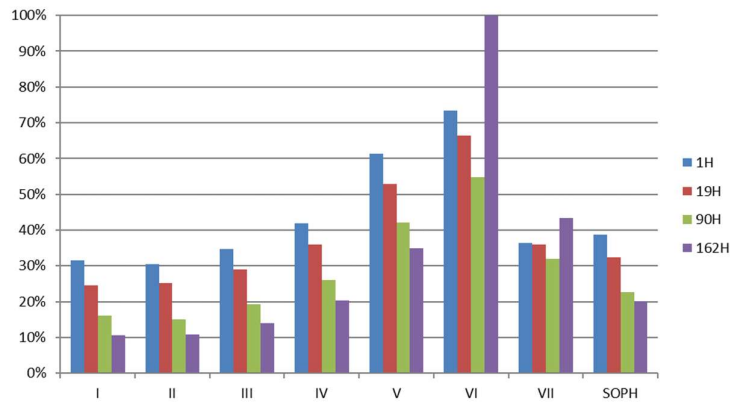
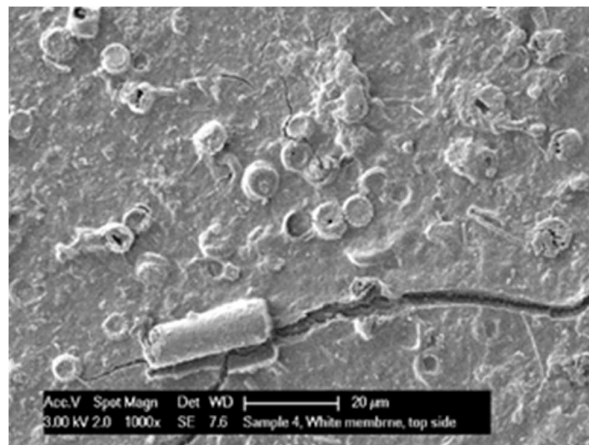
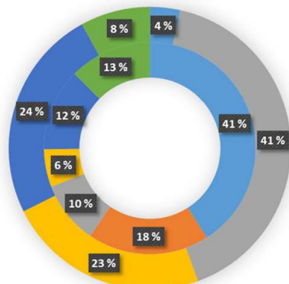


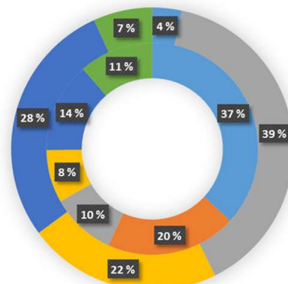
Loppuraportti – Vedenpuhdistuslaitoksen orgaanisen aineksen poiston tehostaminen kalvosuodatuksella



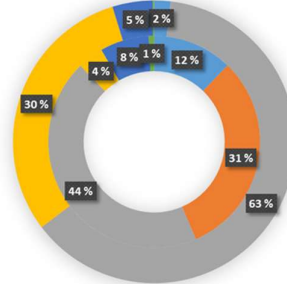
Ecosystems



Human health



Resources



■ Limewater
 ■ Membrane manufacturing
 ■ GAC filtration
 ■ Other chemicals
 ■ Infrastructure
 ■ Electricity

1 Johdanto

Aalto-yliopiston, HSY:n ja Kemiran yhteisessä ADWATECH-projektissa keskitytään parantamaan orgaanisen aineksen (NOM) poistoa vedenpuhdistuslaitoksella. NOM:n määrä pintavesissä on tutkimusten mukaan^{1,2,3} kasvanut ja kehityksen uskotaan jatkuvan samanlaisena tulevaisuudessakin, toisaalta ilmastonmuutoksen ja toisaalta vähenevien happosateiden takia. Vaikka NOM ei itsessään ole talousvedessä vaarallista, on sillä useita negatiivisia vaikutuksia niin talousveden valmistamisen kuin valmiin tuotteen kannalta. Se reagoi desinfiointissa käytettävän kloorin kanssa muodostaen karsinogeenisiä yhdisteitä, lisää mikrobiologista toimintaa jakeluverkostossa, heikentää desinfiointin tehoa ja aiheuttaa maku- ja hajuhaittoja. Kasvava NOM:n pitoisuus kuormittaa vedenpuhdistuslaitoksia lisäämällä saostuskemikaalien kulutusta, heikentämällä hiekkasuodatetun veden laatua ja vaikuttamalla desinfiointin tehokkuuteen. Näiden syiden takia orgaanisen aineksen poistoa on syytä tehostaa.

Kalvosuodatus vaikuttaa lupaavalta tekniikalta tehostamaan NOM:n poistoa. Kalvosuodatuksessa vesi johdetaan puoliläpäisevän kalvon läpi, jolloin epäpuhtaudet jäävät kalvon syöttöpuolelle ja ne voidaan poistaa jatkuvasti retentaattina tai kalvojen pesun yhteydessä. Kalvosuodatusprosessit voidaan jakaa mikro-, ultra-, ja nanosuodatukseseen sekä käänteisosoosiin. Mikrosuodatuksessa huokoskoko on suurin, noin 0,1-5 µm, nanosuodatuksessa huokoskoko puolestaan on pienin, 0,1-1,0 kDa (~0.001-0,01 µm). Myös muita eroja löytyy. Kalvosuodatuksen etuina ovat tasainen puhdistustulos⁴, prosessin yksinkertaisuus ja lyhyet viipymät⁵ sekä kalvomoduulien erittäin suuri pakkaustiheys⁶. Kalvosuodatus vaatii vain vähän pinta-alaa ja se voidaan asentaa esimerkiksi vanhoihin selkeytysaltaisiin⁷.

Kalvosuodatuksen käyttö osana vedenpuhdistusprosessia onkin kasvussa ja vedenpuhdistuslaitokset ovat korvanneet perinteisiä menetelmiä kalvosuodatuksella tai lisänneet kalvosuodatuksen laitokselle parantamaan tuotetun veden laatua⁸. Kalvomateriaalit ovat kehittyneet kestävimiksi ja pinnan ominaisuuksia voidaan muokata paremmin soveltumaan erilaisiin sovelluksiin. Tässä tutkimuksessa onkin tarkoitus tutkia löysiä nanosuodatuskalvoja^{9,10}, joiden huokoskoko on 1,0-3,0 kDa välillä ja jotka on erityisesti kehitetty esimerkiksi NOM:n poistoa varten. Näiden kalvojen käytöstä ja soveltamisesta on kuitenkin vähän tutkimustietoa, osa kalvoista on tullut markkinoille vasta tämän tutkimuksen alkaessa.

2 Tutkimuksen tavoitteet, tutkimuskysymykset ja tutkimusmenetelmät

2.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää löysien nanosuodatuskalvojen soveltuvuus orgaanisen aineksen poistamiseen pintavedestä. Lisäksi tavoitteena on vertailla nykyisten NOM:n poistoon käytettyjen menetelmien ja kalvosuodatuksen tuotetun veden laatua sekä vertailla näiden kahden vaihtoehdon ympäristövaikutuksia. Tutkimuksessa vertaillaan löysiä nanosuodatuskalvoja tiukempiin nanosuodatuskalvoihin tavoitteena etsiä huokoskoko jolla NOM:n poisto olisi tehokasta, mutta alkaliteetti ja kovuus pysyisivät riittävällä tasolla. Kokeissa on myös tarkoitus selvittää nanosuodatuksen vaatima esikäsitely.

