



# Loppuraportti

## VEDENPUHDISTUSTA KALVOTEKNIIGOILLA

**Lisätietoja**

Panu Laurell, [panu.laurell@hsy.fi](mailto:panu.laurell@hsy.fi)

050 4770995

# Sisällys

1	Johdanto	5
1.1	Tausta	5
1.1.1	Pitkälkosken vedenpuhdistuslaitos	5
1.1.2	Päijänteen raakavesi	5
1.2	Vedenpuhdistusta kalvotekniikoilla -hanke	6
1.2.1	Hankkeen lähtötiedot	6
1.2.2	Hankkeen tavoitteet	7
2	Koejärjestely	8
2.1	Suodatinkalvot	8
2.1.1	Ultrasuodatukselta lyhyesti	8
2.1.2	Aquarden – SiC	10
2.1.3	DuPont – Memcor	10
2.1.4	Suez – ZeeWeed 500d	11
2.1.5	Suez – ZeeWeed 1000	12
2.2	Saostuskemikaalit	13
2.2.1	Alumiiniklorohydraatti	13
2.2.2	Alumiinisulfaatti	13
2.2.3	Ferrikloridi	14
2.2.4	Ferrisulfaatti	14
2.2.5	Polyalumiinikloridi	15
2.3	Pilot-laitteisto	15
2.3.1	Kemiallinen saostus	15
2.3.2	Ultrasuodatus	15
2.3.3	Jälkikäsitely	17
2.4	Analysit	18
3	Tulokset	20
3.1	Permeaatin laatu	20
3.1.1	Permeaatin laatu eri suodatuskalvojen välillä	20
3.1.2	Permeaatin laatu eri kemikaalien välillä	21
3.1.3	Jälkikäsitelyn veden laatu	25
3.2	Membraanien suorituskyky	26
3.2.1	Suez ZeeWeed 1000	26
3.2.2	DuPont Memcor	28
3.2.3	Aquarden Cembrane SiC	29
3.2.4	Suez ZeeWeed 500	33
3.3	Vesitase	34
3.4	Kustannusarviot eri vaihtoehdoille	36
3.4.1	CAPEX	36
4	Johtopäätökset	38



# Sanasto

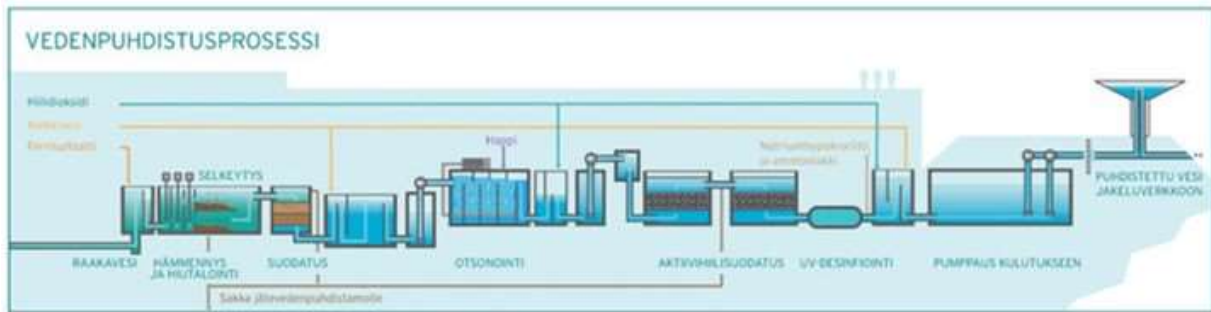
ACH	Alumiiniklorohydraatti ( <i>Aluminium Chlorohydrate</i> )
AOC	Assimiloituva orgaaninen hiili ( <i>Assimilable organic carbon</i> )
BB	Humusyhdisteiden hajoamistuotteet ( <i>Building blocks</i> )
BDOC	Biohajoava liuennut orgaaninen hiili ( <i>Biodegradable dissolved organic carbon</i> )
BOM	Biogeeninen orgaaninen aines ( <i>Biogenic organic matter</i> )
CDOC	Kromatografinen liuennut orgaaninen hiili ( <i>Chromatographic dissolved organic carbon</i> )
CEB	Kemiallisesti tehostettu huuhtelu ( <i>Chemically enhanced backwash</i> )
CIP	Kemiallinen pesu ( <i>Clean-in-place</i> )
DOC	Liuennut orgaaninen hiili ( <i>Dissolved organic carbon</i> )
HS	Humusyhdisteet ( <i>Humic substances</i> )
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut
LC-OCD	Nestekromatografinen orgaanisen hiilen detektori ( <i>Liquid chromatography organic carbon detection</i> )
LMWA	<i>Low molecular weight acids</i>
LMWN	<i>Low molecular weight neutrals</i>
MW	Molekyylipaino ( <i>Molecular weight</i> )
NOM	Luonnon orgaaninen aines ( <i>Natural organic matter</i> )
PACl	Polyalumiinikloridi ( <i>Polyaluminium chloride</i> )
PVDF	Polyvinyyliidifluoridi
ROM	Refraktorinen orgaaninen aines ( <i>Refractory organic matter</i> )
TOC	Orgaaninen kokonaishiili ( <i>Total organic carbon</i> )
TMP	Paine-ero ( <i>Transmembrane pressure</i> )

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

### 1.1.1 Pitkälkosken vedenpuhdistuslaitos

Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY) aloitti toimintansa vuoden 2010 alussa. Kuntayhtymässä yhdistyivät Espoon, Helsingin, Kauniaisten ja Vantaan vesilaitokset sekä Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunnan jätehuolto. Yhdistyneistä vesilaitoksista Helsingin Vesi on vanhin, perustettu 1876. Helsingin vedeltä HSY:lle siirtyi Pitkälkosken vedenpuhdistuslaitos, joka on rakennettu 1959. Pitkälkosken vedenpuhdistuslaitos tuottaa nykyään noin 140 000 m<sup>3</sup> talousvettä vuorokaudessa. Puhdistusprosessin (Kuva 1) alussa ferrisulfaattilla saostetaan raakavedestä epäpuhtauksia ja saostumat poistetaan laskeutuksella ja hiekkasuodatuksella. Hiekkasuodatuksen jälkeen vesi desinfioidaan otsonilla. Otsonoinnin jälkeen veden biostabiiliteettia, orgaanisen aineen poistoa ja esteettisiä ominaisuuksia parannetaan aktiivihillsuodatuksella ja UV-desinfiointilla. Verkosto veden laatu varmistetaan vielä lisäämällä veteen pieni määrä klooriamiinia.



**Kuva 1** Pitkälkosken vedenpuhdistuslaitos

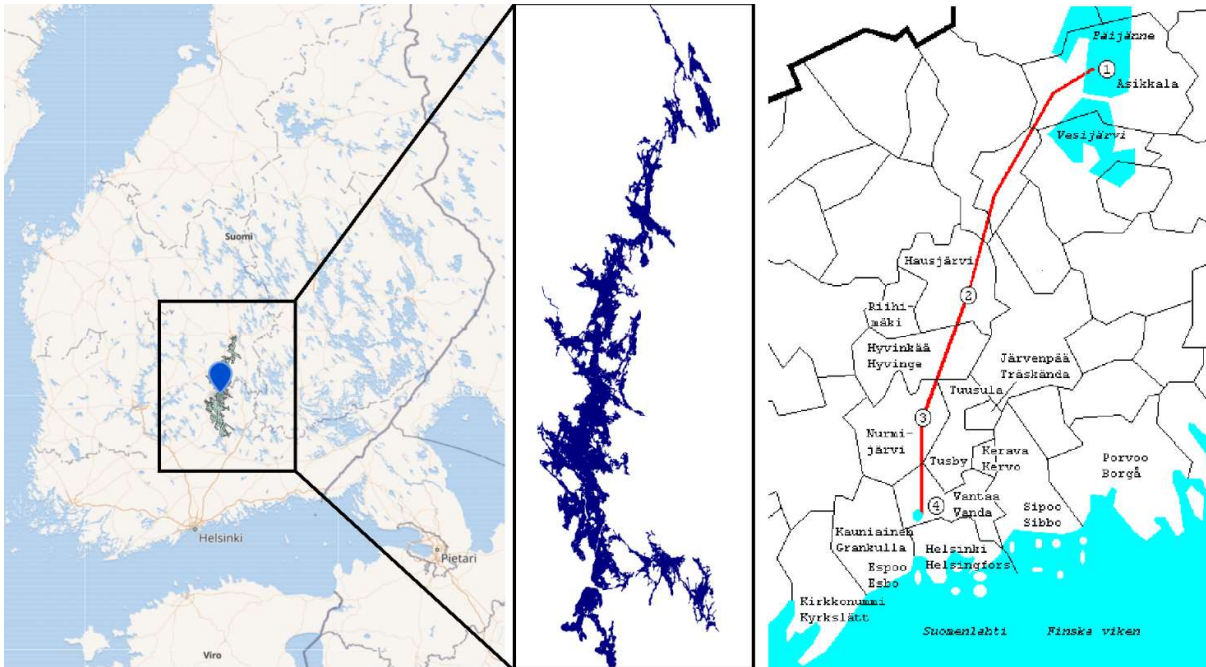
### 1.1.2 Päijälnteen raakavesi

Vanhankaupungin ja Pitkälkosken vedenpuhdistuslaitokset saavat raakavetensä Päijälnteen eteläpäästä Asikkalanselältä (Kuva 2). Päijälntä on Suomen toiseksi suurin järvi, jonka vesipinta-ala on noin 1100 km<sup>2</sup> ja valuma-alue lähes 26 500 km<sup>2</sup>. Suurin valuma-alue on Leppäveden-Kynsiveden alue (n. 17 700 km<sup>2</sup>), jonka vedet virtaavat Päijälnteesen Vaajakosken kautta. Päijälnteen veden viipymä on noin 2,5 vuotta. Veden laatu Päijälnteen eteläosissa on erinomainen. Pitkälkosken vedenpuhdistuslaitoksen raakaveden alkaliteetti on 14,5–21,0 (ka. 15,7) mg/l CaCO<sub>3</sub>, sameus 0,19–0,55 (ka. 0,27) FNU, permanganaattiluku 21,0–27,0 (ka. 25,2) mg/l, TOC 6,8–8,2 (ka. 7,1) mg/l, UV-absorbanssi 0,150–0,216 (ka. 0,203) 1/cm ja SUVA 2,3–3,2 (ka. 2,9) mg/l/m (vuosien 2016–2019 keskiarvo).

Päijälnteen veden orgaanisen aineen rakenne Asikkalanselällä ei sisällä suuri vuodenaikaisvaihteluja. Keskimäärin 98 % orgaanisesta kokonaishiilestä (TOC, *total organic carbon*) on liuennessa muodossa. Liuenneesta orgaanisesta hiilestä (DOC, *dissolved organic carbon*) 84 % on hydrofobista ja loput hydrofiilistä fraktiota<sup>1</sup>. Toisen julkaisun mukaan noin 60 % on humusta, 15 % humuksen hajoamistuotteita ja loput

<sup>1</sup> Eikebrokk *et al.*, 2018. *NOMiNOR: Natural Organic Matter in drinking waters within the Nordic Region*. Norwegian Water, Report **231/2018**.

refraktorisia, vaikeammin poistettavia yhdisteitä<sup>2</sup>. SUVA-arvo kertoo orgaanisen aineen olevan enimmäkseen pienimolekyylimassoista ja matalavarauksellisia orgaanisia yhdisteitä<sup>3</sup>.



**Kuva 2** Päijänteen sijainti ja Päijännetunnelin suurpiirteinen linjaus esitettynä kartalla.

## 1.2 Vedenpuhdistusta kalvotekniikoilla -hanke

### 1.2.1 Hankkeen lähtötiedot

HSY:n, Aalto-yliopiston ja Kemiran pitkäaikaisessa yhteishankkeessa on selvitetty kalvosuodatuksen soveltuvuutta talousveden valmistukseen HSY:n laitoksilla. Tutkimuksen mukaan löysät nanosuodatuskalvot vastasivat osin vedenpuhdistuksen kohtaamiin haasteisiin, mutta tutkimuksissa rajoituttiin vain ylipaineellisiin kalvomoduuleihin ja yhteen saostuskemikaaliin.

Samaan aikaan HSY:n tilaama, Pöyryn (nyk. Afry) tekemä, konsulttiselvitys Pitkälkosken vedenpuhdistuslaitoksen perusrakennuksesta päätyi vertailemaan useita käsittelyvaihtoehtoja, joista lopulliseen tarkasteluun valittiin nykyisen prosessin perusrakennuksen kilpailijaksi nykyisen prosessin perusrakennus tehostettuna ultrasuodatuksella. Kustannukset ehdotuksille olivat hyvin lähellä toisiaan. Lopullinen valinta kohdistui nykyisen prosessin tehostamiseen, sillä se koettiin tutummaksi ja varmemmaksi vaihtoehdoksi. Lisäksi ultrasuodatusta tarjonnut valmistaja ei pystynyt takaamaan tuotetun veden laatua ilman erillisiä pilot-kokeita.

Saneerauksen jälkeen HSY:n vedenpuhdistuksella on käytössä kaksi isoa laitosta sekä yksi pienempi pohjavesilaitos. Kumpikaan suurista laitoksista ei yksin pysty tuottamaan koko pääkaupunkiseudun tarpeisiin riittävää vesimäärää. Niinpä HSY:n on harkittava kolmannen vedenpuhdistuslaitoksen rakentamista

<sup>2</sup> Krzeminski *et al.*, 2019. *Natural organic matter fractions and their removal in full-scale drinking water treatment under cold climate conditions in Nordic capitals*. *Journal of Environmental Management*, **241**, s. 427-438.

<sup>3</sup> Matilainen *et al.*, 2010. *Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review*. *Advances in Colloid and Interface Science*, **159**(2), s. 189-197.

vesihuollon investointistrategiassa määritetyn pitkän aikavälin tuotantokapasiteetin toimintavarmuuden saavuttamiseksi. Varteenotettava vaihtoehto uudelle laitokselle on perusparannushankkeessa esille nousnut ultrasuodatus upotettavilla membraaneilla.

### 1.2.2 Hankeen tavoitteet

Vedenpuhdistusta kalvosuodatuksella -hankkeella on kolme tavoitetta:

Toimintavarmuuden kasvattaminen

- Konsulttiselvityksessä kalvovalmistaja suositteli pilot-kokeita, jotta voidaan selvittää kalvosuodatuksen käsittelemän veden, eli permeaatin, laatu. Mikäli permeaatti laadultaan kelpaa jatkokäsittelyn avulla jakeluun kuluttajille, voidaan ultrasuodatuksella kasvattaa nykyisten laitosten kapasiteettia. Samalla tulokset mahdollistaisivat uuden käsittelyprosessin mahdollisella uudella laitoksella. Pilot-kokeissa kokeiltiin neljää eri upotettavaa suodatuskalvoa kolmelta eri valmistajalta.

Huoltovarmuuden kasvattaminen

- Vedenkäsittelyprosessi HSY:llä on riippuvainen tietyistä toimittajista ja heidän kemikaaleistaan. Erityisesti tämä näkyy saostuskemikaalin osalta. Upotettavia ultrasuodatuskalvoja käytetään useilla laitoksilla Kanadassa, Englannissa ja Skotlannissa ja nämä laitokset käyttävät laajaa skaalaa saostuskemikaaleja. Lyhyessä esiselvityksessä havaittiin laitosten käyttävän ferrikloridia (esim. Thornton, CA, USA ja Heigham, Englanti), ferrisulfaattia (esim. Fargo, ND, USA ja Dallas, TX, USA), alumiinisulfaattia (esim. Carrollton, GE, USA ja Aqua Viva, AZ, USA), polyalumiinikloridia (esim. Susquehanna, PE, USA ja Barrie, Kanada) ja alumiiniklorohydraattia (esim. Oamaru, Uusi-Seelanti, Cartier, Kanada). Kalvosuodatus on siis mahdollista toteuttaa usealla kemikaalilla, mikä lisää vedenkäsittelyn toimintavarmuutta. Kaikkiaan neljää saostuskemikaalia käytettiin pilot-kokeissa. Näin saatiin hyvä käsitys siitä, minkä laatuista vettä kemikaaleilla saadaan tuotettua ja miten vaihtaminen kemikaalien välillä voisi onnistua. Polymeerikalvojen voidaan katsoa olevan käyttöhyödykkeitä varsin rajallisella käyttöiällä. Prosessi on teknisesti suunniteltu toimimaan vain tietyn tyyppisellä kalvoelementillä. Keraamisten kalvojen käyttöikä on pitempi ja ne kestävät kovempaa käsittelyä, joten ne eivät ole polymeerikalvojen lailla käyttöhyödykkeiksi katsottavia tarvikkeita. Tämä on hyvä huomioida tarkasteltaessa eri ratkaisujen huoltovarmuutta.

