Opas kalvosuodatustekniikoista talousveden käsittelyssä

Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 107

Helsinki 2026

Julkaisun jakelu:

Vesilaitosyhdistys
Aleksanterinkatu 44
00100 Helsinki

sähköposti: vvy@vvy.fi
kotisivu www.vvy.fi

ISSN-L 2242-7279
ISSN 2954-2014 (verkkojulkaisu)

ISBN 978-952-7545-39-3

Helsinki 2026

KUVAILULEHTI			
Julkaisija	Suomen Vesilaitosyhdistys ry		
Tekijät	AFRY Finland Oy, Piia Juholin, Emma-Tuulia Nurmesniemi, Jarmo Sallanko, Paula Seppälä ja Anne-Mari Aurola		
Julkaisun nimi	Opas kalvosuodatustekniikoista talousveden käsittelyssä		
Julkaisusarjan nimi ja numero	Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 107		
Julkaisun teema	Talousveden valmistus, kalvosuodatus		
Saatavuus	Julkaisu on saatavissa Vesilaitosyhdistyksen verkkosivuilta.		
Tiivistelmä	Oppaassa tarkastellaan kalvosuodatustekniikoiden käyttöä talousveden käsittelyssä ja niiden soveltuvuutta suomalaisille vesilaitoksille. Ympäristön kuormittuminen ja ilmastonmuutos voivat heikentää vesilähteiden laatua ja lisätä veden laadun vaihtelua, mikä voi edellyttää talousveden käsittelymenetelmien tehostamista. Samanaikaisesti talousveden laatuvaatimukset ovat tiukentuneet, mikä voi lisätä tarvetta vedenkäsittelyn tehostamiseen. Tavanomaiset käsittelyprosessit eivät välttämättä poista riittävän tehokkaasti PFAS-yhdisteitä ja muita haitta-aineita, joiden poistamiseen kalvosuodatustekniikat voivat tarjota tehokkaita ratkaisuja. Lisäksi monet Suomen vesilaitokset ovat lähivuosina saneerausiässä, mikä lisää tarvetta ajantasaiselle tiedolle kalvosuodatuksen mahdollisuuksista ja soveltuvuudesta erilaisiin kohteisiin Suomen olosuhteissa. Oppaaseen on koottu tietoa talousveden valmistukseen soveltuvista kalvosuodatustekniikoista, kalvomateriaaleista ja kalvotyypeistä sekä niiden käyttöön liittyvistä käyttöhyödykkeistä ja esikäsittelytarpeista. Lisäksi tarkastellaan kalvosuodatuksessa muodostuvien rejektivesien hallintaa sekä kalvosuodatuksen hankintaa ja kustannuksia. Oppaassa käsitellään myös kalvosuodatustekniikan valintaan, käytettävyyteen ja kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä. Oppaan tavoitteena on tarjota vesilaitoksille tietoa kalvosuodatuksen mahdollisuuksista.		
Avainsanat	Talousvesi, kalvosuodatus		
Rahoittaja/ toimeksiantaja	Vesihuoltolaitosten kehittämisrahasto		
	ISBN 978-952-7545-39-3	*ISSN* 2954-2014	
	Sivuja 73	*Kieli* suomi	*luottamuksellisuus* julkinen
Julkaisun jakelu	Vesilaitosyhdistys, www.vvy.fi		
	Tekijät vastaavat julkaisun sisällöstä eikä julkaisun sisältöä voida tulkita Vesilaitosyhdistyksen kannanotoksi.		

BESKRIVNINGSBLAD			
Publicerat av	Finlands Vattenverksförening r.f.		
Författare	AFRY Finland Oy, Piia Juholin, Emma-Tuulia Nurmesniemi, Jarmo Sallanko, Paula Seppälä ja Anne-Mari Aurola		
Publikationens titel	Guide till membranfiltreringstekniker för behandling av dricksvatten		
Publikationsseriens titel och nummer	Vattenverksföreningens duplikatserie nr 107		
Publikationens tema	Dricksvattenproduktion, membranfiltrering		
Tillgänglighet	Publikationen finns på Vattenverksföreningens webbsida.		
Sammanfattning	Guiden behandlar användningen av membranfiltreringstekniker vid dricksvattenberedning och deras lämplighet för finländska vattenverk. Miljöbelastning och klimatförändringar kan försämra vattenkällornas kvalitet och öka variationerna i vattenkvaliteten, vilket kan medföra behov av effektivare metoder för dricksvattenberedning. Samtidigt har kvalitetskraven på dricksvatten skärpts, vilket kan öka behovet av effektivare vattenberedning. Konventionella beredningsprocesser avlägsnar inte nödvändigtvis PFAS-föreningar och andra skadliga ämnen tillräckligt effektivt, medan membranfiltreringstekniker kan erbjuda effektiva lösningar för att avlägsna dessa ämnen. Dessutom kommer många finländska vattenverk att ha behov av sanering och förnyelse under de kommande åren, vilket ökar behovet av aktuell information om membranfiltreringens möjligheter och lämplighet för olika tillämpningar under finländska förhållanden. Guiden sammanställer information om membranfiltreringstekniker, membranmaterial och membrantyper som lämpar sig för dricksvattenberedning samt om förbrukningsmaterial och behov av förbehandling i samband med användningen av dessa tekniker. Dessutom behandlas hanteringen av rejektvatten som uppkommer vid membranfiltrering samt upphandling och kostnader för membranfiltrering. Guiden behandlar även faktorer som påverkar valet och användbarheten av membranfiltreringsteknik samt kostnaderna. Syftet med guiden är att ge vattenverken information om möjligheterna med membranfiltrering.		
Nyckelord	Dricksvatten, membranfiltrering		
Finansiär/ uppdragsgivare	Vattenförsörjningsverkens utvecklingsfond		
	ISBN 978-952-7545-39-3	*ISSN* 2954-2014	
	Sidantal 73	*Språk* finska	*Konfidentialitet* offentlig
Distribution av publikationen	Vattenverksföreningen, www.vvy.fi		
	Författarna är ensamt ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Vattenverksföreningens ståndpunkt.		

DESCRIPTION SHEET			
Published by	Finnish Water Utilities Association		
Authors	AFRY Finland Oy, Piia Juholin, Emma-Tuulia Nurmesniemi, Jarmo Sallanko, Paula Seppälä ja Anne-Mari Aurola		
Title of publication	Guide to Membrane Filtration Technologies for Drinking Water Treatment		
Title and number of publication series	Finnish Water Utilities Association Publication Series No. 107		
Theme of publication	Drinking water production, membrane filtration		
Availability	The publication is available on the Finnish Water Utilities Association website.		
Abstract	The guide examines the use of membrane filtration technologies in drinking water treatment and their applicability to Finnish water utilities. Environmental pressures and climate change can affect the quality of water sources and increase variations in water quality, which may create a need for more effective drinking water treatment. At the same time, drinking water quality requirements have become more stringent, which may further increase the need for enhanced water treatment. Conventional treatment processes may not remove PFAS and other harmful substances sufficiently effectively, whereas membrane filtration technologies can provide effective solutions for their removal. In addition, many Finnish water utilities will require renovation and upgrading in the coming years, increasing the need for up-to-date information on the potential of membrane filtration and its suitability for different applications under Finnish conditions. The guide compiles information on membrane filtration technologies, membrane materials and membrane types suitable for drinking water treatment, as well as the consumables and pre-treatment requirements associated with their use. It also examines the management of reject water generated by membrane filtration and the procurement and costs of membrane filtration systems. The guide also addresses factors affecting the selection, applicability and costs of membrane filtration technologies. The aim of the guide is to provide water utilities with information on the potential of membrane filtration.		
Keywords	Drinking water, membrane filtration		
Funding body / commissioning organisation	Water Utilities Development Fund		
	ISBN 978-952-7545-39-3	*ISSN* 2954-2014	
	Number of pages 73	*Language* Finnish	*Confidentiality* Public
Distribution	Finnish Water Utilities Association, www.vvy.fi		
	The authors are solely responsible for the content of this report. The report should therefore not be regarded as representing the views of the Finnish Water Utilities Association.		

Esipuhe

Tässä oppaassa esitellään kalvosuodatustekniikoiden käyttöä vesilaitoksilla. Oppaan tavoitteena on tuottaa ajantasaista tietoa päätöksenteon, hankinnan ja operoinnin tueksi, jotta nykyisten vesilaitosten prosessimuutokset ja saneeraustarpeet voidaan arvioida. Työn toteuttajana toimi AFRY Finland Oy.

Kiitämme hankkeen ohjausryhmää asiantuntevasta panoksesta oppaan koostamiseen. Ohjasryhmään kuuluivat Reetta Stjerna, Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Janne Pakarinen, Joensuun Vesi, Janne Mäki-Petäjä, Lahti Aqua Oy, Heli Härkki, Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Panu Laurell, Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Teemu Lepistö, HeadPower Oy, Riitta Kettunen, Tampereen Vesi, Sari Pyyny, Ylä-Savon Vesi ja Elina Antila, Porvoon Vesi.

Erityinen kiitos myös ohjausryhmäedustajien lisäksi hankkeen työpajaan osallistuneille vesilaitosedustajille sekä hankkeen kyselyyn vastanneille: Emmi-Maria Ukko, Kymen Vesi, Julia Ijäs, Vaasan Vesi, Jukka Tyrväinen, Alva-yhtiöt Oy, Hannu Roikola, Kempeleen Vesihuolto ja Janne Mäki-Petäjä, Lahti Aqua. Oppaassa pystyttiin hyödyntämään arvokasta kokemusta laitoksilta, joissa kalvosuodatusta ollaan hankkimassa tai joissa se on ollut jo käytössä. Kiitämme lämpimästi myös laitetoimittajia arvokkaasta panostuksesta osallistumalla työpajaan ja vastaamalla laitetoimittajille suunnattuun kyselyyn.

Helsingissä 31.8.2026
Tekijät

Sisällysluettelo

1 Johdanto 1
2 Taustaa 2
2.1 Talousveden käsittely perinteisillä tekniikoilla pinta- ja pohjavedestä 2
2.2 Talousveden valmistus merivedestä 3
2.3 Lainsäädäntö 3
2.3.1 Nykyinen talousvesiasetus 3
2.3.2 Uudet talousveden lainsäädäntövaatimukset 4
2.3.3 Lupamenettely 4
3 Kalvosuodatus 6
3.1 Yleistä kalvosuodatuksesta 6
3.1.1 Kalvoerotustekniikat 6
3.1.2 Muodostuvat rejektit 8
3.2 Kalvomateriaalit 8
3.2.1 Polymeeriset kalvot 8
3.2.2 Keraamiset kalvot 9
3.2.3 Uudet ja kehittyvät materiaalit 9
3.2.4 Kalvomateriaalien vertailu 10
3.3 Kalvotyypit 10
3.3.1 Levykalvot 10
3.3.2 Spiraalikalvot 10
3.3.3 Putkimaiset kalvot 11
3.3.4 Onttokuitukalvot 12
3.4 Tarvittavat käyttöhyödykkeet 12
3.4.1 Energia 12
3.4.2 Kemikaalit 13
3.4.3 Vesi 14
3.4.4 Paineilma 14
3.4.5 Kalvot 14
3.4.6 Esisuodattimet 14
3.5 Esikäsittelytarpeet 15
3.5.1 Ultrasuodatuksen esikäsittely 15
3.5.2 Nanosuodatuksen ja käänteisosmoosin esikäsittely 15
3.6 Saavutettuja haitta-aineiden poistotehoja 15
3.6.1 Koonti poistotehoista 16
3.6.2 PFAS-yhdisteiden poisto 16
3.6.3 Orgaanisen aineksen poisto 17
3.6.4 Fluoridin poisto 17
3.6.5 Arseenin poisto 17
3.6.6 Torjunta-aineiden poisto 18
3.6.7 Kloridin poisto 18
3.7 Taudinaiheuttajien poistoteho 19
3.8 Kalvosuodatuksen operointi ja kunnossapito 20
4 Kalvosuodatusprosessin toteutus 21
4.1 Laitosmaiset ratkaisut 21
4.1.1 Pohjaveden käsittely 22
4.1.2 Pintaveden esikäsittely 24
4.1.3 Pintaveden käsittely 25
4.1.4 Meriveden käsittely 27
4.2 Väliaikaiset konttiratkaisut 29
4.3 Rejektien johtaminen 29
4.4 Rajoitteet käytettäville kemikaaleille 30

4.5 Instrumentointi ja automaatio 30
5 Kalvosuodatustekniikan valintaperusteet 31
5.1 Hankintaperusteet 31
5.2 Kapasiteetti 31
5.3 Raakaveden laatu 32
5.4 Elinkaari 32
5.5 Energiatehokkuus 33
5.6 Tilantarve 34
6 Kalvosuodatuksen kustannukset 35
6.1 Investointikustannukset 35
6.2 Käyttökustannukset 36
6.3 Elinkaarikustannukset 37
7 Kalvosuodatustekniikan käytettävyys 38
8 Poimintoja kalvosuodatusta hyödyntävistä laitoksista 39
9 Kalvosuodatushankinnassa huomioitavia riskitekijöitä 40
10 Johtopäätökset ja suositukset 41
11 Lähteet 42
12 Liitteet 45

LIITE 1 KOONTI LAITETOIMITTAJILLE SUUNNATUN KYSELYN TULOKSISTA

LIITE 2 OPPAAN LAADINTAAN TIETOJA TOIMITTANEET KALVOTOIMITTAJAT

LIITE 3 TALOUSVEDEN LAATUVAATIMUKSET JA -TAVOITTEET

LIITE 4 KALVOSUODATUKSESSA KÄYTÖSSÄ OLEVIA, TALOUSVEDEN TUOTANTOON KÄYTETTÄVIÄ MATERIAALEJA JA NIIDEN OMINAISUUKSIA

LIITE 5 SAAVUTETTUJA ARSEENIN POISTOTEHOKKUUKSIA ERI TUTKIMUKSISTA

LIITE 6 SAAVUTETTUJA TORJUNTA-AINEIDEN POISTOTEHOKKUUKSIA SYNTEETTISILLÄ VESILLÄ

LIITE 7 SAAVUTETTUJA KLORIDIN POISTOTEHOKKUUKSIA ERI TUTKIMUKSISTA

LIITE 8 HANKINTAKRITEEREISTÄ

Käytetyt lyhenteet ja termien selitykset

Termi/lyhenne	Selite
CEB	tehostettu kemiallinen pesu (engl. chemically enhanced backwash)
CIP	kiertopesu erillisestä pesutankista (engl. cleaning in place)
flotaatio	flokit erotetaan vedestä nostamalla ne ilman kanssa altaan pinnalle flotaatiossa
fouling	kalvojen likaantuminen
konsentraatti	kalvon pidättämä neste, sisältää kaikki kalvon pidättämät aineet
käänteisosmoosi	prosessi, jossa paineen avulla pakotetaan liuotin liikkumaan puoliläpäisevän kalvon läpi väkevämmästä laimeampaan päin
mikrobiologinen barrieri	talousveden tuotantoketjun vaihe taudinaiheuttajien poistamiseksi
NF	nanosuodatus (engl. nanofiltration)
osmoosi	osmoosi on liuottimen diffuusiota puoliläpäisevän kalvon läpi laimeammasta väkevämpään
osmoottinen paine	paine, joka tarvitaan osmoosin estämiseen
permeaatti	kalvon läpi kulkeva neste
puoliläpäisevä kalvo	kalvo, joka sallii tietyn kokoisten molekyylien läpäisyn ja pidättää toisen kokoiset molekyylit
RO	käänteisosmoosi (engl. reverse osmosis)
rejekti	kalvon pidättämä neste, sisältää kaikki kalvon pidättämät aineet (retentaatti/konsentraatti) sekä kalvojen pesuissa syntyneet pesuvedet
retentaatti	kalvon pidättämä neste, sisältää kaikki kalvon pidättämät aineet, käytetään myös termiä konsentraatti
UF	ultrasuodatus (engl. ultrafiltration)

1 JOHDANTO

Oppaan tavoitteena on koota ajantasainen tieto kalvosuodatustekniikoiden mahdollisuuksista vesilaitosten muuttuvassa toimintaympäristössä, jossa mm. ilmastonmuutoksen ja ympäristön saastumisen vaikutuksiin, raakaveden laatuun sekä haitta-aineiden poistovaatimuksiin ei välttämättä pystytä vastaamaan nykyisin yleisesti käytössä olevilla prosessitekniikoilla.

Vesilaitokset tarvitsevat oppaan tietoja päätöksenteon, hankinnan ja operoinnin tueksi, jotta nykyisten laitosten prosessimuutokset ja saneeraustarpeet voidaan arvioida kestäviin ja toteutuskelpoisiin ratkaisuihin pohjautuen. Oppaassa on esitetty myös perusteita syille, miksi perinteisillä käsittelyprosessilla ei voida hallita kaikkia vedenlaadun haasteita.

Oppaan aineistoa kerättiin neljässä osiossa: kirjallisuusselvityksessä, kyselyissä toiminnassa oleville kalvosuodatusta käyttäville vesilaitoksille ja kalvosuodatusta suunnitteluttaville vesilaitoksille, kyselyssä kalvotoimittajille sekä työpajassa. Sekä vesilaitosten että kalvotoimittajien kyselyjen tuloksia hyödynnettiin oppaan aineistossa nimettömästi.

Työpaja järjestettiin 25.3.2026 ja siihen osallistui konsultin lisäksi vesilaitosten edustajia ja laitetoimittajia. Työpajan tavoitteena oli tunnistaa raakaveden laadun haasteet, joihin kalvosuodatustekniikalla voidaan vaikuttaa sekä tunnistaa tilanteet, joissa kalvosuodatustekniikalla saavutetaan perinteisiä menetelmiä parempi talousveden laatu. Työpajassa saatiin myös vesilaitosten käyttökokemukset osaksi kalvosuodatusopasta. Prosessitoimittajat alustivat työpajapäivää esittelemällä omat ratkaisunsa raakaveden käsittelemiseksi.