¹ Evans *et al.* 2005

² Vuorenmaa *et al.* 2006

³ Worrall ja Burt 2007

⁴ Lerch *et al.* 2005

⁵ Leiknes *et al.* 2004

⁶ Zularisam *et al.* 2006

⁷ Ratnayaka *et al.* 2008

⁸ Pikkarainen ja Laine 2011

⁹ Afonso 2006

¹⁰ Akbari 2007

2.2 Tutkimuskysymykset

Kalvotekniikoiden ominaisuudet

- Mikä on vedenpuhdistusprosessissa paras paikka sijoittaa löysällä kalvolla toimiva nanosuodatusyksikkö? Minkälaisia esikäsittelymenetelmiä tämä vaatii?
- Kuinka tehokkaasti kalvon pinta saadaan puhdistettua huuhtelulla? Entä kemiallisella pesulla?
- Mikä on nanosuodatuksen kalvon materiaalin ja pinnan kemiallisten ominaisuuksien vaikutus kalvojen puhdistustuloksessa, tukkeutumisessa ja operoinnissa?

NOM:n ominaisuudet

- Miten raakaveden olosuhteet vaikuttavat kalvojen puhdistustulokseen?
- Miten NOM:n eri fraktiot poistuvat kalvosuodatuksessa?
- Mikä on NOM:n fraktioiden vaikutus kalvojen tukkeutumiseen?

Elinkaarianalyysi ja kustannustehokkuus

- Päästäänkö nykyisillä kalvotekniikoilla kustannustehokkaasti parempaan NOM:n poistoon kuin perinteisillä menetelmillä?
- Miten kalvotekniikoiden ympäristöjalanjälki eroaa perinteisistä menetelmistä? Miten erilaiset tulevaisuussennusteet muuttavat kalvotekniikoiden ja perinteisten menetelmien suhteita?

2.3 Tutkimusmenetelmät

2.3.1 Suodatuskalvon ominaisuuksien ja esikäsittelyn vaikutus suodatustulokseen

Suodatuskalvon vaikutusta suodatustulokseen tutkitaan vertailemalla viittä erilaista suodatuskalvoa (Taulukko 1). Näistä yksi on tiukka nanosuodatuskalvo, yksi on ultrasuodatuskalvo ja kolme ovat löysiä nanosuodatuskalvoja. Koelaitteisto mahdollisti kahden suodatuskalvon käytön samanaikaisesti. Ensimmäisessä linjassa käytettiin käsittelemätöntä raakavettä ja toisessa linjassa syöttövedenä toimi hiekkasuodatettu vesi, joka oli ensin kemiallisesti saostettu. Vesi suodatettiin yhden kalvomoduulin läpi, minkä jälkeen konsentraatista osa kierrätettiin prosessin alkuun ja osa johdettiin viemäriin. Näin pyrittiin jäljittelemään suodatuskalvojen todellisia olosuhteita, laitteiston kokonaissaanto oli 85 % suodatetusta vedestä. Yhden kalvon suodatuskoe kesti 14 vuorokautta. Kokeiden jälkeen valittiin kaksi suodatuskalvoa pidempiin kokeisiin, jotka kestivät noin 6 kuukautta per suodatuskalvo. Nämä kokeet tehtiin isommalla laitteistolla ja tarkoituksena oli selvittää paremmin kalvon kestävyyttä, vuodenaikojen vaikutusta suodatustulokseen ja elinkaariarviointiin tarvittavia suoritus tietoja.

Taulukko 1 Tutkimuksessa käytetyt suodatuskalvot ja niiden suorituskyky.

Valmistaja	Suodatuskalvon tekniset tiedot ^a				Koeolosuhteet (RV ^b)		Koeolosuhteet (HSV ^c)	
	Malli	MWCO (kDa)	Materiaali	Pinta-ala (m ²)	Suodatuspaine (bar)	Kalvovuo (LMH) ^d	Suodatuspaine (bar)	Kalvovuo (LMH) ^d
Filmtec	NF270	0.3	PPZ	2.60	4.5	17.7	4.5	19.4
Synder	XT	1.0	PES	2.51	5.1	54.5	5.3	55.1
Trisep	UA60	3.0	PPZ	2.42	4.5	11.0	4.6	11.2
Nadir	UH004	4.0	PES	1.80	5.5	28.9	5.3	39.6
Synder	ST	10.0	PES	2.51	5.3	55.2	5.4	53.4

^a Valmistajien antama tieto

^b Käsittelemätön raakavesi

^c Hiekkasuodatettu vesi

^d Normalisoitu 5 °C, 4 bar olosuhteisiin

Suodatuksen toimintaa selvitettiin tarkkailemalla kalvovuon ja suodatuspaineen muutoksia. Lisäksi suodatetun veden laatu tarkkailtiin useilla eri menetelmillä, nämä on mainittu luvussa 2.3.2. Esikäsittelyn vaikutusta kalvoprosessin toimivuuteen ja veden laatuun tarkkailtiin samoilla menetelmillä. Kuten mainittua, suodatuslaitteisto mahdollisti kahden erilaisen syöttöveden kokeilemi-

sen samanaikaisesti, näin ollen laitokselle tulevan raakaveden mahdolliset muutokset laadussa eivät vaikuttaneet vertailuun.

2.3.2 Analyysimenetelmät

Kokeissa käytetyn laatuanalyysimenetelmät on esitetty taulukossa 2. Orgaanisen aineen eri ja-keiden poistumista tutkittiin kahdella menetelmällä. HPSEC-analyysissä orgaaninen aine jaotellaan sen koon perusteella seitsemään eri kokoluokkaan, kun taas LC-OCD menetelmässä tutkitaan orgaanisen aineen koostumusta ja jaetaan se humukseen ja biogeenisen jakeeseen. UV:n ominaisabsorbanssi (SUVA₂₅₄) lasketaan jakamalla absorbanssi DOC:llä. Mikäli veden SUVA₂₅₄-arvo on yli neljä, ilmaisee se korkeaa hydrofobisuutta ja aromaattisuutta¹¹. Analyysit tehtiin HSY:n laboratoriossa, ellei toisin ole mainittu.

Taulukko 2 Veden laadun analyysit

Fysikaalinen laatu	NOM	Mikrobiologinen laatu
pH	DOC	R2A
Sameus	UV ₂₅₄	AOC ^c
Alkaliteetti	SUVA ₂₅₄	
Rauta	HPSEC ^a	
Kovuus	LC-OCD ^b	

