



KEMIALLISEN SAOSTUKSEN HUOLTOVARMUUDEN PARANTAMINEN SUOMEN VESIHUOLLOSSA

Kansallinen selvitys lyhyen ja pitkän aikavälin vaihtoehdoista

HUOLTOVARMUUSORGANISAATIO



SISÄLLYSLUETTELO

Kokonaiskuva nykytilanteesta.....	1
Tavoitetila.....	2
Alustava tiekartta.....	3
1 Johdanto	4
1.1 Johdon tiivistelmä	4
1.2 Hankkeen toteutus.....	5
2 Lyhenteet ja termit	7
3 Saostuskemikaalien käyttö ja valmistus.....	8
3.1 Johdanto.....	8
3.2 Saostuskemikaalien nykyinen käyttö	8
3.2.1 Käyttö talousveden tuotannossa	8
3.2.2 Käyttö jätevedenpuhdistuksessa.....	10
3.2.3 Muut käyttökohteet	13
3.3 Saostuskemikaalien tuotanto.....	13
3.4 Yleisimmät Suomessa käytössä olevat saostuskemikaalit	14
3.4.1 Ferrisulfaatti	14
3.4.2 Ferrosulfaatti.....	14
3.4.3 Ferrikloridi	15
3.4.4 Alumiinisulfaatti	15
3.4.5 Polyalumiinikloridi.....	16
3.5 Vaihtoehtoiset saostuskemikaalit ja -tekniikat	17
3.5.1 Vaihtoehtoiset saostuskemikaalit	17
3.5.2 Vaihtoehtoiset valmistustekniikat.....	19
3.5.3 Elektrokoagulaatio	20
3.6 Saostuskemikaalien talteenotto ja kierrätys.....	21
3.7 Tavoitetila ja tiekartta	23
3.7.1 Tavoitetilan määrittely	23
3.7.2 Tiekartta	24
4 Talousveden tuotanto.....	25
4.1 Johdanto.....	25
4.2 Lyhyen aikavälin toimenpiteet	25
4.3 Pitkän aikavälin toimenpiteet	25
4.3.1 Saostuskemikaalimäärien vähentäminen kemiallisessa saostuksessa.....	25
4.3.2 Tulevaisuuden päätöksentekokriteerit	27
4.3.3 Kalvotekniikat.....	27
4.3.4 Ioninvaihtotekniikat	35
4.3.5 Muut vaihtoehdot	38
4.4 Yhteenveto	41
5 Jätevedenpuhdistus	43
5.1 Johdanto.....	43
5.2 Lyhyen aikavälin toimenpiteet	43
5.3 Pitkän aikavälin toimenpiteet	44
5.3.1 Saostuskemikaalin käytön vähentäminen ja ajotapamuutokset	44
5.3.2 Tulevaisuuden päätöksentekokriteerit	47
5.3.3 Biologinen fosforinpoisto	48

5.3.4	Kalvotekniikat.....	51
5.3.5	Muut tekniikat.....	52
5.4	Yhteenveto	54
Liitteet	56
Liite 1	Varautumisohje pintavesilaitoksille	56
Liite 2	Varautumisohje jätevedenpuhdistamoille.....	58

KOKONAISKUVA NYKYTILANTEESTA

KEMIKAALIT

Suomen vesihuoltolaitoksilla käytetään prosesseja, joiden toiminnan kannalta saostuskemikaalit ovat välttämättömiä. Saostuskemikaalien saatavuus on siten kriittistä sekä turvallisen talousveden että ympäristönsuojelun kannalta. Ferrosulfaatin tuotanto Suomessa loppui äkillisesti vuonna 2017, ja nykyisen ferrosulfaattivaraston on ilmoitettu riittävän noin viideksi vuodeksi. Vaikka muiden saostuskemikaalien tuotanto jatkuu Suomessa ja vaihtoehtoisia kemikaaleja on saatavilla Suomen ja Euroopan markkinoilta, tilapäiset toimitushäiriöt ja kemikaalien laatuvaihtelut ovat konkretisoineet tarpeen parantaa kemiallisen saostuksen huoltovarmuutta ja turvata kemikaalisaatavuutta.

TALOUSVEDEN TUOTANTO

Saostuskemikaalien tarve talousveden tuotannossa ei tule pienenemään, koska saostuskemikaaleja tarvitaan poistamaan raakavedestä humusyhdisteitä. Ominaiskulutus tulee päinvastoin kasvamaan raakaveden orgaanisen aineen pitoisuuksien nousun myötä. Lisäksi kokonaisvedenkulutus kasvaa juuri kaupunkikeskuksissa, joiden talousveden tuotannossa käytetään kemiallista saostusta. Vaikka pintavesilaitoksilla otettaisiin käyttöön vaihtoehtoisia tekniikoita, saostuskemikaaleja tarvitaan kuitenkin myös jatkossa.

Rautapohjaista saostuskemikaalia käyttävillä laitoksilla voidaan tarvittaessa käyttää saostukseen väliaikaisesti alumiinisulfaattia. Pitkällä aikavälillä talousveden laadusta ei olla valmiita tinkimään.

JÄTEVEDENPUHDISTUS

Saostuskemikaaleja tarvitaan jätevedenpuhdistuksessa kemialliseen fosforinpoistoon. Fosforin poistovaatimukset ovat Suomessa tiukkoja herkkien vesistöjen vuoksi. Kemiallista fosforinpoistoa tarvitaan nyt ja tulevaisuudessa, jotta jätevedet voidaan puhdistaa nykyistekin tiukempien lupamääräyksien mukaisesti. Saostuskemikaalien kulutusta on kuitenkin monilla jätevedenpuhdistamoilla mahdollista vähentää optimoimalla nykyisiä käsittelyprosesseja ja/tai ottamalla käyttöön vaihtoehtoisia käsittelytekniikoita.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Rautapohjaisia saostuskemikaaleja valmistetaan ja käytetään Suomessa jatkossakin, mutta vesihuoltolaitoksilla on varauduttava niiden toimitushäiriöihin.

TAVOITETILA

KEMIKAALIEN SAATAVUUDEN VARMISTAMINEN

Kriittisten kemikaalien varastoinnin lisääminen

- Vesihuoltolaitosten omien ja laitosten yhteisten varmuusvarastojen perustaminen
- Tarvittavan varastointitason määrittäminen
- Toimiva varastointi ja ostoketju

Kilpailudynamiikan parantaminen

- Tarjoajien riittävän suuren määrän mahdollistaminen
- Vesihuoltolaitosten yhteistyö hankinnoissa

Selkeä roolitus

- Vastuun ja kustannusten jakautuminen eri toimijoiden kesken, erityisesti vesilaitoslähtöisessä huoltovarmuusvarastoinnissa
- Yhteistyön lisääminen vesihuoltolaitosten kesken sekä vesihuoltolaitosten ja viranomaisten ja kemikaalitoimittajien kanssa
- Hankintasopimusten kehittäminen
- Viranomaisten yleissuunnitelma toimenpiteistä kemikaalien toimintahäiriöiden aikana: mm. talousveden tuotannon priorisointi, jäteveden puhdistuksen taso, viestinnän järjestäminen

KRIITTISTEN PUHDISTUSPROSESSIEN TURVAAMINEN

Varautuminen ja harjoittelu vesihuoltolaitoksilla

- Saostuskemikaaleihin liittyvien riskien tunnistaminen ja arviointi
- Käytännönläheinen varautumissuunnitelma, jossa huomioidaan saostuskemikaalin vaihdon tekniset edellytykset

Prosessien joustavuuden lisääminen

- Vaihtoehtoisten saostuskemikaalien käytön mahdollistaminen
- Nykyisten kemikaalien käytön optimointi prosessien ajossa ja suunnittelussa
- Riippuvuuden vähentäminen yhdestä kemikaalista tai prosessivaiheesta
- Ajattelutavan muutos

Yhteistyön lisääminen

- Kokemusten jakaminen, benchmarkkaus vesilaitosten kesken
- Vesihuoltolaitosten hankintarenkaat ja yhteiset varmuusvarastot
- Vesihuoltolaitosten ja viranomaisten yhteistyö

ALUSTAVA TIEKARTTA

VESIHUOLTOLAITOKSET

Huoltovarmuuden parantamiseksi vesihuoltolaitosten omaa varautumista tulee lisätä. Laitoksilla olisi syytä olla mahdollisuus käyttää useampaa kuin yhtä saostuskemikaalia. Laitoksilla tulee olla käytännönläheiset varautumissuunnitelmat, joissa saostuskemikaalin toimituskatkon vaatimat toimenpiteet on määritetty. Saostuskemikaaliin liittyvien riskien arviointi ja hallinta tulee sisällyttää WSP- ja SSP-kysymyksiin.

Investointipäätösten yhteydessä tulee harkita, pitäisikö yksikköprosesseja toteuttaa rinnakkaisilla tekniikoilla. Tämä lisää joustavuutta vielä tuntemattomia riskejä vastaan.

Vesihuoltolaitosten tulee lisätä kriittisten kemikaalien varmuusvarastointia. Varastokapasiteettitarpeet tulisi yhtenäistää ja määritellä esimerkiksi kansallisiin suunnitteluohjeisiin. Huoltovarmuutta parantaisi myös raaka-aineiden varastointi, jotta saostuskemikaaleja saataisiin myös poikkeustilanteessa.

Vesihuoltolaitoksille suositellaan yhteistyömallia, jossa kriittisten saostuskemikaalien varmuusvarastointi ja tarvittaessa myös hankinta ja logistiikka järjestetään vesihuoltolaitosten yhteistyössä esim. hankintarenkaan kautta. Hankintarengas voisi vastata kemikaalihankintojen kilpailuttamisesta ja hajauttamisesta eri toimijoille. Hankintasopimuksia tulisi kehittää siten, että kemikaalitoimittaja sitoutuu toimittamaan vaihtoehtoista kemikaalia, jos varsinaista kemikaalia ei voida toimittaa.

VIRANOMAISET

Suomessa on tarvetta kansallisille suosituksille toiminnasta kriittisten saostuskemikaalien saatavuusongelman varalle. Akuutissa saostuskemikaalien toimituskatkoksa tarvittavaan säännöstelyyn ja priorisointiin veden- ja jätevedenpuhdistuksen välillä tulisi olla kansalliset ohjeistukset.

KEMIKAALITOIMITTAJAT

Myös kemikaalitoimittajien ja -valmistajien toiminnan jatkuvuudenhallintaa tulee kehittää. Hankintasopimusten kehittäminen yhdessä vesihuoltolaitosten kanssa edistää huoltovarmuutta. Tarjoajien nykyistä suuremman määrän mahdollistaminen edistäisi kilpailudynamiikkaa.

TARPEELLISIA LISÄSELVITYKSIÄ

- Vaihtoehtoisten saostuskemikaalien kehittäminen ja testaus
- Kaivosteollisuuden rautapitoisten sivuvirtojen hyödyntäminen saostuskemikaalien raaka-aineena
- Päivitetyt ohjeet ferrosulfaatin annostelun optimointiin
- Rinnakkaiset prosessit talousveden tuotannossa ja vesien sekoittaminen
- Biologisen fosforinpoiston käytännönläheiset soveltamisohjeet jätevedenpuhdistamoille
- Saostuskemikaalien kierrätys: sisäiset kierrot, reaktiointi laitoksella
- Ioninvaihtotekniikoiden testaaminen suomalaisilla pintavesilaitoksilla

1 JOHDANTO

1.1 Johdon tiivistelmä

Epäorgaaniset rauta- ja alumiinipohjaiset saostuskemikaalit ovat kriittisiä orgaanisen aineen poistossa pintavesilaitoksilla sekä fosforin poistossa jätevedenpuhdistamoilla Suomessa. Noin 40 % talousvedestä tuotetaan Suomessa pintavedestä, jonka humus poistetaan kemiallisella saostuksella, yleisimmin käyttämällä ferrisulfaattia. Suomessa jätevedenpuhdistuksessa käytetään pääosin kemiallista fosforinpoistoa, jossa saostuskemikaalina käytetään yleisimmin ferrosulfaattia.

Alkuvuonna 2017 tapahtuneen Porin titaanidioksiditehtaan tulipalon myötä Suomesta poistui vesihuollon rautakemikaalien pääasiallinen raaka-ainelähde, titaanidioksidin sivutuotteena syntyvä ferrosulfaatti. Ferrosulfaattia käytetään joko sellaisenaan jäteveden saostukseen tai siitä valmistetaan ferrisulfaattia sekä talousveden tuotannon että jätevedenpuhdistuksen käyttöön. Tällä hetkellä ferrosulfaattia saadaan Porin tehdasalueella, jonne ferrosulfaattia läjitettiin 1970-luvulta vuoteen 2007 saakka. Tulipalo herätti vesihuollon tarpeeseen parantaa kemiallisen saostuksen huoltovarmuutta ja turvata kriittisten kemikaalien saatavuutta.

Kemiallisen saostuksen huoltovarmuuden parantamista tutkittiin tässä vesihuoltopoolin ja Huoltovarmuuskeskuksen hankkeessa, jonka toteuttajana toimi AFRY. Hankkeessa arvioitiin nykyiseen toimintamalliin liittyviä riskejä sekä tutkittiin talousveden tuotantoon ja jätevedenpuhdistukseen soveltuvia vaihtoehtoisia kemikaaleja, joita voitaisiin käyttää joko akuuttitilanteissa tai pidemmällä aikavälillä. Hankkeessa selvitettiin myös saostuskemikaalien kulutuksen vähentämistä ja korvaamista uusilla tekniikoilla. Teknisiä vaihtoehtoja ja edellytyksiä niiden toteuttamiseen sekä vaihtoehtojen hyötyjä ja haittoja selvitettiin kirjallisuusselvityksin sekä asiantuntijatyöpajoissa.

Hankkeen tärkein viesti on, että vesihuoltolaitosten on syytä varautua myös epätodennäköisiltä vaikuttaviin riskeihin toiminnan jatkuvuuden turvaamiseksi. Kriittisten saostuskemikaalien saatavuuden häiriöihin tulee varautua riittävin varastoin, ja korvaavien kemikaalien käyttöä tulee valmistella ja harjoitella etukäteen. Kriittisten veden- ja jätevedenpuhdistusprosessien joustavuutta tulisi lisätä sekä vaihtoehtoisten saostuskemikaalien käytön mahdollistamiseksi että myös vielä tunnistamattomien riskien varalta. Veden- ja jätevedenpuhdistusprosessit suunnitellaan usein yhden saostuskemikaalin varaan, mutta jatkuvuudenhallinnan kannalta on tarpeellista lisätä kriittisten prosessien joustavuutta.

Hankkeen tulosten perusteella vesihuoltolaitoksille suositellaan uutta yhteistyömallia, jossa kriittisten saostuskemikaalien varastointi ja tarvittaessa myös hankinta järjestetään vesihuoltolaitosten yhteistyössä. Hankkeessa myös tunnistettiin tarve kansallisille suosituksille toiminnasta vakavan saostuskemikaalien saatavuusongelman varalle. Lisäksi tulee määrittää kriittisille kemikaaleille riittävä varastokapasiteetti, jota laitokset veloitetaan pitämään. Akuuttitilanteessa tarvittavaan säännöstelyyn ja priorisointiin veden- ja jätevedenpuhdistuksen välillä tulisi olla kansalliset ohjeistukset.

1.2 Hankkeen toteutus

Tässä raportissa kuvataan hankkeen ”Vaihtoehtoiset vedenkäsittelymenetelmät rautapohjaisille saostuskemikaaleille Suomessa” tulokset. Huoltovarmuuskeskus toimi hankkeen tilaajana ja rahoittajana, ja AFRY toimi hankkeen toteuttajana.

Hankkeen ohjausryhmä muodostui vesihuoltopoolin sekä Vesilaitosyhdistyksen vesi- ja viemärilaitosryhmien jäsenistä. Ohjausryhmään kuuluivat Jyrki Hakola ja Riku Juhola (Huoltovarmuuskeskus), Riina Liikanen ja Saijariina Toivikko (Vesilaitosyhdistys), Mari Heinonen ja Veli-Pekka Vuorilehto (HSY), Ismo Lindfors (Porin Vesi), Katri Vasama (maa- ja metsätalousministeriö), Jarkko Rapala (sosiaali- ja terveysministeriö) sekä Ari Kangas (ympäristöministeriö).

Hanke koostui kolmesta osatehtävästä. Jokaisen osatehtävän yhteydessä laadittiin taustaselvitys ja järjestettiin asiantuntijatyöpaja. Ensimmäisessä osatehtävässä arvioitiin tulevaisuuden markkinatilannetta ja toimitusvarmuutta rautapohjaisten ja korvaavien saostuskemikaalien suhteen. Ensimmäisen osatehtävän asiantuntijatyöpajaan osallistuivat Riku Juhola (Huoltovarmuuskeskus), Petri Ahola-Luttilla ja Mirva Ojala (Huoltovarmuusorganisaation Kemian pooli), Riina Liikanen (Vesilaitosyhdistys), Jarkko Rapala (sosiaali- ja terveysministeriö), Mari Heinonen ja Veli-Pekka Vuorilehto (HSY), Anna Halinen (Huittisten Puhdistamo Oy), Jouko Tuomi (Turun Seudun Puhdistamo Oy), Suvi Kemmo ja Teemu Palviainen (Berner Oy), Vesa Kettunen ja Matti Nenonen (Kemira Oyj), Aija Jantunen ja Tuomas Rinne (Voda Nordic Oy), Mikael Kvist (Wibax AB), Riku Lehtonen, Risto Saarinen, sekä Heli Härkki, Rauni Karjala, Kristian Sahlstedt ja Maija Vilpanen (AFRY).

Toisessa osatehtävässä arvioitiin vaihtoehtoisten kemikaalien ja tekniikoiden soveltuvuutta vedenkäsittelyyn. Toisen osatehtävän asiantuntijatyöpajaan osallistuivat Jyrki Hakola (Huoltovarmuuskeskus), Riina Liikanen (Vesilaitosyhdistys), Marina Graan, Panu Laurell ja Veli-Pekka Vuorilehto (HSY), Jukka Tyrväinen (Alva-Yhtiöt Oy), Markku Lehtola (Kuopion Vesi), Jarmo Lahtinen (Oulun Vesi), Päivi Peltonen (FCG Oy) sekä Johanna Herttuainen, Heli Härkki, Johanna Sahlstedt ja Maija Vilpanen (AFRY).

Kolmannessa osatehtävässä arvioitiin vaihtoehtoisten kemikaalien ja tekniikoiden soveltuvuutta vastaavasti jätevedenpuhdistukseen. Kolmannen osatehtävän asiantuntijatyöpajaan osallistuivat Saijariina Toivikko (Vesilaitosyhdistys), Ari Kangas (ympäristöministeriö), Anna Mikola (Aalto-yliopisto), Mari Kallioinen (LUT-yliopisto), Jyrki Laitinen (SYKE), Mari Heinonen ja Anna Kuokkanen (HSY), Anna Halinen (Huittisten Puhdistamo Oy), Petri Tuominen (Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy), Jouko Tuomi (Turun Seudun Puhdistamo Oy), Henri Haimi (FCG Oy), Teemu Koskinen (Ramboll Oy), Riitta Hanhimäki (Skanska Infra Oy), Anne Koskela (Hyxo Oy), Seppo Kiiskinen, sekä Johanna Sahlstedt, Kristian Sahlstedt, Paula Seppälä ja Maija Vilpanen (AFRY).

Tässä raportissa esitellään taustaselvitysten ja työpajojen tulokset. Luvussa 3 kuvataan saostuskemikaalien nykyistä käyttöä, tuotantoa sekä toimitusvarmuutta. Luvussa 3 kuvataan myös vaihtoehtoisia saostuskemikaaleja sekä vaihtoehtoisia tuotantomenetelmiä rauta- ja alumiinipohjaisille saostuskemikaaleille. Luvussa 4 käsitellään talousveden tuotantoa ja luvussa 5 jätevedenpuhdistusta kemiallisen saostuksen huoltovarmuuden parantamisen näkökulmasta. Luvuissa käsitellään myös saostuskemikaalien kulutuksen vähentämistä ajotapamuutoksilla ja puhdistusprosessien joustavuuden lisäämistä uusilla tekniikoilla. Liitteissä 1 ja 2 annetaan vesilaitoksille ja jätevedenpuhdistamoille ohjeita varautumiseen sekä toimintaan kriittisten saostuskemikaalien toimintahäiriöitä varten.

Hankkeessa tarkastellut näkökulmat on koottu kuvaan 1-1.



Kuva 1-1 Hankkeessa tarkastellut näkökulmat

2 LYHENTEET JA TERMIT

Alumiinisulfaatti $Al_2(SO_4)_3$	Al^{3+} -pohjainen epäorgaaninen nestemäinen tai kiinteä saostuskemikaali
A2O	anaerobinen-anoksinen-aerobinen prosessi (biologisen fosforinpoiston toteutustapa)
AER	aerobinen eli hapellinen
ANA	anaerobinen eli hapeton
ANO	anoksinen eli ei sisällä liukoista happea
AVL	asukasvastineluku
bioP	biologinen fosforinpoisto
BNR	biologinen ravinteiden poisto (<i>biological nutrient removal</i>)
CEB	kalvosuodatuskalvojen pesu kemikaaleilla vastavirtaan (<i>chemically enhanced backwash</i>)
Denitrifikaatio (DN)	anoksinen prosessi, jossa bakteerit muuttavat nitriitti- ja nitraattityyppä typpikaasuksi
EC	elektrokoagulaatio
Ferrikloridi $FeCl_3$	Fe^{3+} -pohjainen epäorgaaninen nestemäinen saostuskemikaali
Ferrisulfaatti $Fe_2(SO_4)_3$	Fe^{3+} -pohjainen epäorgaaninen nestemäinen saostuskemikaali
Ferrosulfaatti $FeSO_4$	Fe^{2+} -pohjainen epäorgaaninen kiinteä saostuskemikaali
Flux eli vuo	kalvosuodatuksen virtaama suhteessa kalvon pinta-alaan
JHB	Johannesburg-prosessi (biologisen fosforinpoiston toteutustapa)
NF	nanosuodatus (<i>nanofiltration</i>)
MBR	kalvobioreaktori (<i>membrane bioreactor</i>)
MIEX®	ioninvaihtoprosessi orgaanisen aineen poistoon (<i>magnetic ion exchange</i>)
Nitrifikaatio	aerobinen prosessi, jossa nitrifikaatiobakteerit muuttavat kemiallisilla muutoksilla ammoniumtyyppä nitriitti- ja nitraattityypeksi
NOM	orgaaninen aines (<i>natural organic matter</i>)
PAC	jauhemainen aktiivihili (<i>powdered activated carbon</i>)
PAO	fosforia varastoivat mikrobit (<i>phosphorus accumulating organisms</i>)
PHA	polyhydroksialkanoaatti (<i>poly hydroxy alkanoate</i>), varastopolymeeri jäteveden biologisessa fosforinpoistoprosessissa
Polyalumiinikloridi (PACl)	alumiinipohjainen epäorgaaninen nestemäinen esihydrolysoitu saostuskemikaali
Polymeeri	orgaaninen ketjumainen molekyyli
Saostuskemikaali	tässä raportissa tarkoitetaan epäorgaanisia saostuskemikaaleja kuten rauta- ja alumiinisuoloja
SFS	Suomen Standardoimisliitto
SIX®	ioninvaihtoprosessi orgaanisen aineen poistoon (<i>suspended ion exchange</i>)
SSH	sivuvirtahydrolyysi (<i>sidestream hydrolysis</i>)
SUVA	ominaisultraviolettiabsorbanssi (<i>specific ultraviolet absorbance</i>)
TMP	paine kalvosuodatuksessa (<i>trans membrane pressure</i>)
TOC	orgaanisen hiilen kokonaismäärä (<i>total organic carbon</i>)
UCT	University of Capetown -prosessi (biologisen fosforinpoiston toteutustapa)
UF	ultraosuodatus (<i>ultrafiltration</i>)
VFA	haihtuva rasvahappo (<i>volatile fatty acid</i>)

3 SAOSTUSKEMIKAALIEN KÄYTTÖ JA VALMISTUS

3.1 Johdanto

Tässä luvussa tarkastellaan saostuskemikaalien käyttöä ja tuotantoa Suomessa. Lisäksi tarkastellaan vaihtoehtoja rautapohjaisille saostuskemikaaleille sekä esitetään tavoitella ja tiekartta vesihuollossa tarvittavan kemiallisen saostuksen huoltovarmuuden parantamiseksi.

Saostuskemikaalit ovat kriittisiä talousveden tuotannossa ja jätevedenpuhdistuksessa. Talousveden tuotannossa saostuskemikaaleja käytetään poistamaan raakavedestä humusyhdisteitä. Jätevedenpuhdistuksessa saostuskemikaaleja käytetään kemialliseen fosforinpoistoon. Fosforinpoiston lupamääräykset ovat Suomessa tiukkoja herkkien purkuvesistöjen vuoksi.

Saostuskemikaalien tuotanto perustuu tyypillisesti kiertotalouteen. Suomessa rautapohjaisia saostuskemikaaleja on tuotettu pääosin titaanidioksidin sivutuotteena muodostuvasta ferrosulfaattista. Tämä raaka-aineen lähde on poistunut Suomesta Venatorin Porin titaanidioksiditehtaan tulipalon myötä.

3.2 Saostuskemikaalien nykyinen käyttö

Saostus on veden- tai jätevedenkäsittelyn vaihe, jossa epäpuhtaudet kootaan suuremmiksi hiutaleiksi saostusaineen avulla. Saostusaineena käytetään epäorgaanista vedenkäsittelykemikaalia, joka perustuu alumiiniin tai raudan suoloihin. Käsitteellä saostuskemikaali viitataan tässä raportissa nimenomaan epäorgaanisiin saostuskemikaaleihin. Suuret hiutaleet poistetaan vedestä sopivalla prosessilla kuten selkeytyksellä, flotaatiolla tai suodatuksella.