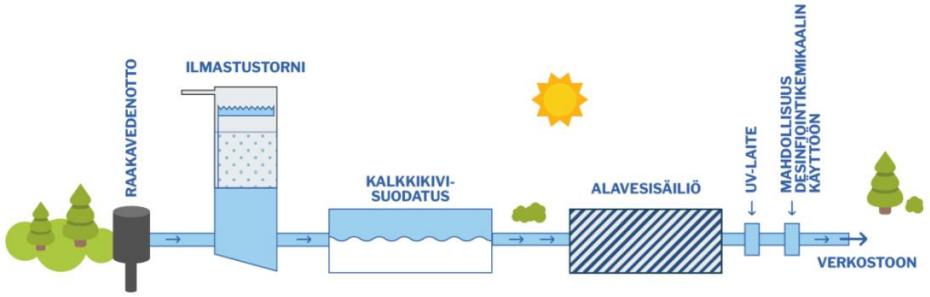
2 TAUSTAA

Kalvoteknologioiden käyttö on lisääntynyt maailmanlaajuisesti, mutta niiden käyttö suomalaisilla vesilaitoksilla on edelleen vähäistä. Suomessa kalvoprosesseja on otettu käyttöön pääasiassa fluoridin, raudan, mangaanin, orgaanisen aineksen sekä kloridin poistamiseksi vedestä.

2.1 TALOUSVEDEN KÄSITTELY PERINTEISILLÄ TEKNIIKOILLA PINTA- JA POHJAVEDESTÄ

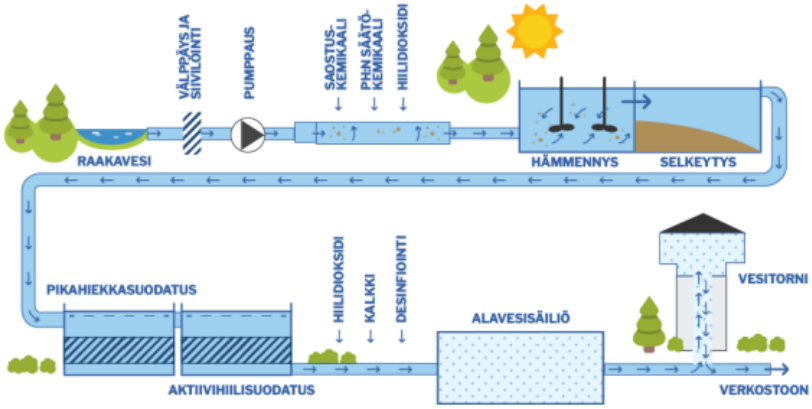
Pohjavesi täyttää parhaimmillaan talousveden laatuvaatimukset ja -suositukset ilman erillistä käsittelyä. Useimmiten pohjavettä kuitenkin käsitellään ennen vesijohtoverkkoon johtamista putkistojen ja veden kanssa kosketuksissa olevien materiaalien syöpymisen vähentämiseksi ja veden mikrobiologisen laadun varmistamiseksi. Niin pohjaveden kuin pintaveden käsittelyprosessi riippuu käsiteltävän veden laadusta ja käsittelyprosessin jälkeisistä laatuvaatimuksista.

Pohjavesilaitoksen tyypillinen käsittelyprosessi (Kuva 1) sisältää alkalointivaiheen (pH:n nosto), raudan ja mangaanin poiston sekä desinfioinnin UV-valolla. Näiden lisäksi laitoksella on yleensä klooridesinfiointivalmius. (VVY, 2025a).



Kuva 1. Esimerkki pohjavesilaitoksen vedenkäsittelyprosessista raakavedenotosta verkostoon syöttämiseen. Lähde: VVY, 2025a

Pintavesi puolestaan vaatii aina monivaiheisen ja tehokkaan käsittelyn (Kuva 2) mm. kiintoaineksen, orgaanisen aineksen ja mahdollisten tautia aiheuttavien mikrobien poistamiseksi. Pintavesi on aina desinfioitava ennen käyttöä talousvetenä.



Kuva 2. Esimerkki pintavesilaitoksen vedenkäsittelyprosessista raakavedenotosta verkostoon syöttämiseen. Lähde: VVY, 2025a.

Taulukossa (Taulukko 1) on esitetty tarkemmin mitä tyypillisiä pintaveden epäpuhtauksia erilaisilla prosessivaihtoehdoilla pystytään poistamaan.

Taulukko 1. Pintavesilaitoksella tyypillisesti käytettäviä prosessivaiheita. Lähde: VVY, 2025a.

Yksikköprosessi	Selite
Välppäys ja siivilöinti	Karkean kiintoaineksen poisto
Pikasekoitus	Saostus- ja pH:n säätökemikaalien annostuksen ja sekoituksen tarkoituksena on sekoittaa kemikaali veteen tehokkaasti ja saostaa kiintoaine ja humus erotettavaksi sakaksi. Sakan mukana poistuu myös osa mikrobeista.
Hämmennys	Pikasekoituksessa muodostuneet mikroflokit kasvavat kokoa vedestä erotettaviksi flokeiksi.
Selkeytys	Flokit erotetaan vedestä joko laskeuttamalla ne altaan pohjalle tai nostamalla ne ilman kanssa altaan pinnalle flotaatiossa.
Suodatus	Suodatusvaiheessa esimerkiksi hiekkasuodattimilla poistetaan selkeytyksen jälkeen veteen jäänyttä kiintoainesta.
Otsonointi, aktiivihiilisuodatus	Menetelmiä käytetään parantamaan veden hajua ja makua. Otsonointi hajottaa hajuja ja makuja aiheuttavia yhdisteitä pienemmiksi molekyyleiksi. Aktiivihiili sitoo aineita kiintoaineen pinnalle.
pH:n säätö	Veden pH nostetaan prosessin lopussa syövyttävyyden vähentämiseksi.
Desinfiointi	Pintavedestä valmistettava talousvesi desinfioidaan yleensä useammalla menetelmällä (kloori, UV-desinfiointi, otsoni).

2.2 TALOUSVEDEN VALMISTUS MERIVEDESTÄ

Suomessa talousvettä valmistetaan myös merivedestä, mutta hyvin pienessä mittakaavassa. Merivedestä valmistetun talousveden osuus on alle 1 % Suomessa toimitetusta talousvedestä (Suomen ympäristökeskus, 2021). Pieniä käänteisosmoosiin perustuvia laitteita on käytössä saaristossa.

2.3 LAINSÄÄDÄNTÖ

Talousveden hankintaa, käsittelyä, toimittamista ja laatua koskevat keskeisesti seuraavat säädökset:

- Terveydensuojelulaki (763/1994) ja sen nojalla annetut talousvesiasetus (1352/2015) ja riskienhallinta-asetus (7/2023)
- Vesihuoltolaki (119/2001) ja sen nojalla annettu VEETI-asetus (6/2023) tiedottamisesta
- Vesilaki 587/2011 (VVY, 2025a)

Tässä kappaleessa keskitytään kalvosuodatustekniikoiden kannalta keskeiseen lainsäädäntöön talousveden laatuvaatimusten ja lupamenettelyn osalta.

2.3.1 Talousvesiasetus

Talousveden laatuvaatimukset ja -tavoitteet on määritelty sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (STM 1352/2015). Talousvesiasetusta sovelletaan vesilaitosten toimittamaan talousveteen, jota toimitetaan

vedenjakelualueelle keskimäärin vähintään 10 m^3 vuorokaudessa tai vähintään 50 henkilön tarpeisiin tai pakataan pulloihin tai säiliöihin. Asetusta sovelletaan myös tilapäiseen vedenjakeluun esimerkiksi tankeista tai vain osan vuodesta käytössä olevista vesijohdoista. Talousvettä toimittava laitos vastaa toimittamansa veden laadusta. Talousvedessä ei saa olla pieneliöitä, loisia tai mitään aineita sellaisina määrinä tai pitoisuuksina, joista voi aiheutua terveyshaittaa. Talousveden on täytettävä säädetyt laatuvaatimukset ja -tavoitteet, jotka on esitetty liitteessä 3.

2.3.2 Uudet talousveden laatuvaatimukset

Lainsäädännön kiristyminen asettaa uusia vaatimuksia vedenkäsittelylle. Perinteiset käsittelyprosessit eivät välttämättä poista riittävän tehokkaasti kaikkia haitta-aineita, mukaan lukien eräitä uusia laatuvaatimusmuuttujia. Kalvosuodatustekniikoilla voidaan menetelmästä ja poistettavasta yhdisteestä riippuen tehostaa näiden aineiden poistamista.

Kunnan terveydensuojeluviranomaisen tuli huolehtia siitä, että seuraavat uudet laatuvaatimusmuuttujat sisällytetään valvontatutkimusohjelmaan viimeistään 12.1.2026:

- bisfenoli A,
- haloetikkahapot,
- kloraatti,
- kloriitti,
- mikrokystiini-LR,
- PFAS-aineiden summa.

Määräykset perustuvat EU:n juomavesidirektiiviin (EU 2020/2184), joka on toimeenpantu Suomessa 3.1.2023 sosiaali- ja terveysministeriön asetuksella (STM 2/2023 21§).

Haloetikkahappojen, kloraatin ja kloriitin tutkimistarve liittyy niitä muodostavien desinfiointimenetelmien käyttöön. Esimerkiksi haloetikkahappoja muodostuu desinfioinnin sivutuotteena, kun orgaanista ainetta sisältävää vettä desinfioidaan klooriyhdisteillä. Kalvotekniikoilla voidaan tehostaa orgaanisen aineksen poistamista ja siten vähentää haloetikkahappojen muodostumispotentiaalia.

2.3.3 Lupamenettely

Minimissään vesilaitoksen prosessimuutokseen tarvitaan Terveydensuojelulain (TsL) (18 §) mukainen ilmoitus tai hakemus. Nykyisen laitoksen prosessimuutokset kalvosuodatusprosesseiksi, nykyisen laitoksen korvaaminen kokonaan uudella kalvosuodatuslaitoksella tai uuden, kalvosuodatustekniikkaan perustuvan vesilaitoksen lupamenettely ei poikkea muusta vesilaitosrakentamisen luvitusmenettelystä. Eli kalvosuodatus ei itsessään aiheuta ylimääräistä, muusta vesilaitoksen toteutuksesta poikkeavaa luvitustarvetta, mutta lopullisen luvitustarpeen vahvistaa lupaviranomainen.

Nykyisen laitoksen prosessimuutostöiden tai uuden vesilaitoksen hankkeen käynnistämisen yhteydessä tulee kuitenkin ottaa huomioon tarpeet, joista seuraavassa on nostettu esille myös kalvosuodatukseen liittyviä erityispiirteitä:

- Tarkistetaan vesiluvan ja vedenottoluvan riittävyys, mikäli vedenottomäärää joudutaan nykyistä prosessiratkaisua heikomman saannon tai vedentuotantomäärän kasvun takia kasvattamaan.
- Tarkistetaan ympäristöluvan tai ympäristölupamuutoksen tarve, mikäli kalvosuodatuksen seurauksena nykyisen laitoksen toimintaan tulee merkittäviä muutoksia kemikaloinnin ja kemikaalikuljetusten osalta, tai esimerkiksi maastoon

johdettavien vesijakeiden (kalvosuodatuksen konsentraattien tai muiden suodattimien pesuvesien) laadun ja määrän osalta.

- Mikäli kalvosuodatusprosessin rejektit viemäröidään, tulee vesilaitoksen neuvotella asiasta viemärilaitoksen kanssa.
- Vesilaitoksen kemikaaliluvat voivat vaatia päivitystä, riippuen kalvosuodatusprosessin pesuissa käytettävistä kemikaaleista, niiden vaarallisuudesta ja varastoitavista määristä. Kemikaaliturvallisuutta valvovat Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) sekä paikalliset pelastusviranomaiset.
- Uuden laitososan/-rakennuksen tai uuden laitoksen tulee hakea myös rakennuslupaa, jonka yhteydessä huomioidaan kaavamääräykset.
- Kalvosuodatuksen pilotoinnin yhteydessä tarvitaan myös koetoimintalupa.

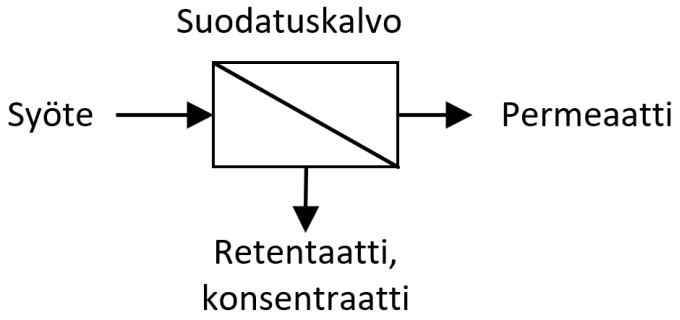
3 KALVOSUODATUS

3.1 YLEISTÄ KALVOSUODATUKSESTA

3.1.1 Kalvoerotustekniikat

Paine-eroon perustuvissa kalvoerotustekniikoissa vesi johdetaan paineen avulla puoliläpäisevän kalvon läpi, jolloin kalvon pidättämät aineet jäävät kalvon syöttöpuolelle. Tällöin muodostuu kaksi vesijaetta, jotka ovat puhdistettu vesi eli permeaatti sekä kalvon pidättämät aineet sisältävä retentaatti (Kuva 3). Erotus perustuu partikkelien ja kalvon huokosten kokoeroon ja myös erityisesti nanosuodatuksessa sähkövaraukseen. Nanosuodatuksessa ja käänteisosmoosissa syöttöpaineen tulee ylittää veden osmoottinen paine, jotta vesi kulkeutuu kalvon läpi. Kalvon huokoskoolla ja materiaalilla vaikutetaan poistettavien aineiden erotustehokkuuteen (Metcalf & Eddy, 2003).

Kalvoerotuksen ajavana voimana voidaan paine-eron lisäksi käyttää esimerkiksi lämpötila-, konsentraatio-, elektrokemiallisen potentiaalin tai höyrynpaineen eroa. Tässä oppaassa tarkastellaan kuitenkin paine-eroon perustuvia kalvoerotusmenetelmiä.



Kuva 3. Syötevirran jakautuminen kalvoprosessissa puhtaaksi permeaatiksi ja haitta-aineita sisältäväksi retentaatiksi.

Kalvosuodatusta voidaan soveltaa vesien orgaanisen aineen poistossa perinteisten ratkaisujen, kuten selkeytys ja suodatus, korvaajana. Lisäksi tiukimmilla kalvoerotusratkaisuilla voidaan tavoitella mm. seuraavien aineiden poistoa: torjunta-aineet, metallit, uudet talousvesiasetuksessa mainitut laatumuuttujat (kts. kpl 2.3.2), mangaani, kloridi ja fluoridi. Kalvosuodatus voi toimia mikrobiologisena esteenä eli yhtenä talousveden käsittelyketjun vaiheena, jolla poistetaan vedestä taudinaiheuttajia (tarkemmin kappaleessa 3.7).

Nanosuodatuksella voidaan poistaa vedestä tyypillisesti tehokkaasti moniarvoisia ioneja, kuten kalsium- ja magnesiumioneja. Niiden poistotehokkuus voi olla 95–99 %. Yksiarvoisten ionien, kuten natrium- ja kloridi-ionien, poistotehokkuus on yleensä pienempi, mutta voi olla jopa 90 %. Käänteisosmoosi poistaa yksiarvoisia ioneja nanosuodatusta tehokkaammin (Metcalf & Eddy, 2003). Tämän vuoksi käänteisosmoosia käytetään laajasti esimerkiksi meriveden suolanpoistoon talousveden valmistuksessa.

Nano- ja käänteisosmoosisuodatus tarvitsevat usein esikäsittelynä kiintoaineen sekä raudan ja mangaanin poiston. Mikäli olosuhteet käänteisosmoosisuodatuksessa ovat kuitenkin optimaaliset, eli pH on riittävän matala (n. 5,5) ja vesi hapetonta, voidaan käänteisosmoosisuodatuksella poistaa myös rautaa ja mangaania. Myös korkea kalsiumpitoisuus häiritsee nano- ja käänteisosmoosisuodatusprosesseja.

Nano- ja käänteisosmoosisuodatuksessa vedestä poistuu myös kovuutta aiheuttavia suoloja. Tämän vuoksi käsitelty vesi voi vaatia jälkikäsittelynä remineralisointia esimerkiksi kalkkikivisuodatuksella, jotta veden korrodoivuutta voidaan vähentää ja veden laatu saadaan jakeluverkostoon soveltuvaksi. Vaihtoehtoisesti, jos vain osa vesivirrasta käsitellään nano- tai käänteisosmoosisuodatuksella, käsitelty vesi voidaan sekoittaa käsittelemättömään ohitusvirtaamaan. Näin veden mineraalipitoisuus ja muut vedenlaatuominaisuudet voidaan säätää talousvedelle ja jakeluverkostoon soveltuviksi. Paine-eroon perustuvien kalvoerotusmenetelmien ominaisuuksia talousveden käsittelyssä on koottu alla olevaan taulukkoon (Taulukko 2).

Taulukko 2. Vertailu paine-eroon perustuvien kalvoerotustekniikoiden ominaisuuksista (Metcalf & Eddy, 2003, Wagner, 2001).

	Mikrosuodatus	**Ultrasuodatus**	**Nanosuodatus**	**Käänteisosmoosi**
Kalvon huokoskoko (µm)	0,08–2,0	0,005–0,2	0,001–0,01	0,0001–0,001
Tarvittava paine (bar)	n. <2	n. 1–10	n. 5–35	n. 15–150 (Talousveden valmistuksessa tarvittava paine on yleensä vaihteluvälin alapäässä mutta se alkaa kasvaa käsiteltävän veden suolapitoisuuden kohotessa)
Retentaatin määrä (%)	n. 1–5	n. 1–10	n. 20–30	n. 20–40
Erotus perustuu	partikkelien ja kalvon huokosten kokoeroon	partikkelien ja kalvon huokosten kokoeroon	partikkelien ja kalvon huokosten kokoeroon, diffuusioon ja kalvon varaukseen	aineiden erilaiseen diffuusioon kalvon läpi
Tyypillinen käyttökohde talousveden valmistuksessa	hiekkasuodatuksen korvaajana kiintoaineen erotuksessa	hiekkasuodatuksen korvaajana kiintoaineen erotuksessa tai esikäsittelynä ennen käänteisosmoosia tai nanosuodatusta	liuenneiden aineiden poisto	liuenneiden aineiden poisto

* Huokoskoot ja tekniikoiden väliset rajat ovat suuntaa antavia. Erityisesti NF- ja RO-kalvojen erotuskykyä kuvataan myös muilla ominaisuuksilla kuin huokoskoolla.

