

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2021

Juuso Kosonen

# HAITALLISET AINEET KAATOPAikkojen SUOTOVESISSÄ JA SUOTOVESIEN KÄSITTELY

Juuso Kosonen

# HAITALLISET AINEET KAATOPAIKKOJEN SUOTOVESISSÄ JA SUOTOVESIEN KÄSITTELY

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää nonyylifenolien ja nonyylifenolietoksyylaattien, ftalaattien, per- ja polyfluorattujen yhdisteiden sekä raskasmetallien pitoisuuksia kaatopaikkojen suotovesissä. Suotovedellä tarkoitetaan kaatopaikkajätteen läpi suotautunutta vettä, johon on liuennut jätteistä erilaisia aineita. Opinnäytetyön tavoitteena oli lisäksi selvittää tehokkaita erilliskäsittelymenetelmiä kyseisten haitta-aineiden poistamiseen suotovedestä.

Opinnäytetyössä käsiteltäviin haitallisiin aineisiin on alettu kiinnittämään enemmän huomiota viimeisten vuosikymmenten aikana. Näiden haitta-aineiden on todettu tai epäilty olevan haitallisia ympäristölle ja ihmisten terveydelle. Kyseisiä haitta-aineita on aikaisemmissa tutkimuksissa todettu esiintyvän suomalaisten kaatopaikkojen suotovesissä.

Suotoveden käsittelymenetelmistä esitellään tarkemmin kalvosuodatusmenetelmät ja adsorptio aktiivihieillä. Aineistonkeruumenetelmänä käytettiin kirjallisuuskatsausta. Haitta-aineiden pitoisuuksia tutkittiin näytteenotoilla Lounais-Suomen Jätehuollon Topinojan kaatopaikalla ja tuloksia vertailtiin kirjallisuuskatsauksen avulla selvitettyihin pitoisuuksiin suomalaisten kaatopaikkojen suotovesissä. Näytteenotto toteutettiin osana SourceTrack-hanketta.

Pienemmän huokoskoon omaavat kalvosuodatusmenetelmät osoittautuivat tehokkaiksi käsittelymenetelmiksi kaikkien haitta-aineiden poiston suhteen. Adsorptio aktiivihieillä osoittautui tehokkaaksi menetelmäksi ftalaattien ja per- ja polyfluorattujen yhdisteiden poistoon, mutta nonyylifenolin ja raskasmetallien poistotehokkuuden suhteen adsorptio ei pärjännyt kalvosuodatusmenetelmille.

Topinojan kaatopaikan suotoveden haitta-aineiden pitoisuuksien todettiin vastaavan pitkälti keskimääräisiä pitoisuuksia suomalaisilla kaatopaikoilla lukuun ottamatta per- ja polyfluorattujen yhdisteiden pitoisuuksia, jotka olivat Topinojan kaatopaikalla keskivertopitoisuuksia korkeampia.

## ASIASANAT:

adsorptio, aktiivihili, haitalliset aineet, kaatopaikat, kalvosuodatus, suotovesi

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy and Environmental Technology

2021 | 39 pages, 3 pages in appendices

Juuso Kosonen

# HAZARDOUS SUBSTANCES IN LANDFILL LEACHATE AND TREATMENT OF LEACHATE

The aim of the thesis was to determine the concentrations of nonylphenols and nonylphenol ethoxylates, phthalates, per- and polyfluorinated compounds and heavy metals in landfill leachate. Leachate means water that has passed through landfill waste into which various substances from the waste have dissolved. In addition, the aim of the thesis was to determine effective on-site treatment methods for the removal of these hazardous substances from leachate.

During the last decades, attention has been drawn more to the hazardous substances discussed in this thesis. These substances have been identified or suspected to be harmful to the environment and human health. In previous studies these hazardous substances have been found in the leachate at Finnish landfills.

Of the leachate treatment methods, membrane filtration and activated carbon adsorption are presented in more detail. Here, a literature review was used as the data collection method. Concentrations of hazardous substances were examined by sampling at the Lounais-Suomen Jätehuolto Topinoja landfill and the results were compared with the concentrations in the leachate of Finnish landfills, examined with the help of a literature review. Sampling has been carried out as part of the SourceTrack-project.

Membrane filtration methods with smaller pore sizes proved to be effective treatment methods for the removal of all hazardous substances. Activated carbon adsorption proved to be effective for the removal of phthalates and per- and polyfluorinated compounds, but in terms of the removal efficiency of nonylphenol and heavy metals, the adsorption was inferior to the membrane filtration.

Concentrations of hazardous substances in the leachate of the Topinoja landfill were found to be equivalent to the average concentrations at Finnish landfills, except for the concentrations of per- and polyfluorinated substances, which were higher at the Topinoja landfill than the average concentrations.

## KEYWORDS:

adsorption, activated carbon, hazardous substances, landfills, membrane filtration, leachate

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 SUOTOVEDET JA SUOTOVEDESSÄ ESIINTYVÄT HAITTA-AINEET</b>	<b>9</b>
2.1 Suotovedet ja niiden muodostuminen	9
2.2 Suotovedessä esiintyvät haitalliset aineet ja yhdisteet	9
2.2.1 Nonyylifenolit ja nonyyliifenolietoksyylaatit	10
2.2.2 Ftalaatit	11
2.2.3 Per- ja polyfluoratut yhdisteet	12
2.2.4 Raskasmetallit	13
2.3 Suoto- ja kaatopaikkavesiä koskeva lainsäädäntö	14
<b>3 SUOTOVESIEN KÄSITTELY KAASTOPAIKOILLA</b>	<b>16</b>
3.1 Käsittelymenetelmät	16
3.2 Suotovesien käsittelyssä kohdattavat ongelmat	16
3.3 Kalvosuodatus	17
3.3.1 Mikro- ja ultrasuodatus	17
3.3.2 Nanosuodatus	18
3.3.3 Käänteisosmoosi	19
3.3.4 Kalvomoduulit	20
3.3.5 Kalvosuodatusmenetelmien ongelmat	21
3.3.6 Haitta-aineiden poistuminen kalvosuodatuksessa	22
3.4 Adsorptio aktiivihieillä	22
3.4.1 Adsorptio	22
3.4.2 Aktiivihieili	23
3.4.3 Jauhettu aktiivihieili	24
3.4.4 Rakeinen aktiivihieili	25
3.4.5 Haitta-aineiden poistuminen adsorptiolla	26
<b>4 NÄYTTEENOTTO LOUNAIS-SUOMEN JÄTEHUOLLON TOPINOJAN KAATOPAIKALLA</b>	<b>27</b>
4.1 Näytteenoton tavoite ja tutkittavat parametrit	27
4.2 Lounais-Suomen Jätehuolto Oy	27
4.3 Näytteenoton valmistelu	27
4.4 Vanha ja uusi täyttöalue	28

4.5 Näytteenoton toteutus	29
<b>5 NÄYTTEENOTON TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU</b>	<b>30</b>
5.1 Näytteenoton tulokset	30
5.2 Tulosten tarkastelu	33
<b>6 POHDINTA</b>	<b>36</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>38</b>

## LIITTEET

Liite 1. Haitta-ainepitoisuudet Topinojan kaatopaikan suotovedessä.  
Liite 2. Haitta-ainepitoisuudet aineryhmäkohtaisesti toimialoittain.

## KAAVAT

Kaava 1. Freundlichin adsorptioisotermi (Ehrig & Robinson 2011, 871).	23
---	----

## KUVAT

Kuva 1. Suodatuskalvojen tyypit ja ominaisuudet (Pentair).	19
Kuva 2. Poikkivirtausmoduuli (Alfa Laval).	20
Kuva 3. Yleisimmät kalvosuodatusmoduulit (Torzewski 2009).	21
Kuva 4. Aktiivihiihisiuodatinjärjestelmä, jossa on kolme suodatinsäiliötä (Ehrig & Robinson 2011, 869–870).	25
Kuva 5. Täyttöalueet ja näytteenottopisteet kaatopaikalla (Maanmittauslaitos).	28

## KUVIOT

Kuvio 1. Nonyylifenolien ja -etoksylaattien, ftalaattien ja PFAS-yhdisteiden pitoisuudet Topinojan kaatopaikan suotovedessä.	30
Kuvio 2. Raskasmetallien pitoisuudet Topinojan kaatopaikan suotovedessä.	31
Kuvio 3. Nonyylifenolien ja -etoksylaattien pitoisuudet eriteltynä yhdisteittäin.	31
Kuvio 4. Ftalaattien pitoisuudet eriteltynä yhdisteittäin.	32
Kuvio 5. PFAS-yhdisteiden pitoisuudet eriteltynä yhdisteittäin.	32
Kuvio 6. Raskasmetallien pitoisuudet eriteltynä aineittain.	33

## KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

BBP	Bentsyylibutyyliftalaatti
DBP	Dibutyyliftalaatti
DEHP	Dietyyliheksyyliftalaatti
DEP	Dietyyliftalaatti
DIBP	Di-isobutyyliftalaatti
GAC	Rakeinen aktiivihilli
Kaatopaikkavesi	Suotovesi ja muu jätteenkäsittelykeskuksessa syntyvä kontaminoitunut vesi (Kaartinen ym. 2009, 9)
Konsentraatti	Kalvosuodatuksessa kalvon pidättämä haitta-aineita sisältävä neste (Ehrig & Robinson 2011, 866)
MF	Mikrosuodatus
NF	Nanosuodatus
PAC	Jauhettu aktiivihilli
Permeaatti	Kalvosuodatuksessa kalvon läpi syötetty puhdistettu vesi (Ehrig & Robinson 2011, 866)
PFAS-yhdisteet	Per- ja polyfluoratut yhdisteet
PFHxA	Perfluoroheksaanihappo
PFOA	Perfluoro-oktaanihappo
PFOS	Perfluoro-oktaanisulfonaatti
PFPeA	Perfluoropentaanihappo
PVC	Polyvinyylikloridi
REACH-asetus	Euroopan unionin säädös, jonka tavoitteena on parantaa ympäristön ja terveyden suojelua kemikaalien riskeiltä sekä parantaa EU:n kemikaaliteollisuuden kilpailukykyä (ECHA)
RO	Käänteisosmoosi
Suotovesi	Kaatopaikkajätteen läpi suotautunut vesi (Kaartinen ym. 2009, 9)
UF	Ultrasuodatus
Van der Waalsin voima	Sähkövarauksista johtuva molekyyliä yhteen vetävä epäspesifinen voima (Tieteen termipankki 2015)

# 1 JOHDANTO

Suomessa valtaosa kaatopaikkojen suotovesistä johdetaan jätevedenpuhdistamoille ilman suotovesien erilliskäsittelyä kaatopaikoilla, kun taas monissa Euroopan maissa suotovesien erilliskäsittely on ollut yleisempää jo pitkään (Kaartinen ym. 2009, 29). Jätevedenpuhdistamoille saapuvan suotoveden sisältämät haitta-aineet voivat käsittelyn aikana hajota tai haihtua vähissä määrin. Kuitenkin suuri osa haitallisista aineista tarttuu puhdistamolietteeeseen tai jatkaa matkaa ympäristöön puhdistetun jäteveden mukana. (Vesilaitosyhdistys 2014, 36–41, 81, 125; Mehtonen ym. 2016, 12.) Suotovesien käsittelyn on ennustettu lisääntyvän Suomessa jätteenkäsittelyn keskittyessä samalla kun päästövaatimukset ja puhdistamojen vastaanottoehdot kiristyvät. Jätevedenpuhdistamoiden asettamien raja-arvojen ylittäminen kaatopaikkavesien pitoisuuksissa kasvattaa jätevesimaksuja, minkä johdosta erilliskäsittely voi tulla taloudelliselta kannalta vartenotettavaksi vaihtoehdoksi. Lainsäädännölliset muutokset 2000-luvulla ovat rajoittaneet kaatopaikalle sijoitettavien jätteiden laatua, joka heijastuu kaatopaikalla muodostuvien suotovesien laatuun. (Kaartinen ym. 2009, 11, 29.)

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia kaatopaikkojen suotovesien sisältämien haitta-aineiden pitoisuuksia, ominaisuuksia, käyttöä ja haittavaikutuksia sekä selvittää erilaisia erilliskäsittelymenetelmiä suotovesien haitta-ainepäästöjen vähentämiseksi. Esitetyt haitta-aineet toimivat SourceTrack-hankkeen kohdeaineina ja valikoituvat sen myötä käsiteltäväksi tässä opinnäytetyössä. Suotovesien haitta-aineiden pitoisuuksia lähestytään myös Lounais-Suomen Jätehuollon Topinojan kaatopaikan suotovesistä otettujen näytteiden avulla, jotka on otettu osana SourceTrack-hankkeen näytteenottoa.

Opinnäytetyössä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Kuinka suuria pitoisuuksia nonyylifenoleita ja nonyylifenolietoksylaatteja, ftalaatteja, per- ja polyfluorattuja yhdisteitä ja raskasmetalleja esiintyy kaatopaikkojen suotovesissä?
2. Millaisilla erilliskäsittelymenetelmillä voidaan tehokkaasti poistaa suotovedestä edellä mainittuja haitta-aineita?

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsitellään suotoveden muodostumista ja sen laatuun vaikuttavia tekijöitä, suotovedessä esiintyviä haitta-aineita sekä käydään läpi suotovesiä

koskevaa lainsäädäntöä. Tämän jälkeen käsitellään suotovesien käsittelyä kaatopaikoilla ja esitellään tarkemmin kaksi potentiaalista suotovesien erilliskäsittelymenetelmää.

Teoriaosuuden jälkeen neljännessä luvussa esitellään Lounais-Suomen Jätehuollon Toimintajärjestelmän jätokeskuksella toteutettu näytteenotto. Luku koostuu Lounais-Suomen Jätehuollon esittelystä, näytteenoton valmisteluista ja näytteenoton toteutuksesta. Näytteenoton tulokset sekä tulosten tarkastelu esitellään viidennessä luvussa.

Opinnäytetyö on tehty osana SourceTrack-hanketta, joka on toteutettu yhteistyönä Turun ammattikorkeakoulun, Turun Vesihuollon, Turun seudun puhdistamon ja Suomen ympäristökeskuksen kesken. Hankkeen tavoitteena on tunnistaa eri toimialojen haitta-aineiden päästöjen määrää ja osuutta jätevedenpuhdistamolle saapuvasta kokonaiskuormituksesta, jolloin haitta-aineiden vähentämistoimenpiteitä voidaan kohdentaa ja toteuttaa kustannustehokkaasti. Jätevesiverkostosta ja teollisuusyritysten jätevesistä otettujen näytteiden avulla saadaan tunnistettua haitta-aineiden päästölähteet ja voidaan määrittellä keskimääräiset toimialakohtaiset haitta-aineiden pitoisuudet.