3.2.1 Käyttö talousveden tuotannossa

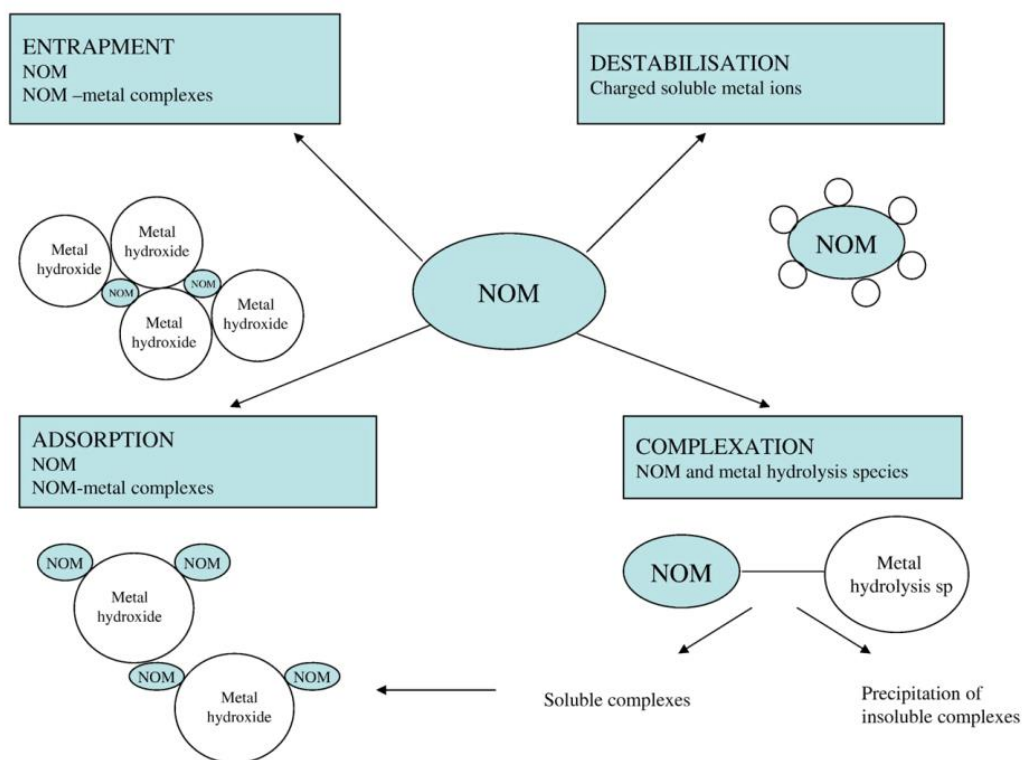
Saostuskemikaaleja käytetään talousveden käsittelyssä poistamaan raakavedestä orgaanista ainesta (*natural organic matter*, NOM). Pohjoisissa ruskeavetisissä vesistöissä suurin osa orgaanisesta aineksesta muodostuu liuenneista eloperäisistä aineista ja humusaineista. Tavallisesti orgaaninen aine mitataan orgaanisena kokonaishiilenä (*total organic carbon*, TOC). Orgaanisen aineen pitoisuuden pintavesissä on havaittu olevan nousussa pohjoisen pallonpuoliskon vesistöissä¹. Syyksi ilmiöön on arveltu ilmastonmuutosta sekä happosateiden vähenemistä. Orgaanisen aineen pitoisuus voi myös muuttua paikallisesti ja alueellisesti maankäytön muutosten takia.

Talousveden käsittelyssä NOM:ia pitää poistaa, koska se aiheuttaa veteen väriä, hajua ja makua. Lisäksi se toimii kasvualustana mikrobeille. Jos talousveden desinfiointiin käytetään klooripohjaista kemikaalia, voi orgaaninen aines reagoida kloorin kanssa muodostaen terveydelle haitallisia desinfioinnin sivutuotteita. Orgaaninen aines voi heikentää prosessin seuraavia vaiheita, kuten kalvosuodatusta tukkimalla kalvot tai aktiivihiihi-suodatusta heikentämällä hiilen tehoa.

¹ Norwegian Water, NOMiNOR: Natural Organic Matter in drinking waters within the Nordic Region, Report 231/2018

Lisättäessä kolmenarvoista alumiini- tai rautasuola veteen suola liukenee, jolloin vedessä esiintyy metallin kolmenarvoisia ioneja (Al^{3+} tai Fe^{3+}). Ionit hydrolysoituvat muodostaen positiivisesti varautuneita vesiliukoisia komplekseja. Yhdisteiden muodostuminen riippuu pH:sta. Nämä adsorboituvat negatiivisesti varautuneiden kolloidien kuten NOM-yhdisteiden pinnalle muodostaen mikropartikkeleita, jotka törmäilevät toisiinsa muodostaen flokkeja.

Orgaanisen aineen poisto saostamalla perustuu useaan eri ilmiöön: varausten neutralointiin, adsorptioon, tarttumiseen ja kompleksien muodostukseen (Kuva 3-1). Riippuu orgaanisen aineen koostumuksesta, millä mekanismilla se poistuu vedestä. Saostamalla saadaan poistettua vedestä suurimolekyylisiä hydrofobista orgaanista ainesta. NOM:in poistoteho saostamalla on riippuvainen saostuskemikaalin tyypistä, annostuksesta, pH:sta, sekoitusolosuhteista ja lämpötilasta. Lisäksi poistotehoon vaikuttaa NOM:in laatu, ml. partikkelikoko, varaus ja hydrofobisuus. Myös vedessä olevilla muilla ioneilla kuten bikarbonaateilla, sulfaateilla ja klorideilla on oma vaikutuksensa poistotehoon.^{2,3}

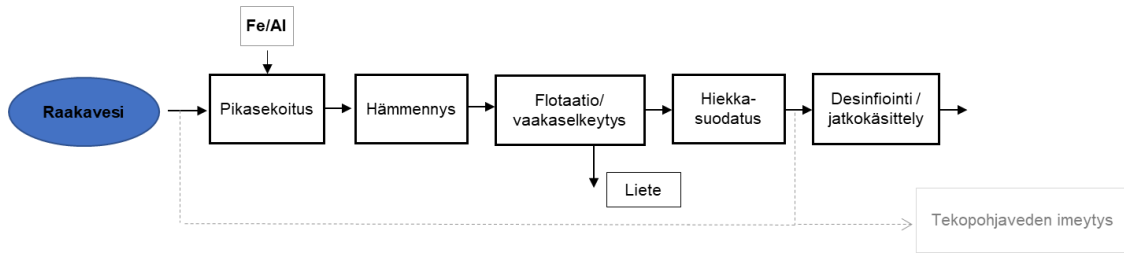


Kuva 3-1 Mahdolliset NOMin poistomekanismit²

Alla olevassa kuvassa (Kuva 3-2) on esitetty tyypillinen vedenpuhdistusprosessi. Rauta- tai alumiinipohjainen saostuskemikaali lisätään veteen prosessin alkuvaiheessa. Suomessa kaikki pintavesilaitokset käyttävät saostuskemikaaleja. Lisäksi tekopohjaveden valmistuksessa käytetään joissakin tapauksissa esikäsittelynä kemiallista saostusta. Alkaliteetin ja pH:n säätöön käytetään tyypillisesti kalkkia ja hiilidioksidia.

² Matilainen, A., Vepsäläinen, M. ja Sillanpää, M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 159, 189-197, 2010

³ Sillanpää, M., Chaker Ncibi, M., Matilainen, A. ja Vepsäläinen, M. Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review, *Chemosphere*, vol. 190, 54-71, 2018



Kuva 3-2 Saostuskemikaalin syöttöpisteet tyypillisessä pintavesilaitoksen prosessissa

Talousveden TOC (*Total Organic Carbon*) -pitoisuudelle ei ole annettu enimmäisarvoa, mutta Talousvesiasetuksen soveltamisohjeessa suositellaan, että pitoisuus olisi enintään 4 mg/l. Suomessa pintavesilaitosten raakaveden TOC-arvo on ollut 5–15 mg/l ja talousveden 2–6 mg/l.⁴ Tutkimusten perusteella Suomen vesilaitosten TOC:n mediaanipitoisuuksien vaihteluväli on pohjavesi mukaan lukien ollut 1,0–2,6 mg/l.⁵

Suomessa 48 % vesihuoltolaitosten toimittamasta talousvedestä tuotetaan kemiallisen saostuksen avulla: 31 % pintavesilaitoksilla ja 17 % esikäsittelyä käyttävillä tekopohjavesilaitoksilla. Loput 52 % talousvedestä tuotetaan pohjavedestä.

Suurimmalla osalla Suomen pintavesilaitoksilla käytetään ferrisulfaattia saostuskemikaalina. Lopuilla pintavesilaitoksilla käytetään alumiinisulfaattia tai polyalumiinikloridia. Joillain tekopohjavesilaitoksilla käytetään tarvittaessa saostuskemikaalia, joka on tyypillisesti alumiinisulfaatti tai polyalumiinikloridi.

Saostuskemikaalien ominaiskulutukset talousveden tuotannossa Suomessa ovat seuraavaa suuruusluokkaa:

- Ferrisulfaatti
 - Järvivesi: 50–100 g/m³
 - Jokivesi: 140–300 g/m³
- Polyalumiinikloridi 30–60 g/m³
- Alumiinisulfaatti 45–80 g/m³

3.2.2 Käyttö jätevedenpuhdistuksessa

Jätevedenpuhdistamoilla on Suomessa tiukat fosforinpoistovaatimukset herkkien vesistöjen vuoksi. Tästä syystä 98 % jätevesistä käsitellään kemiallisella saostuksella fosforin poistamiseksi.⁶ Kemiallinen saostus tukee myös kiintoaineen ja orgaanisen kuorman poistoa.

Jätevedenpuhdistuksessa käytetään saostuskemikaaleja pääosin rinnakkaissaostuksessa ja

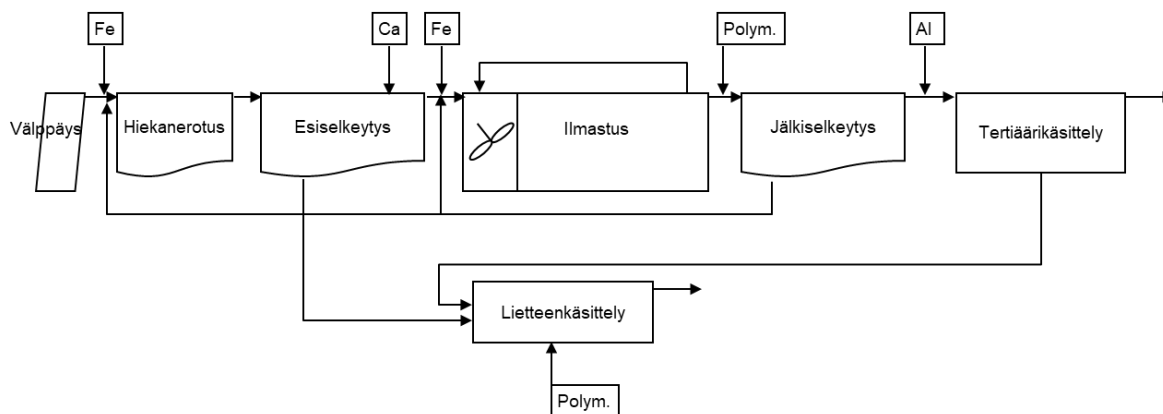
⁴ Valvira, Talousvesiasetuksen soveltamisohje. Osa III Enimmäisarvojen perusteet. Ohje 16/2018. Ks. https://www.valvira.fi/documents/14444/6739502/Talousvesiasetuksen_soveltamisohje_osa_3.pdf/

⁵ Ahonen, M., Kaunisto, T., Mäkinen, R., Hatakka, T., Vesterbacka, P., Zacheus, O. ja Keinänen-Toivola, M. Suomalaisen talousveden laatu raakavedestä kuluttajien hanoihin vuosina 1999–2007, Vesi-Instituutin julkaisu 4, 2008

⁶ Vesilaitosyhdistys, Teknis-taloudellinen tarkastelu jätevesien käsittelyn tehostamisesta Suomessa, Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 42, 2016

tertiärikäsittelyssä. Alla (Kuva 3-3) on esitetty tyypillinen suomalainen jätevedenpuhdistamo, jossa rinnakkaissaostuksessa käytetään rautapohjaista kemikaalia ja tertiärikäsittelyssä alumiinipohjaista.

Tyypillinen kunnallinen jätevesi sisältää 5–20 mg/L kokonaisfosforia. Suurin osa fosforista on liuenneessa muodossa ortofosfaatteina. Rinnakkaissaostuksella esiselkeytyksessä ja sekundärikäsittelyssä pystytään usein poistamaan n. 75–85 % fosforista. Viime vuosina on annettu jopa 0,1 mg/L ja 97 % lupamääräyksiä. Jotta näihin lupamääräyksiin päästään, on kemiallinen tertiärikäsittely välttämätön.



Kuva 3-3 Kemikaalien tyypilliset syöttöpisteet jätevedenpuhdistuksessa

Fosforin kemiallinen saostus perustuu liukoisien fosfaattifosforin saostukseen. Suomessa käytetyimmät saostuskemikaalit ovat rautapohjaiset ferro- ja ferrisulfaatti sekä alumiinisulfaatti ja polyalumiinikloridi. Lisättäessä jäteveteen rauta- tai alumiinipohjaista saostuskemikaalia veteen liukenee metallin kahden- tai kolmenarvoisia ioneja (Fe^{2+} , Fe^{3+} tai Al^{3+}). Fosforin saostuminen tapahtuu suorana sitoutumisena ferri- tai alumiinifosfaattiin sekä adsorboitumisena hydroksidisakkaan. Näistä jälkimmäinen on vallitsevan käsityksen mukaan merkittävämpi mekanismi. Raudan pitää kolmenarvoiseksi hapetuttuaan mahdollisimman pian reagoida fosfaatin kanssa. Muodostuva metallifosfaatti on veteen liukenematon ja voidaan poistaa lietteen mukana.

Jätevedenpuhdistamoiden määrä Suomessa on selvästi pintavesi- tai tekopohjavesilaitosten määrää suurempi.⁷ Kattava selvitys jätevedenpuhdistamoiden saostuskemikaalien käyttömäärästä tehtiin vuonna 2014 jäteveden BAT-selvityksessä.⁸ Selvityksessä kysyttiin saostuskemikaalien kokonaiskulutusta 57 erikokoiselta jätevedenpuhdistamolta Suomessa. Nämä 57 puhdistamoaa vastaavat noin 65 %:sta yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla käsitellystä jätevesimäärästä (kaikilla Suomen puhdistamoilla käsitellään vuosittain yhteensä 500 miljoonaa kuutiota jätevettä⁸). Selvityksen tulokset on koottu seuraavaalla sivulla olevaan taulukkoon (Taulukko 3-1). Tulosten perusteella kemikaalien ominaiskulutuksissa on suurta vaihtelua, mikä osittain selittyy sillä, että saostuskemikaaleja käytetään rinnakkaissaostuksessa ja tertiärikäsittelyssä, minkä lisäksi niitä käytetään myös ohitusvesien käsittelyssä. Näihin eri

⁷ Jätevedenpuhdistamoita on yli 400 kpl, joista alle 2 000 AVL:n puhdistamoita on 160 kpl

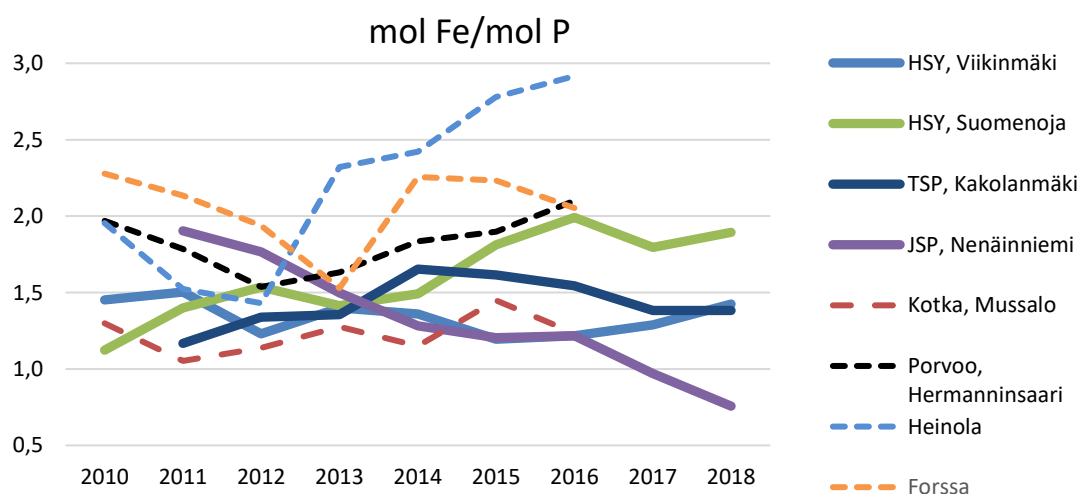
⁸ Laitinen, J., Nieminen, J., Saarinen, R. ja Toivikko, S. Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT), Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot, Suomen ympäristö 3/2014

tarkoituksiin käytetään monilla puhdistamoilla useampaa kuin yhtä saostuskemikaalia.⁹ Siten keskimääräiset ominaiskulutukset ovat karkeita arvioita.

Taulukko 3-1 Saostuskemikaalien käyttömäärät ja ominaiskulutukset vuoden 2014 BAT-selvityksen mukaan⁸

		Ferro-sulfaatti	Ferri-sulfaatti	Alumiini-sulfaatti	PACl
Kemikaalin käyttäjien määrä (N=57)	lkm	29	16	13	4
Kemikaalin ominaiskulutus (vaihteluväli)	g/m ³	190 (52–962)	230 (61–531)	82 (9–253)	110 (2–324)

Saostuskemikaalien käytön tehokkuutta suhteessa poistettuun fosforimäärään voidaan vertailla tarkastelemalla saostuksen Fe/P-moolisuhdetta. Moolisuhte lasketaan prosessivaihekohtaisesti: esimerkiksi rinnakkaissaostuksessa ja tertiäärikäsittelyssä erikseen. Siten kemikaalien kokonaiskulutuksesta laitoksilla ei voida laskea kuin suuntaa antavia moolisuhteita. Seuraavassa kuvassa (Kuva 3-4) on esitetty kahdeksan erikokoisen suomalaisen puhdistamon moolisuhteita, jotka on laskettu kemikaalien kokonaiskulutuksesta laitoksella suhteessa laitokselle tulevaan fosforikuormaan. Kuvasta havaitaan, että moolisuhte on tarkastelluilla laitoksilla vaihdellut n. välillä 1,0–3,0 mol Fe/mol P. Tyypillinen yhdyskuntajäteveden arvo rinnakkaissaostuksessa on n. 1,4 mol Fe/mol P. Tertiäärikäsittelyssä moolisuhte voi kasvaa moninkertaiseksi riippuen mm. käsiteltävästä vedestä ja tavoiteltavasta jäännösfosforipitoisuudesta. Tertiäärikäsittelyssä on tyypillisesti käytössä polyalumiinikloridi. Moolisuhte vaihtelee välillä 2–5 mol Al/mol P.



Kuva 3-4 Saostuksen mol Fe/mol P -suhteita suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla¹⁰

Erot moolisuhteissa johtuvat erityisesti puhdistustuloksesta, mutta myös prosessieroista sekä saostuskemikaalien erilaisista käyttötavoista. Moolisuhteeseen vaikuttavat mm. laitoksen

⁹ Esimerkiksi esisaostuksessa voidaan käyttää joko ferri- tai ferrosulfaattia ja jälkikäsittelyssä polyalumiinikloridia

¹⁰ Tiedot on kerätty vuosiraporteista sekä VAHTI-tietokannasta (katkoviivalla merkityt)

kapasiteetti suhteessa kuormitukseen, tertiäärikäsittelyn olemassaolo ja tyyppi, saostuskelpoisen fosforin pitoisuus kemikaalin syöttökohdassa, kemikaalin sekoittumisolosuhteet, jäteveden sisältämän fosforin kemiallinen rakenne ja jäteveden pH. Osalla kuvan 3-6 laitoksista on ollut merkittäviä prosessimuutoksia vuosina 2010–2018, kuten tertiäärikäsittelyn käyttöönotto, mikä selittää moolisuhteen muutoksia.

Ferrosulfaatin saatavuuden epävarmuuden lisääntyminen ja hinnan nousu vuoden 2017 tulipalon jälkeen ovat saaneet monet laitoksista optimoimaan ferrosulfaatin syöttöä. Toisaalta kiristyvät fosforinpoiston lupamääräykset kasvattavat saostuskemikaalien tarvetta. Kiristyvät lupamääräykset lisäävät tyypillisesti kemikalointia tertiäärikäsittelyssä (kemikaalina ferrisulfaatti tai polyalumiinikloridi), koska saostuksen moolisuhte kasvaa jäännösfosforipitoisuuden pienentyessä. Kemikaalinkulutukseen vaikuttavia seikkoja ja kemikaloinnin optimointimahdollisuuksia on käsitelty tarkemmin kohdassa 5.3.1.

3.2.3 Muut käyttökohteet

Rauta- ja alumiinisulfaatteja käytetään myös teollisuudessa. Ferrosulfaatin tärkein käyttökohte teollisuudessa on ferrisulfaatin valmistus. Sen lisäksi ferrosulfaattia käytetään mm. rehujen valmistuksessa ja kaivosteollisuudessa. Sementtiteollisuudessa ferrosulfaattia käytetään karsinogeenisen kuudenarvoisen kromin (Cr^{6+}) pelkistämiseen. Ferrisulfaattia käytetään kunnallisen vesihuollon lisäksi prosessi- tai kattilaveden valmistuksessa sekä kaivosteollisuuden vedenpuhdistuksessa. Suuri yksittäinen teollisuuskäyttäjäkunta Suomessa on puunjalostusteollisuus. Ferrikloridia käytetään teollisuuden jätevedenpuhdistuksen lisäksi myös raaka-aineena helmiäispigmentin valmistuksessa. Alumiinisulfaattia käytetään paperi- ja kaivosteollisuudessa raaka-aineena. Polyalumiinikloridia käytetään metsäteollisuuden jätevedenpuhdistusprosesseissa.

Ferrisulfaatti ja polyalumiinikloridi ovat tyypillisiä kemikaaleja, joita käytetään esim. elintarviketeollisuuden jätevesien esikäsitelyssä ennen viemäriin johtamista. Siten näillä kemikaaleilla on paljon pieniä käyttäjiä.

3.3 Saostuskemikaalien tuotanto

Sekä rauta- että alumiinipohjaisten saostuskemikaalien tuotanto perustuu teolliseen symbioosiin, jossa teollisuuslaitosten sivutuotteita yhdistämällä valmistetaan vesikemikaaleja. Saostuskemikaalien tuotantoperiaate on liuottaa rauta- tai alumiini-ioneja joko rikkihappoon tai suolahappoon, jotta ionit saadaan sopivaan muotoon vedenpuhdistusprosessia varten.

Rautapohjaisten saostuskemikaalien vaatima rauta saadaan usein sivutuotteena. Suurin osa Euroopan tuotantolaitoksista käyttää raaka-aineenaan titaanidioksidiprosessin sivutuotteena saatavia rautakemikaaleja. Titaanidioksidin (TiO_2) valmistuksessa ilmeniitistä (FeTiO_3) poistetaan rauta. Tuotanto voi perustua joko sulfaatti- tai kloridiprosessiin, joten sivutuotteena muodostuva rauta voi olla joko ferrosulfaattia tai ferrokloridia. Prosessista riippuen ferrosulfaattia tai ferrikloridia syntyy noin 2–4 tonnia per tuotettu titaanidioksiditonni. Näitä sivutuotteita jalostavat tuotantolaitokset sijaitsevat yleensä titaanidioksiditehtaiden yhteydessä.

Alumiinipohjaisiin saostuskemikaaleihin käytettävä alumiinihydroksidi on kaupallista tuotetta, ja silloin tuotannon kannalta kriittiseksi nousee hapon saanti. Alumiinipohjaista saostuskemikaalia valmistetaan sellaisten prosessien yhteydessä, joiden sivutuotteena syntyy rikkihappoa

tai suolahappoa.

3.4 Yleisimmät Suomessa käytössä olevat saostuskemikaalit

3.4.1 Ferrisulfaatti

Ferrisulfaattia eli rauta(III)sulfaattia käytetään sekä veden- että jätevedenpuhdistuksessa. Kemikaalia on saatavilla eri laatuja. Ferrisulfaatti poistaa orgaanista ainetta tehokkaasti, kunhan annostus on riittävää. Sen ominaiskulutus järvivedelle on n. 50–100 g/m³ ja jokivedelle n. 140–300 g/m³. Keskimääräinen poistoteho orgaaniselle aineelle on 65 %. Kylmillä vesillä teho on heikompi kuin lämpimillä vesillä. Ferrisulfaatin saostus-pH on 4,5–5,5 (optimaalinen pH 4,5–5). Riippuen raakaveden alkaliteetista annosteluun saatetaan tarvita lisäksi happoa tai emästä.

Ferrisulfaatti voidaan annostella veteen kalvopumpuilla suoraan varastosäiliöstä laimentamattomana tai vedellä laimennettuna. Lietettä syntyy ferrisulfaattia käytettäessä hieman enemmän kuin alumiinisulfaatilla tai polyalumiinikloridilla. Jäännösraudan pitoisuus on hallittavissa suhteellisen helposti oikealla annostelulla ja saostus-pH:lla. Talousvesiasetuksen raja-arvo raudalle on 200 µg/l.

Ferrisulfaatti, tekniset ominaisuudet	
Rakennekaava	Fe ₂ (SO ₄) ₃
Ulkomuoto	Punaruskea neste
Metallipitoisuus	11,2 % (jätevesi) – 12,5 % (talousvesi)
Fe ₂ (SO ₄) ₃	38–42 % (jätevesi) – 43–46 % (talousvesi)
pH	<1
Jäätymispiste	-20 °C
Standardi	SFS-EN 890: 2012 (talousvesi)
Käyttöturvallisuus	Haitallista nieltynä. Voi syövyttää metalleja. Vaurioittaa vakavasti silmiä. Ärsyttää ihoa.
Materiaalivaatimukset	Muovi, lasikuituvahvisteinen polyesteri, titaani, kumioitu tai haponkestävä teräs
Varastointi	Suosittelava varastointiaika max 12 kk. Suositeltava käyttö- ja varastointilämpötila yli 0 °C

3.4.2 Ferrosulfaatti

Ferrosulfaatti eli rauta(II)sulfaatti on jätevedenpuhdistuksessa käytetty rautapohjainen kemikaali. Kiinteä tuote liuotetaan veteen ennen annostelua. Kemikaali annostellaan useimmiten kylläisenä liuoksena. Toimiakseen tehokkaasti fosforin sitomisessa rauta hapetetaan ferrimuotoon ennen saostusta. Ferrosulfaatin liukoisuus veteen riippuu lämpötilasta. Jos käytetään kylläistä liuosta, osa ferrosulfaatista kiteytyy lämpötilan laskiessa eli liuoksen ferrosulfaattipitoisuus alenee. Liuoksen siirto annostelusäiliöstä syöttöpisteeseen tulee järjestää siten, ettei liuoksen lämpötila putkistossa laske. Ferrosulfaatin kanssa kosketuksiin tulevien materiaalien tulee olla haponkestäviä.¹¹

¹¹ Alavakeri, M., Latvanen, H., ja Pääkkönen, J. Ferrosulfaatin käyttöopas, Kemira, 2002

Ferrosulfaatti, tekniset ominaisuudet	
Rakennekaava	FeSO ₄ x 7 H ₂ O
Ulkomuoto	Vaaleanvihreä, kiteinen aine
Metallipitoisuus	18 %
pH	3–4 (vesi: 50 g/l, 20 °C)
Vesiliukoisuus	~400 g/l (20 °C)
Käyttöturvallisuus	Haitallista nieltynä. Ärsyttää ihoa. Ärsyttää voimakkaasti silmiä.
Materiaalivaatimukset	Muovi, lasikuitu, haponkestävä teräs, pinnoitettu teräsbetoni, kumi
Varastointi	Suosittelua varastointilämpötila yli 0 °C, kylmemmässä lämpötilassa aine kovettuu, mikä hidastaa liukenemistä

3.4.3 Ferrikloridi

Ferrikloridi on nestemäinen saostuskemikaali, jota käytetään sekä veden- että jätevedenpuhdistuksessa. Saostus-pH on 4–6. Kemikaalia voidaan annostella veteen kalvopumpuilla suoraan varastosäiliöstä laimentamattomana tai vedellä laimennettuna. Ferrikloridi on voimakkaasti korrodoivaa. Kemikaalin kanssa kosketuksissa olevien materiaalien tulee olla klorideja ja happoja kestävä. Siten haponkestävä teräs ei sovellu ferrikloridille.