3.1.2 Muodostuvat rejektit

Edellä esitetyissä kalvosuodatusta kuvaavissa kappaleissa todettiin, että prosessissa muodostuu retentaattia, johon kalvon pidättämät aineet konsentroituvat. Retentaatin määrä vaihtelee kalvoprosessin mukaan ja se voi olla merkittävä erityisesti nanosuodatuksessa ja käänteisosmoosissa. Retentaatti voidaan jatkokäsitellä esimerkiksi flotaatiolla tai ultrasuodatuksella, jolloin viemäriin johdettavan retentaatin määrää voidaan vähentää. Jatkokäsittelyssä talteen saatava vesijae voidaan veden laadun niin salliessa palauttaa osaksi vedentuotantoprosessia.

Retentaatin lisäksi kalvosuodatusprosessissa muodostuu rejektivesiä kalvojen huuhteluista ja kemiallisista pesuista. Kalvoja huuhdellaan ajoittain vedellä ja puhdistetaan esimerkiksi happo- ja emäspesuilla kalvojen läpäisykyvyn palauttamiseksi.

Esimerkiksi ultrasuodatuskalvoja huuhdellaan puhtaalla vedellä vastavirtahuuhteluna kymmeniä kertoja päivässä, mikä lisää rejektin määrää. Myös nanosuodatus- ja käänteisosmoosikalvoja huuhdellaan säännöllisesti. Kemiallisia pesuja tehdään kalvoille vesihuuhteluita harvemmin ja siitä syntyvä rejektimäärä on sen vuoksi suhteellisesti selvästi pienempi. Tyypillisesti ultrasuodatuskalvoja pestään kemiallisesti päivittäin tai viikoittain kuormituksesta riippuen. Nanosuodatus- ja käänteisosmoosikalvoja pestään kemiallisesti arviolta muutaman kerran vuodessa. Mm. käsiteltävän veden laatu ja esikäsittely vaikuttavat kemiallisen puhdistuksen tarpeeseen.

Kemiallisten pesujen vedet yleensä viemäröidään sellaisenaan tai siten, että pH säädetään viemäröitävälle vedelle sallitulle alueelle 6–9.

3.2 KALVOMATERIAALIT

3.2.1 Polymeeriset kalvot

Polymeerikalvot ovat olleet yleisimmin käytettyjä muun muassa niiden kustannustehokkuuden ja hyvän saatavuuden vuoksi. Polymeerikalvoja käytetään eri kalvoerotusmenetelmissä mikrosuodatuksesta käänteisosmoosiin. Kalvoja pestään tarvittaessa kemiallisesti, mutta niillä on pH ja lämpötilarajoituksia.

Polymeeriset nanosuodatus- ja käänteisosmoosikalvot ovat usein komposiittikalvoja (thin film composite, TFC), joissa on ohut aktiivinen kerros, jossa suodatus tapahtuu. Aktiivista kerrosta tukee usein polysulfonista valmistettu mikrohuokoinen polymeerikerros sekä kuitumainen tukikerros (Warsinger ym., 2018).

Polymeerikalvoja voidaan valmistaa useista eri materiaaleista ja kalvomateriaaleilla on erilaisia ominaisuuksia, joilla voidaan vaikuttaa suodatuksen toimintaan. Polymeerikalvon materiaalivalintaan vaikuttavat muun muassa huokoskoko, pintavaraus, sekä kemiallinen ja mekaaninen kestävyys (Warsinger et al. 2018).

Yleisiä polymeeristen kalvojen materiaaleja ovat:

- Polyamidit (PA) – erityisesti nanosuodatus- ja käänteisosmoosikalvot
- Polysulfoni (PSU), polyeetterisulfoni (PES), Polyvinyylideenifluoridi (PVDF) – mekaanisesti ja kemiallisesti kestävät ultrasuodatuskalvot
- Selluloosa-asetaatti, selluloosatriasetaatti (CA, CTA) – perinteiset käänteisosmoosikalvot, herkempiä orgaanisen kasvun ja mikrobikannan muodostumiselle

3.2.2 Keraamiset kalvot

Keraamiset suodatuskalvot ovat kehittyneet lähivuosina, ja niiden käyttö on yleistynyt samalla, kun valmistuskustannukset ovat laskeneet (Galjaard, 2024). Keraamisten kalvojen etuna on hyvä kestävyys kemikaaleja, lämpöä ja mekaanista kulutusta vastaan. Esimerkiksi otsoni voi heikentää polymeerikalvojen rakennetta (PVDF poikkeuksena), mutta keraamiset kalvot kestävät otsonia hyvin.

Keraamiset kalvot voivat myös sopia esimerkiksi esikäsittelyksi ehkäisemään kalvojen tukkeutumista kohteeseen, jossa on käytössä käänteisosmoosi. Kaupallisesti saatavilla olevia keraamisia kalvoja löytyy erityisesti mikro- ja ultrasuodatukseen mutta myös nanosuodatukseen. Sen sijaan keraamisten käänteisosmoosikalvojen kaupallinen saatavuus on vielä rajallista.

Yleisiä keraamisten kalvojen materiaaleja ovat:

- piikarbidi (SiC)
- alumiinioksidi (Al_2O_3)
- zirkoniumoksidi (ZrO_2)
- titaanidioksidi (TiO_2)

Keraamisten kalvojen investointikustannukset ovat tyypillisesti suuremmat kuin polymeerikalvojen, mutta valittava materiaali vaikuttaa kustannuksiin. Esimerkiksi alumiinioksidia pidetään keraamisista kalvomateriaaleista edullisena vaihtoehtona. Keraamisten kalvojen etuna on kohtuullisemmat käyttökustannukset verrattuna polymeerikalvoihin, koska niillä on pidempi käyttöikä ja ne kestävät tehokkaampaa kemiallista pesua ja myös korkeampia lämpötiloja (Akash et al., 2024).

3.2.3 Uudet ja kehittyvät materiaalit

Nanomateriaalien lisäämistä polymeerikalvoihin on tutkittu erityisesti erityissovelluksiin teollisuuden vedenkierrätyksessä. Niiden avulla kalvojen vedenläpäisevyyttä, tukkiutumisen estoa ja mekaanista ja lämmön kestoa voitaisiin parantaa.

Vedenläpäisevyyden kasvu voi vähentää kalvoprosessin energiankulutusta. Useat nanokomposiittikalvot ovat vasta pilottitasolla eivätkä kaupallisesti saatavilla (Warsinger et al. 2018). Myös selluloosa-silkkikomposiittia on tutkittu, erityisesti pysyvien haitta-aineiden kuten PFAS-yhdisteiden ja raskasmetallien poistoon (Chandler, 2024).

Tutkittuja materiaaleja ovat muun muassa:

- selluloosa- ja silkkipohjaiset biomateriaalit
- nanokomposiitit:
    - grafeenioksidi (GO)
    - hiilinanoputket (CNT)
    - titaanidioksidi (TiO2)
    - hopeananohiukkaset (nAg)

3.2.4 Kalvomateriaalien vertailu

Polymeeristen mikro- ja ultrasuodatuskalvojen (esim. PVDF, PES, PSF) raportoitu käyttöikä on tyypillisesti noin 5–12 vuotta. Polyamidipohjaisten nanosuodatus- ja käänteisosmoosikalvojen käyttöikä on usein lyhyempi (noin 3–7 vuotta), mihin vaikuttaa muun muassa polyamidin herkkyys kloorille (Yang et al., 2019; Kammakakam & Lai, 2023; Kumar & Chang, 2024). Keraamisten ultrasuodatuskalvojen kestävyys on taas nostanut käyttöikää jopa 15–20 vuoteen.

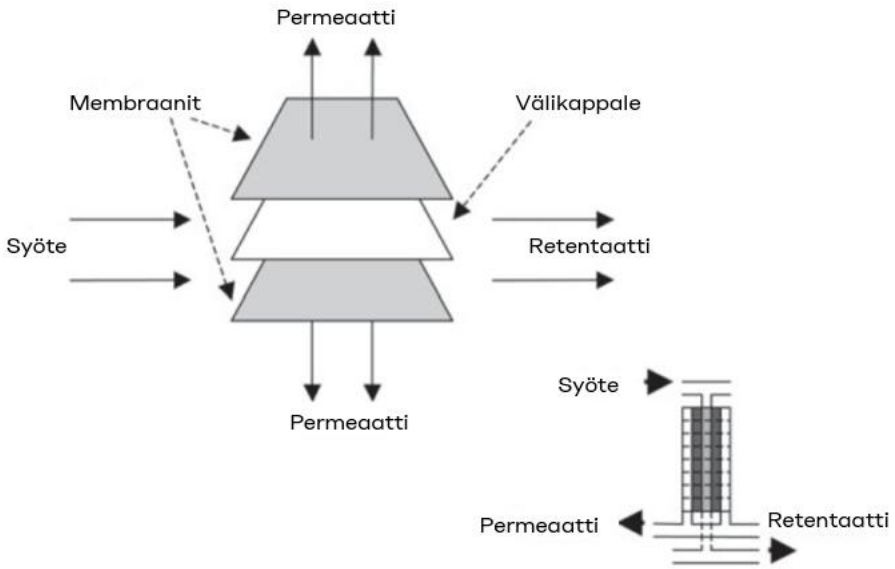
Liitteessä 4 esitetyt käyttöiät ovat arvioita. Kalvojen todelliseen käyttöikään vaikuttavat myös käsiteltävän veden laatu, esikäsittely, pesukäytännöt ja käyttöolosuhteet.

3.3 KALVOTYYPIT

Kalvotyyppejä on kuvattu seuraavissa kappaleissa. Sekä kalvotyypin että kalvomateriaalin valinnassa voidaan pilotoinnilla löytää soveltuvimmat ratkaisut sekä optimoida raakaveden esikäsittelytarve ennen kalvosuodatusta.

3.3.1 Levykalvot

Levykalvoja käytetään tyypillisesti melko matalissa käyttöpaineissa, ja ne soveltuvat esimerkiksi ultrasuodatukseen. Kalvot kiinnitetään välilevyn molemmille puolille. Levyjä valitaan tarvittava, haluttua suodatuspinta-alaa vastaava määrä. Välilevyjen pintakuviointi muodostaa virtauskanavat, joita pitkin permeaatti kulkee. Levykalvojen rakenne on esitetty kuvassa 4 (Heinonen, 2016).



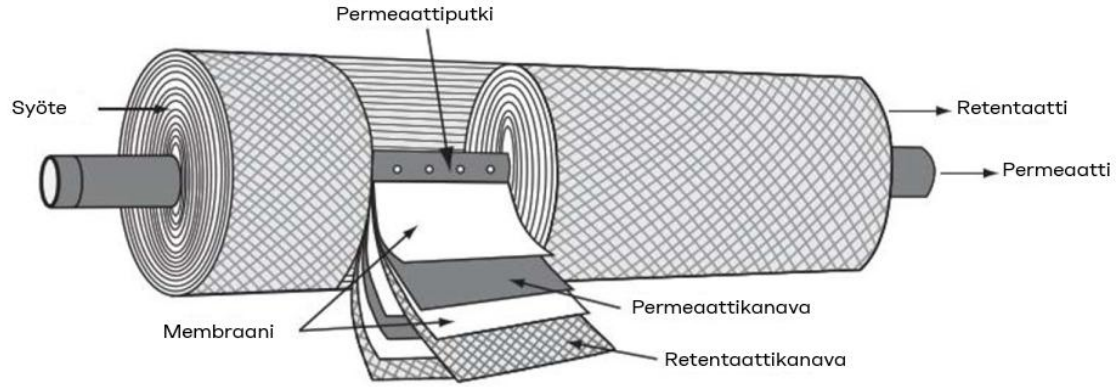
Kuva 4. Levysuodattimen rakenne (Lähde: Al-Jajan, 2017).

3.3.2 Spiraalikalvot

Spiraalisuodattimet ovat yksi käytetyimmistä suodatinmoduuleista. Spiraalikalvojen rakenne on esitetty kuvassa 5 (Heinonen, 2016). Spiraalisuodatin koostuu useista suodatinkalvoista, huokoisista välikappaleista (spacer) ja permeaattiputkesta, jonka ympärille kalvot on kääritty. Suodatinlehdet on erotettu toisistaan välikappaleilla, jotka muodosta-

vat kalvojen väliin virtauskanavan ja estävät kalvoja painautumasta toisiaan vasten korkeissa paineissa. Permeaatti virtaa permeaattiputkeen välikappaleen ohjaamana, kun taas retentaatti virtaa ulos moduulin toisesta päästä.

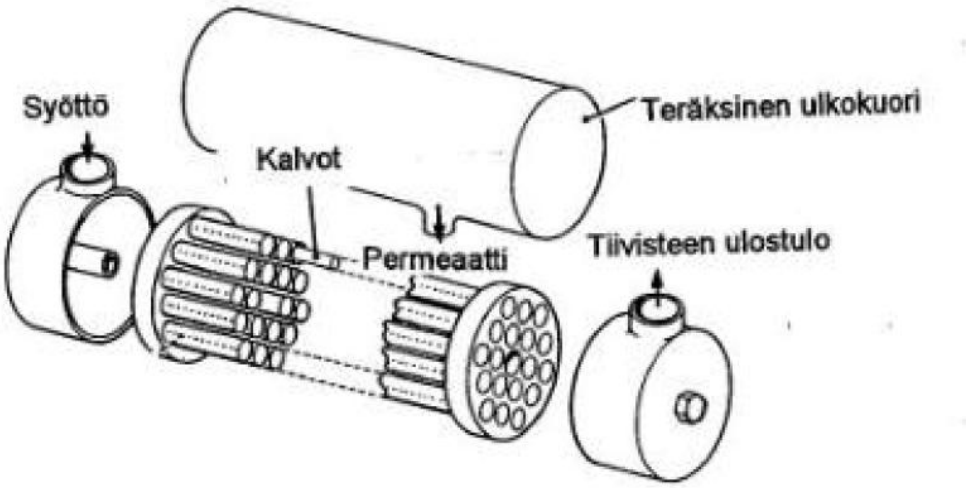
Spiraalisuodattimissa käytetään tyypillisesti polymeerikalvoja. Spiraalimoduulilla saavutetaan suuri pakkaustiheys eli kalvopinta-ala tilavuutta kohden. Spiraalimoduulien haasteena on niiden tukkeutumistaipumus. Kalvojen välissä olevat välikappaleet lisäävät kalvomoduulin tukkeutumista kohdissa, joissa välikappale on kosketuksissa kalvon pinnan kanssa.



Kuva 5. Spiraalisuodattimen rakenne (Lähde: Smith, 2013).

3.3.3 Putkimaiset kalvot

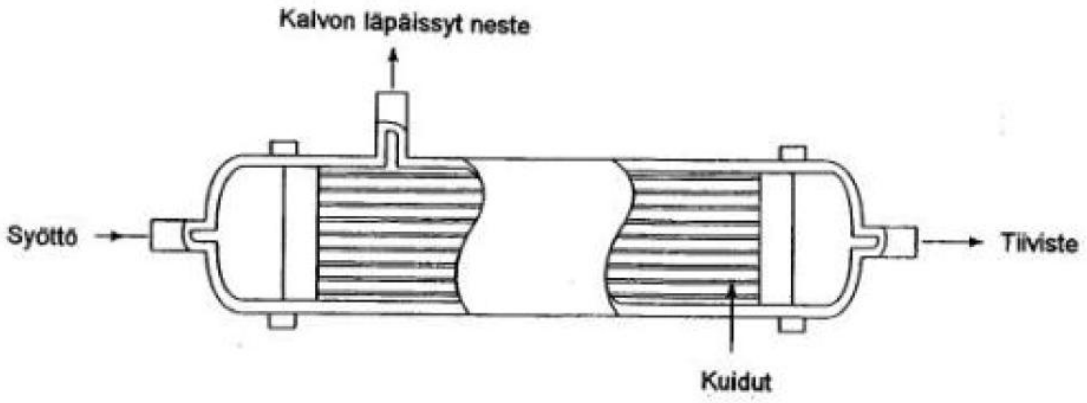
Putkimoduuleissa suodatinkerros sijaitsee jäykkien putkien sisä- tai ulkopinnalla riippuen siitä, johdetaanko syöttövesi paineen avulla putkien sisä- vai ulkopuolelle. Putken halkaisija vaihtelee noin 2–25 millimetrin välillä. Putkikalvoja käytetään erityisesti likaaville ja viskoottisille nesteille. Putkikalvojen etuna on mahdollisuus puhdistaa niitä mekaanisesti pienten vaahtomuovipallojen avulla. Putkimoduuleita voidaan valmistaa polymeeri- tai keraamikalvoista ja niiden pakkaustiheys on pieni. Putkisuodattimen rakenne on esitetty kuvassa 6 (Heinonen, 2016).



Kuva 6. Putkisuodattimen rakenne (Lähde: Sahlstein, 2005 viitattu lähteessä Heinonen, 2016).

3.3.4 Onttokuitukalvot

Onttokuitumoduuli muistuttaa rakenteeltaan putkimoduulisuodattimia, mutta poikkeaa niistä putkien koon osalta. Onttokuitusuodattimessa suodatinkalvoina toimivien kuitujen halkaisija on vain muutamia millimetrejä. Kalvokuidut, tyypillisesti 50–3 000 kappaletta, kootaan kimpuksi paineputken sisään, jolloin vesi voidaan syöttää onttokuitukalvojen ulko- tai sisäpuolelle. Onttokuitusuodattimessa tyypillinen kalvomateriaali on polymeerikalvo. Paineputkeen sijoitetun onttokuitusuodattimen rakenne on esitetty kuvassa 7 (Heinonen, 2016).



