



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Maiju Idman

Ilmastuksen hiililähteen vaihdon vaikutukset Nummelan jätevedenpuhdistamolla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

16.11.2020

Tekijä Otsikko	Maiju Idman Ilmastuksen hiililähteen vaihdon vaikutukset Nummelan jätevedenpuhdistamolla
Sivumäärä Aika	42 sivua 16.11.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	ympäristötekniikka
Ohjaajat	vesilaitoksen johtaja Krista Viitasalo lehtori Esa Toukoniitty
<p>Insinööriyön tavoitteena oli laatia selvitys siitä, millaiset vaikutukset ilmastuksen hiililähteen vaihdolla on Nummelan jätevedenpuhdistamolla. Hiililähteenä käytetty metanoli korvattiin glyserolilla, ja tavoitteena oli selvittää, miten glyseroli vaikuttaa käsittelytuloksiin, työturvallisuuteen ja kustannuksiin. Tavoitteenasettelu tehtiin yhdessä Vihdin Veden kanssa.</p> <p>Glyserolia kokeiltiin kesällä 2019 muutaman kuukauden ajan, ja virallisesti se otettiin käyttöön huhtikuussa 2020. Työssä tarkasteltiin sekä kesän 2019 koejaksoa että virallisen käyttöönoton jälkeistä jaksoa elokuuhun 2020 asti.</p> <p>Insinööriyössä hyödynnettiin laajasti kirjallisuutta ja lainsäädäntöä, joita käytettiin taustoitamaan teoretietoa muun muassa aktiivilieteprosessista ja työturvallisuudesta. Käsittelytulosten analysointiin käytettiin Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry:n (LUVY) laatimia raportteja. Lisäksi hyödynnettiin Vihdin Vedeltä saatuja tietoja esimerkiksi kustannuksista sekä puhdistamolla tehtyä tarkkailua ja selvitystyötä.</p> <p>Insinööriyön tuloksena havaittiin, että työturvallisuus jätevedenpuhdistamolla paranee, kun metanoli korvataan glyserolilla. Lisäksi saatiin kahdelta eri tarkastelujaksolta luotettavaa näyttöä, että glyseroli toimii ilmastuksen hiililähteenä. Glyserolin ja metanolin kustannuksista laadittiin vertailutietoa, josta ilmeni glyserolin tuottavan metanolia enemmän kuluja. Kustannusten nousua tärkeämpänä pidettiin kuitenkin sitä, että työturvallisuusriskit metanoliin liittyen poistuivat ja käsittelytulokset säilyivät hyvinä.</p> <p>Työ on pätevä osoitus siitä, miten työturvallisuutta voidaan parantaa jätevedenpuhdistamolla huomattavasti kemikaalia vaihtamalla ilman, että käsittelytulos heikkenee. Työ on virallinen dokumentti Vihdin Vedelle glyseroliin siirtymisestä ja sitä on hyödynnetty esimerkiksi Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen (ELY-keskuksen) vaatimaan selvitykseen. Lisäksi työ on tärkeä julkisena dokumenttina ja tietolähteenä glyserolin toimivuudesta ilmastuksen hiililähteenä.</p>	
Avainsanat	glyseroli, metanoli, jätevedenpuhdistus, ilmastus

Author Title Number of Pages Date	Maiju Idman The Effects of Switching Aeration Carbon Source in Nummela Wastewater Treatment Plant 42 pages 16 November 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental Engineering
Professional Major	Environmental Engineering
Instructors	Krista Viitasalo, Manager of Vihdin Vesi Esa Toukoniitty, Senior Lecturer
<p>The aim of the thesis was to prepare a report on the effects of changing the carbon source of aeration at the Nummela wastewater treatment plant. Methanol as a carbon source was replaced by glycerol, and the goal was to determine how glycerol affects treatment results, occupational safety and costs. The objective of the thesis was set together with Vihdin Vesi.</p> <p>Glycerol was piloted in the summer 2019 for a few months and was officially introduced in April 2020. The trial period of summer 2019 and the period after official introduction until August 2020 were examined in this thesis.</p> <p>The thesis made extensive use of the literature and legislation to support theoretical knowledge on, for example, the activated sludge process and occupational safety. Reports prepared by the Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry (LUVY) were used to analyse the treatment results. In addition, information on costs received from Vihdin Vesi and monitoring and investigation work at the treatment plant were utilised.</p> <p>As a result of the thesis, it was found that occupational safety at the wastewater treatment plant improves when methanol is replaced by glycerol. Reliable evidence was also obtained from two different analysis periods that glycerol works as a carbon source for aeration. Comparative data was made of the costs of glycerol and methanol, which proved that glycerol is more expensive than methanol. However, the elimination of the occupational safety risks related to methanol and that the treatment results remained good were considered more important than the increase in costs.</p> <p>This thesis is a valid demonstration of how occupational safety can be improved in a wastewater treatment plant significantly by changing the chemical without compromising the treatment result. The thesis is an official document on the transition to glycerol for Vihdin Vesi and has been utilised, for example, in the report required by the Centre for Economic Development, Transport and the Environment (ELY Centre). In addition, the thesis is important as a public document and as a source of information on the functionality of glycerol as a carbon source for aeration.</p>	
Keywords	glycerol, methanol, wastewater treatment, aeration

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Yhdyskuntajätevesi Suomessa	2
2.1	Lainsäädäntö	2
2.2	Jäteveden sisältämät epäpuhtaudet	4
3	Aktiivilieteprosessi	5
3.1	Nitrifikaatio	6
3.2	Denitrifikaatio	8
3.3	D/N-prosessi	8
3.4	Hiililähteet: metanoli ja glyseroli	9
4	Nummelan jätevedenpuhdistamo	12
4.1	Yleiskatsaus	12
4.2	Prosessikuvaus	12
4.3	Puhdistustulosten lupamääräykset	15
4.4	Puhdistustulokset	16
5	Työturvallisuus	19
5.1	Yleiskatsaus	19
5.2	Kemialliset tekijät ja vaarallisten aineiden käyttö	20
6	Käytetyt aineistot ja menetelmät	22
7	Glyserolin käyttöönotto ja vaikutukset	24
7.1	Käsittelytulos	25
7.2	Työturvallisuus	32
7.3	Kustannukset	33
7.4	Käyttäjäkokemus	36
8	Yhteenveto	37

Lyhenteet

AVL	Asukasvastineluku. Jäteveden keskimääräinen eloperäisen aineen vuorokausikuormitus, jonka yksi asukas tuottaa.
BOD _{7ATU}	<i>Biological Oxygen Demand</i> . Seitsemän vuorokauden aikana tapahtunut biologinen hapenkulutus, jossa allyyliitiourealiuosta (ATU) käytetään estämään ammoniumtypen nitrifikaatiosta aiheuttama hapenkulutus.
CH ₃ OH	Metanoli.
COD _{Cr}	<i>Chemical Oxygen Demand</i> . Kemiallinen hapenkulutus, jossa hapettimena käytetään kaliumdikromaattia (Cr).
D/N-prosessi	Jäteveden typen poiston prosessi, jossa tapahtuu ensin denitrifikaatio ja sen jälkeen nitrifikaatio.
N/D-prosessi	Jäteveden typen poiston prosessi, jossa nitrifikaatio tapahtuu ennen denitrifikaatiota.
NH ₄ ⁺	Ammoniumtyppi.
NO ₂ ⁻	Nitriitti.
NO ₃ ⁻	Nitraatti.

1 Johdanto

Jätevedenkäsittely on Suomessa huippuluokkaa, ja käsittelytulokset ovat vuosien saatossa vain parantuneet, vaikka jätevesien sisältämä orgaanisen aineksen ja ravinteiden määrä pääsääntöisesti vain lisääntyy. Jätevedenpuhdistamoja ohjaavat hyviin käsittelytuloksiin yhdyskuntajätevesiasetus sekä ympäristönsuojelulaki. Jätevedenpuhdistamot tarvitsevat toimintaansa varten tyypillisesti ympäristöluvan, jossa asetetaan tapauskohtaisesti muun muassa tietyt raja-arvot käsitellyn jäteveden sisältämien aineiden pitoisuuksille. [1.] Hyviin tuloksiin päästään toimivilla prosesseilla, joissa hyödynnetään niin fysikaalisia, biologisia kuin kemiallisiakin yksikköprosesseja. Käsittelymenetelmiä myös kehitetään ja uusia kemikaaleja sovelletaan käsittelytuloksen parantamiseksi.

Hyvän käsittelytuloksen lisäksi jätevedenpuhdistamolla painaa vaakakupissa työturvallisuus. Hyvät käsittelytulokset on saavutettava työturvallisuus huomioiden. Työturvallisuuslaki sekä monet lakia tarkentavat asetukset takaavat työntekijälle työolosuhteet, jotka eivät ole työntekijälle vaaraksi tai uhkaa työntekijän turvallisuutta tai terveyttä. Työssä on huomioitava esimerkiksi fysikaaliset, biologiset ja kemialliset tekijät.

Tämän insinööriyön tarkoituksena on analysoida ja dokumentoida vaikutukset, jotka ilmenevät, kun Nummelan jätevedenpuhdistamolla ilmastuksen hiililähteenä käytetty metanoli korvattiin glyserolilla. Vaikutuksia selvitettiin käsittelytulosten, työturvallisuuden ja kustannusten näkökulmasta. Tavoitteena on, että tämä työ voisi toimia esimerkkinä muille metanolia ilmastuksen hiililähteenä käyttäville jätevedenpuhdistamoille, että glyseroli on toimiva ja työturvallisuutta parantava korvaaja metanolille.

Insinööriyön toimeksiantajana on Vihdin Vesi, joka on Vihdin kunnan kirjanpidollisesti eriytetty taseyksikkö. Vihdin Veden toimintaan kuuluvat terveydelliset laatuvaatimukset täyttävän talousveden toimittaminen asukkaille ja yrityksille sekä jätevesien johtaminen ja puhdistaminen viranomaisten ja ympäristön vaatimalla tavalla. Rahoitus toimintaan ja investointeihin saadaan asukkaiden vesi- ja viemärimaksuista. Jätevedenpuhdistamoita on kunnassa kaksi: Nummelan jätevedenpuhdistamo ja Vihdin Kirkonkylän jätevedenpuhdistamo. [2.]

2 Yhdyskuntajätevesi Suomessa

Yhdyskuntajätevesi tarkoittaa asuntojen ja laitosten muodostamaa talousjätevettä tai talous- ja teollisuusjätevesien tai hulevesien seosta [3]. Vuodessa muodostunut jäteveden kokonaismäärä on Suomessa noin 500 miljoonaa kuutiometriä. Tämä tarkoittaa, että yhtä taajama-asukasta kohti muodostuu vuorokaudessa noin 300 litraa jätevettä, josta noin 90 litraa on vuotovesiä. [1.]

Yhdyskuntajätevesi sisältää monia ympäristölle haitallisia aineita. Näitä ovat esimerkiksi mikrobit, orgaaninen aines ja epäorgaaninen aines kuten ravinteet, metallit ja hapot. Lisäksi jätevedessä voi olla muita haitallisia ominaisuuksia kuten korkea lämpötila tai epämiellyttävä haju. [4, s. 27.] Vesistöön joutuessaan ravinteet, kuten typpi ja fosfori, aiheuttavat rehevöitymistä. Rehevöityminen yhdessä jäteveden orgaanisen aineksen kanssa kuluttaa vesistöissä puolestaan happea ja altistaa vesistön happikadolle. Jäteveden sisältämät mikrobit voivat aiheuttaa vesistöissä hygieenistä likaantumista. Tämä tarkoittaa, että jätevedessä olevat bakteerit, virukset ja alkueläimet voivat aiheuttaa tauteja, mikä muodostaa hygieenisen terveysriskin. [5.] Lainsäädännön avulla voidaan varmistaa, etteivät jätevedet aiheuta ihmisille ja ympäristölle haittaa tai vaaraa.

2.1 Lainsäädäntö

Jätevesien käsittelyä ohjaa Suomessa valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä (888/2006), joka pohjautuu Euroopan yhteisöjen neuvoston vuonna 1991 antamaan yhdyskuntajätevesien käsittelyn direktiiviin (91/271/ETY). Direktiivi tähtää ympäristön suojelemiseen yhdyskuntien jätevesien aiheuttamilta haitoilta. Valtioneuvoston asetuksessa direktiivin veloitteet on pantu täytäntöön. Asetuksessa veloitetaan, että taajamissa on järjestettävä jätevesien viemärointi tai muu vastaava keräysjärjestelmä, yhdyskuntajätevedet on käsiteltävä biologisesti tai muulla vastaavalla tavalla ja jäteveden sisältämää fosforia on poistettava aina tehostetusti. Typenpoiston tarve tulee ilmi ympäristöluvassa, mutta typpeä on kuitenkin poistettava, mikäli sillä on vesistön tilaa parantava vaikutus. Lisäksi asetuksessa on puhdistamoille määrätty puhdistustehon ja tarkkailun vähimmäisvaatimukset, jotka määräytyvät puhdistamon koon mukaan. Puhdistamon koko määritellään puolestaan asukasvastineluvulla (AVL), joka tarkoittaa yhden asukkaan tuottaman jäteveden keskimääräistä eloperäisen aineen vuorokausikuormitusta. Mitä suurempi

puhdistamo on kyseessä, sitä tiukemmat vähimmäisvaatimukset asetuksessa on määrätty. [6, s. 9.] Asetuksessa määrätty puhdistustehon vähimmäisvaatimukset on esitetty alla olevassa taulukossa.

Taulukko 1. Yhdyskuntajätevesiasetuksen (888/2006) vähimmäisvaatimukset puhdistustulokselle [3].

	Pitoisuus	Poistoteho vähintään, %
BOD	30 mg/l O ₂	70
COD	125 mg/l O ₂	75
Kiintoaine	35 mg/l	90
Kokonaisfosfori	3 mg/l (alle 2 000 AVL)	80
	2 mg/l (2 000–100 000 AVL)	80
	1 mg/l (yli 100 000 AVL)	80
Kokonaistyppe	15 mg/l (10 000–100 000 AVL)	70
	10 mg/l (yli 100 000 AVL)	70

Ympäristönsuojelulaissa (527/2014) säädetään, että yli 100 AVL:n puhdistamoilta vaaditaan ympäristölupa. Puhdistamon ympäristöluvassa määrätään muun muassa jäteveden käsittelytuloksia koskevat vaatimukset. Käsittelytulosten vaatimukset koskevat yleensä orgaanisen aineksen, kokonaisfosforin ja kokonaistypen poistoa. [1.] Ympäristöluissa määrätty käsittelyvaatimukset on oltava vähintään saman tasoiset kuin yhdyskuntajätevesiasetuksessa säädetyt vähimmäisvaatimukset [6, s. 9]. Ympäristöluvassa asetetut käsitellyn jäteveden pitoisuuksien ja käsittelytehon raja-arvot tulee toteutua vuosi-, puolivuosi- tai neljännesvuosikeskiarvoina ohjauksutukset, ylivuodot ja poikkeustilanteet mukaan luettuina [7, s. 22]. Ympäristöluvassa voidaan lisäksi vaatia esimerkiksi käsitellyn jäteveden hygienisointia. Käsittelytulosten ja muiden lupaehtojen täyttymistä valvoo alueellisen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen puhdistamolle nimeämä valvoja. Valvonta suoritetaan luvan haltijan järjestämällä suunnitelmallisella velvoitetarkkailulla sekä säännöllisillä valvontakäynneillä. [6, s. 9–10.]

2.2 Jäteveden sisältämät epäpuhtaudet

Jäteveden sisältämä orgaaninen aines on merkittävä epäpuhtaustekijä jätevesissä, sillä vesistöihin päästessään se aiheuttaa happikatoa, minkä vuoksi se tuotti aikoinaan ensimmäisenä tarpeen jätevesien käsittelylle [8, s. 265]. Käsittelemättömässä jätevedessä orgaanista ainesta on keskimäärin 256 mg/l ja yhden taajama-asukkaan muodostama orgaanisen aineksen kuorma jätevedessä on vuorokaudessa noin 76,3 g [6, s. 17]. Jäteveden sisältämän orgaanisen aineksen määrää voidaan mitata biologisen hapenkulutuksen (BOD) ja kemiallisen hapenkulutuksen (COD) avulla.