Ferrikloridi, tekniset ominaisuudet	
Rakennekaava	FeCl ₃
Ulkomuoto	Tummanruskea neste
Metallipitoisuus	9 % (jätevesi), 13,8 % (talousvesi)
FeCl	39–41 % (talousvesi)
pH	<1
Jäätymispiste	-20 °C
Standardi	SFS-EN 888:2005 (talousvesi)
Käyttöturvallisuus	Voi syövyttää metalleja. Haitallista nieltynä. Ärsyttää ihoa. Voi aiheuttaa allergisen ihoreaktion. Vaurioittaa vakavasti silmiä.
Materiaalivaatimukset	Muovi, lasikuituvahvisteinen polyesteri, titaani, kumioitu teräs
Varastointi	Suosittelua varastointiaika max 12 kk Suositeltava käyttö- ja varastointilämpötila yli 0 °C

3.4.4 Alumiinisulfaatti

Alumiinisulfaattia käytetään Suomessa sekä veden- että jätevedenpuhdistuksessa. Se on maailmalla erittäin yleinen vedenpuhdistuskemikaali ja Suomessa yleisesti käytössä myös muilla teollisuudenaloilla. Alumiinisulfaattia valmistetaan sekä kiinteänä että nestemäisenä. Kiinteä aine liuotetaan veteen ennen annostelua joko jatkuvalla tai panosliuotuksella. Suositeltava liuoksen väkevyyden on 5–20 m-% rautaa (jatkuva liuotus) tai 5–40 m-% rautaa (panosliuotus). Nestemäinen kemikaali voidaan annostella kalvopumpulla laimentamattomana suoraan varastosäiliöstä. Nestemäistä alumiinisulfaattia myydään Suomessa valmiina 4 % liuoksena.

Alumiinisulfaatin ominaiskulutus järvedelle on 45–80 g/m³. Alumiinisulfaatin optimaalinen saostus-pH talousveden tuotannossa on 6–7. Riippuen raakaveden alkaliteetista annosteluun saattaa lisäksi tarvita happoa tai emästä. Alkaliteetin kulutus on vähäisempää kuin raudalla. Alumiinisulfaatti poistaa orgaanisesta aineksestä keskimäärin 50 %. Saostuskemikaali toimii paremmin lämpimillä vesillä. Alumiinisulfaatissa on n. 50 % sulfaattia. Pintavesilaitoksilla käytettynä alumiinisulfaatti lisää veden sulfaattipitoisuutta usein 20–50 mg/l. Jätevedenpuh-

distuksessa optimaalinen saostus-pH on 5–7.

Talousveden puhdistuksessa alumiinisulfaattia käytettäessä on kiinnitettävä erityistä huomiota jäännösalmiinin määrään. Alumiinipitoisuutta voidaan säädellä hyvällä saostus-pH-arvon ja annostelumäärän optimoinnilla sekä varmistamalla optimaaliset sekoitussuhteet. Lisäksi jäännösarvoon vaikuttaa flokin muodostus ja erotus (suodatus), joiden tulisi toimia mahdollisimman hyvin. Jätevedenpuhdistuksessa alumiinin on todettu häiritsevän biologisen prosessin toimintaa, etenkin toksisille aineille herkkää nitrifikaatiota. Alumiinikemikaalit soveltuvat tästä syystä huonosti esi- ja rinnakkaissaostukseen typenpoistolaitoksilla.

Korkeilla alumiinipitoisuuksilla on todettu olevan terveydellisiä haittavaikutuksia (mm. Alzheimerin tauti). Lisäksi verkostoveteen jäänyt alumiini voi alkaa spontaanisti saostua.² Maailman terveysjärjestön määrittelemä terveysperusteinen raja-arvo on 0,9 mg/l, mutta hyvällä prosessin optimoinnilla suurilla laitoksilla tulisi pyrkiä <0,1 mg/l pitoisuuksiin ja enimmillään 0,2 mg/l pitoisuuteen.¹² Suomessa talousvesiasetuksen tavoiteraja-arvo alumiinille on 0,2 mg/l.

Alumiinisulfaatti, tekniset ominaisuudet	
Rakennekaava	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
Ulkomuoto	Vaalea kiinteä aine
Metallipitoisuus	4–9 %
pH	n. 2 (neste)
Jäätymispiste	-10 °C (neste)
Standardi	SFS-EN 878: 2016 (talousvesi)
Käyttöturvallisuus	Voi syövyttää metalleja. Vaurioittaa vakavasti silmiä.
Materiaalivaatimukset	Muovi, kumioitu tai haponkestävä teräs
Varastointi	Kiinteä tuote on hieman hygroskooppinen ja tulee säilyttää kuivassa. Tuote säilyy säikeissä vähintään yhden vuoden. Nestemäisen tuotteen varastointiaika on max 12 kk.

3.4.5 Polyalumiinikloridi

Polyalumiinikloridi on tehokas ja toimiva saostuskemikaali sekä talousveden tuotantoon että jätevedenpuhdistukseen. Suomessa se on tällä hetkellä toiseksi käytetyin saostuskemikaali talousveden tuotannossa heti ferrisulfaatin jälkeen. Jätevedenpuhdistuksessa sitä käytetään lähinnä tertiäärikäsittelyssä viimeistelemään puhdistustulos biologisen käsittelyn jälkeen. Polyalumiinikloridi on esihydrolysoitu saostuskemikaali, mikä tekee siitä vähemmän pH- ja lämpötilariippuvaisen. Kemikaalia tarvitsee annostella vähemmän kuin perinteistä alumiinisulfaattia ja se myös kuluttaa vähemmän alkaliteettia saostusreaktiossa.

Polyalumiinikloridia on olemassa lukuisina erilaisina tuotteina. Polyalumiinikloridin yleinen kemiallinen rakenne on $[\text{Al}(\text{OH})_x\text{Cl}_{3-x}]_n$, jossa $0 < x < 3$ ja $n \geq 2$. Mitä enemmän OH^- -ryhmiä suolassa on, sitä vähemmän kemikaalin lisäys veteen muuttaa veden pH-arvoa ja sitä pienempi on veden alkalointitarve. Kloridin määrä vähenee OH^- -ryhmien määrän lisääntyessä, mikä vähentää kemikaalin korrodoivaa vaikutusta.¹³ Polyalumiinikloridin saostus-pH on 4,5–9,5 (optimaalinen pH-alue talousveden tuotannossa 6,5–6,7). Ominaiskulutus järvivedelle on n.

¹² WHO, Guidelines for Drinking-Water Quality, 4. painos, 2011

¹³ Lindqvist, A. (toim.); Gillberg, L., Hansen, B., Karlsson, I., Nordström Enkel, A. ja Pålsson A. About Water Treatment, Kemira Kemwater, 2003

30–60 g/m³.

Polyalumiinikloridia voidaan annostella veteen kalvopumpuilla suoraan varastosäiliöstä. Kalvoksi sopii esim. Teflon ja venttiili-/tiivistemateriaaliksi esim. PVDF-Viton tai PP-EPDM-yhdistelmät. Kemikaalia käytettäessä tulee huomioida, että se aiheuttaa hitaasti korroosiota useimmille metalleille (ml. haponkestävä teräs). Polyalumiinikloridi poistaa orgaanisesta aineksesta keskimäärin 60 %.

Polyalumiinikloridi, tekniset ominaisuudet	
Rakennekaava	Al ₂ (OH) ₃ Cl ₃ (saatavilla erilaisia rakenteita)
Ulkomuoto	Kellertävä neste
Metallipitoisuus	n. 7,2–12,5 % (riippuu polymerointiasteesta)
pH	n. 1,5
Jäätymispiste	-30 °C
Standardi	SFS-EN 883:2005 (talousvesi)
Käyttöturvallisuus	Vaurioittaa vakavasti silmiä. Voi syövyttää metalleja.
Materiaalivaatimukset	Muovi, lasikuituvahvisteinen polyesteri, titaani tai kumioitu teräs
Varastointi	Suositteltu varastointiaika max 8–12 kk (riippuu laadusta) Suositeltu varastointilämpötila 0–30 °C

3.5 Vaihtoehtoiset saostuskemikaalit ja -tekniikat

3.5.1 Vaihtoehtoiset saostuskemikaalit

Rauta- ja alumiinipohjaiset vaihtoehdot

Polyalumiinikloridista (ks. kappale 3.4.5) on kehitetty useita erilaisia johdannaisia. Niissä vaihtelee hydrolysaatioaste, metalli- ja kloridipitoisuus. Nämä ominaisuudet vaikuttavat tuotteen ominaisuuksiin. Myös rautapohjaisista kemikaaleista on kehitetty uusia esihydrolysoituja tuotteita, kuten polyferrikloridia ja -sulfaattia. On myös olemassa tuotteita, joihin on lisätty silikaattia. Silikaatin lisääminen tehostaa saostuskemikaaliin lisää saostustehoa. Natriumsilikaattia (ns. vesilasi), joka kostuu natriumoksidista ja piidioksidista, voi myös lisätä sellaisenaan saostuskemikaalin lisäaineena. Natriumaluminaatti on emäksinen alumiiniyhdiste, jota voidaan käyttää fosforin saostamiseen jätevedenpuhdistuksessa. Lisättäessä kemikaalia veteen se hydrolysoituu ja voi saostua fosforin kanssa alumiinifosfaattina. Saostuksen teho riippuu annostuksesta ja pH:sta. Yleensä natriumaluminaattia käytetään yhdessä alumiini-sulfaatin kanssa.

Orgaaniset saostuskemikaalit

Saostuksen apuaineena tai saostuskemikaalin korvaajana voidaan käyttää orgaanisia saostuskemikaaleja, joita valmistetaan esimerkiksi kitiinistä, tärkkelyksestä ja tanniinista. Niiden etuna perinteisiin alumiini- ja rautapohjaisiin saostuskemikaaleihin verrattuna on niiden raskasmetallittomuus ja biohajoavuus, jolloin syntyvää lietettä on helpompi käyttää lannoittamiseen. Orgaaniset polymeerit eivät sisällä myöskään perinteisten kemikaalien sisältämiä suoloja kuten sulfaattia. Nämä kemikaalit ovat enemmänkin polymeerejä, mutta niitä markkinoidaan epäorgaanisten saostuskemikaalien korvaajina erityisesti jätevedenpuhdistukseen. Orgaaniset saostuskemikaalit voivat myös yhdistää saostuskemikaalin ja flokkulantin. Aikaisemmin orgaaniset saostuskemikaalit ovat olleet kalliita eikä niiden teho

välttämättä ole ollut yhtä hyvä kuin epäorgaanisilla saostuskemikaaleilla. Viime vuosina orgaaniset saostuskemikaalit ovat kuitenkin kehittyneet tehokkaammiksi. Markkinoilta löytyy myös komposiittikemikaaleja, jotka ovat orgaanisen ja epäorgaanisen polymeerin yhdistelmiä.

Orgaanisiin saostuskemikaaleihin perustuvalla vedenkäsittelymenetelmällä saadaan fosfori sidottua biohajoavaan lietteeseen, joka voidaan kierrättää lannoitteeksi. Orgaanisella saostuskemikaalilla saostettu fosforipitoinen liete on biohajoavaa, jolloin kasvit voivat helpommin käyttää siihen sitoutuneita ravinteita. SYKE:n BioP-hankkeessa maatalouden valumavesillä saavutettiin keskimäärin 50 % fosforireduktio, kun käytettiin orgaanista saostuskemikaalia. Parhaimmillaan fosforia poistui kokeissa yli 90 %. Veden sameuden väheneminen oli samaa luokkaa fosforin vähenemisen kanssa mutta veden kokonaistypen pitoisuus kasvoi kokeissa. TOC:n poistuminen oli parhaimmillaan 27 %. Tutkimuksessa tutkittiin kolmen orgaanisen saostuskemikaalin, tanniinin, tärkkelyksen ja kitosaanin, tehoa fosforin, TOC:n ja sameuden poistoon. Tanniini- ja kitosaanipohjaisten kemikaalien todettiin toimivan tärkkelyspohjaista paremmin.^{14,15}

Orgaanisia saostuskemikaaleja on tutkittu enimmäkseen jätevedenpuhdistuksen käyttöön. Suomessa tärkkelyspohjaista saostuskemikaalia (Chemigate) on kokeiltu Turun Seudun Puhdistamo Oy:n Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla täyden mittakaavan koeajoissa. Koeajoissa korvattiin 50 % ferrosulfaatista orgaanisella saostuskemikaalilla, ja fosforinpoistoteho pysyi samana. Kustannukset kuitenkin kasvoivat. Samaa kemikaalia on kokeiltu myös HSY:n Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla pienemmässä mittakaavassa.

Norjassa on kehitelty kitosaanipohjaista saostuskemikaalia äyriäisten kuorista talousveden käsittelyyn. Tavoitteena on ollut löytää kemikaali, jossa voitaisiin hyödyntää uusiutuvia luonnonvaroja. Koska kitosaanin orgaanisen aineen poistoteho on heikko, lisätään saostuskemikaalin joukkoon zirkoniumia. Kemikaaleja käytetään yhdeksällä vedenkäsittelylaitoksella, joiden tuotantokapasiteetit vaihtelevat välillä 5–200 m³/h. Käytetyn kemikaalin Zr-pitoisuus on 4,4% (w/v) ja kitosaanipitoisuus vastaavasti 2 % (w/v). Käsittelyssä saavutetaan laitosten kokemusten perusteella vastaava puhdistustulos kuin alumiinilla, muodostuvat lietemäärät ovat pienempiä ja lietteen uudelleenkäyttö on helpompaa kuin alumiinipohjaisten lietteiden.¹⁶

Sammutettu kalkki

Kalkkia voidaan käyttää jätevedenpuhdistuksessa pH-arvon nostamisen lisäksi saostuskemikaalina. Kalsiumhydroksidi eli sammutettu kalkki (Ca(OH)₂) on niukkaliukoinen ja sitä liukenee 25 asteiseen veteen noin 800 mg/l. Saostuneen fosforin määrään vaikuttaa myös jäteveden alkaliteetti. Vasta kun pH nousee selvästi emäksiseksi (pH >10) alkaa fosfori saostua hydroksyyliapatiittina. Ihanteellinen pH-alue fosfaatin saostamiselle on 10–11.

Kalkkisaostuksen haittapuolia on, että se tuottaa enemmän lietettä kuin rauta- ja alumiinisuo-
lat. Lisäksi Ca(OH)₂:n käyttö vaatii, että pH:ta säädetään emäksiseksi ennen sen lisäämistä.

¹⁴ SYKE, Biopolymeerit soveltuvat fosforin sitomiseen maatalouden valumavesistä. Tiedote 7.5.2019. Ks. [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Biopolymeerit_soveltuvat_fosforin_sitomi\(50106\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Biopolymeerit_soveltuvat_fosforin_sitomi(50106))

¹⁵ Turunen, J., Karppinen, A. ja Ihme, R. Effectiveness of biopolymer coagulants in agricultural wastewater treatment at two contrasting levels of pollution, SN Applied Sciences 1: 210, 2019

¹⁶ Hakonsen, T, Christensen, E. New Zirconium coagulant for water treatment. Conference Poster and presentation IWA LET 2019, Skotlanti, 2019

Kalkkisaostuksen jälkeen tarvitaan yleensä myös pH:n neutralointivaihe ja on myös otettava huomioon, ettei syntyvä hydroksiapatiitti ole koskaan täysin puhdasta. Siihen voi sitoutua myös fluoridia ja eri metalleja. Fosfori voi myös muodostaa kalkin kanssa muita, helpommin liukenevia fosfaatteja.¹⁷

Muut

Magneettisia rautaoksideja on käytetty saostuksen apuaineena laskeutumisen tehostamiseksi, mutta ei varsinaisesti fosforin sitomiseen. Näitä mineraaleja ovat magnetiitti (rauta (II,III)oksidin, Fe_3O_4) ja hematiitti (Fe_2O_3). Magnetiitissa on korkeampi rautapitoisuus, mutta hematiittimalmi itsessään sisältää enemmän hematiittia kuin magnetiittimalmi magnetiittia. Tämän vuoksi magnetiittia täytyy prosessoida enemmän, jotta mineraali saadaan konsentroitua malmista. Magnetiittia louhitaan lähinnä Yhdysvalloissa ja hematiittia laajemmin mm. Brasiliassa, Australiassa ja Aasiassa. Magnetiittia hyödynnetään esim. Bio-CoMag®-prosessissa (ks. luku 3.6).

Tämän lisäksi Yhdysvalloissa on tutkittu harvinaisten maametallien käyttöä saostuskemikaaleina. Harvinaiset maametallit, joihin luetellaan 17 eri metallia, ovat nykykäytössä korkean teknologian aloilla kuten sähköautoissa, uusiutuvassa energiassa ja puolustusjärjestelmissä. Lantania ja ceriumia käytetään kuitenkin myös tehokkaina saostuskemikaaleina jätevedenpuhdistuksessa. Harvinaisten maametallien etuna on pienempi muodostuva lietteen määrä sekä mahdollisuus saostuskemikaalin regenerointiin.¹⁸

3.5.2 Vaihtoehtoiset valmistustekniikat

Rautapohjaisten saostuskemikaalien vaihtoehtoisia valmistustekniikoita ja raaka-ainelähteitä on syytä selvittää Suomessa. Suomessa on paljon kaivosteollisuutta, jossa muodostuu rautapohjaisia sivuvirtoja. Näiden kiinteiden tai nestemäisten jakeiden soveltuvuus saostuskemikaalien raaka-aineeksi tulisi selvittää jaakohtaisesti. Nestemäisissä jakeissa rautapitoisuuden tulee olla riittävän korkea, jotta rauta saadaan erotettua liuoksesta. Osassa jakeista on poistettava epäpuhtauksia, etenkin jos tuotetta käytettäisiin talousveden tuotannossa.

Esimerkiksi Hannukaisen kaivokselta Kolarissa saadaan magnetiittia (Fe_3O_4), josta voidaan valmistaa rautapohjaisia saostuskemikaaleja, mm. ferrisulfaattia. Kokkolassa Bolidenin sinkkitehtaalla muodostuu sivujakeena jarosiittia (rautasulfaattimineraali), josta on mahdollista valmistaa saostuskemikaaleja. Jarosiitti sisältää kuitenkin enemmän epäpuhtauksia kuin magnetiitti. Talvivaarassa muodostuu rautapitoisia liuoksia.

Vaihtoehtoisia valmistustekniikoita on olemassa erityisesti ferrikloridin tuotantoon. Vaihtoehtoisia valmistusmenetelmiä ovat mm. romuraudan ja kloorikaasun välinen reaktio, romuraudan, suolahapon ja kloorikaasun välinen reaktio, peittaushapon ja kloorikaasun reaktio, hematiitin ja suolahapon reaktio sekä magnetiitin, suolahapon ja hapettimen (esim.

¹⁷ Reuna, S. Fosforin jälkisaostus ja saostuskemikaalin kierrätys, Pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto, 2015

¹⁸ Haneline, M., Cornish, P., Gallman, J. Rare earth technology for low-level P removal and enhanced sludge properties. The BIG Phosphorus Conference & Exhibition – Removal and Recovery, Manchester, Great Britain, 2017

vetyperoksidi) välinen reaktio.¹⁹ Siten ferrikloridia voitaisiin tuottaa paikallisesti kierrätysraaka-aineista. Kaikilla menetelmillä tuotettu ferrikloridi ei välttämättä sovi talousveden tuotantoon korkeiden mangaanipitoisuuksien takia.

3.5.3 Elektrokoagulaatio

Sähkökemiallista saostusta eli elektrokoagulaatiota (*electrocoagulation*, EC) kehitetään perinteisten alumiini- tai rautapohjaisten saostuskemikaalien korvaajaksi. Elektrokoagulaatio yhdistää perinteisen kemiallisen saostuksen ja elektrolyysin edut ja toiminnot. Menetelmän periaate on tunnettu jo yli 100 vuotta, mutta korkea sähkön ja sähkölaitteistojen hinta on aiheuttanut EC:n käytön hiipumisen. Nyt hintojen tultua alaspäin on menetelmä taas nosteessa, ja aiheesta julkaistaan lisääntyvissä määrin artikkeleita.

Elektrokoagulaatiota on erityisesti enemmän jätevesipuhdistuksessa, mutta menetelmän uskotaan soveltuvan myös talousvesipuolelle, esimerkiksi veden esikäsittelyyn ennen kalvo-suodatusta.²⁰ Menetelmä on toistaiseksi kunnallisen veden- ja jätevedenpuhdistuksen osalta tutkimusasteella, mutta se on hyvä ottaa huomioon tulevaisuuden tekniikkana. Tällä hetkellä sitä käytetään erilaisten teollisuuden jätevesien puhdistamisessa.

Suomessa menetelmää ovat kehittäneet ainakin Outotec Oyj ja Kierto Ympäristöpalvelut Oy. Kierto Ympäristöpalvelut Oy on hankkinut jatkuvatoimisen EC-laitteiston/menetelmän patentin, ja yritys kehittää menetelmää mm. teollisten jätevesien, kaivosvesien, kaatopaikkojen suotovesien sekä kunnallisten jätevedenpuhdistamoiden käyttöön. Outotec Oyj on lanseerannut moduuleihin perustuvan vesienkäsittelyratkaisun kaivosten ja metallurgisten laitosten jätevesienkäsittelyyn.

Elektrokoagulaatio perustuu sähkökemiallisen anodimetallin (alumiini tai rauta) liukenemiseen veteen/jäteveeseen, minkä seurauksena haitta-aineet poistuvat liuoksesta katodilla samanaikaisesti muodostuvien mikrokooppisten vetykuplien mukana. Elektrokoagulaation toimitusperiaate on esitetty seuraavalla sivulla olevassa kuvassa (Kuva 3-5).

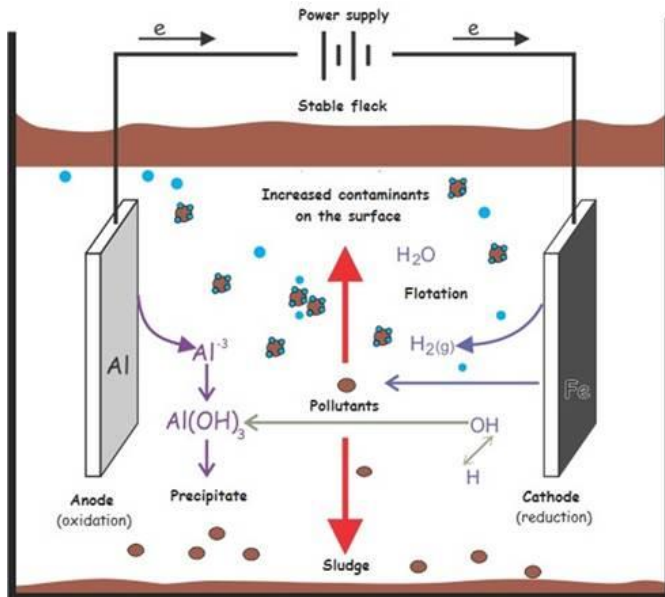
Kuten perinteisessä saostuksessa, pienikokoiset varaukselliset haitta-ainepartikkelit destabiloidaan ja agglomeroidaan (yhdistetään) suuremmiksi yhteenliittymiksi eli flokeiksi, jotka voidaan erottaa vedestä joko laskeuttamalla tai nostamalla ne pintaan erillisellä ilmakuplituksella (flotaatio). Elektrokoagulaation eduiksi verrattuna perinteiseen saostukseen lasketaan taloudellisuus (pienet investointi- ja käsittelykustannukset), ekologisuus, laitteistojen pieni koko ja helppo automatisoitavuus, hajautetun käytön mahdollisuus ja toimivuus kylmille vesille.²¹

¹⁹ Euroopan komissio, Additional Information submitted during the information exchange on Large Volume Inorganic Chemicals – Solid and Others Industry, European Commission Institute for Prospective Technological Studies Sustainability in Industry, 2005. Ks.

https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/info_exchange_LVIC-S.pdf

²⁰ Kuokkanen, V. Utilization of electrocoagulation for water and wastewater treatment and nutrient recovery: Techno-economic studies, väitöskirja, Oulun yliopisto, 2016

²¹ Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Rämö, J. ja Lassi, U. Recent applications of electrocoagulation in treatment of water and wastewater – A review, Green and Sustainable Chemistry 3, 89-121, 2013



Kuva 3-5 Elektrokoagulaation toimintaperiaate²²

3.6 Saostuskemikaalien talteenotto ja kierrätys

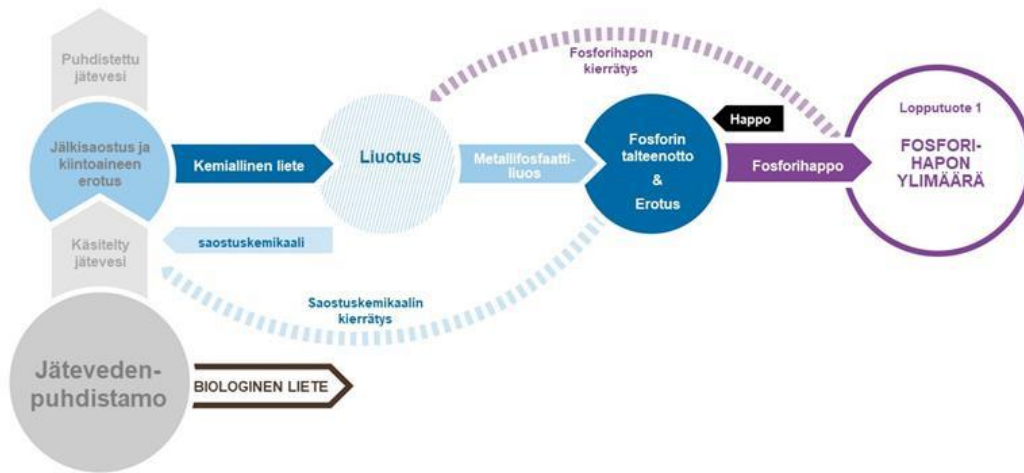
Kiinnostus saostuskemikaalien kierrätykseen on viime vuosina kasvanut. Tutkimus saostuskemikaalien talteenotosta liittyy yleensä jäteveden ja lietteen sisältämän fosforin talteenottoon. Pelkkää saostuskemikaalin talteenottoa ja regenerointia ei ole nähty kustannustehokkaana. Sekä fosforin että saostuskemikaalin talteenotto toteutetaan tyypillisesti lietetuhkasta, josta on mahdollista ottaa talteen myös rauta tai alumiini. Myös muita menetelmiä saostuskemikaalien talteenottoon on kehitetty.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY:n kehittämässä RAVITA-prosessissa (Kuva 3-6) jäteveden sisältämä fosfori otetaan talteen vesifaasista jälkisaostuksessa. Fosforin talteenotossa ensimmäisenä vaiheena on fosforin saostaminen alumiinipohjaisella saostuskemikaalilla. Saostusta tehostetaan polymeerillä, jotta muodostuneista saostumista saadaan tarpeeksi suuria. Muodostunut sakka (RAVITA-liete) erotetaan vesifaasista esimerkiksi laskeutuksella, flotaatiolla tai suodatuksella. Muodostunut RAVITA-liete kuivataan mahdollisimman kuivaksi. Tämän jälkeen kuivattu RAVITA-liete liuotetaan fosforihapolla, jolloin fosfori ja metalli saadaan liukoiseen muotoihin, ja ne voidaan erottaa toisistaan. Erotuksen jälkeen saostusmetalli voidaan kierrättää takaisin jälkisaostusosioon. Fosfori erotetaan fosforihappona.²³

²² Acson, E. Elimination of chemical oxygen demand from domestic residual water by electrocoagulation with aluminium and iron electrodes, Revista Ambiente & Água 13:5, 2018

²³ HSY, RAVITA-prosessi, Internet-sivut, 2019. Ks.