## 2 SUOTOVEDET JA SUOTOVEDESSÄ ESIINTYVÄT HAITTA-AINEET

### 2.1 Suotovedet ja niiden muodostuminen

Kaatopaikan suotovedet ovat kaatopaikalla muodostuvaa kontaminoitunutta vettä. Suotovettä muodostuu, kun jätetäytön päälle satanut vesi tai sulanut lumi suotautuu jätteiden läpi ja samalla jätteistä liukenee ja huuhtoutuu erilaisia aineita ja yhdisteitä läpi suotautuvaan veteen. (Kaartinen ym. 2009, 13.)

Suotoveden laatuun ja sen määrään vaikuttavia tekijöitä ovat jätteiden määrä, jätetyyppi, jätteiden ikä ja hajoamisen vaihe, kaatopaikan koko ja tyyppi, kaatopaikan täyttötapa, tulevan ja lähtevän veden määrä, pintaveden laatu, ilmasto-olosuhteet sekä kaatopaikan ja peiton rakenteet. Erityisesti kaatopaikkarakenteilla pystytään vaikuttamaan suotovesien muodostumiseen. Kaatopaikan suunnittelussa on tärkeää huomioida, että kaatopaikan ulkopuoliset vedet eivät päädy kaatopaikan alueelle ja sekoitu kaatopaikkavesiin. Jätetäytön peittämisellä pystytään vähentämään veden suotautumista jätetäytön läpi. Suotovesien imeytymistä maahan pystytään estämään asianmukaisilla pohjarakenteilla. (Kaartinen ym. 2009, 13.)

Kaatopaikalla syntyvät suotovedet kerätään yhteen yleensä jätetäytön pohjalle sijoitettujen salaojaputkistojen avulla. Salaojaputkista vesi johdetaan joko kaivoihin tai tasausal-  
tasiin. Tasausal-  
taiden ja pumppauksen avulla saadaan tasoitettua kuormitushuippuja, joita voi syntyä esimerkiksi lumien sulamisen yhteydessä. Kontaminoitunut vesi voidaan käsitellä jo kaatopaikalla, mutta useimmiten kaatopaikkavedet johdetaan Suomessa viemäriverkkoon ja sitä kautta edelleen jätevedenpuhdistamoille. (Kaartinen ym. 2009, 14, 29.)

### 2.2 Suotovedessä esiintyvät haitalliset aineet ja yhdisteet

Suotovedessä pääasiallisina esiintyvinä haitta-aineina on pidetty typpeä, ravinteita, suoloja, kiintoainesta, liuennutta orgaanista aineista ja metalleja. Haitallisiin aineisiin ja niiden pitoisuuksiin vaikuttaa jätetäytön ikä, kaatopaikalle loppusijoitettava materiaali sekä vallitsevat olosuhteet. Nuorilla kaatopaikoilla orgaanisen aineen ja metallien pitoisuudet

ovat tavallisesti korkeampia kuin vanhemmilla kaatopaikoilla. Joidenkin aineiden, kuten ammoniumtypen ja fosforin pitoisuudet eivät ole riippuvaisia kaatopaikan iästä. Ravinteiden ja orgaanisen aineen pitoisuudet ovat suurempia kaatopaikoilla, jonne sijoitetaan yhdyskuntajätettä, kun taas metallien ja suolojen pitoisuudet ovat korkeampia teollisuusjätteen kaatopaikoilla. (Kaartinen ym. 2009, 14.)

Tämä opinnäytetyö keskittyy edellä mainittujen haitta-aineiden sijaan, raskasmetalleja lukuun ottamatta, nonyylifenoleihin ja niiden etoksylaatteihin, ftalaatteihin sekä per- ja polyfluorattuihin yhdisteisiin. Kyseiset haitta-aineet toimivat SourceTrack-hankkeen kohdeaineina ja valikoituivat näin ollen käsiteltäviksi myös tässä opinnäytetyössä. Edellä mainittujen haitta-aineiden vaikutuksiin on ruvettu kiinnittämään huomioita viimeisten vuosikymmenten aikana. Kyseisiä haitta-aineita onkin todettu esiintyvän kaatopaikkojen suotovesissä.

### 2.2.1 Nonyylifenolit ja nonyylifenolietoksylaatit

Nonyylifenoleita ja niiden etoksylaatteja käytetään kumien, muovien, maalien, lakkojen, tekstiilien ja rakennusmateriaalien valmistukseen sekä pinta-aktiivisena aineena pesuaineissa. Nonyylifenolien valmistus ja maahantuonti Suomessa vuosina 2005–2008 on ollut vuosittain noin 5–10 tonnia ja nonyylifenolietoksylaattien noin 200–300 tonnia. Nonyylifenoleita ja niiden etoksylaatteja ei enää valmisteta Suomessa. Vuodesta 2003 alkaen EU-direktiivi (2003/53/EC) on kieltänyt nonyylifenolin myynnin ja käytön EU:n alueella pois lukien tietyt kohteet. (Mehtonen ym. 2012, 22–23; Vesilaitosyhdistys 2014, 17–18.)

Nonyylifenolien ja niiden etoksylaattien on todettu olevan vaarallisia ympäristölle sekä vaikuttavan nisäkkäisiin ja kaloihin hormonien lailla. Ympäristössä nonyylifenolietoksylaatit hajoavat lyhytkestäviksi monoetoksylaateiksi, dietoksylaateiksi sekä nonyylifenoliksi. Nonyylifenolien ja niiden etoksylaattien estrogeenista aktiivisuutta estävä vaikutus voimistuu yhdisteiden hiiliketjujen lyhentyessä, vaikutuksen ollessa voimakkainta nonyylifenolilla. Vaarallisten aineiden asetuksen (VNa 868/2010) vesiympäristölle vaaralliseksi luokitteleva 4-nonyylifenoli kertyy vesieliöihin ja sen biologinen hajoaminen vedessä on hidasta. Lisäksi sen on epäilty heikentävän hedelmällisyyttä sekä olevan sikiöille vaarallista. (Mehtonen ym. 2012, 23.)

Suomalaisissa 2010-luvun vaihteessa tehdyissä selvityksissä kaatopaikkojen suotovesistä on löytenyt nonyylifenoleita ja niiden etoksylaatteja. Nonyylifenolien pitoisuudet ovat olleet nonyylifenolietoksylaattien pitoisuuksia korkeampia. Eri selvitysten tuloksista ei kuitenkaan voida koota keskiarvoisia pitoisuuksia nonyylifenoleille ja -etoksylaateille, sillä tulokset ovat raportoitu keskenään eri tavoin. (Mehtonen ym. 2012, 25.)

Vesilaitosyhdistys (2014, 76, 81) arvioi selvityksessään nonyylifenolien ja -etoksylaattien poistumaksi jätevedenpuhdistamoilla yli 90 %. Selvityksen mukaan noin 65 % tarttuu lietteeseen, noin 35 % biohajoaa ja noin 4 % poistuu lähtevän puhdistetun jäteveden mukana. Puhdistamon koolla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta poistumaan.

### 2.2.2 Ftalaatit

Ftalaatit ovat laajasti käytettäviä ftaalihapon estereitä, joissa kaksi hiilivetyryhmää on kiinnittynyt ftaalihappoon. Merkittävin ftalaattien käyttötarkoitus on PVC-muovin pehmentäminen. Muita ftalaattien käyttökohteita on hygieniatarvikkeet, tekstiilit, liimat, maaliit, painomusteet ja lääkkeiden päällysteet. Ftalaateista laajimmin käytössä olevan dietyyliheksyyliftalaatin (DEHP) käyttö on 2000-luvulla Suomessa vaihdellut 200 ja 2000 tonnin välillä. DEHP:tä tavataan yleisesti kaatopaikkojen suotovesissä. DEHP:n pitoisuus suotovesissä on kuitenkin tippunut huomattavasti 1990-luvun selvityksistä ja 2000-luvun selvityksissä pitoisuus on ollut alle 2,5 µg/l. Myös dibutyyliftalaatti (DBP) sekä bent-syylibutyyliftalaatti (BBP) ovat yleisesti käytettyjä ftalaatteja, joskin niitä ei ole pääsääntöisesti löydetty suomalaisten kaatopaikkojen suotovesistä 2000-luvulla. (Mehtonen ym. 2012, 15, 17–19, 21–22; THL 2021b.)

Ihmiset altistuvat ftalaateille pääosin ravinnon välityksellä, mutta altistumista tapahtuu myös muovi- ja hygieniatuotteiden kautta. Ftalaattien käytön ollessa laajaa, niille altistumista tapahtuu päivittäin. Ympäristöön ftalaatteja voi irrota muovista helposti muovilaa-dusta ja sen kunnosta riippuen, sillä ftalaatit eivät ole sitoutuneita muoveihin kemialli- sesti. Ftalaatit hajoavat nopeasti elimistössä ja ympäristössä, eivätkä näin rikastu ravin- toketjussa tai kerry elimistöön. Ftalaateilla on arveltu olevan terveysvaikutuksia ja niiden on epäilty häiritsevän hormonitoimintaa. Joidenkin ftalaattien kuten DEHP:n, DBP:n ja BBP:n käyttöä on rajoitettu REACH-asetuksessa ja niille on asetettu enimmäispitoisuu- det muovituotteiden osalta. (THL 2021b.)

Vesilaitosyhdistyksen (2014, 92, 97–98) selvityksen mukaan ftalaattien poistumat Suomen jätevedenpuhdistamoilla ovat pääosin yli 70 %. DEHP:stä noin 67 % arvioitiin tarttuvan puhdistamolietteen ja 12 % biohajoavan. Lopun 21 % arvioitiin poistuvan puhdistetun jäteveden mukana.

### 2.2.3 Per- ja polyfluoratut yhdisteet

Perfluoratut yhdisteet ovat yhdisteitä, joissa fluori on korvannut kaikki hiileen sitoutuneet vetyatomit, kun taas polyfluoratuissa yhdisteissä fluori on korvannut vain osan vetyatomeista. Näitä PFAS-yhdisteitä on tuhansittain ja myöskin niiden ominaisuudet ovat vaihtelevia. PFAS-yhdisteiden hiiliketjut ovat vahvoja rakenteeltaan, eivätkä juuri hajoa ympäristössä biologisesti, kemiallisesti tai fysikaalisesti. Ne myös kertyvät elimistöön ja rikastuvat ravintoketjussa. Ympäristössä PFAS-yhdisteet voivat esiintyä esimerkiksi metallisuoloina, happoina sekä sulfonamideina ja niiden johdannaisina. PFAS-yhdisteiden käyttökohteita ovat mm. sammutusvaahdot, elektroniikkalaitteet, tekstiilien ja paperin liikaahylkivät pinnoitteet, paistinpannut, kosmetiikkatuotteet, puhdistusaineet ja maalit. (Mehtonen ym. 2012, 43; Mehtonen ym. 2016, 1–3, 6; THL 2021a.)

Merkittävimpiä PFAS-yhdisteitä ovat perfluoro-oktaanisulfonaatti (PFOS) sekä perfluoro-oktaanihappo (PFOA). Vuonna 2004 Suomessa käytettiin PFOS:ta tai sen kaltaisia yhdisteitä noin 150–200 kg. (Mehtonen ym. 2012, 43.) PFOS:n käyttöä on rajoitettu 2000-luvun alusta alkaen, joka on johtanut sen korvaamiseen muilla PFAS-yhdisteillä. Korvaavat, turvallisemmiksi ajatellut yhdisteet voivat kuitenkin muuttua haitallisiksi joutuessaan ympäristöön tai elimistöön. Laajennettuja PFAS-yhdisteiden käyttörajoituksia on suunnitteilla. (THL 2021a.) PFOA:n käyttöä alettiin rajoittaa EU:n alueella vuonna 2020 (Tukes 2020).

Mittavan käytön seurauksena PFAS-yhdisteitä mitataan maailmanlaajuisesti ympäristöstä ja eliöistä. Ihmiset altistuvat PFAS-yhdisteille pääasiassa ravinnon kautta, mutta altistumista tapahtuu myös ympäristön välityksellä. Ihmiselle PFAS-yhdisteille altistuminen saattaa aiheuttaa riskin terveydelle ja kehitykselle. (THL 2021a.)

PFAS-yhdisteitä on havaittu suuria pitoisuuksia kaatopaikkojen suotovesissä (THL 2021a). Suotovesien on todettu olevan keskeisin PFOA:n lähde kunnallisille jätevedenpuhdistamoille. Jätevedenpuhdistamoilla voidaan välillä mitata korkeampia PFOS:n ja PFOA:n pitoisuuksia puhdistetussa jätevedessä kuin puhdistamolle tulevassa

jätevedessä, mikä johtuu johdannaisten hajoamisesta puhdistuksen aikana. PFOS:ta, PFOA:ta sekä muita PFAS-yhdisteitä on myös löydetty puhdistamoiden lietteestä ja mädätteestä. PFAS-yhdisteitä voi päätyä ympäristöön puhdistamolietteiden levityksen yhteydessä. (Mehtonen ym. 2016, 7–8, 12.)

#### 2.2.4 Raskasmetallit

Kaatopaikkojen suotovesistä löytyviä raskasmetalleja ovat mm. kadmium, koboltti, kromi, kupari, lyijy, nikkeli ja sinkki. Yhdyskuntajätteiden kaatopaikoilla niiden pitoisuudet ovat yleensä matalia ja saattavat parhaimmillaan alittaa juomavedelle asetetut raja-arvot. Teollisuuden kaatopaikkojen suotovesissä sen sijaan pitoisuudet voivat olla korkeampia. Metallit voivat esiintyä suotovesissä liuenneina kationeina tai ne voivat muodostaa kolloideja tai komplekseja. Metallien esiintymismuotoon vaikuttaa kaatopaikan olosuhteet esimerkiksi hapettomissa olosuhteissa metallit saattavat sitoutua humukseen tai alhainen pH edesauttaa metalleja liukenemaan jätteistä suotoveteen. Metallien pitoisuudet suotovesissä ovat yleisesti ottaen pienempiä vanhoilla kuin nuorilla kaatopaikoilla. (Kaartinen ym. 2009, 16.)

Raskasmetallit aiheuttavat haittaa sekä ympäristölle että terveydelle. Suurina pitoisuuksina raskasmetallit voivat olla akuutisti myrkyllisiä vesieliöstölle, mutta haitallisia vaikutuksia saattaa ilmetä jo pitoisuuksien ollessa pienempiä. Tunnetuimpia terveydelle haitallisia raskasmetalleja ovat elohopea, kadmium ja lyijy. Suomessa lyijylle altistuminen on vähäistä. Kadmiumille altistumista tapahtuu eniten työympäristön ja elintarvikkeiden kautta. (Siimes ym. 2019, 17; Tuomisto 2020.)