Biologinen hapenkulutus on happimäärä, jonka veden sisältämä orgaaninen aines kuluttaa aerobisissa eli hapellisissa olosuhteissa, kun se hajoaa biologisesti tietyssä ajassa ja lämpötilassa. Koska BOD-arvo on ajasta ja lämpötilasta riippuvainen, näille parametreille on määritetty tietyt standardiarvot. Lämpötila on tyypillisesti +20 °C ja aika viisi (BOD₅) tai seitsemän (BOD₇) vuorokautta. Suomessa on vakiintunut käyttöön BOD₇. [8, s. 238.] BOD-analyysissä viiden päivän jälkeen alkaa tapahtua nitrifikaatiota, kun veden sisältämät typpiyhdisteet alkavat hapettua ja näin kuluttaa happea [8, s. 240]. Koska nitrifikaatio ei ole BOD-analyysissä toivottava reaktio, se voidaan estää käyttämällä allyyliitiourealiua (ATU), joka estää nitrifikaation [9, s. 16]. BOD_{7,ATU}-arvo kuvaa näin ollen pelkästään orgaanisen aineen aiheuttaman hapenkulutuksen.

Kemiallinen hapenkulutus kertoo happimäärän, jonka vedessä oleva liuennut ja suspendoitunut orgaaninen aines kuluttaa hapettimen kanssa tietyissä reaktio-olosuhteissa. Hapettimena käytetään joko permanganaattia (COD_{Mn}) tai dikromaattia (COD_{Cr}). COD_{Mn}-menetelmää sovelletaan puhtaille vesille, jotka sisältävät vähän orgaanisia aineita. COD_{Cr}-menetelmä soveltuu puolestaan jätevesille. [10, s.1; 11, s. 1.]

Fosfori (P) on toinen merkittävä jätevesien sisältämä epäpuhtaus, joka aiheuttaa vesistöissä rehevöitymistä. Fosfori esiintyy luonnossa harvoin puhtaana alkuaineena. [8, s. 219.] Jätevedessä fosfori esiintyy orgaanisena tai epäorgaanisena fosforina. Jäteveden fosforista 10–15 % on orgaanista fosforia, ja sitä päätyy jätevesiin ihmisen ulosteen ja ruoantähteiden mukana. Epäorgaanisena fosfori esiintyy puolestaan erilaisina fosfaatteina, jotka ovat tyypillisesti peräisin pesuaineista. [12, s. 6.] Koska fosfori ei esiinny jätevedessä alkuaineena, vaan se on sitoutuneena monenlaisissa yhdisteissä, fosfori

määritetään jätevedestä kokonaisfosforina. Kokonaisfosforin yksikkönä käytetään mg P/l. [8, s. 220.] Käsittelemättömän jäteveden kokonaisfosforipitoisuus on keskimäärin 8,0 mg/l ja yhden taajama-asukkaan muodostama kokonaisfosforikuormitus jätevedessä on vuorokaudessa 2,4 g [6, s. 17].

Fosforin ohella myös jäteveden sisältämä typpi (N) vaikuttaa vesistöjen rehevöitymiseen. Jätevedessä 50 % typestä on orgaanisessa muodossa, ja se on sitoutuneena esimerkiksi proteiineihin ja ureaan. [13, s. 545.] Proteiineja päätyy jätevetteen ihmisen ulosteen ja ruoantähteiden mukana ja ureaa virtsan mukana [12, s. 6]. Toiset 50 % typestä esiintyy ammoniumioneina [13, s. 545]. Käsittelemättömässä jätevedessä kokonaistyyppipitoisuus on keskimäärin 52,1 mg/l ja yhden taajama-asukkaan kokonaistyyppikuormitus on vuorokaudessa 15,5 g [6, s. 17].

3 Aktiivilieteprosessi

Jätevedenpuhdistuksen puhdistusmenetelmät voidaan jaotella fysikaalisiin (mekaanisiin), kemiallisiin ja biologisiin yksikköprosesseihin. Jäteveden biologisen puhdistuksen tavoitteena voi olla yksi tai useampi seuraavista: orgaanisen aineksen poisto, typen poisto nitrifikaation ja denitrifikaation avulla, fosforin poisto tai lietteen stabilointi [13, s. 181–182]. Suomessa biologisella puhdistuksella tavoitellaan pääasiassa typen ja orgaanisen aineksen poistoa [7, s. 43]. Aktiivilieteprosessi lukeutuu biologisiin yksikköprosesseihin.

Biologinen puhdistus, kuten myös aktiivilieteprosessi, perustuu mikrobiologiaan. Biologinen prosessi vähentää jätevedessä olevien ravinteiden ja orgaanisen aineksen määrää mikrobitoiminnan avulla, sillä mikrobeilla on kyky hajottaa tai sitoa epäpuhtauksia omaa kasvuansa varten [7, s. 43; 14, s. 15]. Näin mikrobit muodostavat jäteveden kolloideista ja liuenneesta orgaanisesta aineksesta solumassaa eli lietettä. Solumassan tiheyden ollessa vettä suurempi solumassa on mahdollista poistaa esimerkiksi laskeuttamalla. [13, s. 169.] Biologisen puhdistusprosessin kannalta tärkein mikrobiryhmä on bakteerit [13, s. 173]. Biologisia puhdistusprosesseja on erilaisia, joten myös mikrobit ja niiden vaatima ravinto sekä aineenvaihduntaan tarvittava happimääräkin eroavat toisistaan. [13, s. 169]

Aktiivilieteprosessi on leijuva-alustainen ja yleensä aerobinen prosessi, jossa puhdistustyöstä vastaavat mikrobit esiintyvät suspendoituneisiin hiukkasiin kiinnittyneinä tai vedessä vapaasti uiden. Nämä mikrobit muodostavat biomassan eli aktiivilietteen. [13, s. 183.] Prosessi tapahtuu tyypillisesti ilmastusaltaassa, jossa altaaseen johdetaan ilmaa eli jätevettä ilmastetaan. Ilmastuksen avulla varmistetaan mikrobien riittävä hapensaanti niiden elintoimintoja varten, taataan mikrobien ja epäpuhtauksien kontakti pitämällä vesi jatkuvassa liikkeessä ja estetään syntyneiden flokkien eli kiintoainehiukkasten ja kolloidien muodostamien partikkeleiden laskeutuminen. [7, s. 70; 13, s. 183, 517.] Mikrobit käyttävät hengitykseensä altaaseen johdettua happea ja ravinnoksi jäteveden orgaanista ainesta muodostaen uutta biomassaa. Aktiivilieteprosessissa voi olla myös hapettomia tai vähähappisia sekoitettuja vyöhykkeitä esimerkiksi denitrifikaatiota varten. [7, s. 43, 47.]

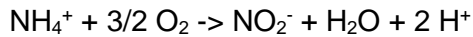
Aktiivilietealtaasta jätevesi johdetaan selkeytysaltaaseen, jossa liete laskeutuu altaan pohjalle. Koska uutta biomassaa muodostuu koko ajan lisää, osa lietteestä johdetaan ylijäämälietteenä lietteen käsittelyyn ja osa johdetaan palautuslietteenä takaisin aktiivilieteprosessiin. [13, s. 183, 517.] Ylijäämälietteiden poiston yhteydessä poistuu orgaanista ainesta ja mahdollisesti biomassaan sitoutunutta typpeä ja fosforia [7, s. 43].

Prosessissa on tarkoituksena, että orgaanisten jäteaineiden hajoamisreaktio olisi mahdollisimman nopea, jotta biomassassa olevat ravinteet eivät ala liueta takaisin jäteveeseen. Reaktio ei saa kuitenkaan olla liian nopea, jotta flokit ehtivät muodostua ilmastusaltaassa ja niistä tulee riittävän laskeutumiskelpoisia. Näin niiden poisto onnistuu selkeytysaltaassa. [13, s. 184.] Mikäli viipymä ilmastusaltaassa on tarpeeksi pitkä, tapahtuu samalla myös ammoniumtyypen hapettumista nitraatiksi eli nitrifikaatio [7, s. 43].

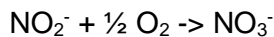
3.1 Nitrifikaatio

Nitrifikaatio on kaksivaiheinen prosessi, joka tapahtuu bakteerien soluhengityksen yhteydessä. [15, s. 15.] Nitrifikaatiossa ammoniumtyyppi (NH_4^+) hapettuu nitriitiksi, jonka jälkeen nitriitti hapettuu nitraatiksi. Jätevedessä oleva typpi saattaa olla sitoutuneena orgaaniseen ainekseen, mutta se hajoaa ammoniumtyypeksi hydrolyysin avulla [7, s. 43]. Nitrifikaatio vaatii aerobiset olosuhteet, ja prosessissa läsnä olevat bakteerit ovat autotrofisia eli ne käyttävät hiilen lähteenä epäorgaanista hiilidioksidia. Ensimmäisessä

vaiheessa ammoniumtyppi hapettuu *Nitrosomonas*-suvun bakteerien vaikutuksesta nitriitiksi (NO_2^-). [16, s. 12.] Ammoniumtyypen hapettuminen nitriitiksi tapahtuu seuraavan kemiallisen kaavan [15, s. 15] mukaan:



Toisessa vaiheessa nitriitti hapettuu *Nitrobacter*-suvun bakteerien vaikutuksesta nitraatiksi (NO_3^-). [16, s. 12.] Koska happea on nitrifikaatiossa läsnä ja nitriitti on pysymätön välituote, nitriitti hapettuu nitraatiksi seuraavan kaavan [15, s. 15] mukaan:



Nitrifikaatio on tyypillisesti koko jäteveden käsittelyprosessin herkin vaihe, ja se vaatii toimiakseen tietynlaiset prosessiolosuhteet [7, s. 44]. Prosessissa on huomioitava esimerkiksi liuenneen hapen pitoisuus, lämpötila ja pH. [16, s. 12] Nitrifikaatiossa yhden ammoniumtyppigramman hapettuessa nitraatiksi kuluu 4,6 grammaa happea [13, s. 212]. Tehokasta nitrifikaatiota varten happipitoisuuden on oltava suurempi kuin 2 mg/l. Suuri happipitoisuus ei ole este nitrifikaatiolle. [16, s. 12]

Nitrifikaatiossa bakteerien kasvunopeus ja sitä myötä nitrifikaationopeus ovat riippuvaisia lämpötilasta. Optimilämpötila, jolloin nitrifikaationopeus on suurimmillaan, on 30–35 °C. Nitrifikaationopeus alkaa laskea merkittävästi, kun lämpötila nousee yli 35 °C, ja termofiiliset olosuhteet (50–60 °C) estävät nitrifikaation kokonaan. Nitrifikaatiobakteerien kasvunopeus hidastuu, kun lämpötila laskee. [16, s. 12–13.] Alhaisissa prosessilämpötiloissa nitrifikaatio voidaan toteuttaa pidentämällä lieteikää eli vähentämällä ylijäämälietteen poistoa, jolloin aktiivilietettä on prosessissa enemmän [13, s. 213].

Nitrifikaatio toimii pH:n ollessa 6–9, mutta optimaalisin pH nitrifikaatiolle on välillä 7,5–8,6. Nitrifikaatio laskee veden pH:ta, sillä veden alkaliteetti kuluu, kun ammoniumtyppi hapettuu. [16, s. 13.] Tämän takia käsittelyprosessiin voidaan lisätä esimerkiksi kalkkia nostamaan veden pH:ta.

3.2 Denitrifikaatio

Denitrifikaatio on reaktio, jossa bakteerit pelkistävät nitraatin typpikaasuksi, joka vapautuu ilmakehään. Nitraatin pelkistyminen typpikaasuksi tapahtuu erilaisten välituotteiden kautta seuraavan kemiallisen kaavan mukaisesti. [16, s. 14.]



Reaktio on anoksinen eli reaktiossa ei ole läsnä liukoista happea [13, s. 213]. Reaktio ei kuitenkaan ole anaerobinen, sillä reaktiossa bakteerit käyttävät soluhengitykseensä nitraattiin ja nitriittiin sitoutunutta happea. Tämän takia se on vain tietynlainen muunnos aerobisesta prosessista. [16, s. 15.] Denitrifikaatio voi kuitenkin toimia, vaikka liennutta happea olisi hieman läsnä (alle 1 mg/l). Mikäli happea on yli 1 mg/l, denitrifikaatio ei toimi. [13, s. 547.]

Denitrifikaatioprosessissa bakteerit ovat heterotrofisia eli ne tarvitsevat energian lähteeksi orgaanista ainesta eli jonkin hiililähteen, joka voi olla sisäinen tai ulkoinen. Sisäisiä hiilen lähteitä voivat olla jätevedessä olevat yhdisteet tai lietteen oma ravintosisältö. Ulkoinen hiilen lähde on prosessiin lisättävä yhdiste, joka voi olla esimerkiksi metanoli tai glyseroli. [16, s. 15.]

Nitrifikaatioon verrattuna denitrifikaatio toimii laajemmalla lämpötilavälillä eli 5–50 °C, mutta denitrifikaatiobakteerit ovat kuitenkin herkkiä lämpötilan vaihteluille [16, s. 16]. Denitrifikaatiossa optimaalinen pH on 7–8. Denitrifikaatioreaktio lisää veden alkaliteettia. Mikäli denitrifikaatiossa käytetään jäteveden sisältämä orgaaninen hiili kokonaan, denitrifikaatiossa saadaan takaisin puolet nitrifikaation aiheuttamasta alkaliteetin kulumisesta. [13, s. 213.]

3.3 D/N-prosessi

Typhen poistamista varten on erilaisia prosessivaihtoehtoja. Prosessissa voidaan hyödyntää esimerkiksi pelkästään nitrifikaatiota tai sekä nitrifikaatiota että denitrifikaatiota. Yleisin prosessi on N/D-prosessi, jossa nitrifikaatio tapahtuu ennen denitrifikaatiota. N/D-

prosessissa jätevedessä on nitrifikaation jälkeen runsaasti nitraatteja, jotka muutetaan denitrifikaatiossa typpikaasuksi. N/D-prosessissa joudutaan tyypillisesti lisäämään denitrifikaatiovaiheessa jätevedeen ulkopuolista hiililähdettä, sillä orgaaninen aines on kulunut jo nitrifikaatiovaiheessa. [13, s. 547.]

Nitrifikaatio voi olla prosessissa myös denitrifikaation jälkeen, jolloin puhutaan D/N-prosessista. D/N-prosessissa on monia etuja verrattuna N/D-prosessiin. Kun prosessissa tapahtuu ensin denitrifikaatio, jäteveden koko orgaaninen aines voidaan hyödyntää denitrifikaatiossa, jolloin jäteveden typpipitoisuus vähenee 60–70 %. Ulkopuolista hiililähdettä ei välttämättä tarvita, mutta mikäli sellaista käytetään, saavutetaan vieläkin suurempi typenpoisto. [13, s. 548.] Nitraatti saadaan denitrifikaatioprosessiin lietekierron avulla [7, s. 47].

Koska denitrifikaatiovaiheessa kuluu jo huomattava määrä jäteveden orgaanista ainesta, vähenee kuormitus ilmastusaltaassa, jossa nitrifikaatio tapahtuu. Tällöin ilmastusaltaan tilavuuden ei tarvitse olla kovin suuri ja ilmastukseen vaadittavan energian määrä vähenee. D/N-prosessi vähentää myös tarvittavan kalkin määrää, sillä denitrifikaatiossa tapahtuva alkaliteetin nousu kompensoi osan nitrifikaatiossa tapahtuvasta alkaliteetin lasusta. [13, s. 548.]