Resurssitehokkuuden kasvattaminen

- HSY:n vedenpuhdistuksessa saostuskemikaalilla muodostettu flokki erotetaan vedestä laskeuttamalla. Jotta flokki saadaan laskeutumaan, täytyy sen olla suurikokoinen. HSY:n edesmenellä Dämmanin laitoksella käytettiin flokin erottamiseen flotaatiota, missä flokin kokoa määrittää puolestaan flotaatioissa käytettävien ilmakuplien koko<sup>4</sup>. Kalvosuodatusprosessin avulla voidaan teoriassa vähentää saostuskemikaalin käyttöä. Kalvosuodatuksessa jo huokoskokoa suuremman, ultrasuodatuksen tapauksessa siis >0,1 µm, mikroflokin muodostuminen riittää erottamaan epäpuhtaudet vedestä. Lisäksi tuotetun veden tasainen laatu mahdollistaa säästöjä jälkikäsittelyprosesseissa. Pilot-kokeilla tarkennetaan myös kalvovalmistajan antamaa kustannusarviota. Kustannuksia vertaillaan samanlaisten laitosten kustannuksiin luvussa 3.4.

<sup>4</sup> Gorczyca & Zhang., 2010. *Floc Size Distributions in Dissolved Air Flotation of Winnipeg Tap Water*. Environmental Technology, **24**1, s. 427-438.

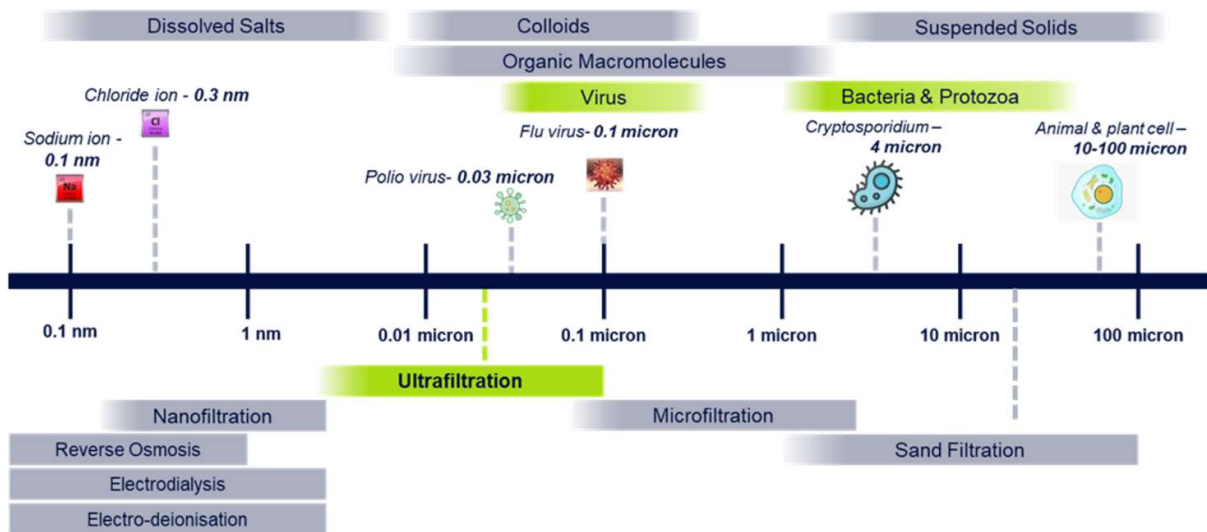
# 2 Koejärjestely

## 2.1 Suodatinkalvot

### 2.1.1 Ultrasuodatuksesta lyhyesti

Ultrasuodatuksessa epäpuhtaudet poistetaan vedestä siivilöinnillä. Ultrasuodatuskalvon huokoskoko on 0,01–0,1 µm, joka riittää poistamaan partikkelit ja bakteerit kokonaan, sekä osan viruksista (Kuva 3). Ultrasuodatuksessa puhdistettava vesi läpäisee kalvon paine-eron avulla. Paine-ero voidaan tuottaa joko syöttöpuolelle (paineellinen suodatus) tai puhtaan veden puolelle (imusuodatus). Imevä suodatus toteutetaan upotettavilla suodatuskalvoilla, jotka voidaan asentaa esimerkiksi vanhoihin hiekkasuodatusaltaisiin. Upotettavan ultrasuodatuksen etuina paineelliseen suodatukseen on, että kalvot kykenevät käsittelemään likaisempaa vettä. Upotettava ultrasuodatus on suosittu vaihtoehto isoilla vedenpuhdistuslaitoksilla ja laitoksilla, joilla raakavesi sisältää paljon kiintoainetta tai muuten heikkolaatuista. Puhdistusprosesseissa käytetään usein saostusta tehostamaan ultrasuodatuksen toimivuutta.

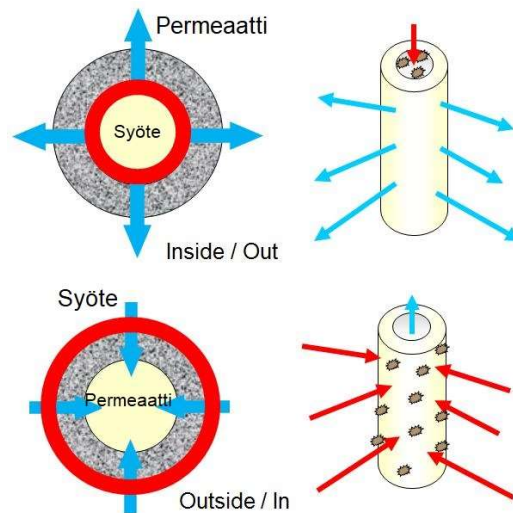
Tutkimusten mukaan alhaisen käyttöpaineen ansiosta upotettavan membraanin pinnalle kasautuu huokoisempi kerros epäpuhtauksia, joka on huuhteluilla helpompi poistaa, harventaen näin kemiallisen pesun pesuväliä. Altaaseen asennetut kalvot hyötyvät myös gravitaatiosta minkä ansiosta suurimmat partikkelit laskeutuvat suoraan altaan pohjalle, eivätkä ole tukkimassa kalvojen pintaa. Tämän takia upotettuja suodatuskalvoja käytetään myös jätevesien puhdistuksessa.



**Kuva 3** Ultrasuodatuksessa suodatuskalvon huokoskoko on niin pieni, että suurin osa veden epäpuhtauksista suodatetaan pois. Suodatus ei kuitenkaan vaikuta liuenneihin suoloihin eikä näin vaikuta esimerkiksi kovuuteen tai alkaliteettiin.

Paineellisella ultrasuodatuksella on kuitenkin useita hyviä puolia. Suuremman käyttöpaineen ansiosta säätövara on suurempi. Tästä on etua esimerkiksi silloin, kun täytyy korvata kylmän veden viskositeetin noususta aiheutuva tuoton heikkeneminen. Upotetuilla membraaneilla imupainetta nostamalla pystytään vain pieneen kapasiteetin nostoon, muuten riskinä on kalvorakenteen rikkoutuminen ja ilman pääsy systeemiin. Ratkaisu tuotannon kasvattamiseen upotettavilla kalvoilla onkin suurempi membraanipinta-ala. Paineellista suodatusta käytettäessä voidaan painetta nostamalla lisätä tuotantoa.

Upotettava ultrasuodatus toteutetaan poikkeuksetta niin sanotulla *outside-in*-ajotapana (Kuva 4). Tässä ajotavassa likainen vesi sijaitsee kalvon ulkoreunalla ja suodautuu kalvon läpi sisäpuolelle. Paineellinen suodatus on mahdollista tehdä myös toisin päin. *Outside-in*-ajotavan etuna on suurempi suodatuspinta-ala ja tehokkaammat vastavirtapesut.



**Kuva 4** Syötteen ja permeaatin suodatussuunnat *inside-out*- ja *outside-in*-suodatuksessa. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa suurempi osa suodatuskalvon pinta-alasta on likaisella puolella ja vastavirtahuuhdeltu on tehokkaampaa.

Upotettavat ultrasuodatuskalvot valmistetaan joko keraamisista materiaaleista (piikarbidi (SiC, *silicon carbide*), alumiinioksidi, zirkoniumoksidi, titaanioksidi) tai polymeeriestä (polyvinyyliidifluoridi (PVDF), polyetyylisulfoni, polyakrylonitrili, polysulfoini, polyetyleni). Keraamisista materiaaleista piikarbidi on kovin, mutta myös kaikkein kallein. Kaikki keraamiset materiaalit ovat kemiallisesti inerttejä ja ne kestävät erilaisia kemiallisia olosuhteita polymeerejä paremmin. Polymeerisistä materiaaleista upotettavissa kalvoissa käytetään lähinnä PVDF-pinnoitettuja membraaneja. Tukimateriaaleina käytetään jotain muista mainituista polymeereistä. PVDF kestää laajemmin kemiallisten olojen vaihtelua ja hetkellisesti esim. klooria. Taulukkoon on listattu tässä pilot-kokeessa käytettyjen suodatuskalvojen ominaisuuksia. Aquardenin tiedot ovat valmistajan itse ilmoittamia, Dupontin tiedot ovat NFS:n mittaamia ja Suezin tiedot perustuvat Kalifornian Terveysviranomaisten tekemään mittaukseen.

**Taulukko 1** Pilot-kokeessa käytettyjen kalvojen perusominaisuuksia

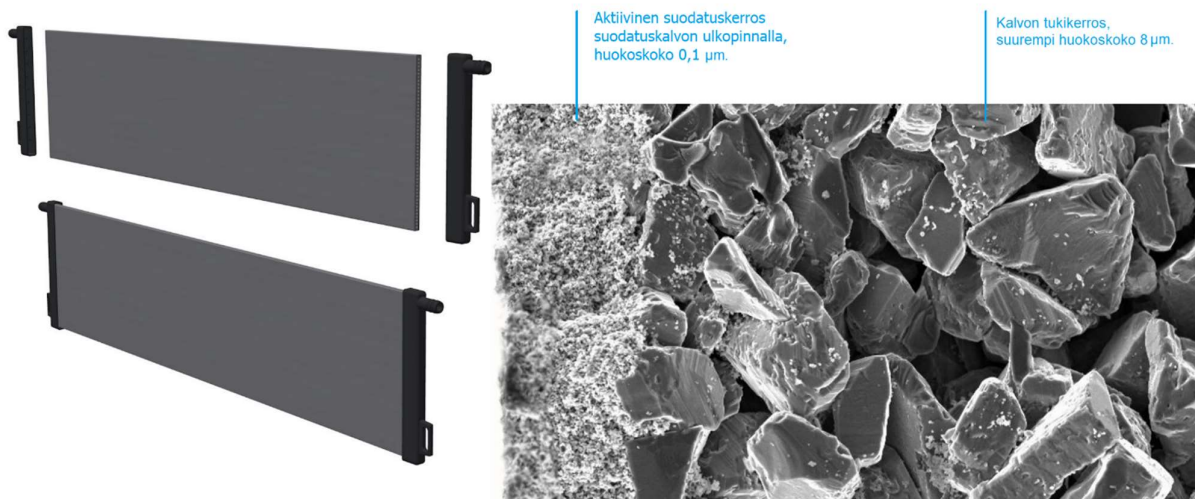
Valmistaja	Merkki	Materiaali	Huokoskoko (µm)	Virtaama (LMH)	Operointi-pH (hetkel. pH)	Log-reduktio
Aquarden	Cembrane	SiC	0,1	500	Ei rajaa	> 5 log (Patogeenit, Bakteerit)
DuPont	Memcor	PVDF	0,04	80–90	6–9 (2–10)	> 5,5 log ( <i>C. parvum</i> ) > 6,0 log ( <i>B. atrophaeus</i> ) > 2,5 log (MS2 virus)
Suez	ZeeWeed 1000	PVDF	0,04	90	5–9,5 (2–10)	> 4,5 log ( <i>C. parvum</i> ) > 2,5 log (MS2 virus)
	ZeeWeed 500					

### 2.1.2 Aquarden – SiC

Aquarden SiC (ent. Cembrane SiC) on piikarbidista valmistettu keraaminen suodatuskalvo, jonka huokoskoko on 0,1 µm. Tässä hankkeessa käytetyistä suodatuskalvoista Aquarden SiC on ainoa suodatuskalvo, jonka moduulirakenne on tasokalvo. Tasokalvomoduulien pakkaustiheys on huomattavasti heikompi kuin onttokuitumoduulien. Yhdessä moduulissa (Kuva 5) on aktiivista suodatuspinta-alaa 0,1752 m<sup>2</sup>. Membraanin huokoisuus on 43 %, mitä voidaan pitää hyvin suurena. Tyypillinen virtaama on valmistajan mukaan 500 litraa per neliometri (LMH).

Piikarpidi on kemiallisesti inertti materiaali, jonka zeta-potentiaali on negatiivinen. Koska suodatuskalvon materiaali on erittäin kestävä, mahdollistaa se myös voimakkaiden pesuliuosten käytön kemiallisessa pesussa. Valmistajan ilmoittama oletettu käyttöikä näille membraaneille on 20 vuotta. Pintaveden puhdistuksesta referenssi kohteita valmistajalla ei ole, mutta suodatuskalvoja on käytetty useissa kalajalostamoissa Tanskassa käsittelemään jätevesiä. Piikarpidikalvojen käyttökohteista voi lukea lisää artikkelista.<sup>5</sup>

Asennuskokemukset kalvosta jäivät vajaaksi, sillä kalvomoduulit toimitettiin suoraan laitteistoon asennettuna. Toisaalta tämä osoitti yhden selkeän edun polymeeripohjaisiin kalvoihin verrattuna: Keraamiset kalvot eivät tukkiudu, vaikka olisivat kuivina. Niinpä käsittely on erittäin helppoa. Moduulirakenteen perusteella asentaminen pitäisi olla kuitenkin kohtalaisen helppoa, yksittäisiä moduuleja kasataan päällekkäin niin, että permeaattiyhteet yhdistyvät keskenään.



**Kuva 5** Aquarden SiC suodatuskalvo. Vasemmalla on tasokalvomoduulin rakenne, oikeanpuoleisessa kuvassa on mikroskooppikuva suodatuskalvon pinnasta. Aktiivinen suodatuseros suodattaa veden, kun taas tukikerros ehkäisee suodattavan kerroksen rikkoutumista<sup>6</sup>.

### 2.1.3 DuPont – Memcor

DuPont Memcor (ent. Evoqua Memcor) on PDVF-pohjainen onttokuitukalvo, jonka huokoskoko on 0,04 µm. Moduulirakenteelta tällä suodatuskalvolla on lähempänä "perinteistä" putkimoduulia. Yhdessä moduulissa on 23 m<sup>2</sup> suodatuspinta-alaa. Materiaalina PVDF on heikompi kuin piikarpidi. Suodatuskalvolle suositeltu pH:n vaihteluväli on 6–9. Hetkellisesti pH saa olla välillä 2–10. Suodatuskalvo on rakenteeltaan kolmikerroksinen "thin-film composite", missä suodattava kerros on erittäin ohut kalvo kahden polyamidi-tukikerroksen päällä.