Raskasmetallien poistumat jätevedenpuhdistamoilla vaihtelevat raskasmetallien mukaan. Vesilaitosyhdistyksen arvion mukaan Suomen puhdistamoilla poistumat ovat kadmiumilla 81 %, lyijyllä 89 % ja nikkelillä vain 9 %. Puhdistamon koolla ei ole todettu olevan suurta merkitystä raskasmetallien poistumaan. Raskasmetallien kohdalla poistuma on valtaosin lietteeseen tarttumista, sillä biohajoamista ei raskasmetallien osalta tapahdu. (Vesilaitosyhdistys 2014, 123, 125.)

### 2.3 Suoto- ja kaatopaikkavesiä koskeva lainsäädäntö

Kaatopaikkojen toimintaa ja kaatopaikkavesiä säädellään jätelain (646/2011, muutos-säädös 714/2021), ympäristönsuojelulain (527/2014) ja valtioneuvoston asetuksen kaa-topaikoista (331/2013) avulla. Jätelain tarkoituksena on kiertotalouden ja luonnonvarojen käytön kestävyys edistäminen, jätteiden ja jätehuollon ympäristö- ja terveysvaikutus-ten ehkäisy, jätteen määrän ja haitallisuuden vähentäminen sekä jätehuollon toimivuu-den varmistaminen (Jätelaki 714/2021, 1 §). Ympäristönsuojelulain tarkoituksena taas on ehkäistä ympäristön pilaantumista ja poistaa pilaantumisesta johtuvat haitat sekä tor-juu ympäristövahinkoja (Ympäristönsuojelulaki 527/2014, 1 §).

Valtioneuvoston asetuksen kaatopaikoista mukaan suotovedet ja muut kaatopaikalla syntyvät kontaminoituneet kaatopaikkavedet on kerättävä yhteen salaojituksen, pump-pauksen tai muun soveltuvan tekniikan avulla. Kerätyt suoto- ja muut kaatopaikkavedet on puhdistettava joko paikan päällä tai johdettava muualle puhdistusta varten. Jäteve-denpuhdistamolle puhdistettavaksi johdatetut kaatopaikkavedet eivät saa heikentää jä-tevedenpuhdistamon toimintaa ja puhdistamalla muodostuvan lietteen laatua. Kaatopai-kan alueella olevien puhtaiden pintavesien ja ulkopuolisten valumavesien sekoittuminen kaatopaikkavesien kanssa on estettävä. (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013, 5 §.)

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista velvoittaa tarkkailemaan suoto- ja muun konta-minoituneen kaatopaikkaveden määrää ja laatua kaikissa kohdissa, joissa kaatopaikka-vettä johdatetaan ulos kaatopaikalta. Kaatopaikan aiheuttaman kuormituksen ja kaato-paikkavesien puhdistuksen tehokkuuden arvioimiseksi myös kaatopaikkavesien puhdis-tamista ja puhdistuksesta eteenpäin ohjattavia vesiä tulee tarkkailla. (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013, 44 §.)

Lisäksi Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista velvoittaa, että käytössä olevan kaatopai-kan kaatopaikkavesien laatua tulee seurata kolmen kuukauden välein näytteiden avulla. Jälkihoitovaiheen aikana seuranta tulee tehdä puolen vuoden välein. Mikäli voidaan osoittaa, että pidemmällä mittausvälillä saadaan tarpeeksi luotettavaa tietoa, voidaan seuranta mukauttaa. (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013, 44 §.)

Kaatopaikkojen ympäristöluvissa on yleistynyt viime vuosikymmenten aikana ainekoh-taisten vaatimusten asettaminen. Myöskin suotovesien tarkkailuohjelmat sisältävät vä-lillä raja-arvoja eri haitta-aineiden pitoisuuksille. Raja-arvot ja laatutavoitteet voidaan

esittää joko pitoisuuksina tai vesistökuormituksena esimerkiksi puolivuosiskeskiarvona.  
(Kaartinen ym. 2009, 39.)

## 3 SUOTOVESIEN KÄSITTELY KAASTOPAIKOILLA

### 3.1 Käsittelymenetelmät

Suotoveden käsittelymenetelmät voidaan jakaa fysikaalis-kemiallisiin ja biologisiin käsittelymenetelmiin. Fysikaalis-kemiallisiin käsittelymenetelmiin kuuluu flotaatio, ilmanpoisto, kemiallinen saostus, kemiallinen hapetus, koagulaatio ja flokkulaatio, adsorptio sekä kalvosuodatusmenetelmät. Biologisiin menetelmiin kuuluu, biosuodatus, kosteikot, ilmastetut lammikot, lietteen mädätys, MBBR (moving-bed bio film reactor), SBR (sequencing batch reactor) ja UASB (upflow anaerobic sludge blanket). Biologiset käsittelymenetelmät voidaan jakaa vielä aerobisiin ja anaerobisiin menetelmiin. (Zhang & Surampalli 2016, 611, 613–617.)

Edellä mainituista käsittelymenetelmistä tarkempaan selvitykseen päätyivät kalvosuodatus ja adsorptio aktiivihieillä. Kyseiset menetelmät osoittautuivat kirjallisuuskatsauksen perusteella tehokkaiksi tässä opinnäytetyössä käsiteltävien haitta-aineiden poistoon.

### 3.2 Suotovesien käsittelyssä kohdattavat ongelmat

Suotovesien käsittelyssä kohdataan kolme erityistä ongelmaa, jotka eivät normaalisti vaikuta jäteveden puhdistukseen. Ensimmäinen ongelma on suuret vaihtelut suotovesien virtauksissa. Tähän vaikuttavat sademäärän kausittaiset vaihtelet ja Suomessa varsinkin lumien sulaminen keväällä. Epätasainen virtaama haittaa käsittelyprosesseja, jotka toimivat paremmin ja luotettavammin tasaisella virtausmäärällä. Ongelmaa voidaan estää suotoveden pidättämisellä. Toinen ongelma on suotoveden laadun muuttuminen ajan myötä. Orgaanisten aineiden pitoisuuksien laskiessa biohajoamattomien aineiden osuus kasvaa. Kolmas ongelma on mahdolliset muutokset jätetäytössä jätehuollon muutosten seurauksena. Aiemmin erilaisten jätetyyppien sekoitus tuotti tasalaatuisempia suotovesiä, joiden laatu vaihteli vähemmän eri kaatopaikkojen kesken. Eri jätejakeiden kierrättäminen johtaa uudenlaisten kaatopaikkojen syntyyn, mikä taas vaikuttaa suotovesien laadun muutokseen ja virtausnopeuksiin. Suomessa erityisesti biohajoavan jätteen kaatopaikkakielto vaikuttaa suotovesien laatuun. Orgaanisten jätejakeiden poistuessa epäorgaaniset suotovedet muuttuvat entistä tärkeämmiksi. (Kaartinen ym. 2009, 11, 14; Ehrig & Robinson 2011, 860–861.)



### 3.3 Kalvosuodatus

Kalvosuodatus on fyysinen menetelmä, jonka tekniikka perustuu puoliläpäisevään kalvoon. Kalvosuodatuksessa vesi johdetaan paineen avulla puoliläpäisevän kalvon läpi, jolloin haitalliset aineet saadaan eroteltua. Kalvon läpi syötettyä puhdistettua vettä kutsutaan permeaatiksi ja kalvon pidättämää haitta-aineita sisältävää nestettä kutsutaan konsentraatiksi. Erilaisia kalvosuodatusmenetelmiä ovat mikro- (MF), ultra- (UF) ja nanosuodatus (NF) sekä käänteisosmoosi (RO). Kaikkia edellä mainittuja tekniikoita on myös käytetty suotovesien käsittelyssä. Kalvosuodatusta voidaan käyttää niin väkevien kuin laimeidenkin suotovesien käsittelyyn. Lisäksi kalvosuodatus soveltuu hyvin käytettäväksi sekä nuorilla että vanhoilla kaatopaikoilla. Suodatustehokkuuteen vaikuttaa suotoveden laatu, kalvon tyyppi, kalvomoduuli ja käyttöpaine. (Kaartinen ym. 2009, 87; Ehrig & Robinson 2011, 866–868.) Tyypillinen kalvosuodatuslaitteisto koostuu kalvomoduulista, pumpusta, virtaus- ja paineensäätimistä, säiliöstä sekä esikäsitteily- ja puhdistus-toiminnoista (Vigneswaran ym. 2012, 48).

Kalvosuodatus voidaan toteuttaa kahdella tapaa, joko poikkivirtaus- tai umpikujasuodatuksena. Umpikujasuodatuksessa syöttövesi kulkee kalvoon nähden pystysuorassa kalvon läpi, jolloin haitalliset aineet ja muut epäpuhtaudet kerääntyvät kalvon pinnalle. Epäpuhtauksien kertyminen kalvon pintaan heikentää virtausta kalvon läpi, jolloin kalvo joudutaan puhdistamaan. Poikkivirtausuodatuksessa syöttövesi liikkuu kalvon suuntaisesti, jolloin vain osa vedestä kulkee kalvon läpi. Kalvoa läpäisemätön osa vedestä kierätetään takaisin syöttöveeseen. Poikkivirtausuodatuksessa kalvon pinnalle kertyvien epäpuhtauksien määrä on huomattavasti vähäisempää, sillä virtaus lähinnä vain pyyhkäisee suodatuskalvon pinnan yli. Tällöin permeaatti pysyy myös korkealaatuisena. Umpikujasuodatukseen verrattuna ristivirtausuodatus vaatii kuitenkin suurempaa käyttöpainetta sekä energiaa, jotta virtausta voidaan ylläpitää suurilla nopeuksilla. (Vigneswaran ym. 2012, 48–49.)

#### 3.3.1 Mikro- ja ultrasuodatus

Mikro- ja ultrasuodatusta käytetään kaatopaikoilla lähinnä erottamaan kiintoaine suotovedestä. UF voi pidättää myös joitakin suuria orgaanisia molekyyliä. Mikro- ja ultrasuodatusta käytetään usein esikäsitteilynä muille kalvosuodatusmenetelmille, kuten

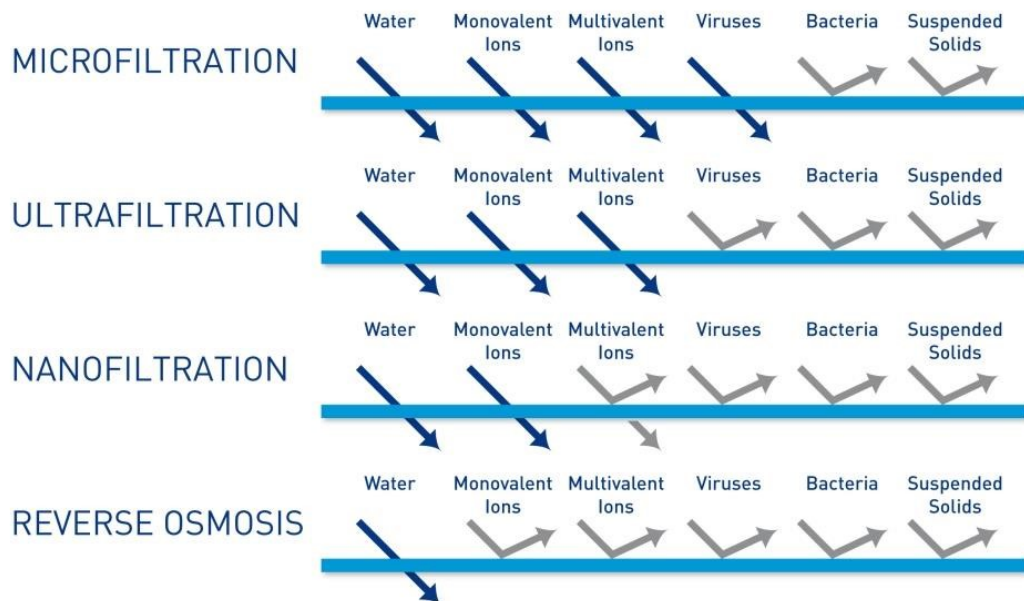
käänteisosmoosille. Ultrasuodatusta voidaan myös käyttää jälkikäsittelynä biologisen käsittelyn jälkeen. (Ehrig & Robinson 2011, 866.)

MF-kalvojen huokoskoot vaihtelevat 0,1 µm ja 10 µm välillä. Käyttöpaine on yleensä alle 30 psi. UF-kalvoissa huokoskoot vaihtelevat 0,01–0,1 µm ja käyttöpaine 3–80 psi:n välillä. MF- ja UF-kalvot on tyypillisesti tehty selluloosa-asetaatista tai erilaisista muoveista, kuten PVC:stä, polyamidista, polysulfonista, polypropeenista tai polyesteristä. (Vignéswaran ym. 2012, 43, 54–55.)

### 3.3.2 Nanosuodatus

Nanosuodatuksen käyttö suotovesien käsittelyssä on ollut harvinaisempaa. Pienemmät molekyylit pääsevät NF-kalvon läpi, minkä johdosta monet ongelmalliset aineet päätyvät permeaattiin. Eri suodatuskalvotyyppien erotteluominaisuuksia on esitelty kuvassa 1. Nanosuodatusta on käytetty suotovesien käsittelyssä biologisen esikäsittelyn jälkeen. Suodatuksessa syntyvä konsentraatti voidaan käsitellä adsorptiolla tai kemiallisella hapetuksella ja sen jälkeen kierrättää uudelleen biologisen käsittelyn alkuun. (Ehrig & Robinson 2011, 866.)

## TYPE OF MEMBRANES AND CHARACTERISTICS



Kuva 1. Suodatuskalvojen tyypit ja ominaisuudet (Pentair).

Nanosuodatuskalvojen huokoskoot sijoittuvat UF- ja RO-kalvojen väliin huokoskoon ollessa 0,001–0,01  $\mu\text{m}$ . NF-prosessissa käyttöpainne vaihtelee 70 ja 220 psi:n välillä. Nanosuodatuskalvot ovat yleensä komposiittikalvoja ja yleisiä valmistusmateriaaleja ovat esimerkiksi polyamidi ja selluloosa-asetaatti. NF-prosessissa haitta-aineiden erotus tapahtuu seulomisella ja/tai diffuusiolla. (Vigneswaran ym. 2012, 43, 55–56.)