Kuva 7. Onttokuitusuodattimen rakenne. (Lähde: Sahlstein, 2005 viitattu lähteessä Heinonen, 2016)

Onttokuitukalvot voidaan sijoittaa myös suoraan altaaseen esimerkiksi kalvobioreaktorissa (MBR). Tässä ratkaisussa vesi imetään alipaineella kalvon läpi. Kalvot likaantuvat niiden ulkopinnalta ja ne pidetään puhtaana mekaanisesti esimerkiksi paineilman avulla.

3.4 TARVITTAVAT KÄYTTÖHYÖDYKKEET

3.4.1 Energia

Kalvosuodatusprosesseissa energiaa kuluu mm. pumppauksiin, sekoituksiin, esikäsittelyn eri prosesseihin ja tilan lämmitykseen. Kalvosuodatusprosessit toteutetaan poikkeuksetta sisätiloihin pohjoismaisissa olosuhteissa.

Kalvosuodatuksen energiankulutus vaihtelee käytetyn tekniikan mukaan. Tyypillisesti ultrasuodatus kuluttaa vähemmän energiaa kuin korkeamman paineen vaativat nanosuodatus ja käänteisosmoosi, joissa energiaa kuluu paineen tuottamiseen. Korkeapainepumput ovat yksi suurimmista energiankuluttajista kalvoprosesseissa (Metcalf & Eddy, 2003).

Laitetoimittajille suunnatun kyselyn perusteella esitetyt arviot energiankulutuksesta vaihtelivat merkittävästi ollen ultrasuodatuskalvoilla 0,05–1 kWh/m³. Tiukempien kalvosuodatusvaihtoehtojen (NF ja RO) kohdalla energiankulutus vaihteli 0,8–1,2 kWh/m³. Käytettävä paine vaikuttaa kokonaisenergiankulutukseen, sillä kovemmalla paineella ja energiankulutuksella voidaan aikaansaada suurempi permeaattivuo (virtaama kalvopinta-alaa kohti).

Esikäsittelyprosessit voivat vaatia esimerkiksi veden pumppausta, sekoitusta ja suodatusta. Esikäsittelymenetelmät eivät ole tyypillisesti erityisen energiaintensiivisiä.

3.4.2 Kemikaalit

Kalvosuodatuksessa käytetään kemikaaleja mm. kalvojen pesuun, veden esikäsittelyyn, kalvojen likaantumisenestoon ja pH:n säätöön. Käytettävät kemikaalit sekä kemikaalien annostelu- ja varastointimäärät voivat poiketa tavanomaisista vesilaitoksilla käytetyistä kemikaaleista ja niiden määristä. Kemikaalien varastoinnissa ja annostelussa tulee huolehtia käyttöturvallisuudesta ja riittävistä varoaltaista sekä estää happojen ja emästen sekoittuminen myös mahdollisissa vuototilanteissa.

pH:n säätö
Tyypillinen pH:n säädössä käytettävä emäs on lipeä (NaOH). Myös kalkkia (CaO, $Ca(OH)_2$) tai kalkkikiveä voidaan käyttää, mutta ne eivät ole suositeltavia kalvoprosessin yhteydessä sen likaavuuden (scaling) vuoksi. Happona voidaan käyttää esimerkiksi rikkihappoa (H_2SO_4) tai suolahappoa (HCl).

pH:n säätökemikaaleja (happo/emäs) voi kulua esimerkiksi esikäsittelyssä. Myös käsiteltävän (pohja)veden pH voidaan haluta säätää riittävän happamalle tasolle esimerkiksi mangaania tai muita metalleja poistettaessa, jolloin halutaan varmistaa, että metallit ovat liukoisessa muodossa ennen kalvoerotusta.

Esikäsittely
Kalvosuodatuksen esikäsittelyssä käytetään tyypillisesti rauta- ja alumiinipohjaisia koagulantteja (VVY, 2022). Ultrasuodatuksen esikäsittelyssä rautapohjaiset koagulantit voivat poistaa humusta tehokkaammin kuin alumiinikoagulantit, mutta kalvojen kannalta alumiinipohjaiset koagulantit ovat rautapohjaisia vähemmän likaavia. Kemikaalien valinta tehdään usein kalvotoimittajan ohjeistamana ja kalvotoimittajat suosittelevat myös kemikaloinnin pilotointia.

Kalvoprosessien toimittajille suunnatuissa kyselyissä ei tullut esille ehdottomia rajoitteita raakaveden esikäsittelyssä käytettävälle kemikaloinnille. Kyselyssä oli tarkoitus selventää esikäsittelyssä käytettävien kemikaalien aiheuttamia riskejä kalvojen tukkeutumiselle, ennenaikaiselle likaantumiselle tai tiheämmälle kemiallisten pesujen tarpeelle.

Kalvojen pesu
Ultrasuodatuskalvoille tehdään määritettävissä olevan ajan välein vastavirtahuuhteluita, joissa käytetään esim. permeaattisäiliöön kerättyä vettä. Sen lisäksi tehdään tehostettuja kemiallisia pesuja CEB (englanniksi chemically enhanced backwash) ennalta määritellyin aikavälein esimerkiksi hapolla (esim. HCl, H_2SO_4 tai sitruunahapolla) ja kloorilla (NaClO). Lisäksi tehdään CIP-pesuja (englanniksi clean in place) erillisestä pesutankista, kun kalvojen likaantumisen aiheuttamaa paine-eroa ei enää saada poistettua vastavirtahuuhtelulla ja tehostetuilla kemiallisilla pesuilla. Nano- ja käänteisosmoosisuodatuksessa CIP-pesuissa käytetään myös happoja (esim. sitruunahappo), emäspesut tehdään yleensä ilman hapettavia emäksiä (esim. NaOH).

Remineralisointi
Käänteisosmoosi vähentää veden suola- ja mineraalipitoisuutta tehokkaasti. Veden pH, alkaliniteetti ja puskurikyky voivat jäädä alhaisiksi, jolloin vesi tulee remineralisoida juomavesilaatuiseksi esimerkiksi kalkkikivisuodatuksella, joka nostaa veden pH:ta ja lisää veteen suoloja. Remineralisointiin käytetään usein kalkkikivirouhesuodatusta, sammutetun kalkin annostelua, lipeää tai soodaa, sekä edellä mainittujen yhdistelmiä.

3.4.3 Vesi

Kalvojen kemiallisissa pesuissa ja vastavirtahuuhtelussa on käytettävä riittävän puhdasta, laadultaan kalvotoimittajan hyväksymää vettä, esim. kalvosuodatuksessa muodostuvaa permeaattia. Myös pesukemikaalien laimennukseen tarvitaan riittävän puhdasta vettä. Pesuvesien määrän ja tarvittavan permeaattisäiliön koon mitoittaa prosessitoimittaja.

3.4.4 Paineilma

Ultrasuodatuskalvojen puhdistuksessa tarvitaan paineilmaa. Kalvojen syöttöpuolelle johdetulla paineilmalla tehostetaan epäpuhtauksien irtoamista kalvojen pinnalta vastavirtapesun yhteydessä. Esikäsittelyssä (esim. flotaatio) voidaan tarvita paineilmaa, riippuen esikäsittelytarpeista. Lisäksi usein tarvitaan instrumentti-ilmaa.

3.4.5 Kalvot

Kalvot likaantuvat käytön myötä ja jossain vaiheessa pesutoiminnoilla ei enää saavuteta hyväksyttävää puhdistustasoa eikä käsiteltävän veden läpäisyä prosessissa. Saannon pienentyessä ja vedenläpäisyvyyden heiketessä myös energiankulutus kasvaa.

Kalvojen käyttöikää on kuvattu mm. kappaleessa 3.2. Todellinen käyttöikä selviää mm. pilotoinnissa tai käyttökokemuksen myötä. Kalvojen vaihto on pääsääntöisesti prosessitoimittajan suorittama huoltotyö, ja vaihdon aikana kyseinen kalvoyksikkö tai elementti on poissa vedentuotannosta muutamia tunteja.

Kalvojen käyttöikään vaikuttavat kalvolle syötettävän veden laadun lisäksi vuo, esikäsittelyssä käytetyt kemikaalit, pesukäytännöt ja kalvomateriaali. Mm. keraamisille ultrasuodatuskalvoille on ilmoitettu jopa 15–20 vuoden käyttöikä.

Laitetoimittajille suunnattujen kyselyiden perusteella kalvojen käyttöiäksi arvioitiin seuraavia:

- pohjaveden käsittelyssä 5–10 vuotta
- pintaveden käsittelyssä 3–10 vuotta
- meriveden käsittelyssä 3–10 vuotta

Kalvojen vaihto voidaan toteuttaa joko kaikkien kalvojen samanaikaisena uusimisena tai porrastetusti siten, että osa kalvoista uusitaan vuosittain suunnitelmallisesti niiden käyttöiän päättyessä tai tarvittaessa kunnon perusteella.

3.4.6 Esisuodattimet

Kalvojen käyttöiän maksimoimiseksi kalvoprosesseissa voidaan käyttää esisuodattimia, joiden tavoitteena on estää erityisesti partikkelien pääsy tiukimmille suodattimille (NF ja RO). Esisuodattimet kuuluvat prosessitoimittajan toimituskokonaisuuteen, ja niiden tarve sekä huolto- ja vaihtokäytännöt vaihtelevat käytön ja veden laadun mukaan. Mahdollinen esisuodattimien vaihto on prosessin operaattorin tehtävissä.

3.5 ESIKÄSITTELYTARPEET

Yleensä kalvosuodatustekniikat tarvitsevat syöteveden esikäsittelyä. Tyypillisesti esikäsittelyllä tavoitellaan kalvojen likaantumisen minimointia, optimoidaan tuottoa sekä pidennetään kalvojen käyttöikää.

3.5.1 Ultrasuodatuksen esikäsittely

Pintaveden ultrasuodatusta edeltää usein saostuskemikaalin annostelu ja flokinmuodostus. Kemiallinen saostus toteutetaan mm. orgaanisen aineen koaguloimiseksi. Mikäli raakavedessä on leviä, voidaan tarvita lisäksi esim. mikrosiivilöinti ja tarvittaessa sen lisäksi desinfiointi esikäsittelynä ennen ultrasuodatusta.

Esikäsittelyssä ennen ultrasuodatusta voidaan syötevedestä poistaa kiintoainetta perinteisemmällä kiintoaineen erotustekniikalla, esimerkiksi vaakaselkeytyksellä tai flotaatiolla. Tällaisella esikäsittelyllä vähennetään kalvoille kohdistuvaa kiintoainekuormitusta ja voidaan harventaa kalvojen pesuväliä sekä ehkäistä kalvojen rikkoutumista. Kiintoaineen poistolla voidaan vaikuttaa myös kalvoprosessin mitoitukseen.

3.5.2 Nanosuodatuksen ja käänteisosmoosin esikäsittely

Nanosuodatuskalvot ja käänteisosmoosikalvot ovat herkkiä kiintoainekuormitukselle, ja kiintoaineen aiheuttama riski kalvojen rikkoutumiselle halutaan hallita esikäsittelyllä. Ennen nano- tai käänteisosmoosisuodatusta tulee olla esimerkiksi hiekkasuodatus tai ultrasuodatus ja kappaleessa 3.5.1 kuvattu ultrasuodatuksen esikäsittely. Lisäksi raudan ja mangaanin poistamiseksi voi olla tarpeen ilmastus/hapetus. Hiekkasuodatuksen ja nano- tai käänteisosmoosisuodatuksen välissä voi olla karkeasuodatin kalvon suojelemiseksi. Prosessitoimittaja suosittelevat myös joissain tapauksissa patruunasuodattimia tai pussisuodattimia nanosuodatuksen ja käänteisosmoosin eteen kalvojen turvaamiseksi kiintoaineilta, mikäli edeltävää hiekka- tai ultrasuodatusta ei pidetä riittävänä. Karkeasuodattimet kuuluvat tässä tapauksessa kalvosuodatusprosessitoimitukseen.

Ultrasuodatusta voidaan käyttää esikäsittelynä ennen nano- tai käänteisosmoosisuodatusta joko yksistään tai yhdistettynä koagulaatioon. Kemiallinen esikäsittely voi olla mm. pH:n säätöä, desinfiointia, likaantumisenestoa tai koagulaatiota (EPA 2005).

3.6 SAAVUTETTUJA HAITTA-AINEIDEN POISTOTEHOJA

Nanosuodatus ja käänteisosmoosisuodatus voivat poistaa käsiteltävästä vedestä sellaisia epäpuhtauksia, joihin tavanomaiset vedenkäsittelyn yksikköprosessit eivät pysty, tai vastaava poistoteho saavutettaisiin esimerkiksi otsonoinnin ja aktiivihiilisuodatuksen yhdistelmällä. Esimerkiksi aktiivihiilisuodatuksella ei saada poistettua suoloja merkittävästi, kun taas kalvosuodatuksella suolat voidaan poistaa tehokkaasti.

Seuraaviin kappaleisiin on koottu esimerkinomaisesti kalvosuodatuksessa saavutettavia poistotehoja. Poistotehoon vaikuttaa merkittävästi raakaveden laatu ja mahdollinen esikäsittely sisältäen hapetuksen, millä poistotehoa voidaan edelleen parantaa.

3.6.1 Koonti poistotehoista

Suodatuskalvojen suuntaa antavia poistotehoja on koottu alla olevaan taulukkoon (Taulukko 3). Tarkemmin eri haitta-aineiden poistotehoista on kerrottu haitta-ainekohtaisesti kappaleissa 3.6.2-3.6.7.

Taulukko 3. Paine-eroon perustuvien kalvosuodatusten poistotehoja eri haitta-aineille (mukaillen Shannon et al., 2008; WHO, 2017)

	Ultrasuodatus	**Nanosuodatus**	**Käänteisosmoosi**
Kiintoaine	Erittäin korkea	Erittäin korkea	Erittäin korkea
Suurimolekyylinen orgaaninen aine	Kohtalainen, paranee merkittävästi koaguloinnin kanssa	Korkea	Erittäin korkea
Väri/humus	Kohtalainen, paranee merkittävästi koaguloinnin kanssa	Korkea	Erittäin korkea
PFAS	Ei poista	Kohtalainen–korkea (riippuu yhdisteestä)	Erittäin korkea
Suolat	Ei poista	Osittainen	Erittäin korkea
Lääkeaineet	Ei poista	Kohtalainen–korkea (riippuu yhdisteestä)	Erittäin korkea
Liuennut orgaaninen aines	Ei poista	Kohtalainen	Erittäin korkea

3.6.2 PFAS-yhdisteiden poisto

PFAS-yhdisteitä eli poly- ja perfluorattuja alkyyliyhdisteitä käytetään monissa tuotteissa, tuotantolaitteissa ja valmistusprosesseissa ja ne voivat päätyä ympäristöön ja kulkeutua vesistöön niitä sisältävien tuotteiden valmistuksesta, varastoinnista, käytöstä tai hävityksestä. PFAS-yhdisteet ovat hyvin pysyviä eivätkä juurikaan hajoa ympäristössä tai elimistössä. PFAS-yhdisteet saattavat aiheuttaa riskin ihmisen terveydelle. Talousvedessä 20 määritellyn PFAS-yhdisteen summapitoisuus ei saa ylittää arvoa 0,10 µg/l (LVV, 2024).

Nanosuodatuksella ja käänteisosmoosisuodatuksella on saavutettu erittäin korkeita poistotehoja PFAS-yhdisteille, etenkin eniten tutkittujen PFAS-yhdisteiden perfluorioktaanihappo (PFOA) ja peroktofluorioktaanisulfonihappo (PFOS) osalta. Nanosuodatuksella on saavutettu tyypillisesti 70–90 % PFAS-yhdisteiden poistotehoja riippuen mm. käytetyistä kalvoista, poistettavasta PFAS-yhdisteestä ja prosessiolosuhteista, mutta jopa 99,9 % poistoteho PFOA-yhdisteelle on raportoitu (Chaudhary et al. 2023).

Käänteisosmoosisuodatuksella on saavutettu tyypillisesti >90 % PFAS-yhdisteiden poistotehokkuus, mutta Giovannin ym. (2026) mukaan pilot-mittakaavan kokeissa on saavutettu jopa 100 % PFAS-yhdisteiden poistotehokkuus.

Jauhemaisen aktiivihiilen syötöllä veteen ennen ultrasuodatusta voidaan myös poistaa PFAS-yhdisteitä: yhdisteet adsorboituvat hiileen ja hiili poistetaan ultrasuodatuksella.

Poistettaessa PFAS-yhdisteitä kalvosuodatuksella tulee huomioida, että haitalliset yhdisteet siirtyvät retentaattiin. Tämä rajoittaa mahdollisuuksia purkaa retentaattia ympäristöön, ja viemäröitäessäkin retentaatin laaturiski tulee ottaa huomioon vastaanottavalla jätevedenpuhdistamolla haitta-aineiden poistotarpeen arvioimiseksi.

3.6.3 Orgaanisen aineksen poisto

Veden sisältämien orgaanisten aineiden määrä on yleistä ilmoittaa orgaanisen hiilen kokonaismääränä (TOC). TOC-pitoisuudelle on annettu talousvedelle laatutavoite, ettei TOC-pitoisuudessa saa olla havaittavissa epätavallisia muutoksia. TOC-pitoisuutta on vähennettävä, jos veden orgaanisesta aineesta aiheutuu välillisiä haittoja. Mikrobeille käyttökelpoisen biologisesti hajoavan orgaanisen aineksen määrä vaikuttaa mikrobien kasvuun verkostossa. Lisäksi pintavesilaitoksilla muodostuu desinfioinnin sivutuotteina, adsorboituvia orgaanisia halogeeniyhdisteitä (AOX), kloorin reagoidessa orgaanisen aineksen kanssa (LVV, 2024).

