

Miikka Lahdenperä

**ULTRASUODATUS (UF) OSANA TEOLLISUUDEN VESIVIRTO-
JEN SISÄISTÄ KIERRÄTTÄMISTÄ**

ULTRASUODATUS (UF) OSANA TEOLLISUUDEN VESIVIRTOJEN SISÄISTÄ KIERÄTTÄMISTÄ

Miikka Lahdenperä
Opinnäytetyö
Kevät 2018
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Miikka Lahdenperä

Opinnäytetyön nimi: Ultrasuodatus (UF) osana teollisuuden vesivirtojen sisäistä kierrättämistä

Työn ohjaajat: Ville Rantanen ja Jukka Ylikunnari

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018

Sivumäärä: 52 + 4 liitettä

Teollisuuden Veden tilaaman työn tavoitteena oli selvittää ultrasuodatuksen (UF) käyttömahdollisuuksia osana kaivosvesien uudelleenkierrättämistä. Ultrasuodatuksen voidaan ajatella olevan vaihtoehto perinteiselle hiekkasuodatukselle. Työn tarkoituksena oli selvittää ultrasuodatustekniikan toimivuutta ja etuja käytännön pilot-kokeiden avulla. Aiemmin vastaavia kokeita ultrasuodatuskalvoilla ei ole juurikaan tehty samassa mittakaavassa, joten kokeille ei ollut vertailupohjaa.

Ultrasuodatusta kaivosvesien käsittelyssä kokeiltiin Teollisuuden Veden rakentamalla pilot-laitteistolla, joka koostuu UF- ja käänteisosmoosikalvoista. Pilot-laitteistoa operoimalla ja etenkin UF-yksikön käyttöä optimoimalla pyrittiin löytämään käsiteltävälle vedelle soveltuvat käyttöparametrit sekä puhdistusmenetelmät pidemmän ja suuremman kokoluokan laitteiston suunnittelua varten.

Koetuloksilla saatiin hyvin selville, miten pilot-laitteiston kaltainen vedenkäsittelyprosessi toimii kaivosvedellä. Neljän käyttöjakson aikana parametrien muutoksilla prosessi saatiin toimimaan taloudellisemmin sekä pitkäjaksoisemmin. Jaksojen väleissä tehdyt kemikaalipesut kalvoille kuitenkin osoittivat, ettei kyseinen vesi tai kaivoksen vedenkäsittelylaitoksen operointi sovellu pitkäjakoisesti kalvosuodatukselle. Pilotilla käsitellyn sulfaatin ja kalsiumin suhteen ylikylläisen veden johdosta pilot-laitteiston kalvot likaantuivat pysyvästi muutamassa kuukaudessa kipsisakan (CaSO_4) muodostuessa suodatuspinnalle eikä niiden puhdistaminen onnistunut tavanomaisin keinoin.

Asiasanat: vedenkäsittely, ultrasuodatus, käänteisosmoosi, teollisuus, jätevesi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Energy technology

Author: Miikka Lahdenperä

Title of thesis: Ultrafiltration (UF) as a part of the recycling of industrial water streams

Supervisors: Ville Rantanen and Jukka Ylikunnari

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2018

Pages: 52 + 4 appendices

This Thesis studied how ultrafiltration (UF) can recycle mine waste water. Ultrafiltration can be considered as an alternative process to traditional sand filtration. Thesis' purpose was to research operability of ultrafiltration membranes with practical pilot tests. Corresponding trials with UF membranes have not been done previously in this scale.

Filtration of mine waste water was tested with Industrial Water Ltd.'s pilot which consist of UF and reverse osmosis membranes. By operating pilot system, it was tried to find out the applicable process parameters and the cleaning methods for a long-term use.

Test results showed how UF-RO process operates with mine water. Four trial periods were operated while process parameters were changed on a systematic way. However, it was found out that water with high concentration of sulfate and calcium or changing circumstances of mines' own water treatment system were not suitable for membrane filtration. Non-reversible fouling of membranes caused by calcium sulfate (CaSO_4) was detected after only few months.

Keywords: water treatment, ultrafiltration, reverse osmosis, industrial waste water

ALKULAUSE

Työn on teettänyt Teollisuuden Vesi Oy. Haluan kiittää työn ohjaajia Teollisuuden Veden Ville Rantasta ja Oulun ammattikorkeakoulun Jukka Ylikunnaria ammattitaitoisesta ohjaamisesta. Lisäksi haluan kiittää muuta Teollisuuden Veden henkilökuntaa tuesta. Erityisesti haluan osoittaa kiitokseni Karri Aunolalle avusta ja opastuksesta koeajojen suorituksessa ja tulosten tulkinnassa.

Oulussa 15.5.2018

Miikka Lahdenperä

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
ALKULAUSE	6
SISÄLLYS	7
SANASTO	9
1 JOHDANTO	9
2 VESIEN KÄSITTELY TEOLLISUUDESSA	10
2.1 Veden käyttö teollisuudessa	10
2.2 Vedenkäsittelytekniikat	11
2.3 Veden laatu ja siihen vaikuttavat tekijät	12
2.4 Kokeellisen osuuden kaivosvedet	15
3 ULTRASUODATUS (UF)	17
3.1 Toimintaperiaate	17
3.2 Kalvosuodatusmenetelmät	18
3.3 Kalvomateriaalit ja rakenteet	20
3.4 UF-laitteiston yleiset komponentit ja kytkennät	24
3.5 Käyttöparametrit	25
3.5.1 Vuoarvo	25
3.5.2 Saanto	26
3.5.3 Ajotapa	26
3.5.4 Vastavirtahuuhtelu	27
3.6 Koagulaatio ennen ultrasuodatusta	28
3.7 Kalvon likaantuminen	29
4 KOEAJOJEN SUORITTAMINEN	33
4.1 Tavoitteet	33
4.2 Pilot-laitteisto	33
4.3 Käytetyt membraanit ja kemikaalit	36
5 TULOKSET	40
5.1 Ajojakso 1	41
5.2 Ajojakso 2	42
5.3 Ajojakso 3	44

5.4 Ajojako 4	46
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUKSET	47
7 YHTEENVETO	49
LIITTEET	
Liite 1	
Liite 2	
Liite 3	
Liite 4	

SANASTO

BW	Vastavirtahuuhtelu (Backwash)
CIP	Pesuyksikkö (Clean-In-Place)
HMWC	Suurimolekyyliset komponentit (High Molecular Weight Component)
MF	Mikrosuodatus (Microfiltration)
NF	Nanosuodatus (Nanofiltration)
RO	Käänteisosmoosi (Reverse Osmosis)
TMP	Transmembraaninen paine (Trans Membrane Pressure)
TOC	Kokonaisorgaaninen hiili (Total Organic Carbon)
TSS	Suspendoitunut kiintoaines (Total Suspended Solids)
UF	Ultrasuodatus (Ultrafiltration)

1 JOHDANTO

Ultrasuodatuksesta (englanniksi *ultrafiltration*, UF) on kehittynyt varteenotettava vaihtoehto perinteisten vedenkäsittelyprosessien rinnalle. UF-tekniikan houkuttelevuutta on lisännyt teknisen kehityksen seurauksena parantunut käsitellyn veden laatu sekä alentuneet valmistuskustannukset. Suunnittelun ja tekniikan kehityksen myötä UF soveltuu nykyään myös suurten ja keskikokoisten vedenkäsittelylaitosten käsittelytekniikaksi. Ultrasuodatusta voidaan pitää perinteisen hiekkasuodatuksen vaihtoehtoisena ja kilpailevana menetelmänä. (1, s. 10.84.)

Tämän työn tavoitteena oli selvittää UF:n soveltuvuutta kaivoksen prosessivesien uudelleen kierrättämisessä käänteisosmoosilaitteiston (englanniksi *Reverse Osmosis*, RO) esikäsittelytekniikkana. Sopivat käyttöparametrit ja puhdistusmenetelmät pitkäaikaista käyttöä varten sekä mahdolliset rajoitteet pyrittiin selvittämään olemassa olevan pilot-laitteiston koeajoilla.

Työ oli osa Tekesin rahoittamaa Teollisuuden Veden RO-Pro-projektia, jonka tavoitteena oli selvittää vaihtoehtoja esille tulleiden käytännön ongelmien ratkaisemiseksi veden kierrätysprosesseissa. Yksi projektin tavoitteista on RO:n esikäsittelyn parantaminen ja soveltuvan tekniikan pilotointi. Projekti kuuluu Tekesin ohjelmaan Green Mining – Huomaamaton ja älykäs kaivos 2011–2016. (2.)

Työn teetti Teollisuuden Vesi Oy, joka on vedenkäsittelyyn ja mikrobiologiaan erikoistunut palveluyritys. Teollisuuden Veden asiakkaita ovat vesilaitokset ja yritykset eri teollisuuden aloilta. (3.)

2 VESIEN KÄSITTELY TEOLLISUUDESSA

Vedenkäsittelyn tarve riippuu veden käyttökohteesta ja käytettävän raakaveden laadusta. Yleensä käsiteltävästä vedestä halutaan poistaa tiettyjä ainesosia, jotta vesi soveltuisi teollisuuden käyttöön. Esimerkiksi höyryntuotannossa kattilakiven muodostumista halutaan estää oikeaoppisella vedenkäsittelyllä. Lämpötilan ja paineen kasvaessa myös kattilaveden laadun merkitys kasvaa. Tekstiili- ja paperiteollisuudessa prosessivesistä halutaan poistaa ensisijaisesti rauta ja mangaani. Joissain tapauksissa, kuten lääkkeiden valmistuksessa, veden täytyy olla ultrapuhdasta. (4, s. 325.)

2.1 Veden käyttö teollisuudessa

Suomen teollisuudessa suurimpia vedenkäyttäjiä ovat voimalaitokset, massa- ja paperitehtaat sekä öljy- ja petrokemianteollisuus. Näissä teollisuuslaitoksissa vettä tarvitaan pääsääntöisesti jäähdytys- ja prosessivetenä. Lisäksi vettä kuluu huuhtelu- ja saniteettivetenä. Muita vähemmän merkittäviä vedenkuluttajia ovat esimerkiksi kemianteollisuus ja metallien valmistusprosessit. (5, s. 18.)

Suomessa suurin osa teollisuuden vedentarpeesta katetaan merivedellä, jota käytetään pääsääntöisesti jäähdytyksessä. Huomattava osa vedestä otetaan myös joista, järvistä ja tekoaltaista. Teollisuuden omien vedenottamoiden yleistymisen myötä kunnallisen vesilaitosveden käyttö on vähentynyt. Lisäksi teollisuusprosessit uudelleenkierrättävät prosessivesiä tehokkaammin ja ovat muuttuneet vähemmän vettä kuluttaviksi. Kunnallisista vesijohtoverkoista joudutaan kuitenkin ottamaan vettä teollisuudenaloilla, joissa vedentarve on kohtuullisen pieni mutta veden laatuvaatimukset ovat korkeat. Elintarviketeollisuus, osa metalliteollisuudesta, tekstiiliteollisuus sekä panimot ovat esimerkkejä tällaisista aloista. (5, s.18–19.)

Suomessa massa- ja paperiteollisuus aiheuttaa jätevesillään merkittäviä fosfori- ja typpipäästöjä, mikä aiheuttaa luonnonvesien rehevöitymistä. Ravinteiden pääsemistä luontoon voidaan vähentää oikeaoppisella jätevesien käsittelyllä. Muita luontoa kuormittavia teollisuudenaloja ovat esimerkiksi kemian teollisuus ja kaivokset. Metallien ja muiden haitallisten aineiden kuormitukset ovat näiden alojen

osalta kuitenkin vähentyneet pois lukien uudet kaivokset, joiden päästövaikutukset ovat kasvaneet kaivostoiminnan lisääntyttyä Suomessa. (6.)

2.2 Vedenkäsittelytekniikat

Vedenpuhdistustekniikoita on useita. Osa niistä soveltuu paremmin tietylle vedelle kuin toiset. Eri tekniikoita voidaan myös käyttää toistensa esi- tai jälkikäsitelymuotona. Puhdistusmenetelmät voivat perustua kemialliseen ja biologiseen tai fysikaaliseen veden prosessointiin. (4, s. 329.)

Kemiallisella saostuksella vedestä voidaan poistaa liuenneita aineita lisäämällä veteen kemikaaleja ja näin muuttaa epäpuhtauksien pintavarauksia ja vuorovaikutuksia toisiinsa. Tämän seurauksena veden sisältämät epäpuhtaudet saostuvat suuremmiksi partikkeleiksi, minkä jälkeen saostuma on helpompi erotella puhdistetusta vedestä. Saostamalla voidaan poistaa vedestä esimerkiksi rautaa, mangaania sekä kovuussuoloja. Kemiallista saostusta hyödynnetään erityisesti orgaanisen aineen kuten humuksen poistamisessa pintavesistä. (4, s. 331.)

Ioninvaihdolla sidotaan veden sisältämiä ionimuotoisia yhdisteitä vaihtamalla ne toisiin ionisiin yhdisteisiin yleensä orgaaniseen hartsimassan avulla. Massat jaetaan kationi- ja anionimassoihin. Ioninvaihdossa poistettavat ionit vaihtuvat tapauskohtaisesti haitattomampiin ioneihin, kuten natriumiin ja kloridiin. Tyypillisesti ioninvaihtosarjoja hyödynnetään raudan, silikaatin, mangaanin, nitraatin, uraanin, humuksen sekä kovuussuolojen poistamisessa vedestä. Tietyin väliajoin massat tulee elvyttää niiden toimintakyvyn palauttamiseksi (7.)

Perinteisellä veden suodatuksella tarkoitetaan vesimassan kuljettamista esimerkiksi hiekka- tai hiilikerroksen läpi. Hiekkasuodatuksella vedestä poistuu kiintoainesta sekä hiutalemaisista flokkeista. Vaihtoehtoinen menetelmä hiukkassuodatukseen on puoliläpäisevät kalvosuodatustekniikat, joita käsitellään tässä työssä laajemmin luvussa 3. (4, s. 337.)