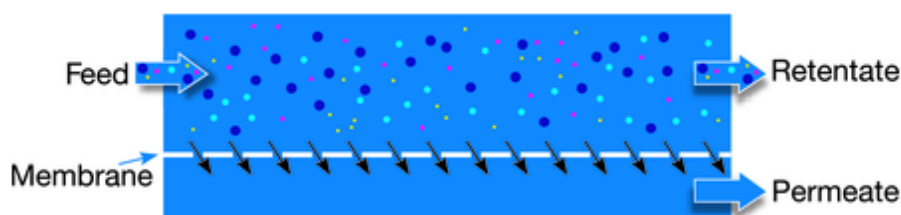
### 3.3.3 Käänteisosmoosi

Käänteisosmoosi on yleisin suotovesien käsittelyyn käytetty kalvosuodatustekniikka (Ehrig & Robinson 2011, 868). Suomessa kaatopaikkavesille tehdään tai on tehty erilliskäsittelyä käänteisosmoosilla Kujalan jäteasemalla, Kuusiselän kaatopaikalla, Munkkaan jätekeskuksella Lohjalla ja Riukkajängän jäteenkäsittelykeskuksella Torniossa (Kaartinen ym. 2009, 29–30). Käänteisosmoosin etuihin kuuluu korkealaatuisen permeaatin tuotto. RO-prosessissa ajatuksena on saada liuotin, kuten vesi kulkemaan paineen avulla kalvon läpi väkevämmästä liuoksesta laimeampaan liuokseen haitta-aineiden jäädessä kalvon toiselle puolelle. RO-prosessissa paine keskitetään konsentraatin puolelle ja tämän paineen on oltava osmoottista painetta korkeampi. Konsentraatin määrän vähentyessä, tarvittavan paineen määrä kasvaa, jotta saadaan tuotettua korkealaatuista permeaattia.

Tehokas käänteisosmoosin toiminta saattaa joskus tarvita kemikaalien esimerkiksi happojen käyttöä, mikä johtaa taas kiintoainejäämien kasvuun konsentraatissa. (Ehrig & Robinson 2011, 868.)

RO-kalvojen huokoskoot ovat alle  $0,001 \mu\text{m}$ . Käyttöpaine vaihtelee 800–1 200 psi:n välillä. Korkea käyttöpaineen tarve johtaa korkeaan virrankulutukseen, mitä voidaan pitää RO-prosessin haittapuolena. RO-kalvot ovat samankaltaisia kuin NF-kalvot, mutta kalvojen verkkorakenne on tiiviimpi. (Vigneswaran ym. 2012, 43, 55, 58.)

RO-prosessissa käytetään yleensä poikkivirtausmoduuleja, mikä mahdollistaa kalvon jatkuvan puhdistuksen ja estää näin kalvon likaantumista ja tukkeutumista. Poikkivirtausmoduulin (kuva 2) toiminta perustuu siihen, että vain osa nesteestä läpäisee kalvon. Loput nesteestä jatkaa kulkuaan myötävirtaan puhdistuen samalla kalvoa sen pinnalle jääneistä haitta-aineista. Kalvojenpintojen puhtaana pysyminen vaatii kuitenkin syöttöveden esikäsitteilyä esimerkiksi mikro- tai ultrasuodatuksella. (Vigneswaran ym. 2012, 56–57.)

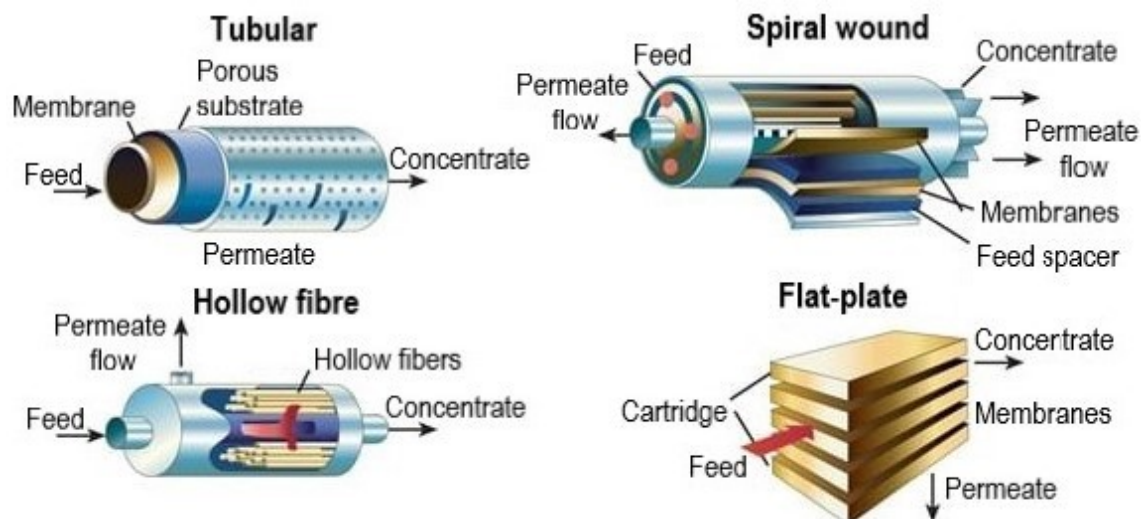


Kuva 2. Poikkivirtausmoduuli (Alfa Laval).

Suurin osa kustannuksista RO-prosessissa aiheutuu sähkönkulutuksesta. Myös esikäsitteilyn tarve lisää syntyviä kustannuksia. Prosessissa muodostuva konsentraatti tulee myös ottaa huomioon arvioitaessa prosessin taloudellisuutta. Henkilöstön työpanosta prosessin käyttö ei juuri tarvitse. (Kaartinen ym. 2009, 87.)

### 3.3.4 Kalvomoduulit

Moduuleiden tarkoitus on antaa tukea suodatuskalvoille ja luoda hyvät edellytykset suodatuksen hallinnalle. Moduulityypeistä yleisimpiä ovat putki- (tubular), spiraali- (spiral wound), onttokuitu- (hollow fibre) ja levymoduulit (flat-plate), jotka on esitelty kuvassa 3. (Vigneswaran ym. 2012, 46.)



Kuva 3. Yleisimmät kalvosuodatusmoduulit (Torzewski 2009).

Putkimoduuleissa suodatuskalvot on sijoitettu putkien sisäpuolelle. Putket voidaan kytkeä joko sarjaan tai rinnakkain. Spiraalimoduuleissa käytetään tasaisia kalvoja, jotka ovat kierretty keskiputken ympärille. Kalvot ovat erotettuna toisistaan verkkomaisten välilevyjen avulla. Onttokuitumoduulissa puoliläpäisevät kuidut ovat sijoitettuna moduulin sisälle. Kuitujen ulkohalkaisija on yleensä alle 1 mm sisähalkaisijan ollessa alle 0,5 mm ja yhteen moduulin mahtuukin tuhansia kuituja. Levymoduuleissa tasaiset suodatuskalvot on asennettu levyille, jotka antavat huokoisen alustan permeaatin poistoaukolle. Levyjen väliin jäävä virtauskanavat ovat ohuita, noin 1–3 mm. (Vigneswaran ym. 2012, 46–47.) Spiraalimoduulit ja erityisesti onttokuitumoduulit ovat herkkiä esikäsittelemättömässä suotovedessä esiintyvälle kiintoaineille (Ehrig & Robinson 2011, 868).

### 3.3.5 Kalvosuodatusmenetelmien ongelmat

Kalvosuodatusmenetelmät kohtaavat kaksi ongelmaa, jotka koskevat erityisesti käänteisosmoosia. Nämä ongelmat liittyvät konsentraatin muodostumiseen sekä kalvojen liikaantumiseen ja tukkeutumiseen. (Zhang & Surampalli 2016, 614.)

Kalvosuodatuksessa syntyvä konsentraatti tulee käsitellä tai hävittää. Haitalliset aineet eivät hajoa prosessin aikana, vaan ne pysyvät konsentraatissa. Yleisimmät keinot konsentraatin käsittelyyn on muuttaa se kiinteämpään muotoon joko haihduttamalla tai kuivaamalla. Konsentraatti voidaan myös polttaa. Monilla kaatopaikoilla konsentraatti sijoitetaan takaisin kaatopaikalle. Koska haitta-aineita ei käsitellä eivätkä ne poistu alueelta,

tämä johtaa haitta-aineiden siirtymiseen takaisin suotoveteen vuosikymmenten kuluessa ja kaatopaikan ympäristöriskit pysyvät ennallaan. (Kaartinen ym. 2009, 87; Ehrig & Robinson 2011, 866.) Sopivilla järjestelyillä syntyvän konsentraatin määrää voidaan kuitenkin vähentää ja permeaatin kokonaisuudeksi prosessissa voidaan saavuttaa jopa 97 %. Usein syntyvän konsentraatin määrä virtaamasta on kuitenkin 10–25 %. (Kaartinen ym. 2009, 87.)

Suotovedessä olevat haitta-aineet aiheuttavat ajan mittaan kalvojen likaantumista ja tukkeutumista. Kalvojen likaantuminen riippuu suotoveden laadusta sekä erilaisista fysikaalisista muutoksista, joita tapahtuu suodatusprosessin aikana. Kalvojen ennen aikaista likaantumista ja tukkeutumista voidaan estää prosessiin syötettävän veden esikäsittelyllä. Kalvojen likaantumista voidaan ehkäistä myös rikkihapon, desinfiointiaineiden ja pesuaineiden käytön avulla. (Kaartinen ym. 2009, 87; Ehrig & Robinson 2011, 868.)

### 3.3.6 Haitta-aineiden poistuminen kalvosuodatuksessa

Dudziakin ja Bodzekin (2008, 98) tutkimuksessa nanosuodatuksen pidätyskyky 4-nonyylifenolin osalta ylsi 74,2 %:iin, kun taas käänteisosmoosilla päästiin 96,8 %:n poistolukemiin. Ftalaattien osalta eri kalvosuodatustekniikoiden pidätyskyky on ollut yleisesti korkea. NF ja RO pystyvät pidättämään DEHP:tä ja DBP:tä 99,9 % ja UF 89,7 %. (Bodzek 2015, 499) Myös perfluoratut yhdisteet saadaan poistettua kalvosuodatuksen avulla tehokkaasti ja pidätyskyky on yleisesti yli 90 % PFOA:n ja PFOS:n osalta käyttämällä nanosuodatusta tai käänteisosmoosia. RO-prosessilla saadaan poistettua hyvin myös lyhytkestoisempia PFAS-yhdisteitä. (Cheremisinoff 2016, 155, 159.) Raskasmetallien poisto suodatuskalvoilla käy tehokkaasti ja käänteisosmoosilla saadaan poistettua lähtevästä vedestä lähes 100 % raskasmetalleista (Kaartinen ym. 2009, 87).

## 3.4 Adsorptio aktiivihielellä

### 3.4.1 Adsorptio

Adsorptio tarkoittaa aineiden siirtymistä neste- ja kaasufaasista kiintoaasiin. Adsorptiossa nestemäiset ja kaasumaiset aineet eli adsorbaatit sitoutuvat kiinteiden aineiden eli adsorbenttien pintaan. Adsorptio voi tapahtua kahdella eri tavalla. Fysikaalisessa

adsorptiossa (fysisorptio) adsorbaattien sitoutuminen tapahtuu van der Waalsin voimista johtuen. Kemikaalisessa adsorptiossa (kemisorptio) sitoutuminen tapahtuu kovalenttisilla sidoksilla. Usein adsorptio tapahtuu sekä fysisorption että kemisorption kautta. (Ehrig & Robinson 2011, 869; Cheremisinoff 2016, 165–166.)

Adsorptioon vaikuttaa adsorbaatin ja adsorbentin välisen sitoutumisen kemiallinen luonne sekä adsorboivan materiaalin pintakapasiteetti. Suuri pintakapasiteetti mahdollistaa maksimaalisen adsorption aikaansaamisen. Muita adsorptioon vaikuttavia tekijöitä on esimerkiksi virtausnopeus, lämpötila ja pH. (Cheremisinoff 2016, 166, 185.)

Adsorbentit voidaan jaotella neljään eri luokkaan: hiilipitoisiin (aktiivihiihi), happipitoisiin (zeoliitit), polymeerisiin ja hapettaviin adsorbentteihin (Cheremisinoff 2016, 166). Kuitenkin suotovesien käsittelyssä aktiivihiihen käyttö adsorbenttina on osoittautunut kustannuksiltaan ja adsorptiokyvyiltään kannattavimmaksi vaihtoehdoksi (Ehrig & Robinson 2011, 869).

$$\frac{X}{M} = K \times C_e^n$$

Kaava 1. Freundlichin adsorptioisotermi (Ehrig & Robinson 2011, 871).

Adsorption tehokkuutta voidaan kuvata adsorptioisotermillä, joka esittää funktiona adsorboituneen aineen massan aktiivihiihen massaa kohti. Freundlichin isotermiä (kaava 1) käytetään yleensä kuvaamaan liuenneiden orgaanisten epäpuhtauksien adsorptiota aktiivihiihen, jossa  $X/M$  tarkoittaa liuenneen aineen määrää aktiivihiihen painoa kohden,  $C_e$  tasapainokonsentraatiota liuoksessa sekä  $K$  ja  $n$  isotermin ominaisparametreja. Monesti suotoveden orgaanisten aineiden koostumus on tuntematon, jolloin isotermi tulee määrittää kokeellisesti mittausten avulla. (Ehrig & Robinson 2011, 869, 871.)

### 3.4.2 Aktiivihiihi

Aktiivihiihen tehokkuus haitta-aineiden poistoon perustuu aktiivihiihen suureen pinta-alaan, joka on kriittinen tekijä adsorptiossa. Aktiivihiihellä adsorptio on enimmäkseen fyysistä johtuen van der Waalsin voimista. Adsorptioasteeseen vaikuttaa hiukkasen koko, joka on yhteydessä hiukkasen kokonaispinta-alaan. (Cheremisinoff 2016, 171–172.) Aktiivihiihen pinta-ala voi olla jopa 800–1200 m<sup>2</sup>/g (Ehrig & Robinson 2011, 869).

Aktiivihiihen adsorptiokykyyn vaikuttaa aktivointiprosessi, huokoskoon jakauma ja pinnan ominaisuudet. Pinta-alan lisäksi adsorptiokapasiteetti riippuu aktiivihiihen sisäisestä huokoisesta rakenteesta ja funktionaalisen ryhmän läsnäolosta huokoisella pinnalla. Pinnan sähkövaraus voi joko parantaa tai heikentää molekyylien adsorptoitumista hiilen pintaan. (Cheremisinoff 2016, 169.)

