

Iida Hirvonen

**BIOLOGISEN TYPENPOISTON  
HAASTEET KAATOPAIKAN  
SUOTOVESISSÄ**  
Kirjallisuuskatsaus

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Ympäristötekniologia

2023



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri AMK
Tekijä/Tekijät	Iida Hirvonen
Työn nimi	Biologisen typenpoiston haasteet kaatopaikan suotovesissä
Toimeksiantaja	Xamk TKI Mikkeli
Vuosi	2023
Sivut	27
Työn ohjaaja(t)	Marjatta Lehesvaara

## TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyö tehtiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Xamk TKI Mikkeli:n ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n yhteisen Devo-hankkeen toimeksiantona. Devo-hankkeessa kehitetään uusia puhdistusmenetelmiä kaatopaikkavesille, ja hankkeen valmistamassa bioreaktorissa biologista typenpoistoa nitrifikaatio-denitrifikaatiomenetelmällä ei olla saatu toimimaan toivotulla tavalla. Opinnäytetyön tavoitteena oli kirjallisuuteen perustuen selvittää niitä suotoveden sisältämiä tekijöitä, joilla on heikentäviä vaikutuksia nitrifikaatio-denitrifikaatiomenetelmän tehokkuuteen.

Uusien jäte- ja suotovesien puhdistusmenetelmien kehittyminen kaupungistumisen lisääntyessä on tärkeää. Suotovesien laatu muuttuu kierrätyskulttuurin kehittyessä ja puhdistusmenetelmien tulee muovautua muuttuvan yhteiskunnan mukana. Suotovesien yksilöllinen laatu asettaa lähtökohdat niiden käsittelylle. Devo-hankkeen käsittelemän Ristiinan suljetun kaatopaikan suotovesi on todettu erittäin rautapitoiseksi, eikä raudanpoistoyksikön lisäämisellä olla saatu toivottuja tuloksia biologisen typenpoiston tehokkuuteen. Haasteita, joita biologisessa typenpoistossa kohdataan, ei ole onnistuttu löytämään.

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jonka avulla toimeksiantaja pystyy mahdollisesti kehittämään puhdistusprosessin toimintaa. Aineiston keruu tapahtui internetlähteiden kautta ja lähdemateriaaleiksi valikoitui niin artikkeleita kuin E-kirjojakin sekä suomeksi että englanniksi. Lisäksi Devo-hankkeeseen liittyvää materiaalia niin suotoveden laadusta kuin pilot-laitteiston toiminnasta ja monitoroinnista saatiin toimeksiantajalta sekä suullisesti että kirjallisesti.

Merkittävimmi prosessia rajoittaviksi tekijöiksi nousi suotoveden ympärivuotinen alhainen lämpötila, joka hidastaa prosessin toimintaa. Suotovedessä esiintyvissä useissa eri aineissa ja yhdisteissä on ominaisuuksia, jotka vaikuttavat häiritsevästi nitrifioivien bakteerien elinkykyyn. Prosessia heikentää monet eri tekijät ja ne vaikuttavat joko suoraan tai epäsuoraan typenpoistoprosessiin. Nitrifikaatiovaihe on denitrifikaatiovaihetta herkempi ympäristön vaikutuksille sekä inhiboiville aineille. Denitrifikaatiovaiheen toiminnan kannalta kriittisintä on riittävän suuri orgaaninen hiilenlähde suhteutettuna typen määrään.

**Asiasanat:** Suotovesi, biologinen typenpoisto, nitrifikaatio-denitrifikaatio

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Iida Hirvonen
Thesis title	The challenges of biological nitrogen removal in landfill leachates
Commissioned by	Xamk RDI activities Mikkeli
Time	2023
Pages	27
Supervisor	Marjatta Lehesvaara

## ABSTRACT

This thesis was commissioned by the joint Devo project of Xamk RDI activities Mikkeli and development company Miksei Oy. The Devo-project developing new purification methods for landfill leachates and the biological nitrogen removal done by the nitrification-denitrification method has not worked as effectively as it should be. The aim of this thesis was to find out, based on the existing literature, factors contained in the leachate that might have a weakening effect on the nitrification-denitrification process.

The development of new wastewater and leachate purification method is important as urbanization increases. The quality of leachates changes as the recycling culture develops, and purification methods must evolve along with the developing society. The individual quality of leachates sets the starting point for the treatment method. The leachate from the Devo project's closed landfill in Ristiina had been found to be very iron-rich, and even the addition of an iron removal unit had not achieved the desired results in terms of the efficiency of biological nitrogen removal. The challenges encountered in biological nitrogen removal had not been found.

The thesis was carried out as a literature review for the Devo project to use in developing the biological nitrogen removal process. The material was collected through internet sources from articles and E-books. In addition, material related to the Devo project regarding the quality of the leachate and monitoring information was obtained from the Devo project.

The thesis showed that most significant factor slowing down the process was a year-round low temperature of the leachate. Several different substances and compounds in leachate have properties that inhibit nitrifying bacteria. The process is weakened by many different factors, and they also affect each other and either directly or indirectly to the nitrogen removal process. The nitrification phase is more sensitive to environmental influences and inhibiting substances than the denitrification phase. What comes to the denitrification phase, the most critical thing is a large enough source of organic carbon to nitrogen ratio.

**Keywords:** Biological nitrogen removal, nitrification and denitrification, leachate

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	KAATOPAIKKOJEN SUOTOVEDET .....	6
2.1	Suotovedet .....	6
2.2	Suotovesiä koskeva lainsäädäntö.....	7
2.3	Suotovesien sisältämiä aineita ja ominaisuuksia .....	8
3	DEVO-HANKE .....	11
3.1	Käsitlemättömän suotoveden laatu .....	12
3.2	Suotoveden monitorointi .....	13
4	BIOLOGINEN TYPENPOISTO .....	15
4.1	Biologisen typenpoiston merkitys.....	15
4.2	Nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessi .....	16
5	TOTEUTUS .....	16
6	TULOKSET.....	18
6.1	Nitrifikaatioon vaikuttavat tekijät.....	19
6.2	Denitrifikaatioon vaikuttavat tekijät.....	22
7	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	23
	LÄHTEET.....	25

## 1 JOHDANTO

Uusien jäte- ja suotovesien puhdistusmenetelmien kehittäminen on tärkeää, sillä kaupungistumisen, elämäntapojen muutosten sekä väestönkasvun myötä myös yhdyskuntajätteen tuotanto lisääntyy vuosi vuodelta. Myös kaatopaikkojen rakenteet ja sinne päätyvien jätteiden laadut muuttuvat kierrätyskulttuurin kehittyessä. Mikäli kasvavia jätemääriä ja muuttuvia kaatopaikkaolosuhteita ei oteta huomioon kaupunkien kehityksessä, tullaan kohtaamaan haasteita jätteenkäsittelyssä. Kaatopaikkojen suotovedet korkeine haitallisten aineiden pitoisuuksineen aiheuttaa helposti pinta- ja pohjavesien pilaantumista. Tämän vuoksi suotovesien virheellinen hävittäminen voi johtaa vakaviin ympäristöongelmiin. (Li ym. 2021.)

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n yhteisessä Devo-hankkeessa kehitetään uusia puhdistusmenetelmiä kaatopaikan suotovesille. Devo-hankkeen tehtävänä on kehittää luonnonmukaisia puhdistusmenetelmiä jäteasemien ja suljettujen kaatopaikkojen suoto- ja hulevesien käsittelyyn. Hankkeen tavoitteena on löytää kustannustehokas ja huoltovapaa ratkaisu ammoniumtyypen poistamiseen suotovedestä. Hankkeella on pilot-laitteisto Ristiinan suljetulla kaatopaikalla, joissa laitteiston avulla pyritään tekemään kaatopaikan suotovesiin biologista typenpoistoa nitrifikaatio-denitrifikaatiomenetelmällä. Ongelmia on ilmentynyt typenpoiston käynnistymisen haasteina hankkeen valmistamassa bioreaktorissa, eikä kaksivaiheisen nitrifikaatio-denitrifikaatiomenetelmän ensimmäistäkään vaihetta olla saatu toimimaan halutussa laajuudessa.

Tässä opinnäytetyössä pyritään selvittämään haastavia tekijöitä, joita suotoveden biologisessa typenpoistossa kohdataan Ristiinan suljetulla kaatopaikalla. Kirjallisuuden avulla pyritään hakemaan vastauksia, joiden myötä prosessin toimintaa saadaan edistettyä. Kaatopaikalla olevan veden laatu ja määrä asettaa lähtökohdan sille, miten vesiä tullaan käsittelemään, jonka takia laajan aiheen rajaus on tehty kuvaamaan hankkeen kaatopaikan veden aineita ja ominaisuuksia.