Etuna kalvosuodatustekniikoilla verrattuna perinteisiin menetelmiin on esimerkiksi kemikaalien vähäisempi tarve. Perinteisissä suodatusmenetelmissä kemikaaleja tarvitaan esimerkiksi koagulointiin, flokkulointiin sekä pH:n säätöön. Li-

säksi kalvosuodatuksella voidaan taata tasaisen käsitellyn veden laatu syöttöveden laadusta riippumatta. Kalvosuodatuslaitokset ovat myös yleensä pienempi-kokoisia verrattuna perinteisiin vedenkäsittelylaitoksiin, ja niiden automaatio on suhteellisen yksinkertainen. (1, s. 10.8.)

2.3 Veden laatu ja siihen vaikuttavat tekijät

Vesianalyysien tarkoituksena on saada selville, soveltuuko vesi tiettyyn käyttötarkoitukseen tai kohteeseen. Analyysien avulla suunnitellaan ja valitaan alustavasti veden käsittelytekniikat, jotta tuotevesi saavuttaisi halutun laatutason. Käsitellyn veden analyyseillä puolestaan tutkitaan, onko haluttu laatutaso saavutettu, kun vedenkäsittelylaitteisto tuottaa puhdistettua tuotevettä vakaassa tilassa. Veden laatu riippuu vahvasti sen lähteestä ja joissain tapauksissa myös vuodenaikasta. Tämän vuoksi vesianalyyseja on tärkeä ottaa pidemmän jakson ajan, jotta veden todellinen laatu ja sen sisältämät epäpuhtaudet tiedostetaan (8, s. 1). Seuraavaksi on esitetty joitain veden laadun mittareita.

Sameus on yksi hyvä veden laadun mittari. Se kertoo nimensä mukaisesti veden läpinäkyvyydestä. Sameutta aiheuttavat veden sisältämät partikkelit ja siten sameuden muutos voi viitata kiintoainepitoisuuden muutokseen. Sameutta aiheuttavat luonnonvesissä esimerkiksi jätevesien mukana tulevat epäpuhtaudet, eroosion aiheuttamat sedimentit, leväkasvusto, kasviplankton sekä kaupunkien hulevedet. Käsiteltävän veden korkea sameusarvo voi aiheuttaa lisäkustannuksia puhdistusprosessissa. Veden sameus määritetään sille tarkoitetulla mittalaitteella. Yleisin mittayksikkö sille on NTU (englanniksi *Nephelometric Turbidity Units*). Mittausmenetelmä perustuu valon siroamiseen vedestä sen sisältämien erilaisten partikkelien ja liuenneen kiintoaineen johdosta. Kirkkaan veden sameus on pienempi kuin 1,0 NTU. Jos sameusarvo on välillä 1–5 NTU, voidaan sanoa veden olevan lievästi sameaa. Joissain tilanteissa luonnonvesien sameus voi nousta jopa yli 100 NTU:n. (9, s. 8.)

Kiintoainepitoisuus eli TSS (englanniksi *Total Suspended Solids*) mitataan vedestä suodattamalla sitä kalvon läpi, jonka huokoskoko on välillä 0,2–20 µm.

Suodatuksen jälkeen suodatuspaperi tai -kalvo kuivataan uunissa vähintään tunnin ajan 103–105 celsiusasteessa. Kuivatuksen jälkeen kiintoainepitoisuus voidaan laskea kaavan 1 mukaisesti. (8, s. 5.)

$$TSS = \frac{(C-D)*1000}{V}$$

KAAVA 1

TSS = näytteen kiintoainepitoisuus (mg/l)

C = suodattimen massa kuivatuksen jälkeen (g)

D = suodattimen massa kuivatuksen jälkeen ennen suodatusta (g)

V = näytteen tilavuus (l)

Kiintoainepitoisuutta vedessä lisää jätevesien kuormitus, runsas biomassa tai eroosion kuljettama aines kuten savi. Puhtaan veden kiintoainepitoisuus on alle 1,0 mg/l. Esimerkiksi jokivesissä kiintoainepitoisuus vaihtelee vuodenaikojen välillä voimakkaasti kuten sameuskin. Avovesien aikaan pintavesien kiintoainepitoisuus on korkeampi (noin 1–3 mg/l) johtuen levien lisääntymisestä. (9, s. 9.)

Kokonaisorgaanisen hiilen eli TOC-arvon (englanniksi *Total Organic Carbon*) määrittäminen on yksi tarkka keino selvittää veden orgaanisia yhdisteitä. TOC-mittauksella saadaan selville liuenneiden sekä liukenemattomien orgaanisten aineiden määrä. TOC määritellään veden sisältämän kokonaishiilen ja epäorgaanisen hiilen erotuksena. Yleensä se mitataan oksidoimalla vesinäytettä. Vapautunut hiilidioksidin määrä mitataan, minkä perusteella kokonaisorgaanisen hiilen määrä näytteestä voidaan laskea. (10.)

pH-luku kuvaa veden happamuutta tai emäksisyyttä. pH-mittaus perustuu näytteen vetyionien (H^+) konsentraation tai tarkalleen ottaen aktiivisuuden määrittämiseen. 25 asteen lämpötilassa pH on yleisesti välillä 1–14. Neutraalin veden pH 25 celsiusasteessa on 7. pH vaikuttaa eri aineiden liukoisuuteen vedessä. Kun pH laskee, monen aineen liukenevuus kasvaa varsinkin epäorgaanisten yhdisteiden tapauksessa, mikä mahdollistaa myös niiden absorptio. pH voidaan määrittää kaavalla 2. (8, s. 11–12.)

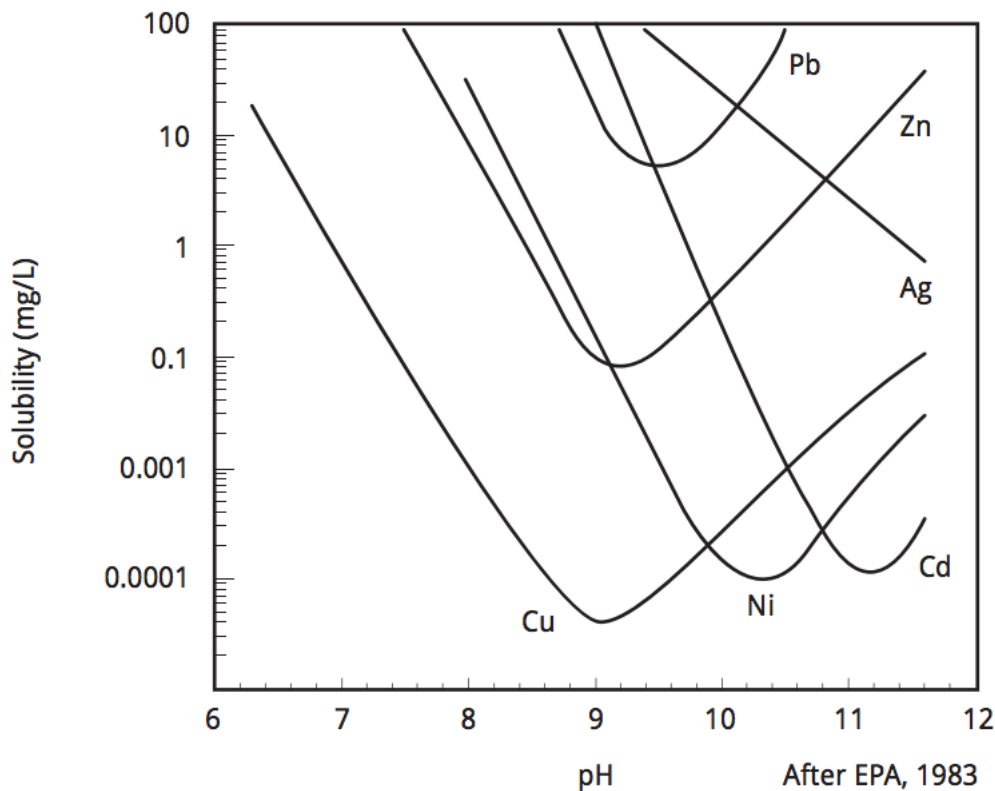
$$pH = -\log_{10}[H^+]$$

KAAVA 2

pH = pH-luku

$[H^+]$ = vetyionin konsentraatio liuoksessa (eq/l)

pH:n säätöä kemikaalien avulla hyödynnetään muun muassa metallihydroksidien ja sulfaattien saostamisessa vedestä. Saostuksessa käsiteltävän veden pH pyritään säätämään sopivaksi, jotta halutun metallihydroksidin liukoisuus vedessä olisi mahdollisimman pieni. Tyypillisiä kemikaaleja pH:n säätämiseen ovat natriumhydroksidi (NaOH), kalsiumhydroksidi (Ca(OH)₂) sekä magnesiumhydroksidi (Mg(OH)₂) (11). Kuvassa 1 on esitetty pH:n vaikutus eräiden metallihydroksidien liukoisuuteen.



KUVA 1. pH:n teoreettinen vaikutus metallihydroksidien liukoisuuteen (11)

Veden sähkönjohtavuus eli johtokyky kertoo vedessä olevien liuenneiden suolajien eli ionien määrän. Jos veden sähkönjohtavuus on korkea, on veden suolapitoisuus myös korkea. Luonnon sisävesissä sähkönjohtavuutta lisää natrium, kalium, kalsium, magnesium sekä kloridit ja sulfaatit. Yleisesti Suomen vedet ovat vähäsuolaisia. Sähkönjohtavuuden SI-järjestelmän mukainen yksikkö on S/m (siemensia per metri). Yleensä sen yksikkönä käytetään kuitenkin mS/m (milli-

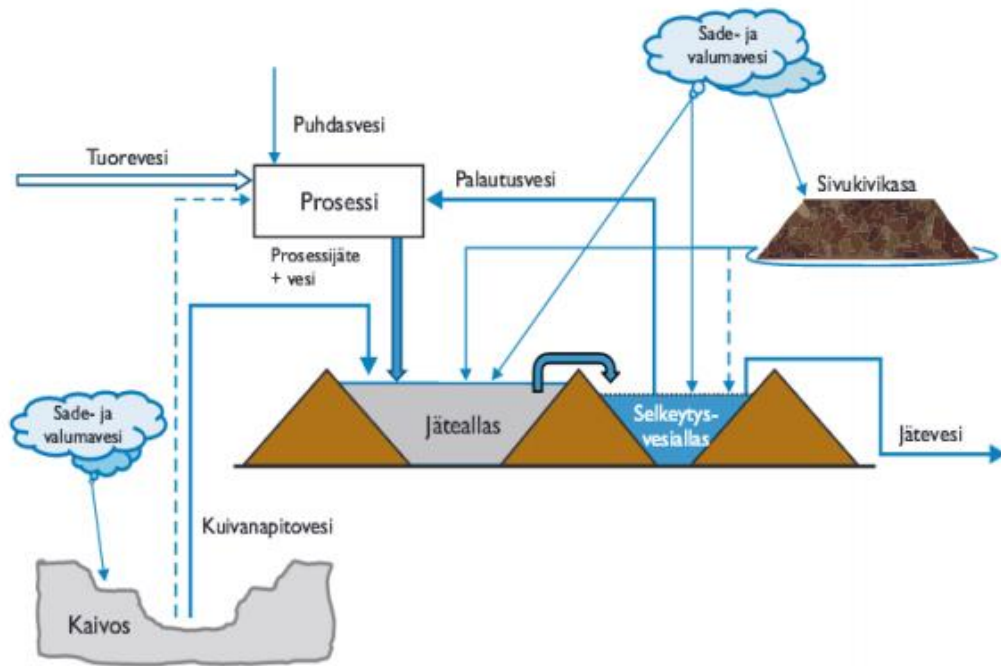
siemensinä per metri) tai $\mu\text{S}/\text{m}$ (mikrosiemensinä per metri). Suomessa mitatut siävesien johtokyvyt ovat 5–10 mS/m. Jätevesissä suolapitoisuus on huomattavasti korkeampi (50–100 mS/m). (9, s. 10.)

2.4 Kokeellisen osuuden kaivosvedet

Kaivostoiminnassa vettä tarvitaan louhinnassa, malmikiven jauhatuksessa ja rikastuksessa. Pienempiä vesitarpeita muodostavat erilaisten laitteiden tiivistevet, kemikaalien valmistaminen sekä huuhtelu- ja pesuvedet. Lisäksi kaivoksilla tarvitaan tavallista talousvettä juomavetenä sekä saniteettitiloissa. Kaivosten vesienhallinta voidaan jakaa viiteen osaan: raakavesi, prosessivesi, talousvesi, louhoksen kuivausvesi ja kaivosalueen valumavedet. (12, s.38.)

Kaivoksille otettava tuorevesi pumpataan yleensä läheisestä joesta tai järvestä. Veden tarpeesta osa voidaan kattaa uudelleen kierrättämällä vettä. Vettä kierrätetään rikastusprosessin sisällä sekä selkeytyksestä tai sakeutuksesta. Ilman kiertoveden tehokasta käsittelyä prosessivesien suolapitoisuus nousee ja ennen pitkään ylikylläisyys ilmenee esimerkiksi kipsisakan muodostumisena. Ylimääräinen jätevesi juoksetaan ulos kaivosalueelta luonnonvesiin. Ennen luontoon päästämistä jätevedet puhdistetaan aktiivisilla tai passiivisilla käsittelymenetelmillä. (12, s. 15.)

Kaivoksien prosessivedet sisältävät tyypillisesti runsaasti alkalimetalleja ja sulfaatteja, jotka nostavat vesien suolapitoisuuksia. Tyypillistä prosessivesille on myös kemikaalijäämät sekä korkea kiintoainepitoisuus. Sulfidimineraalien vuoksi kaivosten jätevedet voivat olla hyvin happamia. Vesien pH voi tippua välille 2–3. Esimerkki kaivoksen vesikierrrosta on esitetty kuvassa 2 (13, s. 35).