Aktiivihiihiltä voidaan valmistaa erilaisista hiilipitoisista materiaaleista, kuten kivihiilestä, puusta, sahanpurusta, ligniinistä, turpeesta ja pähkinänkuoresta. Aktiivihiihen valmistusprosessiin kuuluu kaksi vaihetta: hiiletys ja aktivointi. Ennen hiiletystä ja aktivointia lähtömateriaali kuitenkin mukautetaan siten, että saavutetaan halutut fyysiset ominaisuudet, kuten rakeen koko, muoto, karkeus ja kovuus. Hiiletys alkaa raaka-aineen kuivauksella, jonka jälkeen se kuumennetaan hitaasti yleensä alle 800 °C:een ilman poissa ollessa, jolloin sivutuotteet saadaan poistettua lähtömateriaalista. Hiilettyksen jälkeen hiiltyneet hiukkaset aktivoidaan aktivointiaineen, kuten vesihöyryn tai hiilidioksidin avulla korkeissa, 800–900 °C:een lämpötiloissa. Aktivointivaiheessa aktiivihiihen muodostuu huokoinen kolmiulotteinen hilarakenne. Aktivoinnin aikana syntyneiden huokoisten koko riippuu aktivointiajasta. (Cheremisinoff 2016, 169–170, 172–173.)

Yleisimmin aktiivihiihiltä käytetään joko jauhetussa (PAC) tai rakeisessa (CAG) muodossa. American Water Works Association määrittelee GAC:n minimikoon standardissaan B604 siten, että se ei läpäise 50 meshin seulaa (0,297 mm) ja tätä hienomman materiaalin taas PAC:ksi. (Cheremisinoff 2016, 170, 173.)

Suomessa aktiivihiihen käyttöä suotovesien erilliskäsittelyyn on käytetty mm. Ekokem Oy Ab:n puhdistamolla Riihimäellä. Alueen sadevesien ja ongelmajätdekaatopaikan suotovesien käsittelyyn on käytetty aktiivihiihen ohella hiekkasuodatusta, ioninvaihtoa ja emulsion hajotusta. Myös Ekokem-Palvelun Porin ja Anjalankosken keskuksen puhdistamoilla kaatopaikkavesiä on käsitelty aktiivihiihellä yhdessä kemiallisen käsittelyn ja hiekkasuodatuksen kanssa. (Kaartinen ym. 2009, 29–30.)

### 3.4.3 Jauhettu aktiivihiihi

PAC:tä ei yleensä käytetä omassa prosessiyksikössä, vaan PAC annostellaan sekoitus-säiliöstä muiden prosessien, kuten koagulaation aikana. Myöhemmin PAC saadaan eroteltua joko flokkulaatiolla tai laskeuttamalla. Rakeiseen aktiivihiihen verrattuna jauhetun

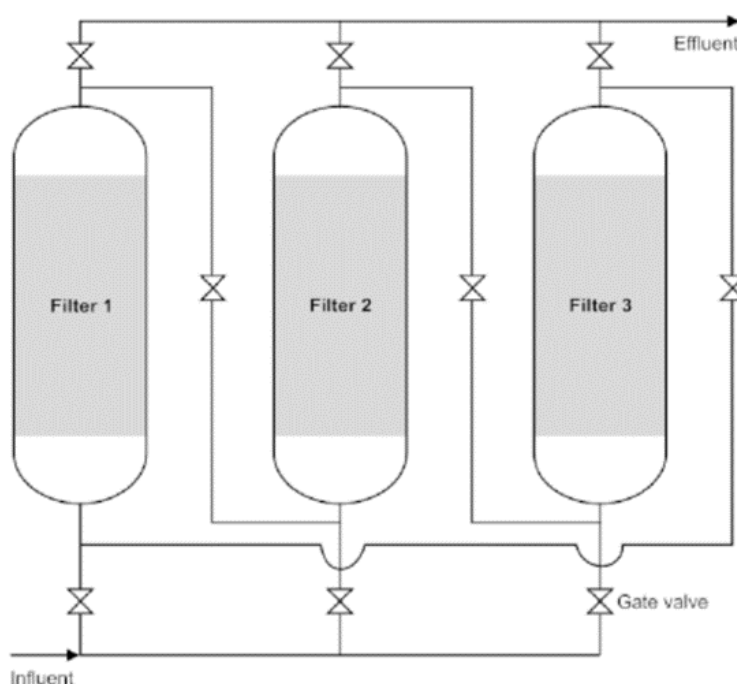


aktiivihiilen adsorptiokyky on huomattavasti suurempi. (Ehrig & Robinson 2011, 869; Cheremisinoff 2016, 158, 173.)

PAC koostuu murskatuista tai jauhetusta hiilihiukkasista. Aktivoinnin jälkeen aktiivihiili jauhetaan sopivan kokoiseksi. Useimmissa aktivointiprosesseissa syntyy hiiltä, jonka pH on suurempi kuin 7. Aktiivihiilen pH:ta voidaan kuitenkin säätää lisäämällä siihen joko happoa tai emästä riippuen käyttötarkoituksesta. (Cheremisinoff 2016, 170, 173.) PAC on halvempaa kuin GAC, mutta sen haittapuolena on, että sitä ei voida uudelleenaktiivoida (Ehrig & Robinson 2011, 869).

#### 3.4.4 Rakeinen aktiivihiili

Suotovesien käsittelyssä GAC:tä käytetään omissa suodatussäiliöissä. Aktiivihiili on vaihdettava, kun sen adsorptiokapasiteetti on täyttynyt. Aktiivihiili saadaan vaihdettua helposti sulkuventtiileillä varustetun putkiston avulla (kuva 4). Aloitustilanteessa käsiteltävä vesi virtaa järjestyksessä: suodatin 1, suodatin 2 ja suodatin 3. Ensimmäisen suodattimen (suodatin 1) aktiivihiilen vaihdon jälkeen veden virtaus kulkee järjestyksessä: suodatin 2, suodatin 3 ja suodatin 1. (Ehrig & Robinson 2011, 869–870.) Yleensä suodatusta edeltää biologinen käsittelyvaihe (Cheremisinoff 2016, 176).



Kuva 4. Aktiivihiilisuodatinjärjestelmä, jossa on kolme suodatinsäiliötä (Ehrig & Robinson 2011, 869–870).

GAC:tä voidaan käyttää joko rakeisessa muodossa tai suulakepuristettuna. GAC:n mekaaninen lujuus tulee olla riittävä, jotta se kestää jatkuvaa käyttöä. Hiilen aktivointivaihe ei saa olla liian lyhyt eikä liian pitkä: lyhyt aktivointivaihe ei tuota hiillelle tarvittavaa adsorptiovoimaa ja liian pitkä aktivointivaihe tekee hiilestä liian pehmeää ja tilaa vievää. Hiilestä voidaan kuitenkin tehdä tiheämpää lisäämällä siihen sidosaineita, kuten sokeireita, tervaa tai pikiä. (Cheremisinoff 2016, 171, 173.)

Adsorptiokapasiteetin täytyessä GAC täytyy vaihtaa tai regeneroida, sillä muuten adsorptoituneet haitta-aineet voivat desorboitua adsorbentista takaisin puhdistettavaan veteen. Regeneraatioissa adsorboituneet aineet poistetaan aktiivihiihen pinnasta. Yleisimmät menetelmät tähän ovat regenerointi lämmön tai höyryn avulla sekä kemiallinen regenerointi. Regeneroinnin aikana desorboituneet haitta-aineet sekä aktiivihiihi, jota ei voida enää regeneroida tulee käsitellä tai hävittää asianmukaisesti. (Cheremisinoff 2016, 191–194.)

#### 3.4.5 Haitta-aineiden poistuminen adsorptiolla

Rakeista aktiivihiihlä on käytetty yleisesti poistamaan teollisuuden jätevesistä mm. fenoleita, bentseeniä ja kloorattuja hiilivetyjä. GAC on myös yleinen käsittelymenetelmä pitkäketjuisten perfluorattujen yhdisteiden poistoon. Tyypillisesti perfluoratuista yhdisteistä PFOA:n ja PFOS:n mitatut poistoprosentit ovat olleet yli 90 %:n luokkaa. (Cheremisinoff 2016, 154–155, 176.) Laboratoriotesteissä nonyylifenolin on todettu adsorptoituvan tehokkaasti rakeiseen aktiivihiihen. PAC:n adsorptointikyky nonyylifenolin kohdalla jäi huomattavasti GAC:tä matalammaksi. Ftalaateista PAC:n adsorptointikyvyn todettiin olevan hyvä etenkin DEHP:llä ja DEHP saatiinkin poistettua lähes kokonaan. (Choi ym. 2006, 404–406.) Myös raskasmetallien poisto GAC:llä on mahdollista, joskin tulokset saattavat jäädä välttävälle tasolle (Cheremisinoff 2016, 168).

## 4 NÄYTTEENOTTO LOUNAIS-SUOMEN JÄTEHUOLLON TOPINOJAN KAATOPAIKALLA

### 4.1 Näytteenoton tavoite ja tutkittavat parametrit

Näytteenoton tavoite oli selvittää Lounais-Suomen Jätehuollon Topinojan kaatopaikan suotoveden keskimääräiset vuorokausikohtaiset haitta-ainepitoisuudet tutkittaville parametreille. Suotovedestä tutkittavia parametreja olivat nonyylifenolit ja -etoksylaatit, ftalaatit, PFAS-yhdisteet ja raskasmetallit. Lisäksi näytteistä analysoitiin bisfenoli A:n, E:n ja S:n, kemiallisen hapenkulutuksen, kiintoaineiden, fosforin ja typen pitoisuudet. Näytteenotto kuului osana SourceTrack-hankkeen laajempaa näytteenottoa, jossa näytteitä otettiin jätevesiverkostosta ja teollisuusyritysten jätevesistä.

### 4.2 Lounais-Suomen Jätehuolto Oy

Lounais-Suomen Jätehuolto (LSJH) on kuntien puolesta jätehuollon organisoinnista ja neuvonnasta vastaava yhtiö, jonka omistaa 17 Varsinais-Suomalaista kuntaa. LSJH:n suurimmat omistajat ovat Turun ja Salon kaupungit. LSJH:n toimialueella asuu yli 400 000 asukasta sekä alueella sijaitsee noin 36 000 vapaa-ajan asuntoa. LSJH:n tarjoamat jätehuollon palvelut rahoitetaan pääosin jätteenkäsittely-, palvelu- ja jätehuollon perusmaksuilla. LSJH:n toimipaikkoihin kuuluu neljä jätekeskusta sekä kahdeksan lajitteluasemaa. (Lounais-Suomen Jätehuolto Oy.)

### 4.3 Näytteenoton valmistelu

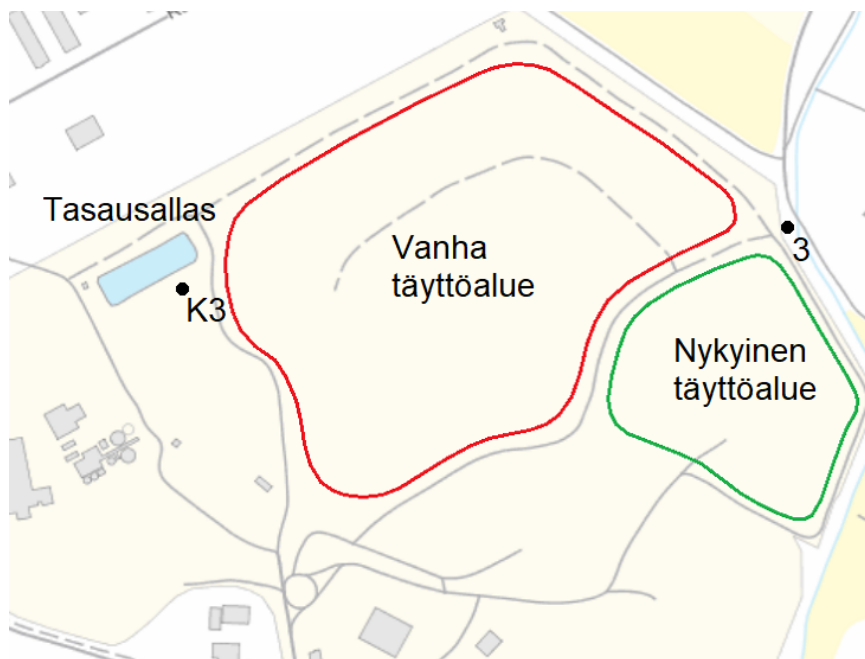
Ennen näytteenoton aloittamista Lounais-Suomen Jätehuollon alueelle suoritettiin katselmus 22.4.2021, jonka perusteella valittiin näytteenottopisteet ja näytteenottoajankohdat sekä voitiin valmistella näytekeräimet näytteenottoa varten. Näytteenottopisteiksi valikoituivat kaivo K3, joka edustaa vanhan täyttöalueen suotovesiä ja pumppuasema 3, joka edustaa uuden täyttöalueen suotovesiä.

Näytteenoton valmisteluissa kiinnitettiin huomiota erityisesti näytteenoton aikaiseen laadunhallintaan. Näytekeräinten materiaalit, kuten letkut ja näytteenottoastiat vaihdettiin

mahdollisimman vähän kontaminoiviin materiaaleihin, sillä yleisesti näytteenotossa käytetyt materiaalit saattavat sisältää analysoitavia parametreja. Samoin meneteltiin myös näytteiden pullotusvälineiden sekä työkäsiineiden osalta. Materiaalien edustavuus saatiin varmistettua kenttäolosuhteissa otettujen nollanäytteiden avulla.

#### 4.4 Vanha ja uusi täyttöalue

Topinojan kaatopaikan käyttöönotto aloitettiin vuonna 1971. Vanhan puolen kaatopaikalla tarkoitetaan tässä opinnäytetyössä Topinojan jätekeskuksen vanhaa pohjarakenteetonta täyttöaluetta. Vanha täyttöalue toimi loppusijoitusalueena vuoteen 2007 asti, jolloin se poistettiin käytöstä. Vanhan puolen pintarakenteita on rakennettu valtioneuvoston kaatopaikkapäätöksen mukaisesti vuodesta 2003 alkaen ja täyttöalueen loppuosan toteuttaminen on määritelty valmistuvan 2023 mennessä. Uuden puolen kaatopaikalla taas tarkoitetaan Topinojan nykyistä täyttöaluetta. Nykyinen täyttöalue otettiin käyttöön vuoden 2007 loppupuolella ja alue toimii edelleen loppusijoitusalueena. Nykyisen täyttöalueen pohjarakenteet on tehty valtioneuvoston päätöksen mukaisesti. (Lounais-Suomen Jätehuolto Oy 2019, 2–3, 15; Yli-Tolppa 2017, 13–15, 18.)



Kuva 5. Täyttöalueet ja näytteenottopisteet kaatopaikalla (Maanmittauslaitos).