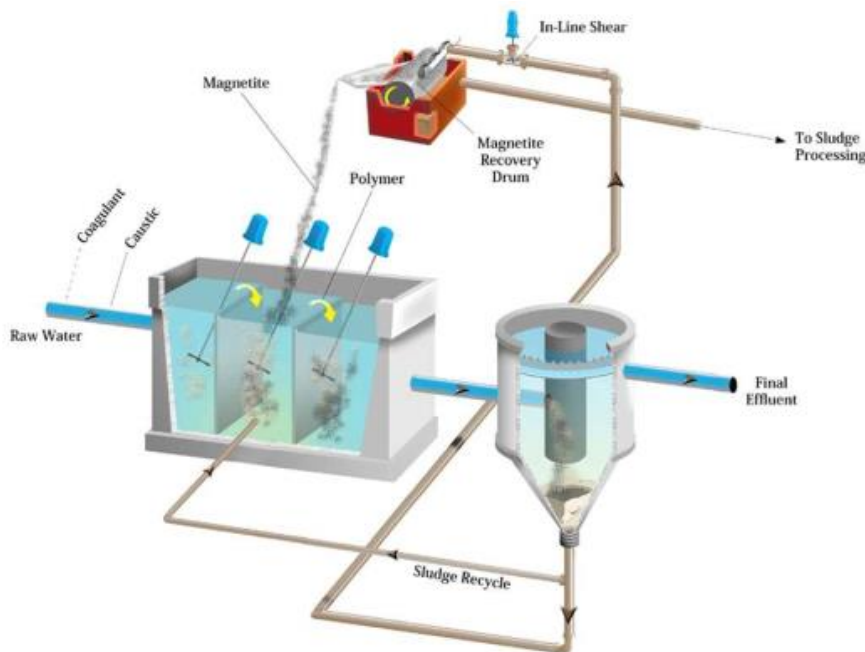
<https://www.hsy.fi/ravita/fi/tulokset/Sivut/default.aspx>



Kuva 3-6 RAVITA-prosessi²³

Hollantilaisen Wetsus-tutkimuskeskuksen ViviMag-prosessi perustuu magneettiseen erotustekniikkaan, jolla saadaan otettua talteen rauta-fosfaattimineraalia vivianiittia jätevesilietteestä. Erotusprosessi tehdään mädätysprosessin jälkeen, sillä siinä kolmenarvoinen rauta pelkistyy kahdenarvoiseksi raudaksi. Rauta(II) reagoi fosfaatin kanssa muodostaen rauta(II)fosfaattia eli vivianiittia, jonka erotus lietteestä perustuu vivianiitin magneettiseen luonteeseen. Vivianiittia voidaan hyödyntää lannoitteiden tuotannossa.²⁴

Yhdysvaltalaisen Evoquan CoMag-menetelmässä selkeytyksen avuksi lisätään magnetiittia eli rauta(II,III)oksidipartikkeleita (Fe_3O_4). Prosessi on kuvattu seuraavassa kuvassa (Kuva 3-7).



Kuva 3-7 CoMag-prosessin periaatekuva²⁵

²⁴ Wetsus, About Vivimag, Internet-sivut, 2019. Ks. <https://www.wetsus.nl/vivimag/about-vivimag>

Menetelmää voidaan soveltaa jätevedenpuhdistuksessa esi- tai tertiäärikäsittelyyn. Tässä menetelmässä Evoquan mukaan jopa 99 % magnetiitista pystytään kierrättämään prosessin sisällä. Magnetiitin kierrätys tapahtuu pohjalta pumpattavan lietteen palauttamisella talteenottorummun kautta takaisin selkeyttimeen.²⁵ Magnetiitti on inerttiä eikä siis itse saosta liukoista fosforia tai orgaanista ainesta lainkaan, vaan sen tarkoitus on lisätä flokin ominaispainoa ja parantaa kiintoaineen erottuvuutta. Magnetiitin käytöllä voidaan mahdollisesti jonkin verran vähentää saostuskemikaalien tarvetta, mutta ei korvata eikä kierrättää niitä.

Talousveden tuotannossa muodostuvan lietteen hyötykäyttöä jätevedenpuhdistukseen on tutkittu jo pitkään. Rautasakan regenerointi on mahdollista happokäsittelyllä. HSY:llä tehtiin vuonna 2018 laboratoriokokeita rautasakan regeneroinnista, mutta tulokset eivät ole olleet erityisen hyviä. Nykyään lähes kaikki talousveden tuotannossa muodostuva liete johdetaan viemäriin ja siten jätevedenpuhdistukseen.

3.7 Tavoitetila ja tiekartta

3.7.1 Tavoitetilan määrittely

Taulukossa 3-2 on määritetty saostuskemikaalien huoltovarmuuden tavoitetila Suomen vesihuollossa.

Taulukko 3-2 Saostuskemikaalien huoltovarmuuden tavoitetila

Kriittisten kemikaalien varastoinnin lisääminen	<p>Vesihuoltolaitosten omien ja laitosten yhteisten varmuusvarastojen perustaminen</p> <p>Tarvittavan varastointitason määrittäminen</p> <p>Toimiva varastointi ja toimitusketju</p>
Kilpailudynamiikan parantaminen	<p>Tarjoajien riittävän suuren määrän mahdollistaminen</p> <p>Vesihuoltolaitosten yhteistyö hankinnoissa</p>
Selkeä roolitus	<p>Vastuun ja kustannusten jakautuminen, erityisesti vesilaitoslähtöisessä huoltovarmuusvarastoinnissa</p> <p>Yhteistyön lisääminen vesihuoltolaitosten kesken sekä vesihuoltolaitosten ja viranomaisten ja kemikaalitoimittajien kanssa</p> <p>Hankintasopimusten kehittäminen</p> <p>Viranomaisten yleissuunnitelma toimenpiteistä kemikaalien toimintahäiriöiden aikana: mm. talousveden tuotannon priorisointi, jäteveden puhdistuksen taso, viestinnän järjestäminen</p>

²⁵ Evoqua, The CoMag system for enhanced primary or tertiary treatment, Internet-sivut, 2019. Ks. <https://www.evoqua.com/en/brands/Envirex/Pages/comag.aspx>

3.7.2 Tiekartta

Tavoitetilan saavuttamiseksi tärkeintä on jatkuvuudenhallinnan kehittäminen. Vesihuoltolaitoksilla tulee olla käytännönläheiset varautumissuunnitelmat, joissa huomioidaan mm. saostuskemikaalien hankinta, varastojen riittävyys, kemikaalin vaihto ja tarvittavat muutokset laitteistoon, automaation ym. sekä harjoittelu. Varastokapasiteettitarpeet tulee selvittää ja määrittellä esimerkiksi kansallisiin suunnitteluohjeisiin. Ohjeita varautumiseen on annettu talousveden tuotantoon liitteessä 1 ja jätevedenpuhdistukseen liitteessä 2.

Vesihuollon kannalta kriittisiin kemikaaleihin liittyvien riskien tunnistaminen, arviointi ja hallinta tulee sisällyttää olemassa oleviin varautumissuunnitelmiin. Kriittisten kemikaalien saatavuuteen liittyvien riskien arviointi ja hallinta tulisi sisällyttää WSP- ja SSP-kysymyksiin.

Talousveden tuotannon ja jätevedenpuhdistuksen kriittisten prosessien joustavuus tulee huomioida nykyistä paremmin suunnittelussa. Riippuvuutta yhdestä kemikaalista tai prosessivaiheesta tulisi välttää.

Vesihuoltolaitoksille suositellaan yhteistyömallia, jossa kriittisten saostuskemikaalien varmuusvarastointi järjestetään vesihuoltolaitosten keskinäisellä yhteistyöllä. Omia varastoja voidaan perustaa tuotteille tai raaka-aineille. Tarvittaessa myös kemikaalihankinta voidaan järjestää vesihuoltolaitosten yhteisten hankintarenkaiden kautta. Hankintarengas voisi olla vastuussa kemikaalihankintojen kilpailuttamisesta ja hajauttamisesta eri toimijoille. Yleisesti hankintasopimuksia tulee kehittää siten, että kemikaalitoimittaja sitoutuu toimittamaan vaihtoehtoista kemikaalia, jos varsinaista kemikaalia ei voida toimittaa. Hankintojen kehittämisessä voidaan hyödyntää SOPIVA-suosituksia ja mallisopimuslausekkeita²⁶.

Yhteistyötä vesihuoltolaitosten välillä tulee lisätä. Yhteisten varastojen lisäksi vesihuoltolaitokset voisivat järjestää esim. kiinteiden saostuskemikaalien alueellista liuotusta, mikäli laitoksilta puuttuu omat liuotusjärjestelmät. Myös yhteistyö kemikaalitoimittajien kanssa on tärkeää ostoketjun hallinnan, harjoittelun ja hankintojen kehittämisen kannalta.

Hankkeessa tunnistettiin myös tarve kansallisille suosituksille toiminnasta vakavan saostuskemikaalien saatavuusongelman varalle. Laitokset tulisi velvoittaa järjestämään riittävä varasto kriittisistä kemikaaleista. Lisäksi akuutissa saostuskemikaalien toimituskatkossa tarvittavaan säännöstelyyn ja priorisointiin veden- ja jätevedenpuhdistuksen välillä on laadittava kansalliset ohjeistukset.

Vaihtoehtoisten saostuskemikaalien tutkimusta ja testaamista tulee jatkaa. Laitoksilla tulee testata vaihtoehtoisia kemikaaleja osana varautumista. Uusien kierrätyspohjaisten saostuskemikaalien tuotannosta mahdollisista kotimaisista raaka-aineista on tehtävä erillinen selvitys. Uusien kierrätyspohjaisten saostuskemikaalien tai muiden vaihtoehtoisten kemikaalien pääsyä markkinoille voidaan helpottaa nykyisestä esim. varmuusvarastoinnin kustannuksia jakamalla. Pienten toimijoiden pääsyä markkinoille voidaan edistää myös hajauttamalla hankintoja useammalle toimijalle.

²⁶ SOPIVA-suositukset sopimukseen perustuvaan varautumiseen. Ks. <https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/sopiva/>

4 TALOUSVEDEN TUOTANTO

4.1 Johdanto

Kemiallinen saostus on yksi tärkeimmistä prosesseista tuottaessa hyvälaatuista ja turvallista talousvettä. Huoltovarmuuden parantamiseksi vesilaitosten omaa varautumista tulee lisätä. Lyhyellä aikavälillä tämä tehdään turvaamalla kemiallinen saostusprosessi. Pidemmällä aikavälillä huoltovarmuuden parantamisen vaihtoehtoja on enemmän, ja tuotannon turvaamisen toimenpiteet edellyttävät hyvissä ajoin aloitettua kehittämis- ja investointisuunnittelua.

Lyhyen aikavälin toimenpiteet
<ul style="list-style-type: none">• Turvataan kemiallinen saostus vaihtoehtoisella kemikaalilla• Lisätään kriittisten kemikaalien varastointia
Pitkän aikavälin toimenpiteet
<ul style="list-style-type: none">• Lisätään prosessien joustavuutta kemikaalien toimitushäiriötilanteissa

4.2 Lyhyen aikavälin toimenpiteet

Huoltovarmuutta voidaan parantaa lyhyellä aikavälillä:

- mahdollistamalla vaihtoehtoisen kemikaalin annostelu, jolloin vähennetään riippuvuutta yhdestä kemikaalista
- lisäämällä kriittisten kemikaalien varastointia akuuttitilanteita varten (yhden tai useamman vesilaitoksen omistamat varastot).

Tunnista tarve varautua akuuttitilanteisiin etukäteen. Akuuttitilanteella tarkoitetaan äkillistä kemikaalin toimituskatkoa esimerkiksi lakkotilanteesta johtuen.

Arvioi tarve lisätä nykyisen kemikaalin varastointikapasiteettia, jotta kemikaalia riittää myös mahdollisessa toimituskatkotilanteessa (esimerkiksi 2–4 viikkoa). Keskustele lähivesilaitosten kanssa yhteisen kemikaalivaraston tarpeesta ja hankintaringin perustamisesta.

Ferrisulfaattia käytävillä laitoksilla voidaan nopeasti siirtyä käyttämään nestemäistä alumiinisulfaattia, mikäli ferrisulfaattia ei ole saatavilla. Ferrisulfaatista ferrikloridiin ja polyalumiinikloridiin siirtyminen edellyttää erillisiä varastointi- ja annostelujärjestelmiä.

Liitteeseen 1 on koottu varautumisohjeet pintavesilaitoksille.

4.3 Pitkän aikavälin toimenpiteet

4.3.1 Saostuskemikaalimäärien vähentäminen kemiallisessa saostuksessa

Saostuskemikaalin käyttömäärä on riippuvainen ominaiskulutuksesta (g/m^3) sekä tuotettavasta vesimäärästä. Ominaiskulutuksen määrittää raakaveden sisältämä orgaanisen aineen määrä ja laatu. Kemiallisessa saostuksessa saadaan poistettua erityisesti suuren molekyylikoon

aromaattisia hydrofobisia humusyhdisteitä. Poistotehoa voidaan yleisesti arvioida SUVA-arvon²⁷ perusteella. Mitä suurempi SUVA-arvo on, sitä parempi on orgaanisen aineen kokonaispoistoteho²⁸.

Pohjoismaissa tehdyn tutkimuksen¹ perusteella orgaanisen aineen (NOM) pitoisuuksien on arvioitu lisääntyvän pintavesissä 15–25 % vuoteen 2100 mennessä johtuen useista tekijöistä, mm. yleisestä lämpötilan noususta, sitä seuraavasta jääpeitekauden lyhenemisestä ja sademäärien lisääntymisestä. Orgaanisen aineen laatuun vaikuttavat mm. viipymät vesistöissä. Viipymien lyheneminen vesistöissä lisää helpommin saostuksessa erottuvan hydrofobisen orgaanisen aineen osuutta.²⁹

Suomen talousvesien orgaanisen aineen pitoisuus on alhainen, mikä ehkäisee haitallisten sivutuotteiden muodostumista klooridesinfioinnissa. Maassa on tyypillisesti pitkiä verkosto-osuuksia ja verkosto on ikääntynyttä. Talousveden mahdollisimman pienellä orgaanisen hiilen määrällä hallitaan verkostossa tapahtuvaa mikrobikasvua, biofilmin muodostusta sekä verkostokorroosiota. Hyvän ja yleensä lainsäädännön vaatimuksia korkeamman talousveden laadun turvaaminen on ensiarvoisen tärkeää vesihuoltolaitoksille, eikä laadusta olla valmiita tinkimään.

Kun tuotetun veden laatu halutaan pitää vähintään samalla tasolla kuin nykyään ja samanaikaisesti raakavesien orgaanisen aineen pitoisuuksien arvioidaan nousevan, voidaan todeta, että ominaiskulutusta ei pystytä tulevaisuudessa pienentämään. Laitoksilla voi olla yksittäistä säätö- ja optimointivaraa, jolla ominaiskulutusta voidaan säätää ja jopa pienentää, mutta isossa mittakaavassa tällä ei ole kemikaalimääriä pienentävää vaikutusta.

Kemiallista saostusta käyttävät pintavesilaitokset tai kemiallista saostusta tekopohjaveden esikäsitteilynä käyttävät laitokset vastaavat Suomessa suurten kaupunkien talousveden tuotannosta. Tehtyjen ennusteiden mukaan nämä kaupunkiseudut (pääkaupunkiseutu, Tampereen, Turun, Oulun ja Jyväskylän seudut) tulevat edelleen kasvamaan ja asutus tiivistymään.³⁰ Tämä johtaa siihen, että jatkossa kemiallisella saostuksella tuotetun veden määrä ei tule vähenemään, eikä sitä kautta kemikaalien kulutus tule pieneneään.

Johtopäätökset
Saostuskemikaalien käytön vähentäminen nykyisissä prosesseissa ei ole pitkällä tähtäimellä mahdollista, koska
➤ veden laadusta ei haluta tinkiä, vaan orgaanisen aineen poistotehon tulee olla hyvä myös tulevaisuudessa
➤ saostuskemikaalien ominaiskulutus ei tule pieneneään, vaan päinvastoin kasvamaan raakaveden orgaanisen aineen pitoisuuksien nousun myötä: annostelun optimointi mahdollista yksittäisissä kohteissa, mutta tällä ei valtakunnallista merkitystä
➤ kokonaisvedenkulutus kasvaa kaupunkikeskuksissa, joissa talousveden tuotannossa käytetään kemiallista saostusta

²⁷ SUVA, ominaisultraviolettia absorbanssi (*specific UV absorbance*), UV₂₅₄/DOC

²⁸ Edzwald, J.K. *Water Quality and Treatment, A Handbook on Drinking Water*, 6. painos, 2011

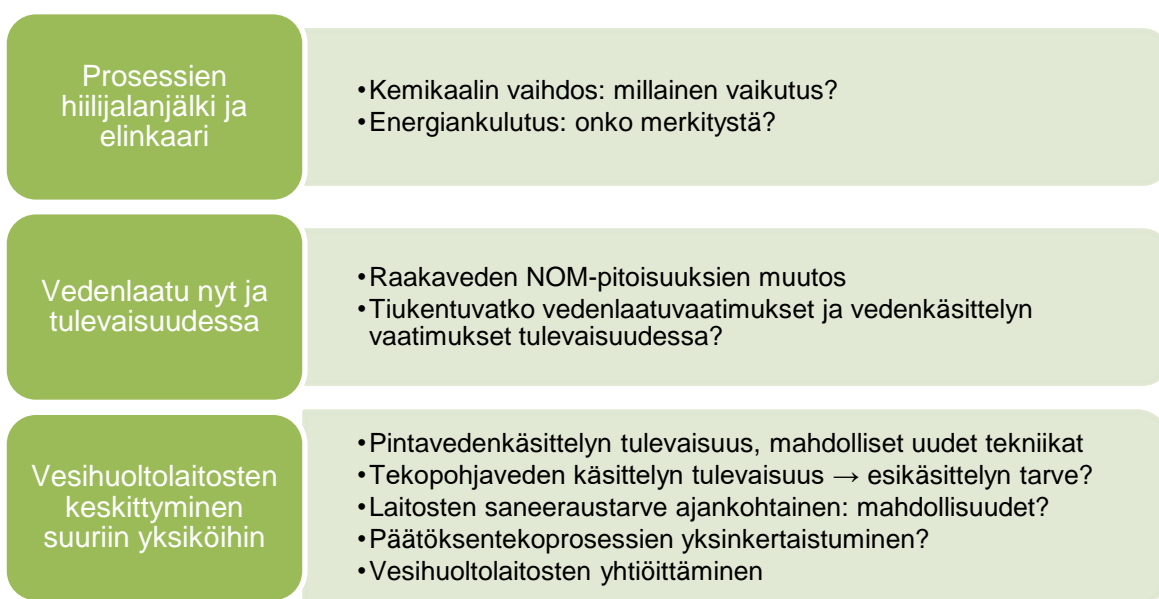
²⁹ Forsius, M., Räike, A., Huttunen, I., Poutanen, H., Mattsson, T., Kankaanpää, S., Kortelainen, P. ja Vuorilehto, V.-P. Observed and predicted future changes of total organic carbon in the lake Päijänne catchment (southern Finland): Implications for water treatment of the Helsinki metropolitan area, *Boreal Environment Research* 22, 317-336, 2017

³⁰ Silfverberg, P., *Vesihuollon suuntaviivat 2020-luvulle, Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 44*, 2017

4.3.2 Tulevaisuuden päätöksentekokriteerit

Pitkällä aikavälillä on mahdollista korvata saostuskemikaaleja uusilla tekniikoilla tai ottaa uusia tekniikoita saostuksen rinnalle, mikä vähentää saostuskemikaalien tarvetta ja siten lisää joustavuutta. Uusia pintavesilaitoksia tai vanhojen laitosten saneerausta suunniteltaessa tulee muuttaa ajattelutapaa nykyisestä. Kriittisiä prosesseja ei voi suunnitella yhden kemikaalin varaan, vaan suunnittelussa tulee huomioida puhdistusprosessin joustavuus.

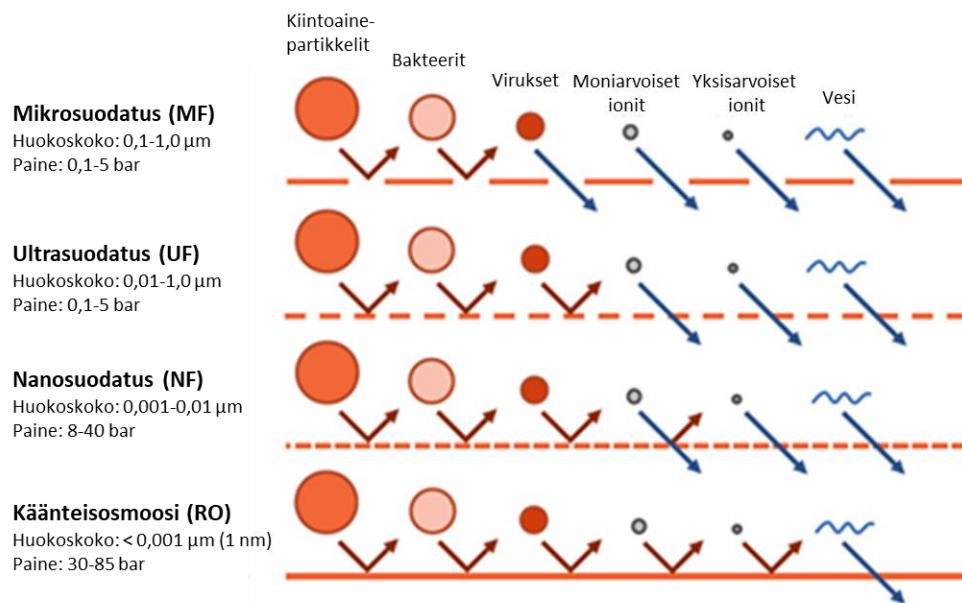
Saostuskemikaalien käytön vähentäminen tai korvaaminen vaihtoehtoisilla tekniikoilla voi riippua raakaveden NOM-pitoisuuksien muutoksesta tai muista tekijöistä, kuten halusta edelläkävijyyteen tai hiilijalanjäljen pienentämiseen. Vaihtoehtoisten tekniikoiden valintaan vaikuttavat myös talousveden tuotannon yleiset trendit, jotka on listattu alla (Kuva 4-1). Tulevaisuudessa uusien tekniikoiden käyttöönottoon vaikuttavia päätöksentekokriteereitä ovat toimintavarmuus, huoltovarmuus ja elinkaariarviointi. Muita tärkeitä tekijöitä ovat mm. energiatehokkuus, muutokset raakavedessä sekä kapasiteettitarve.



Kuva 4-1 Yleisiä trendejä talousveden tuotannossa

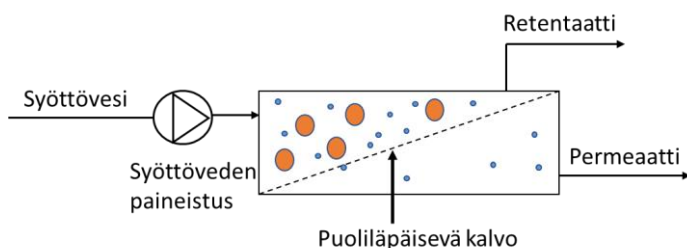
4.3.3 Kalvotekniikat

Kalvosuodatusta voidaan käyttää useissa eri vaiheissa talousveden tuotantoprosessia ja erilaisiin käyttötarkoituksiin riippuen raakaveden laadusta, käsittelyn tavoitteesta ja prosessin muista osista. Kalvosuodatus jaetaan kalvon tyyppin mukaan mikro-suodatukseen (MF), ultrasuodatukseen (UF), nanosuodatukseen (NF) ja käänteisosmoosiin (RO) (Kuva 4-2). Karkeasti luokiteltuina mikro- ja ultrasuodatus poistavat vedestä partikkelimuotoiset epäpuhtaudet, nanosuodatus myös liuennan orgaanisen aineksen ja moniarvoiset ionit, ja käänteisosmoosi lisäksi kaiken ionimuotoisen aineksen. Kaikki kalvosuodatustekniikat parantavat myös veden mikrobiologista laatua poistaen vedestä bakteereja, alkueläimiä ja leviä. Pienemmän huokoskoon kalvot ultrasuodatuksesta alaspäin poistavat myös viruksia.



Kuva 4-2 Kalvosuodatuksen tyypit³¹

Kalvosuodatuksessa vesi johdetaan puoliläpäisevän materiaalin läpi paineen avulla, jolloin osa epäpuhtauksista jää kalvolle (Kuva 4-3). Kalvon läpäissyttä vettä kutsutaan permeaatiksi. Useimmissa kalvosuodatusprosesseissa vain osa vedestä puristuu kalvon läpi, ja kalvon syöttöpuolelta poistetaan retentaattivesi, joka sisältää kalvoille pidäytyneet ainekset.



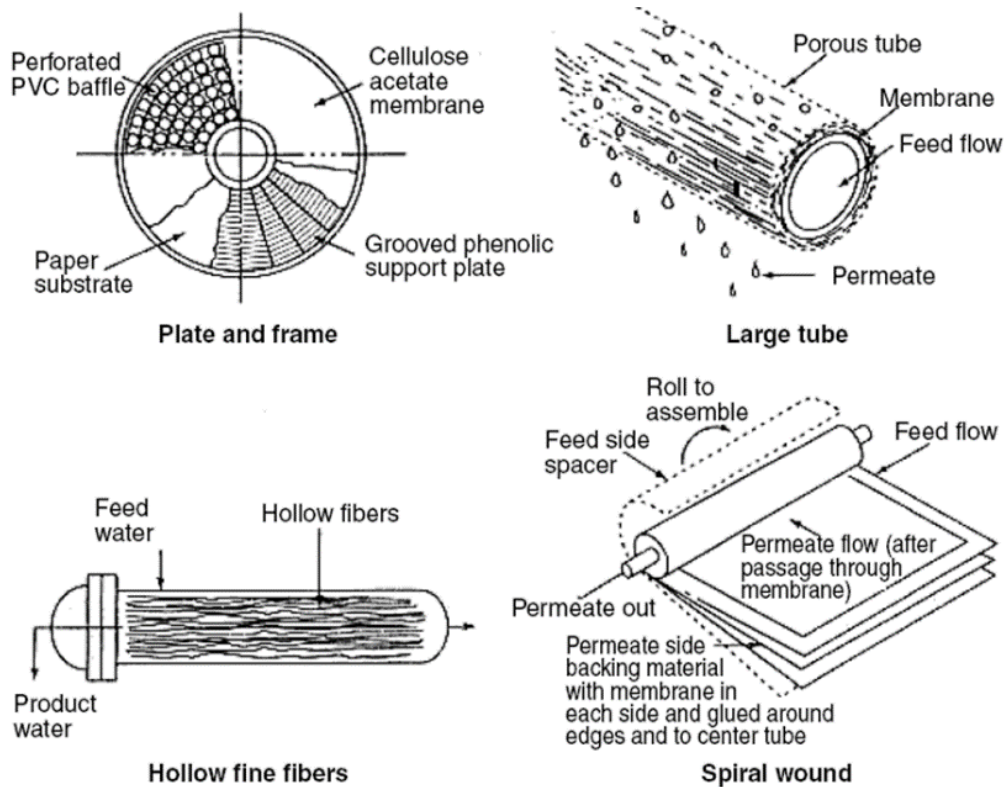
Kuva 4-3 Kalvosuodatuksen periaate

Kalvomateriaalit, kalvomoduulien rakenteet, prosessien operointi sekä prosessikonaisuudet vaihtelevat huomattavasti eri tekniikoiden ja sovelluskohteiden välillä, vaikka kalvosuodatuksen perustoimintaperiaate onkin sama.