3.4 Hiililähteet: metanoli ja glyseroli

Metanoli

Metanoli (CH_3OH) on väritön, helposti syttyvä ja erittäin myrkyllinen alkoholi, joka esiintyy normaalilämpötilassa ja -paineessa nesteinä ja liukenee täysin veteen. Lisäksi metanoli on hygroskooppinen aine eli se sitoo kosteutta. Metanoli on yksinkertaisin alkoholi, sillä siinä esiintyy vain yksi hiili. [17, s. 8–9.] Metanolin sulamispiste on $-98\text{ }^\circ\text{C}$ ja kiehumispiste $65\text{ }^\circ\text{C}$. Lämpö, kipinät, staattinen sähkö ja liekit sytyttävät metanolin herkästi palamaan. Palo- ja räjähdysvaara muodostuu metanolin reagoidessa voimakkaiden hapettimien kanssa. Metanolin CLP-asetuksen mukaiset varoitusmerkinnät näkyvät kuvassa 1. [18.]



Kuva 1. Metanolin varoitusmerkinnät [18].

Metanolia valmistetaan pääasiassa maakaasusta [17, s. 13]. Metanolia käytetään muun muassa polttoaineena, raaka-aineena liuottimiin ja jäähdytysaineisiin sekä maalien ja muovien valmistukseen. Yhä enemmän metanolia hyödynnetään myös polttokennoteknologian sovelluksissa, turbiinipolttoaineena sähköntuotannossa sekä hiililähteenä jäteveden käsittelyn denitrifikaatiossa. [17, s. 10.] Metanolin tuotanto kasvaa suurella nopeudella, ja maailmanlaajuisesti metanolin tuotantokapasiteetti on noin 110 miljoonaa tonnia [17, s. 11].

Metanolille altistuminen voi tapahtua hengitysteitse, nieltynä tai ihokosketuksen kautta, ja metanoli imeytyy helposti ja nopeasti verenkierron välityksellä koko kehoon. Tappava annos metanolia nieltynä on noin 10–30 ml. Kehossa metanoli hajoaa aineenvaihdunnan vaikutuksesta ensiksi formaldehydiksi. Formaldehydi muuntuu formiaatiksi, joka on korkeissa pitoisuuksissa myrkyllinen. Lopuksi formiaatti hajoaa hiilidioksidiksi ja vedeksi. [17, s. 54–55.]

Altistustavasta riippumatta metanolin myrkyllisyys on sama, ja metanolille altistumisen oireet eivät välttämättä näy heti. Metanoli aiheuttaa ärsytystä silmissä, iholla ja hengitysteissä sekä ihon kuivumista ja halkeilua. Muita metanolimyrkytyksen oireita ovat päänsärky, huimaus, oksentelu, kova vatsakipu, selkäkipu, hengitysvaikeudet, raajojen kylmeneminen, uneliaisuus ja koordinaation puute. Voimakas altistuminen voi aiheuttaa näköhermon sekä keskus- ja ääreishermoston pysyviä vaurioita. Metanolialtistuksen vaikutukset näköön voivat olla valoherkkyys, sumuinen ja hämärtynyt näkökenttä tai täysi sokeus. Suuri altistus johtaa tyypillisesti sokeuteen, sisäelinten toiminnan pettämiseen ja kuolemaan. [17, s. 54–55.]

Metanolia ei olla määritelty ympäristölle vaaralliseksi kemikaaliksi eikä metanoli kerry ravintoverkkoon. Maahan joutuessaan metanoli ei sitoudu maa-ainekseen, vaan se haihtuu tai kulkeutuu mahdollisesti pohjaveteen. Metanoli kuitenkin hajoaa biologisesti aerobisissa sekä anaerobisissa olosuhteissa. Vesistöissä metanoli haihtuu nopeasti pintavedestä, ja syvemmällä veden pinnan alla metanoli hajoaa vesiympäristön mukaan tunneissa tai päivissä. Vesieläöille metanolin myrkyllisyys on hyvin lievää. [18.]

Glyseroli

Glyseroli (1,2,3-propaanitrioli) on väritön, hajuton ja täysin myrkytön neste. Lisäksi glyserolilla on korkea viskositeetti ja hygroskooppisuus. Glyseroli on maultaan makeaa, ja se liukenee täysin veteen. Glyserolin sulamispiste on 18 °C ja kiehumispiste 290 °C. [19, s. 1–2.] Glyserolilla ei ole CLP-asetuksen mukaisia varoitusmerkintöjä.

Glyserolia saadaan esimerkiksi rasvahappojen ja saippuan valmistuksen sivutuotteena sekä biodieselin valmistuksen sivutuotteena [19, s. 10]. Koska glyseroli on täysin vaaraton, erittäin stabiili normaaleissa säilytysolosuhteissa, yhteensopiva monien kemiallisten yhdisteiden kanssa eikä sillä ole haitallisia ympäristövaikutuksia, sitä pidetään erittäin monikäyttöisenä ja arvokkaana kemikaalina ja sitä hyödynnetään monissa tuhansissa kaupallisissa tuotteissa. Glyserolia käytetään tuotteen ainesosana tai prosessointiaineenä muun muassa elintarvikkeissa, kosmetiikassa ja lääketeollisuudessa. [19, s. 2.] Lisäksi sitä hyödynnetään esimerkiksi lakkojen, musteiden ja synteettisten muovien valmistuksessa sekä monenlaisessa teollisessa käytössä. Vuonna 2010 glyserolia käytettiin vuodessa noin 160 000 tonnia. [19, s. 6.]

Glyseroli ei ole vaarallinen terveydelle tai ympäristölle. Aerosolien hengittäminen voi aiheuttaa ärsytystä ylähengitysteissä ja glyserolin nieleminen suurina määrinä aiheuttaa oksentelua, mahakipua, päänsärkyä, ripulia ja väsymystä. Glyseroli hajoaa biologisesti helposti eikä se kerry ravintoverkkoon. [20, s. 5.]

4 Nummelan jätevedenpuhdistamo

4.1 Yleiskatsaus

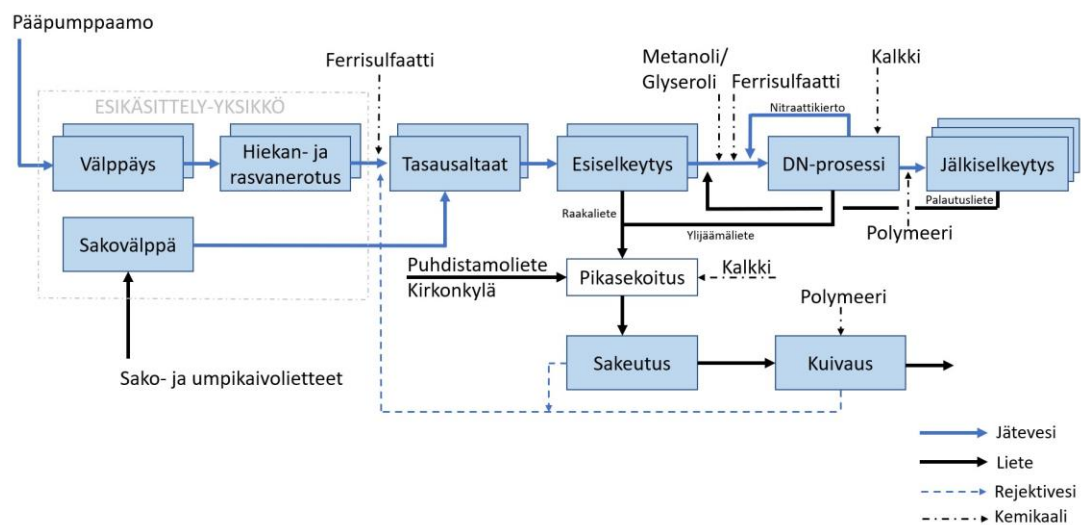
Nummelan jätevedenpuhdistamo on ollut toiminnassa vuodesta 1976 lähtien. Puhdistamolla käsiteltävä jätevesi koostuu noin 17 500 asukkaan jätevesistä sekä kunnan viemäröintialueen yritysten jätevesistä. Lisäksi puhdistamo ottaa vastaan Vihdin haja-asutusalueiden sako- ja umpikaivolietteitä sekä pienten puhdistamoiden lietteitä ja käsittelee ne. [21, s. 16–17.] Puhdistamolle kuljetetaan Vihdin Kirkonkylän jätevedenpuhdistamon lietteet kuivatettavaksi. Vuonna 2019 käsitelty jätevesimäärä oli keskimäärin 2740 m³/d ja vastaanotetun lietteen määrä koko vuoden ajalta keskimäärin 25 800 m³. [22, s. 4–5.] Käsitelty jätevesi puretaan Karhujärveen laskevaan Risubackajokeen. Karhujärvi ja Risubackajoki kuuluvat Siuntionjoen vesistöalueeseen. [21, s. 16.]

Jätevedenpuhdistamojen toiminta on luvanvaraista eli toimintaa varten tarvitaan ympäristölupa, mikäli AVL on yli 100. Nummelan jätevedenpuhdistamon AVL oli vuonna 2015 noin 17 900 [21, s. 28]. Puhdistamo toimii Länsi-Suomen ympäristölupaviraston 21.9.2007 antamalla ympäristölupapäätöksellä (dnro: LSY-2006-Y-350), joka on saanut lainvoimaisen korkeimman hallinto-oikeuden päätöksen 11.5.2010 (dnro: 2218/1/09) [22, s. 4]. Etelä-Suomen aluehallintovirasto antoi päätöksen ympäristöluvan muuttamisesta 17.12.2019 (nro 509/2019) ja päätöksestä tuli lainvoimainen tammikuussa 2020.

4.2 Prosessikuvaus

Nummelan jätevedenpuhdistamo on biologis-kemiallinen rinnakkaissaostuslaitos. Merkittäviä saneeraustöitä on tehty vuonna 1992, ja nykyisellä prosessimuodolla puhdistamo on toiminut vuosien 2000–2001 saneeraustöiden jälkeen. Viimeisimmässä saneerauksessa typenpoistoa lisättiin muuttamalla biologinen käsittelyvaihe D/N-prosessiksi (denitrifikaatio-nitrifikaatio). Typenpoistoa tehostettiin edelleen vuonna 2010, jolloin metanoliannostelu otettiin käyttöön ilmastuksen denitrifikaatiovaiheen hiililähteeksi. [21, s. 17.]

Jätevedenkäsittelyn yksikköprosessit puhdistamalla ovat välppäys, hiekanerotus, tasausallas, esiselkeytys, aktiivilietekäsittely ja jälkiselkeytys [23, s. 11]. Prosessikaavio on esitetty kokonaisuudessaan kuvassa 2. Jätevesi tulee pumppaamoilta vuosina 2016–2017 rakennettuun uuteen esikäsitteily-yksikköön, jossa tapahtuu jäteveden välppäys ja hiekanerotus. Välpe erotellaan ruuviseulavälppällä, jonka jälkeen on hiekanerotus. Eroteltu välpe kulkeutuu välpepesurin kautta sekajätteeseen. Hiekka päätyy hiekkapesurin kautta uudelleenkäytettäväksi. Yksikössä vastaanotetaan myös sakokaivolietteet ja erotellaan niiden sisältämä välpe ruuviseulavälppällä. [23, s. 11, 21.]



Kuva 2. Nummelan jätevedenpuhdistamon prosessikaavio.

Esikäsitteily-yksiköstä jätevesi johdetaan ulkona sijaitsevaan katettuun tasausaltaaseen, jota ennen jätevedeen annostellaan saostuskemikaalina ferrisulfaattia (PIX 105) 85 % saostuskemikaalin päivittäisestä kokonaismäärästä. Ferrisulfaatti saostaa jäteveden sisältämää fosforia. [24.] Tasausaltaasta jätevesi voidaan pumpata ja johtaa tasaisesti kaksilinjaiseen esiselkeytykseen. Esiselkeytysaltaiden pohjalle laskeutunut raakaliete pumpataan uppopumpuilla kalkin pikasekoituksen kautta sakeuttamoon ja pintaliete kerätään ryyppyruuhella ja pumpataan takaisin esikäsitteily-yksikköön. [25, s. 154.]

Esiselkeytysaltaista jätevesi johdetaan yhtä kanavaa pitkin aktiivilietevaltaan alkupäähän. Aktiivilieteprosessi on yksilinjainen ja se koostuu kolmesta peräkkäisestä altaasta, jotka

on jaettu kuuteen lohkokon. [23, s.11.] Ensimmäinen lohko on aina anoksisessa denitrifikaatiokäytössä. Lohkoja 2 ja 3 ohjataan automaattisella Aeromatic-ilmastuksenohjauksella ammoniumtyppipitoisuuden mukaan. Ammoniumtyppipitoisuuden noustessa lohkokossa 4 arvoon 8 mg/l lohko 3 otetaan ilmastuskäyttöön. Jos ammoniumtyppipitoisuus nousee lohkokossa 4 arvoon 10 mg/l, myös lohko 2 otetaan ilmastuskäyttöön. Lohkot 4 ja 5 ovat hapellisia ja ilmastuskäytössä koko ajan ja lohko 6 on hapeton. [24.] Ilmastuksessa typenpoisto toimii ympäri vuoden [21, s. 26]. 15 % ferrisulfaatin päivittäisestä kokonaismäärästä sekä hiililähde (metanoli/glyseroli) syötetään kanavaan, jossa ne sekoituvat palautuslietteen kanssa ennen aktiivilieteprosessin alkupäätä. Kalkkia syötetään neljännen lohkon alkupäähän pH:n säätämiseksi. Ilmastuksessa muodostuva ylijäämäliete johdetaan kalkin pikasekoituksen kautta sakeuttamoon. [24; 25, s. 154.]

Aktiivilietealtaan viimeisestä lohkokosta lähtee kolme putkea, jotka johtavat kolmeen jälkiselkeytsaltaaseen. Viimeisessä lohkokossa putkien alkupäähän lisätään polymeeriä. Polymeeri tehostaa jälkiselkeytyksessä fosforin ja kiintoaineen poistoa sekä kiintoaineen laskeutumisominaisuuksia. [23, s. 24.] Laskeutunut liete ohjataan palautuslietteenä takaisin aktiivilieteprosessiin. Muodostunut pintaliete kerätään ryyppuruuhilla ja johdetaan takaisin esikäsitely-yksikköön. [25, s. 154.]

Jälkiselkeytyksestä vesi johdetaan desinfiointialtaaseen. Toukokuusta 2017 lähtien puhdistettu jätevesi on hygienisoitu peretikkahapolla, mutta sen käyttö lopetettiin marraskuussa 2019, sillä kemikaali aiheutti desinfiointialtaan ja siellä olevien mittalaitteiden liimoittumista ja homeen kertymistä. Tällä hetkellä lähtävä vesi hygienisoidaan UV-käsittelyn ja vetyperoksidin avulla. [26.]

Puhdistamalla lietteenkäsittelyn yksikköprosessit ovat sakeutus ja kuivaus. Jätevedenpuhdistuksessa syntyvä raaka- ja ylijäämäliete sekä Kirkonkylän puhdistamon lietteet päätyvät sakeuttamoon, jossa liete tiivistetään. Sen jälkeen liete kuivataan lingolla. Lietteenkäsittelyssä käytetään kalkkia, jota lisätään ennen sakeutusta, ja polymeeriä, jota lisätään linkouksen yhteydessä. Lietteenkäsittelyssä syntyy rejektivesiä, jotka ohjataan takaisin jäteveden puhdistusprosessiin. Tiivistetyn ja kuivatun lietteen jatkokäsittelystä vastaa Suomen Ekolannoite Oy, joka käsittelee lietteen kemiallisesti puhdistamon liete-kentillä peltolannoitteeksi. [21, s. 41.]

4.3 Puhdistustulosten lupamääräykset

Ympäristöluvassa asetetut puhdistustuloksia koskevat raja-arvot on määritelty BOD_{7,ATU}- ja COD_{Cr}-arvoille sekä fosforille, ammoniumtyypelle ja kokonaistypelle. Raja-arvot on ilmoitettu enimmäispitoisuuksina (mg/l) ja vähimmäistehona (%) ja ne ovat esitetty taulukossa 2. Käsitelty jätevesi, joka johdetaan purkuojaan ja vesistöön, ei saa myöskään sisältää haitallisia määriä terveydelle tai ympäristölle vaarallisia aineita. [27, s. 28.]