## 2 KAATOPAikkojen Suotovedet

### 2.1 Suotovedet

Suotovedet ovat nestemäistä seosta, joka muodostuu kaatopaikan stabiloitumisen aikana kaatopaikan kosteuden sekä mm. sadevesien suotautuessa jätemassojen läpi. Veteen liukenee jätteistä lukematon määrä erilaisia aineita ja yhdisteitä riippuen jätemassojen ominaisuuksista. Suotovedet voivat olla laadultaan hyvin vaihtelevia eri kaatopaikoilla niin jätetyyppien kuin kaatopaikan rakenteenkin takia. (Kaartinen ym. 2009.)

Kaatopaikan rakenteelliset ratkaisut ovat tärkeässä osassa suotovesien muodostumisessa. Oikein suunniteltuna kaatopaikan ulkopuolella olevat vedet eivät pääse kulkeutumaan kaatopaikalle vähentäen suotovesien määrää ja toisaalta estää haitallisten suotovesien kulkeutumista ympäristöön. Toimivat salaojitukset ja vesien kulkureittien suunnittelu edesauttaa vesien kulkeutumisen niille tarkoitettuihin altaisiin tai paikkoihin, joista vesien liikkeitä pystyy helposti hallitsemaan. Rakenteellisilla ratkaisuilla pystytään vähentämään sadevesien pääsyä jätemassoihin sekä valumavesien pääsyä alueen ulkopuolelle ja maaperään. Tällaisia ratkaisuja on esimerkiksi jätteiden peittorakenteet sekä kaatopaikan pohja- ja seinämärakenteet. (Kaartinen ym. 2009.)

Suotovesiä usein saatetaan helposti rinnastaa yhdyskuntajätevesiin. Suotovedet eroavat yhdyskuntajätevesistä monin eri tavoin. Yhdyskuntajätevedellä tarkoitetaan talousvettä tai talous- ja teollisuusjäteveden tai huleveden muodostamaa seosta. Talousvesi on asunnoista sekä laitoksista peräisin olevaa jätevettä, joka muodostuu pääosin kotitalouksien ja asiakkaiden toiminnan seurauksena. Teollisuusjätevesi on teollisuustuotannon tai muun elinkeinon harjoittamiseen käytetyn kiinteistön toiminnasta syntyvää jätevettä, joka ei ole talousjätevettä tai hulevettä. (Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä 1.11.2006/888, 2. §)

## 2.2 Suotovesiä koskeva lainsäädäntö

Kaatopaikkavesiä koskevan lainsäädännön avulla ohjataan suotovesiä sen koko elinkaaren ajan, muodostumisesta aina puhdistamiseen saakka. Kaatopaikkoja ja niiden vesiä säädellään jätelain 17.6.2011/646, ympäristönsuojelulain 1.9.2014/527 sekä valtioneuvoston asetuksen kaatopaikoista 1.6.2013/331 mukaan. Taulukossa 1 on tiivistetty kaatopaikkoja koskeva lainsäädäntö laittain.

Taulukko 1. Suotovesiä koskeva lainsäädäntö

Laki/asetus	Lain tarkoitus
Jätelaki 646/2011, 1. §	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Edistää kiertotaloutta ja luonnonvarojen käytön kestävyyttä.</li> <li>• Ehkäistä ympäristölle ja terveydelle aiheutuvia haittoja ja vaaroja.</li> </ul>
Ympäristönsuojelulaki 527/2014, 1. §	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pyritään ehkäisemään ympäristön pilaantumista, turvata ympäristön monimuotoisuutta.</li> <li>• Ehkäistä ympäristöä pilaavia toimintoja sekä ennaltaehkäistä ympäristövahinkojen tapahtumista.</li> </ul>
Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013, 1. §, 5. §, 44. §	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaatopaikkavesien hallinnan ja käsittelyn vaatimukset</li> <li>• Konkreettiset ohjeet toimintamenetelmiin <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Kaatopaikkavesien keräys, puhdistus ja laadun tarkkailu</li> </ul> </li> </ul>

Lainsäädäntö ei sanele suoranaisesti tiettyjä vaadittuja toimintatapoja, vaan asettaa lähtökohdat suotovesien oikeanlaiseen käsittelyyn. Lainsäädäntö asettaa mm. laatuvaatimuksia niin suotovesille kuin ympäristöä kuormittaville tekijöille. Tällöin turvataan suotovesien ympäristöä säästävä käsittely ja käsitelty suotovesi voidaan palauttaa luonnonvesiin, ilman että se aiheuttaa kuormitusta vesistöihin, muuhun ympäristöön tai aiheuta haittaa ihmisten terveydelle.

### 2.3 Suotovesien sisältämiä aineita ja ominaisuuksia

Kaatopaikkojen suotovedet sisältävät suuren määrän erilaisia aineita ja yhdisteitä, joista osa on haitallisia niin ympäristölle kuin vedenpuhdistusprosesseille. Suotovesistä tekee haasteelliseksi se, että ne ovat usein hyvin monihaitallisia ja sisältävät lukemattomia määriä haitallisia aineita, jotka ympäristöön päästessään voi aiheuttaa suuriakin vaurioita. Veden ominaisuudet ja pitoisuudet ovat hyvin yksilöllisiä eri kohteissa. Tyypillisesti suotovedet sisältävät erilaisia orgaanisia ja epäorgaanisia epäpuhtauksia, kuten humusta raskasmetalleja, ravinteita sekä erilaisia jätteistä peräisin olevia, ympäristölle myrkyllisiä aineita. Jätteiden määrä ja laatu sekä jätetäytön ikä ja hajoamisvaihe vaikuttaa vahvasti siihen, mitä aineita ja yhdisteitä liukenee veden kulkeutuessa massojen läpi. Aineiden esiintyminen ja pitoisuudet riippuvat kaatopaikalle sijoitetusta jätteestä sekä jätemassojen iästä. Jätemassojen ikä vaikuttaa mm. orgaanisen aineksen ja metallien pitoisuuksiin. Orgaanisia aineksia esiintyy suurina pitoisuuksina nimenomaan nuorilla ja vanhoilla kaatopaikoilla. (Kaartinen 2009.)

Kaatopaikkojen suotovedet sisältävät usein korkeina pitoisuuksina erilaisia raskasmetalleja, jotka ovat lähtöisin mm. teollisesta toiminnasta ja kotitalouksien jätteistä. Yleisesti suotovesissä esiintyviä ympäristölle myrkyllisiä raskasmetalleja on mm. rauta, kupari, kadmium, lyijy ja sinkki. (Feng ym. 2013.) Monet metallit ovat haitallisia jätteiden biohajoamiselle ja näin ollen haittaavat myös biologista typenpoistoprosessin toimintaa. Metallit esiintyvät kaatopaikkavesissä mm. liuenneina kationeina tai kiinnittyen orgaanisiin yhdisteisiin muodostaen kolloideja tai komplekseja. Metallien esiintymismuotoon liittyy vahvasti kaatopaikalla vallitsevat olosuhteet, kuten pH ja happipitoisuus. Metallien liukeneminen tapahtuu tehokkaimmin pH:n laskiessa, joka on tyypillistä nuorilla kaatopaikoilla. Hapettomassa ympäristössä metallit pyrkivät sitoutumaan humukseen tai saostumaan. Tyypillisesti rautaa ja mangaania esiintyy suurempina pitoisuuksina (Kaartinen 2009). Kadmiumin on tutkittu esiintyvän nuorien kaatopaikkojen suotovesissä vähäisinä pitoisuuksina, mutta pH:n laskiessa liukoisuus lisääntyy ja kadmiumin pitoisuus suotovesissä kasvaa. Näin ollen kadmiumia esiintyy tyypillisesti iäkkäämmillä kaatopaikoilla suurempina

pitoisuuksina. (Zhang ym. 2019.) Raskasmetallien on todettu aiheuttavan epä-organista likaantumista ja kerrostuneisuutta pinnoille, joka voi aiheuttaa mm. tukkeutumia. (Feng ym. 2013.)