Kalvojen asennustavat

Kalvot voidaan asentaa kahdella eri tavalla, joko moduuleihin pakattuina tai upotettuina. Moduuleihin pakattuihin kalvoihin johdetaan vesi paineella, ja asennus vaatii putkitukset sekä ennen moduuleita että niiden jälkeen. Moduuleihin pakattuja kalvoja on saatavissa useita eri tyyppisiä (Kuva 4-4). Tyyppisiä ovat onttokuitu (*hollow fibre*), spiraali (*spiral wound*), putki (*tube*) ja levyäinen (*plate and frame*). Moduuleita valmistetaan pysty- ja vaaka- asenteisina.

³¹ Akvafresh, Membrane filtration, Internet-sivut, 2019. Ks. <https://www.akvafresh.no/en/membrane-filtration/>



Kuva 4-4 Moduuleihin pakattujen kalvojen asennustavat³²

Upotettujen kalvojen paine-ero saadaan aikaan imupuolen pumppauksella, ja putkituksia vaaditaan ainoastaan kalvojen jälkeen. Upotettujen kalvojen käytettävissä oleva painealue on kapeampi johtuen siitä, että järjestelmä on riippuvainen ympäröivän ilman paineesta. Moduulirakenteisissa kalvoissa painetta rajoittaa kalvojen paineensieto, mikä mahdollistaa suuremmat paine-erot ja antaa sitä kautta mahdollisuuksia prosessin ohjaamiseen erilaisissa olosuhteissa ja vedenlaadun muuttuessa. Tästä on hyötyä muun muassa operoitaessa kalvoja kylmillä vesillä, jolloin viskositeetti on korkeampi. Upotettujen kalvojen suodatettu vesimäärä kalvopinta-alaa kohden on tyypillisesti moduulirakenteisia pienempi.³³

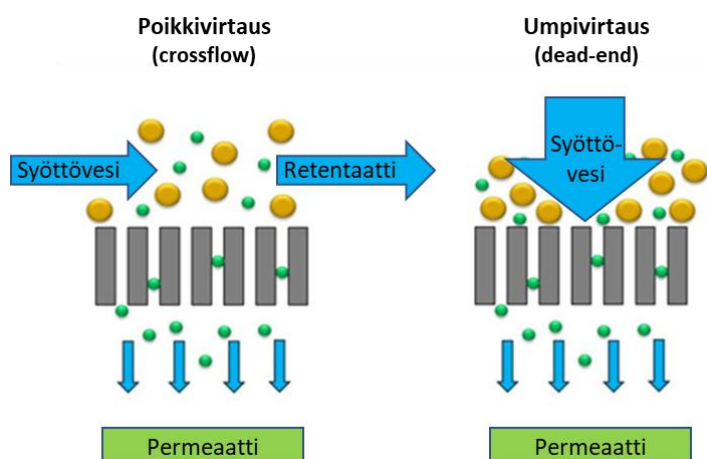
Virtaustavat

Veden virtaus voidaan toteuttaa kalvoissa joko poikkivirtauksena (*crossflow*) tai umpivirtauksena (*dead-end*) (Kuva 4-5). Poikkivirtauksessa permeaattiin päätyy yhdessä modulissa vain noin 25 % käsiteltävästä vedestä, ja loput johdetaan takaisin syöttövedeksi. Umpivirtauksessa käsitellään kerralla koko syötetty vesimäärä. Poikkivirtaus sopii erityisen hyvin vesille, jossa on paljon kalvoa tukkivia partikkeleita, kun taas umpivirtaus soveltuu parhaiten vähän

³² Forwardosmosistech, The 4 different designs of forward osmosis (FO) membrane modules, Internet-sivut, 2019. Ks. <https://www.forwardosmosistech.com/the-4-different-designs-of-forward-osmosis-fo-membrane-modules/>

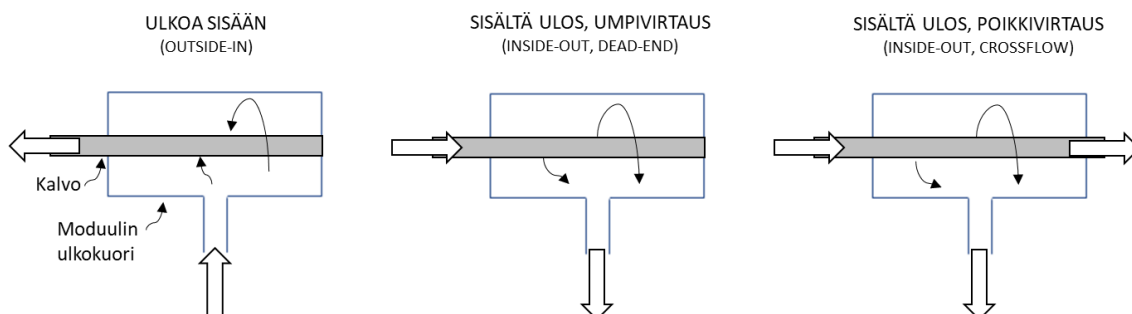
³³ Swiezbin, J. Membrane systems: pressurized vs. submerged. Comparing the benefits of pressurized 6 submerged UF/MF membrane systems. WQP Magazine 3.2.2017. Ks. <https://www.wqpmag.com/membranes/membrane-systems-pressurized-vs-submerged>

partikkeleita sisältävälle vedelle. Poikkivirtausta käytetään useimmiten nanosuodatus- ja käänteisosmoosikalvoilla, kun taas umpivirtaus on yleisempi mikro- ja ultrasuodatuksessa.³⁴



Kuva 4-5 Virtaustavat kalvosuodatuksessa

Virtaussuunta voi olla joko kalvorakenteen sisältä ulos (*inside-out*) tai ulkoa sisään (*outside-in*) (Kuva 4-6). Virtaussuuntaa ulkopuolelta sisäpuolelle käytetään kaikissa upotetuissa kalvoissa ja jossakin moduulikalvoissa. Ulkopuolelta sisäpuolelle suuntautuvan virtauksen etu on ulkopuolen suurempi pinta-ala, minkä vuoksi virtaama kalvon läpi voi olla suurempi.



Kuva 4-6 Virtaussuunnat kalvosuodatuksessa³⁵

Kalvomateriaalit

Kalvomateriaaleja on olemassa useita eri tyyppiä. Materiaalien tärkeimmät ominaisuudet ovat materiaalin kyky hylkiä vettä/imeä vettä itseensä (hydrofobisuus/hydrofiilisyy), huokoisuus ja huokoskoko, kestävyys, kemikaalien sietokyky ja hinta. Vedenkäsittelyssä käytetään tyypillisesti hydrofiilisiä kalvoja. Yleisimmin käytetyt kalvomateriaalit ovat polymeerikalvot, kuten selluloosa-asetatti (*cellulose acetate, CA*) ja synteettiset polymeerit kuten PVDF, PS, PES, PVP ja PP. Lisäksi markkinoilla on saatavilla keraamisia kalvoja, jotka ovat

³⁴ Laurell, P. Retrofitting a water treatment plant with low pressure membranes – Preliminary study on retrofitting Pitkäkoski water treatment plant, diplomityö, Aalto-yliopisto, 2013

³⁵ Crittenden, J., Trussell, R., Hand, D., Howe, K. ja Tchobanoglous, G. Membrane filtration in Water Treatment – Principles and Design, 2. painos, 2005

hyvin kestäviä ja soveltuvat myös mm. otsonia sisältäville vesille, mutta niiden pakkaustiheys on huomattavasti matalampi kuin polymeerikalvojen.

Kalvojen tukkeutuminen ja puhdistaminen

Kalvojen tukkeutuminen on merkittävimpiä haasteita kalvojen käytössä. Kalvojen tukkeutuminen aiheuttaa suodatettavan vesivirran pienentymistä ja nostaa kalvon paine-eroa. Toisaalta kalvolle kertyvä aines parantaa yleensä suodatuksen tehokkuutta ja siten permeaatin laatua. Tukkeutuminen voi olla palautuvaa (*reversible*), tai palautumatonta (*irreversible*). Kalvon puhdistuksella voidaan poistaa palautuva tukkeutuminen.

Merkittävimpiä tukkeutumista aiheuttavia materiaaleja ovat kolloidit ja epäorgaaniset yhdisteet, veden mikro-organismit ja humusyhdisteet (NOM). Kolloideja vedessä ovat esimerkiksi savi ja siltti, orgaaniset kolloidit saostunut rauta ja alumiini ja korroosiotuotteet. Kolloidit aiheuttavat tukkeutumista tarttumalla kalvon pinnan tukkeumakerrokseen, tukkimalla huokosia ja imeytymällä huokosten sisään. Epäorgaaniset aineet tukkivat kalvoa saostuessaan kalvon pinnalle suodatuksen yhteydessä tapahtuvan hydrolyysin tai hapettumisen kautta.

Mikro-organismit aiheuttavat tukkeutumista muodostamalla biofilmejä. Biofilmi alkaa muodostua, kun mikrobit tarttuvat kalvon pinnalle ja alkavat kasvaa hyödyntäen tulevan veden ravinteita. Biofilmin muodostumiseen vaikuttaa vedessä olevan orgaanisen hiilen määrä, minkä ohella vaihtelevat olosuhteet, kuten hapen pitoisuus ja nitraatin määrä vedessä edesauttavat biofilmin muodostumista.

Kalvojen tukkeutumista estetään prosessiin syötettävän veden esikäsitteilyllä ja tukkeutuneiden kalvojen toiminta voidaan palauttaa kalvojen säännöllisellä puhdistamisella, joka voidaan toteuttaa mekaanisesti tai kemiallisesti. Mekaaninen puhdistus tapahtuu tyypillisesti vastavirtapesuna vedellä tai vedellä ja paineilmalla keskimäärin 30–120 min välein. Vastavirtapesu tehdään usein suodatetulla vedellä ulkoa sisäänpäin suodattavissa järjestelmissä, kun taas sisältä ulospäin suodattavissa järjestelmissä tyypillisesti käytetään veden ja ilman yhdistelmää. Upotetuissa järjestelmissä voidaan käyttää pelkkää ilmahuuhtelua, mutta vettä voidaan käyttää pesun tehostamiseksi. Spiraalimoduuleissa ei voida käyttää vastavirtahuuhtelua, vaan kalvot huuhdellaan lisäämällä tangentiaalista virtausta kalvon syöttöpuolella.

Yleensä pesu aloitetaan, kun paine-ero kasvaa kriittistä arvoa suuremmaksi, mutta myös ajastettua tai tuotetusta permeaatin määrästä riippuvaa pesua voidaan käyttää. Kemiallisella puhdistuksella pyritään poistamaan tukkeutumista aiheuttava aines sitten, kun vastavirtapesulla ei voida enää puhdistaa kalvoa kyllin puhtaaksi. Kemikaaleja lisätään tyypillisesti vastavirtapesuun (*chemically enhanced backwashing*, CEB). Useimmiten pesu tapahtuu ilman kalvojen siirtämistä, mutta joissakin tapauksissa kalvoelementit voidaan poistaa ja puhdistaa erillään asennuksesta. Kemiallinen puhdistus lyhentää tyypillisesti kalvojen elinikää.

Pesukemikaalit valitaan suodatettavan veden ja käytetyn kalvomateriaalin mukaisesti, koska kalvomateriaaleilla on erilainen kemikaalien sietokyky. Yleisesti käytettyjä pesukemikaaleja ovat laimeat hapot (0,2–1,0 p-% suola-, rikki- tai sitruunahappo) ja emäkset (pH 10, lipeä tai hypokloriitti).

Kalvosuodatus osana vedenpuhdistusprosessia

Kun harkitaan vaihtoehtoja saostuskemikaalien vähentämiselle tai kokonaan korvaamiselle, kalvotekniikoista soveltuvimmat vaihtoehdot ovat ultra- ja nanosuodatus. Seuraavassa taulukossa (Taulukko 4-1) on vertailtu menetelmiä keskenään.

Taulukko 4-1 Ultra- ja nanosuodatuksen vertailu

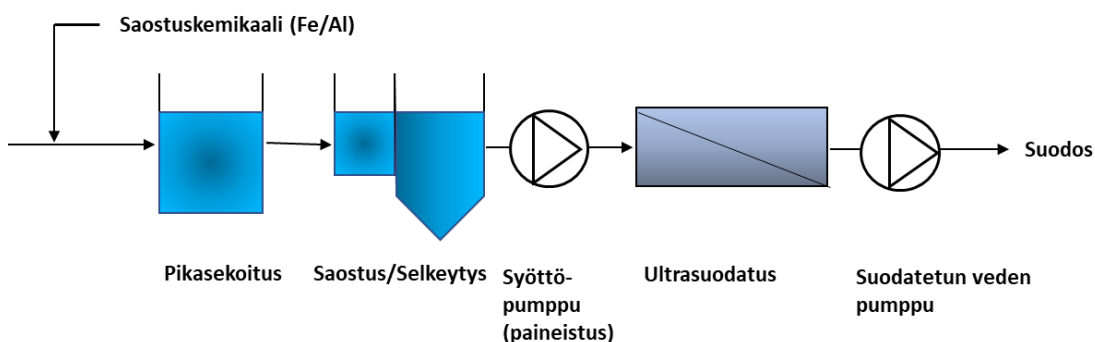
	Ultrasuodatus	Nanosuodatus
Huokoskoko	0,01–1,0 µm	0,001–0,01 µm
Kalvotyyppi	Matalapaineikalvo	Korkeapaineikalvo
Yleisin kokoonpano	Onttokuitu	Spiraali
Yleisin virtaustyyppi	Umpivirtaus (<i>dead end</i>)	Poikkivirtaus (<i>crossflow</i>)
Tyypillinen paine (<i>Trans membrane pressure TMP</i>)	0,2...1 bar	5...55 bar
Tyypillinen permeaattivuo	130...170 l/m ² h	1...50 l/m ² h
Tyypillinen käyttökohde	Korvaa prosessissa selkeytyksen ja/tai suodatuksen, poistaa alkueläimiä, viruksia ja bakteereita	Korvaa kemiallisen saostuksen, selkeytyksen ja suodatuksen, poistaa alkueläimiä, viruksia ja bakteereita
Kalvojen puhdistus	Useita päivittäisiä vastavirtapesuja, lisäksi kemiallinen pesu n. kerran vuorokaudessa + liuotuspesuja ajoittain	Jatkuva virtaus puhdistaa kalvon pintaa normaaliolosuhteissa. Kemiallisia pesuja 1–4 kertaa kuukaudessa (muutamana tunnin liuotuspesuja).
Rejektivesimäärät	Rejektivettä syntyy kalvoja pestessä suuria määriä kerralla.	Rejektivettä syntyy tasaisesti.
Tyypillinen saanto pintavesien käsittelyssä	85–95 %	80–90%, riippuvainen ketjussa olevien suodattimien lukumäärästä
NOM-poistoteho	Orgaanisen aineen poistoteho heikko ilman kemiallista saostusta. Jos esikäsittelynä saostus ja selkeytys, voi poistoteho olla jopa 65–75 %	60–90 %, tiukoilla kalvoilla ei tarvetta saostuskemikaaleille
Huoltovarmuus	<p>Kalvojen käyttöikä jopa yli 10 vuotta.</p> <p>Umpivirtausmoduulit ovat harvoin toisen toimittajan systeemiin sopivia.</p> <p>Useita moduulivalmistajia, mutta muutos yhdestä valmistajasta toiseen saattaa vaatia investointeja.</p> <p>Ultrasuodatuksessa on jatkuva sähköntarve, lisäksi tarvitaan esikäsittely (mahdollinen tarve saostuskemikaaleille) sekä pesukemikaaleja (ks. kohta <i>Kalvojen tukkeutuminen ja puhdistaminen</i>)</p>	<p>Kalvojen käyttöikä 5–7 vuotta.</p> <p>Poikkivirtausmoduulit ovat hyvin standardoituja. Yhden toimittajan membraanin vaihtaminen toiseen onnistuu pelkästään sovitteita vaihtamalla. Membraanimateriaalien välillä on kuitenkin suuria eroja. Sekä membraanien että moduulien valmistajia on useita.</p> <p>Nanosuodatuksessa on jatkuva sähköntarve, lisäksi tarvitaan pesukemikaaleja (ks. kohta <i>Kalvojen tukkeutuminen ja puhdistaminen</i>)</p>

Kalvosuodatusta voidaan käyttää useissa eri vaiheissa prosessia ja erilaisiin käyttötarkoituksiin riippuen raakaveden laadusta, käsittelyn tavoitteesta ja prosessin muista osista. Yleisimmin kalvosuodatusta käytetään joko korvaamaan selkeytys ja/tai hiekkasuodatus, tai perinteisen käsittelyn (saostus, selkeytys, suodatus) jälkeen lähtevän veden laadun varmistamiseksi.

Norjassa käytetään nanosuodatusta humuksen poistoon pintavesistä. Maassa on yli 100 nanosuodatusta käyttävää pienehköä laitosta. Tyypillinen kalvojen huokoskoko on 1,5–5 nm (1–20 kD), materiaali selluloosa-asetaatti ja kalvotyyppi spiraalikalvo. Raakaveden TOC-pitoisuus on 3–6 mg/l. Tyypillinen prosessi koostuu raakaveden siivilöinnistä, nanosuodattuksesta ja kalkkikivialkaloinnista.³⁶ Norjan lisäksi vastaavia kalvoja käytetään humuksen poistoon Pohjois-Amerikassa sekä Skotlannissa. Ranskassa nanosuodatusta käytetään Mery-sur-Oisen pintavesilaitoksella torjunta-aineiden poistoon.³⁷

Ultrasuodatusta käytetään pintavesien humuksen poistoon mm. Pohjois-Amerikassa ja Skotlannissa. Ruotsissa Göteborgissa ultrasuodatuksella tehostetaan laitoksen mikrobiologista poistotehoa.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 4-7) on esitetty tyypillinen ultrasuodatusprosessikaavio. Ultrasuodatusta edeltää useimmiten kemiallinen saostus- ja selkeytysvaihe. Saostuskemikaalin voi syöttää myös putkeen (ns. *inline coagulation*) ennen ultrasuodatusta, jolloin selkeytysvaihe jää kokonaan pois.³⁸



Kuva 4-7 Tyypillinen ultrasuodatusprosessi³⁹

Tyypillisessä nanosuodatusprosessissa (Kuva 4-8) on usein asennettu useampi kalvo peräkkäin. Vain osa vedestä virtaa kalvon läpi (permeaatti), loput jatkavat rejektivetenä seuraavalle kalvolle. Lopulta konsentroitunut suodattamaton vesi johdetaan jätteenkäsittelyyn.

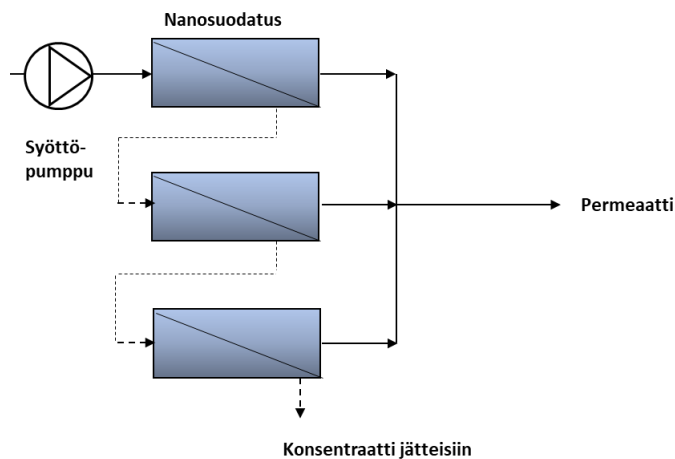
³⁶ Ødegaard, H., Thorsen, T. and Melin, E. Practical experiences from membrane filtration plants for humic substance removal, *Water Science & Technology* 41, 33-41, 2000

³⁷ Pearce, G.K. Nifty Nanofiltration: New developments show promise, *Water & Wastewater International*, 2011. Ks.

<https://www.waterworld.com/international/desalination/article/16202187/nifty-nanofiltration-new-developments-show-promise>

³⁸ Keucken, A., Heinicke G., Persson K., Köhler S. Combined Coagulation and Ultrafiltration Process to Counteract Increasing NOM in Brown Surface Water, *Water* 9, 697, 2017

³⁹ Muokattu lähteestä: United States Environmental Protection Agency (EPA), Drinking water treatability database, Internet-sivut, 2019. Ks. <https://iaspub.epa.gov/tdb/pages/treatment/treatmentOverview.do>



Kuva 4-8 Tyypillinen nanosuodatusprosessi³⁹

Kalvosuodatuksen etuina sekä ultra- että nanosuodatuksessa ovat:

- tasainen ja hyvä lähtevän veden laatu riippumatta tulevan veden laadusta
- hyvä mikrobiologinen poistoteho
- pieni tilantarve
- pitkälle automatisoitu prosessi
- helppokäyttöisyys.

Nanosuodatuksen etuna on ultrakalvoihin verrattuna se, että saostuskemikaalin käytöstä voidaan luopua kokonaan (100 % säästö) ja vastaavasti syntyvän lietteen määrä pienenee. Toisaalta prosessissa syntyy retentaattivirtaama, joka pitää käsitellä. Haittana on korkeasta painetarpeesta johtuva suuri energiankulutus.

Ultrakalvojen etuna on pienempi energian tarve ja mahdollisuus myös uppoasenteisten kalvojen käyttöön, joita voidaan asentaa mm. olemassa oleviin suodatusaltaisiin. Haittana on, että kemiallisesta saostuksesta ei voida luopua kokonaan.

Saostuskemikaalin määrää voidaan vähentää käytettäessä suoraa saostusta ultrakalvoille ilman selkeytysvaihetta. Tämä prosessi soveltuu vesille, joissa orgaanisen aineen määrä on kohtalaisen alhainen, eikä vedessä ole rautaa tai mangaania.²⁸ Kemikaali annostellaan suoraan kalvoille menevään veteen, eikä erillistä flokkausvaihetta ole lainkaan (*inline coagulation*). Tutkituissa prosesseissa on saostuskemikaalina käytetty alumiinipohjaista saostuskemikaalia ja kemikaalin kulutus on n. 40 % pienempi kuin perinteisessä prosessissa.^{38,40}

Saostus-flokkaus-selkeytysvaihe ennen ultrakalvoja lisää kalvojen läpi menevää virtaamaa suhteessa kalvon pinta-alaan (*flux*) ja vähentää kalvojen pesutarvetta.²⁸ Tässä prosessissa saostuskemikaalin kulutus on kuitenkin käytännössä verrannollinen perinteiseen prosessiin, jossa ultrakalvojen tilalla on hiekkasuodatus.

⁴⁰ Bergamasco, R., Konradt-Moraesa, L. C., Fernandes Vieiraa, M., Fagundes-Klenb, M. R. ja Marquetotti Salcedo Vieiraa, A. Performance of a coagulation–ultrafiltration hybrid process for water supply treatment, *Chemical Engineering Journal* 166, 483-489, 2011

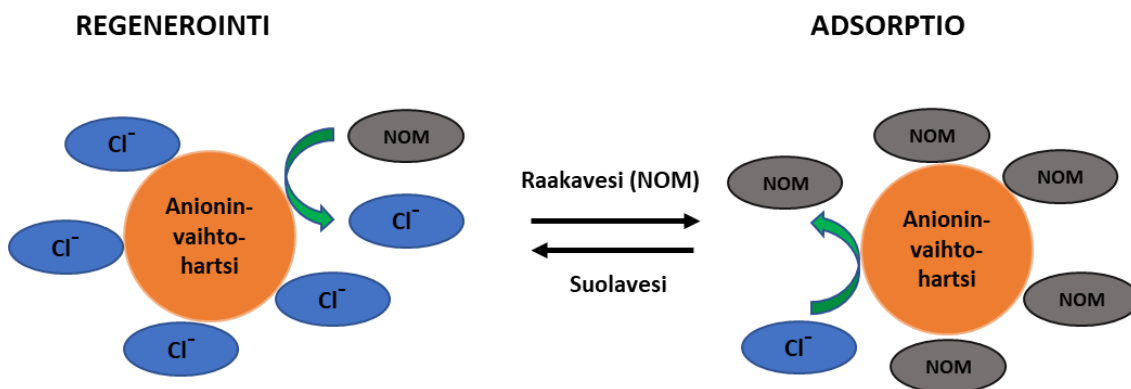
Koniecznyn ym. (2009) tutkimuksessa⁴¹ verrattiin ferrisulfaattia, ferrikloridia ja alumiinisulfaattia ultrasuodatusprosessissa, jota edelsi suorasaostus. Parempi kalvojen toimivuus saavutettiin alumiinipohjaisilla kemikaaleilla. Suomessa tehdyissä tutkimuksissa on havaittu vastaavaa; raskaan, tahmean rautaflokin on todettu lisäävän kalvojen tukkeutumista.

Sekä ultra- että nanosuodatusta harkittaessa sopivimman kalvon valintaan suositellaan koeajoja. Kalvot eivät sovellu ns. *stand by* -käyttöön, sillä ne eivät kestä seisotusta ilman kemiallista kestäväointiä.

Johtopäätökset
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Saostuskemikaalien käytön vähentäminen on mahdollista siirtymällä perinteisestä saostus-selkeytys-suodatusprosessista nanosuodatukseen tai ultrasuodatukseen ➤ Nanosuodatuksella kemiallista esikäsittelyä ei tarvita ➤ Ultrasuodatuksella tarvitaan kemiallinen saostus, kemikaaliksi soveltuu paremmin alumiini- kuin rautapohjainen saostuskemikaali

4.3.4 Ioninvaihtotekniikat

Ioninvaihto on prosessi, jossa liuoksessa olevat ionit, kationit tai anionit vaihdetaan kiinteän matriisin sisältämiin kationeihin tai anioneihin. Ioninvaihtohartseja on erilaisia, ja ne sisältävät tavallisesti joko positiivisesti tai negatiivisesti varautuneita ryhmiä. Orgaaninen aine on pääosin negatiivisesti varautunutta, joten ioninvaihtotekniikoissa, joilla pyritään orgaanisen aineen poistoon, käytetään anionista hartseja. Parhaiten toimivat vahvasti emäksiset hartsit. Usein käytetään hartseja, joissa on kvaternäärinen ammoniumresiini ja siihen kiinnittyneenä kloridia. Kun orgaanista ainesta sisältävä vesi reagoi hartsin kanssa, liukenee veteen kloridioneja samalla kun NOM-molekyylit kiinnittyvät hartsiin. Hartsi regeneroidaan suolavedellä (Kuva 4-9).⁴²



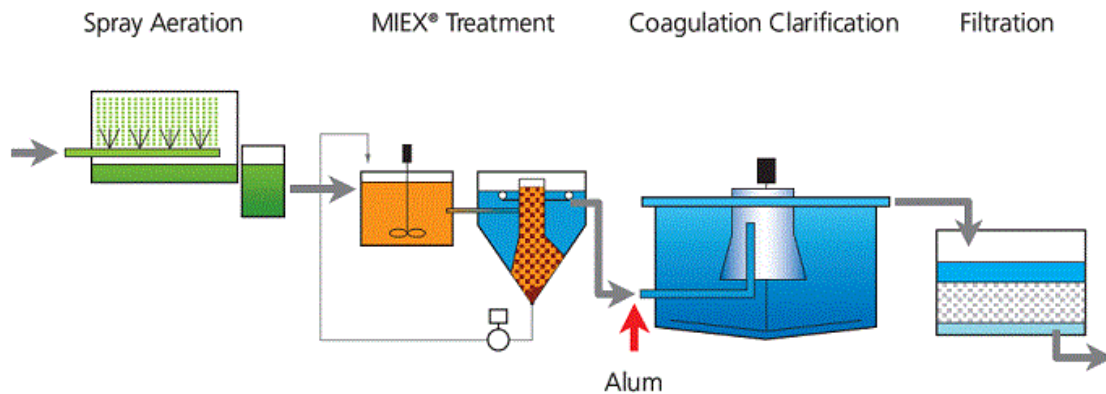
Kuva 4-9 NOM-poisto ioninvaihtotekniikoilla

Hollannissa Andjik III -laitoksella on käytetty samaa hartseja vuodesta 2014 lähtien. Hartsin hävikki on n. 0,2 l hartseja per 1 000 m³ tuotettua vettä. Hartsin regenerointi voidaan tarvittaessa tehdä myös natriumhydroksidilla.