KUVA 2. Kaivoksen vesikierto (13, s. 35)

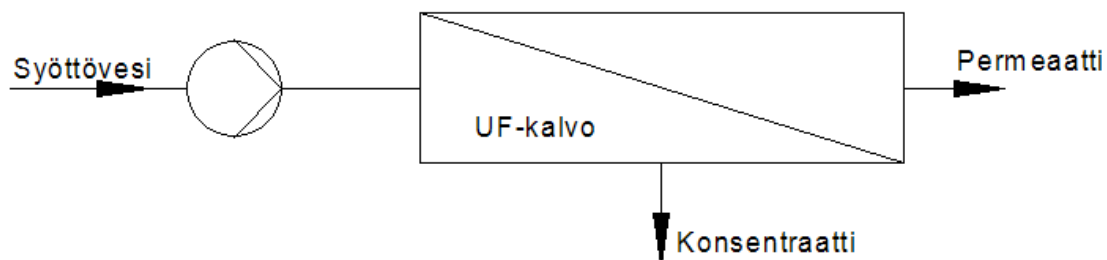
Kaivoksilla syntyvä pöly voi sisältää ympäristölle haitallisia metalleja ja sulfidiminaaleja, jotka voivat aiheuttaa vesistöjen sameutumista, happamoitumista sekä kasvuolosuhteiden muutoksia. Raakaveden otto ja muut kaivostoiminta vaikuttavat alueen vesitaseisiin ja muuttavat veden normaaleja virtausreittejä. Kaivoksen vesipäästöihin vaikuttavat louhittava malmityyppi, rikastusmenetelmä ja käytettävät kemikaalit. (12, s. 18–19.)

3 ULTRASUODATUS (UF)

Mikro- (MF), UF- ja nanosuodatus (NF) sekä RO ovat paine-eroon perustuvia kalvosuodatusmenetelmiä, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi veden puhdistamisessa tai fraktioinnissa (1, s. 2.7). Tässä työssä käsitellään ultrasuodatusta pelkästään veden puhdistusmenetelmänä.

3.1 Toimintaperiaate

UF-tekniikka perustuu puoliläpäisevään kalvoon eli membraaniin, jonka läpi vesivirta siirretään paineen avulla. Kalvo pidättää makromolekyylit nanometriä koluokassa ja vain pienemmät hiukkaset tai liuenneet aineet kulkeutuvat kalvon läpi (kuva 4) (1, s. 2.4–2.7). Kalvon läpäisykyky riippuu sen huokosten koosta. Kalvolle tulevaa vettä kutsutaan syöttövedeksi, joka virtaa kalvon läpi paine-eron avulla. Yleensä kalvon tulopuolen paine saadaan aikaan pumpulla. Puhdistettua, kalvon läpi virrannutta tuotevettä kutsutaan permeaatiksi ja kalvon pidättämää, epäpuhtaudet sisältävää vettä konsentraatiksi (14, s. 3). Yksinkertaistettu virtauskaavio on esitetty kuvassa 3.



KUVA 3. UF-kalvon virtauskaavio (1, s. 2.5)

Vesivirran massatase kalvolla lasketaan kaavalla 3 (4, s. 532).

$$q_{vsyöttö} = q_{vperm} + q_{vkons}$$

KAAVA 3

$q_{vsyöttö}$ = syöttöveden tilavuusvirtaus (l/h)

q_{vperm} = permeaatin tilavuusvirtaus (l/h)

q_{vkons} = konsentraatin tilavuusvirtaus (l/h)

Kalvon painehäviö lasketaan kaavalla 4 (4, s. 532).

$$\Delta p = p_{syöttö} - p_{kons}$$

KAAVA 4

Δp = painehäviö kalvolla (bar)

$p_{syöttö}$ = syöttöveden paine (bar)

p_{kons} = konsentraatin paine (bar)

Transmembraaninen paine (TMP) kertoo, kuinka suuri paine tarvitaan, että vesi läpäisee kalvon. Se määritetään keskimääräisen syöttöpaineen ja permeaatin paineen erotuksena. Syöttöpaine mitataan yleensä kalvomoduulin alkupäästä, jolloin se ei kerro todellista keskimääräistä syöttöpainetta kalvon aiheuttaman painehäviön takia (15). Transmembraaninen paine lasketaan kaavalla 5 (4, s. 532). Kaava pätee cross-flow tyyppiselle suodatukselle, jossa osa kalvolta poistuvasta vedestä ohjataan konsentraatiksi jatkuvasti. Dead-end-suodatukseen kaava ei päde, sillä konsentraattia poistuu kalvolta ainoastaan vastavirtahuuhteluiden aikana.

$$\Delta p_{TMP} = \frac{p_{syöttö} + p_{kons}}{2} - p_{perm}$$

KAAVA 5

Δp_{TMP} = transmembraaninen paine-ero (bar)

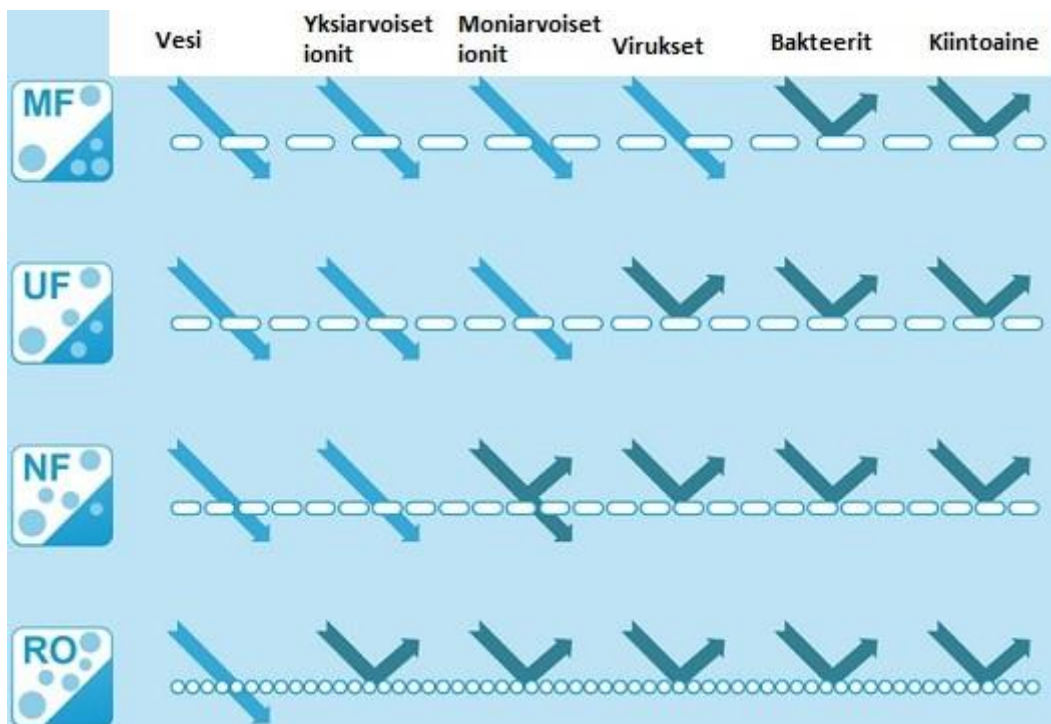
$p_{syöttö}$ = syöttöveden paine (bar)

p_{kons} = konsentraatin paine (bar)

p_{perm} = permeaatin paine (bar)

3.2 Kalvosuodatusmenetelmät

MF, UF, NF ja RO ovat kaikki paine-eroon perustuvia kalvosuodatusmenetelmiä. Muita ajavia voimia kalvosuodatuksessa voivat olla esimerkiksi aktiivisuusero, lämpötila tai sähköinen potentiaaliero kalvon eri puolilla. RO ja NF perustuvat fysikaaliskemialliseen ilmiöön, jossa väkevämpi liuos pakotetaan puoliläpäisevän kalvon läpi osmoosiin nähden päinvastaiseen suuntaan eli väkevämmästä laimeampaan. Nanosuodatuksen ja käänteisosmoosin erona on kalvon selektiivisyys ionien koon ja varauksen suhteen. UF ja MF puolestaan perustuvat partikkelien fysikaaliseen erottamiseen syöttövedestä. Erotuskyky määräytyy kalvon huokoisuuden perusteella (1, s. 2.7-2.8). Edellä mainittujen kalvosuodatustekniikoiden eroja on havainnollistettu kuvassa 4.



KUVA 4. Kalvosuodatusmenetelmien erotuskyvyt (16)

MF:llä voidaan poistaa vedestä hyvällä tehokkuudella kiintoaines ja suurin osa bakteereista. MF:n ja UF:n erona on käytännössä vain kalvon huokosten koko ja käyttöpaine. MF-kalvon erottelukyky vaihtelee välillä 4–0,2 µm ja käyttöpaine on tyypillisesti alle 2 bar. (17, s. 7–8.)

UF:lle soveltuva käyttöpaine on 1–10 bar ja huokosten koko 0,2–0,02 µm. UF-kalvolla voidaan poistaa vedestä suurimolekyyliset komponentit (HMWC) kuten proteiinit, kiintoaines, virukset ja bakteerit. Kalvon erotuskyky ei kuitenkaan riitä esimerkiksi suolojen, aminohappojen tai mono- ja disakkaridien suodattamiseen. (17, s. 7–8.)

Tyypillisesti MF- ja UF-suodatuksia hyödynnetään RO:n esikäsittelynä esimerkiksi jätevesivirtojen sekä meriveden puhdistuksessa. Näin voidaan poistaa esimerkiksi RO-kalvoja kuormittava sameus ja kiintoaines. Esikäsittelyllä voidaan varmentaa RO:n toimivuutta, joten esikäsittelyn myötä prosessista tulee taloudellisempaa käyttökustannuksien osalta. (1, s. 10.15.)

NF pidättää osittain moniarvoiset ionit kuten sulfaatit (SO_4^{2-}) ja fosfaatin (PO_4^{3-}) sekä varauksettomat ja positiivisesti varautuneet ionit niiden koosta ja muodosta

riippuen. Yksiarvoiset ionit pääsääntöisesti läpäisevät NF-kalvon. Natriumkloridin pidätyskyky vaihtelee välillä 0–50 % riippuen syöttöveden konsentraatiosta. NF soveltuu reilusti suurempiin käyttöpaineisiin (5–35 bar) verrattuna MF- ja UF-tekniikkaan. NF-kalvon huokosten koko on tyypillisesti pienempi kuin 0,002 µm. (17, s. 7.)

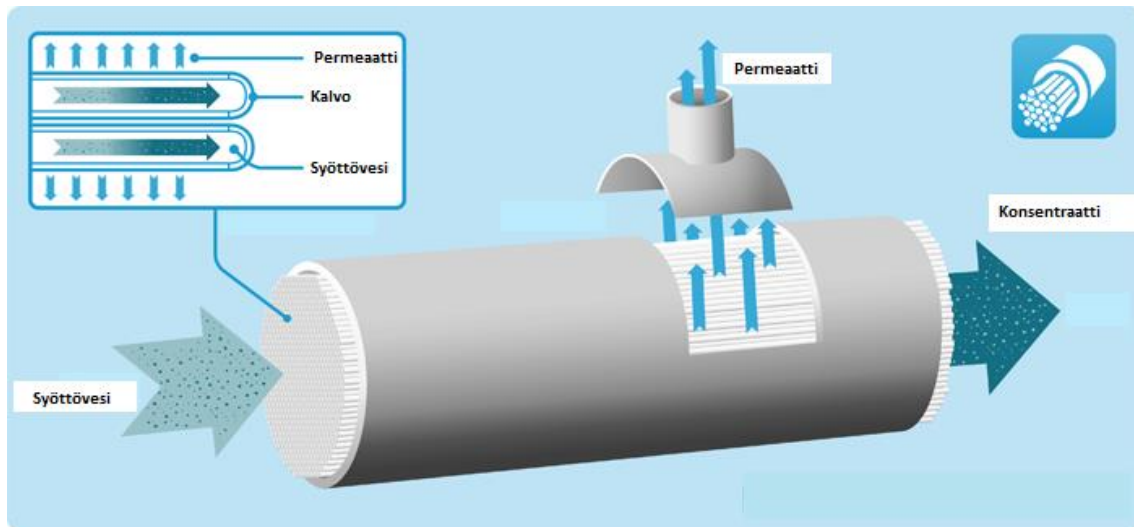
RO-suodatuksessa optimaalisissa oloissa kalvon läpäisee käytännössä ainoastaan vesi tai hyvin pieni määrä epäpuhtauksia. RO-kalvoille ei pystytä määrittämään tarkkaa huokoisuutta, vaan kalvon ajatellaan olevan yhtenäinen pinta. Kalvon likaantuminen voi kuitenkin heikentää tuotetun veden laatua. Varauksettomat aineet ja esimerkiksi alkoholit läpäisevät kalvon. RO soveltuu 15–150 bar:n käyttöpaineisiin. (17, s. 7.)

3.3 Kalvomateriaalit ja rakenteet

UF-kalvot on tyypillisesti valmistettu polysulfoni-tyyppisistä materiaaleista kuten polyeteerisulfonista ja polypropeenista. Orgaanisista materiaaleista valmistetut kalvot sisältävät PVC-polymeerejä tai selluloosa-asetaattia. Lisäksi kalvomateriaalina voidaan käyttää epäorgaanisia aineita, kuten keraamia tai metalleja. Keraami ja metallit ovat kuitenkin harvemmin käytettyjä materiaaleja niiden korkean hinnan vuoksi. (4, s. 529.)

Onttokuitukalvomoduuli (englanniksi *hollow fibre*) koostuu paineputkesta, joka sisältää useita pieniä kuituputkia. Kuituputket ovat ulkohalkaisijaltaan 100–200 µm ja seinämäpaksuudeltaan 20-50 µm. Syöttövesi voidaan tuoda joko kuidun sisä- tai ulkopuolelle. Näitä vaihtoehtoja kutsutaan inside-to-outside- ja outside-to-inside-ajotavoiksi. Permeaatti läpäisee kuiturakenteen ja konsentraatti pidättyy kuidun pinnalle. Onttokuitukalvon pinta-ala tilavuuden suhteen on suuri, noin 8000 m²/m³. (8, s. 305.)