Nanosuodatuksella on raportoitu saavutettavan 50–95 % orgaanisen aineksen poistotehokkuuksia (Guo et al. 2021). Ultrasuodatuksella voidaan myös saavuttaa varsin tehokas orgaanisen aineen poisto, mikäli käsiteltävä vesi kemikaloidaan, ja orgaaninen aines muodostaa ultrasuodatuksella poistettavaa kiintoainetta. Ilman hyvää flokin muodostusta ultrasuodatuksella ei saavuteta merkittäviä TOC-reduktioita.

Haju- ja makuhaittoja aiheuttavien orgaanisten yhdisteiden kohdalla kalvosuodatuksen teho voi mm. haitan aiheuttajayhdisteistä ja kalvon huokoskoosta riippuen olla rajallisempi kuin otsonoinnilla ja aktiivihiilisuodatuksella saavutettu poistoteho.

3.6.4 Fluoridin poisto

Fluoridi on ihmiselle välttämätön hivenaine, mutta liiallinen saanti voi aiheuttaa vakavia vaikutuksia luustossa. Fluoridin terveysperusteinen talousveden enimmäisarvo on 1,5 mg/l. Suomen pohja- ja pintavesissä fluoridipitoisuudet ovat tyypillisesti pieniä lukuun ottamatta rapakivialueita, joilla pohjaveden fluoridipitoisuus voi olla useita milligrammoja litrassa. Lisäksi kohonneita fluoridipitoisuuksia voi olla muillakin alueilla porakaivovesissä (LVV, 2024).

Suomalaisella vesilaitoksella nanosuodatuksella (5,7 bar) on saavutettu pohjavedestä 76 % ja käänteisosmoosisuodatuksella (7,3 bar) 95 % fluoridin poistotehokkuus pohjaveden lähtöpitoisuudesta 4 mg/l. Vesilaitoksella neljäsosa tuotetusta talousvedestä on ollut kalvosuodatettua. Kalvosuodatuslaitoksella (16–25 m^3/h) on ollut kaksi linjaa, toinen nanosuodatukselle ja toinen käänteisosmoosisuodatukselle (Kettunen & Keskisalo 2000).

Yksittäisten, esimerkiksi fluoridin kaltaisten epäpuhtauksien poistamiseksi nano- tai käänteisosmoosisuodatuksella vaadittavalle talousvesiasetuksen mukaiselle tasolle voi käsittely riittää vain osavirtaamalle.

3.6.5 Arseenin poisto

Arseeni on karsinogeeninen aine ja arseenille on terveysperusteinen enimmäisarvo talousvedelle 10 µg/l. Arseenin pitoisuus talousvedessä Suomessa on yleensä selvästi alle 1 µg/l. Tosin Suomessakin on riskialueita, joiden porakaivovesissä on todettu jopa 100–2000 µg/l arseenipitoisuuksia (LVV, 2024).

Liitteessä 5 on esitetty tietoja tutkimuksissa saavutetuista arseenin poistotehoista kalvotekniikoilla. Arseenin poistotehokkuus kalvosuodatuksella on ollut tyypillisesti 70–95 % välillä, mutta myös matalampia sekä korkeampia poistotehokkuuksia on julkaistu (Foorgineeshad et al. 2025 ja Algieri et al. 2022).

3.6.6 Torjunta-aineiden poisto

Torjunta-aineita päätyy pintavesiin huuhtoutumalla mm. pelloilta, puutarhoilta ja radanvarsilta. Torjunta-aineita saattaa päätyä pohjavesiin normaalin käytön lisäksi myös esim. väärän varastoinnin tai paukkausten hävittämisen seurauksena. Torjunta-aineiden ja niiden aineenvaihduntatuotteiden kokonaismäärälle on asetettu talousvedelle enimmäisarvo 0,50 µg/l. Yksittäisen torjunta-aineen enimmäisarvo on 0,10 µg/l, lukuun ottamatta aldriinia, dieldriinia, heptaklooria ja heptaklooriepoksidia, joiden enimmäisarvo on 0,030 µg/l. Talousveden enimmäisarvot on asetettu suojelemaan torjunta-aineilta yleisellä tasolla (LVV, 2024).

Cevalloz-Mendoza et al. (2022) ovat koonneet tietoja synteettisillä vesillä eli malliliuoksilla tehdyissä kokeissa saavutetuista torjunta-aineiden poistotehokkuuksista pääasiassa nanosuodatuskalvoilla, mutta myös nanokomposiittisilla ultrasuodatuskalvoilla. Liitteessä 6 olevaan taulukkoon on koottu tietoja tutkimuksista sisältäen tutkitun torjunta-aineen, kalvosuodatusmenetelmän, käytetyn kalvomateriaalin ja saavutetun poistoprosentin. Torjunta-aineiden poistotehokkuus on tutkimuksissa pääasiassa välillä 80–97 %, mutta myös heikompia ja parempia poistotehokkuuksia on julkaistu.

3.6.7 Kloridin poisto

Kloridin laatutavoite talousvedelle on alle 250 mg/l, mikä perustuu makukynnykseen. Korroosio-ongelmien välttämiseksi tulisi kuitenkin pyrkiä alle 25 mg/l kloridipitoisuuteen elleivät veden muut ominaisuudet vähennä kloridin haitallista vaikutusta (LVV, 2024). Kloridin poistotarve on tunnistettu myös pohjoismaissa, vaikka raakavesilähteenä ei käytettäisi merivettä. Klorideja imeytyy jossain määrin pohjaveteen rantaimeytymisen vuoksi ja esimerkiksi yksittäisissä pohjavesiesiintymissä voi olla kohonneita kloridipitoisuuksia.

Foorgineshad et al. 2025 ovat koonneet poistotehokkuuden perusteella eri poistettaville aineille ml. natriumkloridi lupaavimpien nanosuodatuskalvojen tietoja. Li et al. 2022 ovat koonneet tietoja tutkimuksista kloridin poistoon vesiliuoksista. Liitteeseen 7 on koottu tutkimuksissa saavutettuja kloridin poistotehokkuuksia. Saavutetuissa kloridin poistotehokkuuksissa on ollut paljon vaihtelua. Kloridin poistotehokkuus on ollut parempi käänteisosmoosikalvoilla kuin nanosuodatuskalvoilla. Nanosuodatuskalvoilla saavutettu kloridin poistotehokkuus on ollut enimmillään 94 % ja modifioiduilla kalvoilla 98 %. Käänteisosmoosikalvoilla saavutettu kloridin poistotehokkuus on ollut enimmillään 98 %.

3.7 TAUDINAIHEUTTAJIEN POISTOTEHO

Talousveden tuotantoketjussa täytyy olla useampia vaiheita taudinaiheuttajien poistamiseksi, jotta riski tautien leviämisestä talousveden välityksellä on hallittu. Vaiheista käytetään englanniksi termiä microbial barrier. MBA-laskennan (microbial barrier analysis) avulla voidaan arvioida talousveden tuotantoketjun taudinaiheuttajien poistotehon riittävyys raakaveden laadun ja taudinaiheuttajien logaritmisten poistumien kautta vesilaitoksen eri yksikköprosessien sekä desinfioinnin vaikutuksesta (VVY, 2019).

Kalvotekniikoiden suuntaa antava poistotehokkuus eri taudinaiheuttajien osalta on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 4). Kalvotekniikoiden mikrobiologinen erotuskyky vaihtelee kalvotekniikan ja kalvon ominaisuuksien mukaan. Nanosuodatus ja käänteisosmoosi voivat saavuttaa korkean erotustehon myös viruksille, kun taas ultrasuodatus on tehokas bakteerien ja alkueläinten poistossa.

Taulukko 4. Kalvotekniikoiden suuntaa antava laadullinen tehokkuus mikrobien poistamisessa. (Lähde: VVY, 2019)

Kalvotekniikka	**Bakteerit**	**Virukset**	**Alkueläimet**
RO ja NF	erittäin hyvä	erittäin hyvä	erittäin hyvä
UF	hyvä	kohtalaisen hyvä	erittäin hyvä
Kemiallinen saostus + UF	erittäin hyvä	hyvä	erittäin hyvä

Erilaisille vedenkäsittelymenetelmille voidaan arvioida logaritmisia poistumia taudinaiheuttajien poistossa. (Taulukko 5). Esimerkiksi 2 log poistuma tarkoittaa mikrobien määrän vähenemistä sadasosaan alkuperäisestä (99 % poistuma) ja 3 log poistuma tuhannesosaan (99,9 % poistuma).

Taulukko 5. Taudinaiheuttajien logaritminen poistuma eri vedenkäsittelymenetelmillä (Lähde: VVY, 2019)

Vedenkäsittelymenetelmä	**Logaritmisen poistuman enimmäismäärä**
Ultrasuodatus, kalvosuodatus (UF), kalvon huokosten nimellishalkaisija on < 40 nm	2,5b + 2,0v + 2,5a
Nanosuodatus/käänteisosmoosi, kalvosuodatus (NF/RO), kalvon huokosten nimellishalkaisija on < 5 nm	3,0b + 3,0v + 3,0a
Saostus/UF-kalvosuodatus*	3,0b + 3,0v + 3,0a

*Kun koagulantin annostus on suuri ja toiminnan valvonnalla varmistetaan veden sameuden olevan <0,1 NTU (online seuranta)
a = alkueläimet
b = bakteerit
v = virukset

3.8 KALVOSUODATUKSEN OPEROINTI JA KUNNOSSAPITO

Kalvosuodatus poikkeaa tavanomaisten vedenkäsittelyprosessien operoinnista ja kunnossapidosta mm. kemiallisten pesujen ja kalvojen vaihtotarpeen osalta. Seuraavaan taulukkoon (Taulukko 6) on koottu esimerkkejä kalvosuodatuksen operointi- ja kunnossapitotarpeista. On mahdollista, että osa operointivastuusta etenkin käyttöönottovaiheessa on kokonaan prosessitoimittajalla, tai prosessitoimittajalla on mahdollisuus kalvoprosessin etäohjaukseen.

Hankkeen laitoskyselyyn vastanneiden, kalvosuodatusta käyttävien laitosedustajien vastauksissa nousi esille prosessin käyttöönottovaiheen haasteet, kuten esikäsittelyn optimointi ja pesukäytäntöjen toteutus. Vastaavasti pienemmillä pohjavesilaitoksilla käytössä olleista käänteisosmoosilaitteistoista kohdistui erittäin vähän operointi- tai kunnossapitovastuita vesilaitokselle: hyvälaatuisen pohjaveden viimeistely käänteisosmoosilaitteistolla oli toimiva ratkaisu ja automaatio vastasi mm. pesujen toteutuksesta. Nämä laitokset olivat myös etäkäytettävissä ja prosessin toiminnan seuranta ei edellyttänyt paikalla oloa.

Taulukko 6. Esimerkki kalvoprosessin operoinnin ja kunnossapidon vastuiden jaosta.

Toimenpide	**Prosessitoimittaja vastaa**	**Vesilaitos vastaa**
Kalvoprosessin esikäsittely perinteisellä vesilaitostekniikalla (kemiallinen saostus ja kiintoaineen erotus)		X
Kalvoprosessin esikäsittely patruuna- tai pussisuodattimilla	X, käyttöönottovaiheessa	X
Pesukemikaalien hankinta		X
Kemiallisten pesujen pesuliuosten valmistus		X
Kemiallisten pesujen toteutus	X, käyttöönottovaiheessa	X, automaation ohjaamana
Patruunasuodattimien vaihto		X
Prosessin toiminnan, saannon ja tuotetun veden laadun seuranta	X, käyttöönottovaiheessa	X, myös online-mittausten ja automaation ohjaamana
Rejektien käsittely ja johtaminen		X
Kalvojen vaihto	X	
Kalvosuodatustoimitukseen kuuluvan muun koneiston (pumput, venttiilit, mittaukset) kunnossapito	(X, kunnossapitosopimuksen mukaisesti)	X
Jälkikäsittelyn (remineralisaatio kalkkikivisuodatuksella) operointi ja kunnossapito		X

Kunnossapito ja operointi on mahdollista ulkoistaa myös prosessitoimittajalle tai ulkoiselle palveluntarjoajalle, jolloin esimerkiksi prosessin operoinnissa ja säädössä voidaan hyödyntää etäyhteyksien mahdollisuutta, tietoturvanäkökohdat ja turvallisuus huomioon ottaen.

4 KALVOSUODATUSPROSESSIN TOTEUTUS

Työssä laadittiin kalvolaitetoimittajille suunnattu budjettikysely talousveden käsittelemiseksi. Kyselyn tavoitteena oli koota esimerkkejä kalvosuodatusratkaisuista sekä hintatietoja kalvosuodatuslaitteiden kustannustasosta pohjaveden, pintaveden ja meriveden käsittelyyn. Luvussa tarkastellaan sekä laitosmaiset että väliaikaisiksi tarkoitetut konttiratkaisut.

Soveltuvia kalvosuodatusratkaisuja tarkasteltiin prosessitoimittajien budjettitarjousten pohjalta ja esimerkkeinä käytettiin tyypillisiä suomalaisia pinta- ja pohjavesiä sekä murtovesialueen merivettä. Laitoskokonaisuuden tavoitteena oli tuottaa talousvesiasetuksen mukaista vettä. Prosessitoimittajat esittivät ehdotuksensa toimituksen sisällöksi (ehdotetut hankintasisällön rajapinnat on esitetty liitteessä 8) ja seuraaviin kappaleisiin on koottu esimerkkiratkaisut toteutuksesta.

Ehdotettavan toimituksen toivottiin sisältävän:

- mahdollinen kalvojen vaatima esikäsittely
- kalvosuodatuslaitteisto, sisältäen mm. kalvojen paineastiat ja pumppaukset
- suodatuskalvot
- kalvojen pesulaitteisto (kemikaalisäiliöt ja -pumput)
- prosessin toimivuuden kannalta tärkeimmät mittaukset ja ohjausyksiköt. Laitteiston pitää voida toimia oman automaationsa varassa.

4.1 LAITOSMAISET RATKAISUT

Kalvosuodatusprosessit perustuvat prosessitoimittajien mitoittamiin ja toimittamiin prosessikokonaisuuksiin. Laitosmaisissa ratkaisuissa kalvoprosessi sijoitetaan usein halliin tai huonetilaan siten, että kalvoyksiköt ovat erillisissä betoni-, muovi- tai terässäiliöissä. Oheislaitteet (pumput, prosessiputkistot ja pesulaitteisto kemikaaleineen) sijoitetaan yleensä kalvoyksikön välittömään läheisyyteen yhdessä permeaattisäiliön kanssa. Kalvosuodatus koostuu usein kalvomoduuleista, ja prosessivaihetta on tilojen sallimissa rajoissa mahdollista laajentaa myöhemmin, mikäli putkistojärjestelyt on toteutettu laajennusvaraus huomioon ottaen.

Esimerkkejä kalvosuodatuksen laitosratkaisuista on esitetty seuraavissa kappaleissa. Prosessitoimittajat toivat esille raakaveden laatutiedon vaihtelun: on tärkeää, että käsiteltäväksi aiotusta raakavedestä on riittävästi edustavaa, vuodenaikaisvaihtelua sisältävää dataa kalvoprosessin esikäsittelytarpeen arvioimiseksi ja mitoituksen lähtötiedoiksi. Esim. bariumsulfaatin saostuminen voi tulla ongelmaksi meriveden käsittelyssä.

4.1.1 Pohjaveden käsittely

Kyselyssä pyydettiin kalvotoimittajien ehdotusta taulukon (Taulukko 7) mukaiselle pohjavedelle talousvesiasetuksen mukaisen vedenlaadun tuottamiseksi, käsittelykapasiteettina 100 m³/h. Kalvosuodatuksessa tavoiteltaisiin erityisesti haitta-aineiden poistoa, mm. torjunta-aineiden, MTBE:n, kloridin, fluoridin, mangaanin, kloorifenolien poistamista. Prosessilla varmistetaan myös talousveden hygieeninen laatu.

Taulukko 7. Case-esimerkin pohjaveden laatu, talousveden laatuvaatimuksen tai -tavoitteen ylittävien parametrien pitoisuudet on esitetty lihavoituna.

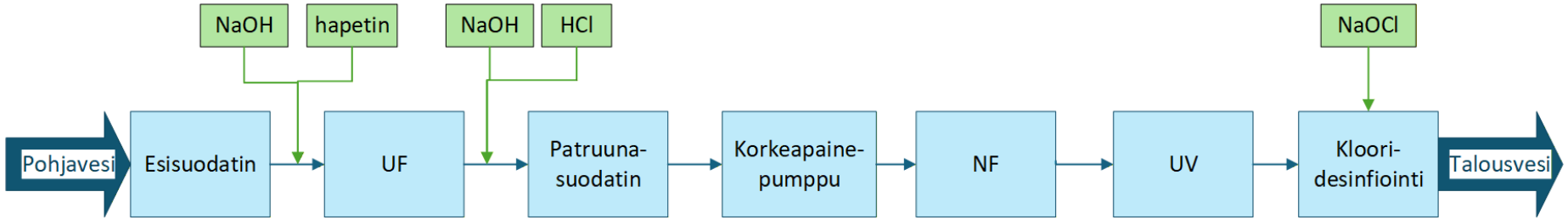
Parametri	**Yksikkö**	**Pitoisuus**
pH		6,6
Sameus	NTU	**68**
Alkaliteetti	mmol/l	0,25
Lämpötila	°C	7
Koliformiset bakteerit 37°C	pmy/100 ml	0
Kok.pesäkeluku 22 °C	pmy/ml	**710***
TOC	mg/l	0,6
Sähkönjohtavuus 25°C	mS/m	7
$KMnO_4$-luku	mg/l	0,7
Liukoinen rauta	µg/l	**350**
Kokonaisrauta	µg/l	**7 400**
Liukoinen mangaani	µg/l	15
Kokonaismangaani	µg/l	**67**
Kovuus	°dH	0,3
Väri	mgPt/l	<2
Kloridi	mg/l	3,1
Sulfaatti	mg/l	13
Korroosioindeksi		0,0
NH_4-N	µg/l	<8
NO_2-N	µg/l	<10
NO_3-N	mg/l	0,9
Happi	mg/l	11,1
Kalsium	mg/l	7

* Ei raja-arvoa, mutta arvo poikkeuksellisen korkea

Prosessitoimittajien ehdotukset poikkesivat toisistaan merkittävästi perustuen mm. yksistään ultrasuodatukseen tai ultrasuodatuksen ja nanosuodatuksen tai käänteisosmoosin yhdistelmään. Eroavaisuuksista johtuen myös saanto (72–92 %), budjettihinta ja arvio energiankulutuksesta poikkesivat merkittävästi.