Taulukko 2. Ympäristöluvassa määritetyt puhdistustuloksen raja-arvot [27, s. 28].

	Enimmäispitoisuus, mg/l	Vähimmäisteho, %
BOD _{7,ATU} , O ₂	10	95
COD _{Cr}	50	90
Kokonaisfosfori, P	0,3	95
Ammoniumtyyppi	4	95
Kokonaistyyppi, N	-	70

Asetetut raja-arvot on saavutettava neljännesvuosikeskiarvona paitsi kokonaistypen osalta vuosikeskiarvona. Puhdistustuloksessa lasketaan mukaan puhdistamalla ja viemäriverkostossa tapahtuvat ohijuoksutukset ja ylivuodot ja jäteveden käsittelyn häiriö- ja poikkeustilanteet. [27, s. 28.]

Näiden lisäksi puhdistustulosten on täytettävä yhdyskuntajätevesistä annetun valtioneuvoston asetuksen (888/2006) vaatimukset BOD_{7,ATU}- ja COD_{Cr}-arvojen sekä fosforin, kiintoaineen ja typen osalta asetuksen vaatimalla tavalla tarkkailtuna. [27, s. 28.] Nämä vaatimukset on esitetty luvun kaksi taulukossa 1. Asetuksessa kokonaisfosforin ja -typen enimmäispitoisuudet määräytyvät AVL:n mukaan, ja Nummelan jätevedenpuhdistamalla kokonaisfosforin pitoisuus saa AVL:n mukaisesti olla enintään 2 mg/l ja kokonaistypen 15 mg/l.

Etelä-Suomen aluehallintavirasto antoi päätöksen (nro 509/2019) ympäristöluvan muuttamisesta 17.12.2019. Päätös muutti puhdistustuloksia koskevia raja-arvoja. Päätöksessä BOD_{7,ATU}-arvon enimmäispitoisuus muutettiin arvosta 10 mg/l arvoon 5 mg/l,

COD_{Cr}-arvon enimmäispitoisuus arvosta 50 mg/l arvoon 40 mg/l ja kokonaisfosforin enimmäispitoisuus arvosta 0,3 mg/l arvoon 0,2 mg/l. Kokonaistypen vähimmäisteho nostettiin 80 %:iin, kun aiemmin se oli 70%. Raja-arvot on saavutettava neljännesvuosikeskiarvona paitsi kokonaistypen osalta vuosikeskiarvona. Puhdistustuloksessa huomioidaan edelleen poikkeustilanteet, ohijuoksutukset ja ylivuodot, jotka tapahtuvat puhdistamolla tai viemäriverkostossa. [23, s. 66.] Uudet raja-arvot on esitetty taulukossa 3 ja ne ovat tulleet voimaan 16.1.2020 [23, liite].

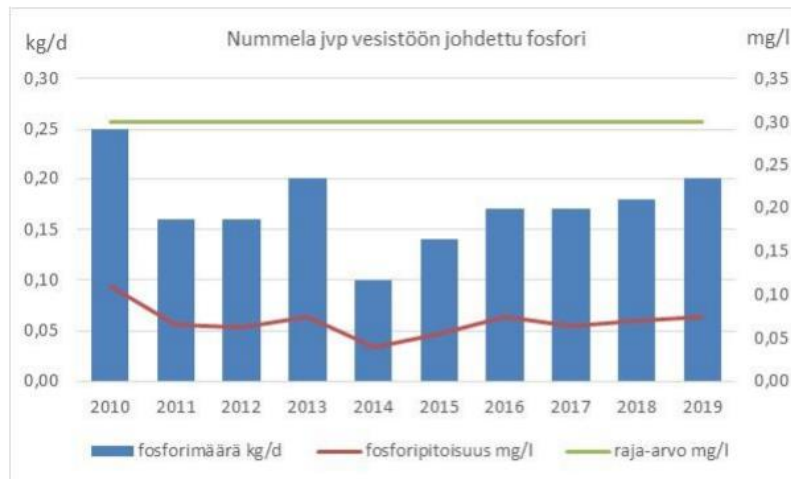
Taulukko 3. Ympäristöluvan muutoksessa määritellyt uudet puhdistustuloksen raja-arvot [23, s. 66].

	Enimmäispitoisuus, mg/l	Vähimmäisteho, %
BOD _{7,ATU} , O ₂	5	95
COD _{Cr}	40	90
Kokonaisfosfori, P	0,2	95
Ammoniumtyppi	4	95
Kokonaistyyppi, N	-	80

Päätöksessä on määrätty myös vesistöön johdettavien jätevesien hygienisoinnista, joka pitää toteutua vuodesta 2020 lähtien ainakin 1.4.–30.11. välisenä aikana. Hygienisoinnin avulla on poistettava fekaaliset koliformiset bakteerit ja enterokokit vähintään 90 %:n tehokkuudella. [23, s. 66.]

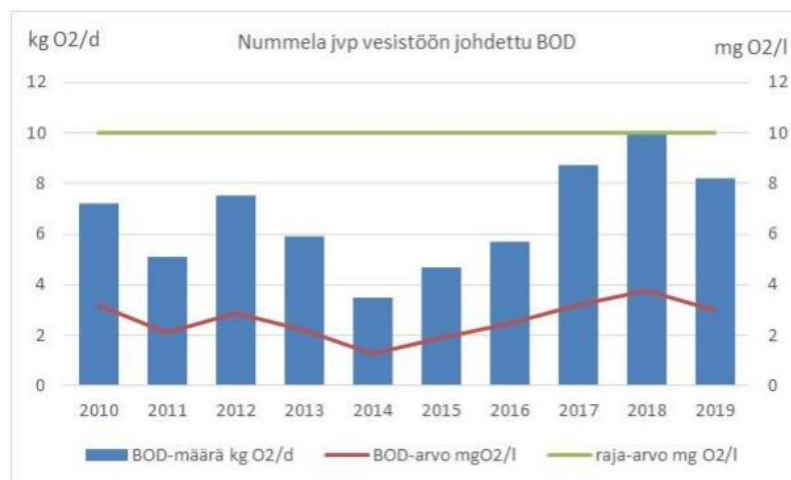
4.4 Puhdistustulokset

Puhdistustulokset ovat Nummelan jätevedenpuhdistamolla olleet viimeisen kymmenen vuoden aikana erinomaisia. Kokonaistypen poistoteho vuosikeskiarvona on ollut vuodesta 2010 eteenpäin yli 70 % [22, s. 12]. Vuosikeskiarvona käsitellyn jäteveden fosforipitoisuus on pysynyt viimeisen kymmenen vuoden aikana reilusti alle asetetun raja-arvon. [22, s. 11.] Kuvassa 3 fosforipitoisuus vuosikeskiarvona näkyy punaisena viivana ja raja-arvo vihreänä.



Kuva 3. Vesistöön johdettu fosfori vuosina 2010–2019 [22, s. 11]. Kokonaisfosforin neljännesvuosikeskiarvon raja-arvo 0,3 mg/l.

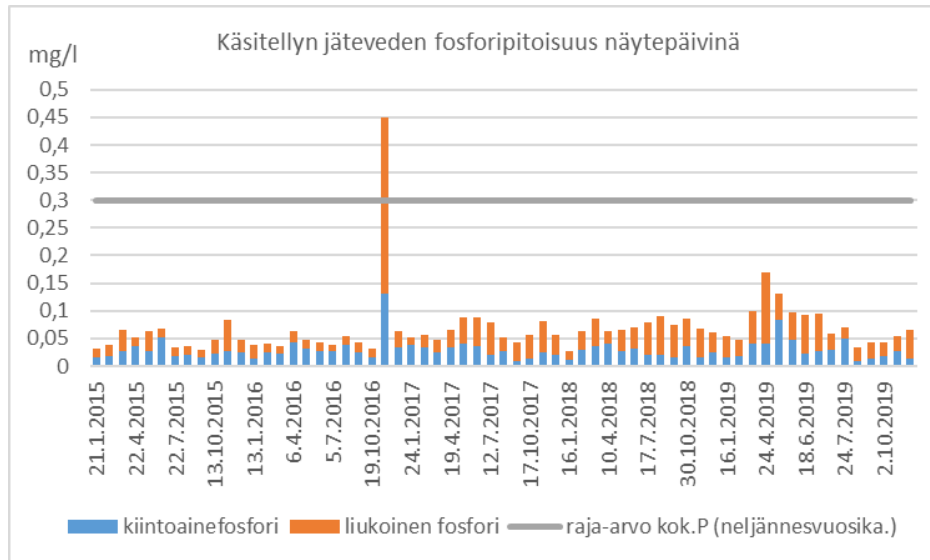
Fosforin lisäksi BOD-arvo vuosikeskiarvona on pysynyt puhdistetussa jätevedessä viimeisen kymmenen vuoden aikana reilusti alle asetetun raja-arvon, mikä näkyy kuvassa 4 [22, s. 11]. Kuvassa punainen viiva kertoo BOD-arvon yksikössä mg O₂/l ja vihreä viiva raja-arvon.



Kuva 4. Vesistöön johdettu BOD vuosina 2010–2019 [22, s. 11].

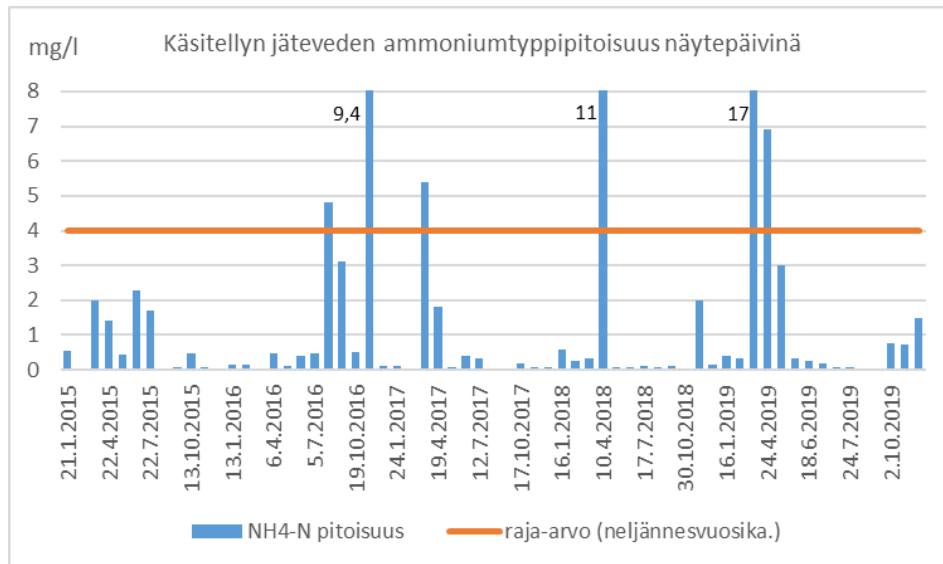
Tarkasteltaessa puhdistustuloksia viimeisen viiden vuoden ajalta näytepäivittäin yksittäisiä neljännesvuosikeskiarvoille asetettujen raja-arvojen ylityksiä on tapahtunut vain fosforin ja ammoniumtypen osalta. Tapahtuneet ylitykset näkyvät kuvissa 5 ja 6. Fosforipitoisuuden ylitys 16.11.2016 johtui polymeerin syöttöpumpun hajoamisesta, minkä

seurauksena kiintoainepitoisuus nousi lähtevässä jätevedessä [28, s. 10]. Tapahtunut ylitys näkyy selkeästi kuvassa 5. Yksikään neljännesvuosikeskiarvo ei ole kuitenkaan ylittänyt raja-arvoa.



Kuva 5. Fosforipitoisuus käsitellyssä jätevedessä näytepäivittäin [22, s. 8].

Ammoniumtyypen osalta neljännesvuosikeskiarvona saavutettavaksi asetettu raja-arvo on ylitetty syksyllä 2016 sekä keväisin vuosina 2017, 2018 ja 2019. Ylitykset ovat johtuneet pääasiassa kylmistä sade- ja sulamisvesistä, jotka päätyvät puhdistamolle hule-/vuotovesinä ja näin heikentävät nitrifikaation toimintaa. [22, s. 9.] Ylitykset näkyvät kuvassa 6. Neljännesvuosikeskiarvona ylityksiä on tapahtunut vuoden 2018 toisella neljännesvuosijaksolla sekä vuoden 2019 ensimmäisellä neljännesvuosijaksolla.



Kuva 6. Ammoniumtyyppipitoisuus käsitellyssä jätevedessä näytepäivittäin [22, s. 9].

Vuosina 2017–2019 käsitellyn jäteveden COD-arvo on ollut keskimäärin 34 mg/l. Näytepäivinä ilmenneitä yksittäisiä neljännesvuosikeskiarvon raja-arvon ylityksiä on ollut kaksi ja molemmissa ylitys raja-arvosta on ollut vain 1 mg/l. [22, liite 2.3.]

5 Työturvallisuus

5.1 Yleiskatsaus

Työturvallisuus kattaa työpaikan fyysiset, psyykkiset ja sosiaaliset työolot, ja kun nämä ovat kunnossa, työturvallisuus työpaikalla toteutuu [29]. Tämä vaatii työpaikan työprosessien, toimintatapojen ja työolosuhteiden tuntemista sekä niihin liittyvien eri vaara- ja haittatekijöiden tunnistamista [30]. Työntekijän terveydestä ja turvallisuudesta huolehtiminen on työnantajan lakisääteinen velvollisuus [31]. Työsuojelu on puolestaan työntekijöiden terveyden ja turvallisuuden edistämiseen sekä työkyvyn ylläpitämiseen tähtävää toimintaa. Lisäksi työsuojelu kattaa työhön liittyvien riskien tunnistamisen, arvioimisen ja ehkäisemisen sekä olemassa olevien ongelmien poistamisen. [32, s. 8.]

Työturvallisuus kattaa sekä toimivan työyhteisön sekä turvallisen työympäristön. Turvallisessa ja terveellisessä työyhteisössä puututaan esimerkiksi työpaikkakiusaamiseen,

häirintään ja erilaisiin väkivalta- ja uhkatilanteisiin, huolehditaan tasa-arvon, monimuotoisuuden ja yhdenvertaisuuden toteutumisesta sekä huomioidaan työntekijöiden psykososiaalinen kuormitus sekä palautuminen. Turvallinen työyhteisö kattaa myös hyvän ilmapiirin ja työyhteisötaidot. [33]. Työympäristö on työntekijälle turvallinen ja terveellinen silloin, kun raaka-aineiden ja muiden syntyvien aineiden haitat ja vaarat tunnetaan ja ne osataan hallita, käytettävät koneet ja työvälineet ovat ehjiä ja työhön sopivia sekä työ- ja tuotantomenetelmät eivät aiheuta työntekijälle vaaraa. Myös työmatkat ja töiden suunnittelu ja mitoitus työntekijälle turvallisella tavalla kuuluvat turvalliseen työympäristöön. [34]. Seuraavaksi tarkastellaan lähemmin tämän työn kannalta oleellisinta osaa työturvallisuudesta eli kemiallisia tekijöitä sekä työssä käytettäviä vaarallisia aineita.

5.2 Kemialliset tekijät ja vaarallisten aineiden käyttö

Työpaikalla käytettävät kemikaalit voivat olla erilaisia ominaisuuksiltaan, käyttömääriltään ja -tavoiltaan, joten myös vaarat vaihtelevat. Kemikaalien aiheuttamat vaarat voivat liittyä niin terveyteen ja ympäristöön kuin palo- ja räjähdysturvallisuuteen. [35.] Työntekijä voi altistua kemikaaleille hengittämällä tai nielemällä ainetta tai ihokosketuksen kautta [32, s. 100].