^a Metropoli Lab

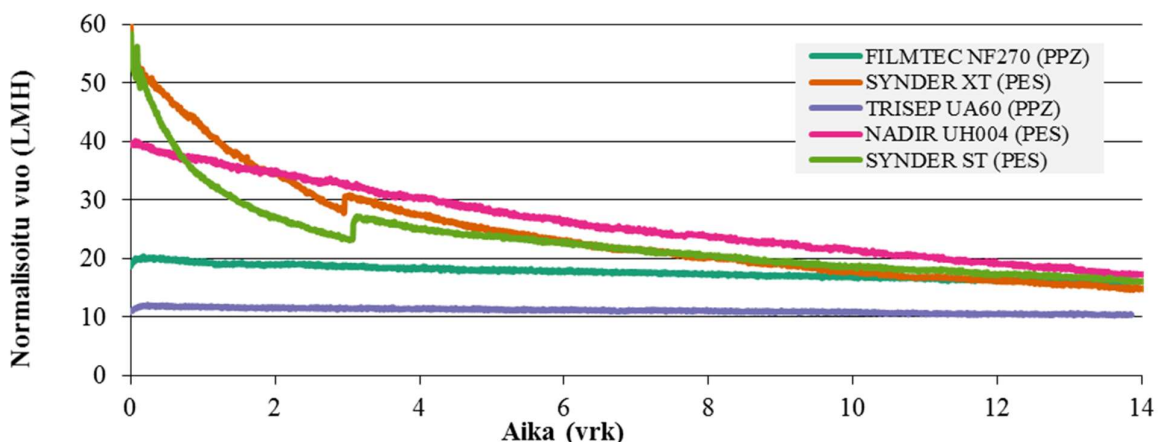
^b Kemira

^c Terveyden ja hyvinvoinnin laitos

3 Tutkimuksen tulokset

3.1 Kalvomateriaalin vaikutus suodatukseen

Tulokset osoittavat, että kalvomateriaalilla on huomattavasti suurempi merkitys tuotetun veden määrään kuin kalvon huokoskooilla (Kuva 1). PES-pohjaisilla kalvoilla vuo oli huomattavasti suurempi suodatuksen alkuvaiheissa. Näillä kalvoilla tukkeutuminen oli kuitenkin paljon nopeampaa kuin PPZ-pohjaisilla kalvoilla. Suurin vuo alussa oli kahdella PES-kalvolla, joista toisen huokoskoko oli 1 kDa kun toisella huokoskoko oli 10 kDa. Normalisoitu vuo oli kaikkein alhaisin kalvolla, jonka huokoskoko oli 3 kDa. Toisaalta tämä kalvo ei osoittanut juurikaan tukkeutumista 14 vuorokauden aikana.



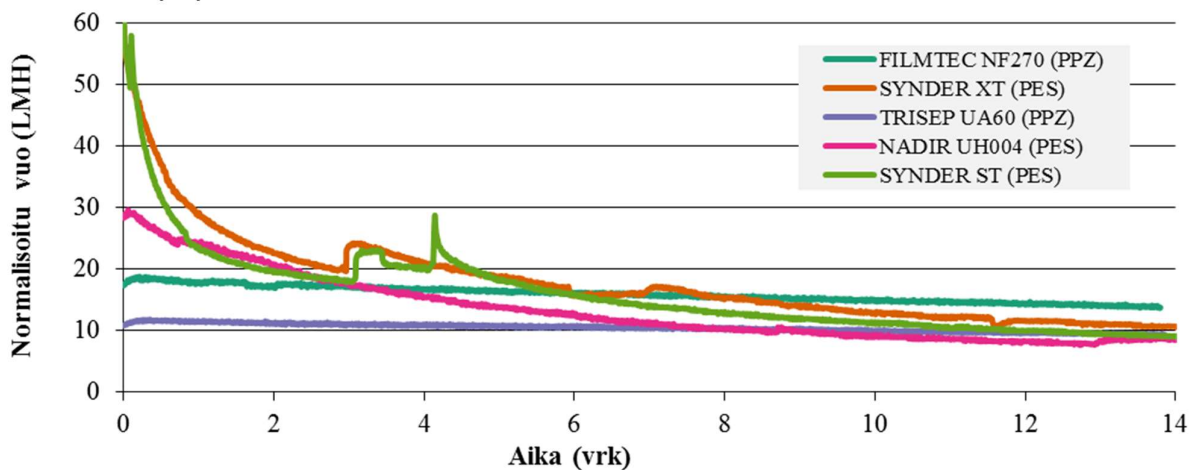
Kuva 1 Normalisoitu vuo (5 °C, 4 bar) kaikille tutkimuksessa käytetyille suodatuskalvoille. Kalvoille syötetty vesi oli esikäsitelty selkeytyksellä ja hiekkasuodatuksella. PES-kalvoilla vuo on alussa huomattavasti suurempi mutta niiden tukkeutuminen on nopeampaa ja vuo heikkenee neljäntoista päivän jälkeen samalle tasolle kuin PPZ-kalvoilla.

¹¹ Edzwald ja Tobiasson 1999

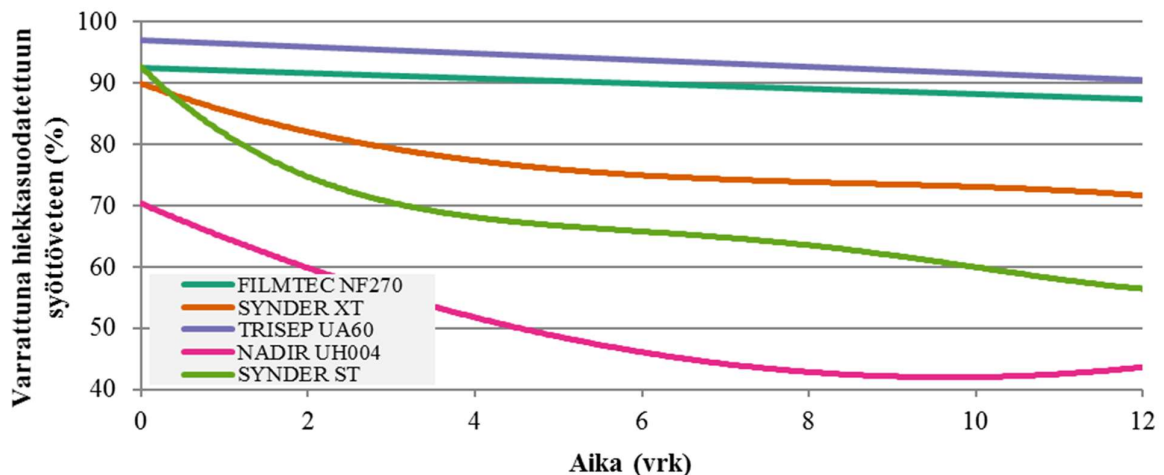
3.2 Esikäsitelyn vaikutus kalvon suorituskykyyn

Laitokselle tulevaa raakavettä puhdistettaessa kaikki PES-materiaalista olevien kalvojen suorituskyky laski, etenkin alussa tuotetun permeaatin vuo kalvon läpi laski huomattavasti nopeammin kuin esikäsitellyllä vedellä (Kuva 2). PPZ-materiaalista valmistetut kalvot sen sijaan tuottivat lähes saman määrän vettä kuin käsitellyllä syöttövedellä. 14 vuorokauden jälkeen ero kalvovuossa oli vain noin 10 % (Kuva 3). Päinvastoin Nadirin valmistamalla kalvolla vuo oli heti alussa 30 % alhaisempi ja 14 vuorokauden jälkeen yli 50 % pienempi kuin käsitellyllä vedellä.

Tulokset osoittavat, että kalvomateriaalilla on enemmän merkitystä kuin kalvon huokoskoolla. Esikäsitelyn tarve riippuukin kalvomateriaalista. PPZ-pohjaisilla kalvoilla joilla kalvovuo on alhaisempi, ei myöskään tarvita välttämättä esikäsitelyä. PES-pohjaisilla kalvoilla esikäsitelystä saattaa olla hyötyä.



Kuva 2 Normalisoitu vuo (5 °C, 4 bar) kaikille kalvoille, kun syöttövesi on ollut laitokselle tulevaa käsittelemättömää raakavettä. Kaikilla PES-materiaalin kalvoilla suorituskyky on heikentynyt, mutta PPZ-kalvot tuottavat suunnilleen yhtä paljon vettä.



Kuva 3 Suorituskyvyn vertailu kahden eri syöttöveden välillä. Suorituskyky on ilmoitettu vertailemalla raakavettä käsitellessä membraanin normalisoitua vuota hiekkasuodatuksella esikäsitellyn syöttövedeen. Tulos on esitetty prosentteina. Esimerkiksi Trisep-kalvon suorituskyky käsittelemättömällä raakavedellä on noin 90-95% esikäsitellystä vastaavasta.