⁴¹ Konieczny, K., Sakol, D., Plonka, J., Rajca, M. ja Bodzek, M. Coagulation-ultrafiltration system for river water treatment. *Desalination* 240, 2009

⁴² Levchuk, I., Rueda Márquez, J.J. ja Sillanpää, M. Removal of natural organic matter (NOM) from water by ion exchange – A review, *Chemosphere* 192, 90-104, 2018

Hartseja voidaan käyttää joko kiinteissä kolonneissa, tai niitä voidaan sekoittaa veteen. Laitosmittakaavassa on käytetty NOM:in poistoon kahta ioninvaihtoprosessia, SIX®:ä ja MIEX®:ä, joissa kummassakin hartsi sekoitetaan veteen erillisessä patentoidussa reaktorissa. SIX® ja MIEX® toimivat muuten samalla periaatteella, mutta SIX®:ssä massan laskeuttamiseen käytetään lamelliselkeyttimiä, kun taas MIEX®:ssä anioninvaihtohartsi sisältää magneettista ainetta, joka saa massan laskeutumaan. SIX®-prosessia tutkitaan etenkin keraamisen kalvosuodatuksen esikäsittelevaiheena⁴³, kun taas MIEX-prosessia käytetään pääsääntöisesti perinteisen alumiinisaostuksen esivaiheena (Kuva 4-10).



Kuva 4-10 Tyypillinen MIEX®-prosessi⁴⁴

Ioninvaihtoprosesseissa saadaan poistettua kattavasti erilaista orgaanista ainesta, kun perinteisessä kemiallisessa saostuksessa poistuvat lähinnä suurimolekyyliset, hydrofobiset yhdisteet. Ioninvaihtokäsittelyn jälkeen veden orgaanisen aineen koostumus vastaa pitkälti raaka-aineen orgaanisen aineen koostumusta, eli siinä on muun muassa samassa suhteessa eri molekyylikokoja ja hydrofobisuutta kuin raakavedessä. Ioninvaihdolla voidaan poistaa vain NOM:in varauksellisia yhdisteitä. NOM-yhdisteiden poistoteho ioninvaihdolla on n. 60–90 %, loppujen arvellaan olevan varauksettomia yhdisteitä. Varaukselliset NOM-yhdisteet ovat kuitenkin sellaisia, jotka voivat muodostaa desinfiointin sivutuotteita, joten niiden poisto on erityisen tärkeää.⁴²

Seuraavassa taulukossa (Taulukko 4-2) on vertailtu SIX®- ja MIEX®-prosesseja.

⁴³ Metcalfe, D., Rockey, C., Jefferson, B., Judd, S. ja Jarvis, P. Removal of disinfection by-product precursors by coagulation and an innovative suspended ion exchange process, *Water Research* 49, 20-28, 2015

⁴⁴ Csiropedia, MIEX® water purification process, Internet-sivut, 2014. Ks. <https://csiropedia.csiro.au/miex-water-purification-process/>

Taulukko 4-2 SIX® ja MIEX®-prosessien vertailu

	SIX®	MIEX®
Toimintaperiaate	<p>Vahva anioninen ioninvaihtohartsi sekoitetaan veteen</p> <p>Syntynyt massa laskeutetaan lamelliselkeytyksellä</p> <p>Kaikki hartsi regeneroidaan suolaliuoksella ja palautetaan prosessiin</p>	<p>Vahva anioninen magneettinen ioninvaihtohartsi sekoitetaan veteen</p> <p>Syntynyt massa laskeutuu hartsin magneettisuuden avulla (muodostuu suuria ryppäitä, jotka laskeutuvat nopeasti)</p> <p>Hartsista 5–10 % regeneroidaan suolaliuoksella ja palautetaan prosessiin, 90–95 % palautetaan prosessiin ilman regenerointia; prosessiin lisätään pieniä määriä uutta hartsia</p>
Tyypillinen käyttökohde	Sijoitettu vedenpuhdistusprosessin alkuun poistamaan orgaanista ainesta ennen kalvosuodatusta	Sijoitettu prosessin alkuun ennen alumiinisaostusta
NOM-poistoteho	<p>55–85 % hartsiannostuksella (10–20 ml/l)</p> <p>Tehoa voidaan parantaa lisäämällä pieni määrä saostuskemikaalia (esim. 0,4–2,5 ppm Al³⁺), kontaktiaika 2,5 min⁴⁵</p>	40–70 % ⁴²
Huoltovarmuus	<p>Kaikkia markkinoilla olevia hartseja voidaan käyttää (hartsin hävikki pientä ja hartsin käyttöikä pitkä)</p> <p>Prosessi patentoitu⁴⁶</p>	<p>Hartsi ja tekniikka saatavilla vain yhdeltä toimittajalta</p> <p>Prosessi patentoitu⁴⁷</p>

Ioninvaihtoprosessin etuja yleisesti ovat

- hyvä puhdistusteho
- kemikaalien käytön vähentäminen
- raakaveden kiintoainepitoisuus ei häiritse prosessia

SIX®-prosessin eduiksi on lisäksi mainittu

- ei hartsin ”sokeentumista” (biofilmin kertymistä hartsin pinnalle)
- pieni hartsikonsentraatio ja varastointitarve
- mahdollista käyttää kaikkia markkinoilla saatavilla olevia ioninvaihtohartseja

⁴⁵ Galjaard, G., Koreman, E., Metcalfe, D., Moore, G., Ericsson, P. NOM-removal by the SIX®-process, Water Practice & Technology 13, 2018

⁴⁶ PWNT Water Technology, Alankomaat. Ks. <https://pwntechnologies.com/>

⁴⁷ Ixom Watercare, Australia. Ks. <https://ixomwatercare.com/>

Ioninvaihtoprosessin haittoja yleisesti ovat:

- patentoidut laitteistot, riippuvuus yhdestä laitetoimittajasta
- prosessissa syntyy suolaisia jätevesiä
- MIEX®-prosessissa myös hartsi on patentoitu, mikä heikentää huoltovarmuutta merkittävästi, lisäksi hartsin kierrätys ilman regenerointia johtaa pitkittyneisiin pidätysaikoihin, minkä seurauksena adsorptiokinetiikkaa muuttuu ja hartsin pinnalle voi alkaa kertyä biofilmiä.

Täyden mittakaavan SIX®-laitoksia on Alankomaissa (Andjik, 5 500 m³/h) sekä Mayflower Iso-Britanniassa. MIEX®-laitoksia on erityisesti Australiassa ja Yhdysvalloissa. SIX®-prosessia on pilotoitu Ruotsissa Lovön pintavesilaitoksella Tukholmassa koelaitosmittakaavassa⁴⁸ sekä Skotlannissa, joissa SIX®-prosessia on käytetty keraamisten kalvojen esikäsitteilyvaiheena.

Johtopäätökset
<ul style="list-style-type: none">➤ Saostuskemikaalien käytön vähentäminen on mahdollista siirtymällä perinteisestä saostus-selkeytys-suodatusprosessista ioninvaihtotekniikkaan➤ SIX®-prosessilla voidaan luopua kokonaan saostuskemikaalin käytöstä➤ Sekä SIX® että MIEX® ovat patentoituja tekniikoita, mikä asettaa haasteita huoltovarmuudelle. SIX®-tekniikassa voidaan kuitenkin käyttää eri toimittajien hartseja, ja hartsien käyttöikä on pitkä (pienä hävikkiä tapahtuu)

4.3.5 Muut vaihtoehdot

Tekopohjavesi

Tekopohjaveden muodostamisen tavoitteena on tuottaa luontaisen pohjaveden kaltaista tekopohjavettä pintavedestä ilman vedenpuhdistusta tai käsittelemällä vettä mahdollisimman vähän. Tekopohjavettä tehdään lisäämällä pohjavesiesiintymän luontaista antoisuutta imeyttämällä pohjavesiesiintymään pintavettä, yleensä joki- tai järvivettä allas- tai kaivoimeytyksen avulla tai maanpinnalle tehtävän sadetuksen avulla.

Suomessa tekopohjavettä muodostetaan useimmiten harjuilla, joiden maaperä on hiekkaa ja sora. Imeytyksen jälkeen vesi kulkee ensin vajovesivyöhykkeessä eli imeytyksen ja pohjaveden pinnan välisellä alueella. Vedestä poistuu tässä vaiheessa kiintoainetta sekä pieni määrä humusyhdisteitä. Merkittävimmät laatu muutokset tapahtuvat vasta veden saavuttaessa pohjaveden. Pohjavesivyöhykkeessä suurimmat muutokset tapahtuvat kulkeutumismatkan alkupäässä. Veden viipymä on tärkein tekijä puhdistumisen kannalta. Tavanomainen viipymä pohjavedessä on 1–2 kuukautta.

Tekopohjaveden valmistusprosessissa saadaan alennettua veden kokonaisorganisen aineen eli TOC:n pitoisuutta. Lisäksi orgaanisen aineen laatu muuttuu imeytyksessä niin, että suurikokoisten molekyylien osuus orgaanisesta hiilestä vähenee. Suurikokoiset molekyylit pidättyvät maaperään pienikokoisia paremmin. Humusaineet poistuvat osin hajoamalla biologisesti, osin pidättymällä maaperään. Tavallisesti biologisen hajoamisen osuus on 30–50 %.⁴⁹ Biologisessa hajoamisessa humusaineet hajoavat hiilidioksidiksi kuluttaen vedestä

⁴⁸ Lundqvist, J., Andersson, A., Johannisson, A., Lavonen, E., Mandava, G., Kylin, H., Bastviken, D. ja Oskarsson, A. Innovative drinking water treatment techniques reduce the disinfection-induced oxidative stress and genotoxic activity, *Water Research* 155, 182-192, 2019

⁴⁹ Biologisen hajoamisen osuus riippuu humusaineen laadusta

happea ja tuottaen veteen hiilidioksidia.⁵⁰

Esikäsittely kemiallisella saostuksella voi olla tarpeen, jos imeytysalue on pieni tai maaperän vedenjohtavuus on hyvin suuri. Esikäsittelynä käytetään tyypillisesti kemiallista saostusta.

Tekopohjavedenkäsittelyn etuna on tasalaatuinen talousvesi. Erityisesti, jos esikäsittelyä ei käytetä, toimintavarmuus ja huoltovarmuus ovat korkealla tasolla. Kemiallista saostusta käyttävät laitokset ovat riippuvaisia saostuskemikaalien saatavuudesta, mutta esikäsittelyssä voidaan käyttää sekä alumiini- että rautapohjaisia kemikaaleja ja annostelumäärät ovat usein alhaisempia kuin pintavesilaitoksilla.

Tukkeutuminen on yleisin tekopohjaveden valmistusta rajoittava ongelma. Tällä tarkoitetaan keinotekoisten suodatinhiekkakerrosten tai luonnontilaisten maaperäkerrosten peittymistä läpäisemättömällä kalvolla tai niiden huokostilavuuden pienenemistä erikokoisilla hiukkasilla.

Tekopohjaveden valmistusta perinteisen pintaveden käsittelyn korvaajana rajoittavat mm. hankkeiden pitkät valmisteluajat sekä sopivien raakavesilähteiden ja imeytysalueiden löytäminen.

Johtopäätökset

- Tekopohjavesiprosessilla saadaan poistettua tehokkaasti orgaanista ainesta
- Yleensä esikäsittelyä ei tarvita tai jos sitä tarvitaan, voidaan käyttää sekä alumiini- että rautapohjaisia kemikaaleja ja määrä on pienempi kuin pintavesilaitoksilla
- Pintavesilaitosprosessien korvaaminen tekopohjavedenkäsittelyllä on pitkäkestoinen prosessi
- Tekopohjavedenvalmistuksessa ei ole samanlaisia huoltovarmuushaasteita kuin muissa tekniikoissa, paitsi jos vesi joudutaan käsittelemään lisäksi kemikaloinnilla tai muilla tekniikoilla

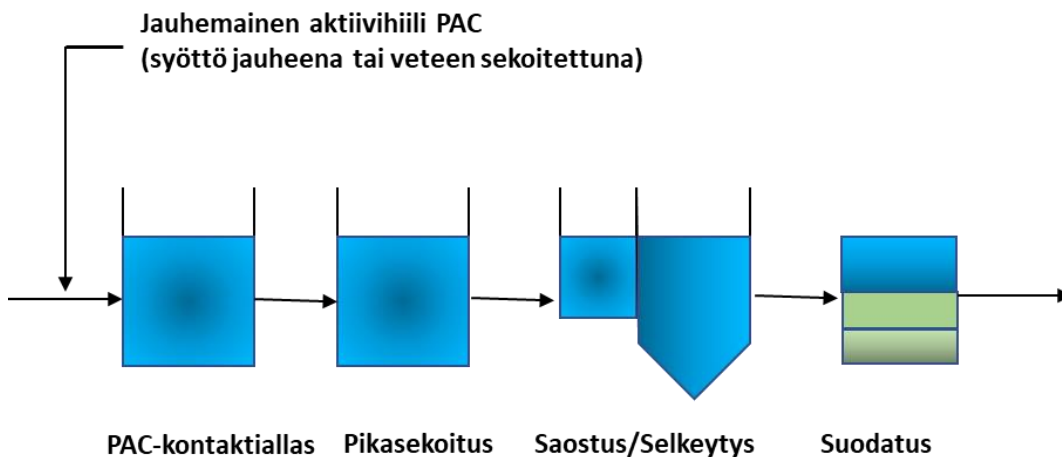
Jauhemainen aktiivihili (PAC)

Lisäämällä jauhemaista aktiivihiltä (*powdered activated carbon, PAC*) veteen osana talousveden käsittelyprosessia voidaan orgaanisen aineen poistoa tehostaa sekä parantaa veden hajua ja makua. Aktiivihilien teho perustuu sen korkeaan adsorptiokykyyn. Se adsorboi itseensä etenkin pienimolekulaarisia sekä hajua ja makua aiheuttavia orgaanisia yhdisteitä. Aktiivihili valmistetaan tyypillisesti fossiilisesta hiilestä. PAC-rakeiden tyypillinen läpimitta on alle 0,1 mm. PAC-käsittelyä käytetään vedenkäsittelyssä jatkuvasti tai vain silloin, kun on erityistä tarvetta hajun ja maun parantamiseen tai orgaanisen aineen poistoon. PAC-annostelu voidaan sisällyttää prosessiin myös varautumisena öljypäästöihin tms.

PAC voidaan syöttää veteen kuivana jauheena tai veteen sekoitettuna lietemäisenä seoksena. Kuivasyöttöä käytetään useimmiten silloin, kun syöttö on epäsäännöllistä ja syöttömäärät pieniä. Kuivasyöttösystemi koostuu yleensä jauheannostelujärjestelmästä, pölynkerääjästä, liotussäiliöstä ja syöttölaitteesta. Veteen suspendoitunutta PAC:ia syötetään useimmiten silloin, kun syöttö on säännöllistä ja syöttömäärät isompia. Tällöin syöttösystemi koostuu yleensä varastosäiliöstä, päivä säiliöstä ja kemikaaliannostelijasta (esim. epäkeskoruuvipumppu tai muu, joka pystyy annostelemaan epätasaista kuluttavaa kiintoainesta).

⁵⁰ Helmisaari, H-S., Illmer, K., Hatva, T., Lindroos, A-J., Miettinen, I., Pääkkönen, J., Reijonen, R. (toim.) Tekopohjaveden muodostaminen: imeytystekniikka, maaperäprosessit ja veden laatu TEMU-tutkimushankkeen loppuraportti, Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 902, 2003

PAC syötetään veteen useimmiten prosessin alkuvaiheessa. Aktiivihiili poistuu vedestä myöhemmin joko lietteen mukana tai suodattimien vastavirtahuuhtelun yhteydessä. Syöttöpisteen tulisi sijaita sellaisessa paikassa, että hiilen ja orgaanisen aineen kontaktiaika on riittävä ja niin etteivät vedenkäsittelykemikaalit pääse pinnoittamaan hiiltä ennen kuin se on ehtinyt riittävästi adsorboimaan vedestä ei-toivottuja yhdisteitä. Useimmat hajua ja makua aiheuttavat yhdisteet vaativat vähintään 15 minuutin kontaktiajan. Yleensä PAC syötetään veteen prosessin aikaisimmassa mahdollisessa vaiheessa. Seuraavassa kuvassa (Kuva 4-11) on esitetty tyypillinen jauhemaisen aktiivihiilen syöttöpiste vedenpuhdistusprosessissa.



Kuva 4-11 Jauhemaisen aktiivihiilen (PAC) tyypillinen syöttöpiste vedenpuhdistusprosessissa³⁹

Jauhemaisen aktiivihiilen tyypillinen annostus on 1–100 mg/l riippuen orgaanisen aineen pitoisuudesta ja laadusta. Yleisesti voidaan arvioida annostukseksi 10 mg/l PAC/1 mg/l TOC. Hajun ja maun poistoon käytetään tyypillisesti annostusta 1–20 mg/l.

Jauhemaisen aktiivihiilen lisääminen veteen aiheuttaa ylimääräisen lietteen syntymistä. Jauhe- maista aktiivihiiltä ei pysty regeneroimaan kuten granulaarista aktiivihiiltä vaan se hävitetään muun pesuveden tai laskeutuslietteen mukana.

Jauhemaisen aktiivihiilen käytössä on kiinnitettävä erityistä huomiota työturvallisuuteen. Se on kuivana pölyävää ja räjähdysherkkää.

Johtopäätökset
➤ Jauhemaista aktiivihiiltä PAC:ia voidaan lisätä veteen vedenpuhdistusprosessin alkuvaiheessa tehostamaan orgaanisen aineen poistoa sekä parantamaan hajua ja makua
➤ PAC:ia voi lisätä veteen jatkuvasti tai satunnaisesti, se voidaan lisätä joko jauheena tai veteen sekoitettuna
➤ Hiili poistuu vedestä lietteen mukana tai suodattimien takaisinpesussa, jauhemaista aktiivihiiltä ei voi regeneroida
➤ PAC on kuivana pölyävää ja räjähdysherkkää
➤ PAC tuodaan ulkomailta, kemikaalitoimittajilta löytyy varastoja Suomesta

4.4 Yhteenveto

Laitoksilla lisätään kemiallisen saostuksen toimintavarmuutta talousveden tuotannossa:

- varautumalla etukäteen vaihtoehtoisen kemikaalin käyttöön
- lisäämällä nykyisen kemikaalin varastointia.

Talousveden tuotannon turvaamiseksi pitkällä aikavälillä suositellaan, että laitoksilla tehdään hyvissä ajoin pitkän tähtäimen kehittämistä ja suunnitellaan investointitarpeet, joiden perusteella voidaan tarvittaessa parantaa kemiallisen saostuksen toimintavarmuutta esimerkiksi hajauttamalla osa prosessista vaihtoehtoiselle vedenkäsittelytekniikalle ja ottamalla ikääntyvien laitosten saneerauksessa huomioon mahdolliset vaihtoehtoiset tekniikat, joissa saostuskemikaalien tarve on nykyistä vähäisempi.

Alla olevassa taulukossa (Taulukko 4-3) on lyhyesti vertailtu varteenotettavimpia vaihtoehtoisia tekniikoita verrattuna perinteiseen saostukseen. Tarkempaa tietoa tekniikoista löytyy kappaleesta 4.3.

Taulukko 4-3 Yhteenveto tarkastelluista vaihtoehtoisista tekniikoista

	Saostuskemikaalien tarve	Ympäristövaikutukset	Huoltovarmuus
Ultrasuodatus	pysyy samana/ vähenee hieman	suurempi energiankulutus kuin perinteisessä saostusprosessissa tarve saostuskemikaaleille käytöstä poistettujen kalvojen loppukäsittely	toimittajat ulkomaisia umpivirtausmoduulin vaihto toiseen haasteellista
Nanosuodatus	vähenee paljon /loppuu	suuri energiankulutus, käytöstä poistettujen kalvojen loppukäsittely	toimittajat ulkomaisia, mutta poikkivirtausmoduulit ovat hyvin standardoituja
SIX®-ioninvaihto	loppuu	vähäisempi energiankulutus verrattuna kalvosuodatukseen	tekniikka patentoitu ulkomailla, mutta kaikki hartsit käyvät
MIEX®-ioninvaihto	vähenee paljon /loppuu	vähäisempi energiankulutus verrattuna kalvosuodatukseen	hartsit ja tekniikka patentoituja ulkomailla
Tekopohjavesi	vähenee paljon /loppuu	pienempi energiankulutus verrattuna kalvosuodatukseen	ei jatkuvaa tarvetta kemikaaleille tai muille tarvikkeille
Jauhemainen aktiivihili	pysyy samana/ vähenee hieman	aktiivihilien valmistuksen ja kuljetuksen suuret ympäristövaikutukset	toimittajat ulkomaisia, mutta varastoja on Suomessa

Kemiallisen saostuksen huoltovarmuutta talousveden tuotannossa tulisi kehittää jatkoselvityksillä ja tutkimuksella. Tässä luvussa tunnistettuja selvitystarpeita ovat:

- Uusien saostuskemikaalien kehittäminen ja testaaminen
- Ioninvaihtoprosessin testaaminen Suomen olosuhteissa

- Ultrasuodatusprosessia edeltävän saostuksen optimointi (kemikaalit ja annosmäärät)
- Sisäiset kierrot, raudan talteenotto ja uudelleenkäyttö
- Veden käsittelyn hajauttaminen rinnakkaisiin prosesseihin ja käsiteltyjen vesien sekoittaminen.

5 JÄTEVEDENPUHDISTUS

5.1 Johdanto

Kemiallinen saostus on kriittinen osa jätevedenpuhdistusprosessia. Fosforinpoisto on yksi tärkeimpiä jätevedenpuhdistamon tehtäviä, joten kemiallisen saostuksen turvaaminen on tärkeää. Huoltovarmuuden parantamiseksi jätevedenpuhdistamoiden omaa varautumista tulee lisätä. Lyhyellä aikavälillä tämä tehdään turvaamalla kemiallinen saostusprosessi nykyisessä käsittelyprosessissa. Pidemmällä aikavälillä huoltovarmuuden parantamisen vaihtoehtoja on enemmän ja tuotannon turvaamisen toimenpiteet edellyttävätkin hyvissä ajoin aloitettua kehittämis- ja investointisuunnittelua.

Lyhyen aikavälin toimenpiteet
<ul style="list-style-type: none">• Turvataan kemiallinen saostus vaihtoehtoisella kemikaalilla nykyisessä prosessissa• Lisätään kriittisten kemikaalien varastointia
Pitkän aikavälin toimenpiteet
<ul style="list-style-type: none">• Optimoidaan saostuskemikaalin syöttöä• Lisätään prosessien joustavuutta kemikaalien toimitushäiriötilanteissa

5.2 Lyhyen aikavälin toimenpiteet

Huoltovarmuutta voidaan parantaa lyhyellä aikavälillä

- mahdollistamalla vaihtoehtoisen kemikaalin annostelu, jolloin vähennetään riippuvuutta yhdestä kemikaalista
- lisäämällä kriittisten kemikaalien varastointia akuuttitilanteita varten (yhden tai useamman vesilaitoksen omistamat varastot).

Tunnista tarve varautua akuuttitilanteisiin etukäteen. Akuuttitilanteella tarkoitetaan äkillistä kemikaalin toimituskatkoa esimerkiksi lakkotilanteesta johtuen.

Akuuttitilanteessa fosforinpoisto lasketaan heti lupamääräysten tasolle. Muutokset kemikaloinnissa eivät näy heti puhdistustuloksessa. Toisin kuin talousveden tuotannossa, jätevedenpuhdistuksessa akuuttitilanteessa voidaan mahdollisesti olla muutama päivä ilman erityisiä toimenpiteitä.

Arvioi tarve lisätä nykyisen kemikaalin varastointikapasiteettia, jotta kemikaalia riittää myös mahdollisessa toimituskatkotilanteessa (esimerkiksi 2–4 viikkoa). Keskustele lähivesilaitosten kanssa yhteisen kemikaalivaraston tarpeesta ja hankintaringin perustamisesta.

Ferrosulfaattia käyttävät laitokset voivat nopeasti siirtyä käyttämään nestemäistä ferrisulfaattia. Ferro- tai ferrisulfaatista ferrikloridiin siirtyminen edellyttää erillisiä varastointi- ja annostelujärjestelmiä. Nopea siirtyminen alumiinipohjaisen saostuskemikaalin käyttöön rinnakkaissaostuksessa vaarantaa biologisen typenpoiston toiminnan. Prosessia tulisi siten totuttaa alumiiniin hitaasti.

Liitteeseen 2 on koottu varautumisohjeet jätevedenpuhdistamoille.

5.3 Pitkän aikavälin toimenpiteet

5.3.1 Saostuskemikaalin käytön vähentäminen ja ajotapamuutokset

Jokaisella laitoksella on mietittävä etukäteen, miten saostuskemikaalin käyttömäärää voisi vähentää ja kuinka paljon kemikaalin syötössä on optimointivaraa. Saostuskemikaalin syötön optimointi tuo pitkän aikavälin säästöjä ja helpottaa toimintaa akuuttitilanteessa.

Ferrosulfaatin käytössä on tehostamisen varaa monilla jätevedenpuhdistamoilla. Tämä johtuu lähinnä siitä, että ferrosaostus on ollut halpa ja varmatoiminen puhdistusmenetelmä, jolla on ollut muitakin hyödyllisiä vaikutuksia kuin fosforinpoisto, esim. orgaanisen kuorman ja kiintoainekuorman leikkaaminen esiselkeytyksessä sekä lietteen laskeutuvuuden ja kuivattavuuden paraneminen. Ferroa syötetään etenkin pienillä laitoksilla usein varmuuden vuoksi yli tarpeen, eikä ferron käyttöä ole ollut tarvetta varsinaisesti optimoida laitosten suunnittelussa ja käytössä.

Rautakemikaloinnin tyypillisimmät optimointimahdollisuudet on tiivistetty taulukkoon 5-1 ja kuvattu tarkemmin seuraavilla sivuilla.