Työturvallisuuslaissa säädetään, että työntekijän altistuminen sellaisille kemiallisille tekijöille, jotka aiheuttavat vaaraa tai haittaa turvallisuudelle tai terveydelle, on rajoitettava niin vähäiseksi, ettei työntekijän turvallisuudelle, terveydelle tai lisääntymisterveydelle koidu haittaa tai vaaraa näiden kemiallisten tekijöiden takia. Työnantajan on myös korvattava työssä käytetyt kemikaalit vähemmän vaarallisilla tai haitallisilla aineilla. [36.] Työpaikalla tämä vaatii erilaisia konkreettisia toimenpiteitä. Käytössä olevat kemikaalit ja niiden ominaisuudet sekä käyttöön liittyvät vaarat on tunnistettava. Lisäksi on tehtävä selvitystyötä haitallisten kemiallisten altisteiden muodostumisesta työssä tai työprosesseissa sekä vaarojen arviointia ja riskien hallinnan toteuttavia toimenpiteitä. [35.] Työnantajan on huolehdittava, että työntekijä saa riittävät tiedot kemiallisten aineiden turvalliseen käsittelemiseen ja työntekijät perehdytetään ja koulutetaan asianmukaisesti ja riittävästi. Mikäli vaaraa ei voida työssä välttää, työntekijälle on taattava pätevät henkilönsuojaimet sekä niiden turvalliseen käyttöön ja asianmukaiseen säilytykseen ja huoltoon liittyvä opastus. Työntekijällä on velvollisuus noudattaa turvallisuusohjeita sekä käyttää tarvittavia suojaimia. [32, s. 101.]

Valtioneuvoston asetus kemiallisista tekijöistä työssä (715/2001) velvoittaa työnantajaa pitämään ajantasaisista kemikaaliluetteloa käytettävistä kemikaaleista [37]. Kemikaalien turvallinen käyttö sekä turvallinen työskentely voivat toteutua, kun vaarallisista kemikaaleista on kunnollinen luettelo ja niiden ominaisuuksista ja käyttöturvallisuudesta ymmärretään tarpeelliset tiedot. Kemikaaliluettelossa on merkittävä kaikki työpaikalla käytettävät kemikaalit kaupanimen mukaisessa aakkosjärjestyksessä. Luettelossa on mainittava myös käyttöturvallisuustiedotteen saatavuus sekä kemikaalien luokitustiedot eli varoitusmerkit, vaara- ja turvalausekkeet sekä ominaisuudet, jotka aiheuttavat erityistä vaaraa. Kemikaalin käyttötarkoituksen ja -paikan sekä käyttö- ja varastointimäärien arvioinnin voi merkitä kemikaaliluetteloon. Käyttöturvallisuustiedote on kemikaalin markkinoille luovuttajan laatima tiedote, jossa on kirjattu oleelliset tiedot liittyen kemikaalin ominaisuuksiin, vaaroihin, terveysvaikutuksiin sekä turvalliseen varastointiin, käsittelyyn ja hävittämiseen. Työpaikalla on olennaista tietää tiedotteesta kemikaalin vaaralliset ominaisuudet, ensiapuohjeet, altistumisen ehkäiseminen ja vaadittavat henkilönsuojaimet. Lisäksi kemikaalin toimittajan on käytettävä CLP-asetuksen mukaisia vakiomerkinlöjä kertomaan vaarallisiksi luokiteltujen aineiden ja seosten vaaroista. [35.] CLP-asetus on EU:n asetus aineiden ja seosten luokituksesta, merkinnöistä ja pakkaamisesta [38].

Työnantajalla on myös työturvallisuuslain asettama velvollisuus selvittää ja arvioida työn vaarat, suunnitella työympäristö ja työ turvallisiksi sekä hankittava ja annettava vaadittavat henkilönsuojaimet ja apuvälineet [36]. Valtioneuvoston asetuksessa kemiallisista tekijöistä työssä työnantajan edellytetään tunnistavan kemiallisten tekijöiden aiheuttamat vaarat ja arvioitavan työntekijän turvallisuudelle ja terveydelle aiheutuvat riskit, ja näiden pohjalta on tehtävä riskien arviointi [37]. Kemiallisten tekijöiden osalta tämä tarkoittaa sitä, että arvioidaan kemikaalialtistumisen laatua ja määrää. Arviointiin merkitään, mille kemikaalille altistutaan, missä altistuminen tapahtuu ja ketkä sille altistuvat sekä tapahtuuko altistuminen hengityksen vai ihokosketuksen kautta. Lisäksi kirjataan altistumisaika, altistumisen luonne, roiske- ja syttymisvaarat sekä käytössä olevat torjuntatoimet. Riskien arvioinnin apuna on tärkeää hyödyntää työterveyshuollon asiantuntemusta. [35.]

Suomalaisen lainsäädännön rinnalla vaikuttaa myös EU:n jäsenmaita sitova lainsäädäntö. Kemiallisiin tekijöihin työssä vaikuttaa EU:n laatima REACH-asetus. Asetus koskee kemiallista ainetta sellaisenaan, seoksessa tai esineissä, eikä se koske esimerkiksi prosesseissa muodostuvia kemiallisia epäpuhtauksia tai samanaikaisesti tai peräkkäin

käytettävistä aineista aiheutuneita kokonaisaltistuksia [38, 39]. Asetus tähtää ihmisten terveyden ja ympäristön suojeluun kemikaalien aiheuttamilta vaaroilta sekä vaihtoehtoisten menetelmien käytön edistämiseen aineiden tuottamien vaarojen arvioinnissa. Asetuksessa tavoitteiden toteuttamistoimenpiteitä ovat aineiden rekisteröinti, vaaraominaisuuksien arviointi, lupamenettely vaarallisimpia aineita varten sekä rajoitukset. [40, s 17.] Rekisteröinti koskee aineita, joiden valmistus- tai maahantuontimäärä ylittää tonnin vuodessa. Rekisteröinnissä valmistajan tai maahantuojan on hankittava ainetta koskevat tiedot, tehtävä aineen käsittelyyn liittyvien riskien arviointi sekä toimitettava nämä tiedot Euroopan kemikaalivirastolle. [41.] Rekisteröintitietoja hyödynnetään, kun viranomaiset selvittävät aineen riskejä terveydelle tai ympäristölle. EU:lla on mahdollisuus asettaa kieltoja tai rajoituksia aineen valmistukselle, myynnille tai käytölle, mikäli aiheutuvat riskit eivät ole hyväksyttäviä. Suomessa toimivaltaisena viranomaisena REACH-asetukseen liittyen toimii Tukes. [39.]

6 Käytetyt aineistot ja menetelmät

Jätevesien tarkkailun vaatimukset perustuvat asukasvastinelukuun yhdyskuntajätevesiasetuksen 888/2006 mukaisesti. Mitä suurempi puhdistamon AVL:n on, sitä suurempi on myös näytteiden vuosittainen vähimmäismäärä. AVL:n ollessa 10 000–49 999 näytteiden vähimmäismäärä vuodessa on 12. Tämän takia Nummelan jätevedenpuhdistamolla toteutetaan käyttö- ja päästötarkkailua 12 kertaa vuodessa. Tarkkailu tehdään Uudenmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen vuonna 2002 hyväksymän käyttö- ja päästötarkkailuohjelman mukaan ja tarkkailu suoritetaan Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry:n (LUVY) toimesta. [3; 23, s. 40.]

Yhdyskuntajätevesiasetuksen mukaisesti näytteet on otettava lähtevästä ja tarvittaessa tulevasta jätevedestä. Yli 499 AVL:n puhdistamoilla näytteet otetaan 24 tunnin ajalta kokoomanäytteinä, jotka ovat jätevesimäärään verrannolliset. [3.] Nummelan jätevedenpuhdistamolla näytteenotto suoritetaan keräämällä kerran kuukaudessa tulevasta, esiselkeytetystä ja lähtevästä jätevedestä 24 tunnin kokoomanäytteet automaattisilla näytteenottimilla. Näytteet analysoidaan LUVY:n laboratoriossa, jonka FINAS-akkreditointipalvelu on akkreditoinut viralliseksi testauslaboratorioksi. [22, s. 4.]

Tulevan ja lähtevän jäteveden näytteistä on määritettävä pH, alkaliteetti, johtokyky, BOD_{7,ATU}, kokonaistyyppi, kokonaisfosfori, kiintoaine sekä COD_{Cr}. Lisäksi lähtevän jäteveden näytteistä tulee määrittää liukoinen fosfori, liuennut rauta, ammoniumtyppi, nitraattityppi ja kokonaisrauta. [23, s. 40.] Näistä lähtevän jäteveden BOD_{7,ATU}- ja COD_{Cr}-arvoille sekä kokonaisfosforille, ammoniumtyypelle ja kokonaistypelle on ympäristöluvassa määritetty raja-arvot, jotka on esitetty luvussa 4. Lähtevästä vedestä on analysoitu myös lämpökestoiset koliformiset bakteerit, suolistoperäiset enterokokit ja E.colit vuoden 2017 toukokuusta lähtien [23, s. 40].

LUVY laatii jokaisesta näytteenotokerrasta kertaraaportin, josta ilmenee muun muassa käsitelty jätevesimäärä, eri aineiden pitoisuudet, kuormitukset, poistotehot, lietetiedot sekä näytepäiväkirja. Koko vuoden näytteenotoista laaditaan vuosiraportti, jossa käsitellään tulokuormitusta, käsittelytuloksia, vesistökuormitusta ja verrataan näitä edellisiin vuosiin. Lisäksi vuosiraportissa kerrotaan vesiympäristölle vaarallisten ja haitallisten aineiden analyysitulokset sekä lietemäärät.

Glyserolin soveltuvuutta Nummelan jätevedenpuhdistamolla kokeiltiin jo vuoden 2019 kesällä. Kesän 2019 koejakson sekä huhtikuun 2020 virallisen käyttöönoton jälkeisiä käsittelytuloksia hyödynnetään tässä insinööriyössä selvittäessä ja arvioitaessa glyserolin käytön vaikutuksia käsittelytuloksiin ja verratessa eroja käsittelytuloksissa metanolin ja glyserolin käytön ajoilta. Käsittelytulokset ilmenevät LUVY:n virallisista kerta- ja vuosiraporteista. LUVY:n suorittamia näytteenottoja ja näytteiden analysointia voidaan pitää erittäin valideina ja luotettavina, minkä takia näytteitä ei otettu ja analysoitu itse. Lisäksi itse suoritettavat näytteenotot olisi pitänyt aloittaa jo ennen huhtikuuta 2020, jotta tuloksia olisi voitu luotettavasti verrata metanolin ja glyserolin ajoilta.

Lisäksi työssä hyödynnettiin puhdistamolla tehtyä tarkkailua ja selvitystyötä sekä kirjallisuutta ja lainsäädäntöä muun muassa työturvallisuuteen ja prosessiin liittyen. Työtä varten haastateltiin myös Nummelan jätevedenpuhdistamon puhdistamomestaria, jolla on laaja kokemus ja käsitys jäteveden puhdistuksesta sekä Nummelan jätevedenpuhdistamon prosessin toiminnasta. Kustannuksiin liittyen hyödynnettiin Vihdin Vedeltä saatua tietoa metanolin ja glyserolin kulutuksesta ja hinnoista.

7 Glyserolin käyttöönotto ja vaikutukset

Ennen varsinaista käyttöönottoa toteutettiin glyserolin koejakso ajalla 11.6.–31.7.2019. Tällöin glyserolin soveltuvuutta prosessiin kokeiltiin alustavasti. Koejakson perusteella metanoli päätettiin korvata glyserolilla, ja glyserolin syöttäminen prosessiin aloitettiin 16.4.2020. Tätä ennen vanhan metanolisäiliön tilalle hankittiin glyserolia varten uusi tilavampi säiliö. Metanolisäiliö oli tilavuudeltaan 9 m³ ja uusi säiliö on tilavuudeltaan 12 m³. Glyseroli varastoidaan samalla paikalla kuin metanoli varastointiin eli puhdistamon piha-alueella aidatun alueen sisäpuolella. Glyserolisäiliölle valettiin tasainen alusta betonista. Glyserolisäiliö on kaksoissäiliö eli varsinaista säiliötä ympäröi varosäiliö, jolloin sisäsäiliön mahdollisesti rikkoutuessa glyseroli valuu varosäiliöön eikä suoraan maahan. Koska varastointialue on suunniteltu metanolille, säiliön vieressä on mahdollisia ylivuotoja varten pihakaivo, joka johtaa suoraan prosessiin. Glyserolisäiliö näkyy kuvassa 7.



Kuva 7. Glyserolisäiliö puhdistamon piha-alueella.

Glyserolia syötettiin työssä käytettyjen tarkastelujaksojen aikana metanolipumppujen avulla aikaperusteisesti 15 l/h. Glyserolia varten on kuitenkin tarkoitus hankkia glyserolille paremmin soveltuvat pumput, jotka syöttäisivät glyserolia prosessiin virtaamaperusteisesti. Prosessiin kulkevaan linjaan ei tarvinnut tehdä muutoksia, eli glyserolia syötetään prosessiin samaa linjaa pitkin kuin metanolia.

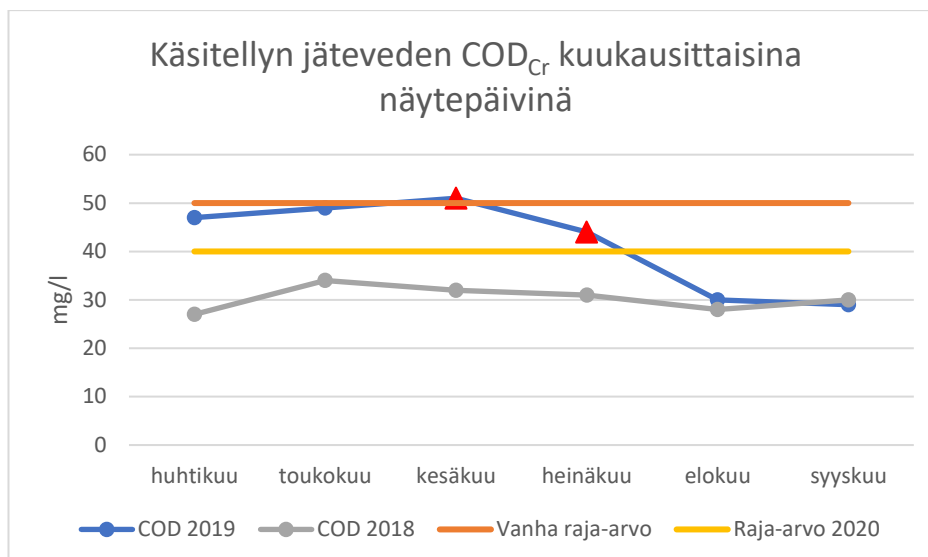
Seuraavaksi tarkastellaan glyserolin vaikutuksia käsittelytulokseen kesän 2019 koejakson ajalta sekä virallisen käyttöönoton jälkeiseltä ajalta. Lisäksi tarkastellaan, miten metanolin korvaaminen glyserolilla vaikuttaa työturvallisuuteen ja kustannuksiin.