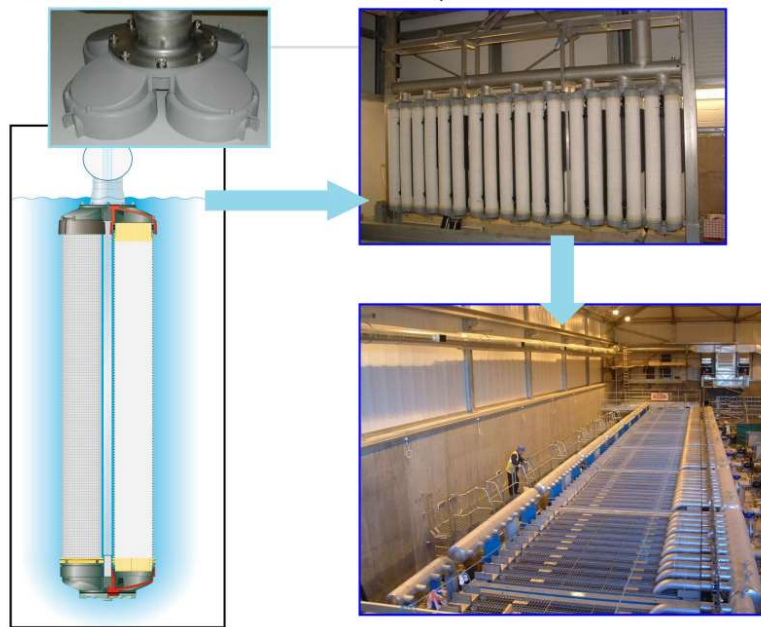
<sup>5</sup> Eray et al., 2021. A roadmap for the development and applications of silicon carbide membranes for liquid filtration - Recent advancements, challenges, and perspectives. Chemical Engineering Journal, **414**, 128826.

<sup>6</sup> Cembrane, 2017. SiC flat sheet membranes and modules

Putkimallin moduulit asennetaan apilan muotoiseen yhteeseen (Kuva 6). Näitä voidaan sijoittaa rinnakkain altaaseen. Moduuleja ei kuitenkaan voi pinota päällekkäin, joten ainoa tapa hyödyntää kolmiulotteisuutta on pidemmät moduulit. Noin metrin mittainen moduuli on pisin mahdollinen ilman kuitujen katkeamista.

DuPont Memcor on suosittu suodatuskalvo Englannissa ja Skotlannissa. Useat laitokset ovat valinneet kalvon puhdistusprosessiinsa. Rautapohjaisilla saostuskemikaaleilla on havaittu tukkeutumista, minkä takia laitoksilla on asennettu selkeytysprosessi ennen kalvosuodatusta.

Suodatuskalvon asentaminen oli kokeilluista vaihtoehdoista hankalinta. Tämä johtuu tosin osittain pilot-laitteiston suodatusaltaan ahtaudesta ja tilanne olisi parempi, mikäli vapaata tilaa olisi enemmän. Moduulien asennuksessa oli kuitenkin havaittavissa jonkin verran samoja ongelmia kuin paineellisissa kalvoissa. Tiukat tiivistykset permeaattipuolella vaativat melko paljon voimaa asennettaessa ja väärin asentaminen on mahdollista (oikea asennussuunta osoitettu tiivisterenkailla putkilon päässä).



**Kuva 6** DuPont Memcorin upotettavan ultrasuodatuskalvon moduuli sekä asennustapa laitoksella<sup>7</sup>.

#### 2.1.4 Suez – ZeeWeed 500d

Suez ZeeWeed 500d on erityisesti Kanadassa ja Yhdysvalloissa suosittu PVDF-pohjainen suodatuskalvo. Se on onttokuitukalvo jonka huokoskoko on 0,04  $\mu\text{m}$ . Kalvon suositeltu pH väli on 5–10. Myös Suezin suodatuskalvo on kolmikerroksinen komposiittikalvo. Suezin kalvoilla moduulirakenne on selvästi putkilomallista poikkeava (Kuva 7). Kalvorakenteen etuna on suurempi liikkuvuus kalvolle, näin huuhtelut ja varsinkin paineilmakäsittely tehostuvat. ZeeWeed 500d on suunniteltu talousveden valmistukseen, siinä on tiheimmin moduuleja kuin jätevedenpuhdistukseen suunnitellussa 500c:ssä. Kalvovalmistajan mukaan tämä moduuli ei vaadi esiselkeytystä ja toimii hyvin suurella skaalalla raakavesiä.

Kokeilluista suodatuskalvoista ZeeWeed 500d oli ainoa, mitä ei pystytty asentamaan yhden henkilön voimin. Pitkät, verhomaiset rakenteet vaativat kaksi henkilöä kannattelemaan verhoa samalla kun kolmas henkilö asensi verhon kiskoille. Väärin asentamisen mahdollisuus on pieni. Moduuli jää näkyviin eri tavalla, mikäli asennus on tehty väärin.

<sup>7</sup> Evoqua, 2014. *Submerged Membrane Presentation*.



**Kuva 7** Suez ZeeWeed 500 suodatuskalvon moduuli (oikealla) ja suurempi kasetti, joka sisältää muutaman kymmenen moduulia. Yhden moduulin korkeus on noin 1,5 m.

#### 2.1.5 Suez – ZeeWeed 1000

Suezin ZeeWeed 1000 käyttää samaa membraania kuin 500d, erona on moduulirakenne (Kuva 8). ZeeWeed 1000 on suunniteltu viemään pakkaustiheys mahdollisimman korkeaksi. Näin ollen mahdollisimman pienessä tilassa saadaan tuotettua suurin määrä vettä. Poikkeuksellista muihin ontokuitumoduuleihin on se, että kuidut on asennettu poikittain virtaussuuntaan nähden. Tämän pitäisi teoriassa parantaa ilmahuuhtelua. Toisaalta saostuskemikaalia käytettäessä poikittainen suunta lisää saostumien kasautumisen riskiä kuitujen päällä. Niinpä rautapohjaisilla kemikaaleilla saostettaessa valmistaja ei suosittele yli 3 mg/l Fe annosta. Samanlaista rajoitusta ei ole esim. ZeeWeed 500d:llä. Verrattaessa ZeeWeed 500d:n huomataan myös, että esikäsittelyvaatimus on ZeeWeed 1000:lla tiukempi.



**Kuva 8** Suezin ZeeWeed 1000 kasetti, joka sisältää useita moduuleja. Yksittäinen moduuli voidaan vetää kasetista ulos kuvassa näkyvillä sinisillä kahvoilla. Moduulit ovat kevyitä ja helposti käsiteltäviä.

Käytetyistä moduuleista tämä oli helpoin asentaa. Asentamiseen tarvitaan vain yksi ihminen (toki asennettaessa korkealla tarvitaan toinen henkilö valvomaan), sillä moduulit ovat kevyitä ja sopivan kokoisia. Niiden paikalleen laitossa täytyy huolehtia, että permeaattiyhde tulee oikeaan suuntaan. Moduuli ei kuitenkaan mene paikoilleen kunnolla, jos sitä yritetään asentaa väärin.

## 2.2 Saostuskemikaalit

Tutkimuksessa kokeiltiin yhteensä viittä eri saostuskemikaalia. Saostuskemikaalien valintaan vaikutti sekä jo upotettavaa ultrasuodatusta käyttävien laitosten kokemukset, että kalvovalmistajien suositukset ja ehdotukset. Kemikaaleista keskusteltiin myös kemikaalitoimittajien kanssa, jotta pystyttiin toimimaan lähellä optimiolosuhteita.

Saostuskemikaalit olivat PIX-322 (ferrisulfaatti, Kemira), PIX-111 (ferrikloridi, Kemira), PAX-XL100 (polyalumiinikloridi, Kemira), ALSU-50 (alumiinisulfaatti, Kemira) ja Koskifloc 50 (alumiiniklorohydraatti, Bang & Bonsomer) (Taulukko 2).

**Taulukko 2** Viidestä hankkessa käytetystä saostuskemikaalista neljää käytettiin pilot-laitteiston kanssa ja neljää saostuskokeessa. Ferrikloridia ei kokeiltu pilot-laitteistossa. Alumiinisulfaattilla ei tehty saostuskokeita.

	PIX-322	PIX-111	PAX-XL100	ALSU-50	Koskifloc 50
Pilot-laitteisto	X		X	X	X
Saostuskoe	X	X	X		X

### 2.2.1 Alumiiniklorohydraatti

Alumiinipohjaisista saostuskemikaaleista alumiiniklorohydraatti (ACH) sisältää eniten alumiinia (Taulukko 3). Alumiiniklorohydraattia valmistetaan alumiinista ja suolahaposta korkeassa lämpötilassa ja se on epäorgaaninen kationinen polymeeri. Vedenpuhdistuksessa kemikaalin useat OH-yhdisteet mahdollistavat vain pienet muutokset käsitellyn veden pH:ssa. Valmistajan mukaan lisäksi alumiinipitoisuus käsitellyssä vedessä on alhainen. Taulukko 3 on merkitty kaksi Suomessa toimivaa kemikaalitoimittajaa. Saostuskokeessa käytettiin Kemiran tuotetta, pilot-laitteistossa Bang & Bonsomerin kemikaalia.

**Taulukko 3** Kaupallisten alumiiniklorohydraattien ominaisuudet.

Alumiiniklorohydraatin koostumus	PAX-XL 19	Koskifloc 50
Valmistaja	Kemira	Bang & Bonsomer
Alumiinipitoisuus (%)	12,2–12,8	12,1–12,7
Tiheys (25 °C) (ton/m <sup>3</sup> )	1,31–1,37	1,33–1,35
Emäksisyys (%)	80–86	82–85
Saostuskemikaaliannos (5 ppm Al)	29,6 ml/m <sup>3</sup>	30,1 ml/m <sup>3</sup>

### 2.2.2 Alumiinisulfaatti

Alumiinisulfaattia (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) on käytetty saostuskemikaalina HSY:n vedenpuhdistuksessa ennen siirtymistä ferrisulfaattiin. Alumiinisulfaattia valmistuu alumiinihydroksidin ja rikkihapon reaktiossa. Alumiinisulfaatin tehokas pH-alue on suppea, 5,5–6,5. Alumiinin jäännöspitoisuus jää yleensä korkeaksi. Taulukko 4 on esitetty alumiinisulfaatin perusominaisuuksia.

**Taulukko 4** Kaupallisen, pilotoinnissa käytetyn alumiinisulfaatin ominaisuuksia.

Alumiinisulfaatin koostumus	ALS-50
Valmistaja	Kemira
Alumiinipitoisuus (%)	3,7–4,3
Tiheys (25 °C) (ton/m <sup>3</sup> )	1,26–1,32
Emäksisyys (%)	-
Saostuskemikaaliannos (5 ppm Al)	96,9 ml/m <sup>3</sup>

### 2.2.3 Ferrikloridi

Ferrikloridi (FeCl<sub>3</sub>) on vedenpuhdistuksessa käytettävä saostuskemikaali, jonka teho perustuu kolmiarvoiseen rautaan. Ferrikloridia voidaan valmistaa titaanioksidin valmistuksessa, kun rauta erotetaan titaanista kloridiprosessilla. Vaihtoehtoisesti ferrikloridia voidaan valmistaa mm. romuraudan ja kloorikaasun välisessä reaktiossa ja magnetiitin, suolahapon ja hapettimen välisessä reaktiossa. Ferrikloridin kanssa kosketuksiin joutuvien osien tulee olla muovia, lasikuituvahvisteista polyesteriä, titaania tai kuminoitua terästä. Haponkestävät teräslaadut eivät kestä ferrikloridia<sup>8</sup>. Ferrikloridia käytettiin ainoastaan saostuskokeissa. Saostuskokeessa käytetyn PIX-111:n (Taulukko 5) ohella markkinoilta löytyy esim. Voda Nordicin Ferri-90.

**Taulukko 5** Ferrikloridin ominaisuuksia.

Ferrikloridin koostumus	PIX-111
Valmistaja	Kemira
Rautapitoisuus (%)	13,4–14,2
Tiheys (25 °C) (ton/m <sup>3</sup> )	1,39–1,45
Emäksisyys (%)	-
Saostuskemikaaliannos (5 ppm Fe)	25,6 ml/m <sup>3</sup>

### 2.2.4 Ferrisulfaatti

Kemiran valmistama ferrisulfaatti (Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) on käytössä HSY:n Pitkälän ja Vanhankaupungin laitoksella. Kemikaalia on valmistettu titaanioksiditeollisuuden sivutuotteesta, ferrosulfaatista. Ferrisulfaatilla on leveämpi saostusalue kuin alumiinisulfaatilla, noin 4,5–6,0. Taulukko 6 on kasattu ferrisulfaatin ominaisuuksia.

**Taulukko 6** Kaupallisen ferrisulfaatin ominaisuuksia.

Ferrisulfaatin koostumus	PIX-322
Valmistaja	Kemira
Rautapitoisuus (%)	12,2–12,8
Tiheys (25 °C) (ton/m <sup>3</sup> )	1,52–1,62
Emäksisyys (%)	-
Saostuskemikaaliannos (5 ppm Fe)	25,5 ml/m <sup>3</sup>

<sup>8</sup> Huoltovarmuuskeskus, 2020. *Kemiallisen saostuksen huoltovarmuuden parantaminen suomen vesihuollossa*. Huoltovarmuuskeskus, ISBN 978-952-5608-72-4.

## 2.2.5 Polyalumiinikloridi

Polyalumiinikloridia (PACl) syntyy alumiinihydroksidin ja suolahapon reaktiossa korkeassa paineessa ja lämpötilassa. PACl:n pH on noin 1,0. Polymeerirakenteen ansiosta PACl toimii nopeammin ja muodostaa suurempia, nopeammin laskeutuvia flokkeja. PACl toimii alemmissa lämpötiloissa ja sen pH-alue on laajempi, 4,5–10,0.

Polyalumiinikloridin koostumus	PAX XL-100
Valmistaja	Kemira
Alumiinipitoisuus (%)	9,0–9,6
Tiheys (25 °C) (ton/m <sup>3</sup> )	1,36–1,42
Emäksisyys (%)	41–45
Saostuskemikaaliannos (5 ppm Fe)	38,8 ml/m <sup>3</sup>

## 2.3 Pilot-laitteisto

Koelaitteisto käsitti kolme käsittelyvaihetta. Raakavesi pumpattiin uppopumpulla Pitkäkosken PK2-suodatushallin tulokaivosta ensin metrin syvyydestä. Laitoksen prosessin kemikaaliannostustapaa muutettiin kesken pilotoinnin, jolloin alkuperäinen, noin metrin syvyys ei riittänyt vaan saostuskemikaalia pääsi pilotin raakaveteen. Niinpä pumpun paikkaa vaihdettiin ja se upotettiin kolmen metrin syvyydelle.

Raakavesi johdettiin esikäsittelyyn. Esikäsittelyssä saostuskemikaali lisättiin raakaveteen ja flokkaus tapahtui n. 1 m<sup>3</sup> kokoisessa säiliössä. Saostettu vesi pumpattiin kalvosuodatusaltaaseen. Puhdas vesi imettiin kalvojen läpi ja jatkokäsiteltiin aktiivihiihisuodatuksella ja kalkkikivisuodatuksella.

### 2.3.1 Kemiallinen saostus

Esikäsittelylaitteistoja oli kahdenlaisia. Suezin kalvoja pilotoitaessa käytettiin Suezin toimittamaa omaa laitteistoa, muilla kalvoilla tuotettiin Kuva 9 olevaa, Hyxon valmistamaa saostusyksikköä. Molemmissa laitteistoissa saostuskemikaali annosteltiin juuri ennen putkisekoittajaa. Suezin laitteistossa putkisekoittajaa oli yksi kappale, Hyxon toimittamassa laitteistossa kaksi. Hyxon jälkimmäisessä putkisekoittajassa oli mahdollista sekoittaa pH:n säätökemikaali. Suezin laitteistossa pH:n säätökemikaalin lisäys olisi tapahtunut samassa pisteessä kuin saostuskemikaali.

Molemmissa laitteistoissa oli 1 m<sup>3</sup> kokoinen saostussäiliö. Pilotoinnissa käytettiin 4–5 m<sup>3</sup>/h virtaamaa, jolloin saostusaika säiliössä vaihteli 12–15 min. Suezin laitteistossa uppopumppu sijaitse saostusaltaassa, kun taas Hyxon laitteistossa vesi johdettiin erilliseen pumppaussäiliöön. Esikäsitellyn veden pH:ta seurattiin jatkuvatoimisesti.

### 2.3.2 Ultrasuodatus

Saostettu vesi pumpattiin ultrasuodatustankkiin. Ultrasuodatus toimi vakiovirtaamalla. Suezin molemmilla kalvoilla ja DuPontin kalvoilla virtaama oli 4 m<sup>3</sup>/h ja Aquardenin keraamisella kalvolla virtaama oli 5 m<sup>3</sup>/h. Mahdollisimman tasaisen virtaaman saavuttamiseksi kalvoille tehtiin erilaisia pesuja. Pesuvedenä käytettiin suodatuksella tuotettua permeaattia.