Taulukko 5-1 Rautakemikaalin syötön optimointi

Seuranta ja toimenpiteet	Seuraa saostuksen moolisuhdetta: jos Fe/P > 2,0 mol/mol tai muuten nousee merkittävästi laitokselle tyypillisestä arvosta, selvitä mistä tämä johtuu
Prosessin kokonaisoptimointi	Pyri pitämään prosessin kiintoainetase hallinnassa ilman ylimääristä kemikalointia Optimoi biolietteen laskeutuvuus: älä aja biologiaa ylipitkällä lieteiällä tai tarpeettoman korkeilla palautus- ja kierrätysvirtaamilla Minimoi sisäiset kierrot lietteenkäsittelystä: varmista sakeutuksen ja kuivauksen oikeat ajoasetukset ja vaihda tarvittaessa polymeeria
Sekoittumisolosuhteet	Tarkista turbulenssi kemikaalin syöttökohdissa: tehosta tarvittaessa potkurisekoituksella tai muuta syöttöpaikkaa Tunnista ja eliminoi oikovirtaukset etenkin flokkausaltaissa
Syöttöpisteet	Pyri syöttämään turbulentiin kohtaan Painota kemikalointia prosessin loppupäähän, mutta ylläpidä valmius kasvattaa alkupään syöttöä toimintahäiriöiden varalta Huomioi alkaloitkemikaalin syöttöpiste ja saostuskemikaalin vaikutus alkaloinnin tarpeeseen
Syöttöväkevyys	Syötä ferro laimennettuna n. 10 % väkevyyteen (siirtopumppaus päiväsailiöön → laimennus → syöttö) Mittaa kylläisen liuoksen tiheyttä jatkuvasti, jotta saat aikaan oikean laimennoksen ja syötetty kemikaalimäärä vastaa tavoiteannostusta
Laitteistot ja ohjaus	Käytä oikein mitoitettuja, hyvin säädettäviä pumppuja Kalibroi instrumentit Hyödynnä jatkuvatoimista fosforimittausta kemikaalin syötön ohjauksessa

Ensimmäinen ja tärkein tehostamistoimenpide on seurata kemikaalin kokonaiskulutusta ja verrata sitä käsiteltyyn fosforimäärään. Jos saostuksen Fe/P-moolisuhte on yli 2,0 tai jos moolisuhteessa on nouseva trendi, on syytä selvittää, syötetäänkö kemikaalia yli tarpeen, ja jos syötetään, niin mistä se johtuu. Eräillä suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla, joiden lähtevän kokonaisfosforin lupamääräys on 0,3 mg/l, on päästy alle 1,5 moolisuhteeseen.

Rautakemikalointi tehostaa esiselkeytyksen kiintoainereduktiota ja lisää aktiivilietteen ominaispainoa. Kemikalointia käytetäänkin fosforin saostuksen lisäksi usein myös laitoksen kiintoainetaseen hallintaan ja lietteen laskeutuvuuden parantamiseen. Prosessi tulisi optimoida kokonaisuutena siten, että esim. lietteenkäsittelyn rejektien mukana ei kierrä kiintoainetta takaisin vesiprosessiin ja aktiivilietteen laskeutuvuudesta huolehdittaisiin mahdollisimman pitkälle biologisen prosessin ajoasetusten avulla. Tällöin kemikaalia ei tarvitse käyttää muuhun kuin varsinaiseen käyttötarkoitukseensa.

Kemikaalin tehokas sekoittuminen käsiteltävään jätevetteen syöttöpisteessä on ehkä tärkein yksittäinen saostustehoon vaikuttava tekijä. Syöttö tulee järjestää kohtaan, jossa on mahdollisimman paljon turbulenssia, esim. ilmastettuun hiekanerotukseen tai nostopumpupaamon paineputkeen. Tarvittaessa sekoittumista on tehostettava esim. potkurisekoittimella. Korkean turbulenssin kohteita pyritään jätevedenpuhdistamojen suunnittelussa energiategokkuus- ja hajunhallintasyistä välttämään, joten tehokasta sekoittumista ei usein voida taata ilman potkurisekoitusta. Etenkin jälkisaostuksessa kannattaa tarkkailla kemikaalin flokkautumista ja selvittää mahdolliset oikovirtaukset flokkausaltaissa esim. kolmiulotteisella virtausmallinnuksella.

Useimmilla suurilla ja keskikokoisilla jätevedenpuhdistamoilla kemikaalia syötetään vähintään kahteen pisteeseen, minkä on käytännössä havaittu tehostavan kemikaalin käyttöä. Syöttöpisteen valinnassa on huomioitava sekoittumisen lisäksi myös esim. muiden prosessikemikaalien syötöt sekä syötön ohjausmahdollisuudet.

- Alkalointi- ja saostuskemikaalit yleensä häiritsevät toistensa toimintaa, joten niitä ei pidä syöttää samaan pisteeseen (ei ole epätavallista, että näin kuitenkin tehdään tai että kemikaalit syötetään lähelle toisiaan). Vaikka pisteillä olisi etäisyyttäkin, voi esim. ylenmääräinen ferronsyöttö prosessin alkupäässä lisätä tarpeettomasti alkalointikemikaalin tarvetta ilmastuksessa.
- Mitä korkeammasta fosforipitoisuudesta saostetaan, sitä vähemmän kemikaalia kuluu fosforikiloa kohden.
- Fosforin saostuvuus paranee puhdistamon loppupäätä kohden, kun ei-fosfaattimuotoiset fosforijakeet hydrolysoituvat ortofosfaatiksi.
- Prosessin loppupäässä saostusta on mahdollista ohjata tarkemmin kuin alkupäässä, koska jatkuvatoimiset analysaattorit toimivat sitä paremmin mitä vähemmän vedessä on epäpuhtauksia.

Edellä esitetyn perusteella vaikuttaisi kokonaisuutena järkevältä painottaa saostusta puhdistamon loppupäähän etenkin laitoksilla, joilla on käytössä tertiärikäsittely; näitä on nykyisin jo enemmistö keskikokoisista ja suurista laitoksista. Jälkisaostus mahdollistaa alumiinipohjaisten saostuskemikaalien käytön ilman, että alumiini vaikuttaa toksisesti nitrifikaatioon. Siten rautapohjaisten saostuskemikaalien käyttöä voitaisiin vähentää. Etukäteen tulee selvittää, riittääkö tertiärikäsittelyn kapasiteetti poistamaan kaiken fosforin, joka ei poistu mekaanisesti ja biologisesti, ja jos ei riitä, kuinka suuren osan fosforireduktiosta voi loppuun jättää. Tämä ajotapa sopii parhaiten yhteen myös biologisen fosforinpoiston operoinnin kanssa.

Fosforinpoiston jättäminen puhdistusprosessin loppuun lisää kuitenkin riskejä. Toisin kuin esi- ja (etenkin) rinnakkaissaostuksessa, jälkisaostuksen lyhytkin toimintahäiriö näkyy heti puhdistustuloksessa. Jälkisaostuksessa korostuu toimintavarmuuden tärkeys. Esi- ja/tai rinnakkaissaostusta on järkevää käyttää jälkisaostuksen rinnalla tai ainakin siihen on oltava valmius tertiäärin toimintahäiriöiden varalta.

Jälkisaostuksen lisäksi muut ajotapamuutokset voivat vähentää rautapohjaisten saostuskemikaalien kulutusta. Esimerkiksi jälkiselkeytyksen tehostaminen polymeerillä voi vähentää saostuskemikaalin tarvetta. Myös orgaanisia saostuskemikaaleja voi käyttää saostuksen apuna ja siten vähentää ferro- tai ferrisulfaatin kulutusta.

Monilla laitoksilla ferrosulfaatti syötetään prosessiin kylläisenä liuoksena, joka valmistetaan liuottamalla kiinteää ferrosulfaattia puhdistettuun jäteveeseen. Liuoksen pitoisuus vaihtelee lämpötilasta ja kemikaalin puhtaudesta riippuen välillä n. 350–450 g/l ja tiheys vastaavasti n. 1,15–1,20 kg/l. Jotta kemikaalin annostusta voidaan ohjata tarkasti, liuoksen pitoisuus on tiedettävä. Perinteisesti pitoisuuden indikaattorina käytettävää tiheyttä mitataan laitoksilla manuaalisesti, mutta nykyisin jatkuvatoiminenkin mittaaminen on mahdollista. Kemikaalin toimintaa edistää laimentaminen n. 10 % vahvuiseksi liuokseksi. Tällöin kylläinen liuos siirretään siirtopumpulla päiväsäiliöön, jossa se laimennetaan syöttöväkevyyteen ennen pumppausta prosessiin.

Optimoitu kemikaalinkäyttö edellyttää myös moderneja, oikein mitoitettuja ja suurella säätöalueella varustettuja pumppuja, toimivia jäteveden ja kemikaalin virtausmittareita sekä mielellään myös fosfaattifosforin jatkuvatoimisen analyysin hyödyntämistä ohjauksessa. Jatkuvatoiminen fosfaattianalyysi toimii parhaiten biologisesti puhdistetussa jätevedessä. Suositeltava ohjauksen optimointitapa on fosfaattifosforin mittaaminen tertiäärikäsittelyyn tulevasta ja sieltä lähtevästä jätevedestä. Annostusta jälkikäsittelyyn ohjataan tällöin eteenpäin kytketysti tulevan fosforin pitoisuudella (esim. taulukkovahvistus) ja hienosäädetään lähtevästä fosforipitoisuudesta riippuvalla kompensointitermillä.

Hyvä esimerkki ferrisulfaatin syötön optimoinnista on tehty Seinäjoen jätevedenpuhdistamolla. Tämän työn toimenpiteet ja tulokset on kuvattu opinnäytetyössä.⁵¹ Työn ansiosta ferrisulfaatin annostelu esiselkeytykseen ja jälkiselkeytykseen lopetettiin ja ferrisulfaatin vuorokautinen kulutus väheni noin viidestä tonnista kahteen. Myös polymeerin annostelu jälkiselkeytysaltai- siin lopetettiin.

Johtopäätökset
<ul style="list-style-type: none">➤ Saostuskemikaalien käyttöä voisi vähentää nykyisestä monilla jätevedenpuhdistamoilla, ja siten parantaa toimintavarmuutta kemikaalitoimitusten tilapäisissä häiriötilanteissa➤ Kemikaloinnin optimointiin on useita keinoja: parhaiten soveltuvat toimenpiteet on selvitettävä laitoskohtaisesti➤ Vaihtoehtoisten kemikaalien (erityisesti alumiinipohjaisten) käyttöä voidaan mahdollistaa ajotapamuutoksilla

⁵¹ Mäki, K.-M. Kustannustehokas fosforin poisto Seinäjoen jätevedenpuhdistamolla, opinnäytetyö, Hämeen ammattikorkeakoulu, 2012

5.3.2 Tulevaisuuden päätöksentekokriteerit

Pitkällä aikavälillä on mahdollista korvata saostuskemikaaleja uusilla tekniikoilla tai ottaa uusia tekniikoita saostuksen rinnalle, mikä vähentää saostuskemikaalien tarvetta ja siten lisää joustavuutta. Uusia puhdistamoita tai vanhojen puhdistamoiden saneerauksia suunniteltaessa tulee muuttaa ajattelutapaa nykyisestä. Kriittisiä prosesseja ei voi suunnitella yhden kemikaalin varaan, vaan suunnittelussa tulee huomioida puhdistusprosessin joustavuus.

Pitkällä aikavälillä fosforinpoiston lupamääräykset tulevat todennäköisesti kiristymään nykyisestä. Fosforipitoisuudet yhdyskuntajätevedessä kasvavat suhteessa väestönkasvuun.⁶ Samalla kiristyvät lupamääräykset lisäävät erityisesti tertiärikäsittelyn kemikaalikulutusta. Siten saostuskemikaalien ominaiskulutus tulisi tulevaisuudessa kasvamaan. Saostuskemikaalin syötön optimoinnilla saadaan kuitenkin säästettyä rinnakkaissaostuksessa käytettyjä kemikaalimääriä (ks. edellinen luku). Tulevaisuuden ominaiskulutuksia on siten haastavaa ennustaa. Saostuskemikaalien kokonaiskulutus kuitenkin tuskin tulee merkittävästi vähenemään nykyisestä.

Saostuskemikaalien käytön vähentäminen tai korvaaminen vaihtoehtoisilla tekniikoilla voi riippua uusista fosforinpoiston lupamääräyksistä tai muista tekijöistä, kuten halusta edelläkävijyyteen tai tilarajoitteista. Vaihtoehtoisten tekniikoiden valintaan vaikuttavat myös jätevedenpuhdistuksen yleiset trendit, jotka on listattu alla (Kuva 5-1). Etenkin lietteen hyödyntämisen kautta tulee intressi vähentää saostuskemikaalien käyttöä, koska fosforin saatavuus kasveille heikkenee epäorgaanisten saostuskemikaalien käytön myötä.

Ravinteiden poiston tehostaminen	<ul style="list-style-type: none">• Moolisuhde kasvaa, kun tehdään puhtaasta vielä puhtaampaa• Tertiärikäsittelyn tärkeys kasvaa
Ravinteiden talteenotto	<ul style="list-style-type: none">• Fosfori talteen biologisesta fosforinpoistosta tai polttotuhkasta• RAVITA
Hiilijalanjäljen pienentäminen	<ul style="list-style-type: none">• Ajaa optimoimaan kemikaalien käyttöä ja tehostamaan kierrätystä
Orgaanisten haitta-aineiden poisto	<ul style="list-style-type: none">• Kalvoprosessien yleistymisen voi jonkin verran vähentää saostuskemikaalin kulutusta
Lietteen hyödyntäminen ja loppusijoitus	<ul style="list-style-type: none">• Kemiallisen lietteen minimointi, kuivaustuloksen parantaminen• Fosforin saatavuus kasveille

Kuva 5-1 Yleisiä trendejä jätevedenpuhdistuksessa

5.3.3 Biologinen fosforinpoisto

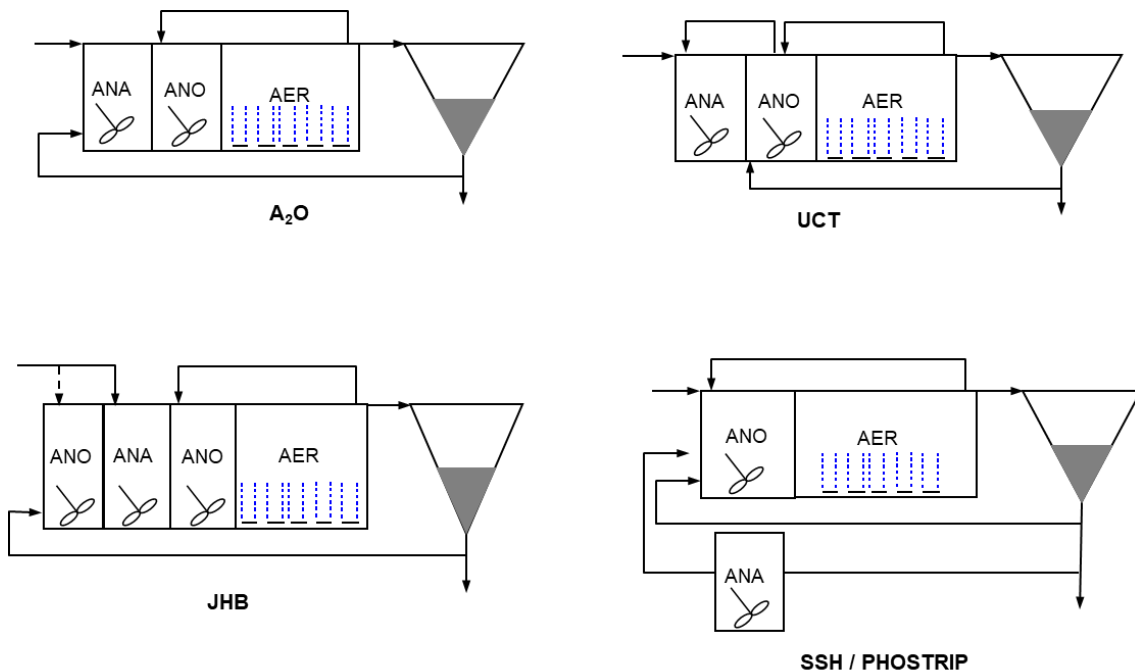
Yleistä

Biologisessa fosforinpoistossa (bioP) jäteveden fosfori poistetaan aktiivilietteessä mikrobin avulla ilman kemikaaleja. Prosessissa aktiivilietteen tietyt fosforia varastoivat mikrobit (Phosphorus Accumulating Organisms, PAO) sitovat fosforia yli normaalin metaboliatarpeensa, jolloin fosfori kertyy aktiivilietteen biomassaan. Tämä biomassaan sitoutunut fosfori poistetaan prosessista ylijäämälietteen mukana.

Prosessin lähtökohtana on luoda mikrobeille sopivat olosuhteet, sillä prosessi vaatii toimiakseen anaerobisen ja aerobisen(/anoksisen) ympäristön vuorottelun. Toisena merkittävänä lähtökohtana on riittävä määrä helposti hajoavaa orgaanista hiiltä, joka fermentoituu prosessissa (tai viemärissä ennen puhdistamoa). Anaerobisessa ympäristössä helposti hajoava hiili fermentoidaan haihtuviksi rasvahapoiksi (VFA), joita PAO-mikrobit hyödyntävät muodostaessaan varastopolymeerejä (PHA). Aerobisessa vaiheessa mikrobit käyttävät varastopolymeerit kasvuun varastoiden jäteveden fosfaattifosforia (polyfosfaatin muodostuminen). Nettotuloksena fosforia varastoituu enemmän kuin perinteisessä aktiivilietteen mikrobitoiminnassa.

Prosessivaihtoehdot

Yhdistetty biologinen fosforin- ja typenpoisto (BNR) voidaan toteuttaa useilla erilaisilla prosessikonfiguraatioilla. Niistä tavallisimmat on kuvattu seuraavassa kuvassa (Kuva 5-2).



Kuva 5-2 *Biologisen fosforinpoiston toteutustavat (ANO: anoksinen, ANA: anaerobinen eli ei sisällä nitraattia, AER: aerobinen eli ilmastettu).*

A₂O-, UCT- ja JHB-prosessissa anaerobireaktori sijaitsee päävirrassa, SSH-prosessissa taas palautuslietteestä otettavassa sivuvirrassa. SSH-tyyppisenä toteutuksena toimii myös ajotapa, jossa yhden päävirrassa sijaitsevan anoksilohkon sekoitus käynnistetään vain pariin tunniksi

päivittäin. Muun aikaa lohkon pohjalla makaa lietepatja, jossa vallitsevat anaerobiolosuhteet. Sekoitettaessa lietepatjaan kasautuneet fermentaatiotuotteet ja mikrobit pääsevät päävirran mukaan.

Operointi

Prosessin toiminnan kannalta on keskeistä, että aktiivilieteprosessissa saavutetaan täysin anaerobinen tila, ja PAO-mikrobien tarpeisiin saadaan riittävä määrä fermentaatiotuotteita. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kierrätysvirtojen nitraattipitoisuuden tulee olla mahdollisimman alhainen ja anaerobilohko on suojattava nitraatilta kokonaan. Nitraatti heikentää PAO-mikrobien kilpailuetua, joka perustuu siihen, että PAO-mikrobien toiminta ei edellytä elektroniakseptoria, kuten NO_3^- tai NO_2^- . Lisäksi nitraatin pelkistämiseen kuuluva orgaaninen hiili on pois PAO-mikrobien käytöstä. Tästä syystä biologisen typen- ja fosforinpoiston operointi on käytännössä pitkälti typenpoiston operointia. Biologinen fosforinpoisto edellyttää siten riittävää lieteikää, jotta nitrifikaatio pysyy toiminnassa, ja nitraattipitoisuuden minimointia myös palautuslietevirtaamassa. Operointi edellyttää hyvää instrumentointia ja käyttäjiltä enemmän asiantuntemusta kuin perinteinen kemialliseen saostukseen perustuva prosessi. Näistä syistä bioP soveltuu pääosin keskisuurille ja suurille laitoksille.

Toteutus

Biologisen fosforinpoiston mahdollistavilla prosessijärjestelyillä varustettuja jätevedenpuhdistamoja on Suomessa vain muutama, eikä kaikilla niistäkään ajeta bioP:tä ympärivuotisesti. Tekniikan yleistymistä on estänyt halvan saostuskemikaalin hyvä saatavuus. Keski-Euroopassa, Baltiassa, Tanskassa ja Pohjois-Amerikassa kaikenkokoisia, -tyyppisiä ja -ikäisiä bioP-laitoksia on paljon.

Yhdistetyn biologisen fosforin- ja typenpoiston (BNR) vaatima anaerobi-anoksi-aerobivuorottelu luodaan perinteiseen denitrifikaatioprosessiin yksinkertaisimmillaan siirtämällä nitraattikierrätyksen syöttöpistettä eteenpäin. Tällöin tuloksena on A2O-prosessi. Porrastamalla tulevan jäteveden syöttö siten, että osa syötetään suoraan anaerobilohkoon parannetaan fermentaation toimintaa (JHB-prosessi). DN-prosessissa voi myös kokeilla toisen anoksilohkon sekoittamista jättämistä kuten edellä kuvattiin.

Toteutustavasta riippumatta BNR vaatii enemmän allastilavuutta kuin pelkkä typenpoisto. Näin ollen ympärivuotista yhdistettyä biologista fosforin- ja typenpoistoa ei yleensä ole mahdollista toteuttaa allastilavuutta kasvattamatta, jos puhdistamon tulokuormitus on lähellä prosessin mitoitusarvoja.

Hyvin toteutettu ja operoitu BNR-prosessi voi päästä ilman kemikaaleja jopa 0,1 mg/l:n jäännösfosforipitoisuuteen. Käytännössä kuitenkin 1 mg/l vuosikeskiarvona on tyypillinen hyvä tavoitearvo. Käsittelytulosta huonontaa usein prosessin epävakaata toimintaa, jolle ei aina löydy selvää syytä. Etenkin toteutukset, joissa anaerobireaktori on päävirrassa, ovat herkkiä tulevan jäteveden laadun äkillisille heilahteluille esim. rankkasateiden aikana.

Prosessin toimintavarmuutta ja puhdistustuloksia voidaan parantaa seuraavilla toimenpiteillä:

- Anaerobiosan osastoimisen vähintään kahteen peräkkäiseen lohkoon on havaittu parantavan lietteen laskeutuvuutta ja mikrobien reaktionopeuksia anaerobilohkossa.
- Tulevan jäteveden fermentointikelpoinen hiilenlähde ei normaalissa yhdyskuntajätevedessä yleensä riitä tehokkaaseen biologiseen fosforinpoistoon ainakaan jatkuvasti. Hiilitasetta on monilla laitoksilla parannettu raakalietteen fermentoinnilla esiselkeytyksessä tai sakeutuksessa ja fermentoidun lietteen tai sakeuttamon ylitteen kierrättämi-

sellä vesiprosessiin.

- Raaka- ja biolietteen sakeutus on syytä erottaa toisistaan tai jättää raakaliete kokonaan sakeuttamatta, jotta biolietteeeseen sitoutunut fosfori ei vapautuisi lietteenkäsittelyssä.

Osa biologisesti sitoutuneesta fosforista (yleensä n. 15–40 %) vapautuu mädättämössä. Samalla kasvaa riski struviitin eli magnesiumammoniumfosfaatin saostumisesta lietteenkäsittelyn laitteisiin, altaisiin ja putkistoihin. BioP-laitoksilla on tavallista, että lietteenkäsittelyn putkistoille tehdään säännölliset happohuuhdelut struviittisaostumien irrottamiseksi. Sakeutukseen menevään lietteeseen voi myös syöttää saostuskemikaalia, joka sitoo vapautuvaa fosforia ja ehkäisee siten struviitin muodostumista.

Yhdistäminen kemikalointiin

Korkeatasoisen puhdistustuloksen saavuttaminen vaatii yleensä biologisen fosforinpoiston täydentämistä kemiallisella saostuksella. Kemikalointi voidaan toteuttaa esim. seuraavasti:

- esisaostus ennen biologiaa
- jälkisaostus tertiäärikäsittelyssä
- kemikaalin syöttö lietteenkäsittelyn rejektivesiin tai sakeutukseen menevään lietteeseen.

Saostuskemikaalin kulutuksessa on mahdollista päästä n. 50–80 % vähenemään verrattuna perinteiseen esi- tai rinnakkaissaostusprosessiin. Kemikaalien käytössä on varottava liikasyöttöä, jottei kemikalointi sido fosforia niin paljon, että sitä ei jää riittävästi PAO-mikrobien käyttöön.

Hyödyntäminen suomalaisilla puhdistamoilla

BioP:n hyödyntämismahdollisuudet kemikaalin kulutuksen vähentämisessä on selvitettävä laitoskohtaisesti. Parhaiten prosessi soveltuu laitoksille, joilla ei ole lainkaan typenpoistovelvoitetta ja joilla jäteveden orgaanisen aineksen koostumus ja ravinnesuhteet ovat esim. teollisuusjätevesien vaikutuksesta bioP:lle edulliset. Huonoimmin tekniikka soveltuu laitoksille, joille tuleva jätevesi on laimeaa ja joilla on pelkästään nitrifikaatiovelvoite eikä kokonaistypenpoistovelvoitetta. Tarvittavat prosessimuutokset riippuvat puhdistamon nykyisistä allasrakenteista ja nitraatti- ja palautuslietekiertojen johtojärjestelyistä. BioP:tä voi kokeilla ajaa esim. kesäaikaan, jolloin allastilavuutta tarvitaan vähemmän ja fermentaatio toimii paremmin sekä prosessissa että viemäreissä. BioP:n hyödyntämisen edistämiseksi on syytä laatia käytännönläheinen ohjeistus tekniikan soveltamiselle tyypillisillä suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla.

Valvovan viranomaisen kanssa voi olla mahdollista sopia, että kemikaalin toimitushäiriön aikana ajetaan osittaista biologista fosforinpoistoa ja tarvittaessa sallitaan typenpoistotuloksen tilapäinen huonontuminen.

Johtopäätökset

- Biologisen fosforinpoiston toteuttamista suurilla ja keskisuurilla puhdistamoilla on syytä selvittää laitoskohtaisesti
- Käytännönläheiset biologisen fosforinpoiston soveltamisohjeet tulisi laatia
- Biologisella fosforinpoistolla ei pystytä kokonaan korvaamaan kemiallista saostusta, mutta sen avulla voidaan vähentää saostuskemikaalien kulutusta 50–80 %
- Saostuskemikaalin korvaaminen voisi olla toteutettavissa esim. kesäaikaan, jolloin biologisessa prosessissa on ylimääräistä kapasiteettia

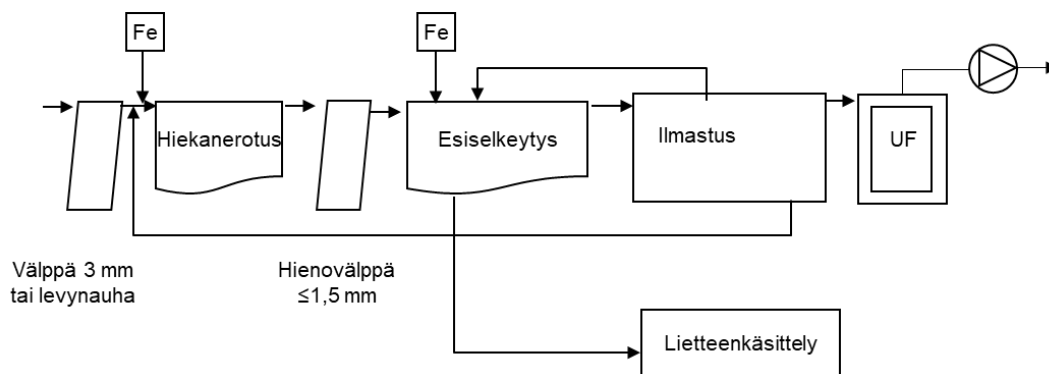
5.3.4 Kalvotekniikat

Jätevedenpuhdistuksessa käytettäviä kalvotekniikoita ovat kalvobioreaktori (membrane bioreactor, MBR) sekä tertiäärinen kalvosuodatus. Jätevedenpuhdistuksessa käytetään tyypillisesti ultrasuodatusta (0,01–1,0 μm), joka poistaa kaiken kiintoaineen sekä bakteerit ja osan viruksista (ks. Kuva 4-2). Kalvotekniikat toimivat siis tehokkaana barrierina. Talousveden käsittelyn yhteydessä luvussa 4.3.3 esitetty kuvaus kalvotekniikoiden perusteista pätee mikro- ja ultrasuodatuksen osalta pitkälti jätevesisovelluksiinkin.