Tyypillisesti kaatopaikkojen suotovedet sisältävät muihin jätevesiin verrattuna vain hyvin pieniä pitoisuuksia fosforia, mutta suuren pitoisuuden tyyppiä. Typpi on fosforin rinnalla yksi tärkeimmistä ravinteista luonnossa, mutta liiallisina määrinä edesauttaa vesistöjen rehevöitymistä. Tämän vuoksi suotovesissä esiintyvää tyyppiä pidetään haitallisena. Kaatopaikkavesien typpi on pääosin ammoniumtyypen muodossa, jota muodostuu jätteiden anaerobisen hajoamisen seurauksena, ja se esiintyy ammoniumioneina tai eliöstölle myrkyllisenä ammoniakkinä. Korkeat ammoniakkipitoisuudet ovat tyypillisiä etenkin vanhoilla kaatopaikoilla, eikä pitoisuudet yleensä laske kaatopaikan ikääntyessä (Li ym. 2021). Nitraatti- ja nitriittipitoisuudet ovat usein hyvin pieniä johtuen haittomista olosuhteista, jotka jätetäytössä vallitsee. Keskimääräiset kokonaistyyppien määrät nuorilla suomalaisilla kaatopaikoilla on n. 130 mg/l ja vanhoilla kaatopaikoilla n. 87 mg/l. (Kaartinen 2009.)

Jättemassojen läpi suotautuu suotoveteen lukematon määrä erilaisia orgaanisia aineita, joilla on vaikutusta biologiseen tyyppipoistoprosessiin. Kaatopaikan suotovedet sisältävät sekä helposti että vaikeasti biohajoavia orgaanisia aineksia. Helposti biohajoava orgaaninen aines pilkkoutuu mikrobitoiminnan seurauksena, lopulta hiilidioksidiksi ja metaaniksi. Iäkkäät ja stabiloituneet kaatopaikat sisältävät yleisesti ottaen pienempiä pitoisuuksia orgaanisista aineista. Kirjallisuudesta käy kuitenkin ilmi, että myös nuoremmilla kaatopaikoilla orgaanisen aineksen määrä on vähentynyt, johtuen mm. suotoveden kierrätyksestä, joka vähentää jätteen stabilointi-aikaa sekä lisää kaasuntuotantoa ja alentaa etenkin kemiallista hapenkulutusta. Yleisesti vanhaksi kaatopaikaksi luokitellaan yli 10 vuotta vanhat kaatopaikat, joiden kemiallinen hapenkulutus on alle 4000 mg/l ja nuoreksi, kun kaatopaikka on alle 5 vuotta vanha ja kemiallinen hapenkulutus on yli 10 000 mg/l (Li ym. 2021).

Kemiallinen hapenkulutus, chemical oxygen demand (COD) kertoo kemiallisesti hapetettavien yhdisteiden määrän. Biologisesti hajoavan orgaanisen aineen määrää ilmaistaan biologisen hapenkulutuksen, biological oxygen demand (BOD) avulla BOD-arvona. (Marttinen ym. 2000.) Arvo perustuu veden

biologiseen hapentarveeseen, eli suotovedessä olevien mikro-organismien hapenkulutukseen (Mellifiq 2023). Liennut orgaaninen aines sisältää myös huonosti biohajoavia orgaanisia aineita, kuten mm. humusyhdisteitä, jotka eivät hajoa jätetäytössä luonnollisesti (Kjeldsen ym. 2002). Helposti biohajoavia aineksia pystytään käsittelemään biologisissa prosesseissa, mutta vaikeasti biohajoavat orgaaniset aineet on eroteltava muusta jätteestä fysikaalis-kemiallisin menetelmin. (Marttinen ym. 2000.) COD-arvo paljastaa kaikki kemiallisesti hapettuvat aineet mukaan lukien BOD-arvot (Mellifiq 2023). BOD- ja COD-arvojen suhteen avulla pystytään kuvaamaan jätteiden hajoamisen tilaa. Suhdearvo pienenee sitä mukaa mitä pidemmälle jätteet hajoavat. (Marttinen ym. 2000) Alhainen BOD: COD-suhde kertoo siitä, että suotovesissä on enää vähän biohajoavia aineita ja yhdisteitä (Mellifiq 2023).

Ftalaatit ovat suotovesissä yleisesti esiintyviä orgaanisia aineita, joita käytetään mm. muovin pehmentiminä, maaleissa ja liimoissa. Edellä mainittujen jätteiden mukana ftalaatteja päätyy kaatopaikoille ja liukenee suotovesiin. Etenkin huonosti veteen liukenevia di-2-etyyliheksyyliftalaaatteja (DEHP-ftalaatit) on todettu esiintyvän suotovesissä. Ftalaatit hajoavat suhteellisen nopeasti ympäristössä, minkä vuoksi kertymistä ei juuri tapahdu. Erilaisia polyfluoratuja yhdisteitä (PFAS-yhdisteet) esiintyy kaatopaikojen suotovesissä suurina pitoisuuksina liuenneina mm. elektroniikkalaitteista, puhdistusaineista sekä kosmetiikkatuotteista. Palonestoaineita päätyy suotovesiin mm. kesto-  
muovien, verhoilukankaiden ja rakennusmateriaalien kautta. Palonestoaineista etenkin penta-, okta-, dekabromatut difetyylieetteri (BDE)- ja heksabromisyklododekaani (HBCD)-yhdisteitä esiintyy tyypillisimmin kaatopaikkojen suotovesistä korkeampina pitoisuuksina. (Mehtonen ym. 2012.)

Kaatopaikkavesissä esiintyy paljon erilaisia antibiootteja, joista osalla on haitallisia vaikutuksia typenpoistoprosessiin. Antibioottien vaikutuksista nitrifikaatioon tutkitaan koko ajan, eikä selkeää selittävää syytä haitallisuuteen ole löydetty. On tutkittu, että antibioottien rakenteelliset ominaisuudet vaikuttavat sen haitallisuuteen. Antibioottien rakenteiden ja niiden myrkyllisten vaikutusten välisestä suhteesta nitrifikaatioon tiedetään kuitenkin vielä vain vähän. Antibioottien vaikutukset denitrifikaatioon eivät ole osoittautuneet yhtä merkitykselliksi, kuin nitrifikaatioon. (Huang, ym. 2016.)

MLS-ryhmän antibiootit ja sulfonamidit ovat maataloudessa ja lääketieteessä laajalti käytettyjä antibiootteja, jotka ovat vaikeasti hajoavia yhdisteitä ja näin ollen kertyvät jatkuvasti ympäristöön. Korkeita pitoisuuksia on mitattu etenkin kaatopaikkaympäristöissä. Suomessa antibioottien käyttö maataloudessa on kuitenkin vähäistä verrattuna muihin maihin. Makroilidi-, linkosamidi- ja streptogramiini-antibioottien (MLS-ryhmä) ollessa vahvasti hydrofobisia, ei niitä esiinny juurikaan suotovedessä. Sulfonamidit ovat hydrofiilisiä, jonka vuoksi niitä päätyy helposti suotovesiin. (Gong ym. 2022.) Eri sulfonamidien vaikutusta nitrifikaatioon on tutkittu, ja nitrifikaation toiminnan kannalta myrkyllisimmäksi sulfoamidiksi on todettu sulfadimetoksiini (SDM) sen inhiboidessa nitrifikaatiovaihetta (Huang ym. 2016). Siprofloksasiini on yleisesti lääkkeissä käytetty antibiootti, jota päätyy jätteen mukana moniin vesiympäristöihin ja etenkin jäteveteen. Siprofloksasiini häiritsee aktiivilietteen aerobista toimintaa vähentäen orgaanisen aineksen poistamisen tehokkuutta. Biohiilen on tutkittu olevan hyvä lisäaine nitrifikaatiokyvyn parantamiseen, mikäli siprofloksasiinia esiintyy suotovedessä. (Kim & Oh 2021.)

### **3 DEVO-HANKE**

Opinnäytetyössä keskitytään Devo-hankkeen Ristiinan suljetun kaatopaikan suotovesien haastaviin tekijöihin, joilla on vaikutusta nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessin toimimiseen. Ristiinan vanha kaatopaikka on suljettu ja peitetty. Vuonna 2019 alueelle on rakennettu suotovesien biosuodatinlaitteisto Hulevesien käsittelyn tutkimus- ja kehitys- ympäristö- hankkeen (Huky-hanke) toimesta. Pilot-laitteistoa on sittemmin kehitetty eteenpäin Devo-hankkeen aikana sen nykyiseen muotoonsa.

Pilot-laitteisto koostuu neljästä osasta; puhdistamattoman suotoveden pump-pauksesta, raudanpoistoyksiköstä, kantoaine- ja ilmastusyksiköstä sekä bioreaktorista. Suotovesi pumpataan suotovesikaivosta järjestelmään esipuhdistimen läpi, jonka tarkoituksena on saostaa suotoveden sisältämä rauta järjestelmän pohjalle ilmastuksen ja tarpeellisen viipymääjan avulla. Raudanpoistoyksikössä veden viipymäaika on n. 5 päivää. Esipuhdistettu vesi johdetaan aktiivilietekierrolla varustetun ilmastusyksikön kautta 3-lohkoiseen bioreaktoriin.