Vastavirtahuuhtelun aikana normaali virtaussuunta käännettiin ja permeaattia puskettiin imupuolelta kalvon läpi. Samanaikaisesti paineilmaa puhallettiin suodatusaltaan pohjalle. Paineilman muodostamat pienet ilmakuplat ”raapivat” suodatuskalvon pinnalta likaa, lisäksi onttokuitumoduuleilla paineilma sai kuituniput

liikkeelle ja hieroutumaan toisiaan vasten. Huuhteluita tehtiin jokaisella suodatuskalvoilla 20 minuutin välein. Huuhteluissa käytetty veden ja paineilman määrä erosi toisistaan merkittävästi. Näistä on kerrottu enemmän tuloksissa kohdassa 3.3.



**Kuva 9** Toinen pilotoinnissa käytetyistä esikäsittely-yksiköistä. Ensimmäisessä isossa säiliössä tapahtui flokkaus, toisesta vesi pumpattiin kalvosuodatukseen. Pienemmät säiliöt ovat kemikaalisäiliöt.



**Kuva 10** Keraamisen suodatuskalvon kemiallinen huuhtelu tapahtui levittämällä pesuliuos kalvon pintaan sprinklereillä. Tämä pienensi merkittävästi pesulioksen määrää, kun kalvoa ei upotettu veteen.

Vastavirtahuuhtelu ei riitä ylläpitämään membraani suorituskykyä. Vastavirtahuuhtelua voidaan tehostaa lisäämällä pieni annos kemikaalia pesuveden sekaan. Tätä kutsutaan kemiallisesti tehostetuksi huuhteluksi (CEB, *chemically enhanced backwash*). Huuhteluprosessi on muuten sama kuin vastavirtahuuhtelussa. Pesukemikaalina voidaan käyttää hypokloriittia, suola- tai sitruunahappoa, hieman tarpeen mukaan. Yleensä saostuskemikaalia käytettäessä happopesut ovat tehokkaampia ja niitä tehdään useammin. Hypokloriittipesu on puolestaan tehokas orgaanista likaa puhdistettaessa. CEB oli mahdollista toteuttaa Suezin pilot-laitteisolla, mutta laitosmittakaavassa huuhtelu voidaan toteuttaa kaikilla vaihtoehdoilla. Yleensä tehostettu pesu tehdään kerran, kaksi päivässä.

CEB:n lisäksi suodatuskalvoille tehdään tarvittaessa kemiallista pesua (CIP, *clean-in-place*). CIP toteutetaan joko happo- tai emäspesuna. Happopesussa pesukemikaaleina oli joko sitruunahappo tai sitruunahappo-suolahappo sekoitus. Happopesu tehtiin n. pH 2:ssa. Sitruunahapon vahvuus pesussa oli 33 %. Sitruunahappo-suolahappo pesussa käytettiin seosta, joka sisälsi puolet 50 % sitruunahappoa ja puolet 37 % suolahappoa. Emäspesussa käytettiin 11 % natriumhypokloriittia ja pesun pH oli 10–11. Onttokuitukalvoilla pesukemikaali lisättiin n. 200 litraan permeaattia ja liuosta kierrätettiin laitteistossa puolesta tunnista ylöspäin. Keraamisilla kalvoilla pesuliuosta suihkutettiin spriklereillä suodatuskalvon ulkopinnalle (Kuva 10). Spriklerihuuhdeltu käytti huomattavasti vähemmän vettä verrattuna ison vesimassa kierrättämiseen.

### 2.3.3 Jälkikäsittely

Kalvosuodatuksen permeaatti johdettiin jälkikäsittelyyn, joka koostui aktiivihiili- ja kalkkikivisuodatuksesta (Kuva 11). Aktiivihiilikäsittelyn pystyi ohittamaan, milloin jälkikäsittely sisälsi pelkän kalkkikivisuodatuksen. Jälkikäsittelyn suunniteltaessa tehtiin selvitys upotettavaa ultrasuodatusta käyttävien laitosten puhdistusprosessista. Erityisesti keskityttiin laitoksiin, jotka käyttävät kemiallista saostusta orgaanisen aineen poistoon. Tällaisia laitoksia löytyy esimerkiksi Kanadasta ja Englannista (osa mainittu luvussa 1.2.2). Lähes kaikilta laitoksilta löytyy aktiivihiilisuodatus kalvosuodatuksen permeaatin jatkokäsittelynä.

Aktiivihiilisuodatuksella poistetaan vedestä suodatuksessa jäljelle jäänyt orgaaninen aines (*natural organic matter*, NOM) sekä parannettiin veden esteettisiä ominaisuuksia. Tutkimuksen lähtöoletuksena oli, ettei kalvosuodatus yksin kykene poistamaan NOM:ia nykyisen verkostoveden tasolle, tähän tavoitetasoon tarvittiin aktiivihiilisuodatus. Toisaalta haluttiin selvittää, voisiko puhdistusprosessi toimia ilman aktiivihiilisuodatusta. Tätä selvitettiin analysoimalla biologista stabiilisuutta ja käytettävissä olevan biohajoavan hiilen määrää tuotetussa vedessä.

Suodattimessa käytetty aktiivihiili oli reaktivoitua Filtrasorb F400-hiiltä, samaa hiililaatua käytetään PK:n laitoksen aktiivihiilisuodattimissa. Neitseellistä hiiltä ei lisätty. Aktiivihiilisuodatuksen kontaktiaika oli suurimman osan ajasta 6,5 minuuttia virtaaman ollessa 3,2 m<sup>3</sup>/h. Pienempi virtaama jälkikäsittelyssä johtui ultrasuodatuksen huuhtelun aiheuttamista tauoista permeaatin tuotannossa. Ennen aktiivihiilisuodatusta oli varastosäiliö, mikä mahdollisti jälkikäsittelyn jatkuvatoimisuuden, vaikka permeaatin tuotannossa oli katkoja suodatuskalvojen huuhteluiden aikana.

Kalkkikivisuodatukselta on HSY:llä hyviä käyttökokemuksia selkeytetyn veden jatkokäsittelyssä, lisäksi se on veden pH:n ja alkaliteetin nostamisessa ympäristöystävällinen vaihtoehto poltetulle kalkille. Pilot-prosessissa kalkkikivisuodatus oli tuotetun veden viimeinen käsittely ennen viemäröintiä. Kalkkikivisuodatuksella veden pH, alkaliteetti ja kovuus saatiin nostettua lähemmäs verkostoveden tasoa. Pitkäkoscelta lähtevän veden pH on 8,4, alkaliteetti 32,5 mg/l CaCO<sub>3</sub> ja kovuus 2,9 °dH. HSY:n käyttökokemuksien perusteella odotettiin myös kalkkikivisuodatuksen alentavan kalvosuodatuksen jäännösraudan pitoisuuksia. Alumiinikemikaalien kanssa kokemuksia ei aiemmin ole.

Käytetty kalkkikivi oli Nordkalkin Parafill 1500, jonka raekoko on 1,4 mm. Kolmen ensimmäisen ultrasuodatusjakson aikana kalkkipatjan paksuus oli n. metrin. Viimeisellä kerralla kalkkia lisättiin ja patjan

paksuus oli 1,6 metriä. Kalkkisuodatuksen viipymä oli aktiivihiihluodatusta pidempi, noin 10 minuuttia. Virtaama oli sama kuin aktiivihiihllä. Kalkkikivisuodattimen huuhteluun käytettiin permeaattia kääntämällä virtaussuunta suodattimessa pohjalta ylöspäin.



**Kuva 11** Permeaattia käsittelevät jälkikäsitteilyn vaiheet. Vasemmalla on varastosäiliö, keskellä aktiivihiihluodatus ja oikealla kalkkikivisuodatus.

## 2.4 Analyysit

Veden laatua analysointiin jatkuvasti koejakson aikana kolmesta mittauspisteestä. Nämä olivat raakavesi (ilman saostusta), permeaatti ja jälkikäsitelty vesi. Tuloksia on verrattu laitoksen omiin mittaustuloksiin samalta ajanjaksolta.

Analyysijä suoritettiin joko päivittäin, kolme kertaa viikossa tai kerran viikossa. Mikrobiologista laatua seurattiin ainoastaan permeaatista, sillä jälkikäsitteilylaitteistoon ei saatu rakennettua toimivaa, ja etenkin mikrobiologisesti turvallista, näytepistettä. Jäännösrautapitoisuutta mitattiin ainoastaan rautakemikaalia käytettäessä, jäännösalmiinia puolestaan pelkästään alumiinikemikaalilla. Alumiinimittaus tehtiin Metropolilabissa, muut analyysit tehtiin HSY:n omissa laboratorioissa Pitkäkoscalla (Taulukko 7).

**Taulukko 7** Tutkimuksessa käytetyt analyysit taulukoituna. Taulukosta löytyy standardi, minkä mukaan analyysi on tehty, tärkeimmät laitteistot sekä analysointitiheys.

Analyyysi	Standardi	Laitteisto	Mittauskertoja viikossa
pH	SFS 3021:1979	Metrohm (Lasielektrodi)	5
Alkaliteetti	ISO 9963-1:1996	Metrohm Ttruno 794 (Titraattori)	3
Kovuus			3

Sameus	SFS-EN 27027:2000	HACH 2100AN	5
Sähkönjohtavuus			5
TOC	SFS-EN 1484:1997	Schimadzu VCPH-TOC	3
UV	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 5910B	PerkinElmer (Fotometri)	5
R2A	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 5910B	-	1 (vain permeaatti)
Rauta	ISO 17294-2	PerkinElmer (Fotometri)	3
Alumiini	SFS-EN ISO 11885:2009		3

# 3 Tulokset

## 3.1 Permeaatin laatu

### 3.1.1 Permeaatin laatu eri suodatuskalvojen välillä

Jokaisella suodatuskalvolla käytettiin PACI-saostusta lähes identtisellä saostuskemikaaliannoksella, jotta saatiin vertailukelpoisimmat tulokset membraanien välille. Taulukko 8 on esitetty permeaatin laatutulokset PACI-saostuksella. Saostuskemikaaliannos on pyritty pitämään samana jokaisella suodatuskalvolla, tosin Suez ZeeWeed 1000:lla annos on pienempi. Tämä johtui rajallisesta ajasta, sillä suodatusjakso toteutettiin suurimmaksi osaksi ferrisulfaatilla. Koska suodatus ferrisulfaatilla 3 ppm Fe annoksella ei toiminut, ei valmistaja uskaltanut suositella PACI-saostustakaan korkeammalla pitoisuudella.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että suodatuskalvon välillä ei ole merkittävää eroa. Permeaatin laatu on tasaisesti samanlaista suodatuskalvosta riippumatta. Huomioitavaa on se, että raakaveden laatu vaihtelee jonkin verran vuodenajan mukaan, lisäksi kylmemmässä vedessä saostuminen ei välttämättä tapahdu yhtä nopeasti kuin lämpimässä.

Pilot-kokeiden tulokset vastaavat hyvin saostuskokeen tuloksia. Sameus on kaikilla suodatuskalvoilla hyvällä tasolla, alle 0,1 FTU. Alkaliteetista poistuu noin 60 %. Koejakson aikana raakavedestä ei mitattu kovuutta, siksi sille ei ole laskettu prosentuaalista muutosta. Kovuus on kuitenkin pysynyt lähellä raakaveden kovuutta. Orgaanisen aineen analyysien tuloksia tarkastellessa huomataan, että UV-valoa absorboivista yhdisteistä on poistunut lähes 80 prosenttia, mutta orgaanisesta hiilestä vain noin 60 prosenttia. Samanlainen havainto voidaan tehdä tarkasteltaessa perinteistä selkeytys/hiekkasuodatus prosessia, mikä on käytössä Pitkäkioskella. Jäännösalmiiniipitoisuudessa on selkeää vaihtelua. Saostuskokeessa 5 ppm Al pitoisuudella jäännösalmiini oli noin 400 µg Al/l (n=1), sama kuin keraamisella Aquardenin suodatuskalvolla. ZeeWeed 500 kalvolla tulos oli alhaisempi, keskiarvo oli vain 110 µg Al/l (n=3). Suurin mitattu pitoisuus oli 170 µg Al/l.

Tarkasteltaessa tuloksia voidaan todeta, että DuPont Memcor -suodatuskalvolla saostuskemikaalin laskennallinen pitoisuus ei luultavasti ole vastannut todellisuutta. Permeaatin laatu vastaa enemmän Suez ZeeWeed 1000:n tuottamaa vettä, ei kahden muun tuloksia. Mitattu pH:n muutos on prosentuaalisesti sama kuin ZeeWeed 1000:n, myös alkaliteetti ja TOC on laskenut selvästi vähemmän kuin muilla kemikaaleilla. UV-valoa absorboivien yhdisteiden määrä on kuitenkin laskenut saman verran kuin muilla vaihtoehdoilla. Tämä indikoisi, että saostuskemikaali tehoaa ensisijaisesti UV-valoa absorboiviin yhdisteisiin ja sen jälkeen vaikeammin poistettaviin orgaanisiin yhdisteisiin.

**Taulukko 8** PACI saostettujen vesien suodatustulokset eri suodatuskalvoilla. Suez ZeeWeed 1000 annos oli hieman muita pienempi, sillä koejakso aloitettiin ferrisulfaatilla, eikä PACI:n testaamiseen useilla annoksilla jäänyt riittävästi aikaa. Tuloksista on ilmoitettu keskiarvo sekä muutos raakaveteen. Positiivinen muutos tarkoittaa, että permeaatissa on pienempi mitattu pitoisuus kuin raakavedessä, negatiivinen taas korkeampaa pitoisuutta permeaatissa.

Analyysi	Aquarden SiC 4,7 ppm Al		DuPont Memcor 4,8 ppm Al		Suez ZeeWeed 500 5 ppm Al		Suez ZeeWeed 1000 3 ppm Al	
	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)
pH (-)	6,09	16	6,31	12	5,97	17	6,09	12
Alkaliteetti (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	6,0	63	7,0	52	5,0	69	5,5	59
Kovuus (°dH)	0,96	-	1,05	-	0,98	-	0,96	-

Sameus (FTU)	0,05	83	0,05	80	0,03	90	0,08	65
Sähkönjoht. (mS/m)	820	-15	885	-13	887	-15	795	-14
TOC (mg/l)	2,7	59	2,9	51	2,6	62	2,7	59
UV <sub>254</sub> (m <sup>-1</sup> )	4,4	79	4,6	77	3,9	79	3,5	77
R2A (pmy/ml)	10	-	10	-	10	-	-	-
Alumiini (µg/l)	380	-	-	-	110	-	-	-

### 3.1.2 Permeaatin laatu eri kemikaalien välillä

Koska suodatuskalvolla ei ole suurta merkitystä permeaatin laatuun, voidaan eri kalvoilla tehtyjä kokeita samalla saostuskemikaalipitoisuudella verrata toisiinsa.

#### Ferrisulfaatti

Ferrisulfaatti käytettiin saostuskemikaalina Suez ZeeWeed 1000 ja DuPont Memcor suodatuskalvoilla. Suez ZeeWeed 1000 -kalvolla saostus tapahtui alkuun suorasaostuksena, mutta suodatuskalvon menetettyä toimintakykyä erittäin nopeasti, päätettiin esikäsitteilyksi lisätä selkeytys. DuPontin kalvomoduuli oli erilainen, eikä uhkana ollut saostuskemikaalikakun muodostuminen kalvon pinnalle, niinpä pilotointi tehtiin pelkästään suorasaostuksella. Toisaalta suodatuskalvon valmistaja oli huolissaan suodatetun veden alhaisesta pH:sta ja epäili sen pahentavan tukkeutumista. Niinpä osa koejaksosta käsiteltiin vettä, jonka pH nostettiin juuri ennen kalvosuodatusta tasolle pH 7.