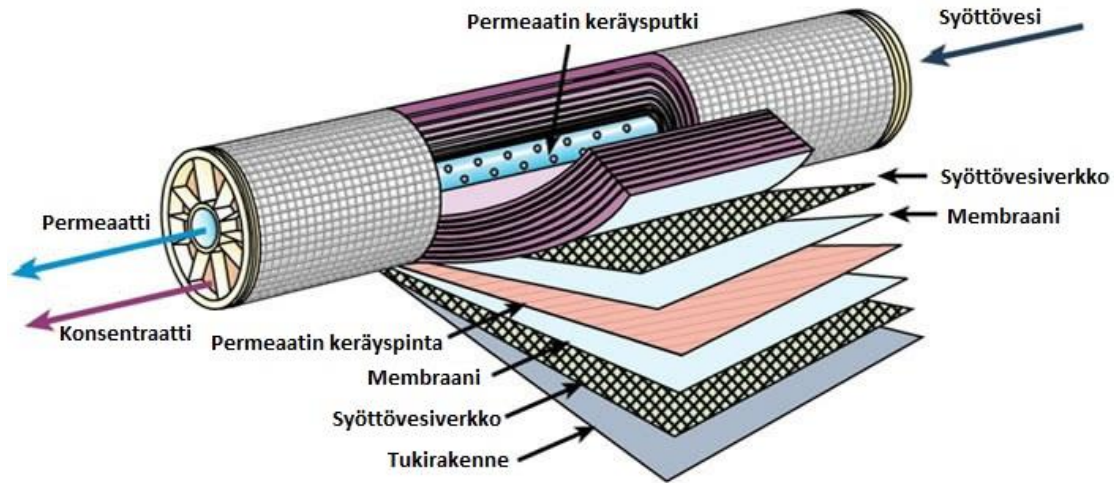
Onttokuitukalvossa syöttövirtaus saavuttaa suurimman virtausnopeuden heti moduulin sisääntulossa. Matalimmillaan virtausnopeus puolestaan on kuituputkien ulkoreunalla (1, s. 9.4). Onttokuitukalvon virtausperiaate on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Onttokuitukalvomoduuli crossflow tyyppisesti kuvattuna (18)

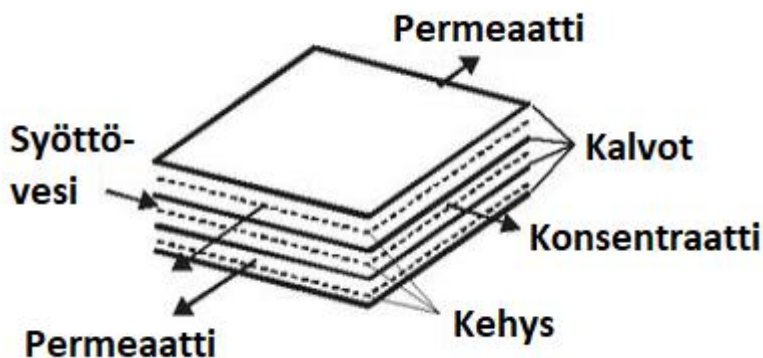
Spiraalikalvossa (englanniksi *Spiral Wound*) kaksi tai useampi kalvo on liitetty yhteen. Toinen pää kalvosta on avoin ja toinen suljettu, joista avoin pää kerää permeaatin. Avoin pää ja syöttövesiverkko kääritään yhteen permeaattiputken ympärille. Käärityn elementin ympärille valetaan lasikuiturakenne tukemaan elementtiä. Syöttövesi virtaa kalvorakenteen päädyistä sisään ja permeaatin suotautuessa kalvon läpi se kerätään moduulin keskellä olevaan putkeen ja jäljelle jäävä väkevöitynyt konsentraatti poistuu kalvomoduulin toisesta päästä. Lasikuitukuoren ympärillä olevalla tiivisteellä estetään permeaatin ja konsentraatin sekoittumista keskenään. (8, s. 305-309.)

Spiraalikalvoja suositaan kohteissa, jossa käsiteltävä vesi ei sisällä kiintoainesta. Suuremmat kiintoainepartikkelit suodattuvat heikosti spiraalielementissä johtuen tiiviistä syöttövesipuolen rakenteesta. Kokonaissaanto on yleensä heikompi verrattuna esimerkiksi ontokuitukalvojen saantoon. Elementtien investointikustannukset ovat niiden laajan käytön takia edulliset (4, s. 530). Spiraalikalvoelementin rakenne on esitetty kuvassa 6.



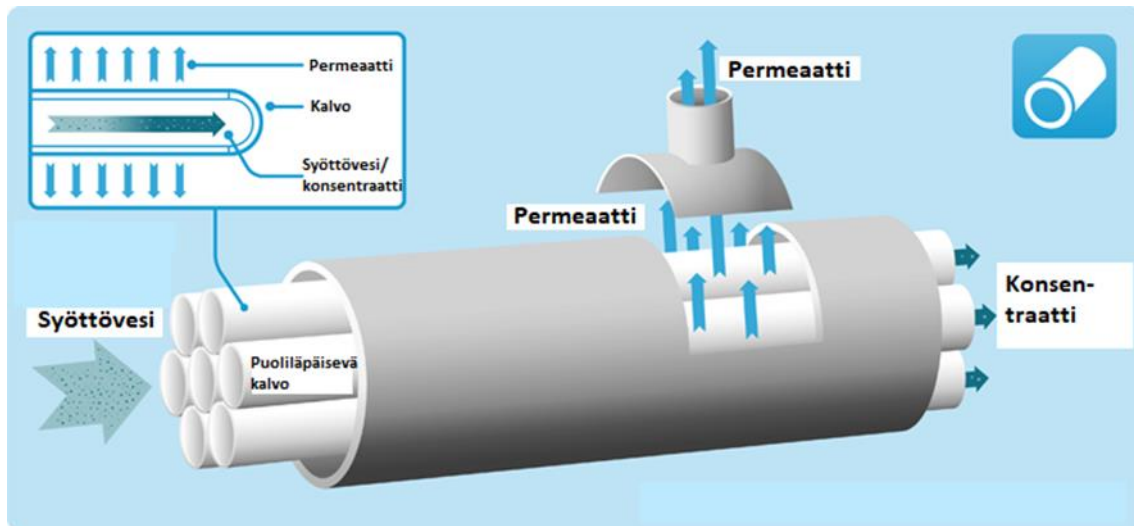
KUVA 6. Spiraalikalvoelementti (17, s. 16)

Levysuodatuksen (englanniksi *Plate-and-Frame*) rakenne on yksinkertainen ja kalvojen vaihto helppoa. Rakenne koostuu vuoron perään asennetuista ohutkalvoista ja kehyksistä. Saannon määrää voidaan lisätä asentamalla näitä kalvopaketteja useita peräkkäin. Kalvopakettitekniikka on monipuolinen ja sitä on mahdollista käyttää myös korkeassa paineessa, mutta moniosainen rakenne tekee siitä valmistuskustannuksiltaan kalliin. Esimerkiksi RO-spiraalikalvoelementtien energiankulutus on vähäinen suhteessa plate-and-frame-kalvojen energiankulutukseen. Kalvopakettien pinta-alan suhde tilavuuteen on myös pieni, noin $165 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Rakenteen purkaminen on kuitenkin yksinkertainen toimenpide, mikä helpottaa myös kalvojen pesemistä (19, s. 50). Levysuodatuksenelementin rakenne ja virtausperiaate on esitetty kuvassa 7.



KUVA 7. Kalvopakettien periaatepiirros (20)

Putkikalvomoduulin (englanniksi *Tubular*) rakenne on ajatukseltaan samantyylinen kuin onttokuitukalvossa. Kalvomateriaali on valettu huokoisen ja putkimaisen tukirakenteen sisään. Tukirakenteen halkaisija on yleensä 0,3–2,5 cm. Tukirakenne puolestaan asennetaan teräksisen paineputken sisään. Vaihtoehtoisesti paineputken materiaalina voi olla esimerkiksi lasikuitu tai keraami (8, s. 307). Putkikalvomoduulin rakennetta havainnollistaa kuva 8.



KUVA 8. Putkikalvomoduuli (18)

Saannon kasvattamiseksi kalvoputkia voidaan asentaa sarjaan. Syöttövesi virtaa kalvoputken sisäpuolelle. Permeaatti virtaa kalvon läpi putken ulkopuolelle, mistä se kerätään permeaattiputkeen. Korkealla virtausnopeudella kalvoputken sisällä voidaan ehkäistä kalvojen likaantumista sekä tehostaa niiden puhdistamista. Putkikalvon pinta-alan suhde tilavuuteen on tyypillisesti noin $335 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Tekniikan etuina ovat kiintoaineen sietokyky, vähäinen likaantuminen sekä helppo puhdistettavuus. (8, s. 307.)

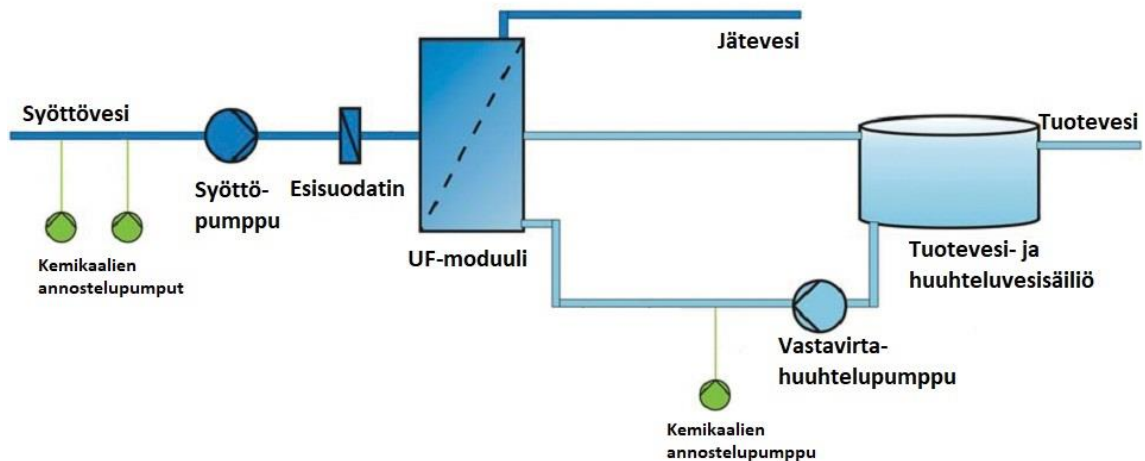
Onttokuiturakennetta käytetään yleisesti MF- ja UF-prosesseissa. Spiraalikalvoelementtejä puolestaan suositaan NF- ja RO-laitteistoissa. Plate-and-frame-kalvorakennetta hyödynnetään kaikissa neljässä esitetystä kalvosuodatustekniikassa, mutta niiden käyttö on yleistä vain erityiskohteissa. (1.)

3.4 UF-laitteiston yleiset komponentit ja kytkennät

UF-laitteistokokonaisuus koostuu tyypillisesti itse UF-yksiköistä, kemikaalien annosteluyksiköistä, neutralointiyksiköstä, vastavirtahuuhtelu- (englanniksi *back-wash, BW*) ja pesulaitteistosta (englanniksi *Clean-In-Place, CIP*) sekä jälkikäsitelystä. Tapauskohtaisesti ennen UF-kalvoja vettä voidaan käsitellä esimerkiksi koaguloinnilla tai MF-kalvoilla. Lisäksi juomaveden valmistuksessa kalvojen eheys pitää pystyä testaamaan esimerkiksi paineilman avulla (21). Pumppuja tarvitaan syöttöveden paineen nostamiseen, vastavirtahuuhteluihin ja mahdollisesti kemikaalien annosteluihin. Huuhtelu- ja pesuvetenä käytetään yleensä permeaattia, joka kerätään sille tarkoitettuun säiliöön. Jos laitteistoa ajetaan uudelleen kierrättäen konsentraattia, tarvitaan tälle virtaukselle oma pumppu. UF-yksiköitä voidaan asentaa useampi rinnan, jolloin saadaan suurempi kalvopinta-ala, mikä tekee UF-tekniikasta monistettavan ja kapasiteetiltaan joustavan. Tällöin myös rinnakkaiset pumput voivat olla tarpeellisia (1, s. 10.70–10.72).

Mahdollinen UF:n esikäsitely voi koostua esimerkiksi veden karkeasta seulonnasta ja esisuodatuksesta sekä pH:n säädöstä kemikaalien avulla. Lisäksi muut esikäsitelymuodot kuten koagulaatio ovat tarvittaessa mahdollisia (1, s. 10.70). Esikäsitelyn tarkoituksena on vähentää UF-kalvolle tulevia epäpuhtauksia. Esikäsitelyn myötä UF-kalvon suodatuspinta-alaa voidaan tapauskohtaisesti pienentää tai parantaa pitkäkestoista toimintaa, sillä esikäsitelyllä voidaan vähentää kalvojen TSS-kuormaa (21).

Kemikaalien annosteluyksiköitä tarvitaan pH:n säädön lisäksi kalvojen kemikaalipesuihin (CIP), saostuskemikaalin lisäämiseen prosessiin sekä kemialliseen neutralointiin. Lisäksi vastavirtahuuhtelua voidaan tehostaa lisäämällä huuhtelulinjaan kemikaaleja (21). Kemikaalit annostellaan prosessiin esimerkiksi niille tarkoitetuilla kalvopumpuilla. UF-laitteiston yksinkertaistettu prosessikaavio on esitetty kuvassa 9.



KUVA 9. UF-laitteiston periaatekytkentä (22)

3.5 Käyttöparametrit

Kalvosuodatuksen käyttöparametreillä voidaan vaikuttaa prosessin toimivuuteen, taloudellisuuteen ja kalvojen käyttöikään. Sopivat käyttöparametrit riippuvat käsiteltävästä vedestä ja sen laadusta, käytettävistä kalvoista sekä käsiteltävästä vesimäärästä. Ennen täyden mittakaavan investointia voidaan tehdä pilot-kokeita epävarmuustekijöiden minimoimiseksi.

3.5.1 Vuoarvo

Vuoarvo kuvaa permeaatin virtausta kalvon pinta-alaa kohden. Painetta kasvatamalla voidaan kasvattaa ajavaa voimaa eli TMP:tä, jolloin enemmän vettä läpäisee kalvon. Sopiva paine määräytyy suodatusyksikön rakenteen perusteella. Kasvattamalla vuoarvoa yli kriittisen pisteen kalvon likaantuminen nopeutuu, mikä lisää myös kemikaalipesujen tiheyttä. Soveltuva vuoarvo ja kriittinen piste riippuu vahvasti käsiteltävästä syöttövedestä ja sen sisältämistä kalvoa likaantuttavista aineista. (8, s. 321-322.)