Bioreaktorin suodatinmateriaaleina on käytetty kuusibiohiiltä sekä lehtipuuhaiketta. Bioreaktorista käsitelty suotovesi päättyy tasausaltaaseen. (Pulliainen 2023.)

Suotoveden puhdistus nykyisen pilot-laitteiston avulla ei ole saavuttanut toivottunlaisia tuloksia. Haasteita on kohdattu etenkin nitrifikaatiovaiheen vajavaisen toiminnan kanssa, eikä typenpoistotehokkuutta ole saatu toivotulle tasolle. Prosessiin vaikuttavia ongelmia ei olla pystytty vielä paikallistamaan, mikä osallaan haastaa sen kehittämistä.

### 3.1 Käsittelemättömän suotoveden laatu

Ristiinan suljetun kaatopaikan suotovesi haisee vahvasti erilaisille kemikaaleille ja sen oletetaan olevan erittäin monihaitallista. Nitrifikaatio-denitrifikaatio-prosessin toiminnassa kohdattujen haasteiden vuoksi epäilynä on, että nitrifikaatiobakteerit eivät ole elinkykyisiä käsittelemättömässä suotovedessä. (Pulliainen 2023.) Taulukossa 2 on listattu eri parametreja, joita käsittelemättömästä suotovedestä on mitattu. Taulukossa mainittujen lisäksi suotoveden sisältämistä aineista ja niiden pitoisuuksista ei ole tietoa.

Taulukko 2. Käsittelemättömän suotoveden keskimääräisiä pitoisuuksia (Mykkänen ym. 2021)

Mitattu parametri	Keskimääräinen mitattu arvo
Kokonaisrauta	105 mg/l
Liukoinen rauta	73 mg/l
Kloridi	113 mg/l
Kromi	32 mg/l
Sinkki	12 mg/l
Arseeni	12 mg/l
Kokonaistyyppi	150 mg/l
Ammoniumtyppi	120 mg/l
Happipitoisuus	0,6 mg/l
pH	6,6
COD	95 mg/l

Suotovesi on todettu erittäin rautapitoiseksi. Lisäksi suotovesi sisältää tiedettävästi korkeina pitoisuuksina kloridia ja orgaanisia yhdisteitä sekä pienempinä pitoisuuksina raskasmetalleja, kuten kromia, sinkkiä ja arseenia. Käsittelemättömässä suotovedessä typpi esiintyy pääosin ammoniumtyyppinä. Tulevan suotoveden lämpötila on suurimman osan vuodesta hyvin matala ja korkeimmillaankin alle 10 °C.

### 3.2 Suotoveden monitorointi

Pilot-laitteiston eri vaiheita monitoroidaan niin kenttämittarein kuin vesinäytteitä analysoimalla. Näytteenottopisteiden tuloksia seuraamalla pyritään seuraamaan prosessin toimintaa ja paikallistaa ongelmia, joita prosessin aikana ilmenee. (Mykkänen ym. 2021, 107–111.) Suotoveden laatua monitoroidaan kenttämittareilla viikoittain biologisen typenpoistoprosessin ollessa käynnissä. YSI ProDSS-kenttämittarilla mitataan veden happipitoisuutta, sähkönjohtokykyä, pH-arvoa, lämpötilaa ja sameutta 15 eri mittauspisteestä suotoveden edetessä järjestelmän läpi. Suotovesinäytteitä otetaan noin kahden viikon välein neljästä eri näytteenottopisteestä. Näytteitä kerätään prosessin jokaisesta eri vaiheesta, eli käsittelemättömästä suotovedestä, esipuhdistetusta suotovedestä, ilmastetusta suotovedestä sekä täysin käsitellystä suotovedestä. Vesinäytteistä määritettiin typen ja sen kaikkien fraktioiden pitoisuudet, happipitoisuus, rautapitoisuus ja kemiallinen hapenkulutus sekä raskasmetallipitoisuuksia. (Pulliainen 2023.)

Veden suuri rautapitoisuus on osoittautunut haastavaksi tekijäksi nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessin toimivuuden kannalta, joten biosuodatinjärjestelmän eteen asennettiin raudanpoistoyksikkö. Raudanpoistoyksikön avulla onnistuttiin saavuttamaan keskimäärin 96,9 %:n reduktio kokonaisrautapitoisuuteen ja 99,6 %:n reduktio liukoisen raudan pitoisuuteen. Esikäsitelyyn jälkeen kokonaisrautapitoisuus suotovedessä on keskimäärin enää 7,5 mg/l ja liukoisen raudan keskimääräinen pitoisuus 0,215 mg/l. (Pulliainen 2023.)

Raskasmetalleja on analysoitu prosessin kaikista neljästä vesinäytepisteestä. Tutkituista raskasmetalleista lyijy-, arseeni-, koboltti-, nikkeli-, sinkki-, vanadiini- ja kromipitoisuudet olivat yli määritysrajan. Kaikki pitoisuudet olivat alle 40 µg/l käsittelemättömässä suotovedessä. Suurimmat reduktiot saavutettiin

arsenin, kromin ja vanadiinin pitoisuuksissa. Sinkin ja elohopean pitoisuudet nousivat prosessin edetessä, ja sinkkipitoisuus oli noussut jopa yli 200 % bioreaktorista tullessa vedessä. (Pulliainen 2023.)

Raudanpoistoyksikön hapettimien ansiosta lähes hapettoman suotoveden happipitoisuus moninkertaistuu esipuhdistusprosessin aikana, ollen 5,3–8,3 mg/l:n välillä esipuhdistuksen jälkeen. Lisähapettimen asentamisen jälkeen happipitoisuus on noussut esipuhdistimen jälkeen 8,5–9,9 mg/l:n välille. Hapenkulutus kasvaa huomattavasti bioreaktorissa, sillä mittausten perusteella bioreaktorista poistuvan veden happipitoisuus on keskimäärin enää 0,2 mg/l. Veden hapetuksen lisäämisellä ei ole saavutettu toivottuja tuloksia aikaan prosessin tehokkuuden kannalta. (Pulliainen 2023.)

Suotoveden kemiallisen hapenkulutuksen on todettu esipuhdistuksen ja hapetuksen aikana vähenevän n. kolmanneksen, mutta bioreaktorissa nousevan huomattavasti. Käsittelemättömän veden kemiallinen hapenkulutus on seuranta-kaudella ollut keskimäärin 353 mg/l ja bioreaktorista poistuvan veden pitoisuus keskimäärin 450 mg/l. (Pulliainen 2023.)

Mittausten perusteella prosessin edetessä veden lämpötila nousee, ja lämpimimmillään suotoveden lämpötila on noussut yli 20 °C:n veden kulkeutuessa bioreaktorista tasausaltaaseen. Veden lämpötilan muutos on riippuvainen ilman lämpötilasta, sillä suotoveden lämpötila tasaantuu prosessin aikana lähelle ilman lämpötilaa. Typenpoiston on todettu toimivan tehokkaimmin suotoveden lämpötilan ollessa korkeimmillaan eli kesän lämpimimmillä ajanjaksoilla. (Pulliainen 2023.)

Järjestelmän tuloputken virtaus on keskimäärin 2,9 m<sup>3</sup>/d ja raudanpoistoyksikön poistoputkessa 2,7 m<sup>3</sup>/d. Virtausmittaukset on tehty astiamittauksin, jonka vuoksi tulokset ovat vain suuntaa antavia. Laskennallisesti suotoveden viipymäaika koko järjestelmässä on keskimäärin 15,1 vuorokautta. Mittausten perusteella virtaamassa on esiintynyt suuria vaihteluita johtuen mm. kaatopalkalta tulevan suotoveden määrän vaihtelusta, jolloin pumpun tehoa ei olla pystytty vakioittamaan. (Pulliainen 2023.) Suotoveden pH-arvo nousee hieman järjestelmän edetessä, ja tasausaltaaseen päätyessä pH on keskimäärin 8,0. (Mykkänen ym. 2021, 125–126.)