Ferrisulfaatilla pH putoaa jo pienillä annoksilla (Taulukko 9). Silti optimaalisen saostus-pH:n (4,5-5,0) saavuttamiseksi kemikaaliannoksen täytyy olla vähintään 5 ppm Fe. Pienemmillä annoksilla alkaliteettia jää vielä jäljelle, suuremmilla annoksilla veden puskurikyky on kokonaan kulutettu. Kovuuteen saostuskemikaaliannos ei vaikuta. Sameus oli kaikilla annoksilla hyvällä tasolla, eikä suuria laadunvaihteluita ollut havaittavissa. Saostuskokeeseen verrattuna on orgaanisten, UV-valoa absorboivine yhdisteiden poisto tehokkaampaa pilot-laitteistolla. Pienemmillä annoksilla (1,5 ppm Fe ja 2,5 ppm Fe) UV<sub>254</sub> ja TOC ovat kuitenkin vielä korkealla tasolla, mikäli verrataan esimerkiksi Pitkäkosken prosessin hiekkasuodatettuun veteen (KA 4,5 m<sup>-1</sup> ja 2,8 mg/l). Laitoksen prosessissa käytetyllä kemikaaliannoksella, 6 ppm, on kalvosuodatetun veden laatu parempaa verrattuna hiekkasuodatukseen.

Kun poistetun TOC:n määrää verrataan annosteltuun saostuskemikaalin, huomataan, että korkeillakin pitoisuuksilla ferrisulfaatti on tehokas. Pienimmällä annoksella (1,5 ppm Fe) poistuu orgaanista ainetta 1,33 g TOC / g Fe. Hieman suuremmalla annoksella (2,5 ppm Fe) poistuu 1,26 g TOC / g Fe. Suurimmalla, eli 6 ppm Fe, annoksella orgaanisesta aineesta poistuu 0,74 g TOC / g Fe.

**Taulukko 9** Ferrisulfaatilla saostetun veden analyysituloksia. ZeeWeed 1000 suodatuskalvolla käytettiin esikäsitteilynä saostuksen lisäksi selkeytystä, Memcorin kalvolla oli käytössä suorasaostus. Yhteensä kolme eri saostuskemikaaliannosta kokeiltiin näillä kahdella kalvolla.

Analyysi	ZeeWeed 1000 6,0 ppm Fe, ES*		Memcor 1,5 ppm Fe, SS**,		Memcor 2,5 ppm Fe, SS** pH***		Memcor 6,0 ppm Fe, SS**	
	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)
pH(-)	5,0	30	6,4	8	6,9	-1	4,6	34
Alkaliteetti (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	1,5	89	10,0	38	14,3	8	1,0	92
Kovuus (°dH)	0,98	-	1,0	-	0,96	-	0,96	-

Sameus (FTU)	0,05	77	0,03	85	0,04	89	0,04	89
Sähkönjohtavuus (mS/m)	852	-22	757	-6	1065	-51	940	-35
TOC (mg/l)	2,1	70	4,6	30	3,6	49	2,2	67
UV <sub>254</sub> (m <sup>-1</sup> )	3,7	82	10,5	46	7,0	59	3,7	81
R2A (pmy/ml)	12	78	10	-	10	-	14	-
Rauta (µg/l)	65	-	69	-	25	-	209	-

\* Esiselkeytetty \*\* Suorasaostus \*\*\* pH-säätö, tavoitetaso pH 7

Ferrisulfaattisaostusta kokeiltiin lyhyesti myös Aquardenin keraamisella suodatuskalvolla. Saostuskemikaalilla havaittiin samoja ongelmia kuin ZeeWeed 1000:lla ja Memcorilla, joten koetta ei jatkettu muutamaa päivää pidempään. Kemikaalin annostus oli 5 ppm Fe ja laadultaan permeaatti oli tasaista. Permeaatin pH oli 5,7, alkaliteetti 3,5 mg/l CaCO<sub>3</sub> ja sameus 0,085 FNU. Orgaanisen aineen poistossa tulokset olivat hieman odotettua heikommat, TOC oli 3,2 mg/l (54 %) ja UV<sub>254</sub> oli 5,3 m<sup>-1</sup> (75 %). Jäännösrautapitoisuus oli alhainen, keskiarvo oli 61 µg/l.

### Polyalumiinikloridi

Kuten aiemmin luvussa 3.1.1 kerrottiin, polyalumiinikloridisaostusta kokeiltiin jokaisen suodatuskalvon kanssa. Myös kemikaalin annosta vaihdeltiin, jotta saatiin selvitettyä mahdollisimman tehokas käyttö. Taulukko 10 on esitetty permeaatin laatutulokset neljällä eri annoksella. Polyalumiinikloridisaostuksessa pH ei laske yhtä paljon kuin ferrisulfaatilla, eikä saostus kuluta alkaliteettia täysin loppuun. Tarkasteltaessa kovuutta, sameutta ja sähköjohtavuutta, voidaan huomata ferrisulfaatin ja polyalumiinikloridin toimivan samankaltaisesti. Orgaanisen aineen poistamisen kannalta optimaalinen saostuskemikaaliannos on 4–5 ppm Al, aivan kuten saostuskokeessa. Suuremmalla annoksella (6 ppm Al), permeaatin laatu ei enää parane. UV-valoa absorboivia yhdisteitä erotetaan raakavedestä noin 20 prosenttiyksikköä tehokkaammin kuin TOC:tä, samalla tavalla kuin ferrisulfaatilla ja UV<sub>254</sub> on samalla tasolla kuin rautakemikaalilla. TOC on hieman korkeampi kuin ferrisulfaatilla. Jäännösalmiini nousee, mitä suurempaa kemikaaliannosta käytetään. Tämä kertoo myös siitä, että osa saostuskemikaalista jää liukoiseen muotoon eikä enää tehosta orgaanisen aineen poistoa.

Poistetun TOC:n määrää voidaan verrata annosteltuun saostuskemikaalin määrään. Pienemmillä annoksilla PACI on tehokkaampi kuin ferrisulfaatti. 2,0 ppm Al annoksella TOC:ta poistuu 1,7 g TOC / g Al kun ferrisulfaatilla vastaava oli n. 1,3 g TOC / g Fe. Tämä johtuu suurelta osin saostus-pH:sta, sillä ferrisulfaattisaostus ei tapahtunut optimaalisessa pH:ssa. Suuremmilla PACI-annoksilla tehokkuus laskee, 4,0 ppm Al poistaa 1,0 g TOC / g Al ja 5 ppm Al puolestaan poistaa 0,80 g TOC / g Al. 6 ppm Al annoksella PACI-saostus on hieman tehottomampi kuin ferrisulfaatti, 0,68 g TOC / g Al.

**Taulukko 10** Polyalumiinikloridi saostuskemikaalina toimii laajemmassa pH:ssa kuin muut käytetyt kemikaalit. Eri saostuskemikaaliannoksilla pH ei laske yhtä paljon kuin ferrisulfaatilla. Orgaanisesta aineesta UV-valoa absorboivat yhdisteet poistuvat tehokkaammin kuin TOC.

Analyysi	ZeeWeed 1000 2,0 ppm Al		Memcor 4,0 ppm Al		ZeeWeed 500 5,0 ppm Al		Aquarden SiC 6,0 ppm Al	
	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)
pH(-)	6,3	9	6,2	14	6,0	17	5,9	19
Alkaliteetti (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	7,8	50	7,0	56	5,2	67	5,0	69
Kovuus (°dH)	0,96	-	1,0	-	1,35	-	1,00	-

Sameus (FTU)	0,07	70	0,03	88	0,03	89	0,05	80
Sähkönjohtavuus (mS/m)	777	-11	803	-13	887	-14	838	-15
TOC (mg/l)	3,4	50	2,7	58	2,6	61	2,6	61
UV <sub>254</sub> (m <sup>-1</sup> )	5,7	72	4,7	77	3,9	80	3,8	81
R2A (pmy/ml)	20	-	-	-	20	-	10	-
Alumiini (µg/l)	-	-	-	-	112	-	380	-

### Alumiinisulfaatti

Alumiinisulfaatti käytettiin saostuskemikaalina ainoastaan keraamisen ultrasuodatuskalvon kanssa. Annostus oli hieman korkeampi kuin muilla saostuskemikaaleilla, 7,5 ppm Al. Raakavesi käsiteltiin ainoastaan suorasaostuksella. Taulukko 11 permeaatin laatutuloksista voidaan huomata, että saostus on tapahtunut hieman optimaalisen saostus-pH:n ulkopuolella. Permeaatin puskurikyky on laskenut yli 60 % raakavedestä. Permeaatin sameus on selkeästi korkeampi kuin muilla saostuskemikaaleilla, tämä johtuu todennäköisesti korkeasta jäännösalmiiniipitoisuudesta. Kemikaalin annostus on ollut liian suuri, sillä noin kolmannes alumiinista on jäänyt liukoiseen muotoon veteen. Orgaanisen aineen saostuksessa alumiinisulfaatti on heikompi kuin muut saostuskemikaalit, sillä se poisti vain 0,44 g TOC / g Al. Permeaatin TOC ja UV<sub>254</sub> jäivät korkeaksi.

**Taulukko 11** Permeaatin laatutulokset kokeessa, missä saostuskemikaalina käytettiin alumiinisulfaattia. Tuloksista nähdään, että alumiinisulfaatti ei ole orgaanisen aineen poistamisessa yhtä tehokas kuin muut kemikaalit.

Analyysi	Aquadren SiC, 7,5 ppm Al	
	Keskiarvo	Reduktio (%)
pH (-)	5,4	26
Alkaliteetti (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	4,2	73
Kovuus (°dH)	1,0	-
Sameus (FTU)	0,130	38
Sähkönjohtavuus (mS/m)	1037	-44
TOC (mg/l)	3,73	47
UV <sub>254</sub> (m <sup>-1</sup> )	6,6	67
R2A (pmy/ml)	15	-
Alumiini (µg/l)	2700	-

### Alumiiniklorohydraatti

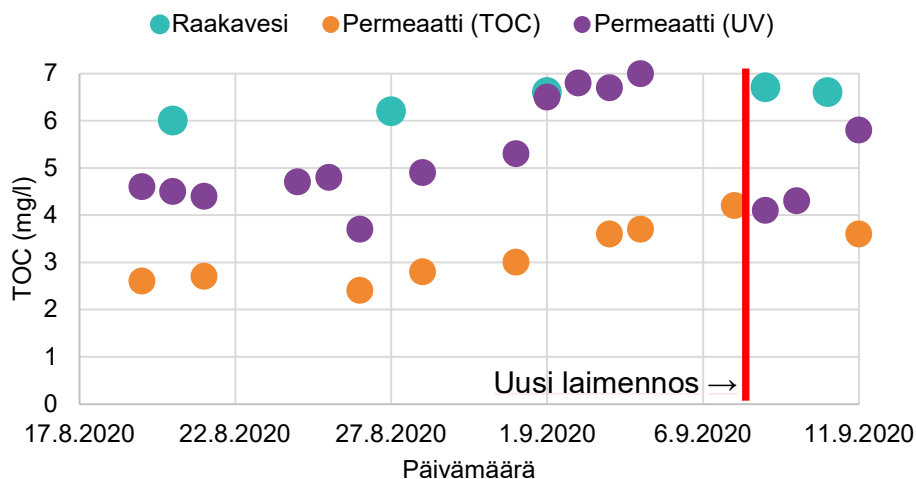
Alumiiniklorohydraatilla saostettua raakavettä syötettiin ainoastaan ZeeWeed 500 -kalvon pilotoinnissa. ACH:lla saostettaessa pH laski huomattavasti maltillisemmin kuin muilla kemikaaleilla, enimmillään permeaatin pH oli raakaveden verrattuna vain 9 % alhaisempi (Taulukko 12). Alkaliteetia ACH ei kuluta yhtä paljon kuin muita kemikaalit, 5 ppm Al annoksella permeaatin alkaliteetia oli vain 11 % vähemmän kuin raakavedellä. Kovuus, sameus, sähkönjohtavuus ja R2A ovat samankaltaisia kuin muillakin kemikaaleilla. Jäännösalmiiniipitoisuus on selkeästi alhaisempi kuin muilla alumiiniipitoisilla kemikaaleilla, eikä noussut korkealle edes 10 ppm Al annoksella, aivan kuten saostuskokeessa.

**Taulukko 12** Alumiiniklorohydraattisaostuksen tuloksista huomataan, että kemikaali alentaa vähemmän pH:ta ja alkaliteettiä, lisäksi jäännösalmiiniipitoisuus on erittäin alhainen. TOC:n poisto ei ole yhtä tehokasta kuin ferrisulfaattilla tai polyalumiinikloridilla.

Analyysi	ZeeWeed 500 5,0 ppm Al		ZeeWeed 500 7,0 ppm Al		ZeeWeed 500 10,0 ppm Al	
	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)	KA.	Reduktio (%)
pH(-)	6,9	0	7,0	2	6,2	9
Alkaliteetti (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	14,3	11	13,3	17	12,0	25
Kovuus (°dH)	1,0	-	1,0	-	1,0	-
Sameus (FTU)	0,03	90	0,03	89	0,03	88
Sähkönjohtavuus (mS/m)	793	-5	813	-6	813	-7
TOC (mg/l)	3,2	50	2,8	56	2,8	57
UV <sub>254</sub> (m <sup>-1</sup> )	5,5	72	4,4	77	3,9	80
R2A (pmy/ml)	15	-	10	-	15	-
Alumiini (µg/l)	10	-	-	-	14	-

Orgaanista ainetta ACH ei poista yhtä tehokkaasti kuin PACl tai ferrisulfaatti, mutta paremmin kuin alumiinisulfaatti. 5 ppm Al annoksella jäännös-TOC on 3,2, eli noin puolet raakaveden TOC:sta on poistunut. 5 ppm Al saostuksen kanssa ongelmana laitteiston kanssa oli kuitenkin se, että saostuskemikaalia jouduttiin laimentamaan kemikaalipumpun virtaamarajan takia. Laimennos (1:1) heikensi ACH:n laatu ja puhdistusteho heikkeni noin kahdessa viikossa (Kuva 12). Jos tarkastellaan ensimmäistä kahta viikkoa laimennetulla kemikaalilla, on permeaatin TOC vain 2,7 mg/l. Toisaalta UV<sub>254</sub> on pienempi (4,6 m<sup>-1</sup>) kuin saostuskokeessa (5,0 m<sup>-1</sup>). Kahden viikon jälkeen kemikaalin saostusteho heikkenee. 7.9.2020 vaihdettiin uusi laimennos, UV<sub>254</sub> palautui alkuperäiselle tasolle, mutta TOC jäi korkeammalle.

5 ppm Al annoksella ACH poistaa TOC:ta 0,68 g TOC / g Al. 8 ppm Al annoksella poistoteho putoaa hieman, 0,52 g TOC / g Al. Suurimmalla 10 ppm Al annoksella 0,39 g TOC / g Al poistuu vedestä. ACH:lla on siis heikompi teho kuin PACl:llä, mutta parempi kuin alumiinisulfaattilla.



**Kuva 12** Alumiiniklorohydraatin laimentaminen vaikutti kemikaalin tehoon noin kahdessa viikossa. Kemikaalia jouduttiin laimentamaan kemikaalipumpun minimivirtaaman takia.

### 3.1.3 Jälkikäsitellyn veden laatu

Jälkikäsitelyllä parannettiin permeaatin laatua ja pyrittiin tuottamaan vettä, joka kelpaisi jälkikemikaloinnin ja kloorauksen jälkeen verkostoon. Jälkikäsitely toteutettiin joko aktiivihilisuodatuksella ja kalkkikivisuodatuksella, tai pelkästään kalkkikivisuodatuksella. Aktiivihili oli pilotoinnin alussa reaktivoitua, käyttämätöntä hiiltä, niinpä käyttöönoton jälkeen suodatetun veden TOC pitoisuus oli alhainen, 1,0 mg TOC/l (kalvosuodatuksen permeaatin TOC 2,1 mg/l).

Adsorptiotaso saavutti vakiotason noin kuukausi käyttöönotosta, minkä jälkeen orgaanista hiiltä poistui keskimäärin 0,3 mg/l. Adsorptiokapasiteetti käytettiin loppuun suunnilleen vuodessa, tänä aikana käsitellyn veden määrä oli noin 19 Mm<sup>3</sup>. Aktiivihilisuodatuksen toimintaan ei vaikuttanut saostuksessa käytetty kemikaali, poistetun TOC:n määrä oli aina välillä 0,2–0,4 mg/l. Poikkeuksena tähän oli alumiinisulfaattisaostus, jossa permeaatin TOC pitoisuus jäi selkeästi korkeammaksi. Permeaatin TOC oli 3,7 mg/l, mutta suodatetun veden TOC oli 2,8 mg/l.