.

Seuraavassa lohkokaaviossa (Kuva 8) on esitetty ehdotus pohjavesilaitoksen prosessikokonaisuudesta, jossa talousveden laatu saavutettaisiin ultra- ja nanosuodatustekniikkaan perustuen. Veteen syötettäisiin lipeää alkalointiin veden syövyttävyyden vähentämiseksi ja hapetinta raudan ja mangaanin hapettamiseksi ei-liukoiseen muotoon.



Kuva 8. Esimerkkilohkokaavio pohjaveden käsittelemiseksi kalvosuodatusprosessilla.

Ultrasuodatuskalvoilla (UF) poistettaisiin mm. saostunutta rautaa ja mangaania sekä mikrobeja. Tapauskohtaisesti ennen nanosuodatusta (NF) olisi patruuna- tai pussisuodatin, joka toimisi karkeasuodattimena nanosuodatuskalvojen suojaamiseksi. Nanosuodatuskalvoilla poistettaisiin liuenneita aineita kuten torjunta-aineita, MTBE:a, kloridia, fluoridia ja kloorifenoleja. Lisäksi nanosuodatus poistaa mikrobeja. Nanosuodatuskalvojen tilalle oli esitetty myös käänteisosmoosisuodatusta (RO), joka poistaa tehokkaammin yksiarvoisia ioneja kuten kloridia ja fluoridia kuin nanosuodatus. Mikäli prosessissa käytettäisiin käänteisosmoosia, vaadittaisiin sen jälkeen lisäksi remineralisointi.

Nanosuodatuksen jälkeen vesi desinfioitaisiin UV-valolla ja lisäksi pohjavesilaitoksella tulisi olla klooridesinfiointivalmius.

4.1.2 Pintaveden esikäsittely

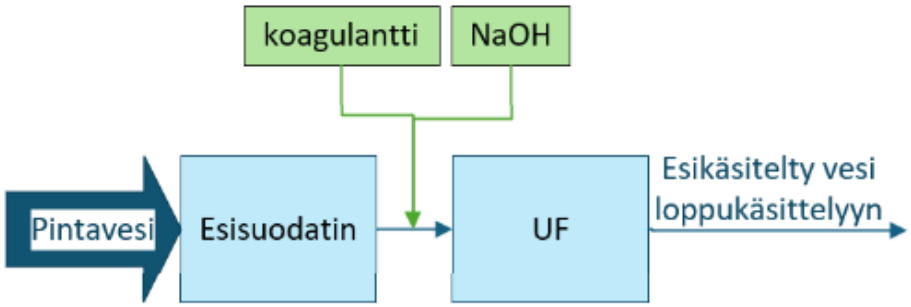
Kyselyssä pyydettiin kalvotoimittajien ehdotusta taulukon (Taulukko 8) mukaiselle pintavedelle hiekkasuodattimien korvaajaksi (tai vastaavan kemikaloidun orgaanisen ja kiintoaineen poistoon mitoitetun prosessin korvaajaksi), käsittelykapasiteettina 1 000 m³/h. Kalvosuodatuksessa tavoiteltaisiin erityisesti sameutta alle 0,1 NTU ja TOC-pitoisuutta alle 3 mg/l.

Taulukko 8. Case-esimerkin pintaveden laatu, talousveden laatuvaatimuksen tai -tavoitteen ylittävien parametrien pitoisuudet on esitetty lihavoituna

Muuttuja	**min**	**ka**	**max**
pH (pH-luku)	6,6	7,0	7,7
Sähkönjohtavuus (mS/m)	6,2	7,6	71
Sameus (FTU)	0,75	**1,6**	**5,2**
Lämpötila (°C)	0,60	8,4	**22**
Väri (Väriluku)	35	47	70
Happi (O_2 mg/l)	5,5	8,7	12
Ammoniumtyppi (NH_4-N mg/l)	0,022	0,024	0,025
NPOC (mg/l)	6,8	8,7	12
Kloridi (mg/l)	4,9	9,5	73
Alkaliteetti (mmol/l)	0,32	0,40	0,53
Kokonaiskovuus (*dH)	1,0	1,2	2,9
Kokonaiskovuus (mmol/l)	0,18	0,21	0,52
Magnesium (Mg mg/l)	1,3	1,5	1,8
Rauta (Fe mg/l)	0,12	**0,30**	**0,68**
Mangaani (Mn mg/l)	0,020	**0,120**	**0,39**
Alumiini (Al mg/l)	0,022	0,13	0,3
Kalsium (Ca mg/l)	4,9	5,8	18

Budjettitarjoukset jättäneiden prosessitoimittajien ratkaisut perustuivat raakaveden kemikalointiin ja ultrasuodatukseen (Kuva 9). Veteen syötettäisiin lipeää alkalointiin ja koagulanttia mm. orgaanisen aineksen saostamiseen.

UF-kalvoilla poistettaisiin mm. saostunutta orgaanista ainesta ja mikrobeja. Ultrasuodatuksen jälkeen esikäsitelty vesi johdettaisiin loppukäsittelyyn joko perinteiseen pintaveden loppukäsittelyyn tai kalvosuodatusloppukäsittelyyn. Pintaveden käsittelystä perinteisillä tekniikoilla on kerrottu kappaleessa 2.1. Kalvosuodatuksesta viimeistelyvaiheena pintaveden käsittelyssä on kerrottu seuraavassa kappaleessa (4.1.3).



Kuva 9. Esimerkkilohkokaavio pintaveden esikäsittelystä kalvotekniikalla.

4.1.3 Pintaveden käsittely

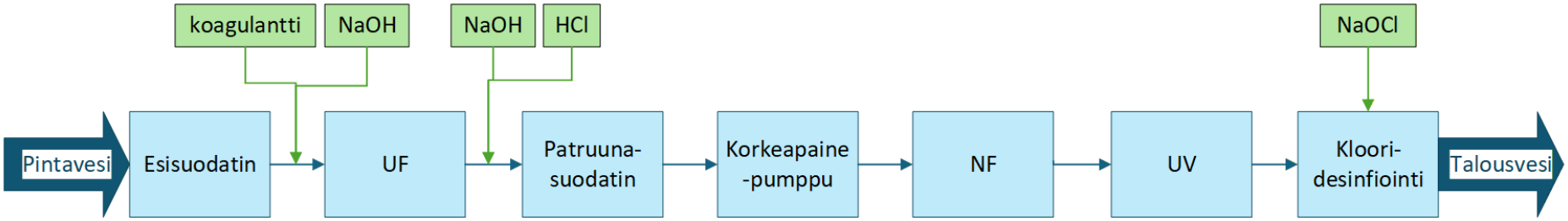
Kyselyssä pyydettiin kalvotoimittajien ehdotusta taulukon (Taulukko 9) mukaiselle, jo esikäsitellylle pintavedelle viimeistelyvaiheeksi haitta-aineiden erotukseen, käsittelykapasiteettina 1 000 m³/h. Kalvoerotuksella tavoiteltaisiin erityisesti seuraavien aineiden poistoa: PFAS, metallit sekä uudet talousvesiasetuksessa mainitut laatumuuttujat. Kalvoerotuksella varmistetaan myös talousveden hygieeninen laatu.

Taulukko 9. Viimeistelyvaiheena käytettävän kalvoerotusprosessin syöttöveden laatu, talousveden laatuvaatimuksen tai -tavoitteen ylittävien parametrien pitoisuudet on esitetty lihavoituna.

Muuttuja	**keskiarvo**
pH (pH-luku)	6,5–7
Sähkönjohtavuus (mS/m)	8
Sameus (FTU)	0,3
Lämpötila (°C)	8,4
Ammoniumtyppi (NH_4-N mg/l)	0,024
NPOC (mg/l)	2,6
Kloridi (mg/l)	9,5
Alkaliteetti (mmol/l)	0,40
Kokonaiskovuus (*dH)	1,0
Kokonaiskovuus (mmol/l)	0,17
Magnesium (Mg mg/l)	1,35
Rauta (Fe mg/l)	<0,1
Mangaani (Mn mg/l)	**0,10**
Alumiini (Al mg/l)	0,13
Kalsium (Ca mg/l)	5,8

Prosessitoimittajien ehdotukset poikkesivat toisistaan merkittävästi perustuen mm. yksistään ultrasuodatukseen tai ultrasuodatuksen ja nanosuodatuksen tai käänteisosmoosin yhdistelmään. Eroavaisuuksista johtuen myös saanto (70–90 %), budjettihinta ja arvio energiankulutuksesta poikkesivat merkittävästi.

Seuraavassa lohkokaaviossa (Kuva 10) on esitetty ehdotus pintavesilaitoksen prosessikokonaisuudesta, jossa talousveden laatu saavutettaisiin ultra- ja nanosuodatustekniikkaan perustuen.



Kuva 10. Esimerkkilohkokaavio pintaveden käsittelemiseksi kalvosuodatusprosessilla

Veteen syötettäisiin lipeää alkalointiin ja koagulanttia mm. orgaanisen aineksen saostamiseen. Rautapohjaiset koagulantit voivat poistaa humusta tehokkaammin kuin alumiinikoagulantit, mutta kalvojen kannalta alumiinipohjaiset koagulantit ovat rautapohjaisia koagulantteja vähemmän likaavia.

Ultrasuodatuskalvoilla (UF) poistettaisiin mm. saostunutta orgaanista ainesta ja mikrobeja. Ultrasuodatuksen jälkeen veden pH säädettäisiin sopivaksi. Ennen nanosuodatusta olisi patruunasuodatin, joka toimisi karkeasuodattimena kalvojen suojaamiseksi.

Nanosuodatuksessa (NF) poistettaisiin liuenneita aineita kuten esimerkiksi PFAS-yhdisteitä, metalleja ja kappaleessa 2.3.2 esitettyjä talousvesiasetuksen uusia laatumuuttujia. Lisäksi nanosuodatuksella poistettaisiin mikrobeja. Prosessitoimittajien ehdotuksissa nanosuodatuskalvojen tilalle oli esitetty myös käänteisosmoosia (RO), mutta mikäli prosessissa käytettäisiin käänteisosmoosia, vaadittaisiin sen jälkeen lisäksi remineralisointi.

Nanosuodatuksen jälkeen vesi desinfioitaisiin UV-valolla ja lisäksi kloridesinfioinnilla.

4.1.4 Meriveden käsittely

Prosessitoimittajille suunnatussa kyselyssä pyydettiin kalvotoimittajien ehdotusta taulukon (Taulukko 10) mukaiselle merivedelle, sisältäen käsittelyprosessin kokonaisuudessaan.

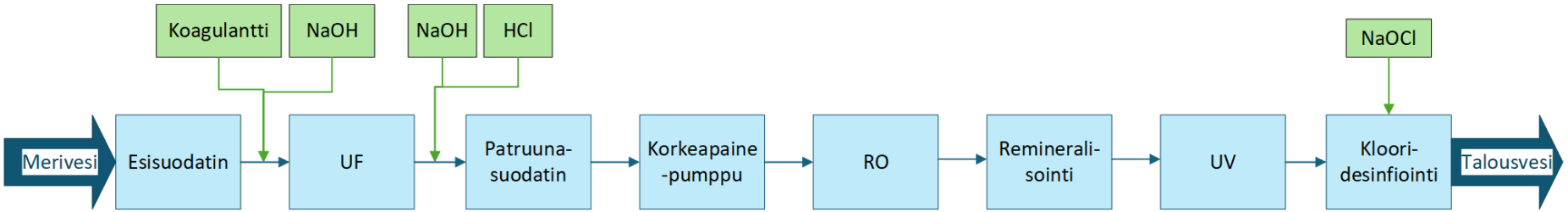
Taulukko 10. Case-esimerkin meriveden laatu, talousveden laatuvaatimuksen tai -tavoitteen ylittävien parametrien pitoisuudet on esitetty lihavoituna.

Parametri	**Yksikkö**			
		min	**max**	**ka**
Lämpötila	°C	0,2	**23,4**	14,1
Happi	mg/l	8,0	10,7	9,7
Happikyllästys	%	64	99	86,5
pH		6,9	8,5	7,8
Saliniteetti	‰	2,7	4,3	4,0
Sameus	FNU	0,73	**15**	**4,5**
Sähkönjohtavuus	mS/m	**497**	**815**	**723**
Väri, liukoinen (0,45µm)	mg/l Pt	7,6	26	13,1
Typpi, kokonais	µg/l	360	9900	1925,6
Nitriitti- ja nitraattitypen summa	µg/l (NO_2+NO_3)-N	9,5	9200	2695,1
Ammoniumtyppi	µg/l NH_4-N	3	200	102,1
Fosfori, kokonaispitoisuus	µg/l	13	60	25,1
Fosfaatti-fosfori	µg/l PO_4-P	2	48	25,5
Escherichia coli	MPN/100 ml	0	**250**	**54,8**
Suolistoperäiset enterokokit	pmy/100 ml	0	**20**	**7,6**
Sulfaatti	mg/l	12,6	54	20,2
Alkaliniteetti	mekv/l	-0,018	0,488	0,110
Mangaani	µg/l	21,6	**238**	**69**
Rauta	µg/l	190	**1 919**	**948**

Seuraavassa lohkokaaviossa (Kuva 11) on esitetty ehdotus merivesilaitoksen prosessikokonaisuudesta, jossa laitoksen vedenkäsittely perustuisi kalvosuodatukseen.

Veteen syötettäisiin lipeää alkalointiin ja koagulanttia mm. orgaanisen aineksen saostamiseen. UF-kalvoilla poistetaan mm. saostunutta orgaanista ainesta. Ultrasuodatuksen jälkeen veden pH säädettäisiin sopivaksi. Ennen käänteisosmoosisuodatusta olisi patruunasuodatin, joka toimisi karkeasuodattimena kalvojen suojaamiseksi. Käänteisosmoosisuodatuksella poistettaisiin merivedestä liuenneita aineita kuten suoloja. Käänteisosmoosisuodatuksen jälkeen vesi remineralisoitaisiin, jotta talousveden laatuvaatimukset saavutettaisiin. Viimeisenä vaiheena vesi desinfioitaisiin UV-valolla ja lisäksi kloridesinfioinnilla.

Prosessitoimittajien ehdotukset poikkesivat toisistaan merkittävästi perustuen mm. yksistään ultrasuodatukseen tai ultrasuodatuksen ja käänteisosmoosin yhdistelmään. Käänteisosmoosiin perustuvissa kokonaisuuksissa saanto oli 65–70 %. Tarjousten budjettihinta ja arvio energiankulutuksesta poikkesivat merkittävästi toisistaan. On epätodennäköistä, että yksistään ultrasuodatukseen perustuvalla kalvosuodatuksella voitaisiin saavuttaa mm. suolaisuuden osalta talousvesiasetuksen mukaisesti laatuvaatimukset.



Kuva 11. Esimerkkilohkokaavio meriveden käsittelemiseksi kalvosuodatusprosessilla

4.2 VÄLIAIKAISET KONTTIRATKAISUT

Kalvosuodatuslaitteistoja voidaan sijoittaa myös pieneen tilaan kuten merikonttiin. Konttiin rakennettu suodatuslaitteisto on yleensä liikuteltavissa, mutta pienen tilan vuoksi sen suodatuskapasiteetti on rajallinen. Konttiratkaisussa on huomioitava kohteeseen soveltuva vedenottoratkaisu. Lisäksi tulee huomioida muodostuvien rejektien purkupiste sekä pesuvesien hallinta (ks. kappale 4.3). Konttiratkaisuissa tulee huomioida talviolosuhteet, joissa kontin ulkopuoliset vesienhallintarakenteet voivat jäätyä. Myös kontin tulee olla lämmitetty ja eristetty, jos laitetta käytetään talviaikaan.

Konttiin sijoitettu suodatuslaitteisto vaatii samoja käyttöhyödykkeitä kuin laitokseen sijoitettu prosessi (ks. kappale 3.4). Suodatuskontin käytössä tulee huomioida myös riittävä lämmöneristys pohjoisissa olosuhteissa.

Esimerkiksi Huoltovarmuuskeskuksen ALUE 2030 -ohjelma on rahoittanut liikuteltavan merivesikonttiin rakennetun kalvosuodatuslaitteiston pilotointia juomaveden valmistamiseksi merivedestä. Pilotoinnin tavoitteena on parantaa huoltovarmuutta rannikkoalueella (Vaasan kaupunki, 2026).

4.3 REJEKTIEN JOHTAMINEN

Kalvosuodatuksessa erotetut aineet päätyvät retentaattiin ja pitoisuudet ovat suuremmat syötteeseen verrattuna. Pitoisuudet riippuvat konsentrointiasteesta. Kalvosuodatuksessa muodostuu rejektejä kalvosuodatuksen retentaattina ja kalvojen kemiallisten pesujen pesuvetenä. Kalvosuodatuksen retentaatin määrä on tyypillisesti ultrasuodatuksessa noin 1–5 %, nanosuodatuksessa noin 20–30 % ja käänteisosmoosisuodatuksessa noin 20–40 %. Retentaatin määrä riippuu kuitenkin mm. syöteveden laadusta ja kalvojärjestelmän mitoituksesta. Monivaiheisissa järjestelmissä, joissa retentaattia konsentroidaan edelleen seuraavissa kalvoerotusvaiheissa, voidaan saavuttaa suurempi talteenottoaste ja vastaavasti pienempi lopullinen retentaattimäärä.