Suotoveden ammoniumtyyppipitoisuudet ovat pysyneet ennallaan, eikä nitriittipitoisuuksien ja siitä edelleen nitraattipitoisuuksien nousua juuri ole tapahtunut. Tämä itsessään kertoo typenpoiston toiminnan heikkoudesta. Nitriittipitoisuuksia on havaittu hyvin pieniä määriä muutamissa näytteissä, mutta nitraattipitoisuuksien nousua on havaittu vain lämpimimmillä ajanjaksoilla. Parhaimmillaan on päästy 43 % kokonaistypen reduktioon heinäkuussa 2022, jolloin kokonaistypen pitoisuus putosi 160 mg/l:sta 92 mg/l:n. Pääosin reduktio on kuitenkin ollut vähäistä tai sitä ei ole tapahtunut lainkaan. (Pulliainen 2023.)

## **4 BIOLOGINEN TYPENPOISTO**

### **4.1 Biologisen typenpoiston merkitys**

Typpeä esiintyy suotovesissä suurina pitoisuuksina lähinnä ammoniumtypen ja orgaanisen typen muodossa. Typpi on fosforin kanssa pääosin Suomen vesistöjen perustuotantoa rajoittava tekijä. Pitoisuuksien kasvaminen edesauttaa vesistöjen rehevöitymistä, joka aiheuttaa mm. vesikasvillisuuden runsastumista, kasvi- ja eliölajiston muuttumista sekä vesistön sisäistä kuormittumista. (Syke 2013). Typenpoisto on tärkeä toimenpide ennen kuin suotovesiä johdetaan vesistöihin. Syy suotovesien typenpoiston tarpeeseen liittyy suurimmilta osin vesistöjen rehevöitymisen ehkäisemiseen. Typpipitoisten suotovesien päätyminen luonnonvesiin aiheuttaa rehevöittävää kuormitusta, joka voi näkyä etenkin pienissä sekä herkissä vesistöissä suurina muutoksina. (Antikainen 2008.)

Biologista käsittelyä käytetään laajasti suotovesien typenpoistoon alhaisten kustannuksien sekä huoltovapauden vuoksi, ja etenkin vanhoilla kaatopaikoilla biologisia menetelmiä pidetään suotuisimpina. Biologisen typenpoistoprosessin toimiessa oikein, se toimii suurelta osin omalla painolla eikä vaadi huolto- toimenpiteitä yhtä lailla kuin esimerkiksi kemialliset puhdistusmenetelmät. Käytössä on useita menetelmiä, kuten tässäkin opinnäytetyössä käsiteltävä perinteinen nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessi. Lisäksi on kehitelty uudempiä menetelmiä, kuten anaerobinen ammoniumin hapetusmenetelmä, anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) sekä tehostettu biologinen typenpoistoprosessi, jossa käytetään hallitsevia bakteereita. Enenevässä määrin käyttöön on tullut myös perinteinen nitrifikaatio-denitrifikaatiomenetelmä yhdistettynä

ANAMMOX-prosessiin, jonka etuina on korkea typenpoistokapasiteetti sekä alhainen energiankulutus, eikä se tarvitse ylimääräistä hiilenlähdettä. Tärkeintä kaatopaikkojen biologisessa käsittelyssä on osata valita oikea menetelmä suotovesien ominaisuuksiin pohjautuen. (Li ym. 2021.)

#### **4.2 Nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessi**

Typen biologinen poisto tapahtuu kaksivaiheisen nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessin avulla. Nitrifikaatiovaiheessa tapahtuu nitriitin ja ammoniumin hapettuminen nitraatiksi aerobisissa olosuhteissa bakteeritoiminnan avulla. Nitraatin poistamiseksi vedestä tarvitaan anoksisissa oloissa tapahtuva denitrifikaatiovaihe, jossa mikrobit pelkistävät nitraatin muodostaen typpikaasua. Anoksisissa olosuhteissa happea esiintyy ainoastaan sitoutuneena veden sisältämiin aineksiin. (Juholin 2019.) Anoksinen hajotusvaihe tarvitsee toimiakseen orgaanisen hiilenlähteen, joka voi olla peräisin jätevedestä itsestä tai vaihtoehtoisesti prosessiin lisätty orgaaninen hiilenlähte. Yleisesti käytettyjä hiilenlähteitä on mm. metanoli, etikkahappo sekä melassi. (Kaartinen ym. 2009, 31.)

Oikein toimiessa nitrifikaatio-denitrifikaatiolla voidaan saavuttaa jopa 90 % typenpoisto puhdistettavasta vedestä. Pelkän nitrifikaation avulla saavutetaan usein n. 30 %:n typenpoistotulos. Hyvä kokonaistypenpoiston onnistuminen indikoi vähäisempää kemiallisten haitta-aineiden esiintymispitoisuutta puhdistetuissa vesissä. Tämä johtuu siitä, että typpeä hajottavat bakteerit erittävät entsyymeitä, jotka pystyvät hajottamaan haitta-aineita kemiallisesti. Kun aktiivilietteessä on runsaasti nitrifioivaa bakteerikantaa, pystyy se tehokkaammin hajottamaan suotovedestä erilaisia haitta-aineita. (Vieno 2014, 47.) Nitrifikaatiovaihe on yleisesti ottaen herkempi ympäristön aiheuttamille häiritseville tekijöille kuin denitrifikaatiovaihe (Kim & Oh 2021).

### **5 TOTEUTUS**

Opinnäytetyö on toteutettu kirjallisuuskatsauksena ja työssä käsiteltiin haasteita, joita kohdataan kaatopaikan suotovesien biologisessa typenpoistoprosessissa. Aihe itsessään on hyvin laaja, joten rajausta oli tehtävä. Päädyttiin keskittymään Devo-hankkeen Ristiinan suljetun kaatopaikan suotovesiin ja sen pohjalta hakea ominaisuuksia, jotka haastavat prosessia. Hankkeelta saamien tietojen sekä internetistä löytyvien lähteiden perusteella haettiin tietoa

niin suotovesiin kuin nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessiinkin liittyen. Aineiston keruu tapahtui internetlähteiden sekä Devo-hankkeesta saatujen materiaalien avulla.

Artikkeleita etsittiin pääasiassa Science Direct- sekä National Library of medicine-sivustolta. Hakua rajattiin käyttämällä mm. vuosilukuja mahdollisimman ajankohtaisien julkaisujen löytämiseksi. Pääasiassa etsittiin 2019 vuoden jälkeen tehtyjä julkaisujan, mutta mikäli hakutuloksia oli vähän, niin aikajanaa pidennettiin. Yleisiä hakusanoja "Landfill", "Leachate", "nitrification", "denitrification" käytettiin paljon sekä edellä mainittujen lisäksi spesifimpiä hakusanoja tiettyjä asioita etsiessä, mm. "C/N-ratio", "low temperature" sekä eri yhdisteiden tai aineiden nimiä englanniksi liitettynä "effects"-sanaan. Suuri osa hyödynnetyistä artikkeleista löytyi kuitenkin toisten artikkeleiden ehdotuksien kautta. Useissa artikkeleissa saattoi olla samaa asiaa, joten lähteitä valikoitiin käytettäväksi oman harkinnan mukaan. Lähdekriittisyys kasvoi työn edetessä, kun useita saman aiheen artikkeleja lukiessa saattoi huomata poikkeavuuksia mm. annetuissa lukuarvoissa.

Suomenkielisiä hakuja tehtiin lähinnä Google Scholarin tai Googlehakujen kautta. Myös näissä käytettiin aikarajausta jonkin verran ja sitä tarvittaessa pidennettiin. Hakusanoina käytettiin mm. "suotovesi", "kaatopaikka", "nitrifikaatio", "denitrifikaatio", "biologinen typenpoisto" sekä synonyymejä edellä mainituille. Hakumenetelmät olivat käytännössä samat kuin englanniksi, mutta eri kielellä. Suomenkielisiä lähteitä löytyi selkeästi englanninkielisiä vähemmän, ja suurin osa valideista lähteistä olikin pro graduja tai opinnäytetöitä, jolloin päädyttiin selaamaan niiden lähdeluetteloita ja sitä kautta löytyi useita hyödynnettäviä lähteitä niin suomen kuin englanninkielisinä.

Hyödyllisiä E-kirjoja löytyi Kaakkurin kirjastosta 2 kappaletta hakemalla kirjan nimen perusteella. Opinnäytetyön aiheeseen liittyvien muiden opinnäytetöiden lähdeluetteloja selaamalla löytyi alun perin teosten nimet, jotka kumpikin löytyivät uudempina painoksina Kaakkurin kirjastosta. Muitakin hyödyllisiä internetlähteitä löytyi lähdeluetteloita selaamalla. Finlexiä ja EUR-lexiä käytettiin lainsäädännön lähdesivustoina. Lait löytyivät nimellä hakemalla sivustoilta ja selaamalla lakipykälä.