Kalkkikivisuodatus paransi veden kemiallisia ominaisuuksia (pH, alkaliteetti, sähkönjohtavuus, kovuus), mutta ei vaikuttanut TOC:n tai UV-absorptioon. Sameus oli yleisesti korkeampi kuin permeaatilla, mikä oli odotettavissa. Erityisesti sameuspiikit näkyivät suodattimen huuhteluiden jälkeen (silmämääräinen havainto). Käytetyllä saostuskemikaalilla ei ollut merkitystä veden laadun muutoksiin.

Suodattimen patjan paksuudella, eli kontaktiajalla, oli odotetusti merkitystä. Taulukko 13 on esitetty vertailujälkikäsiteltyjen vesien laadulle. Tuloksissa ei ole esitetty orgaanisen aineen tuloksia, sillä aktiivihilien adsorptiokapasiteetti oli käytetty paksumman patjan kokeiden aikana. Kalkkikiven lisääminen näkyy erityisesti alkaliteetin ja kovuuden muutoksena. Ohuemmalla patjalla alkaliteetti 2,5-kertaistuu suodatuksena aikana, kun paksummalla patjalla muutos on lähes viisinkertainen. Kovuus ja pH ovat paksummalla patjalla verkostoveden tasolla, alkaliteettia ja sähkönjohtavuutta pitäisi vielä parantaa.

**Taulukko 13** Veden laatutulosten vertailu eri kalkkikivimäärillä. Metrin paksuisella patjalla veden laatu ei saavuta vielä asetettuja tavoitteita, mutta pidemmällä kontaktiajalla saadaan lähes talousveden laatuista vettä.

	Alkaliteetti	Kovuus	pH	Sähkönjohtavuus
	(mg/l CaCO <sub>3</sub> )	(°dH)	(-)	(mS/m)
Permeaatti	5,82	0,96	6,1	819
Jälkikäsitely (1 m)	14,9	1,5	6,9	992
Muutos (%)	256	158	113	121
Permeaatti	5,21	1,4	6,0	887
Jälkikäsitely (1,6 m)	24,8	3,0	8,4	1252
Muutos (%)	475	225	141	141
Talousvesi	36,9	3,0	8,4	1539

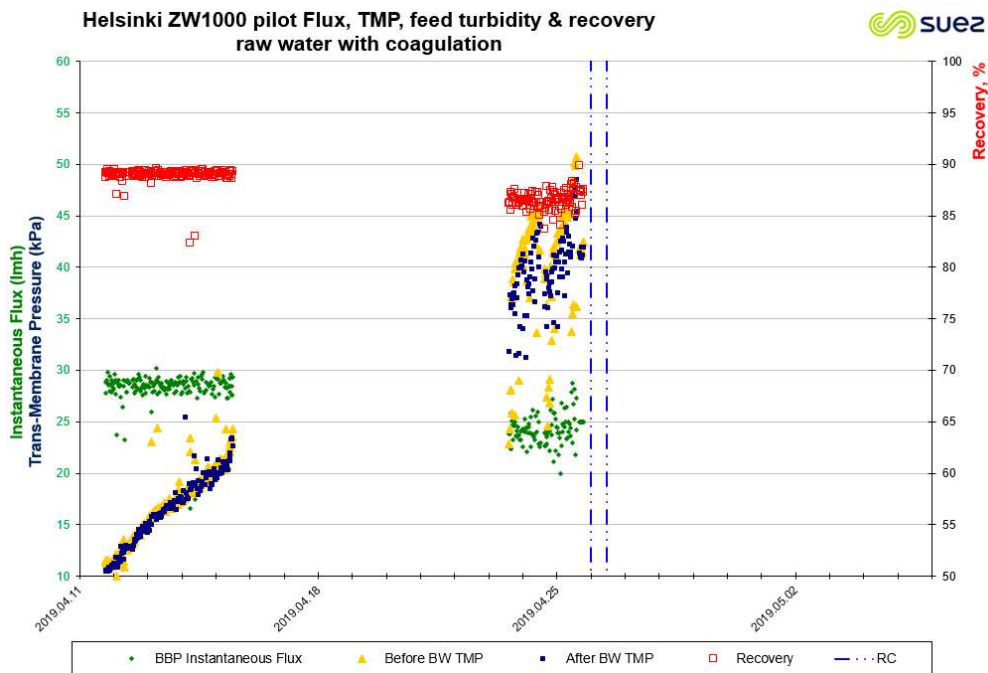
## 3.2 Membraanien suorituskyky

### 3.2.1 Suez ZeeWeed 1000

Suez ZeeWeed 1000 pilot-jakso laoitettiin huhtikuussa 2019. Jakson alussa (Kuva 13) käsiteltiin raakavettä ilman saostuskemikaalia. Pian aloittamisen jälkeen pilot-laitteistosta hajosi puhaltimen taajuusmuuttaja, mikä aiheutti kymmenen päivän mittaisen keskeytyksen uuden saapuessa Englannista. Tämän jälkeen aloitettiin saostusjakso ferrisulfaatilla. Ferrisulfaattisaostuksessa laitteiston sallima enimmäispitoisuus oli 3 ppm Al, millä suodatus aloitettiin. Kuten Kuva 13 nähdään, lähti paine-ero (TMP, *transmembrane pressure*) nousemaan välittömästi lähesty laitteiston enimmäispainetta (50 kPa). Saantoa ei pystytty pitämään tavoitellussa 89 %,.. Ensimmäisen päivän jälkeen tehty päivittäinen CEB ei kyennyt palauttamaan alkuperäistä suorituskykyä.

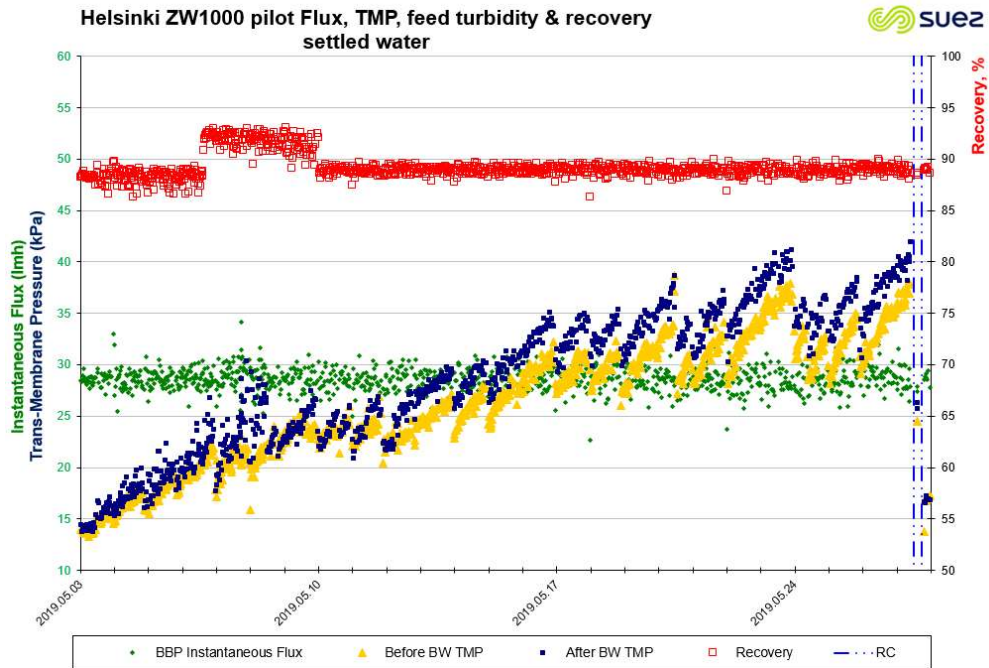
Koska ferrisulfaatti saostuskemikaalina ei soveltunut suorasaostettuna suodatuskalvolle, siirryttiin käyttämään selkeytettyä vettä. Selkeytetty vesi otettiin Pitkäkosken PK2-suodatushallin viimeisestä paluukourusta, mitä pitkin selkeytetty vesi johdetaan selkeytyksestä hiekkasuodatukseen. Selkeytetyllä vedellä pilot-laitteisto toimi moitteettomasti ja saavutti helposti 90 % saannon. Pilot-laitteisto pyöri lähes kuukauden ilman CIP-pesua (Kuva 14) saavuttaen tavoitteeksi asetetun vuon. Päivittäin tehtiin CEB-pesu joko hypokloriitilla tai suola-sitruunahapon sekoituksella. Happopesu oli huomattavasti tehokkaampi.

Polyalumiinikloridilla saostettaessa käytettiin 1 ppm Al, 2 ppm Al ja 3 ppm Al annosta (Kuva 15). Kaikilla annoksilla suodatuskalvon toimintakyky laski nopeasti, eikä päivittäinen CEB riittänyt pitämään suorituskykyä tasaisena. Tasaiseen toimintaan tarvittiin noin joka kolmas päivä ylimääräinen, hieman pidempi CEB.



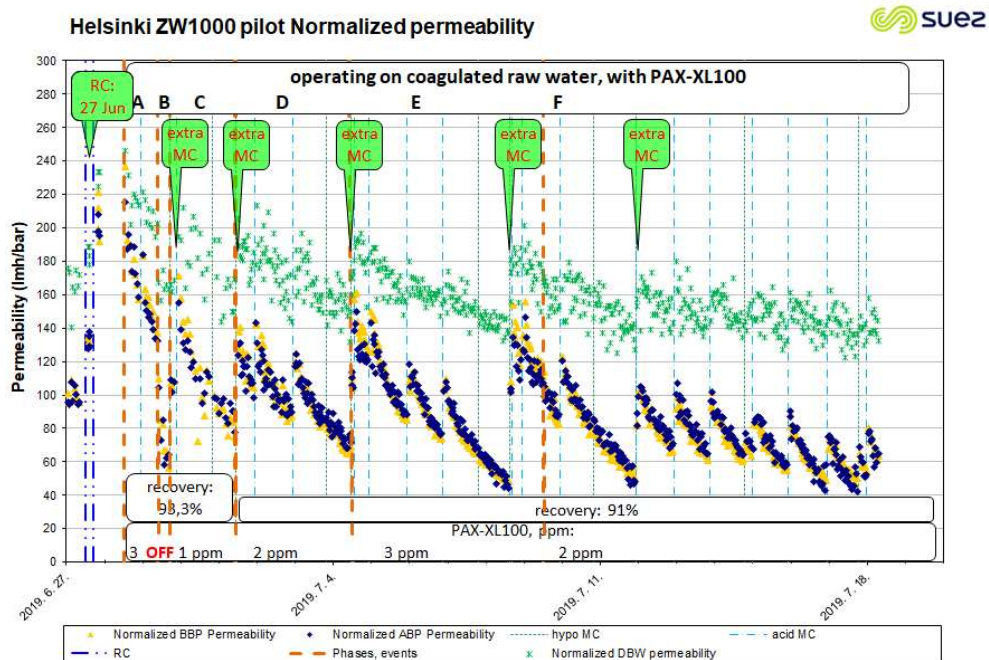
Kuva 13

Suez ZeeWeed 1000 -suodatuskalvon koejakson alkuvaihe. Aluksi laitteistoa pyritettiin raakavedellä ilman saostuskemikaalia. Laitteisto-osan hajoamisen aiheuttaman tauon jälkeen koetta jatkettiin ferrisulfaattisaostuksella.



Kuva 14

Suez ZeeWeed 1000 suodatuskalvo toimi selkeytetyllä vedellä tasaisesti noin kuukauden ajan. CIP-pesua ei tarvittu ollenkaan. Koejakson loppupuolella on havaittavissa TMP:n nousun tasoittuminen, eli suodatuskalvo on saavuttanut tasaisen suoritusvaiheen.



Kuva 15

Polyalumiinikloridilla käsitelty raakavesi aiheutti tukkeutumista kalvoihin, joita päivittäinen CEB-pesu ei pystynyt poistamaan.

Suodatusjakso päättyi heinäkuussa 2019. Koejakson lopussa ajettu lyhyt aika käsittelemättömällä raakavedellä osoitti, että osa suorituskyvystä oli menetetty kokeen aikana, eikä palautunut kemiallisen pesun avulla. Moduuleja poistettaessa onttokuitujen välissä oli havaittavissa selkeästi ferrisulfaattisaostumia (Kuva 16), jotka eivät poistuneet edes tehokkaissa pesuissa. Saostumaa oli niin paljon, että se on varmasti

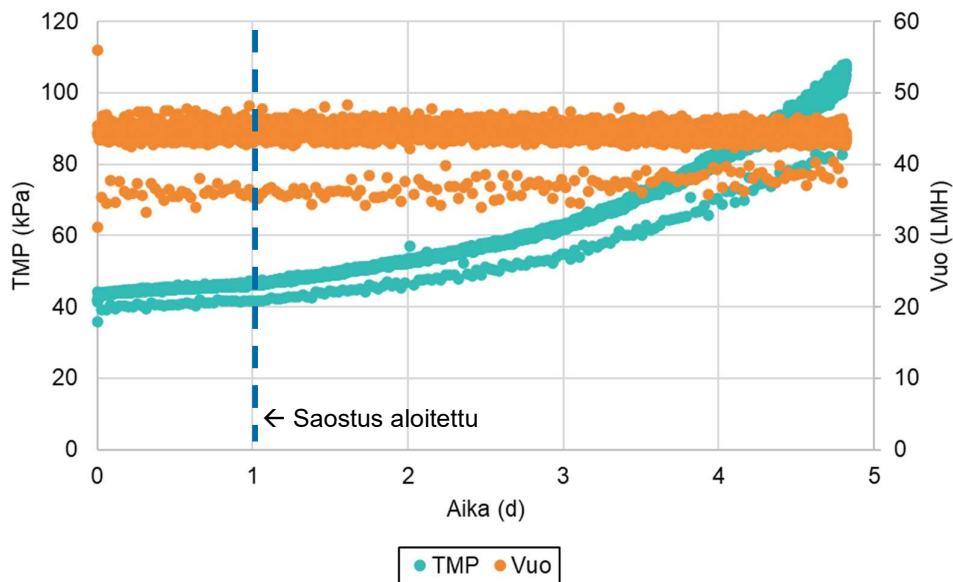
vaikuttanut suodatuskalvon toimintakykyyn ja selittää yksinään suorituskyvyn heikkenemisen kolmen kuukauden aikana.



**Kuva 16** Moduuleja poistettaessa tarkastettiin myös ontokuitujen kunto. Hieman päällimmäisiä kuituja siirtämällä havaittiin kuitunipun keskellä ferrisaostumia, jotka eivät poistuneet kemiallisilla pesuilla.

### 3.2.2 DuPont Memcor

DuPont Memcor -suodatuskalvolla koejakso aloitettiin suodattamalla käsittelemätöntä raakavettä viiden päivän ajan. Tämän jälkeen aloitettiin raakavesi ferrisulfaattisaostuksella, kemikaaliannos alussa oli 6 ppm Fe (Kuva 17).



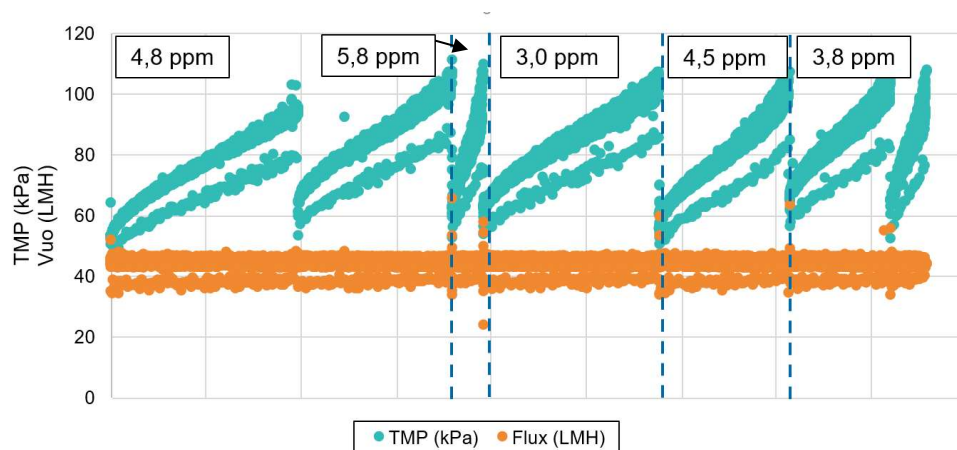
**Kuva 17** DuPont Memcor suodatuskalvo ylitti turvallisen 80 kPa paine-eron kolmessa päivässä, kun saostuskemikaalina käytettiin ferrisulfaattia (6 ppm).