7.1 Käsittelytulos

Kesän 2019 koejakso

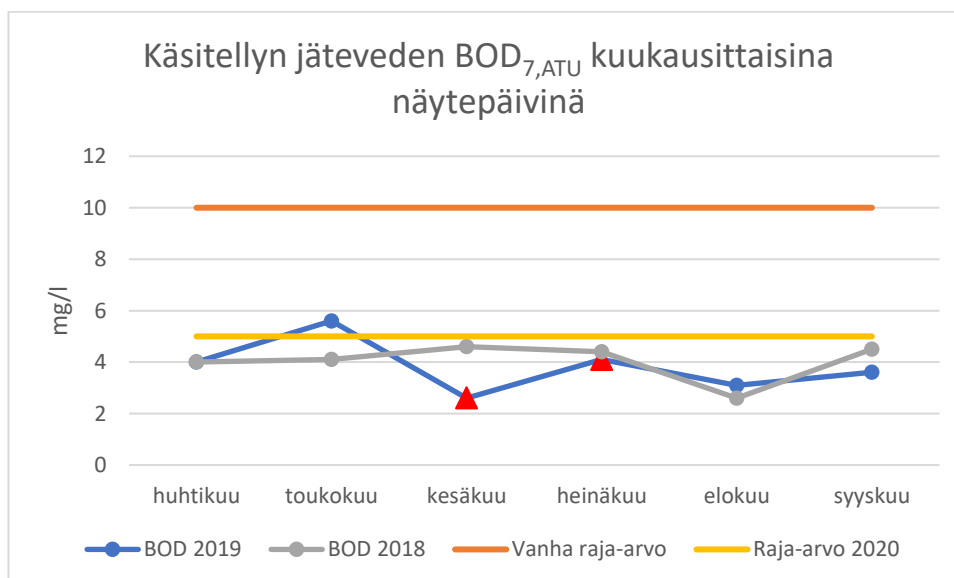
Glyserolia syötettiin kesällä 2019 prosessiin metanolipumpuilla aikaperusteisesti 15 l/h. Tuloksissa on huomioitava, että kesällä 2019 ei vielä ollut tullut voimaan ympäristöluvan muuttamista koskevaa päätöstä (nro 509/2019), joka muutti käsittelytuloksia koskevia raja-arvoja tammikuusta 2020 eteenpäin. Kuvaajiin on merkitty havainnollistamaan sekä vanha että uuden päätöksen mukainen raja-arvo. Punaisella on merkitty näytepäivät, jolloin prosessiin on syötetty metanolin sijasta glyserolia. Tarkastelujaksoksi on rajattu huhti-syyskuu.

COD_{Cr}-pitoisuuksien osalta vuoden 2018 huhti-syyskuun arvot ovat olleet vuoden 2019 vastaavia matalampia. Kesäkuun 2019 COD_{Cr}-pitoisuus 51 mg/l ylitti silloisen neljännesvuosikeskiarvon raja-arvon, mikä näkyy kuvassa 8. COD_{Cr}-pitoisuudet lähtivät kuitenkin glyserolin koejakson aikana laskuun eikä ylityksiä tapahtunut neljännesvuosikeskiarvona mitattuna.



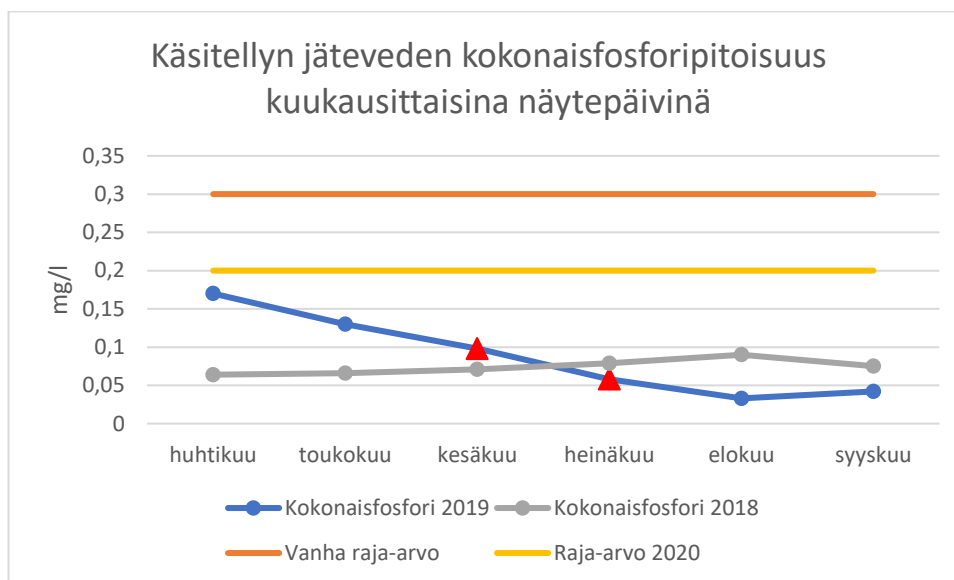
Kuva 8. Käsitellyn jäteveden COD-arvot kuukausittaisina näytenäytteinä ja raja-arvot. Käytössä metanoli lukuun ottamatta punaisella merkattuja näytenäytteinä, jolloin käytössä glyseroli.

BOD-pitoisuuksien osalta arvot ovat vaihdelleet 2,6–5,6 mg/l välillä eikä silloista raja-arvoa ole ylitetty yksittäisinä näytenäytteinä eikä neljännesvuosikeskiarvona kuten kuvasta 9 ilmenee. Glyseroli ei ole kuitenkaan aiheuttanut BOD-arvon nousua, sillä heinäkuussa 2019 ylimääräisenä näytteenottokertana BOD-arvo kääntyi vielä glyserolin syötön aikana laskuun [22, liite 2.1.2 s. 1/2].



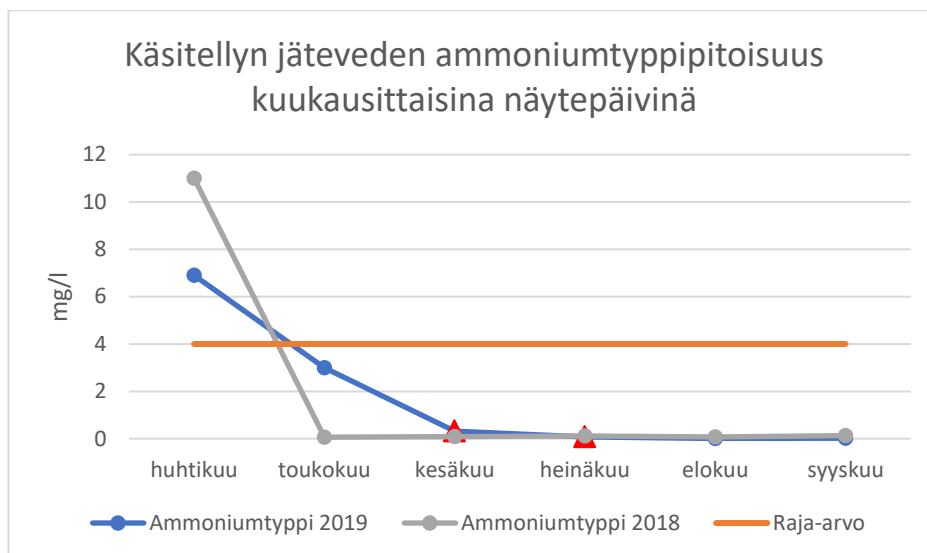
Kuva 9. Käsitellyn jäteveden BOD-arvot kuukausittaisina näytepäivinä ja raja-arvot. Käytössä metanoli lukuun ottamatta punaisella merkattuja näytepäiviä, jolloin käytössä glyseroli.

Käsitellyn jäteveden kokonaisfosforipitoisuudet ovat puhdistamolla olleet pitkään hyvin pieniä ja reilusti alle neljännesvuosikeskiarvon raja-arvon. Kuvasta 10 ilmenee, ettei glyserolin koejakso nostanut käsitellyn jäteveden fosforipitoisuuksia. Sen sijaan pitoisuudet laskivat kesän 2019 aikana.



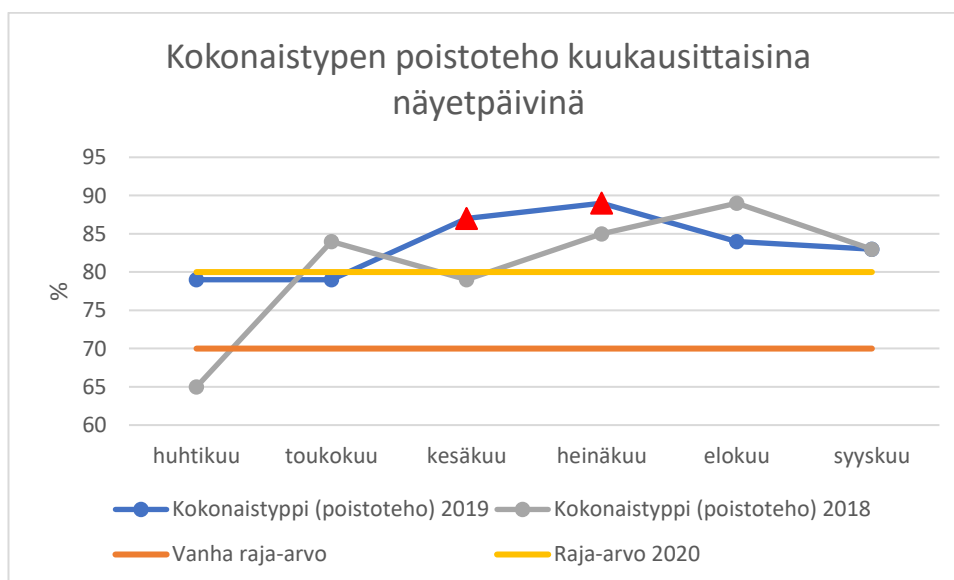
Kuva 10. Käsitellyn jäteveden kokonaisfosforipitoisuus kuukausittaisina näytepäivinä ja raja-arvot. Käytössä metanoli lukuun ottamatta punaisella merkattuja näytepäiviä, jolloin käytössä glyseroli.

Ammoniumtyypen osalta nähdään kuvasta 11, että lämpimien vesien aikaan ammoniumtyyppipitoisuudet laskevat hyvin alhaisiksi eikä neljännesvuosikeskiarvon raja-arvo silloin ylity. Glyserolin koejakso ei myöskään nostanut ammoniumtyyppipitoisuutta.



Kuva 11. Käsittelyn jäteveden ammoniumtyppipitoisuus kuukausittaisina näytenäytteinä ja raja-arvot. Käytössä metanoli lukuun ottamatta punaisella merkattuja näytenäytteinä, jolloin käytössä glyseroli.

Kokonaistypen poistoteho on pääsääntöisesti ollut tarkastelujakson aikana suurempi kuin vuosikeskiarvon raja-arvoksi määrätty vähimmäisteho kuten kuvasta 12 näkyy. Glycerolin koejakson aikana poistoteho parani, joten glyserolilla ei ollut kielteistä vaikutusta typen poistoon.



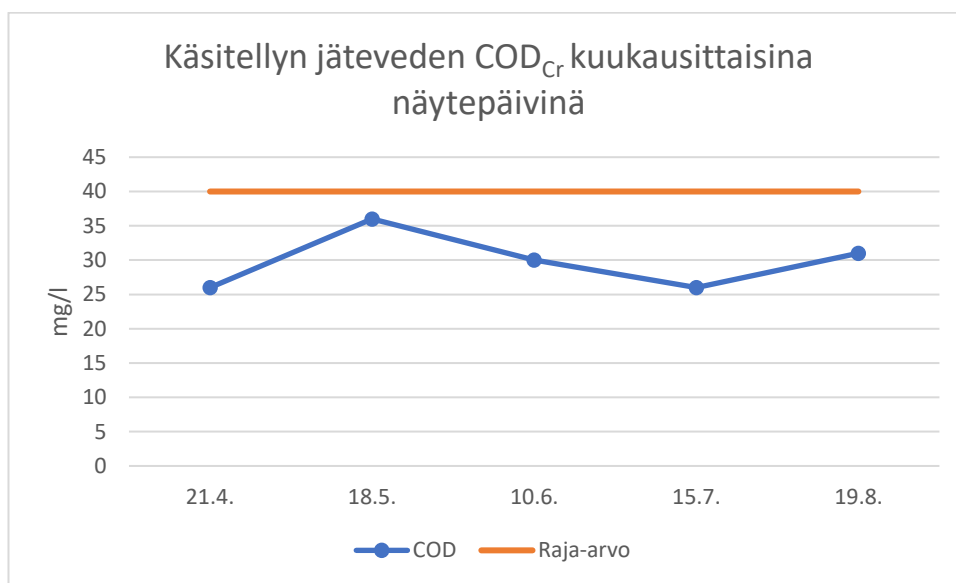
Kuva 12. Kokonaistypen poistoteho kuukausittaisina näytenäytteinä ja raja-arvot. Käytössä metanoli lukuun ottamatta punaisella merkattuja näytenäytteinä, jolloin käytössä glyseroli.

Käsitellyn jäteveden sisältämän kiintoaineen osalta huomattavia muutoksia ei ole ilmennyt, sillä mitatut pitoisuudet ovat olleet vuoden 2018 sekä 2019 huhti-syyskuussa alle 7 mg/l. Raja-arvo kiintoaineelle on 35 mg/l.

Virallinen käyttöönotto

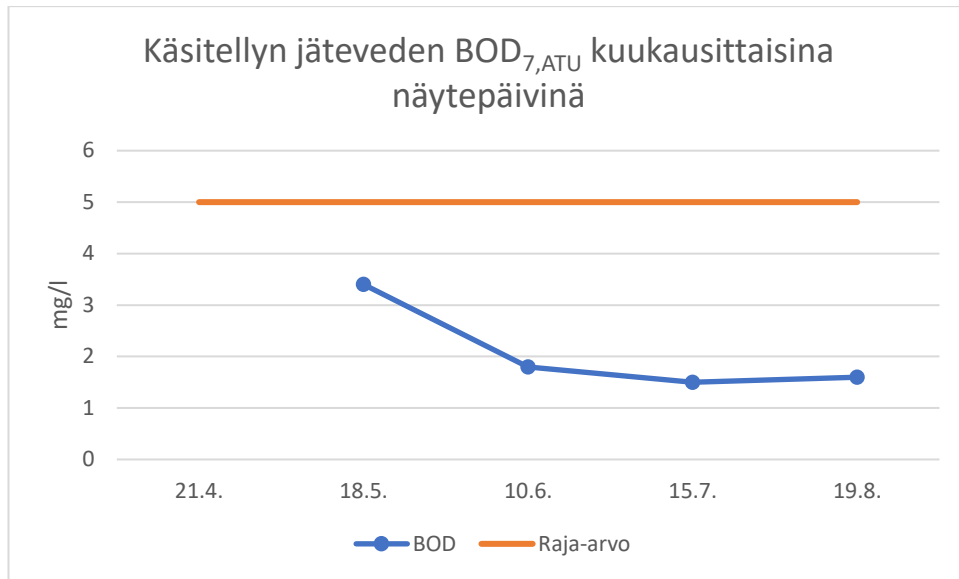
Glyseroli otettiin virallisesti käyttöön 16.4.2020. Sen jälkeen ensimmäinen virallinen näytteenottopäivä oli 21.4.2020. Tähän työhön tarkastelujaksoksi rajattiin 21.4.–19.8. ja kyseisen jakson aikana suoritettiin viisi näytteenottoa. Koko tarkastelujakson aikana glyserolia syötettiin aikaperusteisesti 15 litraa tunnissa.

COD_{Cr}-pitoisuudet pysyivät koko tarkastelujakson ajan alle neljännesvuosikeskiarvolle asetetun raja-arvon eli glyseroli ei nostanut COD_{Cr}-pitoisuuksia. Pitoisuudet vaihtelivat välillä 26–36 mg/l. Tuloksia on havainnollistettu kuvassa 13.



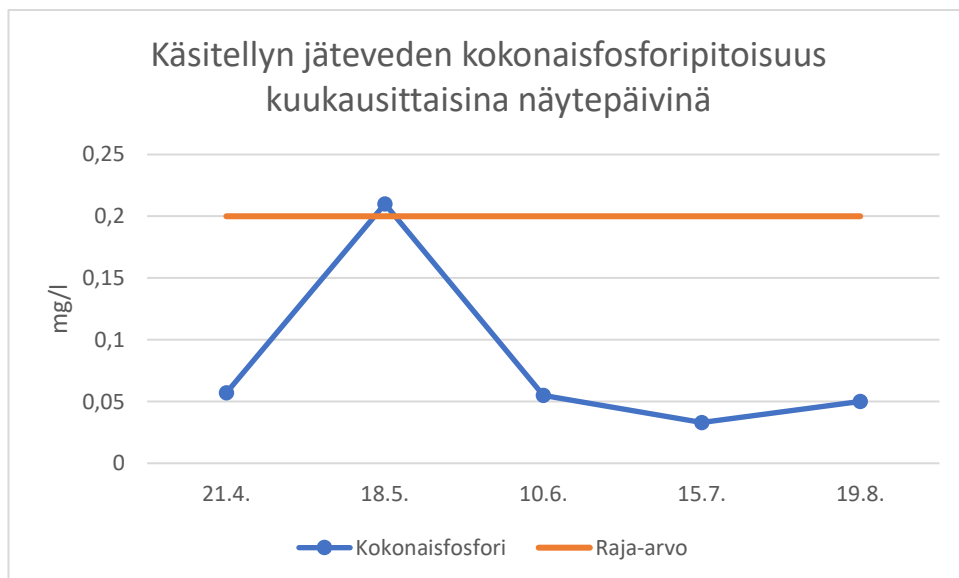
Kuva 13. Käsitellyn jäteveden COD-arvot glyserolin tarkastelujakson kuukausittaisina näytepäivinä.