Tuoreita ja opinnäytetyön kannalta hyödyllisimpiä lähteitä oli Devo-hankkeesta saadut materiaalit, joiden avulla Ristiinan suljetun kaatopaikan suotoveden laadusta sekä prosessi toiminnasta sai selkeän ja ajankohtaisen kuvan. Opinnäytetyötä varten saadut materiaalit ovat luottamuksellisia, joten ne eivät ole yleisesti saatavilla. Materiaaleja kerääntyi niin suullisesti palaverien yhteydessä kuin kirjallisestikin ja sähköpostin välityksellä.

Lopullinen lähdemateriaali koostui yhteensä 29 eri lähteestä. Lähteitä käsiteltiin kriittisesti eikä kaikkea löydettyä lähdemateriaalia käytetty. Osa lähteistä kertoi täsmälleen samoja asioita, jolloin valittiin se lähde, jossa oli enemmän hyödyllistä tietoa. Myös epäluotettavan oloiset lähteet jätettiin pois sekä sellaiset yksittäiset lähteet, joiden antamaa tietoa ei pystynyt varmistamaan minäkään toisen lähteen kautta. Pyrin etsimään ajankohtaisia ja uusia lähteitä, mutta loppujen lopuksi 10/29 lähteistä oli vuodelta 2019 tai uudempia. Vanhemmista lähteistä saadut materiaalit kuitenkin olivat sellaisia, jotka eivät ole vanhentunut tai muuttunut ajan saatossa.

## **6 TULOKSET**

Suotovesien laatu määräytyy jätteiden ominaisuuksista ja laatu vaihtelee sen mukaan, minkä tyyppisen kaatopaikan jätemassojen läpi se imeytyy. Tämä tekee suotovesistä uniikkeja, eikä eri kaatopaikkojen suotovesiä voi välttämättä suoraan verrata toisiinsa. Laatuun vaikuttaa mm. kaatopaikan jätteiden koostumus, kaatopaikan rakenteelliset ratkaisut sekä ympäristön olosuhteet. Veden käyttäytyminen, kuten virtaama, haihtuvuus ja sitoutuminen vaikuttaa myös suotoveden laatuun ja määrään. (Kaartinen 2009 & Kim ym. 2006.)

Kaatopaikkaympäristössä, jossa vedenlaatuun tai olosuhteisiin ei voida laitosolosuhteiden lailla vaikuttaa, tulee erinäisiä haasteita liittyen prosessin toimintaan. Prosessin toimintaa haastaa useat eri tekijät, joista kaikkia ei olla pystytty paikallistamaan. Ilmeisimpinä ja yleisimpinä tekijöinä on suotovesien alhainen lämpötila sekä veden sisältämät useat haitalliset aineet ja yhdisteet, jotka häiritsevät nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessin toimintakykyä. Typenpoistoprosessi on kaksivaiheinen, ja kummankin vaiheen toiminta on riippuvainen useista erilaisista tekijöistä. Vaiheet ovat kytköksissä toisiinsa, eikä denitrifikaatiovaihe pysty toimimaan ilman nitrifikaatiovaihetta.

## 6.1 Nitrifikaatioon vaikuttavat tekijät

Nitrifikaatiovaiheen toimintaan vaikuttaa useat eri tekijät, joista merkittävimmin nousee esille lämpötilaolosuhteet sekä ammoniumtyppikuormitus (Kim ym. 2006). Nitrifioivat bakteerit ovat herkkiä niin ympäristön muuttuville tekijöille kuin inhiboiville aineille, jonka vuoksi suotoveden sisältämiä haitallisia aineita ja niiden pitoisuuksia on syytä selvittää (Bitton 2011, 92). Taulukossa 3 on esitetty nitrifikaatioon vaikuttavia parametrejä ja vaikutuksia, joita ilmenee arvojen erotessa optimaalisesta.

Taulukko 3 Nitrifikaatioon vaikuttavat tekijät.

Parametri	Optimaalinen arvo	Vaikutus
Viipymäaika	> 15 vrk	Nitrifikaatiobakteerit kasvunopeudeltaan hitaita –eivät kerkeä vaikuttamaan lyhyellä viipymäajalla tehokkaasti (Lehtniemi 2004, 43).
Lämpötila	30–35 °C	Lämpötilan lasku nostaa lieitekää (Kivisalmi s.a.).
pH	7–8.5	pH:n lasku tai nousu optimaalisesta rajoittaa nitrifikaatiota (Chen ym. 2020, 172–173).
NH <sub>3</sub>	Matala	Korkea pitoisuus häiritsee NO <sub>2</sub> - ja NO <sub>3</sub> - bakteerien toimintaa (Kim ym. 2006).
Happipitoisuus	Korkea	Liian alhainen happipitoisuus rajoittaa nitrifikaation tehokkuutta (Chen ym. 2020, 170–171).
C:N-suhde	< 4	Nitrifikaatiobakteerien kasvu rajoittuu suhteen kasvaessa (Kumar ym. 2011).

Nitrifikaatiobakteerit ovat kasvunopeudeltaan hitaita, ja bakteerit tarvitsevat tyypillisesti 15 vuorokautta tai pidemmän viipymäajan riippuen olosuhteiden

optimaalisuudesta (Lehtniemi 2004, 43). Nitrifikaation käynnistysaikaa pidentää mm. myrkyllisten kemikaalien, antibioottien sekä raskasmetallien esiintyminen suotovedessä. Nitrifikaatiobakteereiden elinkyvyn kannalta myrkyllisiä yhdisteitä ovat mm. syanidi, tiourea, fenoli, aniliinit sekä raskasmetallit, kuten rauta, lyijy, kupari, sinkki ja kadmium. (Bitton 2011, 91.)

Lämpötilalla on suuri vaikutus nitrifikaatioaktiivisuuteen. Nitrifikaatiota on todettu tapahtuvan jopa 5 °C:n lämpötilassa, mutta tehokkaimmillaan nitrifikaatiovaihe toimii 30–35 °C:n lämpötilassa (Kivisalmi s.a.). Laskennallisesti jokainen 6 °C:n lämpötilan lasku kaksinkertaistaa minimilieteiän pituutta. Tehokkaimmillaan prosessi saadaan toimimaan, kun järjestelmä suunnitellaan perustuvan siihen vähimmäislämpötilaan, jonka oletetaan reaktorissa vallitsevan. Myös lämpötilan nousu optimaalisesta 6 °C:n välein kaksinkertaistaa puolikyläisyysvakiota ( $K_{AND,T}$ ) kasvattaen ammoniakkin ominaiskasvunopeutta, joka pidentää lieteikää ja hidastaa prosessia. (Chen ym. 2020, 167–168.)

Nitrifikaatiobakteerit ovat herkkiä nopeille lämpötilanmuutoksille, vaikka ne olisivatkin optimaalisella lämpötilaskaalalla. Nopea lämpötilan nostaminen ei nopeuta merkittävästi nitrifikaatiobakteerien lisääntymistä, samoin nopea lämpötilan pudottaminen aiheuttaa bakteerien odotettua suuremman lisääntymisen vähenemisen. Nitrifioivien bakteerien suorituskyvyn kannalta adaptiivisesti muuttuva lämpötila on kaikkein optimaalisin. (Lehtniemi 2004, 45.)

Lämpötilan pudotessa suotoveden happipitoisuuden merkitys lisääntyy ja ilmastustilavuutta on lisättävä prosessin toimimisen edistämiseksi. Liuenneen hapen pitoisuus on tärkeä nitrifikaation toiminnan kannalta, sillä suotovedessä oleva vapaa ammoniakki on nitrifioivien bakteerien kasvua rajoittava ravintoaine. Liuenneen hapen ansiosta myrkyllinen ammoniakki hapettuu nitriitiksi ja edelleen nitraatiksi. Hapensaannin on oltava riittävä prosessin toiminnan kannalta. Liuenneen hapen ollessa vähäistä, korostuu reaktorissa tapahtuvan virtauksen merkitys. Epätasainen virtaus häiritsee prosessia ja näin ollen vaatii pidempää lieteikää. (Chen ym. 2020, 170–171.)