3.3 Permaatin laatu

3.3.1 Orgaaninen aine

Vain yksi käytetyistä löysistä nanosuodatuskalvoista pystyi parantamaan laitoksen orgaanisen aineen poistoa (Taulukko 3), DOC-pitoisuus oli Trisep UA60-kalvon permeaatissa lähes analyysin määrittämysrajan tasolla. Kaksi muuta löysää nanosuodatuskalvoa poistivat orgaanista ainetta suunnilleen yhtä paljon kuin vesilaitoksen käyttämä kemiallinen käsittely, eikä toisaalta kalvo-suodatuksen sijoittaminen kemiallisen käsittelyn perään parantanut merkittävästi tuotetun veden laatua. Tulokset osoittavat, että orgaanisen aineen poisto on riippuvainen jostain muusta kuin kalvon huokoskoosta. Esimerkiksi pintamateriaali, pinnan varaus ja hydrofobisuus saattavat vaikuttaa poiston tehokkuuteen. SUVA₂₅₄-arvot osoittavat, että suodatuksen jälkeen jäljelle jäänyt orgaaninen aine on pääasiassa hydrofiilistä. Aromaattisuus on alhaisempi hiekkasuodatuksella käsitellyllä vedellä. Alhaisen SUVA₂₅₄-arvon on osoitettu estävän kalkin saostumista¹² sekä mahdollisesti heikentävän desinfiointin sivutuotteiden syntyä¹³.

HPSEC-tulokset (Kuva 4) osoittavat tarkemmin, että PPZ-materiaalista olevat kalvot poistavat erittäin hyvin suuremman kokoluokan orgaanisen aineen, mutta pienempi fraktio läpäisee kalvon. Muilla kalvoilla myös suuremman kokoluokan orgaanista ainetta on löydettävissä permeaatista. Kemiallisella käsittelyllä saadaan tehokkaasti poistettua suurimman kokoluokan orgaaninen aine, siksi piikit I-III puuttuvat myös vastaavista permeaateista. Piikit IV-V ovat matalammat, mutta ero käsittelemättömän raakaveden vastaaviin on huomattavasti pienempi kuin piikkien I-III. Käsittelemätöntä raakavettä suodatettaessa kalvoa läpäisevä suurimman kokoluokan orgaaninen aine saattaisi lisätä operointikustannuksia jatkokäsittelyvaiheessa. Kaikkein pienempien fraktioiden (piikit VI-VII) poisto on yhtä tehokasta molemmilla syöttövesillä. Kalvomateriaalilla on kuitenkin selkeä merkitys.

Tulokset vahvistavat suorituskyvystä vedettyjä johtopäätöksiä. Kemiallinen käsittely esikäsittelynä parantaa tuotetun veden laatua, mutta parannus ei ole merkittävää eikä alenna käyttökustannuksia riittävästi, jotta esikäsittely olisi taloudellisesti kannattavaa. Analyysien tulokset osoittavat myös, että PES-materiaalin kalvot pystyvät korvaamaan kemiallisen käsittelyn laitoksella ja vaatii samanlaiset jälkikäsittelyt kuin kemiallisesti käsitelty vesi. Yksi löysä nanosuodatuskalvo, Trisep UA60, tarvitsee vähemmän esikäsittelyä ja tuottaa paremman laatuista vettä kuin muut löysät nanosuodatuskalvot.

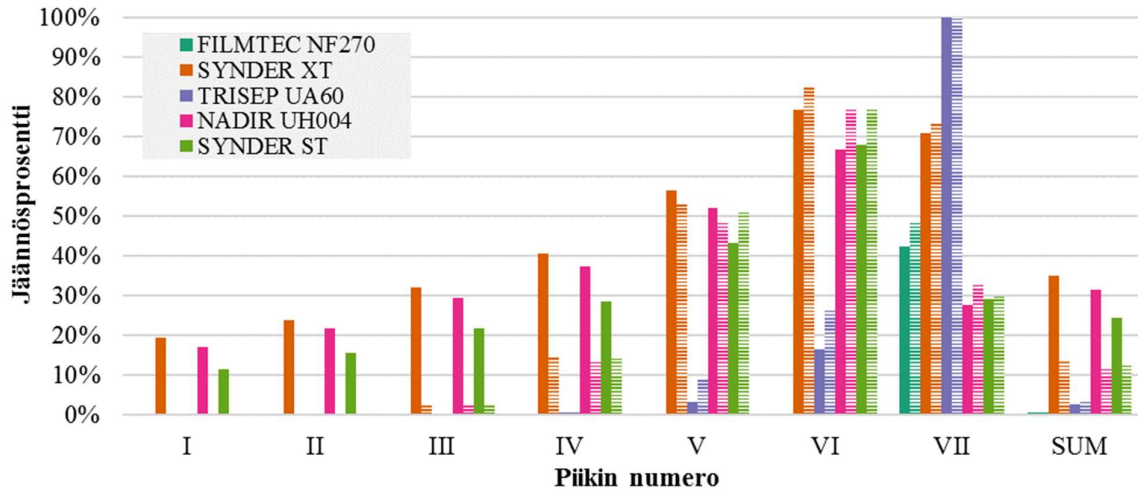
Taulukko 3 Orgaanisen aineen pitoisuus viiden eri kalvotyypin permeaatissa. Lisäksi taulukossa on mukana vertailu kahden eri syöttöveden suhteen (RV = käsittelemätön raakavesi, HSV = hiekkasuodatettu vesi). Jos tulos on ollut alle menetelmän määrittämysrajan (c_L), on tulos ilmoitettu puolet alle määrittämysrajan (ei < c_L)¹⁴.

Suodatuskalvo	Syöttö- vesi	DOC (mg/l)			UV254 (1/cm)			SUVA ₂₅₄ (L/mg/m)		
		KA	Min	Max	KA	Min	Max	KA	Min	Max
Filmtec NF270	RV	0.20	0.20	0.20	0.001	0.000	0.001	0.25	0.00	0.50
	HSV	0.20	0.20	0.20	0.000	0.000	0.001	0.17	0.00	0.50
Synder XT	RW	2.56	1.20	3.00	0.053	0.021	0.073	2.11	1.75	2.43
	HSV	2.12	2.10	2.20	0.032	0.031	0.033	1.48	1.48	1.50
Trisep UA60	RW	0.30	0.20	0.50	0.004	0.003	0.005	1.63	0.80	2.50
	HSV	0.53	0.40	0.70	0.007	0.006	0.008	1.36	1.00	1.75
Nadir UH004	RW	3.10	2.80	3.80	0.077	0.064	0.093	2.39	2.21	2.52
	HSV	2.18	2.10	2.30	0.033	0.032	0.036	1.51	1.45	1.57
Synder ST	RW	2.42	1.30	3.40	0.058	0.051	0.064	2.18	2.13	2.22
	HSV	2.13	1.80	2.50	0.032	0.030	0.033	1.46	1.43	1.50