Pitkälle konsentroituja retentaatteja voi olla vaikea kierrättää takaisin talousvedenvalmistusprosessiin, jolloin ne johdetaan joko jätevedenpuhdistamolle tai, mikäli ympäristölupa sallii, vesistöön. Mikäli retentaatti viemäröidään, voi olla kustannustehokasta konsentroida sitä pitkälle. Näin toimittaessa säästetään mm. pumppauskustannuksissa ja jätevesimaksuissa. Osa laimeammista konsentraateista on mahdollista kierrättää takaisin prosessiin, mutta tällöin on huomioitava mahdollinen esikäsittelytarve ja kierrätyksen vaikutus käsitellyn veden laatuun.

Pesuvesiä voidaan käsitellä ja mahdollisesti kierrättää, jolloin puhtaat ylitteet voidaan johtaa takaisin prosessiin tai puhtaana vetenä eteenpäin.

Lisäksi esikäsittelyssä voi muodostua rejektejä riippuen esikäsittelyprosessista. Tyypillisesti esikäsittelyn rejektimäärä on alle 8 % syötteen määrästä. Esikäsittelyn rejektin laatuun vaikuttavat esikäsittelyssä käytetyt kemikaalit, kuten koagulantti ja pH:n säätökemikaalit happo/emäs.

Rejektien käsittelymenetelmiä ovat mm. ultrasuodatus tai flotaatio. Syntynyt sakka voidaan jatkokäsitellä mekaanisesti esimerkiksi linkokuivauksella, jolloin sen kuiva-ainepitoisuus kasvaa. Rejektien käsittelyssä syntyvät ylitteet voidaan mahdollisesti palauttaa tuotantoprosessiin tai purkaa maastoon. Pääsääntöisesti kemiallisista pesuista syntyvät

pesuvedet viemäröidään. Viemäröitäessä tulee varmistaa, että pH on viemäröitäville vesille sopivalla alueella pH 6–9. Tämä saattaa edellyttää pesuvesien erillistä neutralointia.

Rejektien hallintakeinot tulee huomioida suunnittelussa ja ne on valittava tapauskohtaisesti. Maastoon purkamisen mahdollisuus vaatii keskustelua lupaviranomaisen kanssa ja viemäröinti keskustelua paikallisen viemärilaitoksen kanssa.

4.4 RAJOITTEET KÄYTETTÄVILLE KEMIKAALEILLE

Kalkkipohjaisten pH-säätökemikaalien yhdistäminen rautapohjaisiin saostuskemikaaleihin ennen ultrasuodatusta voi aiheuttaa riskin saostumien muodostumisesta kalvojen pinnalle ja tavanomaista voimakkaampien tai useammin toistettavien kemikaalipesujen tarpeelle. Saostuskemikaaleja käytettäessä on myös syytä varmistaa riittävän pitkä flokinmuodostusaika ennen kalvosuodatusta, jotta kaikki kemikaalin on reagoinut ennen kalvoja.

Kloorin käyttö voi johtaa kalvon nopeampaan kulumiseen (esim. 7 v. vs 12 v.) (Svenskt Vatten, 2024). Tästä tarkempaa tietoa antavat kalvoprosessien toimittajat. Mm. keraamiset kalvot kestävät kemikaalien aiheuttamaa rasitusta paremmin kuin polymeeripohjaiset kalvot.

Hapettimet voivat vaurioittaa kalvoja. (EPA 2005). Muovikalvot kestävät heikosti hapettimia, mutta keraamiset kalvot kestävät hapettimia sen sijaan hyvin. Muovikalvot eivät kestä otsonia, mutta niiden vetyperoksidin kesto on parempi. Jos käytetään hapettimia, tulee olla hapettumisessa muodostuneen sakan (esim. rauta- tai mangaanisakka) poistomenetelmä ennen NF- tai RO-kalvoa.

Tässä hankkeessa kontaktoidut kalvoprosessitoimittajat eivät tuoneet esille ehdottomia rajoituksia eri kemikaalien käytölle.

4.5 INSTRUMENTOINTI JA AUTOMAATIO

Kalvosuodatusprosessin ja prosessiyksiköiden instrumentointi sisältyy yleensä prosessitoimitukseen ja tarvittavat instrumentit mahdollistavat prosessin ohjauksen ja seurannan tarkoituksenmukaisella tavalla.

Kalvosuodatuksen automaatio perustuu myös prosessitoimittajan automaatiotoimitukseen omalla ohjauskeskuksella, joka voidaan liittää rajapinnan kautta vesilaitoksen omaan automaatioon. Rajapintojen suunnittelussa tulee määrittää mm. soveltuva liityntärajapinta: usein IO-liityntä tai prosessiautomaatioväylä.

Kalvosuodatusyksikön pääkomponenttien on hyvä olla ohjattavissa myös laitoksen automaatiosta, ei pelkästään paikallisesti. Ohjausmahdollisuuksien kohdalla on syytä miettiä myös etäohjausmahdollisuutta rajapinnan kautta sekä mahdollisesti prosessitoimittajan tilapäistä mahdollisuutta etäohjaukseen ongelmatilanteissa, ottaen huomioon etäohjaukseen liittyvät turvallisuusnäkökohdat.

5 KALVOSUODATUSTEKNIIKAN VALINTAPERUSTEET

5.1 HANKINTAPERUSTEET

Euroopassa on jo jouduttu ottamaan kalvotekniikoita käyttöön raakaveden laadun heikkenemisen takia. Suomessa on vielä toistaiseksi riittänyt melko hyvälaatuisia raakavesilähteitä, mutta ilmastonmuutoksen arvioidaan vaikuttavan heikentävästi raakaveden laatuun ja siten varautumiselle tehokkaampien käsittelymenetelmien käyttöönottoon voi olla syytä. Lisäksi, jos halutaan hajauttaa raakavedenottoa huoltovarmuuden takia, osa vesilähteistä voi olla heikkolaatuisempia ja tarvitaan tehokkaampia käsittelymenetelmiä. Jos muuta sopivaa raakavesilähdettä ei ole, juomaveden tuotanto merivedestä voi olla vaihtoehto, ja juomaveden tuotantoon merivedestä tarvitaan kalvotekniikkaa.

Mikäli tavanomaisella prosessilla ei päästä riittävään veden laatuun, usein joudutaan valitsemaan kalvoerotusmenetelmä, esim. kloridin ja fluoridin poisto. Suomalaisille kalvoprosesseja käyttäville vesilaitoksille suunnatun kyselyn perusteella hankintaperusteina on nostettu esille mm. seuraavia seikkoja:

- fluoridin poiston tarve pohjavedestä talousvesiasetuksen mukaisen raja-arvon toteuttamiseksi
- kloridin poisto raakavedestä
- fosforin poisto pohjavedestä
- ultrasuodatuksen teknistaloudellinen paremmuus flotaatioon ja hiekkasuodatukseen verrattuna, sekä tavoiteltavien vedenlaatuparametrien toteutuminen
- orgaanisen aineen poisto kustannustehokkaasti

Kalvoprosessi mahtuu pienempään tilaan kuin tavanomainen prosessi. Jos tehdään paljon uutta betonirakenteita vaativaa laitosrakentamista, voi olla edullisempaa tehdä pienempi laitos ja käyttää kalvotekniikkaa. Lisäksi kalvosuodatuksen saneeraus on myöhemmissä vaiheissa helpompaa tehdä pienissä paloissa kuin tavanomaisen prosessin saneeraus. Tätä kautta kalvotekniikan saneeraus voi olla edullisempaa ja helpompaa.

Liitteessä 8 on esitetty esimerkinomaisesti kalvosuodatuksen hankinnan vertailukriteereiksi soveltuvia perusteita sekä tämä hankkeen budjettikyselyssä käytetty taulukko kalvosuodatushankinnan toimitusajoista. Vesilaitosyhdistys on julkaissut Vesihuoltolaitosten hankintojen vastuullisuustavoitteet (VVY, 2025b), jossa on luku myös julkisen alan hankintakriteereistä.

5.2 KAPASITEETTI

Kalvosuodatusprosessin kapasiteetti on vahvasti sidoksissa energiankulutukseen: tiukka mitoitus edellyttää suurempaa energian käyttöä ja todennäköisesti myös tiheämpiä pesuja. Ultrasuodatukseen perustuvassa kalvosuodatuksessa syntyy rejektivesiä, joiden määrä vastaa perinteisiä vedenkäsittelyprosessien rejektivesimääriä, noin 5 % käsitellystä vedestä. Nanosuodatuksessa ja käänteisosmoosiin perustuvassa prosessissa rejektien kokonaismäärä esikäsittelyvaiheet mukaan lukien voi nousta jopa 50 % tasolle kokonaisvesimäärästä. Monivaiheisella suodatusprosessilla voidaan kuitenkin pienentää merkittävästi muodostuvan rejektin määrää. Korkeaa saantoa tavoitellessa haasteeksi voi tulla liuenneiden aineiden saostuminen kalvon pinnalle, jos pitoisuudet ylittävät liukoisuusrajan.

Suuri raakavedentarve tuotetun veden määrään nähden tulee ottaa huomioon sekä vedenottolupien riittävyydessä että laitoksen mitoituksessa, mukaan lukien syntyvien rejektien paikalliskäsittely ja johtaminen.

Kalvosuodatuslaitoksen hankinnan kohdalla on tavanomaisten prosessiratkaisujen tapaan tärkeää arvioida tarvittavien rinnakkaisten prosessilinjojen/- yksiköiden lukumäärä, jotta halutta tuotantokapasiteetti saavutetaan myös silloin, kun yksi prosessilinjoista tai kalvosuodatusyksiköistä on pesussa tai huollossa. Hankinnassa kapasiteettivaatimus voidaan asettaa esimerkiksi n-1 kalvosuodatusyksikölle ja kapasiteetti voidaan sitoa takuuehtoina energiankulutukseen.

Tiukimpien kalvosuodatusprosessien (NF ja RO) kohdalla vedenkäsittelyn tavoitteen voi olla myös yksittäisten epäpuhtauksien poisto halutulle tasolle. Tällöin laitoskokonaisuuden suunnittelussa on suositeltavaa tarkastella tilannetta, joissa vain osa tuotettavasta vedestä käsitellään kalvosuodatuksella, ja tämä virtaama sekoitetaan sitten muun käsittelyprosessin läpi tulevaan virtaamaan. Esimerkiksi Laitilan pohjavesilaitoksella on käytössä tällainen menettely.

5.3 RAAKAVEDEN LAATU

Kalvosuodatusprosessin hankinnassa ja mitoituksessa on huomioitava raakaveden laadun sekä lämpötilan vaihtelu vuodenajan mukaan. Esimerkiksi raakaveden kiintoaine-, humus- ja ravinnepitoisuudet vaihtelevat eri vuodenaikoina. Veden laadun ja lämpötilan vaihtelu saattavat vaikuttaa myös mahdollisen esikäsittelyn kemikalointitarpeeseen, jolloin kalvosuodatuksen kapasiteetti tulee mitoittaa ns. huonoimman tilanteen mukaisesti.

Veden lämpötila vaikuttaa kalvolaitteiston mitoitukseen, sillä raakaveden kylmeneminen kasvattaa veden viskositeettia. Tällöin vaaditaan enemmän kalvopinta-alaa tai korkeampi paine tuottamaan sama vesimäärä.

Raakaveden laatu vaikuttaa saavutettavaan veden saantoon. Jos vedessä on runsaasti helposti kalvon pinnalle saostuvia aineita, joita on vaikea poistaa kalvon pinnalta kemiallisesti, alkavat ne konsentroitumisen edetessä liata kalvoja ja lyhentää kalvojen käyttöikää, mikä rajoittaa veden saantoa.

Tavanomaisten vedenlaatuvaatimusten ja tavoitteiden lisäksi kalvosuodatuksen hankinnassa tulee nostaa esille ne parametrit, joita kyseisellä prosessiyksiköllä erityisesti poistetaan ja joihin tavanomaiset käsittelyt eivät toimi.

5.4 ELINKAARI

Kalvosuodatuksen valinnassa on hyvä huomioida suodatuskalvojen rajallinen elinkaari. Kalvosuodatusprosessin elinkaari vastaa koneiston ja putkiston osalta vastaavia perinteisiä käsittelyprosesseja, mutta kalvosuodattimet itsessään ovat vaihdettavia osia, joiden käyttöikä riippuu muun muassa kalvomateriaalista, raakaveden laadusta, esikäsittelystä, kalvokuormituksesta ja pesukäytännöistä. Tässä selvityksessä kerätyissä toimittaja-arvioissa polymeerikalvojen käyttöikä oli tyypillisesti noin 3–10 vuotta.

Keraamisilla kalvoilla on tyypillisesti tätä pidempi elinkaari. Esimerkiksi joissain tapauksissa keraamisille ultrasuodatuskalvoille on luvattu jopa 15–20 vuoden käyttöikä. Keraamiset kalvot ovat investointikustannuksiltaan polymeerikalvoja kalliimmat, mutta pidempi elinkaari vähentää niiden elinkaarikustannuksia. Elinkaarivaatimus on hyvä sitoa hankintavaiheessa sekä tavoiteltavaan kapasiteettiin, veden laatuun, että energiankulutukseen.

5.5 ENERGIATEHOKKUUS

Kappaleessa 3.4.1 on kuvattu kalvosuodatuksen energiankulutusta ja erityisesti tiukempien nanosuodatus- ja käänteisosmoosiprosessien kohdalla energiankulutus voi nousta tavanomaisia vedenkäsittelytekniikoita merkittävästi korkeammaksi. Taulukon (Taulukko 11) esitetyissä energiankulutuksista nähdään, että ainoastaan ultrasuodatukseen perustuvissa kalvosuodatusratkaisuissa voidaan energiankulutus pitää alhaisena, kun taas tiukempien kalvojen ja tarvittavan paineen takia energiankulutus kasvaa perinteisiä prosessiyksikköjä korkeammiksi.

Taulukko 11. Kalvosuodatusprosessien energiankulutusarvio perustuen prosessitoimittajilta saatuihin budjettitarjouksiin. Eri prosessitoimittajien esittämien mitoitusten, saannon, esikäsittelyn ja kalvon laadun erojen takia taulukon energiankulutuksissa on epäjohdonmukaisuutta: esimerkkitapauksissa käänteisosmoosi ei suoraviivaisesti johtanut suurimpaan energiankulutukseen.

	Kalvoprosessi	**Energiankulutus kWh/m³**
	Pohjavesi	
Kapasiteetti (m^3/h)	100	
Kalvotoimitus	esisuodatus + UF	
	UF	0,04
	esisuod. UF+RO	0,34
	esisuod. + UF + NF	0,44
	NF	0,8–1,2
	Pintaveden esikäsittely	
Kapasiteetti (m^3/h)	1 000	
Kalvotoimitus	esisuodatus + UF	1,0
	UF	0,04
	Pintaveden jälkikäsittely	
Kapasiteetti (m^3/h)	1 000	
Kalvotoimitus	esisuodatus + UF	
	hiekkasuod. + UF + RO	0,34
	esisuod. + UF + NF	0,64
	UF + RO	1,05
	NF + RO	0,8–1,2
	Meriveden kalvosuodatus	
Kapasiteetti (m^3/h)	1 000	
Kalvotoimitus	UF	0,04
	hiekkasuod. + UF + RO	0,83
	UF + RO	1,0
	RO	0,8–1,2

Uuden vesilaitoksen investoinnin yhteydessä voidaan tarkastella myös hankkeen luokittelun EU-taksonomia-asetuksen mukaisuutta. Asetuksen avulla luokitellaan ympäristön kannalta kestäviä taloudellisia toimia ja investointeja. Asetuksen tavoitteena on ohjata rahoitusta vihreään siirtymään. Kalvosuodatuksen perinteisiä vedenkäsittelyprosesseja korkeampi energiankulutus voi tuoda painetta kompensoida koko laitoksen energiakulutusta esimerkiksi omalla energiantuotannolla.

Euroopan unionin komission delegoitu asetus (EU) 2021/2139 vahvistaa arviointikriteerit, joilla määritetään, millä edellytyksillä taloudellista toimintaa pidetään ilmastonmuutoksen hillintää tai ilmastonmuutokseen sopeutumista merkittävästi edistävänä. Lisäksi asetuksessa määritellään, aiheuttaako kyseinen taloudellinen toiminta merkittävää haittaa millekään muulle ympäristötavoitteelle. Asetuksen liitteen 1 kohdassa 5.1. asetetaan

seuraavat tavoitteet vedenotto-, vedenpuhdistus- ja vedenjakelujärjestelmien rakentamiselle, laajentamiselle ja käytölle:

”*vedenoton ja käsittelyn keskimääräinen nettoenergiankulutus on enintään 0,5 kWh tuotettua vesikuutiometriä kohti. Nettoenergiankulutuksessa voidaan ottaa huomioon energiankulutusta vähentävät toimenpiteet, kuten lähteen valvonta (epäpuhtauskuormien sisääntulo) ja tarvittaessa energian tuotanto (esim. hydraulinen ja aurinko- ja tuulienergia);”*

5.6 TILANTARVE

Kalvosuodatus on perinteisiä vedenkäsittelyn prosessiratkaisuja kompaktimpi prosessi, jossa prosessitoimittajan mitoittama ratkaisu saadaan pakattua huomattavan tiiviisti. Oheislaitteiden, kuten pumppujen ja pesuvesisäiliöiden lisäksi tilaa tarvitaan kalvoyksiköiden huolto- ja vaihtotoimenpiteille. Vähän prosessiallastilavuutta vievän ratkaisun ansiosta kalvosuodatusyksiköitä on voitu sijoittaa myös olemassa oleviin laitoksiin ilman merkittävää lisärakentamista.