Reaktorissa vallitsevat olosuhteet tulisi olla sellaiset, ettei hapettomia alueita pääse syntymään. Nitrifioivat bakteerit kasvavat ainoastaan aerobisella vyö-

hykkeellä, mutta bakteerien endogeeninen hengitys tapahtuu myös hapettomilla alueilla, joka ei ole toivottua. Ammoniakkia hapettavien organismien osuus haihtuvassa kiintoaineessa on sama ilmastamattomalla ja ilmastetulla vyöhykkeellä, jolloin lietemassaosuuksista voi heijastua nitrifiointiainemassojen jakautumista. Kiinteän lietteen vähimmäisaerobinen massaosuus tulisi mitoittaa huomattavasti laskennallista arvoa suuremmaksi, sillä nitrifikaatioprosessi muuttuu epävakaaksi ja ammoniakkipitoisuus kasvaa lietteen massaosuuden laskiessa. Liian vähäinen massaosuus johtaa nitrifikaation toimimattomuuteen. (Chen ym. 2020, 168–169.)

Korkea vapaan ammoniakin pitoisuus häiritsee sekä nitraattia että ammoniumtyyppiä hapettavien bakteerien toimintakykyä. Suotoveden pH ja lämpötilaolosuhteet vaikuttavat vapaan ammoniakin muodostumiseen ja pitoisuuteen, sen asettuessa suotovedessä esiintyvän ammoniumtyypin kanssa tasapainoon. Äkillinen ammoniumtyyppipitoisuuden nousu voi johtaa nitrifikaatiotehon heikkenemiseen. (Kim ym. 2006.)

Korkea pH nostaa ammoniakkipitoisuutta vähentäen nitrifikaatioaktiivisuutta etenkin, kun ammoniumtyypin pitoisuus on suuri (Kim ym. 2006). Nitrifikaatiobakteerit ovat herkkiä pH-arvon vaihteluille. Suotoveden optimaalinen pH-arvo nitrifikaatiobakteerien toiminnan kannalta on 7–8,5 välillä, jonka ulkopuolella nitrifikaation tehokkuus laskee jyrkästi. Nitrifikaation on todettu lakkaavan pH:n noustessa yli 9,5. (Chen ym. 2020, 172–173.)

Yleisesti nitrifikaationopeuden oletetaan laskevan hiili: typpi -suhteen (C:N) kasvaessa, sillä tällöin kilpailevien heterotrofisten organismien kasvu on suurempaa. Tämä johtaa siihen, että nitrifikaation kasvu rajoittuu ja hidastuu. Nitrifikaatio toimii parhaiten, kun C:N-suhdearvo pysyy alle 4:ssä, jotta sisäinen kilpailuasetelma ei aiheuta häiriötä prosessin toiminnan kannalta. (Kumar ym. 2011.)

Tyypenpoistoprosessin toiminnan varmistamiseksi on tärkeää huomioida jäteveden ravinteiden määrä. On olemassa yleinen suhde, jonka mukaan suotovedessä biologisen hapenkulutuksen, typen ja fosforin tulee olla suhteessa 100 : 5 : 1 (BOD : N : P) parhaan tyypenpoistotuloksen saavuttamiseksi. Tämä

perustuu siihen, että typpeä ja fosforia tulee esiintyä vedessä tarpeeksi verrattuna biologiseen hapenkulutukseen, jotta bakteerikanta pystyy sekä hajottamaan materiaalia ravinnoksi että lisääntymään. (Dias ym. 2005.)

## 6.2 Denitrifikaatioon vaikuttavat tekijät

Denitrifikaatiovaihe ei ole nitrifikaatiovaiheen tavoin yhtä herkkä erinäisille ulkoisille tekijöille, kuten myrkyllisille kemikaaleille tai ympäristön aiheuttamille muutoksille. Merkittävimmin denitrifikaation toimintaan vaikuttaa orgaanisen hiilen riittävä määrä typeen suhteutettuna. Taulukossa 4 on esitetty parametrejä, joilla on vaikutusta denitrifikaation tehokkuuteen.

Taulukko 4 Denitrifikaatioon vaikuttavat tekijät.

Parametri	Optimaalinen arvo	Vaikutus
Lämpötila	35–50 °C	Lämpötilan lasku hidastaa denitrifikaatiota (Bitton 2011, 92).
C:N-suhde	> 3	Riittämätön hiilenlähde rajoittaa voimakkaasti denitrifikaation tehokkuutta (Kumar ym. 2011).
pH	6,5–7,5	pH:n lasku tai nousu optimaalisesta rajoittaa denitrifikaatiota (Rantanen 1999).

Denitrifikaatio tapahtuu tehokkaimmin lämpimämmissä, 35–50 °C:n lämpötilaolosuhteissa. Matalammissa lämpötiloissa prosessi hidastuu, mutta toimii jopa 5 °C lämpötilassa. (Bitton 2011, 92.) Denitrifikaation kannalta suotuisin pH-alue on hieman alhaisempi kuin nitrifikaation, 6,5–7,5 välillä (Rantanen 1999).

Denitrifikaatiovaiheen onnistumisen kannalta kriittisimpiä parametrejä on C:N-suhde. Denitrifikaatiovaihe tarvitsee toimiakseen tarpeeksi suuren orgaanisen hiilen lähteen vedestä. (Kumar ym. 2011.) Alhainen orgaanisen hiilen ja typen suhde estää voimakkaasti denitrifikaatioprosessia johtuen orgaanisen hiilen lähteen puutteesta. Tämän vuoksi ulkoisen hiilenlähteen lisäämistä pidetään välttämättömyytenä (Li ym. 2021). Denitrifikaationopeus määrittyy käytetyn hiilen lähteen perusteella. Mitä pienimolekyylisempi hiilenlähde on käytettävissä,

sen nopeammin denitrifikaatio tapahtuu. (Rantanen 1999.) Typenpoistoprosessin ulkoisina hiilenlähteinä voidaan hyödyntää mm. aktiivilietettä, ruokajätteitä sekä muuta kiinteää orgaanista jätettä. Koska orgaaninen jäte sisältää myös typpeä, tulisi hiilenlähteen olla C:N-suhteeltaan korkea, jotta lisää typpikuormitusta ei pääse syntymään. (Li ym. 2021.)

Teoreettisesti denitrifikaatioon vaadittava C:N-suhdeluku on 2,86 (COD/NO<sub>3</sub>-N), mutta kirjallisuudessa käy ilmi, että käytännössä suhdeluvun on oltava teoreettista arvoa suurempi prosessin toiminnan kannalta, etenkin jos nitrifikaatiota tapahtuu samaan aikaan. Denitrifikaatiotehokkuuden on todettu kasvavan huomattavasti suhdeluvun ollessa suurempi kuin 3, mutta parhaimmat typenpoistotulokset on saavutettu C:N-suhteen ollessa keskimäärin yli 8. (Kumar ym. 2011.)

## **7 JOHTOPÄÄTÖKSET**

Kehittyvässä yhteiskunnassa suotovesien laatu muuttuu ja uusia menetelmiä niin jätteiden kuin suotovesien käsittelylle syntyy jatkuvasti. Tämän vuoksi kehityksen perässä on pysyttävä myös suotovesien käsittelyssä, jotta ympäristön kuormitus ei lisäänty entisestään. Kaatopaikkojen suotoveden laatua ja asianmukaista puhdistamista pyritään ohjaamaan lainsäädännön avulla. Kaatopaikalle päätyviä jätteitä säätelemällä vaikutetaan suotoveden laatuun ja rakenteellisilla vaatimuksilla turvataan suotovesien pysyminen erillään ympäristöstä. Suotovesien puhdistamista säätelevän lainsäädännön avulla turvataan suotoveden asianmukainen käsittely ennen sen johtamista luonnonvesiin.

Suotoveden lähteellä on suuri vaikutus veden laatuun ja vedessä vallitseviin olosuhteisiin. Kaatopaikkojen ollessa erilaisia, sisältäen erityyppisiä jätteitä eri verran, on suotovesien laadut hyvin yksilöllisiä ja vaihtelevia. Veden jatkuva analysoiminen on tärkeää, jotta veden laadusta saadaan mahdollisimman kattava kuva ja muutokset huomataan ja niihin pystytään reagoimaan. Suotoveden laatu voi muuttua mm. jätetäytön hajoamisen edetessä. (Chen ym. 2020, 167.)

Keskeisimpiä tekijöitä nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessin toiminnan kannalta ovat veden lämpötila, ravinteiden määrä ja niiden suhde mm. hapen- tai hiilen- tarpeeseen. Lisäksi haitallisten aineiden, kuten metallien sekä orgaanisten aineiden esiintyminen suotovedessä on suuri prosessia häiritsevää tekijä mikrobi- toiminnan kannalta. Tekijät ovat kytköksissä toisiinsa vaikuttaen niin suoraan kuin epäsuorasti biologiseen typenpoistoprosessiin. Alhainen lämpötila mm. lisää suotoveden hapentarvetta toimiakseen.