¹² Hoch *et al.* 2000

¹³ Weishaar *et al.* 2003

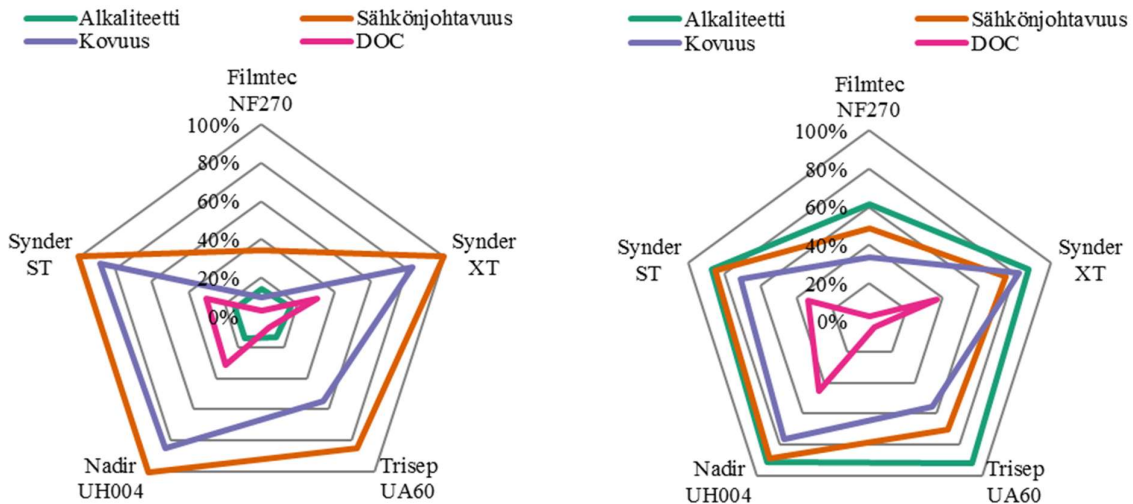
¹⁴ AMC 2001



Kuva 4 HPSEC-fraktioinnin tulokset verrattuna laitoksen raakaveteen. Yksiväriset pylväät kuvaavat käsittelemättömän raakaveden tilannetta, raidalliset pylväät puolestaan hiekkasuodatetun veden käyttöä syötövetenä. Piikit kuvaavat orgaanisen aineen kokoluokkaa. Piikki I on suurin kokoluokka, piikki VII pienin. SUM kuvaa piikkien yhteenlaskettua korkeutta verrattuna laitoksen raakaveteen.

3.3.2 Fysikaalinen veden laatu

Fysikaalisen veden laatuanalyysit (Kuva 5) tukevat orgaanisen aineen poiston tuloksia. Tiukka nanosuodatuskalvo poistaa ioneja huomattavasti muita kalvoja tehokkaammin, kun taas ultrasuodatuskalvo ei poista ioneja kuin noin 20 %. Trisep UA60 –kalvo poistaa noin 40 % kovuudesta, kun muut löysät nanosuodatuskalvot poistavat vain 20 %. Sameus oli kaikissa mittauksissa kaikilla kalvoilla alle 0,1 FTU. Jäännösraudan pitoisuus oli puolestaan alle määrittämissä kaikilla kalvoilla puhdistettaessa käsittelemätöntä raakavettä. Hiekkasuodatettua vettä käsiteltäessä suurimman huokoskoon omaavilla kalvoilla jäännösrautapitoisuus oli 27 µg/l ja 24 µg/l (UH004, ST), muilla kalvoilla myös tällä raakavedellä tulos oli alle määrittämissä.

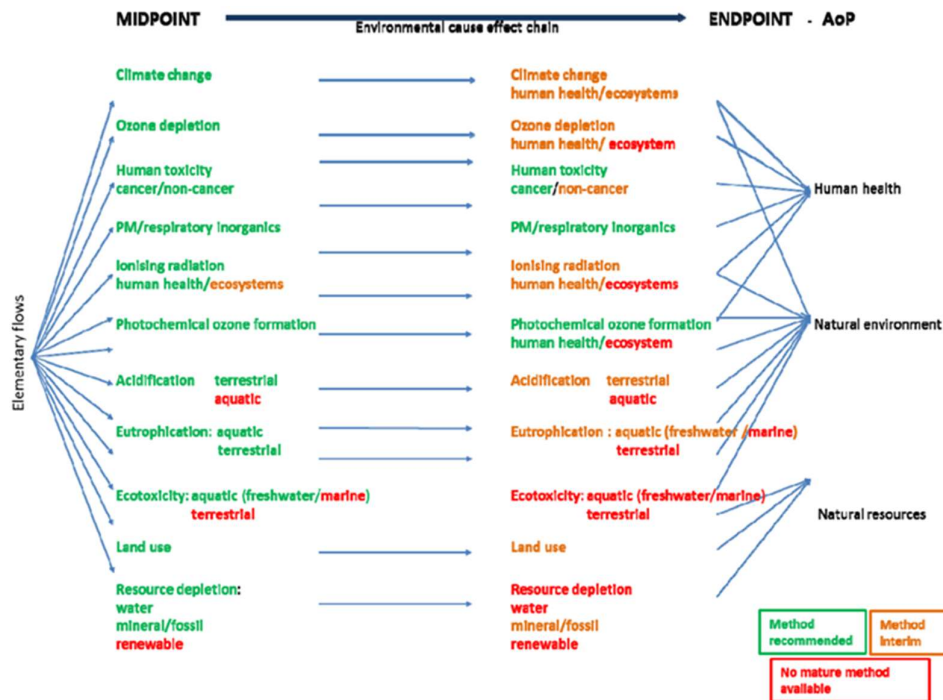


Kuva 5 Alkaliteetin, kovuuden, sähkönjohtavuuden ja DOC:n tulokset permeaatissa. Vasemmanpuoleisissa tuloksissa on käytetty esikäsittelyä, oikeanpuoleisissa ei. Siksi esim. alkaliteetti on huomattavasti alhaisempi vasemmalla, alkaliteetti kuluu saostuksessa pois. Saostus vaikuttaa myös jonkin verran sähkönjohtavuuteen ja kovuuteen, nostaten molempia. Tulokset ilmoitettu prosentteina.

3.4 Elinkaariarviointi

3.4.1 Johdanto tutkimukseen

Elinkaariarvioinnissa vertailtiin Trisep UA60 -kalvoa käyttävän kuvitteellisen laitoksen ja HSY:n Vanhankaupungin laitoksen ympäristöjalanjälkeä. Tutkimuksessa oli tarkoitus lisätä vesilaitoksen päätöksentekoon muitakin päätäntävälaineita pelkän taloudellisen näkökulman lisäksi. Arviointi tehtiin OpenLCA-ohjelmistolla hyödyntäen ELCD-tietokantaa (European Life Cycle Database). Vaikutuksenarviointiin käytettiin kolmea eri menetelmää: ReCiPe Midpoint (H), ReCiPe Endpoint (H) ja CML (baseline) (lisätietoa menetelmistä löytyy OpenLCA-manuaalista¹⁵). Menetelmistä ReCiPe Midpoint ja CML antavat midpoint-tuloksia, kun taas ReCiPe Endpoint antaa endpoint-tason tuloksia (Kuva 6). Midpoint-tason tulokset ovat luotettavampia kuin endpoint-tason, mutta niiden tulkinta ja vertailu toisiinsa tutkimuksiin on huomattavasti vaikeampaa. Tutkimuksen referenssivirtaama oli 1 m³ tuotettua vettä, joka täyttää talousveden laatuvaatimukset. Tuotteet eivät siis ole samanlaisia, esimerkiksi orgaanisen aineen määrä puhdistetussa vedessä on hyvin erilainen.