Ferrisulfaattisaostuksen aloittamisen jälkeen suodatuskalvon toimintakyky heikkeni kolmessa päivässä niin paljon, että suodatuskalvon paine-eroraja 80 kPa saavutettiin. Vuo oli tasaisesti valmistajan suosittelema 42–43 LMH, mikä oli hieman korkeampi kuin ZeeWeed 1000:lla. Suodatuskalvolle tehtiin CIP-huuhtelu, mutta MTP

ei palautunut ennalleen. Suodatuksen käynnistämistä meni alle vuorokausi, kun TMP:n enimmäisraja saavutettiin. Saostuskemikaaliannosta pienennettiin 1,5 ppm Fe. Tämä auttoi, sillä suodatus pystyi jatkamaan viikon ajan ennen kuin TMP:n raja tuli vastaan.

Ferrisulfaattisaostuksen jälkeen siirryttiin käyttämään polyalumiinikloridisaostusta. Kuten Kuva 18 voidaan todeta, oli TMP heti suodatuksen alussa yli 50 kPa, kun koejakson alussa, ennen ferrisaostusta, se oli noin 40 kPa. Niinpä PACI-saostusta ei päästy tekemään samoista lähtökohdista kuin rautakemikaalilla. PACI:lla TMP:n yläraja saavutettiin noin viikossa, hieman riippuen kemikaaliannoksesta. Suurimmalla, 5,8 ppm Al, annoksella raja saavutettiin jo vuorokaudessa. Suorituskyvyn kuvaajasta voidaan myös huomata, että kemiallisen pesun jälkeen toimintakyky palautuu siihen, mitä se oli PACI-saostuksen käynnistyessä. Tämä viittaisi siihen, että saostuskemikaali ei enää heikennä suodatuskalvon toimintakykyä, toisin kuin ferrisulfaatti.

Koeajojen päätteeksi suodatuskalvot poistettiin käytöstä ja tarkastettiin silmämääräisesti. Suojaputken takia onttokuituja ei päästy tarkastelemaan kuin pintapuolisesti. Suodatuskemikaalit olivat värjänneet pinnalta onttokuidut rusehtaviksi. Tarkempaa analyysia varten kalvot lähetettiin LUT-yliopistoon Lappeenrantaan. Tarkemmin näistä tuloksista voi lukea Kalle Kakon diplomityöstä<sup>9</sup>.



**Kuva 18** PACI-saostuksella suodatuskalvo toimi paremmin, mutta silti TMP:n raja tuli vastaa noin viikossa.

### 3.2.3 Aquarden Cembrane SiC

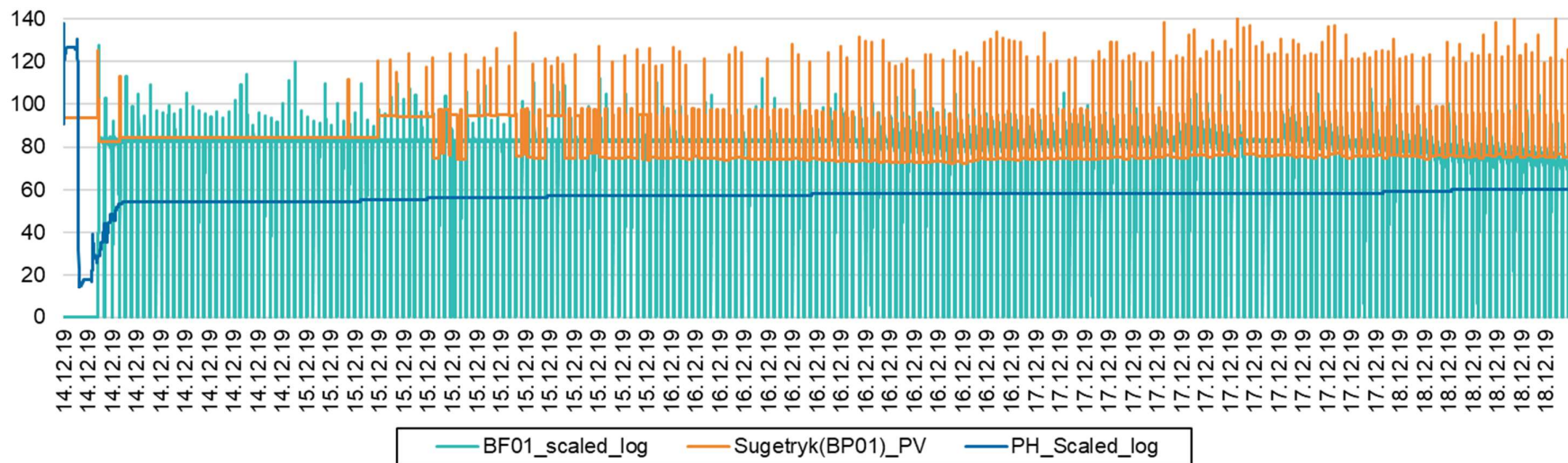
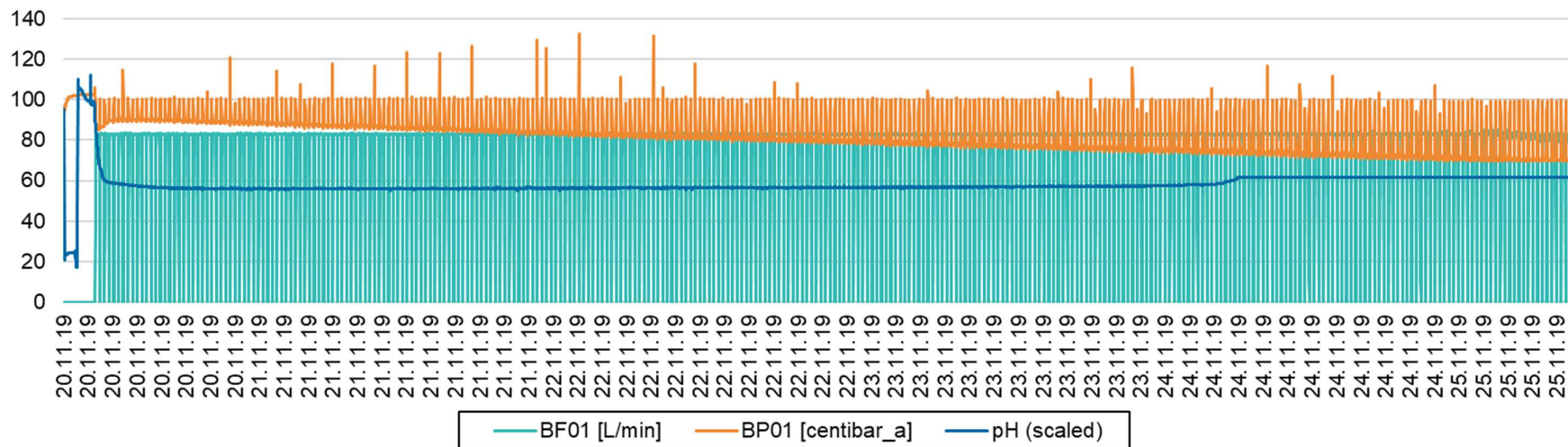
Aquardenin keraamisella suodatuskalvolla aloitettiin viikon jaksolla ilman saostuskemikaalia. Muista suodatuskalvoista poiketen pelkällä raakavedellä ilman saostusta suodatuskalvo tukkiutui melko nopeasti, noin kolmessa päivässä. Syytä tähän ei löytynyt. Seuraavassa vaiheessa siirryttiin PACI-saostukseen. Kuva 19 on esitetty kahden koeajon imupaineen lasku (eli TMP:n kasvu), virtaama ja pH. Ensimmäisessä osassa saostuskemikaalia on annosteltu 4,5 ppm Al. Koko viikon ajan virtaama pysyy tasaisena, TMP kasvaa noin 20 kPa. Suorituskyvyn perusteella voidaan olettaa, että suodatusta voisi jatkaa noin kaksi viikkoa ennen kemiallista pesua. Jälkimmäisessä Kuva 19 kuvaajassa saostuskemikaaliannos on 6,0 ppm Al. Virtaama laskee hieman koejakson loppupuolella. Huomionarviosta on se, että koelaitteistossa ei ole CEB-pesun mahdollisuutta. CEB-pesulla suorituskykyä voisi kontrolloida paremmin ja CIP-pesun väliä pidentää entisestään.

Kuva 20 on esitetty alumiinisulfaattisaostusjakson virtaama, imupaine ja pH. Alumiinisulfaatin annostus oli 7,5 ppm Al. Alumiinisulfaatin kanssa suodatus toimii erinomaisesti. Kahden viikon mittaisella koejaksolla

<sup>9</sup> Kakko, 2020. *Membrane fouling in hollow fiber membrane filtration of surface water*. LUT-yliopisto, s. 110.

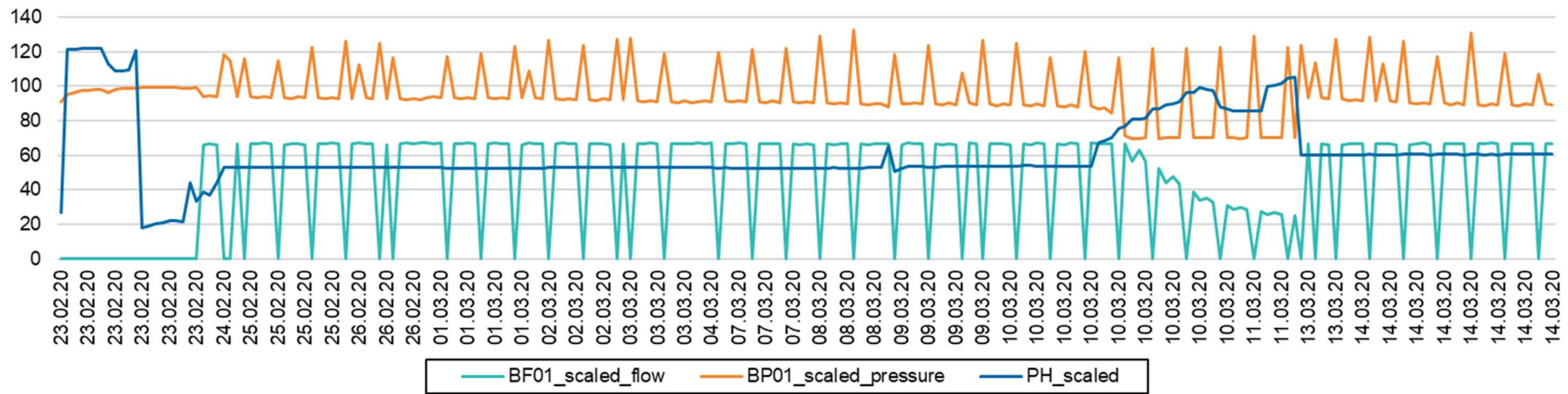
suorituskyky pysyy tasaisena lukuun ottamatta yhtä päivää, jolloin saostuskemikaali loppui. Saostusta jatkettaessa suorituskyky palautui ilman kemiallista pesua ennalleen.

Keraamisen suodatuskalvon kanssa kokeiltiin myös ferrisulfaattisaostusta, mutta tulokset eivät olleet merkittävästi paremmat kuin kahdella edellä mainitulla kalvolla. Suorituskyky lähti laskuun pian saostuksen aloituksen jälkeen eikä palautunut ennen kemiallista pesua. Koejakson jälkeen suodatuskalvoja tarkasteltiin visuaalisesti, mutta hyvin vähän suodatuspintaa oli nähtävissä. Ferrisaostumia ei havaittu, mutta suodatuskalvon väri oli muuttunut vaaleasta vaalean ruskeaksi.



**Kuva 19**

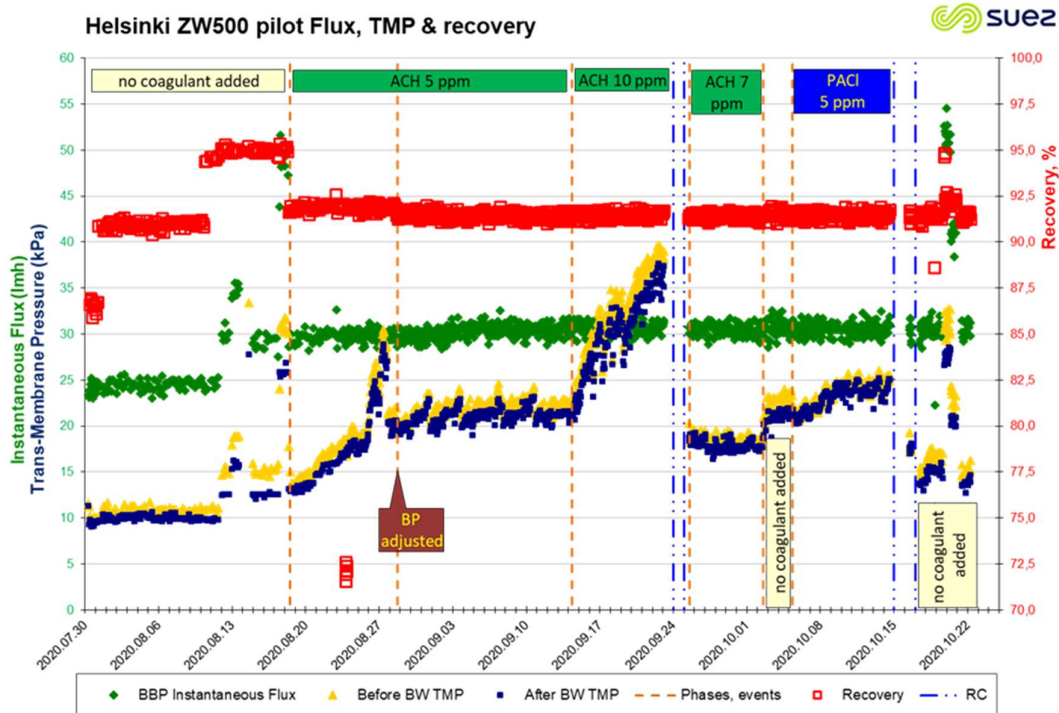
Aquardenin keraaminen suodatuskalvo toimi hyvin PACI-saostuksella. Ylempässä kuvassa on viiden päivän koejakson virtaama ja imupaine, kun saostuskemikaaliannos oli 4,5 ppm Al. Alemmassa kuvassa annostus on nostettu 6 ppm Al. Tässä kuvaajassa nähdään virtaaman laskevan hieman viimeisen päivän aikana. Kuvassa turkoosilla viivalla on esitetty virtaama (l/min), oranssilla paine (kPa) ja sinisellä pH.



**Kuva 20** Alumiinisulfaattilla suodatuskalvo toimi hyvin. Pienemmällä virtaamalla (4 m<sup>3</sup>/h) noin kahden viikon suodatusjaksolla virtaama putosi ainoastaan yhtenä päivänä, kun saostuskemikaali loppui. Ilman saostuskemikaalia operoitaessa orgaaninen aines tukki keraamisen kalvon nopeasti. Kuvassa turkoosilla viivalla on esitetty virtaama (l/min), oranssilla paine (kPa) ja sinisellä pH.

### 3.2.4 Suez ZeeWeed 500

Seuz ZeeWeed 500 -suodatuskalvolla koejakso aloitettiin kahden viikon mittaisella suodatuksella ilman saostuskemikaalia (Kuva 21). Suodatuskalvoa testattiin useilla eri asetuksilla, jotta tukkeutumista pystyttiin selvittämään koejakson lopussa. Seuraavassa vaiheessa raakaveteen lisättiin ACH-kemikaalia 5 ppm Al. Ensimmäisen viikon aikana TMP nousi merkittävästi. Syy tähän löytyi vastavirtahuhteluiden suoritusarvoista, sillä pesuissa vastavirtahuhtelun kesto oli määritelty liian lyhyeksi. Säättämällä pesua saatiin toimintakyky tasaiseksi. Lopusta ACH:lla 5 ppm Al annoksella suodatuskalvon toiminta oli hyvin tasaista.