Sekä uuden että vanhan puolen suotovedet johdetaan pumppaamoiden kautta tasausaltaaseen, josta ne johdetaan eteenpäin kaupungin viemäriverkostoon (Yli-Tolppa 2017,

13). Täyttöalueiden, näytteenottopisteiden ja tasausaltaan sijainnit Topinojan jätekeskuksella on esitetty kuvassa 5.

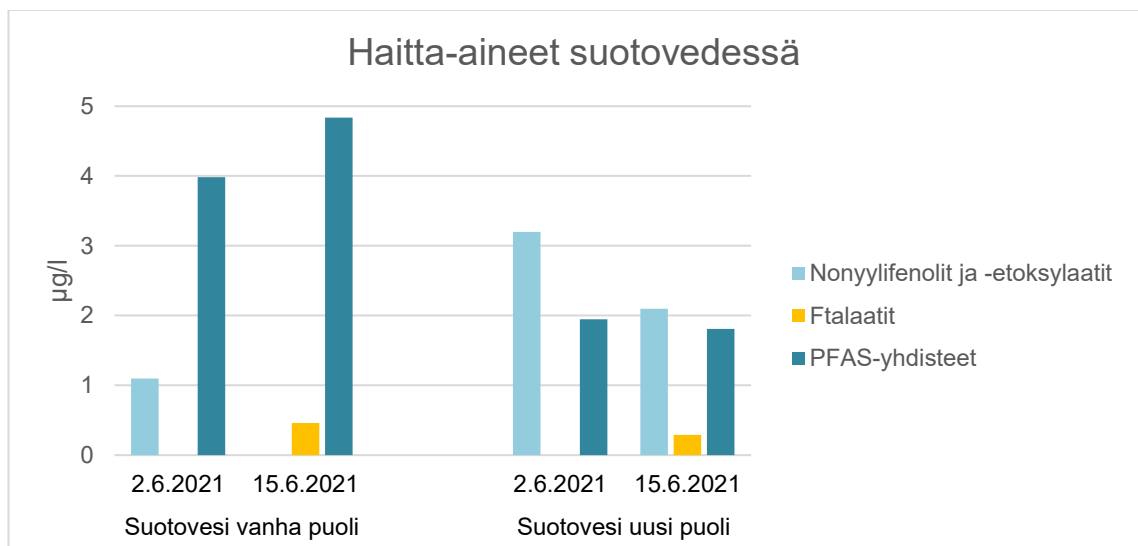
#### 4.5 Näytteenoton toteutus

Näytteenotto suoritettiin LSJH:n Topinojan jätekeskuksella Turussa. Näytteenottokertoja oli kaksi suotovesien laadunvaihtelun vuoksi. Näytteenotot sijoituivat aikavälille 2.6.–3.6.2021 ja 15.6.–16.6.2021. Näytteenotot toteutettiin kahden kokoomanäytekeräimen avulla kerätyillä kokoomanäytteillä. Kokoomanäytteessä näyte muodostetaan yhdistämällä useita näytteitä. Tässä tapauksessa kokoomanäytteet koostuivat 30 minuutin välein otetuista 400 ml:n näytteistä, jotka otettiin 24 tunnin aikana. Näytteet otettiin samanaikaisesti vanhan ja uuden kaatopaikan suotovesistä ja näytteitä kertyi kaksi sekä uudelta että vanhalta puolelta, eli yhteensä neljä kappaletta. Näytteenottojen aikana uuden puolen suotoveden kokonaisvirtaama oli ensimmäisellä näytteenottokerralla 73 m<sup>3</sup> ja toisella näytteenottokerralla 77,25 m<sup>3</sup>. Virtaamatiedot on laskettu kahden vuorokauden kokonaisvirtaamasta saadulla keskiarvolla. Vanhan puolen suotovesistä virtaamatietoja ei ole saatavilla. Näytteenotot suoritettiin poutaisissa sääolosuhteissa, tosin toista näytteenottokertaa edeltävinä päivinä oli satanut. Todennäköisesti tämän johdosta kokonaisvirtaama oli toisella näytteenottokerralla hieman ensimmäistä suurempi. Näytteenottovälineet pestiin ja huollettiin näytteenottojen välillä kontaminaatoriskin minimoimiseksi. Näytteiden analysoinnista vastasi Eurofins Environment Testing Finland.

## 5 NÄYTTEENOTON TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

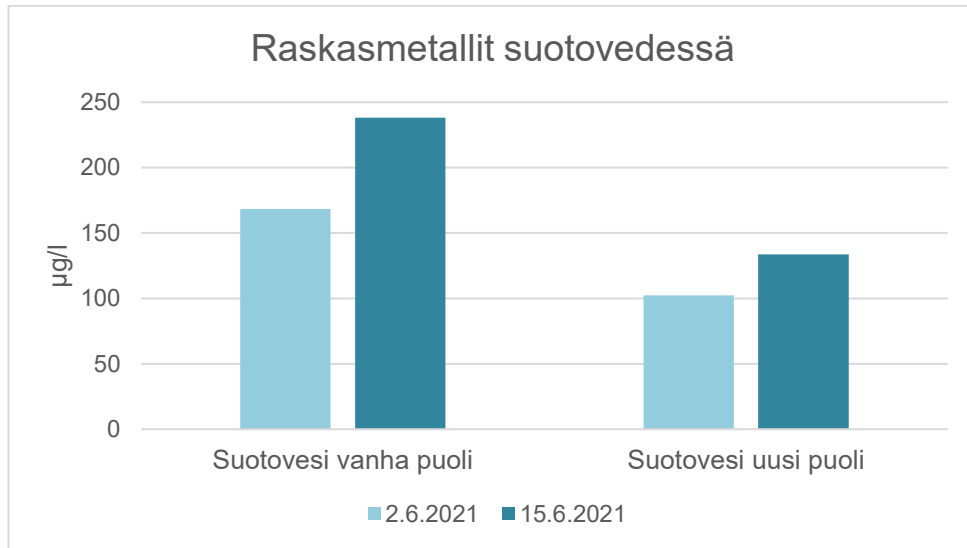
### 5.1 Näytteenoton tulokset

Nonyylifenolit ja niiden etoksylaatit, ftalaatit ja PFAS-yhdisteet on esitetty kuviossa 1. Raskasmetallien pitoisuudet on esitetty erillään muista haitta-aineista kuviossa 2, sillä niiden pitoisuudet poikkeavat huomattavasti muista haitta-aineista. Haitta-aineiden pitoisuudet suotovedessä on esitetty ainekohtaisesti liitteessä 1.



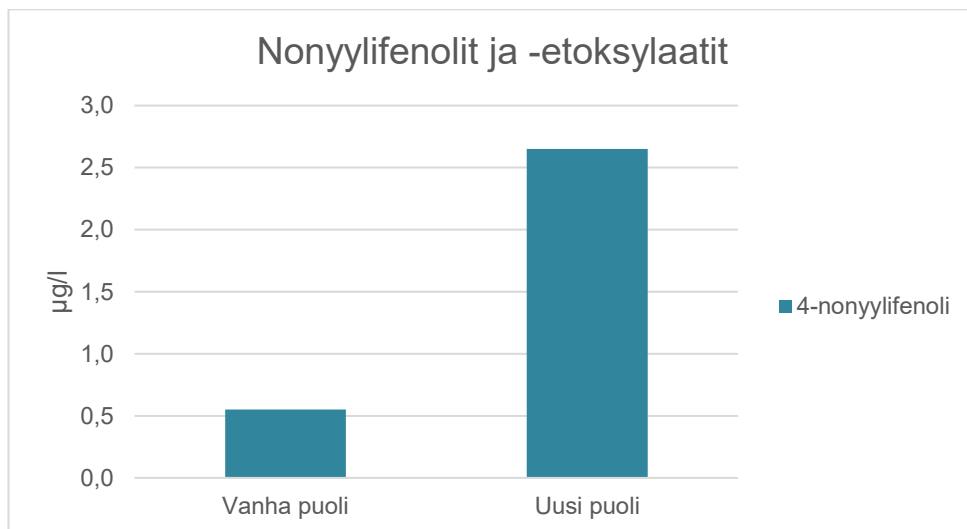
Kuvio 1. Nonyylifenolien ja -etoksylaattien, ftalaattien ja PFAS-yhdisteiden pitoisuudet Topinojan kaatopaikan suotovedessä.

Nonyylifenolien ja -etoksylaattien pitoisuudet vanhalla puolella vaihtelivat määrittäjärajan alapuolelta 1,1 µg/l asti. Uudella puolella nonyyllifenolien ja -etoksylaattien pitoisuuksiksi saatiin 3,2 ja 2,1 µg/l. Ensimmäisen näytteenottokerran tuloksissa ftalaattien pitoisuudet jäivät määrittäjärajan alle molempien puolien suotovesissä. PFAS-yhdisteiden pitoisuuksiksi saatiin vanhalla puolella 4,0 ja 4,8 µg/l ja uudella puolella 1,9 ja 1,8 µg/l.



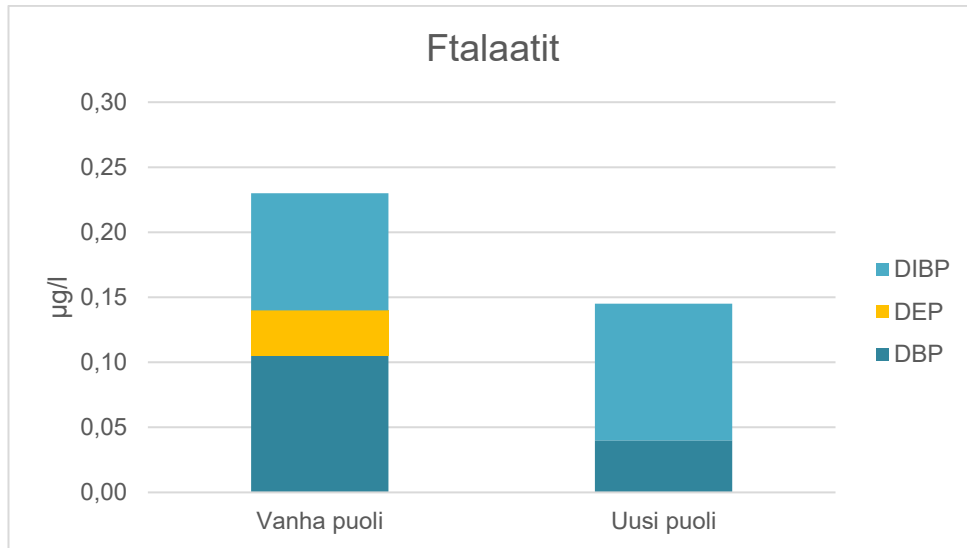
Kuvio 2. Raskasmetallien pitoisuudet Topinojan kaatopaikan suotovedessä.

Vanhalla puolella raskasmetallien pitoisuus oli ensimmäisellä näytteenotokerralla 168 µg/l ja toisella 238 µg/l. Uudella puolella pitoisuudet olivat 102 ja 134 µg/l.



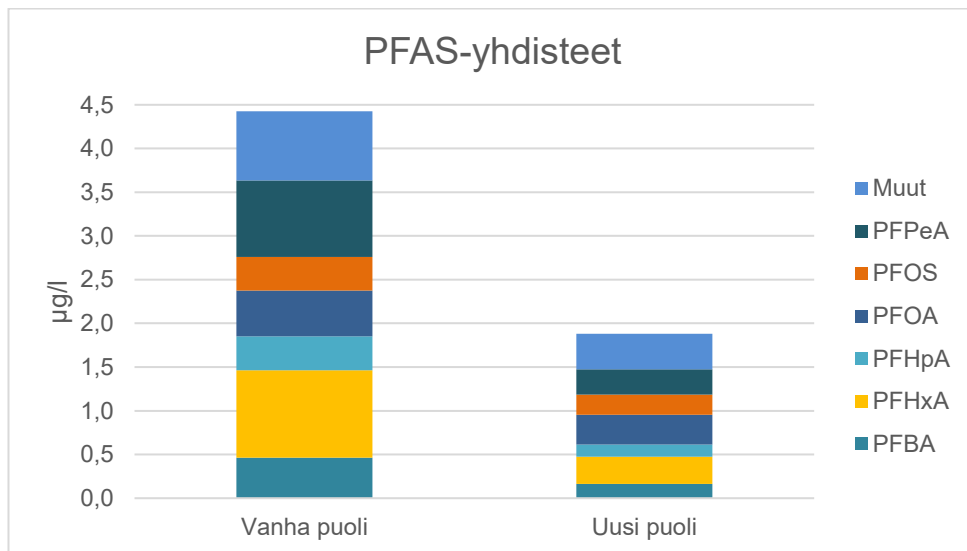
Kuvio 3. Nonyylifenolien ja -etoksyalaattien pitoisuudet eriteltynä yhdisteittäin.

Kuviossa 3 on esitetty molempien näytteenotokertojen nonyyylifenolien ja nonyyylifenolietoksyalaattien pitoisuudet keskiarvotuloksena vanhan ja uuden puolen suotovedessä. Nonyylifenolien ja -etoksyalaattien ryhmässä ainoastaan 4-nonyylifenolin pitoisuus suotovedessä ylitti määritysrajan. 4-nonyylifenolin pitoisuus oli vanhalla puolella 0,55 µg/l ja uudella puolella 2,65 µg/l.



Kuvio 4. Ftalaattien pitoisuudet eriteltynä yhdisteittäin.

Ftalaattien pitoisuuksien keskiarvot on esitetty kuviossa 4. Molempien puolien suotovedessä määrittärajaa ylittäneitä ftalaatteja olivat DBP ja di-isobutyyliftalaatti (DIBP). Lisäksi vanhan puolen suotovedessä havaittiin DEP:tä. DEHP:n pitoisuudet jäivät määrittärajaa alle sekä vanhan että uuden kaatopaikan suotovesien näytteissä.