Kuva 6 Kaaviokuva midpoint- ja endpoint-menetelmien yhteydestä. Kuvasta käy ilmi väreillä myös menetelmän kehitysaste. Vihreät ovat ILCD:n mukaan suositeltavia, "kypsiä" menetelmiä, oranssit ovat kehityskelpoisia ja punaiset vasta kehitteillä. Kuvasta selviää, että midpoint-tason menetelmät ovat pääsääntöisesti käyttökelpoisia, kun taas niistä johdetut vaikutusketjut endpoint-vaikutuksiin ovat vielä melko epävarmoja.

Tutkimuksessa käytettyjen laitosten prosessit ovat seuraavat:

- Vanhankaupungin laitos: kemiallinen saostus, selkeytys, hiekka-kalkkikivisuodatus, otsonointi, aktiivihiihiisuodatus, UV ja kemikalointi
- Membraanilaitos: esisuodatus (patruunasuodatus), löysä nanosuodatus, aktiivihiihiisuodatus, UV ja kemikalointi.

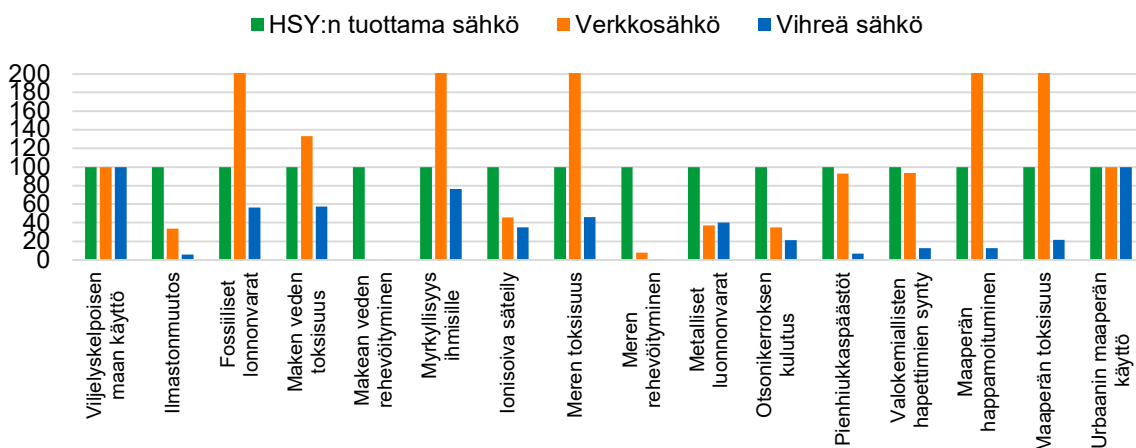
¹⁵ Acero *et al.* 2017

Tutkimuksen ulkopuolelle on rajattu raakaveden hankinta sekä talousveden korkeapainepumpaus verkkoon, sillä nämä oletettiin identtisiksi molemmille laitoksille. Näiden lisäksi laskennan ulkopuolelle on jätetty laitoksen sisältämät henkilöstön tilat (valvomo, työhuoneet, sosiaalitalat, kokoushuoneet jne.). Laitoksen lämmittämiseen käytettävä kaukolämpö, joka tuotetaan sivutuotteena, on laskennassa päästötön. Samoin kemiallisessa saostuksessa käytetyn ferrisulfaatin valmistuksen raaka-aine, ferrosulfaatti, ja otsonin valmistuksessa käytetty happi katsotaan sivutuotteeksi ja näin päästöttömiksi. Rakennukset on laskettu Vanhankaupungin nykyisen laitoksen mukaan, vaikka uuden laitoksen seinämateriaalit olisivatkin todennäköisesti erilaiset.

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös useita erilaisia energiantuotantomuotoja. Yksi näistä oli vihreä sähkö, joka sisältää aurinko-, tuuli- ja vesivoimaa. Näiden osuudet on mallinnettu Nord Pool -sähköpörssin halvimpien hintojen mukaan, jolloin suurin osa sähköstä on vesivoimaa (88,5%), tuulivoimaa on 8% ja aurinkovoimaa 3,5%. Mikäli laskennassa olisi käytetty Helsingin Energian vihreää sähköä, olisi tuulivoiman osuus suurin (n. 60%), vesivoiman toiseksi suurin (30%) ja aurinkovoiman pienin (10%). Toinen tuotantomuoto on tavallinen sähkö verkosta Suomen alueella. Kolmas vaihtoehto on HSY:n oma energiantuotanto, jota HSY itse laskennassaan käyttää. HSY tuottaa energiaa aurinkopaneeleilla, kaatopaikkakaasuilla, vesivoimalla ja mädätyskaasuilla. Tämä prosessi mallinnettiin erikseen HSY:ltä saatujen tietojen pohjalta.

3.4.2 Tulokset

Kolmesta tutkitusta sähköntuotantomuodosta vihreä energia on päästöttömin ja tavallinen verkkosähkö haitallisin, sillä Suomessa tuotetaan paljon energiaa uusiutumattomista lähteistä, kuten kivihiili ja ydinvoima. HSY:n käyttämällä energialla on enemmän päästöjä kuin vihreällä sähköllä. Päästöistä suuri osa tulee kuljetuksista. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että mikäli HSY ei käytäisi jätteiden ja jäteveden tuottamia kaasuja energiantuotantoon, olisivat laitosten laskennalliset päästöt huomattavasti suuremmat. Niinpä on suositeltavaa jatkaa oman energian käyttöä. Kuvassa vertaillaan kolmen eri sähkönlähteen vaikutuksia eri vaikutuskategoriassa. HSY:n käytämä sähkö toimii vertailuarvona, mikäli muiden tuotantomuotojen palkki on pienempi, on myös sen vaikutuskategorian vaikutus pienempi. Jatkossa tuloksissa on käytetty vihreää sähköä, ellei toisin ole mainittu.



Kuva 7 Eri sähköntuotantomuotojen vaikutus eri vaikutuskategoriassa. Vihreällä on merkitty HSY:n tuottama sähkö, jolla on enemmän päästöjä kuin vihreällä sähköllä. Verkkosähkö on joissain kategoriassa ympäristö kannalta parempi, toisissa huonompi vaihtoehto.

Nykyistä Vanhankaupungin puhdistusprosessia verrattiin membraanilaitokseen kahden eri menetelmän avulla (ReCiPe Midpoint ja CML Baseline). Kahta eri menetelmää käyttämällä saa-

daan suoritettua myös herkkyystarkastelua. ReCiPe Midpoint menetelmässä on yhteensä 18 vaikutuskategoriaa¹⁶, joista tutkimukseen otettiin mukaan 16 (Taulukko 4). Veden pilaantuminen ja luonnontilaisen maan muokkaus jätettiin pois, sillä niihin aiheutuvat vaikutukset tulivat raaka-veden otosta ja laitosten rakentamisesta, joita kumpaakaan ei voida välttää. Vaikutuskategorioiden yhdeksässä membraanilaitoksen kuormitus on pienempi. Lopuissa seitsemässä Vanhankaupungin laitoksen nykyinen prosessi on parempi. Normalisoimalla tulokset (Europe ReCiPe H, 2000) saadaan laskennallisesti sama yksikkö kaikille kategorioille. Normalisoidut tulokset osoittavat, että fossiilisten luonnonvarojen käyttö ja ilmastonmuutos ovat molemmilla prosesseilla suurimmat vaikuttajat. Tulokset eivät kuitenkaan kerro sitä, mitkä vaikutuksista ovat merkittäviä.

CML (baseline) -menetelmä antaa samansuuntaiset tulokset. Yhdestätoista kategoriasta kuudessa membraanilaitos on vähempipäästöinen, viidessä taas Vanhakaupungin laitos on parempi. Suurin osa kategorioista on verrattavissa ReCiPe Midpoint -kategorioihin ja lähes kaikissa tulokset ovat samansuuntaiset kuin tällä menetelmällä.