Fosforinpoiston kannalta kalvotekniikoiden teho tulee tehokkaasta kiintoaineen poistosta. Käänteisosmoosikalvoilla saadaan poistettua liukoinen fosfori, mutta esim. Lappeenrannan jätevedenpuhdistamolla tehdyissä pilot-koeajoissa saatiin tertiäärisellä ultrasuodatuksella poistettua myös kolloidimuotoista fosforia.⁵² Kalvotekniikoihin tulee kuitenkin yhdistää kemiallinen saostus, jotta fosforinpoiston lupamääräyksiin päästään.

Kalvosuodatuksen käyttöhäiriötilanteissa (esim. tukkeutuminen, rikkoutuminen) puhdistustulos on heikko tai käsittelylinja jää kokonaan pois käytöstä. Kalvosuodatus vaatii siksi aina tehokkaan esikäsittelyn, esim. verkkorakenteisen hienovälppäyksen tai rumpusiivilöinnin rakovälillä 0,5–2 mm. Kalvojen tukkeutumista voi aiheutua myös rautapohjaisesta saostuskemikaalista, joka muodostaa tahmeampaa flokkia kuin alumiini. Laitetoimittajat suosittelevat käyttämään kalvojen kanssa alumiinipohjaista saostuskemikaalia.

Kalvobioreaktori yhdistää aktiivilieteprosessin ja kalvosuodatuksen. Aktiivilietteen erotus puhdistetusta vedestä tehdään kalvosuodatuksen avulla, mikä mahdollistaa korkeamman lietepitoisuuden (6–15 g MLSS/l) ja korkeamman lieteiän (15–60 d) kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa. MBR-prosessin toteutus osana jätevedenpuhdistusprosessia on kuvattu alla (Kuva 5-3).



Kuva 5-3 Kalvobioreaktori jätevedenpuhdistusprosessissa

Kalvosuodatusyksikkö asennetaan yleensä erilliseen altaaseen omaksi yksiköksi. MBR vaatii voimakkaan palautuspumpun (400–500 % tulovirtaamasta) pumppuineen, putkistoineen ja instrumentointineen. Haluttu lietepitoisuus ylläpidetään ylijäämalietepumppauksella. Kalvojen tukkeutumista estetään kalvojen omalla ilmastusjärjestelmällä, mikä yhdessä pumppausten kanssa kasvattaa käyttökustannuksia. Käyttökustannukset ovat uusilla laitoksilla n. 30 % suuremmat kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa. Käyttökustannukset ovat

⁵² Ruokolainen, V. Fosforin poistaminen jätevedestä tertiäärikäsittelyllä, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2017

laskeneet merkittävästi viime vuosina kalvojen pienentyneen energiankulutuksen ansiosta.

MBR-prosessi on otettu käyttöön kolmella suomalaisella puhdistamolla vuonna 2018: Oulussa (50 000 m³/d), Parikkalassa (1 700 m³/d) ja Viitasaarella (1 840 m³/d). Näiden laitosten kokemusten perusteella MBR sopii erityisesti aktiivilieteprosessin rinnalle, jolloin MBR-linjaa ajetaan vakiovirtaamalla ja virtaamavaihtelu ohjataan aktiivilieteprosessiin. MBR-linjaa ei tällöin tarvitse mitoittaa käsittelemään kaikkia sulamisvesiä, joilla on kylmyyden vuoksi suurempi viskositeetti. Siten sulamisvedet kasvattavat kalvojen mitoitusta merkittävästi. Tehokkaan esikäsitteilyn tärkeys on myös todettu käytännössä. Suomessa MBR-laitoksilta on täyden mittakaavan käyttökokemusta niin lyhyeltä ajalta, että kemikaalinkulutuksen mahdollisista eroista muihin puhdistustekniikoiden nähdessä ei voida vielä todeta mitään varmaa. Viitteitä on kuitenkin siihen suuntaan, että kalvoprosesseissa riittäisi pienempi kemikaaliannostus kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa. Kalvotekniikoilla saavutettavia säästöjä saostuskemikaalikulutuksessa tulisi tutkia.

Kalvosuodatus tertiäärinenä käsittelytekniikkana on kiinnostava erityisesti haitta-aineiden poiston tehostamismenetelmänä, vaikka kaikki haitta-aineet eivät kalvosuodatuksessa poistu. Tertiäärinen kalvosuodatus sopii myös veden hygienisointiin ja sillä saa poistettua jäännösfosforia. Lappeenrannassa Toikansuon jätevedenpuhdistamolla tehtyjen pilot-mittakaavan koeajojen perusteella tertiäärisellä ultrasuodatuksella voidaan päästä 0,05 mg P/l tulokseen jopa ilman erillistä saostuskemikaalin syöttöä tertiäärikäsittelyyn. Koeajoissa todettiin, että myös liukoista (<0,45 µm) fosforia poistui ilman saostuskemikaalia. Kokonaisfosforista saatiin poistettua keskimäärin 93 % ja fosfaattifosforista 95 %.⁵²

Kalvotekniikoiden etuja ovat:

- vakaa puhdistustulos, kiintoainereduktio käytännössä 100 %
- tehokas barrieri, myös bakteerit ja virukset poistuvat
- pieni tilantarve
- haitta-aineiden poiston tehostuminen (riippuen kalvotyypistä)

Kalvotekniikoiden haittoja ovat:

- suurempi energiankulutus kuin perinteisissä prosesseissa → käyttökustannukset
- hienovälppäys ennen kalvoja on välttämätön
- rautakemikaalit eivät sovi kalvoille (tahmeampi flokki)
- MBR ei sovi suurille virtaaman vaihteluille: kylmät sulamisvedet ovat ongelmallisia
- kalvosuodatuksen käyttöhäiriötilanteissa (esim. tukkeutuminen, rikkoutuminen) puhdistustulos heikko tai käsittelylinja kokonaan pois käytöstä.

Johtopäätökset

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">➤ Kalvotekniikoilla saadaan vakaa puhdistustulos ja 100 % kiintoainereduktio➤ Liukoisesta fosforista poistoon tarvitaan kemiallinen saostus, mutta kemikaaliannostus voi ultrasuodatuksessa mahdollisesti olla pienempi kuin muissa jälkikäsitteilytekniikoissa |
|--|

5.3.5 Muut tekniikat

Kemialliset suodatinmateriaalit

Biologisesti puhdistetun jäteveden jäännösfosforia on mahdollista poistaa kemiallisilla suodatinmateriaaleilla. Näissä suodatinmateriaaleissa fosforinpoiston mekanismina toimii joko adsorptio huokoisen suodattimen pintaan tai fosfori saostetaan kalkki- tai rautapitoisen materiaalin pinnalla. Kemiallisten suodattimien materiaalit vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan, mutta käytössä olevia ja tutkittuja materiaaleja ovat esimerkiksi kevytsora, piisaven ja

kalkkioksidin yhdistelmä, kalkkikivirouhe yhdistettynä rautaan ja kipsiin sekä rautaoksidipäällystetty hiikkakivi.⁵³ Kalkkipitoisilla materiaaleilla saadaan nostettua veden alkaliteettia.

Kemiallisia suodatinmateriaaleja on kehitetty erityisesti lammikkopuhdistamoille ja kosteikkoihin sekä haja-asutusalueiden maasuodattimiin. Suodatinmateriaaleja on kuitenkin mahdollista lisätä myös jätevedenpuhdistamoiden hiikkasuodattimiin, jolloin suodatinmassalla on mahdollista poistaa jonkin verran myös liukoista fosforia. Suomessa tällainen sovellus on käytössä Turun Seudun Puhdistamo Oy:n Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla, jossa Filtralite-kevytsoraa on lisätty hiikkasuodattimeen. TSP:n kokemusten mukaan suodatinmassa sitoo liukoista fosforia ilman kemikalointia.

Kemiallisilla suodatinmateriaaleilla saavutettavia säästöjä saostuskemikaalin kulutuksessa tulisi selvittää myös muilla puhdistamoilla. Kemialliset suodatinmateriaalit voisivat sopia erityisesti pienten ja keskisuurten laitosten tarpeisiin.

Tietoja markkinoilla olevista kemiallisista suodatinmateriaaleista on koottu taulukkoon 5-2. Taulukossa listatuista materiaaleista Saint-Gobainin Filtralite®-kevytsoraa valmistetaan Norjassa. Nordkalkin Filtra P -kalkkipohjaista tuotetta valmistetaan Suomessa.

Taulukko 5-2 Markkinoilla olevien kemiallisten suodatinmateriaalien ominaisuuksia

Valmistaja	Tuotenimi	Materiaali	P red.	Nykyiset käyttökohteet	Käyttöikä
EcoFiltration	Polonite®	Kalsium-silikaatti	>90 %	Kiinteistökohtaiset jätevesijärjestelmät, maatalouden valumavedet	2–4 a
Nexom	BluePro®	Fe-päällystetty hiekka	99 %	Jätevedenpuhdistamot	>20 a
Saint-Gobain	Filtralite®	Kevytsora	60 %	Veden- ja jätevedenpuhdistus, kiinteistökohtaiset jätevesijärjestelmät	25 a
Nordkalk	Filtra P	Kalkki, kipsi ja rauta	78 %	Kiinteistökohtaiset jätevesijärjestelmät	6–24 kk

RAVITA

RAVITA on HSY:llä kehitetty menetelmä fosforin talteenottoon jätevedestä. RAVITA-prosessi perustuu fosforin jälkisaostukseen, ja saostuksessa syntyvän lietteen käsittelyyn siten, että fosfori saadaan talteen fosforihappona, ja saostuskemikaali saadaan kierrätettyä takaisin prosessiin. Saostuskemikaalin talteenottoa RAVITA-prosessissa on kuvattu luvussa 3.6. RAVITA-prosessin etuna on se, että se mahdollistaa fosforin talteenoton ja saostuskemikaalin kierrätyksen erikokoisilla puhdistamoilla, mutta menetelmä on toisaalta vielä pilotointivaiheessa.⁵⁴

⁵³ Hedström, A. Reactive Filter Systems for Small Scale Wastewater Treatment – A Literature Review, Vatten 62, 253-263, 2006

⁵⁴ HSY, RAVITA-prosessi, Internet-sivut, 2019. Ks. <https://www.hsy.fi/ravita/fi/tulokset/Sivut/default.aspx>

Magnetiitti

BioMag® on Yhdysvalloissa kehitetty menetelmä, jossa magnetiittia (rauta(II,III)oksidi, Fe₃O₄) syötetään aktiivilieteprosessiin tehostamaan kiintoaineen erottumista. Saman yrityksen (Evoqua) tuotteisiin kuuluu myös magnetiitin sisällyttäminen kemiallisesti tehostettuun esiselkeytykseen (CEPT) tai tertiäärikäsittelyn kemialliseen saostukseen (Bio-CoMag®). Perinteistä saostuskemikaalia ja polymeeriä tarvitaan silti, koska magnetiitti on inertti aine, eikä itsessään saosta mitään. Magnetiitti kerätään lietteestä magneettirummun avulla ja kierrätetään prosessissa uudelleen käytettäväksi (ks. luku 3.6). Magnetiitistä saadaan talteen 85–95 %. Menetelmän etuja ovat tehostettu fosforinpoisto sekä lietteen parempi laskeutuvuus selkeytyksessä, minkä ansiosta ilmastuslaitaissa voidaan käyttää korkeampia lietepitoisuuksia.⁵⁵ Magnetiittisovelluksia on Yhdysvalloissa, mutta Suomessa niistä ei ole käyttökokemuksia.

Elektrokoagulaatio

Elektrokoagulaatio on menetelmä, jossa saostava metalli-ioni (alumiini tai rauta) liuotetaan anodielektrodilta. Elektrokoagulaatiossa korvataan siten saostuskemikaali kiinteällä metallilla. Menetelmää on kuvattu tarkemmin luvussa 3.5.3. Jätevedenpuhdistuksessa elektrokoagulaatio toimii, koska veden sähkönjohtavuus on riittävä. Menetelmän etuja ovat pienempi tilantarve ja pienempi lietteen määrä perinteiseen saostukseen verrattuna. Elektrokoagulaation sovellutuksia ei kuitenkaan juuri löydy kunnallisesta jätevedenpuhdistuksesta, ja menetelmän kehitys vaatii lisää tutkimusta.

5.4 Yhteenveto

Laitoksilla lisätään kemiallisen saostuksen toimintavarmuutta seuraavin keinoin:

- varautumalla etukäteen vaihtoehtoisen kemikaalin käyttöön
- lisäämällä nykyisen kemikaalin varastointia
- optimoimalla nykyistä käsittelyprosessia ja siten vähentämällä kemikaalin kulutusta.

Saostuskemikaalin käytön vähentäminen on useimmilla nykyisillä jätevedenpuhdistamoilla mahdollista kehittämällä saostuskemikaalin syöttöjärjestelyjä ja jätevedenpuhdistus- ja lietteenkäsittelyprosessien hallintaa kokonaisuutena. Kemikaalin syötön optimoinnista tulee tehdä laitoskohtaiset selvitykset.

Kemiallisen fosforinpoiston turvaamiseksi pitkällä aikavälillä suositellaan, että laitoksilla selvitetään saostuksen toimintavarmuuden parantamisen vaatimat toimenpiteet ja niiden toteutus huomioidaan pitkän aikavälin kehittämis- ja investointisuunnitelmissa. Ikääntyvien laitosten saneerauksia suunniteltaessa on syytä harkita vaihtoehtoisia tekniikoita, joissa saostuskemikaalien tarve on nykyistä vähäisempi.

Seuraavassa taulukossa (Taulukko 5-3) on lyhyesti vertailtu varteenotettavimpia vaihtoehtoisia tekniikoita verrattuna perinteiseen saostukseen. Tarkempaa tietoa tekniikoista löytyy kappaleesta 5.3.

⁵⁵ Evoqua, The CoMag system for enhanced primary or tertiary treatment, Internet-sivut, 2019. Ks. <https://www.evoqua.com/en/brands/Envirex/Pages/comag.aspx>

Taulukko 5-3 Yhteenveto tarkastelluista vaihtoehtoisista tekniikoista

	Saostuskemikaalien tarve	Ympäristövaikutukset	Huoltovarmuus
Biologinen fosforinpoisto	vähenee 50–80 %	prosessihäiriöiden riski kasvaa	mahdollisuus operointiin jopa ilman kemikaaleja
Kalvobioreaktori	vähenee hieman	puhdistustulos paranee myös muiden parametrien kuin fosforin osalta suurempi energiankulutus kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa	kalvosuodatusmoduulien toimittajat ulkomaisia, moduulit eivät välttämättä standardoituja
Tertiäärinen kalvosuodatus	vähenee 30-50 %	puhdistustulos paranee myös muiden parametrien kuin fosforin osalta korkeahko energiankulutus	kalvosuodatusmoduulien toimittajat ulkomaisia, moduulit eivät välttämättä standardoituja
Kemialliset suodatinmateriaalit	vähenee hieman /pysyy samana	suodatinmateriaalien käyttöikä voi olla jopa >20 a	suuri osa toimittajista ulkomaisia

Kemiallisen saostuksen huoltovarmuutta tulisi kehittää jatkoselvityksillä ja tutkimuksella. Tässä luvussa tunnistettuja selvitystarpeita ovat:

- Päivitetyt, käytännönläheiset ohjeet ferrosulfaatin annostelun optimointiin
- Saostuskemikaalien kierrätys: sisäiset kierrot, mahdollinen reaktiointi laitoksella
- Vaihtoehtoisten saostuskemikaalien kehittäminen ja testaus
- Biologisen fosforinpoiston käytännönläheiset soveltamisohjeet
- Kalvotekniikoilla saavutettavien saostuskemikaalikulutusten säästöjen arviointi
- Kemiallisten suodatinmateriaalien testaus pienillä ja keskisuurilla puhdistamoilla.

LIITTEET

LIITE 1 VARAUTUMISOHJE PINTAVESILAITOKSILLE

Varautumisohje

Selvitä vesilaitoksesi mahdollisuudet vaihtoehtoisten kemikaalien käyttöön hyvissä ajoin ennen mahdollista kriisitilannetta.

1 Määritä soveltuvin vaihtoehtoinen kemikaali

Määritä laitoksellesi soveltuvat vaihtoehtoiset kemikaalit (ks. luvut 3.4 ja 4.2).

Esim. ferrisulfaatista on helpointa vaihtaa nestemäiseen alumiinisulfaattiin ja päinvastoin (tarkista materiaalivaatimukset ym. kohdan 7 mukaisesti).

2 Ole yhteydessä kemikaalitoimittajaan

Sovi hankintavaiheessa, että käytössä oleva kemikaali voidaan sopimusteknisesti vaihtaa saman toimittajan korvaavaan kemikaaliin. Kartoita tarvittaessa vaihtoehtoiset kemikaalitoimittajat.

3 Laske annostelumäärät

Laske valmiiksi tarvittava vaihtoehtoisen kemikaalin annostelumäärä sekä määritä saostus-pH-alue. Määritä pH:n säätökemikaalin tarve ja annostelumäärän muutos, esim. esikalkki. Kemikaalin annostelumäärään ja pH:n säätöön vaikuttavat raakaveden orgaanisen aineen määrä, alkaliteetti ja pH. (ks. luku 3.4).

4 Tee tarvittaessa koeajot

Tee kemikaaliannoksen optimoimiseksi ja soveltuvuuden testaamiseksi mahdollisuuksien mukaan koeajot, joiden tulosten perusteella tarkenna kemikaalimäärät.

5 Laadi kirjalliset ohjeet

Laadi valmiiksi kirjalliset ohjeet vaihtoehtoiseen kemikaaliin siirtymiselle sisältäen ohjauksen muutokset ja annostelumäärät.

6 Tee muutokset automaatioon

Tee automaatiojärjestelmään tarvittaessa valmiiksi automaattinen ohjaus vaihtoehtoisen saostuskemikaalin annostelulle.

7 Tarkista laitteet, putket ja kemikaalivarastot

Tarkista eri kemikaalien materiaalivaatimukset (ks. luku 3.4). Ferrisulfaatin kanssa pitkälti samat materiaalivaatimukset ovat alumiinisulfaatilla ja nestemäiseen alumiinisulfaattiin on nopeinta siirtyä ilman rakenteellisia muutoksia (2–4 viikossa). Ferrisulfaatista ferrikloridiin ja polyalumiinikloridiin siirtyminen edellyttää erillisiä varastointi- ja annostelujärjestelmiä.

Tarkista nykyisten pumppujen tuottoalueet ja vertaa vaihtoehtoisen kemikaalin annostelumäärään. Tarvittaessa hanki erilliset pumput.

8 Rakenna tarvittaessa vara-annostelujärjestelmät

Rakennuta tarvittaessa valmiiksi kiinteät putkistot toiselle saostuskemikaalille sekä varaa tila kemikaalisäiliöille.

9 Tilapäisvarastointi

Selvitä varastointipaikat nykyisin käytetylle saostuskemikaalille sekä vaihtoehtoisille kemikaaleille. Tarkista eri kemikaalien suositellut varastointiajat ja -lämpötilat (ks. luku 3.4).

Valmistaudu varmuusvaraston käyttöönottoon.

10 Arvioi vaikutukset veden laatuun

Arvioi vaikutukset vedenlaatuun / jatkoprosesseihin siirryttäessä raudasta alumiiniin:

- Raakaveden raudan heikompi poistuminen
- Alumiinijäännöksen hallinta annosta optimoimalla
- Orgaanisen aineen poistotehon aleneminen
- Muutokset jälkialkaloinnissa
- Muutokset lietteen laadussa ja vaikutukset jätevedenpuhdistamolle / lietteen käsittelyssä

Arvioi vaikutukset vedenlaatuun / jatkoprosesseihin siirryttäessä alumiinista rautaan:

- Saostus-pH:n muutos lisää alkalointitarvetta laitoksella ja vaikuttaa kemikaalien kokonaiskulutukseen
- Muutokset lietteen laadussa ja vaikutukset jätevedenpuhdistamolle / lietteen käsittelyssä

11 Hae viranomaishyväksyntä etukäteen

Saostuskemikaalin muutos vaatii Terveysturvallisuuslain 763/1994 § 18 mukaisen hyväksynnän. Hakemus on tehtävä viimeistään 30 vuorokautta ennen toiminnan muuttamista, joten vaihtoehtoisen saostuskemikaalin käytölle kannattaa hakea hyväksyntää jo ennalta osana varajärjestelyjä/varautumista.

12 Tee tarvittaessa ilmoitus kemikaaliturvallisuudesta vastaavalle viranomaiselle

Tee varastoitavasta kemikaalimäärästä riippuen Valtioneuvoston asetuksen vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta 685/2015 mukainen ilmoitus pelastuslaitokselle tai lupahakemus Turvallisuus- ja kemikaalivirastolle.

13 Huolehdi tiedottamisesta

Laadi valmiit tiedotepohjat, joilla muutoksista ja sen vaikutuksista ilmoitetaan asiakkaille. Tunnista keskeiset mediakanavat ja varaudu sosiaalisessa ja muussa mediassa käytävään maine keskusteluun.

LIITE 2 VARAUTUMISOHJE JÄTEVEDENPUHDISTAMOILLE

Varautumisohje

Selvitä jätevedenpuhdistamosi mahdollisuudet vaihtoehtoisten kemikaalien käyttöön hyvissä ajoin ennen mahdollista kriisitilannetta.

1 Määritä soveltuvin vaihtoehtoinen kemikaali

Määritä laitoksellesi soveltuvat vaihtoehtoiset kemikaalit (ks. luvut 3.4 ja 5.2).

Esim. ferrosulfaatista on helppo siirtyä nestemäisen ferrisulfaatin käyttöön (ks. kohta 7).

2 Ole yhteydessä kemikaalitoimittajaan

Sovi hankintavaiheessa, että sopimusteknisesti voidaan vaihtaa saman toimittajan korvaavaan kemikaaliin. Tarvittaessa kartoita vaihtoehtoiset kemikaalitoimittajat.

3 Laske annostelumäärät

Laske nykyisen saostuskemikaalin alin mahdollinen annostelumäärä, jolla päästään fosforin lupamääräyksiin. Selvitä tertiäärikäsittelyn kapasiteetti: kuinka suuren osan fosforinpoistosta voi jättää alumiinikemikaaleilla toteutettavaan jälkisaostukseen (ks. luku 5.3.1).

Laske valmiiksi tarvittava vaihtoehtoisen kemikaalin annostelumäärä. Käytettäessä alumiinipohjaista kemikaalia esi- tai rinnakkaissaostukseen on aloitettava pienellä annostuksella ja kasvatettava annostusta vähitellen, jotta biologinen prosessi ehtii tottua uuteen kemikaaliin ja typenpoisto häiriintyisi mahdollisimman vähän.

4 Tee tarvittaessa koeajot

Tee kemikaaliannoksen optimoimiseksi ja soveltuvuuden testaamiseksi mahdollisuuksien mukaan koeajot, joiden tulosten perusteella tarkenna kemikaalimäärät.

5 Laadi kirjalliset ohjeet

Laadi valmiiksi kirjalliset ohjeet vaihtoehtoiseen kemikaaliin siirtymiselle sisältäen ohjauksen asetusarvojen muutokset, prosessiyksiköiden ajotapamuutokset ja annostelumäärät.

6 Tee muutokset automaatioon

Tee automaatiojärjestelmään tarvittaessa valmiiksi automaattinen ohjaus vaihtoehtoisen saostuskemikaalin annostelulle.

7 Tarkista laitteet, putket ja kemikaalivarastot

Tarkista eri kemikaalien materiaalivaatimukset luvusta 3.4. Ferrosulfaatin kanssa samat materiaalivaatimukset on ferrisulfaatilla ja alumiinisulfaatilla. Kiinteään alumiinisulfaattiin ja nestemäiseen ferrisulfaattiin pystyy siirtymään ilman rakenteellisia muutoksia periaatteessa parissa päivässä. Ferrikloridiin ja polyalumiinikloridiin siirtyminen edellyttää erillisiä varastointi- ja annostelujärjestelmiä, mikäli kemikaalisäiliöt, -putkistot ja -laitteet eivät ole muovisia tai muovitettuja.

Tarkista nykyisten pumppujen tuottoalueet ja vertaa vaihtoehtoisen kemikaalin annostelumäärään. Esimerkiksi ferrisulfaatin viskositeetti on ferrosulfaattia suurempi. Tarvittaessa hanki erilliset pumput.

8 Rakenna tarvittaessa vara-annostelujärjestelmät

Rakenna tarvittaessa valmiiksi kiinteät putkistot toiselle saostuskemikaalille sekä varaa tila kemikaalisäiliöille.

9 Tilapäisvarastointi

Selvitä varastointipaikat nykyisin käytetyille saostuskemikaalille sekä vaihtoehtoisille kemikaaleille. Tarkista eri kemikaalien suositellut varastointiajat ja -lämpötilat (ks. luku 3.4).

Valmistaudu varmuusvaraston käyttöönottoon.

10 Tunnista vaihtoehtoisen kemikaalin ja ajotapamuutosten vaikutukset

Saostuskemikaalin vaihto voi vaikuttaa eri yksikköprosesseihin. Arvioi etenkin alumiinin vaikutukset biologiaan (nitrifikaation inhibitio) ja lietteenkäsittelyyn (rikkivety, käsiteltävyys). Vaihtoehtoinen saostuskemikaali voi aiheuttaa myös pH-muutoksia, minkä vuoksi voi olla tarpeen kasvattaa alkalointikemikaalien annostelua.

11 Tee tarvittaessa ilmoitus kemikaaliturvallisuudesta vastaavalle viranomaiselle

Tee varastoitavasta kemikaalimäärästä riippuen Valtioneuvoston asetuksen vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta 685/2015 mukainen ilmoitus pelastuslaitokselle tai lupahakemus Turvallisuus- ja kemikaalivirastolle.

12 Huolehdi tiedottamisesta

Ota yhteyttä valvovaan viranomaiseen ja käy läpi saostuskemikaalin saatavuusongelmiin liittyviä skenaarioita ja vaihtoehtoisen kemikaalin käytön vaikutukset. Keskustele fosforinpoiston ja typenpoiston välisestä priorisoinnista.

Tunnista keskeiset mediakanavat ja varaudu sosiaalisessa ja muussa mediassa käytävään maine keskusteluun.

Kemiallisen saostuksen huoltovarmuuden parantaminen Suomen vesihuollossa

JULKAISIJA:

Huoltovarmuusorganisaatio

Vesihuoltopooli

www.huoltovarmuus.fi

ISBN 978-952-5608-72-4

Helsinki 2020



HUOLTIVARMUUSORGANISAATIO
FÖRSÖRJNINGSBEREDSKAPSORGANISATIONEN
NATIONAL EMERGENCY SUPPLY ORGANISATION



AFRY
ÄF PÖRY