Vuoarvo lasketaan kaavalla 6 (4, s. 532).

$$F = \frac{q_{vperm}}{A_{kalvo}}$$

KAAVA 6

F = vuoarvo (l/(m²h))

q_{vperm} = permeaatin tilavuusvirtaus (l/h)

A_{kalvo} = kalvopinta-ala (m²)

3.5.2 Saanto

Saannolla tarkoitetaan kalvolta saatavan permeaatin määrää suhteessa syöttöveden määrään. Liian suuri saanto likaannuttaa kalvopinnan nopeasti, joten se tulee mitoittaa syöttöveden laadun mukaan. (8, s. 318.)

Saanto lasketaan kaavalla 7 (4, s. 532).

$$R = \frac{q_{vperm}}{q_{vsyöttö}} * 100\%$$

KAAVA 7

R = saanto (%)

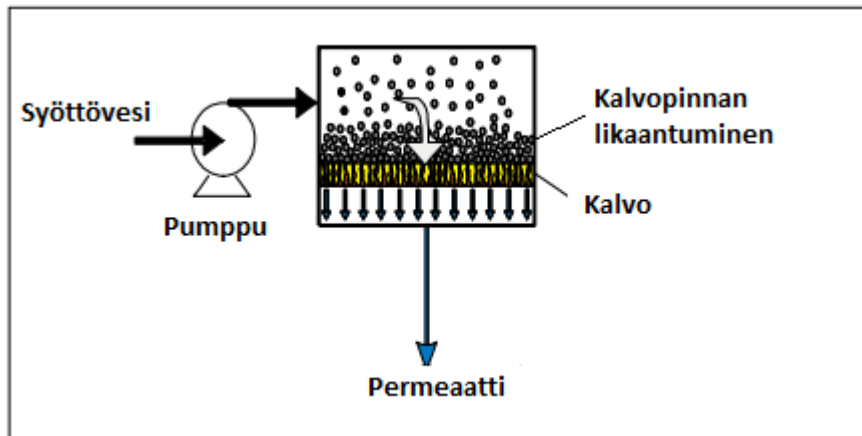
q_{vperm} = permeaatin tilavuusvirtaus (l/h)

$q_{vsyöttö}$ = syöttöveden tilavuusvirtaus (l/h)

Pidemmällä aikavälillä laskettuun kokonaissaantoon vaikuttaa negatiivisesti vastavirtahuuhteluissa ja kemikaalipesuissa käytetty tuotevesi. Kokonaissaantoa laskettaessa kulutettujen pesuvesien yhteenlaskettu määrä tulee siis vähentää kalvolta saadusta permeaatin kokonaismäärästä.

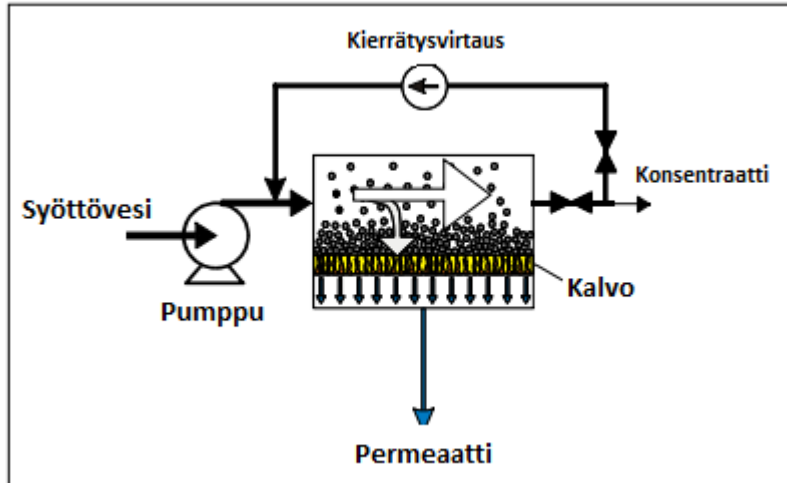
3.5.3 Ajotapa

UF-kalvoja voidaan käyttää kahdella eri ajotavalla. Dead-end-ajotavassa kaikki syöttövesi viedään paineen avulla kalvon permeaattipuolelle, jolloin konsentraattia ei muodostu ja kiintoaines poistuu kalvolta ainoastaan vastavirtahuuhtelun aikana. Dead-end-ajotapaa suositetaan erityisesti kohteissa, missä syöttöveden laatu on korkea ja sen sameus on matala. Kyseinen ajotapa on todettu luotettavaksi ja sen käyttökustannukset ovat matalat johtuen pumppauksen vähäisestä energiantarpeesta. Lisäksi Dead-end-malli mahdollistaa korkean saannon. Dead-end on siis taloudellisempi tapa etenkin käyttökustannuksia vertailtaessa, jos likaantuminen ei muodostu rajoittavaksi tekijäksi (14, s. 4). Dead-end-kalvon toimintaperiaate on esitetty kuvassa 10.



KUVA 10. Dead-end-ajomallin toimintaperiaate (14, s. 4)

Cross-flow-ajomallissa konsentraattia kierrätetään takaisin syöttövesipuolelle korkeammassa virtausnopeudessa, jotta saadaan aikaan turbulenttivirtaus kalvon ohi. Lisäksi osa konsentraatista poistuu kalvolta jatkuvasti viemäriin. UF-kalvoilla on kuitenkin mahdollista kierrättää koko konsentraattivirtaus takaisin kalvon syöttöpuolelle, jos kalvo vastavirtahuhdellaan säännöllisesti (14, s. 5). Cross-flow tyyppisen membraanin virtausperiaatetta havainnollistaa kuva 11.

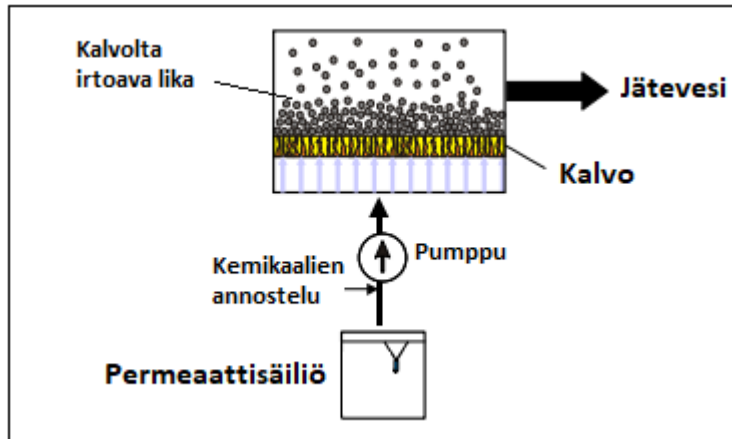


KUVA 11. Cross-flow-ajomallin toimintaperiaate (14, s. 5)

3.5.4 Vastavirtahuuhtelu

Kalvon pitkäaikaisen toiminnan mahdollistamiseksi sekä likaantumisen vähentämiseksi se täytyy vastavirtahuhdella säännöllisin väliajoin. Huuhtelun aikana tuotevettä pumpataan kalvon permeaattipuolelta suodatuspuolelle. Näin saa-

daan kalvon konsentraattipuolelle kiinnittyneet epäpuhtaudet irtoamaan. Huuhteluvesi voidaan ottaa permeaatin keräyssäiliöstä tai rinnakkaisista suodatusyksiköistä. Riittävä huuhtelun kesto ja tiheys riippuvat käsiteltävän veden laadusta (14, s. 6). Kalvojen vastavirtahuuhtelua havainnollistaa kuva 12.



KUVA 12. Vastavirtahuuhtelun toimintaperiaate (14, s. 6)

Huuhteluvirtaus mitoitetaan noin kolme kertaa suuremmaksi kuin kalvon syöttöveden virtaus on normaalisti. Yleensä huuhtelun vesitilavuuden suunnitteluarvona käytetään noin 5 litraa kalvoneliötä kohden. Kalvon läpi virrannut huuhteluvesi ohjataan yleensä viemäriin. (17, s. 56.)

Vastavirtahuuhtelun tehostamiseksi huuhteluveteen voidaan lisätä kemikaaleja kuten lipeää, natriumhypokloriittia tai vetyperoksidia. Lisäksi lyhyellä myötävirtaisella huuhtelulla juuri ennen vastavirtahuuhtelun aloittamista voidaan tehostaa epäpuhtauksien irtoamista kalvon konsentraattipuolelta. Tätä menetelmää kutsutaan myös relaksaatioksi. Relaksaatiossa huuhtelussa syöttövetä pumpataan normaalisti kalvolle mutta permeaattia ei tuoteta, vaan kaikki syöttövesi ohjataan konsentraatiksi. (14, s. 6–7.)

3.6 Koagulaatio ennen ultrasuodatusta

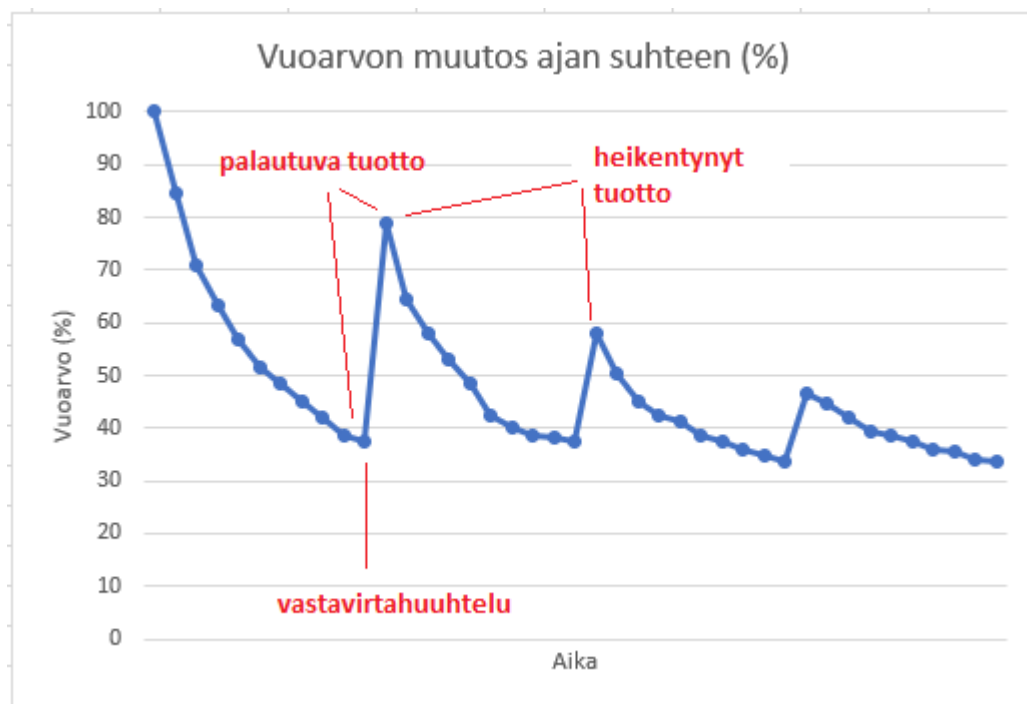
Koagulaatiolla tarkoitetaan syöttöveden sisältämien partikkelien kokoamista suuremmiksi flokeiksi, jolloin ne pidäytyvät paremmin kalvolle ja parantavat näin suodatusta. Kalvosuodatuksessa koagulanttien lisääminen syöttöveteen voi joissain tapauksissa parantaa vuoarvoa tai permeaatin laatua. Lisäksi membraanien kemikaalipesujen tarve voi vähentyä. Parhaiten koagulaation on todettu toimivan

mikrosuodatuksen esikäsitteilynä. Lisäksi joissain tapauksissa polymeeristen UF-kalvojen toimivuutta on pystytty parantamaan lisäämällä syöttövedeen koagulantteja. Joissain tapauksissa koagulaatiosta voi olla myös haittaa. Polypropeenikalvoilla käsiteltäessä pintavettä yhdessä koagulantin kanssa on havaittu käsitellyn veden laadun ja vuoarvon nopeampaa heikkenemistä. (1, s. 16.1.)

Koagulaation hyödyllisyys riippuu syöttöveden sisältämistä epäpuhtauksista sekä niiden käyttäytymisestä suodatuskalvojen pinnalla. Koagulantit voivat estää lian pääsemistä kalvon huokosiin sekä estää epäpuhtauksien kerrostumista kalvolle. Lisäksi koagulantit voivat tehostaa partikkelien liikkumista pois kalvopinnoilta konsentraatiksi. (1, s. 16.2.)

3.7 Kalvon likaantuminen

Syöttöveden mukana tuleva kiintoaines heikentää kalvojen tuottoa ajan myötä. Syöttöveden laadusta riippuen tuoton heikkeneminen voidaan havaita jopa tuntitasolla. Vastavirtahuuhteluilla pyritään palauttamaan menetettyä tuottoa. Useiden vastavirtahuuhteluiden jälkeen menetetty permeaatin virtaama kalvon läpi on merkki kalvon likaantumisesta. Kemikaalisilla pesuilla pyritään palauttamaan kalvojen alkutilanteen toimintakyky. Ajan myötä kalvot kuitenkin menettävät läpäisykykyään kemikaalipesuista huolimatta, jolloin puhutaan palautumattomasta likaantumisesta. Kalvojen likaantumista käyttöjakson aikana havainnollistaa kuva 13. (1, s. 4.5.)



KUVA 13. Vuoarvon muutos ajan suhteen (1, s. 4.7)

Likaantumisnopeudesta riippuen kalvosuodatus ei välttämättä sovellu kaikkiin käyttökohteisiin. Soveltuvuus riippuu siitä, kuinka tehokkaasti säännöllisillä huuhteluilla ja kemikaalipesuilla saadaan kalvot pysymään toimintakykyisenä. Likaantumisen seurauksena heikentynyt vuoarvo ja saanto sekä lisääntyvät kemikaalipesut ja mahdolliset kalvojen vaihdot heikentävät käsittelyprosessin kannattavuutta myös taloudellisesti.