Nitrifikaatiovaihe on yleisesti ottaen rajoittava tekijä typenpoistoprosessissa nitrifikaatiobakteerien ollessa hidaskasvuisia ja herkkiä muuttuville ulkoisille tekijöille. On päätelty, että eri aineiden ja olosuhteiden vaikutukset vaikuttavat merkitsevämmin nitrifikaatioon kuin denitrifikaatioon. (Zhang ym. 2019.) Suo- toveden jatkuva laaja analysointi on tärkeässä osassa, jotta syy prosessin toi- mimattomuuteen selviää.

## LÄHTEET

Antikainen, R., Holmberg, M., Kauppila, J., Kauppila, P., Ketola, T., Korpinen, P., Lepistö, A., Lepistö, L., Pietiläinen, O-P., Pitkänen, H., Rantanen, P., Rekolainen, S., Räike, A., Santala, E., Similä, J., Tamminen, T. & Vuorenmaa, J. 2008. Yhdyskuntien typpikuormitus ja pintavesien tila. Suomen Ympäristökeskus. 46/2008. Helsinki: Edita Prima Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38370/SY\\_46\\_2008.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38370/SY_46_2008.pdf?sequence=5&isAllowed=y) [viitattu 28.2.2023].

Bitton, G. 2011. Wastewater Microbiology. 4. Painos. New Jersey: Hoboken Wiley-Blackwell. E-kirja. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 4.2.2023].

Chen, G., Brdanovic, D., Ekama, G. & van Loosdrecht, M. 2020. 2. Painos. London: IWA Publishing. E-kirja. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 5.3.2023].

Dias, J., Rezende R., Silva, C. & Linardi V. 2005. Biological treatment of kraft pulp mill foul condensates at high temperatures using a membrane bioreactor. Process Biochemistry (2005) Volume 40. s. 1125–1129. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032959204001943> [viitattu 6.3.2023].

Feng, B., Fang, Z., Hou, J., Ma, X., Huang, Y. & Huang, L. 2013. Effects of heavy metal wastewater on the anoxic/aerobic-membrane bioreactor bioprocess and membrane fouling. Bioresource Technology. Volume 142. s. 32–38. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852413007797> [viitattu 15.3.2023].

Gong, Z., Yang, S., Zhang, R., Wang, Y., Wu, X. & Song, L. 2022. Physiochemical and biological characteristics of fouling on landfill leachate treatment system surface. Journal of environmental science. volume 135. s. 59–71. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074222006210> [viitattu 24.4.2023].

Huang, X., Yeng, F., Hu, C., Xiao, X., Yu, D. & Zou, X. 2016. Mechanistic model for interpreting the toxic effects of sulfonamides on nitrification. Journal of hazardous materials. Volume 305. s. 123–129. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389415302375> [viitattu 24.4.2023].

Juholin, P. 2019. Typenpoisto kaivosvesistä rehevöitymisen ehkäisemiseksi. AFRY. WWW-Dokumentti. Saatavissa: <https://afry.com/fi-fi/artikkeli/typenpoisto-kaivosvesista-rehevoitymisen-ehkaisemisessa> [viitattu 20.1.2023].

Jätelaki 17.6.2011/646.

Kaartinen, T., Eskola, P., Vestola, E., Merta, E. & Mroueh, U. 2009. Uudet jäteenkäsittelykeskusten vesienhallintatekniikat. VTT tiedotteita 2502. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2009/T2502.pdf> [viitattu 20.1.2023].

Kim, D-J., Lee, D-I. & Keller, J. 2006. Effect of temperature and free ammonia on nitrification and nitrite accumulation in landfill leachate and analysis of its nitrifying bacterial community by FISH. *Bioresourche Technology*, volyme 97 (2006). s. 459–468. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085240500180X> [8.3.2023].

Kim, Y. & Oh, S. 2021. Biochar addition into activated sludge mitigate antibiotic toxicity on nitrification performance. *Journal of water process engineering*. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714421004426> [viitattu 7.2.2023].

Kjeldsen, P., Barlaz, M., Rooker, A., Baun, A., Ledin, A. & Christensen, T. 2002. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4):297–336. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380290813462> [viitattu 28.1.2023].

Kumar, M., Lee, P-Y., Fukushima, T., Whang, L-M. & Lin, J-G. 2011. Effect of supplementary carbon addition in the treatment of low C/N high-technology industrial wastewater by MBR. *Biosourche technology* 113 (2012) s.148–153. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852411018669> [viitattu 8.3.2023].

Lehtniemi, L. 2004. Pienpuhdistamoiden toimivuus ja typenpoisto. Lounais-Suomen ympäristökeskuksen moniste 9/2004. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134621/mo9\\_2004.pdf?sequence=10](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134621/mo9_2004.pdf?sequence=10) [viitattu 4.2.2023].

Li, Y., Tang, F., Xu, D. & Xie, B. 2021. Advances in Biological Nitrogen Removal of Landfill Leachate. *WWW-dokumentti*. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6236> [viitattu 14.3.2023].

Marttinen, S. 2000. Jätteiden hajoaminen kaatopaikalla sekä kaatopaikkavesien muodostuminen, ominaisuudet ja käsittely. Kirjallisuuskatsaus. KAATO 2001-hanke. Jyväskylän yliopisto. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://docplayer.fi/4228345-Jatteiden-hajoaminen-kaatopaikalla-seka-kaatopaikkavesien-muodostuminen-ominaisuudet-ja-kasittely.html> [viitattu 28.1.2023].

Mehtonen, J., Mannio, J., Kalevi, K., Huhtala, S., Nuutinen, J., Perkola, N., Sainio, P., Pihlajamäki, J., Kasurinen, V., Koponen, J., Paukku, R. & Rantakokko, P. 2012. Haitallisten orgaanisten yhdisteiden esiintyminen yhdyskuntajätevedenpuhdistamoilla ja kaatopaikoilla. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 29/2012. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/39860> [viitattu 22.3.2023].

Mellifiq. 2023. Otsooni ja AOP ratkaisut suurille COD- ja BOD-pitoisuuksille. *WWW-dokumentti*. Saatavissa: <https://mellifiq.com/fi/brands/ozonetech/sovelukset/vedenkasittely/cod-ja-bod-kasittely-otsonilla/> [viitattu 1.2.2023].

Mykkänen, A., Hämäläinen, L. & Saarelainen, J-P. 2021. Hulevesien käsittelyn t&k-ympäristö. s. 107–129. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/504174> [viitattu 16.2.2023].

Neuvoston direktiivi 26.4.1999/31/EY.

Pulliainen, S. 2023. Projektipäällikkö. Sähköpostikeskustelu 1.2.–20.3.2023. Devo-Hanke.

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. Biologinen fosforin- ja typenpoiston tehokkuus, prosessiohjaus ja mikrobiologia. Suomen ympäristökeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40575/SY\\_318.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40575/SY_318.pdf?sequence=1) [viitattu 22.2.2023].

Syke. 2013. Järven rehevöityminen. Suomen ympäristökeskus (Syke). WWW-dokumentti. Päivitetty: 10.7.2020. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesistojen\\_kunnostus/Jarvien\\_kunnostus/Kunnostustarvetta\\_aiheuttavia\\_tekijoita/Rehevoityminen/Jarven\\_rehevoityminen\(8181\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesistojen_kunnostus/Jarvien_kunnostus/Kunnostustarvetta_aiheuttavia_tekijoita/Rehevoityminen/Jarven_rehevoityminen(8181)) [viitattu 28.2.2023].

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 1.6.2013/331.

Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä 1.11.2006/888.

Vieno, N & Envieno ky. 2014. Haitalliset aineet jätevedenpuhdistamoilla -hankkeen loppuraportti. Vesilaitosyhdistysten monistesarja nro 34. Suomen Vesilaitosyhdistys ry. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.vvy.fi/site/assets/files/1617/haitalliset\\_aineen\\_jatevedenpuhdistamoilla\\_hankkeen\\_loppuraportti.pdf](https://www.vvy.fi/site/assets/files/1617/haitalliset_aineen_jatevedenpuhdistamoilla_hankkeen_loppuraportti.pdf) [viitattu 2.3.2023].

Ympäristönsuojelulaki 1.9.2014/527.

Zhang, L., Fan, J., Nguyen, H-N., Li, S. & Rodrigues, D. 2019. Effect of cadmium on the performance of partial nitrification using sequence batch reactor. Chemosphere volume 222. s. 913–922. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565351930222X> [viitattu 14.3.2023].