Taulukko 4 ReCiPe Midpoint menetelmän tulokset. Vihreällä on osoitettu kunkin vaikutuskategorian parempi tulos, punaisella heikompi.

Vaikutuskategoria	Membraanilaitos	Vanhakaupunki	Yksikkö
Viljelykelpoisen maan käyttö	1,55 * 10 ⁻⁵	1,28 * 10 ⁻⁵	m ² *a
Ilmastonmuutos	0,0343	0,0221	kg CO ₂ eq.
Fossiiliset luonnonvarat	0,0156	0,0356	kg oil eq.
Makean veden toksisuus	3,89 * 10 ⁻⁶	2,81 * 10 ⁻⁶	kg 1,4-DB eq.
Makean veden rehevöityminen	5,02 * 10 ⁻⁷	3,00 * 10 ⁻⁷	kg P eq.
Myrkyllisyys ihmisille	0,0012	0,0004	kg 1,4-DB eq.
Ionisoiva säteily	0,0010	0,0010	kg U235 eq.
Meren toksisuus	4,28 * 10 ⁻⁶	4,63 * 10 ⁻⁶	kg 1,4-DB eq.
Meren rehevöityminen	2,02 * 10 ⁻⁶	2,09 * 10 ⁻⁶	kg N eq.
Metalliset luonnonvarat	0,0005	0,0008	kg Fe eq.
Otsonikerroksen kulutus	3,97 * 10 ⁻¹⁰	5,98 * 10 ⁻¹⁰	kg CFC-11 eq.
Pienhiukkaspäästöt	2,19 * 10 ⁻⁵	2,52 * 10 ⁻⁵	kg PM10 eq.
Valokemiallisten hapettimien synty	6,37 * 10 ⁻⁵	5,72 * 10 ⁻⁵	kg NMVOC
Maaperän happamoituminen	6,22 * 10 ⁻⁵	6,53 * 10 ⁻⁵	kg SO ₂ eq.
Maaperän toksisuus	2,58 * 10 ⁻⁷	2,61 * 10 ⁻⁵	kg 1,4-DB eq.
Urbaanin maan käyttö	5,40 * 10 ⁻⁶	5,50 * 10 ⁻⁶	m ² *a

Taulukko 5 CML (baseline) -menetelmällä analysoidut tulokset. Myös tällä menetelmällä membraanilaitos saa enemmän vihreitä kategorioita kuin Vanhakaupungin laitos.

Vaikutuskategoria	Membraanilaitos	Vanhakaupunki	Yksikkö
Happamoittamispotentiaali	6,41 * 10 ⁻⁵	6,95 * 10 ⁻⁵	kg SO ₂ eq.
Ilmastonmuutos	0,02333	0,01593	kg CO ₂ eq.
Abioottiset resurssit – alkuaineet	4,46 * 10 ⁻⁸	3,38 * 10 ⁻⁸	kg antimoni eq.
Abioottiset resurssit – fossiiliset	0,65516	1,49186	MJ
Rehevöityminen	8,65 * 10 ⁻⁶	1,22 * 10 ⁻⁵	kg PO ₄ ³⁻ eq.
Makean veden ekotoksisuus	0,00243	3,77 * 10 ⁻⁵	kg 1,4-DB eq.
Myrkyllisyys ihmisille	0,01376	0,00052	kg 1,4-DB eq.
Meren ekotoksisuus	1,36615	1,31857	kg 1,4-DB eq.
Otsonikerroksen kulutus	3,97 * 10 ⁻¹⁰	5,98 * 10 ⁻¹⁰	kg CFC-11 eq.
Valokemialliset hapettimet	5,84 * 10 ⁻⁶	8,95 * 10 ⁻⁶	kg eteeni eq.
Maaperän ekotoksisuus	2,46 * 10 ⁻⁵	3,56 * 10 ⁻⁵	kg 1,4-DB eq.

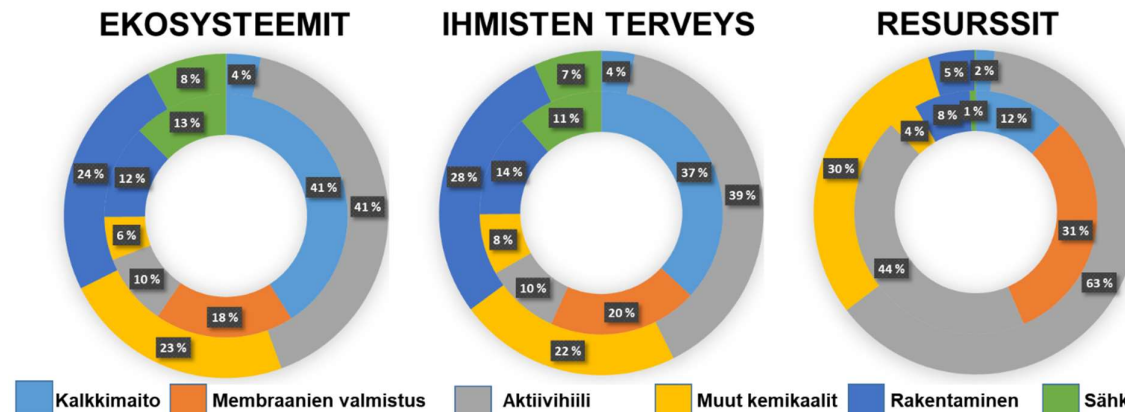
Jotta tuloksia olisi helpompi käsitellä, analysoitiin tulokset myös ReCiPe Endpoint -menetelmällä. Kuva 6 on esitetty tarkemmin polut, miten eri Midpoint-tason kategoriat jakautuvat Endpoint-tasolle. Tulokset on helpompi ymmärtää, sillä ne ovat vain kolmessa eri kategoriassa: vaikutukset ekosysteemeihin, ihmisten terveyteen ja maapallon resursseihin. Normalisoimalla ja painotamalla saadut tulokset voidaan laskea teoreettisesti yksi arvo, "single score", tutkittavalle pro-

¹⁶ Goedkoop *et al.* 2013

sessille. Tässä tutkimuksessa normalisoinnissa käytettiin Europe ReCiPe H, H/A normalisointikerrointa (Taulukko 6). Tulosten mukaan verkkosähköllä laskettaessa membraanilaitoksen ympäristövaikutukset ovat suuremmat. Mikäli sähköntuotanto jätetään pois analyysistä, on membraanilaitos ympäristön kannalta parempi vaihtoehto. Tämä johtuu suureksi osaksi siitä, että kalvosuodatusprosessi on hyvin energiantensiivinen, kun taas Vanhankaupungin saostusprosessi on riippuvainen muista uusiutumattomista resursseista. Tarkasteltaessa lähemmin eri vaikutuskategorioita (Kuva 8), huomataan, että membraanilaitoksen ympäristövaikutuksista suurin osa tulee veden alkalisoinnista (kalkkimaito sammutetusta kalkista), membraanien valmistuksesta, aktiivihiihluodatukselta ja rakentamisesta. Vanhankaupungin laitoksella alkalisointi tapahtuu kalkkikivisuodatuksella, jolloin alkalisoinnin vaikutus kokonaisuuteen on pienempi. Aktiivihiihluen ja muiden kemikaalien osuus ympäristövaikutuksiin on merkittävä.