Kalvojen kemikaalipesut

Vastavirtahuuhtelulla ei pitkällä aikavälillä saada kalvopintaa täysin puhdistettua, vaan ajan myötä permeaatin virtaus laskee kalvon likaantuessa. Tämän vuoksi kalvot tulee pestä kemikaaleilla tietyin väliajoin, jotta alkutilanteen permeaattivirtaus saadaan palautettua. Jos kohtuullisella kemikaalipesulla ei saada kalvojen tuottoa palautettua lähtötilanteeseen, on menetetty tuotto pysyvää likaantumista. Pysyvän likaantumisen nopeus riippuu kalvoilla käsiteltävän veden laadusta eikä tuoton heikkenemistä välttämättä havaita lyhyellä aikavälillä. Kemikaalipesujen riittävä tiheys riippuu käsiteltävän veden laadusta, kalvojen likaantumisnopeudesta ja vastavirtahuuhtelun optimoinnista. Näiden operointiarvojen selvittämiseksi voidaan suorittaa pieniä laboriokokeita tai täydenmittakaavan laitosta

mallintavia pilot-kokeita. Soveltuvat pesukemikaalit UF-kalvoille ovat esimerkiksi hapot (rikki-, fosfori- ja typpihappo) ja natriumhydroksidi eli lipeä (NaOH), joilla pestään kalvoa vuorotellen riittävän monta kertaa. Suuri pesujen määrä kuitenkin heikentää prosessin taloudellista kannattavuutta. (14, s. 7.)

Pesuohjeita on olemassa monia erilaisia, mutta sopiva menetelmä tietyille kalvovyksikölle riippuu esimerkiksi kalvotyypistä sekä puhdistusjärjestelmän rakenteesta. Seuraavana on esitetty yksi pesumenetelmä, jota voidaan muokata tarvittaessa tietyille laitteistolle sopivaksi:

1. Tiputa kalvojen syöttöpaine. UF- ja MF-kalvoille sopiva paine on 1–2 bar.
2. Huuhtelee kalvoja tuotevedellä, kunnes kalvoilta poistuva konsentraatti on silmin nähden puhdasta.
3. Huuhtelee kalvot emäksisellä pesuliuksella kierrättäen permeaattia ja konsentraattia. Sopiva pesuliuksen konsentraatio on yleensä noin 1 %.
4. Huuhtelee kalvot esimerkiksi vesijohtovedellä.
5. Huuhtelee kalvot happamalla pesuliuksella kierrättäen permeaattia ja konsentraattia. Sopiva pesuliuksen konsentraatio on noin 1 %.
6. Huuhtelee kalvot esimerkiksi vesijohtovedellä.
7. Toista emäksisellä pesuliuksella huuhtelu. Nyt sopiva konsentraatio on noin 0,1 %.
8. Huuhtelee kalvot vesijohtovedellä.
9. Kierrätä permeaattia ja konsentraattia 10-20 minuuttia sekä lisää kalvoille desinfioiva kemikaali, jonka konsentraatio on noin 0,1 %.
10. Huuhtelee vielä kalvot vesijohtovedellä.
11. Tarkista kalvojen vuoarvo kemikaalipesun jälkeen. (17, s. 84–85.)

Saman periaatteen mukaisesti voidaan myös suorittaa happo-emäs-happo-pesu. Sopiva pesuohjelma riippuu vahvasti kalvoilla käsiteltävästä vedestä sekä kalvojen likaantumistyyppistä (orgaaninen tai epäorgaaninen likaantuminen). Samat tekijät vaikuttavat myös riittävän pesuveden paineeseen. Korkeammalla paineella voidaan varmistaa, että virtauskanavat puhdistuvat liasta. (14, s. 85–86.)

Kemikaalipesut ovat vastavirtahuuhteluihin nähden pitkäkestoisempia ja likavien komponenttien ominaisuuksista riippuen monivaiheisempia. Tietty pesukemikaalit tehoavat tiettyyn kalvon likaantumistyyppiin paremmin kuin toiset, joten kemikaalit tulisi valita sen mukaan. Yleisellä tasolla voidaan sanoa, että emäkset tehoavat orgaaniseen likaantumiseen. Hapot puolestaan irrottavat epäorgaanista likaa kalvoilta. On kuitenkin varmistettava kalvovalmistajalta, minkälaiset kemikaalit ja annostelumäärät ovat soveltuvia käytössä oleville UF-kalvoille (21). Soveltuvia pesukemikaaleja on listattu taulukossa 1.

TAULUKKO 1. UF-kalvojen pesukemikaalit (21)

Kemikaali	Puhdistava vaikutus kalvoilla
NaOH, KOH	Orgaaninen ja biologinen likaantuminen
H ₂ SO ₄ , HCl	Epäorgaaninen likaantuminen
NaOCl, H ₂ O ₂	Orgaaninen ja biologinen likaantuminen
Orgaaniset hapot	Raudan ja mangaanin aiheuttama likaantuminen
Surfaktantit	Öljyn, rasvan ja tiettyjen orgaanisten polymeerejen aiheuttama likaantuminen

Natriumhydroksidi (NaOH), kaliumhydroksidi (KOH), natriumhypokloriitti (NaOCl) ja vetyperoksidi (H₂O₂) soveltuvat orgaanisen ja biologisen lian irrottamiseen kalvolta. Epäorgaanisten epäpuhtauksien pesemiseen soveltuvat hapot kuten rikki- (H₂SO₄) ja suolahappo (HCl). Orgaanisilla hapoilla kuten sitruuna-, oksaali- ja askorbiinihapolla voidaan puhdistaa esimerkiksi raudasta ja mangaanista aiheutunut likaantuminen (21).

4 KOEAJOJEN SUORITTAMINEN

4.1 Tavoitteet

Koeajojen tavoitteena oli selvittää UF-laitteiston soveltuvuutta kaivosvesien uudelleenkierrättämisessä etenkin silttipitoisille vesille. Työ keskittyi sopivien käyttöparametrien ja puhdistusmenetelmien selvittämiseen operoimalla pilot-kokoluokan laitteistoa. Muutettavia parametrejä olivat muun muassa vastavirtapesun kesto ja tiheys, kalvojen vuoarvo, esisuodattimen erotuskyky, prosessissa käytettävät kemikaalit ja niiden määrä sekä ajotavan valinta UF-kalvoille. Tavoitteena oli saada pilot-laitteistolle mahdollisimman pitkiä yhtenäisiä käyntijaksoja. Lisäksi selvitettiin, kuinka tehokkaasti kemikaalipesuilla saadaan palautettua UF-kalvojen suorituskyky ajojaksojen jälkeen. Pilotin syöttövetenä käytettiin kaivoksen vedenkäsittelylaitoksella käsiteltyä vettä.

4.2 Pilot-laitteisto

Koeajoissa käytetty pilot-laitteisto koostui UF- sekä RO-laitteistosta, jotka on rakennettu merikontin sisään. Pilotissa UF toimii RO:n esikäsittelytekniikkana, eli UF tuotevettä käytettiin RO:n syöttövetenä. UF:n vastavirtahuuhtelussa käytettiin RO-permeaattia. Tuotevedet kerättiin merikontin sisällä oleviin kuution kokoisiin IBC-kontteihin.

Ennen UF-moduuleja veden paine nostetaan keskipakopumpulla. Pumpulta vesi johdetaan pussisuodatusyksikölle, joka voidaan varustaa eri suodatusasteen pussisuodattimilla. Pussisuodatin on helppo vaihtaa uuteen vanhan likaantuessa ja sen tarkoituksena on suojata varsinaista suodatinyksikköä poikkeuksellisen suurilta kiintoainemääriltä. Pussisuodattimen tulopäässä on kemikaaliletkuliitin, jota voidaan käyttää saostuksenesto- eli antiscalant-kemikaalin annosteluun. UF-osion esisuodatin on esitetty kuvassa 14.



KUVA 14. UF:n esisuodattimena toimiva pussisuodatinyksikkö

Esisuodattimelta vesi ohjataan sekoitusputkien ja viipymäletkun kautta UF-moduulien jakotukille, joka on varustettu käsiventtiileillä. Syöttövesilinjaan on myös asennettu pH-mittari. UF-yksikköä voidaan ajaa joko kolmella tai kuudella kalvolla käsiventtiiliohjauksella. Sekoitusputket ennen UF-yksikköä on varustettu kemikaaliletkuliittimillä, joiden avulla syöttöveeteen voidaan lisätä antiscalant- ja rautasaostus- eli PIX-kemikaaleja. UF-moduuleja ajetaan dead-end-mallin mukaisesti (kuva 10). Permeaatti siirretään virtausmittarin kautta UF-permeaattisäiliöön. UF-kalvomoduulit on esitetty kuvassa 15.



KUVA 15. Inge dizzer UF-moduulit

UF-permeaattia käytetään RO-yksikön syöttövetenä. RO-yksikkö koostuu kahdesta sarjaan asennetusta kalvomodulista. RO-permeaatti ohjataan sille tarkoitettuun säiliöön ja konsentraatti viemäriin. Osa konsentraatista kierrätetään takaisin syöttöveden sekaan, mikä kasvattaa prosessin saantoa. RO-kalvojen eteen voidaan asentaa patruunasuodatin tarvittaessa. Veden johtokykyä voidaan seurata RO:n tulo- ja permeaattipuolelta. Lisäksi RO-syöttö-, permeaatti- ja kierrätyslinjat on varustettu virtausmittareilla. RO-paineputket ovat kuvassa 16.



KUVA 16. Pilot-laitteiston RO-yksikkö

Kalvojen pesua ja UF-yksikön vastavirtahuuhtelua varten konttiin on rakennettu oma putkilinjasto, joka on varustettu keskipakopumpulla ja rotametrillä, jolla voidaan seurata pesuveden virtaamaa paikallisesti. Kemikaalipesuja varten on oma pesusäiliö, johon kemikaalit lisätään käsin. UF:n vastavirtahuuhtelun kestoa ja huuhteluiden välistä aikaa voidaan säätää etäyhteyden kautta.

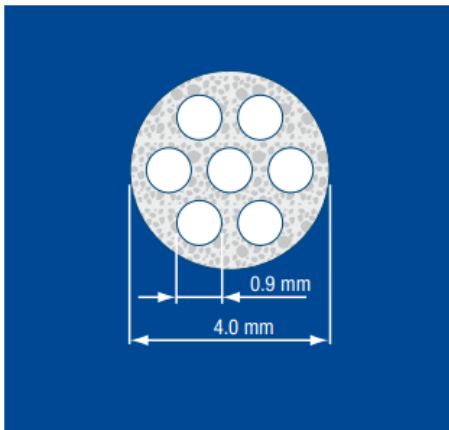
4.3 Käytetyt membraanit ja kemikaalit

Pilot-laitteiston UF-yksikkö koostuu kuudesta rinnakkaisesta Inge dizzer P 4021-2.5-onttokuitukalvosta. Yhden moduulin kalvopinta-ala on 2,5 m². Valmistajan ilmoittama suunniteltu vuoarvo kalvoille on 52 l/m²h ja vastavirtahuuhtelun virtaama 230 l/m²h (23, s. 2). UF-kalvoja ajettiin koeajoissa dead-end-ajomallin mukaisesti. Tarkemmat tiedot käytetyistä UF-kalvoista on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Inge dizzer P 4021 - 2.5 -kalvon tekniset tiedot (23, s. 2–4)

Inge dizzer P 4021 - 2.5 (Multibore 0.9)	
Korkein transmembraaninen paine (bar)	3
Korkein järjestelmän paine (bar)	10
Lämpötila-alue (°C)	1-40
pH-alue (min-max)	1-13
Kapillaariputkia/kuitu (kpl)	7
Huokosten koko (µm)	0,02
Kuituputken sisähalkaisija (mm)	0,9
Kuituputken ulkohalkaisija (mm)	4

Pilot-laitteiston UF-kalvojen kuituputken poikkileikkaus on esitetty kuvassa 17, jossa näkyy 7 kapillaaria.



KUVA 17. Kuituputken poikkileikkaus (23, s. 4)

UF-yksikköä voidaan ajaa joko kolmella tai kuudella kalvolla. Kolme kalvoista oli koeajojen alkaessa ollut jo käytössä meriveden puhdistamisessa. Loput kolme kalvoa puolestaan oli täysin käyttämättömiä. Koeajojen aikana laitteistoa ajettiin koko ajan kuudella UF-kalvolla. Kalvojen suunnitteluarvot on esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Käytettävien UF-kalvojen suunnitteluarvot

Inge dizzer P 4021 - 2.5 (Multibore 0.9)		
	3 kalvoa	6 kalvoa
Kalvopinta-ala (m ²)	7,5	15
Permeaatin virtaama (l/h)	390	780
Vastavirtahuuhtelu (l/h)	1725	3450

RO-kalvoina käytettiin Filmtecin XLE-4040-spiraalikalvoelementtejä. Yhden moduulin aktiivinen kalvopinta-ala on 8,1 m² eli yhteensä 16,2 m². Kalvot on valmistettu polyamidi komposiitista (24, s. 1). RO-yksikköä ajettiin koejakson ajan vakaassa tilassa noin 50 prosentin saannolla. Syöttöveden virtaus kalvoille säädettiin 500 litraan tunnissa, jolloin saadun permeaatin määrä oli noin 250 l/h. Vastavasti viemäriin johdetun konsentraatin virtaus oli noin 250 l/h. Kierrätysvirtauksen määrä vaihteli välillä 600–900 l/h.

Pilotoinnin aikana käytetty antiscalant-kemikaali oli Vitec 7000. Vitec 7000 on kemikaali, jolla estetään saostuvien yhdisteiden haitallinen vaikutus kalvojen pinnalla ja taataan RO-kalvojen suorituskyky. Ensisijaisesti antiscalant-kemikaaleja käytetään saostuvia yhdisteitä muodostavia suolapitoisia vesiä käsiteltäessä. Valmistajan mukaan Vitec 7000 tehoaa erityisesti kalsiumkarbonaatin (CaCO₃) sekä kalsium- (CaSO₄), barium- (BaSO₄) ja strontiumsulfaatin (SrSO₄) sekä kalsiumfluoridin (CaF₂) ja piidioksidin (SiO₂) aiheuttamaan kalvojen likaantumisen ehkäisemiseen. (25)

Antiscalant-kemikaali syötettiin prosessiin UF-osion esisuodattimelle. Annostelumääräksi valittiin 10 ppm, joka vastaa noin 8,3 ml:aa/m³. Kun annostelupumpun teho säädettiin minimille ja pumpaamaan 10 prosentin vahvuista kemikaalia, saatiin prosessiin virtaavan antiscalantin määräksi 1–2 ml/min. Kemikaali laimennettiin RO:n tuotevedellä.