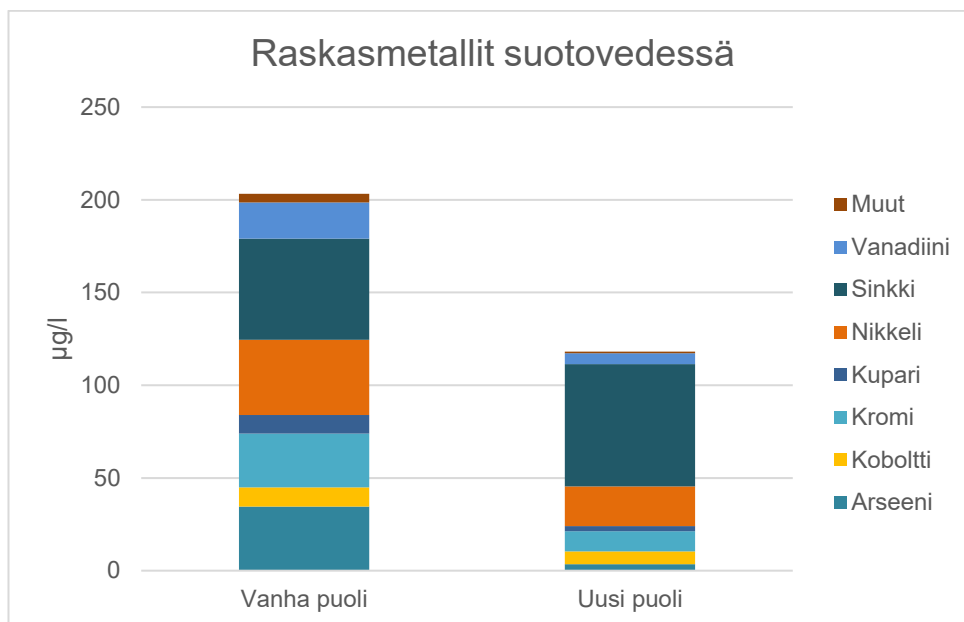


Kuvio 5. PFAS-yhdisteiden pitoisuudet eriteltynä yhdisteittäin.

PFAS-yhdisteiden pitoisuuksien keskiarvot on esitetty kuviossa 5. PFOS:n ja PFOA:n pitoisuudet PFAS-yhdisteiden kokonaismäärästä olivat vanhalla puolella noin viidesosa ja uudella puolella hieman yli neljäsosa. PFAS-yhdisteistä korostuivat vanhalla puolella



PFPeA ja PFHxA. Uuden puolen tuloksissa korostui muut-ryhmän osuus. Muut-ryhmä sisältää yhteensä 12 yhdistettä, joiden pitoisuudet olivat pääsääntöisesti  $<0,1 \mu\text{g/l}$ .



Kuvio 6. Raskasmetallien pitoisuudet eriteltynä aineittain.

Raskasmetallien pitoisuuksien keskiarvot on esitetty kuviossa 6. Suotovedessä korostuivat sinkin, nikkelin ja kromin pitoisuudet sekä vanhalla että uudella puolella. Vanhalla puolella korostui lisäksi arseenin pitoisuus. Muut-ryhmä sisältää lyijyn, seleenin ja uraanin pitoisuudet. Lyijyn pitoisuus ylitti määrittämissä rajan vain vanhalla puolella, jossa sen keskimääräinen pitoisuus oli  $1,6 \mu\text{g/l}$ . Kadmiumin pitoisuudet alittivat määrittämissä rajan kaikkien näytteiden kohdalla.

## 5.2 Tulosten tarkastelu

Suomalaisessa 2010-luvun vaihteen tutkimuksessa suotoveden 4-nonyylifenoli-pitoisuudeksi saatiin noin  $1,53 \mu\text{g/l}$  (Nakari ym. 2012, 16). Uuden puolen suotovedessä 4-nonyylifenolin pitoisuus nousi hieman tätä korkeammaksi, kun taas vanhalla puolella pitoisuus oli hieman matalampi. Myös määrittämissä rajan alittaneiden 4-nonyylifenolimono-etoksyylaatin ( $<0,50 \mu\text{g/l}$ ) ja 4-nonyylifenolidietoksyylaatin ( $<0,10 \mu\text{g/l}$ ) pitoisuudet vastaavat pitkälti suomalaisten tutkimusten tuloksia, jossa 4-nonyylifenolimonoetoksyylaatin pitoisuudet ovat olleet  $<0,05\text{--}0,21 \mu\text{g/l}$  ja 4-nonyylifenolidietoksyylaatin pitoisuudet  $0,06\text{--}0,08 \mu\text{g/l}$  (Mehtonen ym. 2012, 25; Nakari ym. 2012, 16).

DEHP:n pitoisuus Topinojan kaatopaikan suotovedessä jäi määrittämissä rajoissa. Pitoisuus vastaa osaltaan suomalaisia 2010-luvun vaihteen tutkimuksia, joissa osassa DEHP:tä ei ole havaittu lainkaan ja korkeimmillaan DEHP:n pitoisuus on ollut 2,5 µg/l. Myös BBP:n (<0,20 µg/l) ja DBP:n (0,08–0,21 µg/l) pitoisuudet vastaavat suomalaisten kaatopaikkojen suotovesien pitoisuuksia, sillä kyseisiä aineita ei ole pääsääntöisesti löydetty 2000-luvun selvityksissä. (Mehtonen ym. 2012, 16–22.)

PFAS-yhdisteiden pitoisuudet olivat vanhalla puolella yli kaksi kertaa korkeammat kuin uudella puolella. Suomalaisissa 2000-luvun puolella tehdyissä tutkimuksissa PFOS:n pitoisuus on ollut noin 0,1 µg/l, PFOA:n pitoisuus noin 0,1–0,25 µg/l ja PFHxA:n pitoisuus 0,05–0,2 µg/l (Mehtonen ym. 2012, 44–46; Nakari ym. 2012, 24). Sekä uuden että vanhan puolen PFOS:n, PFOA:n ja PFHxA:n pitoisuudet olivat huomattavasti korkeampia kuin suomalaisissa tutkimuksissa todetut pitoisuudet ja vanhalla puolella pitoisuudet saattoivat nousta moninkertaisiksi.

Raskasmetallien osalta suurimmat erot pitoisuuksissa uuden ja vanhan puolen välillä havaittiin arseenin kohdalla, jonka pitoisuus vanhalla puolella oli noin kymmenkertainen uuteen puoleen verrattuna. Topinojan suotoveden kadmium- (<0,10 µg/l), kupari- (<3,0–10 µg/l), lyijy- (<1,0–2 µg/l) ja sinkkipitoisuudet (27–82 µg/l) olivat matalampia kuin suomalaisten kunnallisten kaatopaikkojen raskasmetallien mediaanipitoisuudet (kadmium 0,5 µg/l, kupari 20 µg/l, lyijy 3 µg/l, sinkki 110 µg/l), kun taas nikkelpitoisuudet (20–41 µg/l) sekä vanhan puolen arseeni- (33–36 µg/l) ja kromipitoisuudet (26–32 µg/l) olivat mediaanipitoisuuksia (nikkeli 14 µg/l, arseeni 7 µg/l, kromi 15 µg/l) korkeampia (Assmuth ym. 1990, 68).

Virtaamatietojen avulla laskettu keskimääräinen vuorokausikuormitus uudella puolella näytteenottojen aikana oli nonyylifenolien ja -etoksyylaattien osalta 0,20 g, ftalaattien osalta 0,01 g, PFAS-yhdisteiden osalta 0,14 g ja raskasmetallien osalta 8,87 g. Vuositasolla laskettuna kuormitus olisi nonyylifenolien ja -etoksyylaattien osalta noin 70 g, ftalaattien osalta 4 g, PFAS-yhdisteiden osalta 50 g ja raskasmetallien osalta hieman yli 3 kg. Tämä kuitenkin edellyttäisi, että haitta-aineiden pitoisuudet suotovedessä sekä virtaamat pysyisivät samansuuruisina ympäri vuoden. Vanhan puolen virtaamatietojen puuttuessa vuorokausittaisen tai vuosittaisen kuormituksen laskeminen ei ollut mahdollista.

Kaatopaikan suotoveden PFAS-yhdisteiden pitoisuudet olivat huomattavasti korkeampia kuin SourceTrack-hankkeessa mitatut pitoisuudet teollisuus- ja asuinalueilla. Tämä oli odotettavissa, sillä kaatopaikkojen suotovesistä on ennenkin havaittu suuria pitoisuuksia

PFAS-yhdisteitä sekä suotovesien on todettu olevan merkittävä PFOA:n lähde jätevedenpuhdistamoille. Myös nonyylifenolien ja -etoksylaattien pitoisuudet olivat suotovedessä korkeampia kuin asuinalueiden jätevedessä, mutta kuitenkin matalampia kuin teollisuusalueen jätevesissä. Sen sijaan ftalaattien pitoisuudet suotovedessä olivat huomattavasti matalampia kuin pitoisuudet teollisuus- ja asuinalueiden jätevesissä. Toimialakohtaiset haitta-ainepitoisuudet jäte- ja suotovesissä on esitetty aineryhmittäin liitteessä 2.

## 6 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kaatopaikkojen suotovesissä esiintyvien nonyyli-fenolien ja -etoksylaattien, ftalaattien, PFAS-yhdisteiden ja raskasmetallien pitoisuuksia. Haitta-aineiden pitoisuuksia lähestyttiin kirjallisuuskatsauksen sekä näytteenoton avulla. Pitoisuuksien lisäksi kirjallisuuskatsauksen avulla selvitettiin haitta-aineiden käyttöä, ominaisuuksia ja haittavaikutuksia. Toisena tavoitteena opinnäytetyössä oli selvittää kirjallisuuskatsauksen avulla erilliskäsittelymenetelmiä, joilla voidaan poistaa tehokkaasti edellä mainittuja haitta-aineita suotovedestä.

Vertailtaessa eri käsittelymenetelmiä havaittiin, että nonyylifenolin ja raskasmetallien poistotehokkuuden kohdalla adsorptio ei osoittautunut yhtä tehokkaaksi käsittelyvaihtoehdoksi kuin tehokkaimmat kalvosuodatusmenetelmät. Opinnäytetyössä esitettyjen tietojen perusteella voidaan todeta, että paras puhdistustulos voidaan saavuttaa käänteis-osmoosilla.

Näytteenoton tuloksia tarkastellessa huomattiin, että suurimmat pitoisuuserot uuden ja vanhan puolen välillä olivat nonyylifenolien ja -etoksylaattien sekä PFAS-yhdisteiden kohdalla. Nonyylifenolien ja -etoksylaattien pitoisuudet olivat korkeampia uudella puolella, kun taas PFAS-yhdisteiden, ftalaattien ja raskasmetallien pitoisuudet olivat korkeampia vanhalla puolella. Haitallisten aineiden käyttörajoituksilla saattaa olla vaikutuksia uuden puolen suotoveden PFAS-yhdisteiden ja ftalaattien pienempiin pitoisuuksiin, mutta pitoisuuserot uuden ja vanhan puolen välillä saattavat johtua myös esimerkiksi kaatopaikan rakenteellisista syistä tai kaatopaikalle sijoitettavien jätteiden laadun muutoksista.

Käsittelymenetelmien vertailu osoittautui haastavaksi, sillä menetelmien poistotehokkuutta haitta-aineiden suhteen ei ole juuri tutkittu suotoveden käsittelyn yhteydessä, vaan tutkimuksia on tehty erityyppisten jätevesien käsittelyssä tai laboratorio-olosuhteissa. Suotoveden laadulla ja ominaisuuksilla saattaa olla vaikutuksia käsittelymenetelmien tehokkuuteen ja poistotehokkuus saattaakin todellisuudessa jäädä heikommaksi kuin tässä opinnäytetyössä esitetyt tulokset osoittavat. Käsittelymenetelmien vertailu osoittautui hankalaksi myös kustannusten suhteen, sillä kustannuksiin vaikuttavat monet tekijät, kuten esi- ja jälkikäsittelymenetelmien tarve, kalvosuodatuksessa syntyvän konsentraatin käsittely- ja hävitysmenetelmät, aktiivihillen regenerointi-, käsittely- ja hävitysmenetelmät sekä prosessien huoltotoimenpiteet ja ohjauksen tarve.

Suotovesien erilliskäsittely haitta-aineiden, erityisesti PFAS-yhdisteiden vähentämiseksi voidaan nähdä tarpeellisena toimenpiteenä, sillä suotovedet ovat merkittävä PFAS-yhdisteiden lähde jätevedenpuhdistamoille. Suotovesien erilliskäsittelyllä voitaisiinkin vähentää huomattavasti PFAS-yhdisteiden kulkeutumista ympäristöön. Päästövaatimusten ja puhdistamojen vastaanottoehtojen kiristyessä saattaa suotovesien erilliskäsittely muuttua taloudellisesti kannattavammaksi vaihtoehdoksi.

Näytteenotot Topinojan kaatopaikalla suoritettiin vain kaksi kertaa ja molemmat näytteenotokerrat sijoittautuivat kesälle, joten tuloksista ei käy selville vuodenaikaisvaihteluiden vaikutus suotovesien haitta-aineiden pitoisuuksiin, kuten keväällä lumien sulamisesta johtuva mahdollinen suotovesien laimeneminen. Tämä yhdessä puutteellisten virtaamatietojen kanssa vaikeutti haitta-ainepäästöjen laskemista vuositasolla. Vertailtaessa Topinojan ja muiden suomalaisten kaatopaikkojen suotovesien haitta-ainepitoisuuksia ongelmaksi muodostui haitta-aineiden pitoisuustietojen rajallinen saatavuus sekä tietojen mahdollinen vanhentuminen. Tämän johdosta haitta-ainepitoisuuksien vertailu kaatopaikkojen kesken ei välttämättä anna täysin totuudenmukaista kuvaa.

Tulevaisuudessa tutkimusaiheena voisi olla haitta-aineiden päästölähteiden paikantaminen Topinojan kaatopaikalla tai kaatopaikoilla yleisesti sekä selvittää mistä korkeat PFAS-yhdisteiden pitoisuudet kaatopaikkojen suotovedessä johtuvat. Opinnäytetyön jatkokehittämisideana voisi olla tarkempi selvitys suotovesien erilliskäsittelyn kustannuksista ja taloudellisesta kannattavuudesta, jonka apuna voitaisiin hyödyntää näytteenotosta saatuja tuloksia.

## LÄHTEET

Alfa Laval. Mitä on kalvosuodatus? Viitattu 21.9.2021. <https://www.alfalaval.fi/tuotteet-ja-jarjestelmat/erotustekniikka/kalvot/what-is-membrane-filtration/>

Assmuth, T.; Poutanen, H.; Strandberg, T.; Melanen, M.; Penttilä, S. & Kalevi, K. 1990. Kaatopaikkojen ongelmajätteiden ympäristövaikutukset: Riskikaatopaikkatutkimuksen pääraportti. Helsinki: Vesi- ja ympäristöhallitus

Bodzek, M. 2015. Membrane technologies for the removal of micropollutants in water treatment. Teoksessa A. Basile, A. Cassano & N. Rastogi (Eds), *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications*. Amsterdam: Elsevier.

Cheremisinoff, N. 2016. *Perfluorinated Chemicals (PFCs): Contaminants of Concern*. Beverly: Scrivener Publishing.