Käsitellyn jäteveden BOD-tuloksista puuttuu huhtikuun tulos, mikä johtuu laboratoriossa tapahtuneesta inhimillisestä virheestä. Toukokuusta eteenpäin BOD-pitoisuudet ovat kuitenkin olleet selkeästi alle neljännesvuosikeskiarvoksi asetetun raja-arvon eli glyserolilla ei ole ollut BOD-pitoisuutta nostavaa vaikutusta. Tulokset on esitetty kuvassa 14.



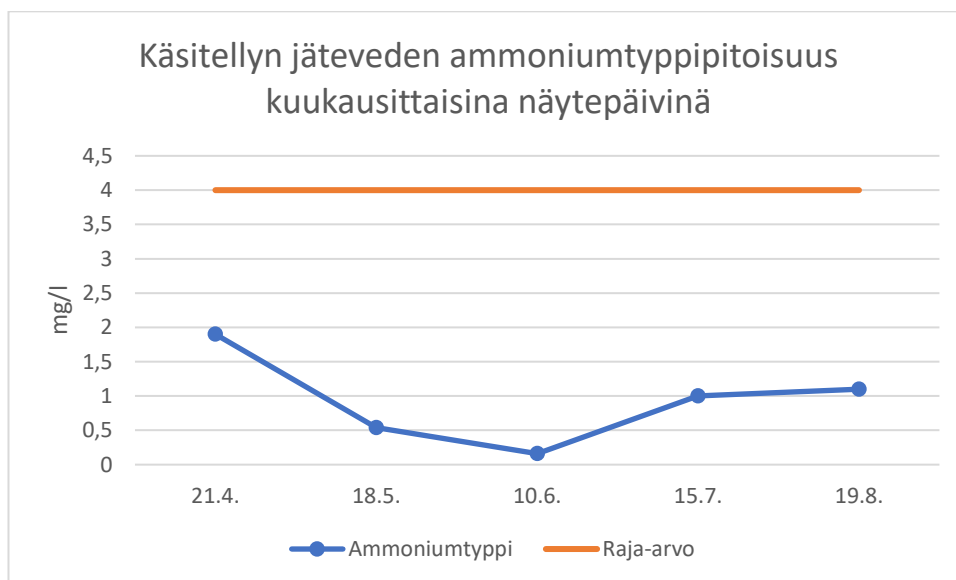
Kuva 14. Käsitellyn jäteveden BOD-arvot glyserolin tarkastelujakson kuukausittaisina näytepäivinä.

Kokonaisfosforipitoisuudet ovat tyypilliseen tapaan pysyneet alhaisina lukuun ottamatta toukokuun näytteenotokertaa, jolloin pitoisuus oli 0,21 mg/l eli hieman yli neljännesvuosikeskiarvona sallitun raja-arvon. Kokonaisfosforin tavanomaiseen verrattuna korkea pitoisuus selittyy ferrisulfaatin syöttöpumpun kalvon rikkoutumisella, mikä on aiheuttanut syöttöhäiriön. Syöttöhäiriö on näin vaikuttanut fosforin saostamiseen ja siten hieman nostanut pitoisuutta, eli glyserolilla ei ollut kokonaisfosforipitoisuuden nousuun vaikutusta. Tulokset on esitetty kuvassa 15.



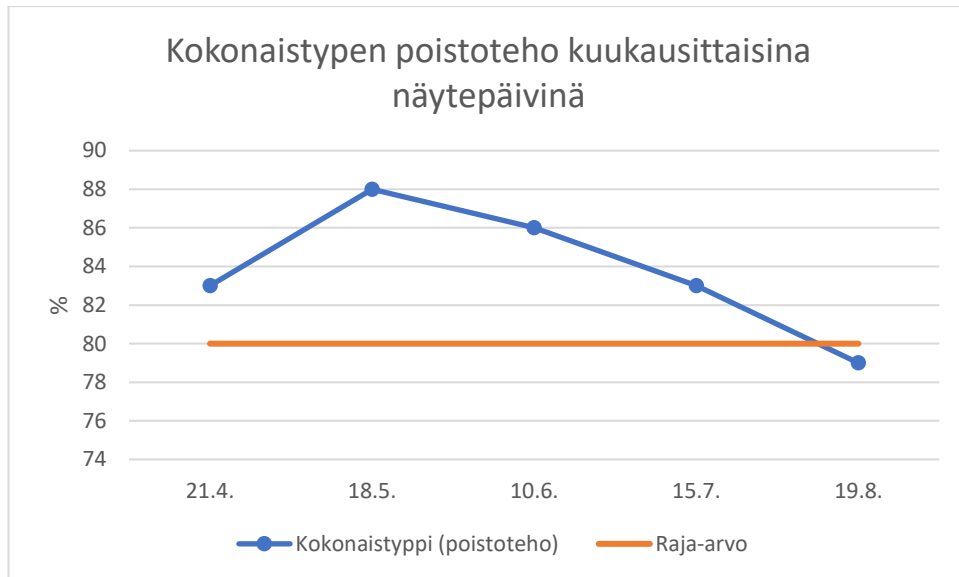
Kuva 15. Käsitellyn jäteveden kokonaisfosforipitoisuus glyserolin tarkastelujakson kuukausittaisina näytepäivinä.

Käsitellyn jäteveden ammoniumtyyppipitoisuus pysyi koko tarkastelujakson ajan reilusti alle sallitun neljännesvuosikeskiarvolle asetetun raja-arvon, mikä havainnollistuu kuvassa 16. Näin ollen voidaan todeta, ettei glyseroli ole aiheuttanut ammoniumtyyppipitoisuuksissa nousua.



Kuva 16. Käsitellyn jäteveden ammoniumtyyppipitoisuus glyserolin tarkastelujakson kuukausittaisina näytepäivinä.

Kokonaistypen poistoteho on pysynyt vuosikeskiarvoksi määrätyn raja-arvon yläpuolella lukuun ottamatta elokuun näytteenottokertaa, jolloin poistoteho jäi 79 %:iin. Yhden prosentin alitus vuosikeskiarvon raja-arvosta on kuitenkin melko pieni. Tulokset kokonaistypen poistotehon osalta on esitetty kokonaisuudessaan kuvassa 17. Koska poistoteho parani glyserolin käyttöönoton jälkeen, toukokuun jälkeinen poistotehon lasku selittyy todennäköisesti normaalilla vaihtelulla.



Kuva 17. Käsitellyn jäteveden kokonaistypen poistoteho glyserolin tarkastelujakson kuukausittaisina näytepäivinä.

Kiintoainepitoisuus pysyi koko tarkastelujakson ajan välillä 1,7–5,5 mg/l eli hyvin pienenä. Raja-arvo kiintoaineelle on 35 mg/l.

7.2 Työturvallisuus

Metanolin korvaaminen glyserolilla on merkittävä työturvallisuutta parantava tekijä. Metanolin käytön riskit työturvallisuuteen liittyen ilmenevät niin metanolin varastoinnissa ja toimituksessa kuin metanolin varastoinnin ja syötön mahdollisissa korjaus- ja huoltotoimenpiteissä. Kun käytössä on glyseroli, varastointi ja toimitus on vaaratonta, eikä korjaus- ja huoltotoimenpiteet aiheuta vaaraa työntekijän terveydelle tai turvallisuudelle.

Terveydelle vaarallisen ja helposti syttyvän kemikaalin, kuten metanolin, varastointi ja käyttö lisää aina työturvallisuuteen liittyviä riskejä. Mahdollisia riskejä ovat esimerkiksi vuoto-, palo- tai räjähdystilanteet, syöttöpumppujen vikaantuminen, ilkivalta tai huolimaton ja varomaton työskentely metanolin kanssa. Nämä aiheuttavat niin palo- ja räjähdysvaaran kuin altistumisvaaran.

Metanolin toimitus on ensisijaisesti kemikaalin toimittajalle suuri työturvallisuusriski mutta esimerkiksi säiliöauton vikaantuminen puhdistamoalueella tai purussa ilmenevä

ongelma ovat mahdollisia riskejä, jotka lisäävät palo- ja räjähdysvaaraa sekä altistumisvaaraa huomattavasti. Päivittäisessä työssä puhdistamalla metanolin työturvallisuusrisikit eivät ole läsnä, vaan lähinnä satunnaiset korjaus- ja huoltotoimenpiteet metanolin varastointiin tai syöttöön liittyen lisäävät riskiä altistumiselle. Työntekijöiden on oltava tietoisia metanolin vaaroista sekä käytettävä tarvittavia suojarusteita.

Vaarallisten aineiden käyttöä työssä ohjaa työturvallisuuslain lisäksi valtioneuvoston asetus kemiallisista tekijöistä työssä. Asetuksessa vaaditaan, että työnantajan on poistettava työntekijän terveydelle ja turvallisuudelle vaarallinen kemiallinen tekijä tai vähennettävä riski niin pieneksi kuin mahdollista. Tämä tarkoittaa, että vaarallinen kemiallinen tekijä joko poistetaan tai korvataan se työntekijän turvallisuudelle ja terveydelle vähemmän vaarallisella tekijällä. Metanolin korvaaminen glyserolilla toteuttaa tämän asetuksessa vaaditun toimenpiteen, sillä glyseroli ei aiheuta puhdistamalla työntekijöiden terveydelle ja turvallisuudelle vaaraa. Glyserolille hankittu sopiva säiliö ja säiliön sijoittaminen tasaiselle alustalle ja aidatulle alueelle tekevät glyserolin varastoinnista stabiilia ja näin estää esimerkiksi mahdollisen ilkvallan. Kun glyserolia varastoidaan ja käytetään stabiileissa olosuhteissa, ei pääse muodostumaan riskitekijöitä, jotka aiheuttaisivat palotai räjähdysvaaraa tai ihmiselle terveydellistä vaaraa. Glyserolin toimittaminen on pääsääntöisesti täysin turvallista eikä se ole vaaraksi terveydelle ja paloturvallisuudelle.

7.3 Kustannukset

Metanolin ja glyserolin hintoja vertailtaessa tulee huomioida, että metanolin hinta on kiinteä ja glyserolin hinta indeksiin sidottu. Glyserolin hinta päivittyy indeksin mukaisesti kolme kertaa vuodessa, kun taas metanolin hinta määräytyy toimittajan asettaman hinnan mukaisesti vuosittain.

Taulukossa 4 on vertailtu metanolin kulutusta sekä kustannuksia vuosi- ja kuukausitasolla. Vuoden 2018 kulutus ja kustannukset ovat kokonaan toteutuneita arvoja. Vuonna 2019 metanoli oli käytössä noin 10 kuukautta, sillä glyserolin koejakso kesti sinä vuonna noin kaksi kuukautta. Näin ollen vuosikulutus ja kustannukset on laskettu 10 kuukauden kulutuksen perusteella. Vuoden 2020 kulutus on arvioitu aiempien vuosien perusteella ja kustannukset laskettu arvioitua kulutusta hyödyntäen.

Taulukko 4. Metanolin hinnan ja kulutuksen vertailua vuosina 2018–2020. * = 10 kuukauden kulutuksen perusteella arvioidut kulutus ja kustannukset. ** = aiempien vuosien kulutuksen perusteella arvioidut kulutus ja kustannukset.

	Metanolin yksikköhinta (€/tonni)	Vuosikulutus puhdistamolla (kg)	Kustannukset vuodessa	Kustannukset kuukaudessa
2018	500,02	55 050	27 526 €	2 293,8 €
2019	394,26	42 240 *	16 653 € *	1 387,8 € *
2020	361,71	40 000–55 000 **	14 500–20 000 **	1 200–1 700 **

Metanolin yksikköhinta on laskenut vuodesta 2018, minkä myötä myös kustannukset ovat laskeneet. Lisäksi metanolin kulutus vaihtelee vuosittain, mikä johtaa myös kustannusten vaihteluun.

Glyserolin hinta on sidottu indeksiin, ja se päivittyy kolme kertaa vuodessa: tammikuun ensimmäinen päivä, toukokuun ensimmäinen päivä ja syyskuun ensimmäinen päivä. Kesän 2019 koejakson aikana glyserolin hinta oli 320 €/t. Glyserolia kului koejakson aikana 18 360 litraa eli 23 134 kg, ja sen hinnaksi muodostui yhteensä 7 402,9 €. Kuukausihinnaksi siitä muodostuu noin 4 430 €. Taulukkoon 5 on havainnollistettu glyserolin kulutusta ja kustannuksia vuoden 2020 huhtikuusta elokuuhun. Taulukkoon on myös laskettu kustannukset käyttäen yksikköhintana kuuden vuoden keskiarvoa, sillä glyserolin hinta nousi kevään 2020 aikana epätavallisen korkeaksi.

Taulukko 5. Glyserolin kulutus ja kustannukset tarkastelujaksolla.

	Glyserolin yksikköhinta (€/tonni)	Kulutus (kg)	Kustannukset	Kustannukset laskettuna yksikköhinnan kuuden vuoden keskiarvolla (357,22 €/t)
Huhtikuu	324,90	5 400	1 754,5 €	1 929,0 €
Toukokuu	450,84	13 124	5 916,8 €	4 688,2 €
Kesäkuu	450,84	12 701	5 726,1 €	4 537,1 €
Heinäkuu	450,84	13 124	5 916,8 €	4 688,2 €
Elokuu	450,84	13 124	5 916,8 €	4 688,2 €

Metanolin ja glyserolin kustannuksia vertailtaessa voidaan todeta, että kesän 2019 koejaksolla sekä virallisen käyttöönoton jälkeisellä tarkastelujaksolla glyseroli tuotti meta-
nolia enemmän kuluja. On kuitenkin huomioitava, että glyserolin hinta on noussut poikkeuksellisen nopeasti vuoden 2020 aikana ja on lähellä viime vuosien huippuarvoja. Tä-
hän on vaikuttanut raakaglyserolin heikentynyt saatavuus, sillä biodieselin tuotanto on
pienentynyt, jolloin myöskään raakaglyserolia ei muodostu. Biodieselin alhaiseen tuo-
tantoon on syynä öljyn alhainen hinta. Lisäksi COVID-19-pandemia on nostanut

glyserolin kysyntää käsihuuhteiden ja nestesaippuoiden kovan menekin takia. [42.] Tämän takia glyserolin kuukausikustannukset laskettiin myös yksikköhinnan kuuden vuoden keskiarvolla.

Lisäksi glyserolia syötetään prosessiin suhteellisen paljon, mikä nostaa myös kustannuksia. Vie jonkin verran aikaa, että löydetään syöttömäärä, joka on prosessin toimivuuden kannalta optimaalisin. Myös uudet glyserolin syöttöön paremmin soveltuvat pumput, jotka syöttävät glyserolia virtaamaperusteisesti, laskevat kulutusta. Kun optimaalinen syöttömäärä on selvillä ja glyserolia voidaan syöttää virtaamaperusteisesti, kulutus on todennäköisesti pienempää, jolloin myös kustannukset ovat pienemmät. On myös hyvä huomioida, että tarkastelujakson aikainen glyserolin poikkeuksellisen korkea hintataso laski heti syyskuun indeksipäivityksen myötä ja oli silloin 341,38 €/t eli yli 100 €/t halvempi kuin toukokuun indeksipäivityksen jälkeen.