UF- ja RO-kalvojen kemikaalipesuissa käytettiin laimennettuja Ultrasil 75 -happoa sekä lipeää. Ultrasil 75 on hapan nestemäinen membraanien pesuaine, joka koostuu fosfori- ja typpihaposta. Se soveltuu kaikille yleisimmille MF-, UF-, NF-

ja RO-kalvoille. Käyttöliuoksen suositeltu pitoisuus on 0,3–1,5 % (26, s. 1–2). Koeajoissa kalvoille pumpattava Ultrasil 75 laimennettiin noin 0,5-prosenttiseksi ja lipeä noin 0,05-prosenttiseksi 60 litran CIP-säiliöön.

5 TULOKSET

Koeajojen aikana suoritettiin yhteensä 4 ajojaksoa. Hankaloittavia tekijöitä olivat pilot-laitteistolle tulevan veden paineen muutokset sekä kiintoainepitoisuus, joka tukki putkiyhteitä ja aiheutti virtaaman alenemista. Optimitilanteessa pilot-laitteisto ajettaisiin vakio syöttöpaineella, jolloin esisuodattimen ja UF-kalvojen aiheuttamien painehäviöiden seuranta olisi helpompaa. Tällöin myös UF-permeaattivirtaus laskisi tasaisemmin kalvojen likaantuessa ja tulosten analysointi helpottuisi.

Käyttöjaksojen parametrit ja tulokset on esitetty taulukossa 3. Kalvojen vuoarvo määräytyi saatavasta tulopaineesta ja kalvojen puhtaudesta kemikaalipesujen jälkeen. Tulopumppua ei koeajojen aikana käytetty, koska vedenkäsittelylaitokselta tuleva veden paine riitti pilotille suurimman osan ajasta.

UF:n hetkellinen kokonaissaanto on laskettu vähentämällä permeaatin virtaamasta vastavirtahuuhteluiden tunnin aikana kuluttama vesimäärä ja jakamalla erotus syöttöveden virtaamalla. UF:n kokonaissaannossa on vähennetty koko ajojakson aikana tuotetun permeaatin tilavuudesta vastavirtahuuhteluiden yhteenlaskettu vesimäärä. Koko prosessin kokonaissaannosta on otettu myös huomioon RO-kalvoilta poistuva konsentraatti, joka vähentää todellista prosessista saatavan tuoteveden määrää. Huuhteluveden virtaama ei pysynyt koejaksojen aikana vakiona, joten taulukossa 4 esitetyt huuhtelunvesien kulutuksen eivät ole täysin tarkkoja.

TAULUKKO 4. Käyttöjaksojen parametrit ja tulokset

	1. jakso	2. jakso	3. jakso	4. jakso
Jakson kesto (vrk)	2	8	11	9
Jakson kesto (h)	50	193	264	204
UF:n kokonaissaanto alussa (%)	82,4	85,0	84,6	90,3
UF:n syöttöpaine alussa (bar)	0,6	0,5	0,7	0,5
Tuotettu UF-permeaatti (m ³)	30,3	83,9	57,9	68,1
Kulutettu huuhteluvesi (m ³)	7,5	29,0	26,4	10,9
UF:n kokonaissaanto (%)	75,2	65,5	54,4	84,0
Prosessin kokonaissaanto (%)	25,2	15,5	4,4	34,0
Huuhteluveden kulutus (l/h)	150	150	100	53,3
UF:n esisuodattimen huokoisuus (µm)	5	5	5	100

5.1 Ajojakso 1

Ajojakso aloitettiin hieman suunniteltua suuremmalla UF-kalvojen vuoarvolla johdettua vedenkäsittelylaitokselta saatavasta korkeasta syöttöpaineesta. Ensimmäinen ei päättynyt varsinaisesti UF-kalvojen tai esisuodattimen likaantumiseen vaan RO:n esisuodatinpatruunan likaantumisen aiheuttamaan painehäviöön. Tämän seurauksena RO-yksikön paineenkorotuspumppu ei enää saanut käyntikäskyä. Jakson päätteeksi esisuodatinpatruuna poistettiin käytöstä kokonaan, koska se arvoitiin turhaksi välisuodatukseksi UF- ja RO-suodatusten välissä.

Noin kahden vuorokauden aikana UF-permeaatin virtaama laski suunnilleen 50 % eli noin 400 l/h. Kun tarkastellaan saman ajanjakson syöttöpaineen kehitystä, huomataan, että myös paine on laskenut noin 50 %. Syöttöpaineen mittaussijainti esisuodattimen jälkeen, juuri ennen UF-moduulien jakotukkia. Paineen alenema selittyi UF:n esisuodattimen nopealla likaantumisella kiintoaineesta. Jos käyttöjaksoa olisi voitu jatkaa pidemmälle, olisi paineen ja virtaaman kehitys luultavasti jatkunut samalla nopeudella. Ensimmäisen jakson päätteeksi UF-kalvoja ei vielä pesty kemikaaleilla, vaan tulolinja esisuodattimelle asti puhallettiin paineilmailla puhtaaksi. Lisäksi esisuodatin vaihdettiin uuteen. Likaantunut 5 mikronin esisuodatin on kuvassa 18.



KUVA 18. UF-osion esisuodatin ensimmäisen ajojakson jälkeen

Ensimmäisen ajojakson UF-permeaatin virtauksen ja syöttöpaineen muutokset on esitetty liitteen 1 kuvaajissa. Punainen katkoviiva kuvaajassa kertoo vastavirtahuuhteluiden vedenkulutuksen tunnissa. Jos permeaatin tuotto laskee tämän viivan alapuolelle, on UF:n tuotto negatiivinen. Kuvaajissa esiintyvät hetkelliset virtauspiikit osoittavat vastavirtahuuhteluiden toimivuuden. Kalvojen tuotto kuitenkin laskee huuhtelua edeltävälle tasolle nopeasti.

5.2 Ajojakso 2

Toinen ajojakso oli huomattavasti pidempi verrattuna ensimmäiseen. Prosessin parametreihin ei tehty vielä tässä vaiheessa muutoksia, vaan tarkoituksena oli saada pidempi ja kattavampi ajo ensimmäisen jakson arvoilla.

UF-yksikön tuotto oli jakson alussa noin 1000 l/h, mutta kuten liitteen 2 kuvaajasta nähdään, tuotto tippui muutamassa vuorokaudessa yli 50 prosenttia. Syöttöpaineen trendi jaksolla seuraa virtaaman trendiä. Esisuodattimen vaihdolla kesken ajojakson pystyttiin nostamaan UF:n tuotto hetkellisesti 600 litraan tunnissa, mutta muutamassa tunnissa tuotto romahti. Lisäksi tulolinjaa jouduttiin puhdistamaan mekaanisesti, koska pilot-kontille saatava tulopaine laski liian alhaiseksi. Reilun viikon ajon jälkeen laitteisto pysäytettiin, koska saanto oli laskenut huomattavasti.

Liitteen 2 kuvaajista huomataan, että esisuodattimen vaihdolla UF:n syöttöpaine saatiin nostettua hetkellisesti 1,2 bar:iin. Jakson alussa syöttöpaine oli reilusti alle 1 bar. Esisuodattimen vaihdon jälkeen UF:n tuotevirtaus oli kuitenkin noin 400 l/h pienempi kuin jakson alussa. Tämä viittaa kalvojen likaantumiseen.

Toisen ajojakson päätteeksi UF-kalvot pestiin kemikaaleilla suorituskyvyn palauttamiseksi. Pesu suoritettiin happo-emäs-happo-periaatteella. Kemikaalihuuhteluiden välissä kalvot huuhdeltiin vesijohtovedellä. Lisäksi tulolinja puhallettiin paineilmailla puhtaaksi ja esisuodatinpussi uusittiin. Kemikaalipesun vaiheet on esitetty taulukossa 5. Edellä esitetyn kemikaalipesun ja muiden toimenpiteiden jälkeen aloitettiin koeajojen kolmas ajojakso.

TAULUKKO 5. Pilot-laitteiston UF-kalvoille suoritettu kemikaalipesu

1. huuhtelu vesijohtovedellä	vesimäärä:	60 l
	huuhteluvirtaama:	1500 l/h
2. happopesu (Ultrasil 75)	liuoksen määrä:	60 l
	liuoksen vahvuus:	325 ml/60 l
	pesuvirtaama:	1500 l/h
3. huuhtelu vesijohtovedellä	vesimäärä:	60 l
	huuhteluvirtaama:	1500 l/h
4. emäspesu (NaOH)	liuoksen määrä:	60 l
	liuoksen vahvuus:	30 ml/60 l
	pesuvirtaama:	1500 l/h
5. huuhtelu vesijohtovedellä	vesimäärä:	60 l
	huuhteluvirtaama:	1500 l/h
6. happopesu (Ultrasil 75)	liuoksen määrä:	60 l
	liuoksen vahvuus:	325 l/60 l
	pesuvirtaama:	1500 l/h
7. huuhtelu vesijohtovedellä	vesimäärä:	60 l
	huuhteluvirtaama:	1500 l/h

5.3 Ajojakso 3

Ennen pesun jälkeistä käynnistystä automaattisia vastavirtahuuhteluita tihennettiin ja kestoja hieman lyhennettiin. Muutoksella pyrittiin pitämään UF-kalvot pidempään puhtaana ja suorituskykyisinä ilman kemikaalipesua. Muita muutoksia prosessiin ei tehty.

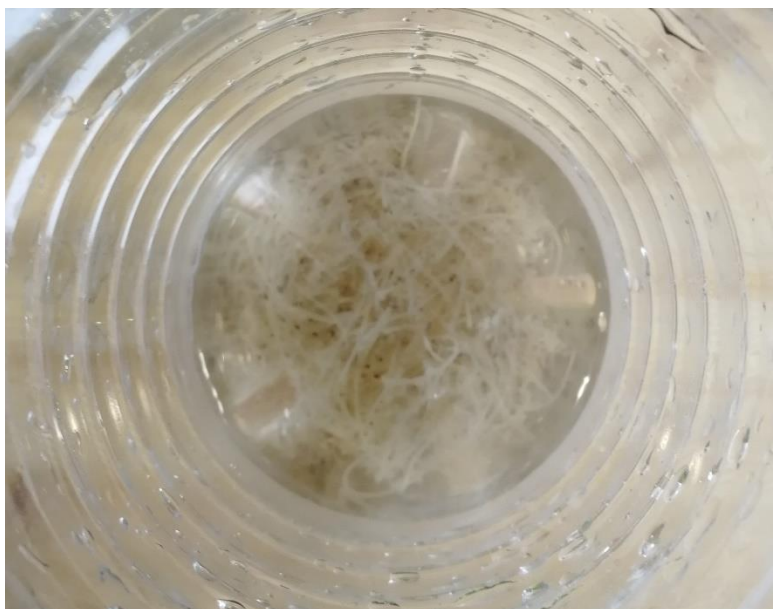
Kolmannen ajojakson alussa UF:n tuotto oli aiempia jaksoja alhaisempi (noin 650 l/h). Tämä selittyy ainakin osin matalammalla tulopaineella. Käynnistyksen aikaan esisuodattimella paine oli vain noin 1 bar. Vastavirtahuuhteluiden aikana havaittiin, että huuhteluiden virtaama oli laskenut noin puolella eli 1500 l/h. Pesupumpun ja putkiston kunto tarkistettiin eikä syytä virtaaman alenemalle löydetty. Alhaisempi tuotto ja huuhteluvirtaaman heikkeneminen johtui luultavasti UF-kalvojen pysyvistä likaantumista.

Liitteen 3 kuvaajista huomataan prosessin epävakaa tila kolmannen ajojakson aikana. Syöttöpaineen muutoksien vuoksi UF-kalvojen likaantumista on vaikea

arvioida kuvaajien perusteella. Äkillinen syöttöpaineen tippuminen 22.3. viittaa suuremman kiintoainemäärän virtaamiseen esisuodattimelle. 23.3. suoritettun esisuodattimen vaihdoin jälkeen UF:n syöttöpaine saatiin nostettua takaisin 1 bar:iin.

Prosessin kokonaissaanto oli muita jaksoja heikompi johtuen alun pienemmästä UF-kalvojen vuoarvosta. Lisäksi vastavirtahuuhtelusekvenssin muutoksien johdosta huuhteluvettä kului jakson aikana paljon. 23.3. huomattiin, että myös RO-yksikön saanto oli lähtenyt laskemaan. Pilotille tulevan veden pH oli jakson loppuvaiheessa asetusarvoa korkeampi. Normaalitilanteessa kyseisen veden pH tulisi olla noin 7, kun kolmannen ajojakson aikana se oli yli 8.

Kolmannen ajojakson lopuksi UF-kalvoille tehtiin taulukossa 5 esitetty kemikaalipesu, jonka aikana huomattiin pesuveden mukana kalvoilta irtoavan suuria määriä nauhamaista likaa. Kalvoilta poistuvan nauhamaisen aineksen oletettiin olevan kipsisakkaa (kuva 19). Kemikaalipesun kuluessa kipsin irtoaminen kalvoilta ei loppunut täysin, mutta seuraava ajojakso aloitettiin pesemättä kalvoja enempää.



KUVA 19. Kemikaalipesun aikana UF-kalvoilta irronnutta kipsiä

5.4 Ajojakso 4

Ennen jakson aloittamista UF-osion esisuodatin vaihdettiin huokoisempaan 100 µm:n suodattimeen. Muutoksen tarkoituksena oli saada pidennettyä esisuodattimen vaihtoväliä ja kuormittaa enemmän esisuodattimen jälkeisiä UF-kalvoja. Muita muutoksia prosessiin ei tehty.

Liitteen 4 kuvaajista huomataan, että ajojakson ensimmäisellä puolikkaalla ennen kaivoksen vedenkäsittelylaitoksen huoltoseisakkia UF:n syöttöpaine nousee vähitellen 1,8 bar:iin. UF-permeaatin virtaus ei kuitenkaan reagoi tähän paineen nousuun, mikä viittaa kalvojen likaantumiseen. Huoltoseisakin jälkeinen syöttöpaine ja tuotto pysyvät tasaisina jakson loppuun asti. Myös vastavirtahuuhtelun virtaama oli tippunut jo 800 litraan tunnissa. Heikko huuhteluvirtaama ei puhdistaa kalvoja yhtä tehokkaasti, mikä edesauttaa kalvojen likaantumista entisestään lian akkumuloituessa kalvon pinnalle hiljalleen.