Taulukko 6 ReCiPe Endpoint -menetelmällä lasketut "single score" -arvot membraanilaitokselle ja Vanhankaupungin laitokselle. Jos energiantuotantomuoto on verkkosähkö, on perinteinen saostuslaitos ympäristöstävällisempi. Mikäli käytetty energia on uusiutuvaa, on membraanilaitos parempi.

Vaikutuskategoria	Verkkosähkö		Vihreä sähkö	
	Membraanilaitos	Vanhakaupunki	Membraanilaitos	Vanhakaupunki
Ekosysteemit	0,0098	0,0047	0,0006	0,0004
Ihmisten terveys	0,0169	0,0083	0,0010	0,0007
Resurssit	0,0071	0,0108	0,0040	0,0090
Yhteensä	0,0338	0,0238	0,0056	0,0101



Kuva 8 Eri puhdistusvaiheiden osuus kolmeen ReCiPe Endpoint -kategoriaan. On tärkeää muistaa, että eri puhdistusprosessien vaikutus ei ole yhtä suuri, vaan kuvassa on ainoastaan prosentuaaliset osuudet kokonaisvaikutuksesta. Ulkokehällä on Vanhankaupungin laitoksen tulokset, sisäkehällä membraanilaitoksen.

"Single score" -tuloksilla voidaan myös verrata vedenkäsittelyn ympäristövaikutuksia muihin arjen toimintoihin. Jos arvioidaan, että vesilaitoksen henkilöasiakas kuluttaa 160 litraa vettä vuorokaudessa, on hänen kokonaisarvonsa vuodessa suurimmillaan 1,971 (membraanilaitos, verkkosähkö). Muilla vaihtoehdoilla kokonaisarvo on 1,389 (Vanhakaupunki, verkkosähkö), 0,592 (Vanhakaupunki, vihreä sähkö) ja 0,328 (membraanilaitos, vihreä sähkö). Taulukko 7 on vertailu, kuinka monta kilometriä autolla pystyy ajamaan, jotta kokonaisarvo olisi sama.

Taulukko 7 Yhden kuluttajan vuodessa aiheuttaman "single score" -arvon vertailu autolla ajamiseen.

Tutkimus	Verkkosähkö		Vihreä sähkö	
	Membraanilaitos	Vanhakaupunki	Membraanilaitos	Vanhakaupunki
Folega ja Burchart-Korol ¹⁷	57,3 km	40,4 km	9,5 km	17,2 km
Message et al. ¹⁸	100,7 km	71,0 km	16,7 km	30,2 km

¹⁷ Folęga ja Burchart-Korol 2017

¹⁸ Message et al. 2013

4 Tutkimuksen tuottamat julkaisut

Konferenssijulkaisut:

- Applicability of loose nanofiltration membranes for the removal of natural organic matter from soft surface water, IWA Specialist Conference on Natural Organic Matter. 7-10.9.2015 Malmö, Ruotsi
- Suitability of membrane filtration for natural organic matter removal from cold surface water, EWA Water Management in Cold Climate, 25-27.6.2016. Spitsbergen, Norja
- Workshop-esitys "NOM Removal from Surface Water by Membrane Filtration – Four Years of Trials at Pitkälampi Water Treatment Plant", 10. Pohjoismainen juomavesikonferenssi, 28-30.9.2016. Reykjavik, Islanti

Tieteelliset artikkelit:

- Tieteelliset artikkelit ovat kirjoitusvaiheessa, arvioitu valmistumisaika vuoden 2018 loppuun mennessä.

Lähdeluettelo

- Aceró A., Rodríguez C., Ciroth A. 2017. *LCIA methods – Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories*. GreenDelta, s. 23, versio 1.5.6. Saatavilla: http://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/openLCA_LCIA_METHODS-v.1.5.6.pdf (viitattu 12.9.2018).
- Afonso, M. 2006. *Surface charge on loose nanofiltration membranes*. *Desalination* 191(1-3), 262-272.
- Akbari A., Desclaux S., Rouch J., Remigy J. 2007. *Application of nanofiltration hollow fibre membranes, developed by photografting, to treatment of anionic dye solutions*. *Journal of Membrane Sciences* 297(1-2), 243-252.
- AMC. 2001 *What should be done with results below the detection limit? Mentioning the unmentionable*. *Analyst* 126, 256-259.
- Edzwald J., Tobiasson J. 1999. *Enhanced coagulation: US requirements and a broader view*. *Water Science and Technology* 40(9), 63-70.
- Evans C., Monteith D., Cooper D. 2005. *Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations possible causes and environmental impacts*. *Environmental Pollution*, 137(1), 55-71.
- Foległa P., Burchart-Korol D. 2017. *Environmental assessment of road transport in a passenger car using the life cycle approach*. *Transport Problems*, 12(2), 147-153.
- Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J., van Zelm R. *ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. Ruimte en Milieu. Saatavilla: https://35f23ee4-a-62cb3a1a-s-sites.googleusercontent.com/site/lciarecipe/file-cabinet/ReCiPe_main_report_MAY_2013.pdf?attachauth=ANoY7cggKwkXdCnOBHF18TK327PYUgYmMrpAps-XLYP7itLbfRYG2isYF46XjCNuxnpCcccCK9mcdjRj_04cxGmF5ph4rjmxlQvMdSTB5kc5aXJ_Wmo9V-XpVtKdMX-3MwgRrBF2JpDgE_u-QgglQPekwgUmvxng-MBryQ5iMPh_b47sYCl4gFvb3loZ5hfazfg4WIDBAKSOpFncWAQRZJMiuBkqj3GrzBRSenizh45PBvm1wcBdCLsV_KKs9u-06TFk6XAPx9NU07&attredirects=1 (Viitattu 17.9.2018)
- Leiknes T., Ødegaard H., Myklebust H. 2004. *Removal of natural organic matter (NOM) in drinking water treatment by coagulation-microfiltration using metal membranes*. *Journal of Membrane Sciences*, 242(1-2), 47-55.
- Lerch A., Panglisch S., Gimbel R. 2005. *Research experiences in direct potable water treatment using coagulation/ultrafiltration*. *Water Science and Technology*, 51(6-7), 221-229.
- Message M., Lebeau K., Coosemans T., Macharis C., van Mierlo J. 2013. *Environmental and financial evaluation of passenger vehicle technologies in Belgium*. *Sustainability*, 5(12), 5020-5033.
- Pikkarainen A., Laine E. 2011. *Ultrafiltration in drinking water treatment – literature review IB*. Center of Expertise in Water Industry Cluster – Water for Tomorrow (CEWIC).
- Ratnayaka D., Lee M., Tiew K., Chua H., Sanmuganathan D., Lim D., McNeil A., Teo K., Tan T., Currie J. 2008. *Application of membrane technology to retrofit large-scale conventional water treatment plant in Singapore*. Singapore International Water Week Convention.
- Vuorenmaa J., Forsius M., Mannio J. 2006. *Increasing trends in total organic carbon concentrations in small forest lakes in Finland from 1987 to 2003*. *Science of Total Environment*, 365(1-3), 47-65.
- Weishaar J., Aiken G., Bergamaschi B., Fram M., Fujii R., Mopper K. 2003. *Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon*. *Environmental Science and Technology* 37(20), 4702-4708.
- Worrall F., Burt T. 2007. *Trends in DOC concentration in Great Britain*. *Journal of Hydrology* 346(3-4), 81-92.
- Zularisam A., Ismail A., Salim R. 2006. *Behaviours of natural organic matter in membrane filtration for surface water treatment – a review*. *Desalination*, 194(1-3), s. 221-231.