Myös metanolin kulutus on vaihdellut vuosittain ja ennen vuotta 2018 kulutus on ollut suurempaa. Vuonna 2015 vuosikulutus oli noin 69 000 kg, vuonna 2016 noin 72 000 kg ja vuonna 2017 noin 62 000 kg. Metanolin hinta on myös tällöin ollut korkeampi.

7.4 Käyttäjäkokemus

Glyserolin käyttöönotolla ei ollut käyttäjäkokemukseen lainkaan kielteistä vaikutusta. Prosessi toimii glyserolilla hyvin, joten esimerkiksi ylimääräisiä glyserolin aiheuttamia ongelmia ei aiheudu eikä sitä kautta ylimääräistä työtä. Glyseroli on myös turvallinen kemikaali, jonka kanssa työskentely ei aiheuta työntekijöille työturvallisuusriskiä, mikä lisää myönteistä käyttäjäkokemusta.

Glyserolilla ei näyttäisi myöskään olevan vaikutusta lietteen laatuun tai sen käsittelyyn. Kesän 2019 koejakson aikoihin liete muuttui löysemmäksi, mikä vaikeutti lietteen käsittelyä, ja syyksi epäiltiin glyserolia. Ongelma ei kuitenkaan uusiutunut virallisen käyttöönoton jälkeen, ja huhtikuun 2020 jälkeisen tarkastelujakson ajan liete on ollut täysin normaalia. Näin ollen pääteltiin, että kesän 2019 vetinen liete johtui muista syistä. Glyseroli ei siten vaikuttanut lietteen laatuun tai sen käsittelyyn, joten käyttäjäkokemus säilyi senkin osalta hyvänä.

8 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli saada aikaan mahdollisimman kattava selvitys glyserolista metanolin korvaajana ilmastuksen hiililähteenä ja glyserolin vaikutuksista käsittelytuloksiin, työturvallisuuteen ja kustannuksiin Nummelan jätevedenpuhdistamolla. Työ tehtiin yhteistyössä Vihdin Veden kanssa. Työ toteutettiin hyödyntäen LUVY:n suorittamien virallisten näytteenottojen perusteella laadittuja raportteja. Lisäksi työn toteuttamisessa hyödynnettiin kirjallisuutta ja lainsäädäntöä, selvitystyötä puhdistamolla, puhdistamomestarin haastatteluja sekä Vihdin Vedeltä saatuja muita tietoja.

Työssä havaittiin, että glyseroli toimii ilmastuksen hiililähteenä metanolin korvaajana. Käsittelytulosta arvioitiin kahtena kesänä käsitellyn jäteveden kiintoaineen, ammoniumtyypen, fosforin, kokonaistypen poistotehon sekä BOD_{7,ATU}- ja COD_{Cr}-arvojen perusteella. Pitoisuudet eivät nousseet glyserolin vaikutuksesta eikä kokonaistypen poistoteho laskenut.

Suotuisiin tuloksiin voi vaikuttaa kesäaika, jolloin käsiteltävä jätevesi on lämpimämpää kuin muina vuodenaikoina. Käsiteltävän jäteveden ollessa lämmintä prosessi toimii paremmin saaden aikaan myös hyvät käsittelytulokset. Oleellinen ja tärkeä havainto on kuitenkin se, ettei glyseroli saanut aikaan käsittelytuloksen huononemista. Havainnon luotettavuutta lisää se, että käsittelytuloksia glyserolin käytön ajalta on kahdelta eri kesältä.

Työturvallisuuden osalta havaittiin, että metanoliin liittyvät riskit poistuvat kokonaan glyseroliin vaihdon myötä ja näin työturvallisuus paranee huomattavasti. Glyserolin toimitus ja varastointi sekä glyserolin varastointiin ja syöttöön liittyvät korjaus- ja huoltotoimenpiteet eivät aiheuta työntekijöiden terveydelle tai turvallisuudelle vaaraa.

Kustannuksiin liittyen vertailtiin metanolin ja glyserolin kulutusta ja kustannuksia. Tässä työssä käytettyjen tarkastelujaksojen perusteella glyseroli maksaa metanolia jopa yli kaksi kertaa enemmän. Syy metanolia suurempiin kustannuksiin on glyserolin kulutuksessa. Glyserolin kuukausikulutus on ollut noin 11 500–13 000 kg, mikä on noin 2–4 kertaa enemmän kuin metanolin kuukausikulutus. Glyserolin kulutus saattaa myöhemmin laskea, mikäli nitrifikaatio toimii nykyistä pienemmällä määrällä glyserolia. Kulutusta voi

laskea myös glyserolia virtaamaperusteisesti syöttävät pumput, jotka eivät tarkastelujakson aikaan olleet vielä käytössä. Näin myös kustannukset alenisivat. On myös huomiotava, että metanolin ja glyserolin hinnat vaihtelevat maailmanmarkkinoiden mukaan, joten eri aikoina metanolin ja glyserolin tuottamat kustannukset riippuvat myös sen hetkisestä hintatasosta. Vaikka glyserolin kustannukset olivatkin tarkastelujaksojen aikana korkeammat kuin metanolin kustannukset, työturvallisuusriskit pienenevät ja käsittelytulokset säilyvät hyvinä.

Työn tavoitteet saavutettiin eli työssä saatiin selvitettyä, miten glyseroli vaikuttaa käsittelytuloksiin, työturvallisuuteen ja kustannuksiin. Tässä työssä ei kuitenkaan selviä, miten glyseroli vaikuttaa käsittelytuloksiin kylmien vesien aikaan, jolloin käsittelyprosessi ei toimi aina yhtä sujuvasti kuin kesällä lämpimien vesien aikana. Rintanen on tutkinut opinnäytetyössään Glyseroli jätevedenpuhdistuksen hiililähteenä (2018) glyserolin toimivuutta kylmien vesien aikaan. Rintasen työssä glyseroli syötettiin prosessiin ferrisulfaattiin sekoitettuna. Tutkimusta voisi jatkaa selvittämällä, miten pelkän glyserolin syöttäminen ilmastuksen hiililähteeksi vaikuttaa käsittelytuloksiin kylmien vesien aikaan. Lisäksi tässä työssä jäi selvittämättä, mitkä ovat glyserolin kustannukset pitkällä aikavälillä. Muutaman kuukauden tarkkailusta ei voida päätellä pidemmältä ajalta aiheutuvia kustannuksia, sillä glyserolin syöttömäärää saatetaan vielä optimoida, jolloin se vaikuttaa heti kustannuksiin. Lisäksi glyserolin poikkeuksellisen korkea hinta tarkastelujakson aikana ei anna todellista ja luotettavaa kuvaa kustannuksista. Tutkimusta voisi siten jatkaa tarkastelemalla kustannuksia pidemmällä aikavälillä, kun tietoa kustannuksista on kertynyt enemmän.

Tämä työn on myös virallinen selvitys metanolin korvaamisesta turvallisemmalla vaihtoehdolla. Työ voi siten lisätä tietoutta aiheesta ja näin voisi mahdollistaa vastaavanlaisen vaihdoksen muillakin jätevedenpuhdistamoilla. Ilman tätä työtä aiheesta ei olisi saatu näin kattavaa selvitystä, josta joku muu voisi myös hyötyä.

Lähteet

- 1 Yhdyskuntien jätevesien kuormitus vesiin. Verkkoaineisto. Ympäristö.fi. <https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kartat_ja_tilastot/vesihuoltoraportit/Yhdyskuntien_jatevesien_kuormitus_vesiin>. Päivitetty 12.12.2019. Luettu 28.4.2020.
- 2 Hakemus Nummelan jätevedenpuhdistamon ympäristöluvan tarkistamiseksi. 2016. Verkkoaineisto. Vihdin kunta/Vihdin vesihuoltolaitos -liikelaitos. <https://ti-topalvelu.ahtp.fi/Lupa/AvaaLiite.aspx?Liite_ID=5318210>. 23.12.2016. Luettu 20.4.2020.
- 3 Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä. 2006. 888/12.10.2006.
- 4 Henze, Mogens; Harremoës, Poul; la Cour Jansen, Jes & Arvin, Eric. 2002. Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes. 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag.
- 5 Jäteveden ympäristövaikutukset. Verkkoaineisto. Jätevesiopas. <<https://vesien-suojelu.fi/jatevesi/etusivu/jateveden-ymparisto-vaikutukset/>>. Luettu 28.4.2020.
- 6 Säylä, Jonne. 2015. Yhdyskuntien jätevesien puhdistus 2013. Verkkoaineisto. Suomen ympäristökeskus. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/158957/SYKEra_34_2015.pdf?sequence=1>. Luettu 29.4.2020.
- 7 Laitinen, Jyrki; Nieminen, Jenni; Saarinen, Risto & Toivikko, Saijariina. 2014. Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/43199/SY_3_2014.pdf?sequence=1>. Luettu 29.4.2020.
- 8 Karttunen, Erkki & Tuhkanen, Tuula. 2003. RIL 124-1 Vesihuolto I. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 9 Oravainen, Reijo. 1999. Vesistötulosten tulkinta -opasvihkonen. Verkkoaineisto. Kokemäenjoen vesistön vesiensuojeluyhdistys ry. <<https://kvvy.fi/wp-content/uploads/2015/10/opasvihkonen.pdf>>. Luettu 4.5.2020.
- 10 SFS 5504. Veden kemiallisen hapen kulutuksen (COD Cr) määrittäminen suljetulla putkimenetelmällä. 1988. Hapetus dikromaatilla. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 11 SFS 3036. Veden kemiallisen hapen kulutuksen (COD Mn -arvon tai KMnO₄ -luvun) määrittäminen. 1981. Hapetus permanganaatilla. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

- 12 Peltö-Huikko, Aino & Vieno, Niina. 2009. Vesikoulu. Verkkoaineisto. Vesi-Instituutti WANDER/Prizztech Oy. <http://www.vesikoulu.fi/assets/docs/vesikoulu_tiepaketti_jatevedesta.pdf>. Luettu 20.5.2020.
- 13 Karttunen, Erkki; Kiuru, Heikki & Tuhkanen, Tuula. 2004. RIL 124-2 Vesihuolto II. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 14 Lähde, Jussi. 2008. Ammoniumtyyppi ilmastuksen ohjausparametrinä yhdyskunta-jäteveden puhdistuksessa. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUTPub-tietokanta.
- 15 Rantanen, Pirjo-Liisa. 2010. Biologinen typen- ja fosforinpoisto jätevesistä – nitri-fikaation tehostaminen vapaasti kelluvilla kantoainekappaleilla. Lisensiaattityö. Aalto yliopisto, teknillinen korkeakoulu. Acris-tietokanta.
- 16 Ruissalo, Maria Kanerva. 2006. Yhdyskuntajätevedenpuhdistamon rejektivesien erilliskäsittely. Pro gradu –tutkielma. Jyväskylän yliopisto. JYX-julkaisuarkisto.
- 17 Methanol safe handling manual: 5th edition. Verkkoaineisto. Methanol Institute. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/Safe-Handling-Manual_5th-Edition_Final.pdf>. Luettu 3.6.2020.
- 18 OVA-ohje: metanoli. 2017. Turvallisuusohje. Työterveyslaitos.
- 19 Pagliaro, Mario & Rossi, Michele. 2010. The Future of Glycerol. RSC Green Chemistry Series. 2nd Edition. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- 20 Glyseroliseos. 2017. Käyttöturvallisuustiedote. Berner.
- 21 Hakemus Nummelan jätevedenpuhdistamon ympäristöluvan tarkistamiseksi. 2016. Verkkoaineisto. Vihdin kunta/Vihdin vesihuoltolaitos -liikelaitos. <https://tietopalvelu.ahp.fi/Lupa/AvaaLiite.aspx?Liite_ID=5318210>. 23.12.2016. Luettu 20.4.2020.
- 22 Valtonen, Marja. 2020. Nummelan puhdistamon v. 2019 kuormitustarkkailun yhteenveto. Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Raportti 5/2020.
- 23 Etelä-Suomen aluehallintovirasto. 2019. Nummelan jätevedenpuhdistamon ympäristöluvan muuttaminen, Vihti. Lupapäätös nro 509/2019.
- 24 Kaltiainen, Heikki. 2020. Puhdistamomestari, Vihdin Vesi, Vihti. Sähköposti 13.5.2020.

- 25 Kangas, Ari. 2004. Jätevedenpuhdistamojen toiminta ja toteutukset. Vesi- ja viemärlaitosyhdistyksen monistesarja Nro 15. Helsinki: Vesi- ja viemärlaitosyhdistys.
- 26 Puhdistamolle käyttöön UV-laitteen ja kemikaalin yhdistelmä. 2020. Vihdin Uutiset 1.4.2020, s. 5.
- 27 Länsi-Suomen ympäristölupavirasto. 21.9.2007. Nummelan jätevedenpuhdistamon ympäristölupahakemus, Vihti. Lupapäätös nro 33/2007/1.
- 28 Valtonen, Marja. 2017. Nummelan jätevedenpuhdistamon kuormitustarkkailun yhteenvedo vuodelta 2016. Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Tutkimusraportti 613/2017.
- 29 Turvallinen ja terveellinen työ varmistetaan työsuojelella. Verkkoaineisto. Työturvallisuuskeskus. <https://ttk.fi/tyoturvaluusuuus_ja_tyosuojelu>. Luettu 6.5.2020.
- 30 Turvallisessa työympäristössä ja toimivassa työyhteisössä voidaan hyvin. Verkkoaineisto. Työturvallisuuskeskus. <https://ttk.fi/tyoturvaluusuuus_ja_tyosuojelu/tyoturvaluusuuuden_perusteet>. Luettu 6.5.2020.
- 31 Työturvallisuuden johtaminen. Verkkoaineisto. Työturvallisuuskeskus. <https://ttk.fi/tyoturvaluusuuus_ja_tyosuojelu/tyoturvaluusuuuden_perusteet/tyoturvaluusuuuden_johtaminen>. Luettu 6.5.2020.
- 32 Mertanen, Virve. 2015. Työturvallisuuden perusteet. Tampere: Suomen yliopistopaino Oy – Juvenes Print.
- 33 Toimiva työyhteisö. Verkkoaineisto. Työturvallisuuskeskus. <https://ttk.fi/tyoturvaluusuuus_ja_tyosuojelu/tyoturvaluusuuuden_perusteet/tyoyhteiso>. Luettu 6.5.2020.
- 34 Turvallinen ja terveellinen työympäristö. Verkkoaineisto. Työturvallisuuskeskus. <https://ttk.fi/tyoturvaluusuuus_ja_tyosuojelu/tyoturvaluusuuuden_perusteet/tyoymparisto>. Luettu 6.5.2020.
- 35 Kemialliset tekijät työympäristössä. Verkkoaineisto. Työturvallisuuskeskus. <https://ttk.fi/tyoturvaluusuuus_ja_tyosuojelu/tyoturvaluusuuuden_perusteet/tyoymparisto/kemialliset_tekijat>. Luettu 6.5.2020.
- 36 Työturvallisuuslaki. 2002. 738/23.8.2002.
- 37 Valtioneuvoston asetus kemiallisista tekijöistä työssä. 2001. 715/9.8.2001.

- 38 Kemialliset tekijät. 2020. Verkkoaineisto. Työsuojelu.fi. <<https://www.tyosuojelu.fi/tyoolot/kemialliset-tekijat>>. Päivitetty 12.3.2020. Luettu 8.5.2020.
- 39 REACH – Rekisteröinti, luvat ja rajoitukset. Verkkoaineisto. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. <<https://tukes.fi/kemikaalit/reach>>. Luettu 8.5.2020.
- 40 Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. 2014. REACH-valvontaopas ympäristönsuojeluviranomaiselle. Ympäristöhallinnon ohjeita 7. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/136504/OH_7_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu 8.5.2020.
- 41 REACH ja CLP. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/tyoymparisto/altisteet/kemikaaliturvallisuus/reach-ja-clp/>>. Luettu 8.5.2020.
- 42 Viitasalo, Krista. 2020. Vesilaitoksen johtaja, Vihdin Vesi, Vihti. Sähköposti. 7.5.2020.