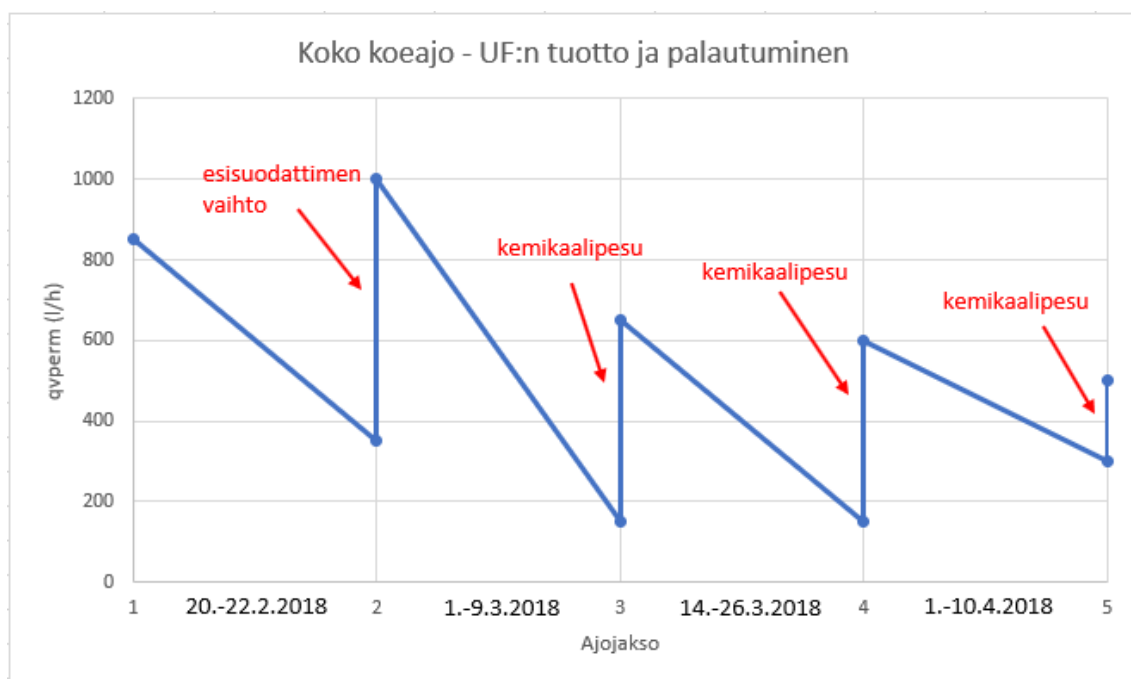
Ajojaksosta saatiin verrattain pitkä. Myös prosessin kokonaissaanto oli muita jaksoja parempi. Saannon laskemisessa on kuitenkin oletettu RO:n toiminnan pysyvän vakaana, mikä vääristää taulukossa 4 esitettyä prosessisaantoa. Jakson aikana esisuodatinta ei vaihdettu, koska UF:n tuotto pysyi kohtalaisella tasolla.

Jakson päätteeksi huomattiin, että RO-kalvot olivat täysin tukossa. UF-permeaattisäiliön pohjalle oli kertynyt kipsisakkaa, joka todennäköisesti oli aiheuttanut RO-kalvojen likaantumisen. UF-kalvojen lisäksi RO-kalvot pestiin happo-emäshappo-periaatteella. Hapon annettiin vaikuttaa RO-kalvoilla useita tunteja ja lipeäliuos jätettiin kalvoille noin vuorokaudeksi. Pesusta huolimatta kalvojen toimintakykyä ei saatu täysin palautettua. Pesun jälkeen RO-yksikön pumppujen ollessa täysteholla permeaatin virtaamaksi saatiin vain noin 100 l/h.

UF-kalvojen pesu suoritettiin pesemällä kolme kalvoa kerralla. Kaksiosaisen pesun perusteena oli kolmen vanhemman kalvon selvästi voimakkaampi likaantuminen ja heikompi tuotto neljännen jakson loppuvaiheessa. Taulukossa 5 esitetyn pesuohjelman lisäksi UF-kalvot pestiin vielä uudestaan emäksellä ja hapolla. Pesujen heikon tuloksen perusteella koejaksoja kyseisellä kaivosvedellä ei enää jatkettu.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUKSET

Koeajojen aikana kerätyn datan ja pilot-laitteiston operoinnin perusteella voidaan sanoa, ettei UF- ja RO-suodatus sovellu kyseiselle kaivosvedelle. Prosessin vaihtelevat olosuhteet ja operointitavat tekevät vedenkäsittelylaitteiston toiminnasta epävarman ja taloudellisesti kannattamattoman. Jos syöttöveden laatu pysyisi vakaana eikä kipsisakka aiheuttaisi jatkuvia huolto- ja puhdistustöitä, olisi koeajoja voitu vielä jatkaa prosessiparametrejä muuttaen. Kalvojen voimakas likaantuminen lyhyessä ajassa on kuitenkin merkki, ettei kyseisen pilot-laitteiston kaltaisen vedenkäsittelyprosessi sovellu pitkäjakoiseen käyttöön. Kalvojen likaantumisessa pesuvesien kasvava kulutus ja mahdollinen kalvojen vaihto heikentää prosessin taloudellista kannattavuutta. Koko koeajojen UF:n tuottoa ja kalvojen palautumista kuvaa yksinkertaistetusti kuva 20, jossa pisteet ovat ajojakson alku- ja loppuhetkiä.



KUVA 20. Koko koeajon UF:n tuotto ja toimintakyvyn palautuminen

Kuvassa 20 pysyvän likaantumisen trendi on liian jyrkkä, jotta prosessia voitaisiin ajaa taloudellisesti. Parametrien muutoksilla ei voitu riittävästi vaikuttaa tähän likaantumisenopeuteen. Jos sama trendi voitaisiin piirtää vuosien aikajanaalla, ei likaantuminen olisi taloudellisen kannattavuuden esteenä.

Mahdolliset jatkotutkimukset voisivat kohdistua itsepuhdistuvan MF:n tai hiekka-suodattimen toimintaan UF-kalvojen esikäsitteilynä. Saostuslaitoksen veden viipymällä voitaisiin varmistaa riittävä laskeutuminen. Lisäksi UF-kalvoja voitaisiin kohtuu pienin muutoksin ajaa cross-flow-ajomallin mukaisesti, mikä mahdollisesti vähentäisi kalvopinnalle jäävän kipsin määrää. RO-kalvojen likaantuminen koeajojen aikana kuitenkin viittaa siihen, että liukoinen kalsiumsulfaatti on ratkaiseva tekijä kalvosuodatuksen toimimattomuuteen haastavalla kaivosvedellä. UF- ja RO-tekniikkaa voidaan tässä työssä esitettyjen koeajojen jälkeen kokeilla myös kaivoksen vedenkäsittelyprosessiin tulevalla raakavedellä, johon sammutettua kalkkia ei ole lisätty. Kyseisen veden ominaisuudet ovat siis erilaiset verrattuna koeajoissa käytetyn veden ominaisuuksiin.

7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli löytää UF-kalvoille soveltuvat käyttöparametrit ja puhdistusmenetelmät kaivosveden käsittelyssä. UF-RO-laitteistoa operoitiin yhteensä neljän ajokajon verran. Koeajojen tarkoituksena oli selvittää luotettava tapa hyödyntää UF-tekniikkaa kaivosvesien uudelleenkierrätyksessä.

Koeajojen perusteella saatiin selkeä kuva laitteiston toimivuudesta kaivosvedellä. Käyttöparametrien muutoksilla ja kemikaalipesuilla pyrittiin löytämään soveltuvat toimintatavat laitteiston pitkäaikaisempaa käyttöä varten. Koeajot kuitenkin osoittivat, ettei prosessiin tehdyillä muutoksilla voitu suuresti vaikuttaa pilotin toimivuuteen likaantumisen suhteen. Useiden kemikaalipesujen jälkeen kalvoilla havaittiin pysyvää likaantumista, jota ei saatu poistettua tavanomaisin puhdistuskeinoin.

UF-kalvojen vuoarvoon tai syöttöpaineeseen ei voitu halutulla tavalla vaikuttaa vedenkäsittelylaitoksen muuttuvien olosuhteiden vuoksi. Pilot-laitteiston kehittyneemmällä varustelulla olisi voitu vaikuttaa näihin tärkeisiin prosessiarvoihin halitusti. Tällöin myös tulosten analysointi olisi ollut helpompaa ja koejaksojen dataa voitaisiin verrata toisiinsa paremmin. Kalvojen likaantuminen oli kuitenkin tässä tapauksessa niin nopeaa, ettei tulosten tulkinnassa ole epäselvyyksiä.

Koeajot antoivat paljon uutta informaatiota UF-tekniikan toimivuudesta ja käytännöllisyydestä. Jatkotutkimuksien kannalta suoritettut kokeet ovat hyvä ja vertailukelpoinen pohja. Työ opetti lisäksi pilot-luontoisen prosessiajon haastavuudesta ja antoi paljon kokemusta tulevaisuuden varalle.

LÄHTEET

1. Mallevalle, Joël – Odendaal, Peter E. – Wiesner, Mark R. 1996. Water Treatment Membrane Processes. Michiganin yliopisto: McGraw-Hill.
2. RO-Pro. 2011. Business Finland. Saatavissa: <https://extranet.tekes.fi>. Hakupäivä 23.4.2018.
3. Yritys. 2018. Teollisuuden Vesi Oy. Saatavissa: <http://www.teollisuudenvesi.fi/yritys>. Hakupäivä 23.4.2018.
4. Shammass, Nazih K. – Wang, Lawrence K. 2016. Water Engineering: Hydraulics, Distribution and Treatment. New Jersey: Wiley.
5. Etelämäki, Lauri 1999. Veden käyttö Suomessa. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.
6. Teollisuuden vesistökuormitus. 2013. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Vesistojen_kuormitus_ja_luonnon_huuhouma/Teollisuuden_vesistokuormitus. Hakupäivä 26.4.2018.
7. Vedenkäsittelymenetelmien toimintaperiaatteet. 2013. Ympäristöhallinto. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset_jarjestelmat_LVI/Vedehankinta_kaivosta/Kaivoveden_kasittely. Hakupäivä 23.4.2018.
8. Avijit, Dey – Gareth, Thomas 2003. Electronics Grade Water Preparation. Littleton: Tall Oaks Publishing Inc.
9. Oravainen, Reijo 1999. Vesistötulosten tulkinta -opasvihkonen. Tampere: KVVY. Saatavissa: <http://kvvy.fi/wp-content/uploads/2015/10/opasvihkonen.pdf>. Hakupäivä 26.4.2018.
10. Total Organic Carbon (TOC). 2018. LAR Process Analysers AG. Saatavissa: <https://www.lar.com/products/toc-analysis/toc-total-organic-carbon.html>. Hakupäivä 26.4.2018.

11. Heavy Metal Removal From Wastewater by Precipitation and Microfiltration. 2018. Porex Filtration Group. Saatavissa: <http://www.porexfiltration.com/learning-center/technology/precipitation-microfiltration/>. Hakupäivä 26.4.2018.
12. Kauppila, Päivi 2015. Tutkimusraportti 222. Hyviä käytäntöjä kaivoshankkeiden ympäristövaikutusten arvioinnissa. Espoo: Geologian tutkimuskeskus. Saatavissa: http://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_222.pdf. Hakupäivä 26.4.2018.
13. Kauppila, Päivi – Räsänen, Marja Liisa – Myllyoja, Sari 2011. Metallimalmi-kaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37056/SY_29_2011.pdf. Hakupäivä 26.4.2018.
14. Ultrafiltration Technical Manual 2002. Tekninen opas. Inge AG.
15. Membrane Systems Management. 2018. Lenntech B.V. Saatavissa: <https://www.lenntech.com/membrane-systems-management.htm>. Hakupäivä 26.4.2018.
16. Membrane Filtration & Separation. 2013. Shanghai Minipore Industrial Co. Saatavissa: <http://www.miniporeuf.com/channel.asp?id=26>. Hakupäivä 26.4.2018.
17. Wagner, Jorgen 2001. Membrane Filtration Handbook. Minnetonka: Osmo-nics Inc.
18. Membrane Configurations. 2018. Koch Membrane Systems Inc. Saatavissa: <http://www.kochmembrane.com/Learning-Center/Configurations.aspx>. Hakupäivä 26.4.2018.
19. Byrne, Wes 2002. Reverse Osmosis. A Practical Guide for Industrial Users. Littleton: Tall Oaks Publishing Inc.
20. Gas Separation with Membranes. 2008. Mecadi GmbH. Saatavissa: http://technologyreport.mecadi.com/Chapter_2_Gas_separation_with_membranes.php. Hakupäivä 26.4.2018.

21. Knops, Frans – Steggink, Mark – Körbl, Irene 2014. Design of Ultrafiltration plants for safe drinking water. Diasarja. X-Flow BV.
22. Aqua Ultrafiltration System featuring Multibore Membranes. 2015. Hydrofil Water Technologies. Saatavissa: <http://www.hydrofil.com.au/filters/aqua-ultrafiltration-system-featuring-multibore-membranes/>. Hakupäivä 26.4.2018.
23. Dizzer P Ultrafiltrationsmodule. 2012. Lenntech BV. Saatavissa: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Inge-Dizzer-P-DE-L.pdf>. Hakupäivä 27.4.2018.
24. FILMTEC XLE-4040 Membranes. 2018. Lenntech BV. Saatavissa: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dow-Filmtec-XLE-4040.pdf>. Hakupäivä 27.4.2018.
25. Vitec 7000. 2018. Avista Technologies Inc. Saatavissa: <https://www.avistatech.com/antiscalants/vitec-7000>. Hakupäivä 27.4.2018.
26. Ultrasil 75. 2014. Oy Ecolab Ab. Saatavissa: http://productcatalogue.ecolab.fi/UserFiles/VarePDF/11581_5_1.pdf. Hakupäivä 27.4.2018.