**Kuva 21** Suez ZeeWeed 500 -pilotin koko koejakson suorituskäyrä. Ensimmäisessä vaiheessa kemiallista saostusta ei käytetty. Siirryttäessä ACH-saostukseen lähti TMP nousuun. Parametreja säättämällä (merkitty kuvaan BP adjusted) saatiin suorituskyky tasaiseksi. Suuremmalla kemikaaliannoksella (10 ppm Al) TMP kasvoi hallitsemattomasti eikä CEB auttanut. 7 ppm Al annoksella toiminta oli jälleen tasaisempaa. PACl-saostuksella TMP oli korkeampi kuin ACH:lla, mutta toiminta pysyi tasaisena.

Orgaanisen aineen poistumista pyrittiin tehostamaan lisäämällä saostuskemikaaliannosta. 10 ppm Al annoksella permeaatin laatu paranikin, mutta samalla suodatuskalvon suorituskyky heikkeni enemmän kuin pienemmällä annoksella. Kuuden päivän suodatuksen jälkeen TMP oli lähellä raja-arvoa, eikä vastavirtahuhtelu sekä päivittäinen CEB riittänyt palauttamaan toimintakykyä. Tehokkailla CIP:llä saatiin suodatuskalvo pestyä, minkä jälkeen saostuskemikaaliannosta laskettiin 7 ppm Al. Tällä annoksella suorituskyky oli tasainen.

Viimeisessä vaiheessa saostuskemikaali vaihdettiin PACl:iin. PACl:lla TMP lisääntyi heti suodatuksen alussa, mutta tasaantui ja pysyi sallituissa rajoissa. Koejakson aikana saatiin pidettyä tasaisesti 30 LMH vuo ja saanto yli 91 %. PACl-jakson loppuksi suoritettiin vielä tehokkaammat kemialliset pesut, minkä jälkeen käsittelemättömällä raakavedellä ajettiin lyhennettynä samat ajot kuin koejakson alussa.

Pilotoinnin jälkeen suodatuskalvot jälleen kuvattiin. Pinnoilla oli huomattavissa likaantumista (Kuva 22), erityisesti ontokuitujen yläpäässä. Alapäässä, missä ilmavirta tehokkaimmin liikuttaa kuituja, oli huuhtelu poistanut kemikaalijäämät tehokkaammin. Kuitujen väleissä ei keskivaiheilla ollut havaittavissa likaantumista.



**Kuva 22** ZeeWeed 500 -suodatuskalvon ontokuidut pysyivät kohtalaisen puhtaina suodatusjakson ajan. Kuitunippujen yläpäässä oli havaittavissa pientä kerrostumaa, mutta erityisesti keskivaiheilla kuitu oli täysin puhdas.

### 3.3 Vesitase

Kalvosuodatuspilotoinnissa suorituskyvyn ja permeaatin laadun lisäksi on tärkeää tarkastella vesitasetta. Taulukko 14 on esitetty laskentaa vesitasetta varten, kun saostuskemikaalina on käytetty PACI:a annostuksella 5 ppm Al. Pilot-laitteistoista Aquarden toimi 5 m<sup>3</sup>/h virtaamalla, muut 4 m<sup>3</sup>/h. Tuotetun veden määrää laskettaessa vähennetään permeaatin virtaamasta käytetyt pesuvedet sekä pesuihin kuluvana aikana tuottamatta jäänyt vesi. Saantoprosenttia laskiessa on tuotetun permeaatin määrästä vähennetty pesuihin käytetty permeaatin määrä.

**Taulukko 14** Vesitaseen laskelmat esitettynä jokaiselle pilotoidulle laitteistolle (saostuskem. PACI 5 ppm).

	Aquarden SiC	Memcor	ZeeWeed 500	ZeeWeed 1000
Pesutiheys (min)	20	20	20	20
Pesuveden kulutus (l/krt)	20	120	110	100
Seisokki (huuhtelu) (min/krt)	1	1,5	1,5	1,5
CEB tiheys (h)	-	24*	24	24
CEB pesuveden kulutus (l/krt)	-	120*	110	100
CEB seisokki (min/krt)	-	1,5*	1,5	1,5
CIP tiheys (h)	168	720	720	720
CIP pesuveden kulutus (l/krt)	84	300	240	200
CIP seisokki (min/krt)	60	45/30**	45	45
Bruttotuotto (m <sup>3</sup> /h)	5,00	4,00	4,00	4,00
Nettotuotto (m <sup>3</sup> /h)	4,66	3,25	3,28	3,31
Saanto-%	98,8	90,9	91,6	92,4

\*CEB mahdollinen laitosmittakaavassa, oletettu ZeeWeed 500 pesusykli. \*\* Happopesu 45 min, hypokloriittipesu 30 min

Aquardenin keraaminen suodatuskalvo saavutti kokeiluista vaihtoehdoista selkeästi korkeimman saantoprosentin. Merkittävin ero tuli pienestä permeaatin kulutuksesta huuhteluissa. Keraamisella kalvolla huuhtelu tapahtui erittäin nopeasti korkeammalla paineella. Ennen huuhtelua suodatusaltaasta poistettiin muutama prosentti vettä, minkä jälkeen huuhteluvesi työnnettiin permeaattipuolelta kalvon läpi. Lyhyen rauhoitusjakson suodatus jatkui normaalisti. Muilla kalvovaihtoehdoilla huuhtelu käynnistyi ilmastuksella, johon liitettiin huuhtelun loppuvaiheessa permeaatin pumppaus vastavirtaan kalvon läpi. Huuhtelun jälkeen koko suodatusallas tyhjennettiin ja täytettiin uudestaan raakavedellä. Tämän jälkeen suodatus jatkui. Tämä tyhjennyksissä hukattu vesi on laskettu taulukossa pesuveden kulutukseen mukaan. Keraamisella kalvolla huuhteluprosessi oli myös lyhyempi koska suodatusallasta ei tyhjennetty ja täytetty välissä.

Permeaatilla tehtyjen vastavirtahuuhteluiden väli oli vakio kaikilla toimittajilla ja riippuu enemmän käytettävästä kemikaalista kuin kalvomateriaalista. Taulukko 14 on esitetty vastavirtahuuhtelut ja kemialliset huuhtelut käytettäessä polyalumiinikloridia saostuskemikaalina. Ferrisulfaattikokeissa ei onnistuttu löytämään pesusykliä, jonka avulla suorituskyky olisi pysynyt vakiona. Saantoprosenttikin laski alle 90 % sillä automaatio huuhteli suodatuskalvoja useasti. Kemiallisilla pesuilla (CEB tai CIP) ei saavutettu tavoiteltua vaikutusta, vaikka niitäkin tehtiin tihennetyllä välillä. Alumiiniklorohydraatilla annoksilla 5 ppm Al ja 7 ppm Al huuhteluväli pysyi samana kuin PACI:lla, eikä automaatio lähtenyt muuttamaan huuhteluväliä merkittävästi. CEB-huuhteluiden väli kuitenkin kasvoi noin kahteen päivään, puolittaen kemiallisen huuhteluveden määrän.

CEB-huuhtelussa kemiallinen pesuvesi on joko happo- tai klooripitoista. CEB:sta toteutetaan vain toinen ja jäteveettä syntyy noin 100 litraa kerralla. Suuremman luokan laitoksella, kemikaalipitoisen jäteveden määrä on suuri. Esimerkiksi 100 m<sup>3</sup>/h tuottava ZeeWeed 500-laitos tuottaa yhdessä huuhtelussa 2,75 m<sup>3</sup> jäteveettä, jonka pH on happopesussa 2 ja hypokloriittipesussa 10 (klooripitoisuutta ei mitattu). Kun tarkastellaan tuotetun CEB-veden määrää tuotantomäärään, saadaan seuraavat lukemat: Memcor: 0,179 l/tuotettu m<sup>3</sup>, ZeeWeed 500: 0,164 l/tuotettu m<sup>3</sup>, ZeeWeed 1000: 0,149 l/tuotettu m<sup>3</sup>.

CIP-pesussa pesuvettä syntyy vielä enemmän. Jäteveden pH-arvot pysyvät samoin kuin CEB:ssä. Taulukko 15 on listattu CIP-pesussa syntyvän jäteveden määrä. Aquardenin keraamisilla suodatuskalvoilla kemiallinen pesu tapahtuu sprinklereillä, jotka suihkuttavat vettä kalvon pinnalle. Muilla vaihtoehdoilla koko kalvopaketti upotetaan kemikaalia sisältävään veteen, mikä tarkoittaa suurempaa jätevesimäärää. Vaikka Aquardenin pilotilla syntyvät CIP-jätevesimäärät ovat pienempiä kuin muilla vaihtoehdoilla, tapahtuu pesuja useammin (yksi pesu viikossa, muilla yksi pesu kuukaudessa). Tämä lisää väkevempien pesuliuosten määrää, sillä esimerkiksi Suezin ehdottamassa pesuohjelmassa CIP-pesussa hypokloriittipitoisuus on kymmenkertainen verrattuna CEB:un.

Pesuvesien laadusta ei otettu näytteitä. Huuhteluveden laatua arvioimalla olisi mahdollista arvioida kalvoille jäävän saostuskemikaalikakun pitoisuutta ja toisaalta orgaanisen aineen määrää. Kemiallisissa pesuissa pyrittiin siihen, että pH oli koko pesun ajan riittävä (pH <2 tai >10). Näistäkään jätevesistä ei otettu näytteitä.

**Taulukko 15** Erilaisten jätevesien määrä suodatuskalvovaihtoehdoilla. Mitoitettu 100 m<sup>3</sup>/h laitokselle.

	Aquarden SiC	Memcor	ZeeWeed 500	ZeeWeed 1000
Huuhteluvesi (m <sup>3</sup> /krt)	0,5	3	2,5	2,75
CEB (m <sup>3</sup> /krt)	-	3	2,5	2,75
CIP (m <sup>3</sup> /krt)	2,1	7,5	5	6

## 3.4 Kustannusarviot eri vaihtoehdoille

### 3.4.1 CAPEX

Kaikilta valmistajilta kysyttiin kustannusarviota suodatuslaitteistolle, joka mahtuisi Pitkäkosken vedenpuhdistuslaitoksella yhteen hiekkasuodatuspariin. Hiekkasuodatinpari sisältää kaksi allasta, yhden altaan koko 6,4 m x 4,5 m, syvyys on 3,3 metriä (veden pinta 0,3 metriä alempana, pohjan kaltevuutta ei ole otettu huomioon). Arvioitu kapasiteetti oli kaikilla kalvovaihtoehdoilla lähes samansuuruinen, noin 500 m<sup>3</sup>/h. Valmistajien arviot erosivat toisistaan paljon. DuPontin tarjouksessa oli vain kalvosuodatusmoduulit ja niiden vaatimat tukirakenteet. Näiden lisäksi tarvitaan vielä pesuvesisäiliö (tähän voidaan mahdollisesti käyttää Pitkäkosken pesuvesitornia), pesukemikaalien säiliöt, putkisto, imupumppu ja pesuvesipumppu sekä mahdolliset paineilmajärjestelyt.

DuPont Memcor suodatuskalvojen listahinta on 730 € per moduuli, mistä saadaan laskettua nettotuotolla noin 365 000 € kustannus moduuleille (500 moduulia). Valmistajan mukaan moduulien ympärille tarvittavat tukirakenteet maksaisivat noin 84 000 €. Uпотettavat ultrasuodatuskalvot rasittuvat pienemmän paineen takia vähemmän kuin paineelliset kalvot, joten kalvomoduulin voidaan olettaa kestävän 7–10 vuotta ennen uusimista. Memcor-kalvon paineilman virtausvaatimus on yhdelle moduulille 12 Nm<sup>3</sup>/h. Näin monelle moduulille tarvittaisiin yhden minuutin mittaisen pesuun 100 Nm<sup>3</sup> paineilmaa. CIP:ssä tarvitaan jo huomattavasti enemmän. Paineilma-asiantuntijan arvion mukaan tarvittaisiin 40 m<sup>3</sup> paineilmaa 8 barin paineessa.

Suezilta yksilöityjä kustannuksia ei saatu. He ovat tarjonneet ZeeWeed 1000 -suodatuskalvoihin perustuvaa ratkaisua Norrvattenin laitokselle. Tuon laitteiston kapasiteetti oli 650 m<sup>3</sup>/h ja kustannusarvio 1,8 M€. Norrvattenin kohde on kuitenkin haastava, eikä kustannus ole suoraan verrattavissa kapasiteettiin. Edustajan hiha-arvion mukaan hinta voisi olla noin 1,2 M€. Suodatuskalvojen käyttöaika on suunnilleen sama kuin Memcorilla, eli noin 7–10 vuotta.

Aquardenin keraamisten kalvojen pakettihinta sisältää suodattimen rakennus- ja muutostöitä lukuun ottamatta kaiken. Valmistaja ei halua toimittaa pelkästään suodatuskalvoja, vaan he rakentavat myös logiikan ja pesuohjelmat. Pakettihinta olisi valmistajan arvion mukaan noin 1,2 M€. Keraamisten kalvojen oletetaan kestävän huomattavasti pidempään kuin polymeerikalvot, vähintään 20 vuotta.

## 4 Johtopäätökset

Pilot-kokeita suoritettiin neljällä eri suodatuskalvolla ja saostuskemikaalilla. Suodatuskalvot eivät vaikuta juurikaan tuotetun veden laatuun. Ilman saostuskemikaalia suodatuskalvot eivät poista vedestä muuta kuin sameutta. Saostuskemikaalivalinta puolestaan vaikuttaa merkittävästi niin tuotetun veden laatuun kuin suodatuskalvon toimintaan. Ferrisulfaatilla saostettaessa saadaan orgaanisen aineen poistossa parhaat tulokset, mutta toisaalta suodatuskalvot tukkeutuvat nopeasti ja palautumattomasti. Alumiinisulfaatilla suodatuskalvo toimintakyky pysyy hyvänä pitkään, mutta orgaanisen aineen poisto on heikkoa.

Polyalumiinikloridi ja alumiiniklorohydraatti toimivat suodatuskalvojen kanssa hyvin. Oikealla kemikaaliannoksella suorituskyky pysyy hyvänä ja tuotetun veden laatu on hyvä. Kolmen kuukauden pilot-jakson jälkeen saostuskemikaalista jäi kuitenkin aina pieni määrä kalvojen pinnalle, mikä vaatisi tehokkaamman puhdistuksen. Alumiiniklorohydraatti ei vaikuttanut tuotetun veden alkaliteettiin ja pH-arvoon samalla tavalla kuin muut kemikaalit, lisäksi jäännösalumiinipitoisuus oli alhainen. Saostuskemikaaleista suodatuskalvojen kanssa alumiiniklorohydraatti olisi paras, mutta samalla myös kallein. Myös polyalumiinikloridi on hyvä vaihtoehto saostuskemikaaliksi.

Polymeeripohjaiset suodatuskalvot toimivat samankaltaisesti. Niillä tuotetusta vedestä noin 10 % kuluu kalvomoduulien huuhteluihin. Keraamisella tasokalvolla vain 1–2 % tuotetusta vedestä käytetään huuhteluihin. Keraamisten kalvojen käyttöikä on vähintään kaksinkertainen polymeerikalvoihin verrattuna, mutta ne ovat myös kalliimpia. Pitkälukon hiekkasuodattimen muuttaminen kalvosuodattimeksi maksaisi karkean arvion mukaan polymeerikalvoilla noin 1,2 M€ ja keraamisilla kalvoilla 1,8 M€. Korkeampaa hankintahintaa keraamisilla kalvoilla kompensoi pidempi käyttöikä. Mikäli polymeerikalvot joudutaan uusimaan kahdesti yksien keraamisten kalvojen aikana, olisivat polymeerivaihtoehdon kustannukset mahdollisesti korkeammat.

Kalvosuodatus on energiantensiivinen prosessi. Aquardenin keraamisen suodatuskalvon energiankulutus on n. 0,072 kWh/m<sup>3</sup>, mikä tarkoittaisi hiekkasuodattimen kokoisella, n. 500 m<sup>3</sup>/h tuottavalla laitoksella 36 kWh kulutusta yhdessä tunnissa. Nykyisellä sähkön hinnalla se tarkoittaisi 2,5 € tunnissa kustannusta energiankäytöstä.