Choi, K. J.; Kim, S. G.; Kim, C. W. & Park, J. K. 2006. Removal efficiencies of endocrine disrupting chemicals by coagulation/flocculation, ozonation, powdered/granular activated carbon adsorption, and chlorination. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 23(3). <https://www.cheric.org/PDF/KJChE/KC23/KC23-3-0399.pdf>

Dudziak, M. & Bodzek, M. 2008. Removal of Xenoestrogens from Water During Reverse Osmosis and Nanofiltration – Effect of Selected Phenomena on Separation of Organic Micropollutants. Viitattu 13.9.2021. [http://delibra.bg.polsl.pl/Content/28209/BCPS\\_31803\\_-\\_Removal-of-xenoestro\\_0000.pdf](http://delibra.bg.polsl.pl/Content/28209/BCPS_31803_-_Removal-of-xenoestro_0000.pdf)

ECHA. REACH-asetus tutuksi. Viitattu 29.11.2021. <https://echa.europa.eu/fi/regulations/reach/understanding-reach>

Ehrig, H. & Robinson, H. 2011. Landfilling: Leachate Treatment. Teoksessa T. Christensen (Eds), *Solid Waste Technology & Management*. Chichester: John Wiley & Sons.

Jätelaki 17.6.2011/646, muutossäädös 15.7.2021/714. Saatavissa sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110646#L5P44>

Kaartinen, T.; Eskola, P.; Vestola, E.; Merta, E. & Mroueh, U-M. 2009. Uudet jätteenkäsittelykeskusten vesienkäsittelytekniikat. VTT tiedotteita 2502. Viitattu 20.7.2021. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2009/T2502.pdf>

Lounais-Suomen Jätehuolto Oy. Lounais-Suomen Jätehuolto Oy. Viitattu 14.9.2021. <https://www.lsjh.fi/fi/yritys-ja-ymparisto/lounais-suomen-jatehuolto-oy/>

Lounais-Suomen Jätehuolto Oy 2019. Topinojan jätekeskuksen ympäristöraportti 2018. Viitattu 8.11.2021. [https://vuosikatsaus.lsjh.fi/2018/wp-content/uploads/sites/2/2019/06/Topinojan\\_ymparistoraportti\\_2018.pdf](https://vuosikatsaus.lsjh.fi/2018/wp-content/uploads/sites/2/2019/06/Topinojan_ymparistoraportti_2018.pdf)

Maanmittauslaitos. Viitattu 5.12.2021. <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/>

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. Viitattu 18.8.2021. [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/39860/SYKEra\\_29\\_2012.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/39860/SYKEra_29_2012.pdf?sequence=1)

Mehtonen, J.; Perkola, N.; Reinikainen, J.; Seppälä, T. & Suikkanen, J. 2016. Perfluoratut yhdisteet ympäristössä – tietopaketti. Viitattu 11.8.2021. [https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kulutus\\_ja\\_tuotanto/kemikaalien\\_ymparistoriskit/ymparistoon\\_paatyvat\\_haitalliset\\_aineet/perfluoratut\\_yhdisteet](https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kulutus_ja_tuotanto/kemikaalien_ymparistoriskit/ymparistoon_paatyvat_haitalliset_aineet/perfluoratut_yhdisteet) > Perfluoratut yhdisteet ympäristössä -tietopaketti

Nakari, T.; Schultz, E.; Munne, P.; Sainio, P.; & Perkola, N. 2012. Haitallisten aineiden pitoisuudet puhdistetuissa jätevesissä ja jätevesien ekotoksisuus. Viitattu 10.11.2021. <https://core.ac.uk/download/pdf/14928324.pdf>

Pentair. Membrane Technology. Viitattu 18.9.2021. <https://xflow.pentair.com/en/spectrum/membrane-technology-in-general#>

Siimes, K.; Vähä, E.; Junttila, V.; Lehtonen, K. & Mannio, J. 2019. Haitalliset aineet Suomen vesissä: tilanne ja seurannan suuntaviivat. Viitattu 25.8.2021. [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/301460/SYKEra\\_8\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/301460/SYKEra_8_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

THL 2021a. PFAS-yhdisteet. Viitattu 17.8.2021. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/pfas-yhdisteet>

THL 2021b. Ftalaatit. Viitattu 18.8.2021. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/ftalaatit>

Tieteen termipankki 2015. Van der Waalsin voima. Viitattu 29.11.2021. [https://tieteentermipankki.fi/wiki/Fysiikka:van\\_der\\_Waalsin\\_voima](https://tieteentermipankki.fi/wiki/Fysiikka:van_der_Waalsin_voima)

Torzewski, K. 2009. Membrane Configurations. Viitattu 21.9.2021. <https://www.chemengonline.com/membrane-configurations/>

Tukes 2020. Fluoriyhdisteen PFOA ja samankaltaisten aineiden käytön rajoitus eteni komission hyväksyttäväksi. Viitattu 17.8.2021. <https://tukes.fi/-/fluoriyhdisteen-pfoa-ja-samankaltaisten-aineiden-kayton-rajoitus-eteni-komission-hyvaksyttavaksi#f109dc38>

Tuomisto, J. 2020. Vieläkö raskasmetalleista on ongelmia?. Viitattu 25.8.2021. <https://www.terveyskirjasto.fi/asy00220>

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 2.5.2013/331. Saatavissa sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130331#L7P45>

Vigneswaran, S.; Sathananthan, S.; Shon, H. K.; Kandasamy, J. & Visvanathan, C. 2012. Delineation of Membrane Processes. Teoksessa T. Zhang, R. Surampalli, S. Vigneswaran R. D. Tyagi, S. L. Ong & C. M. Kao (Eds), Membrane Technology and Environmental Applications. Reston: American Society of Civil Engineers.

Vesilaitosyhdistys 2014. Haitalliset aineet jätevedenpuhdistamoilla -hankkeen loppuraportti. Viitattu 18.8.2021. [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)

Yli-Tolppa, J. 2017. Kaatopaikan sulkemisorakenteet Topinojan jätekeskuksessa – Lounais-Suomen Jätehuolto Oy. Opinnäytetyö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Turku: Turun ammattikorkeakoulu. Viitattu 8.11.2021. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/139760/Yli-Tolppa\\_Joonas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/139760/Yli-Tolppa_Joonas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Ympäristönsuojelulaki 27.6.2014/527. Saatavissa sähköisesti osoitteessa <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527#L3P21>

## Haitta-ainepitoisuudet Topinojan kaatopaikan suotovedessä

		Suotovesi vanha		Suotovesi uusi	
		2.6. 2021	15.6. 2021	2.6. 2021	15.6. 2021
Alkyyliolenit ja -etoksyalaatit	4-n-Nonyylifenoli - (µg/l)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
	4-Nonyylifenoli - (µg/l)	1,1	<1,0	3,2	2,1
	4-Nonyylifenolidietoksyalaatti (isomeerien seos) - (µg/l)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
	4-Nonyylifenoliheksaetoksyalaatti (isomeerien seos) - (µg/l)	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
	4-Nonyylifenolimonoetoksyalaatti (isomeerien seos) - (µg/l)	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
	4-Nonyylifenolipentaetoksyalaatti (isomeerien seos) - (µg/l)	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
	4-Nonyylifenolitetraetoksyalaatti (isomeerien seos) - (µg/l)	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
	4-Nonyylifenolitrietoksyalaatti (isomeerien seos) - (µg/l)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
	4-tert-Oktyylifenoli - (µg/l)	<0,50	<0,50	<0,50	0,3
	4-tert-Oktyylifenolidietoksyalaatti - (µg/l)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
	4-tert-Oktyylifenolimonoetoksyalaatti - (µg/l)	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
	4-tert-Oktyylifenolitrietoksyalaatti - (µg/l)	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
	Bisfenolit	Bisfenoli A - (µg/l)	<10,0	9,6	34
Bisfenoli F - (µg/l)		<10	<1,0	<10	<1,0
Bisfenoli S - (µg/l)		<10	<5,0	<10	<5,0
Ftalaatit	Butyylibentsyyliiftalaatti - (µg/l)	<0,20	<0,02	<0,20	<0,02
	Dibutyliiftalaatti - (µg/l)	<0,50	0,21	<0,50	0,08
	Dietyyliiftalaatti - (µg/l)	<0,50	0,07	<0,50	<0,05
	Dietyyliheksyyliiftalaatti (DEHP) - (µg/l)	<3,0	<0,30	<3,0	<0,30
	Diheksyyliiftalaatti (DHXP) - (µg/l)	<0,10	<0,01	<0,10	<0,01
	Di-isobutyliiftalaatti (DiBP) - (µg/l)	<0,50	0,18	<0,50	0,21
	Di-isodekyliiftalaatti (DIDP) - (µg/l)	<10	<1,0	<10	<1,0
	Di-isononyliiftalaatti (DINP) - (µg/l)	<10	<1,0	<10	<1,0
	Dimetyliiftalaatti (DMP) - (µg/l)	<0,20	<0,05	<0,20	<0,05
	Di-n-oktyliiftalaatti (DNOP) - (µg/l)	<0,10	<0,01	<0,10	<0,01
	Dipentyliiftalaatti - (µg/l)	<0,10	<0,01	<0,10	<0,01
Raskasmetallit	Arseeni (As) - (µg/l)	33	36	3,7	3,4
	Kadmium (Cd) - (µg/l)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
	Koboltti (Co) - (µg/l)	10	11	7,1	6,5
	Kromi (Cr) - (µg/l)	26	32	10	12
	Kupari (Cu) - (µg/l)	10	10	5,2	<3,0
	Lyijy (Pb) - (µg/l)	1,1	2	<1,0	<1,0
	Nikkeli (Ni) - (µg/l)	40	41	20	23
	Seleeni (Se) - (µg/l)	1,7	<1,0	<1,0	<1,0
	Sinkki (Zn) - (µg/l)	27	82	50	82
	Uraani (U) - (µg/l)	2,5	2,1	1	0,63
	Vanadiini (V) - (µg/l)	17	22	5,4	6,2
Muut	CODCr - (mg O2/l)	760	740	1300	290
	Fosfori (P) - (µg/l)	6200	10000	1400	1900
	Kiintoaine (GF/A) - (mg/l)	190	190	46	80
	Mikroaaltohajotus HNO3	Tehty	Tehty	Tehty	Tehty
	Kokonaistyyppi (N) - (mg/l)	270	260	200	200



PFAS-yhdisteet	Metyyliperfluoro-1-oktaanisulfonamidoetikkahappo - (µg/l)	<0,020	<0,020	0,05	0,041
	11-Kloorieikosafuoro-3-oksoundekaani-1-sulfonaatti - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	4,8-Diokso-3H-perfluorononaanihappo (ADONA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	5H-Perfluoropentaanihappo (5H-PFPeA) - (µg/l)	0,06	<0,05	<0,025	<0,005
	7H-Dodekafluoriheptaanihappo (HPFHpA) - (µg/l)	<0,025	<0,05	<0,005	<0,005
	9H-Perfluorononaanihappo (9H-PFNA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	9-klooriheksadekafluoro-3-oksononaani-1-sulfonaatti - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Bis(1H,1H,2H,2H-perfluoro-dekyyli)fosfaatti (8:2 D) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Bis(1H,1H,2H,2H-perfluoro-oktyyli)fosfaatti (6:2 D) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Etyyliperfluoro-1-oktaanisulfonamidoetikkahappo - (µg/l)	<0,020	<0,10	0,055	<0,10
	Perfluoro(2-etoksietani)sulfonaatti (PFEESA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoro-1-oktaanisulfonamidoetikkahappo - (µg/l)	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
	Perfluoro-2,5,8-trimetyyli-3,6,9-trioksidodekaanih - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoro-2,5-dimetyyli-3,6-dioksononaanihappo (HF) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoro-2-metyyli-3-oksoheksaani-happo (HFPO-DA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoro-3,6-dioksoheptaanihappo (NFDHA/3,6-OPFHp) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoro-3,7-dimetyylioktaanihappo (P37DMOA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoro-3-metoksipropanihappo (PFMPA/PF4OPeA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoro-4-etyylisykloheksaanisulfonaatti (PFECH) - (µg/l)	0,017	0,012	0,012	<0,005
	Perfluoro-4-metoksibutaanihappo (PFMBA/PF5OHxA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	1H,1H,2H,2H-Perfluorodekaanisulfonaatti (8:2 FTS) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	1H,1H,2H,2H-Perfluorohexanesulfonaatti (4:2 FTS) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	1H,1H,2H,2H-Perfluoro-oktaanisulfonaatti (6:2 FTS) - (µg/l)	0,19	0,22	0,036	0,032
	Perfluorinonaanihappo (PFNA) - (µg/l)	0,026	0,025	0,023	0,023
	Perfluorobutaanihappo (PFBA) - (µg/l)	0,48	0,45	0,16	0,17
	Perfluorobutaanisulfonaatti (PFBS) - (µg/l)	0,23	0,31	0,091	0,087
	Perfluorodekaanihappo (PFDA) - (µg/l)	0,011	0,01	<0,005	<0,005
	Perfluorodekaanisulfonaatti (PFDS) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluorododekaanihappo (PFDoA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluorododekaanisulfonaatti (PFDoS) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoroheksaanihappo (PFHxA) - (µg/l)	0,7	1,3	0,31	0,31
	Perfluoroheksaanisulfonaatti (PFHxS), lin.+haaroit - (µg/l)	0,088	0,18	0,1	0,11
	Perfluoroheksadekaanihappo (PFHxDA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoroheptaanihappo (PFHpA) - (µg/l)	0,33	0,44	0,13	0,15
	Perfluoroheptaanisulfonaatti (PFHpS) - (µg/l)	<0,005	0,006	<0,005	<0,005
	Perfluorononaanisulfonaatti (PFNS) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoro-oktaanidekaanihappo (PFODA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluoro-oktaanihappo (PFOA) - (µg/l)	0,56	0,49	0,35	0,33
	Perfluoro-oktaanisulfonaatti (PFOS), lin.+haaroitt - (µg/l)	0,42	0,35	0,28	0,18
	Perfluoropentaanihappo (PFPeA) - (µg/l)	0,75	1	0,29	0,29
	Perfluoropentaanisulfonaatti (PFPeS) - (µg/l)	0,045	0,029	0,052	0,088
	Perfluorotetradekaanihappo (PFTA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
	Perfluorotridekaanihappo (PFTrDA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Perfluoroundekaanihappo (PFUnA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	
Perfluorioktaanisulfonamidi (PFOSA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	
Perfluoro-1-heksaanisulfonamidi (FHxSA) - (µg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	
Perfluorobutaanisulfonamidi (PFBSA) - (µg/l)	0,077	0,017	0,011	<0,005	

## Haitta-ainepitoisuudet aineryhmäkohtaisesti toimialoittain