Laitetoimittajat arvioivat tilantarpeita tarjouksissaan ja arviot on esitetty taulukossa (Taulukko 12). Arviossa on huomioitu esikäsittelyn tarvitsema pinta-ala, joka prosessikohtaisesti voi olla noin puolet tilantarpeesta.

Taulukko 12. Laitetoimittajien ilmoittamia alustavia tilantarpeita käsittelyprosesseille.

	Kapasiteetti (m^3/h)	Tilantarve (m^2)
Pohjavesi	100	200–400
Pintavesi	1000	800–1100
Merivesi	1000	800–900

6 KALVOSUODATUKSEN KUSTANNUKSET

Arviot kalvosuodatusprosessien investointikustannuksista perustuvat prosessitoimittajien hankkeelle antamiin budjettitarjouksiin. Investointikustannukset sisältävät vain prosessitoimitukseen kiinteästi kuuluvat ratkaisut, kuten kiinteästi prosessiin kuuluvat esikäsittelyvaiheet, prosessiputkisto venttiileineen, pumput, kalvot, kalvojen pesulaitteisto pesuvesisäiliöineen, kenttäinstrumentit, ohjausyksiköt, asennukset ja käyttöönotto.

Prosessitoimittajille esitettiin seuraavat kyselyt:

- kalvosuodatusprosessi pintavesilaitokselle (1 000 m^3/h), jossa kalvoerotusta pyydetään tarjoamaan
    - hiekkasuodattimien korvaajaksi (tai vastaavan kemikaloidun orgaanisen ja kiintoaineen poistoon mitoitetun prosessin) sekä
    - viimeistelyvaiheeksi haitta-aineiden erotukseen
- kalvosuodatusprosessi haitta-aineiden erotukseen pohjavedestä (100 m^3/h)
- meriveden käsittelyprosessille (1 000 m^3/h), joka sisältää vesienkäsittelyprosessin kokonaisuudessaan

6.1 INVESTOINTIKUSTANNUKSET

Hankkeen budjettikyselyssä saadut tiedot kalvosuodatusprosessien investointikustannuksista on esitetty seuraavassa taulukossa (Taulukko 13). Ratkaisut eivät sisältäneet laitoksen rakennuskustannuksia, ainoastaan prosessitoimituksen. Arvioita investointikustannuksista voidaan pitää suuntaa antavina, vaikka hintahaarukka joissain esimerkkiratkaisuissa on varsin laaja. Kompaktina prosessiratkaisuna kalvosuodatus voi tuoda merkittävää säästöä rakennuskustannuksissa.

Prosessitoimittajien ratkaisuissa oli myös eroavaisuuksia tarvittavan kalvosuodatuksen tiukkuudessa ja tarvittavien peräkkäisten kalvosuodatusten konseptissa. Mahdolliset kalvosuodatuksen esi- ja jälkikäsittelyt erosivat myös sen lisäksi, että ne myös puuttuivat osasta tarjouksia kokonaan, minkä takia taulukossa esitetty hintahaarukka oli varsin laaja.

Lopulliseen investointiin tulee vaikuttamaan merkittävästi raakaveden mahdollinen esikäsittely, sekä ratkaisun toteutus erillisessä rakennusurakassa tavanomaisella prosessilla tai kalvosuodatinprosessin toimittajan ratkaisuna. Investointipäätöksen tueksi on suositeltavaa teettää laitoskohtainen esisuunnitelma investointi- ja käyttökustannusten laatimiseksi.

Taulukko 13. Prosessitoimittajien budjettitarjouksiin perustuvat kalvosuodatusratkaisun investointikustannukset ja toimituksen sisältö erilaisille raakavesille. Investointikustannusten laaja hintahaarukka selittyy ratkaisujen eroavaisuuksilla sekä ehdotetun esikäsittelyn, kalvosuodatuksen että jälkikäsittelyn osalta.

	Pohjavesi	**Pintaveden esikäsittely**	**Pintaveden jälkikäsittely**	**Meriveden kalvosuodatus**
Kapasiteetti (m^3/h)	100	1 000	1 000	1 000
Kalvotoimitus	esisuodatus + UF	esisuodatus + UF	esisuodatus + UF*	
	UF	UF	hiekkasuod. + UF + RO	hiekkasuod. + UF + RO
	esisuod. + UF + NF		esisuod. + UF + NF	UF + RO
	NF		UF + RO	RO**
			NF + RO	
Investointikustannus milj. €	0,55–1,5	1,3–6	(0,85*) 4,9–8,9	4–15**

*) Pelkkä UF ei vastaa pintaveden jälkikäsittelyn tarpeeseen
**) Prosessitoimittajan tarjous 15 milj. € sisälsi myös määrittelemättömän esi- ja jälkikäsittelyn

6.2 KÄYTTÖKUSTANNUKSET

Kalvosuodatusprosessin käyttökustannuksien arviot on koottu prosessitoimittajilta saatujen arvioiden perusteella alla olevaan taulukkoon. Pohjaveden kalvosuodatuksen kohdalla vuotuinen, muita ratkaisuja pienempi, vedentuotanto kasvatti käyttökustannusta tuotettua vesikuutiota kohti.

Energiakustannusten merkittävyys on tuotu esille luvussa 5.5. Käyttökustannustaulukossa (Taulukko 14) käytettiin prosessitoimittajien esittämistä energiakustannuksista vaihteluvälin korkeampia arvioita. Kemikaalikustannusten osalta kalvosuodatusprosessit poikkeavan tavanomaisista vedenkäsittelyprosessien kemikaloinneista lähinnä kalvojen pesukemikaalien osalta. Kemikaalien kulutusmääriä oli saatu vain osalta prosessitoimittajia. Huollon ja varaosien vuosikustannuksina oli käytetty 2 % kalvoprosessin investointikustannuksien keskimääräisestä prosessitoimittajien budjettihinnasta. Henkilötyön tarve oli esitetty yhtenevästi kaikille vedenkäsittelyesimerkeille, ja tämä nosti erityisesti pohjaveden pienemmän kapasiteetin laitoksen kokonaiskäyttökustannuksia.

Taulukko 14. Prosessitoimittajien budjettitarjouksiin perustuvia kalvosuodatusprosessin käyttökustannuksia

	Pohjavesi	**Pintaveden esikäsittely**	**Pintaveden jälkikäsittely**	**Meriveden kalvosuodatus**
Kapasiteetti (m^3/h)	100	1 000	1 000	1 000
Energiakustannus (0,05 €/kWh):				
min (€/v, ei käytetty laskennassa)	73	730	1 366	21 900
max (€/v)	2 190	18 250	21 900	438 000
Kemikaalit*:				
NaOCl 10–12 % (€/v)	1 424	15 938	ei määräarviota	18 360
HCl 33 % (€/v)	ei määräarviota	ei määräarviota	ei määräarviota	1 533
Sitruunahappo 50 % (€/v)	2 244	25 168	ei määräarviota	29 040
Kemikaalit yhteensä (€/v)	3 668	41 106	ei määräarviota	48 933
Huolto ja varaosat (€/v)	20 000	50 000	90 000	185 000
Henkilötyö (1 htv/v, €/v)	60 000	60 000	60 000	60 000
Yhteensä (€/v)	**85 858**	**169 356**	**216 919**	**315 833**
Yksikkökustannus (€/m^3)	2,35	0,46	0,59	0,87

*) Pois lukien mahdolliset saostuskemikaalit

6.3 ELINKAARIKUSTANNUKSET

Elinkaarikustannuksien vertailussa sekä eri kalvoprosessitoimittajien että kalvosuodatusratkaisuja tavanomaisiin yksikköprosesseihin vertailtaessa voidaan yleisellä tasolla todeta, että kompaktit kalvosuodatinratkaisut muodostavat vähemmän rakennuskustannuksia, mutta koneistokustannukset prosessitoimituksen osalta voivat olla merkittäviä.

Kalvosuodatusprosesseissa kalvojen vaihtoväli (kts. luku 3.4.5) ja vaihtokustannukset ovat avainasemassa. Vaihto voidaan toteuttaa kerralla kaikille kalvoille, mikäli vedentuotantotarve sen mahdollistaa tai useampaan erään jaksotettuna, jolloin laitoksen kalvoista vaihdetaan vain osa tai yksittäisiä kalvoja.

Vuotuisina kalvojen vaihtokustannuksina saatiin arvio vain yhdeltä kalvoprosessin toimittajalta. Heidän budjettitarjouksessaan kalvojen vaihtokustannus jaettuna tasaisesti kalvojen käyttöiälle oli seuraava:

- Pohjavesilaitoksessa (kapasiteetilla 100 m^3/h) 30 000–50 000 €/vuosi
- Pintavesilaitokselle (kapasiteetilla 1 000 m^3/h) 200 000 €/vuosi
- Merivesilaitokselle (kapasiteetilla 1 000 m^3/h) 400 000–600 000 €/vuosi

7 KALVOSUODATUSTEKNIIKAN KÄYTETTÄVYYS

Kalvosuodatusprosessin käyttöönotto ja operointi poikkeaa tavanomaisista prosessiratkaisuista mm. kalvojen kemiallisten pesujen osalta. Prosessin korkean automaation ansiosta myös etäohjaus on mahdollista. Hyvin toimiva kalvosuodatusprosessi vaatii seurantaa ja huoltoa, vaikka prosessin päivittäiset pesutoiminnot ovatkin automaation ohjaamia. Jos esikäsittelyssä käytetään esimerkiksi koagulanttia, tulee varmistua kemikaalin riittävästä koagulointiajasta, olosuhteista, kuten pH-arvosta, jotta flokin muodostuminen on riittävää ennen kiintoaineen erotusvaihetta.

Esikäsittelyvaiheessa käytettävät suodattimet vaativat huoltoa tai vaihtoa riittävän usein. Esisuodattimien huolto- ja vaihtoväliin vaikuttavat käsiteltävän veden laatu ja edeltävät prosessivaiheet. Esisuodattimet suojaavat suodatuskalvoja rikkoutumiselta ja pidentävät kalvosuodattimien puhdistusväliä ja vähentävät likaantumista. Esisuodatusvaihe voi olla tarpeen mukaan myös monivaiheinen niin, että esisuodattimien huokoskoko pienenee asteittain ennen kalvosuodatusta. Ennen suodatuskalvoja käytetään usein myös esimerkiksi pussisuodattimia suojaamaan kalvoja partikkeleilta, jotka voivat tulla suodattimille putkistoista ja kalvosuodattimia edeltävistä prosessilaitteista. Esikäsittelyvaiheiden toimivuus vaikuttaa kalvojen toimintaan ja sen vuoksi esikäsittelyvaiheiden toimivuudesta tulisi huolehtia.

Suodatuskalvoja tulee pestä riittävän usein. Riittävä kalvojen pesu pidentää kalvojen käyttöikää, parantaa veden saantoa ja voi parantaa suodatetun veden laatua. Käsittelyyn tulevan veden laatu ja muodostuneen tukkeutuman aiheuttaja vaikuttaa pesukemikaalien valintaan: epäorgaanisten tukkeutumien pesuun käytetään usein happopesua ja orgaanisten tukkeutumien pesuun emäspesua. Tarvittaessa pesu voi olla monivaiheinen, esimerkiksi happo-emäspesu, joiden välillä kalvoja huuhdellaan puhtaalla vedellä. Säännöllisesti toteutettava vastavirtahuuhtelu voidaan toteuttaa automaattisesti esimerkiksi kerran tunnissa tai paine-eron kasvaessa tiettyyn tasoon, jolloin huuhtelu käynnistyy.

Suodatuskalvot konsentroivat liuenneita aineita, jotka eivät mene kalvojen läpi. Konsentroituvat aineet, kuten kalsium ja sulfaatti, voivat saostua kalvon pinnalle pitoisuuden kasvaessa. Saostuminen vaikuttaa kalvoilla saavutettavaan veden saantoon ja kalvojen likaantumiseen.

Kalvosuodatustekniikkaa käyttäville laitoksille suunnatuissa kyselyissä tuli esille mm. seuraavia prosessin käytettävyyteen liittyviä huomioita:

- pintavesikohteissa saanto on kalvojen likaantumisen, pesutiheyden ja alhaisen lämpötilan takia jäänyt jonkin verran suunniteltua alhaisemmaksi
- saantoa on kalvojen likaantumisen myötä ylläpidetty syöttöpainetta nostamalla tiettyyn pisteeseen asti ennen kalvojen lopullista vaihtoa
- pohjavesilaitoksilla kalvojen kemiallisten pesujen väli on ollut hyvin pitkä, jopa vuosi
- kalvoprosessin etäohjausmahdollisuus on tunnistettu tärkeäksi
- esikäsittely on vaatinut optimointia edelleen
- puhtaan pesuveden/permeaatin säiliön koko tulee olla ylimitoitettu, jolloin pesuvesiä on riittävästi saatavilla myös poikkeuksellisissa tilanteissa

8 POIMINTOJA KALVOSUODATUSTA HYÖDYNTÄVISTÄ LAITOKSISTA

Vaasassa on pilotoitu konttiin sijoitettua käänteisosmoosilaitteistoa meriveden käsittelemiseksi talousvedeksi. Hankkeen loppuraportti valmistuu loppuvuodesta 2026 ja tulokset veden laadun osalta ovat olleet lupaavia. Vaasan hanke tähtää liikuteltavan merivesikontin rakentamiseen puhtaan veden saamiseksi kriisitilanteissa. Itämeren veden puhdistamisessa on etuja, mutta myös haasteita, kuten korkeampi ravinnepitoisuus valtameriin verrattuna sekä puhdistamisessa syntyvän rejektin käsittelyn ongelmat.

Kempeleen Vesihuolto Oy on käyttänyt nanosuodatusta talousveden valmistukseen vuodesta 1999 lähtien ja tavoitteena on ollut fosforin, raudan ja mangaanin poisto pohjavedestä. Jälkikäsittelynä Kempeleessä on kalkkikivisuodatus. Alkuvuosien tiheämpi kalvojen vaihtoväli on vuosien kokemuksen myötä kasvanut kuuteen vuoteen. Tässä kohteessa raakaveden happi on pidetty alla 1 mg/l tason, jotta raudan saostuminen ei ole tukkinut kalvoja.

Suomen olosuhteita vastaavissa olosuhteissa kalvosuodatusta on käytetty talousveden valmistukseen mm. Ruotsissa Gotlannissa, Skotlannissa ja Norjassa. Em. maissa kalvosuodatusta on käytetty pääsääntöisesti pienillä ja keskisuurilla laitoksilla. Norjan 160 pienessä kalvosuodatuslaitoksessa nanosuodatusta käytetään ensisijaisesti orgaanisen aineen, värin ja taudinaiheuttajien poistoon (Norsk Vann, 2024).

Skotlantiin on valmistunut 2023 Bonnycraigin vesilaitokselle keraamista ultrasuodatusta hyödyntävä vesilaitos, jonka kapasiteetti on 4 000 m³/d (Scottish Water, 2026). Ruotsissa Göteborgissa on Lackarebäcksin vesilaitos käyttänyt ultrasuodatusta vuodesta 2016 lähtien. Göteborgin Alelyckansin vesilaitokselle ultrasuodatus on hankittu parantamaan talousveden mikrobiologista laatua, valmistumisajankohdaksi on arvioitu 2026 (Göteborgs Stad, 2026).

Yksi maailman suurimmista kalvosuodatuslaitoksista Méry-sur-Oise Pariisissa käsittelee noin 40 % tuottamastaan talousvedestä (340 000 m³/d) nanosuodatuksella, jotta jokiveden teollisuuden epäpuhtaudet ja maatalouden torjunta-aineet saadaan sallittuihin pitoisuuksiin (Ventresque et al. 2000).

Muun muassa Gotlannin saarella on useita kiinteistökohtaisia kalvosuodatusprosesseja pohjavedessä paikoitellen esiintyvä suolaisuuden käsittelemiseksi. Myös osaan julkisen vesihuollon tarjoamasta talousvedestä on hyödynnetty kalvosuodatusta: osassa Gotlantia talousvesi valmistetaan merivedestä ja prosessissa hyödynnetään käänteisosmoosia suolaisuuden ja PFAS-yhdisteiden poistamiseksi (Region Gotland, 2026).

9 KALVOSUODATUSHANKINNASSA HUOMIOITAVIA RISKITEKIJÖITÄ

Tässä luvussa käsitellään kalvosuodatushankintaan ja -prosessiin liittyviä erityisiä riskejä ja niiden hallinnassa huomioitavia käytännön näkökohtia.

Kalvosuodatuksen rajallisen käyttökokemuksen ja erityyppisten raakavesilähteiden takia prosessin toiminnan varmistamiseksi on tunnistettu pilotointitarve, erityisesti pintaveden käsittelyn ollessa kyseessä. Pilotoinnista voidaan saada arvokasta taustatietoa sekä vesilaitokselle että prosessitoimittajalle niin mitoitusperusteiksi kuin hankintakriteereiksikin. Käyttäjäkokemusten perusteella prosessitoimittajan osallistuminen myös suunnitteluvaiheeseen on koettu hyödylliseksi. Yksittäisissä pohjavesikohteissa kalvosuodatusprosesseja ei ole aina pilotoitu ja hankinnat ovat vastanneet tarpeita. Pohjavesikohteissa myös kapasiteetti on säilynyt suunnitellulla tasolla useita vuosia.

Kalvosuodatusratkaisujen kestävyyden arvioinnissa avainasemassa voidaan pitää hyvän vesihuollon kriteerien mukaisesti energiatehokkuutta. Kalvoprosessien kestävyyteen vaikuttavat myös kemikaalien kulutus ja kaikki prosessiin syötetty vesi ei päädy tuotteeksi ja siitä muodostuu rejektijae, joka tulee hallita kestävästi (AWWA, 2012).

Prosessitoimittajien tuotantoketjuja ja kalvojen valmistusta voidaan arvioida hankinnan yhteydessä, jolloin arvioinnin kohteena ovat kestävät valmistusmenetelmät ja toimitusketju sekä käytettyjen kalvomateriaalien kierrätettävyys. Huoltovarmuuden näkökulmasta oleellista on kalvojen saatavuus koko vesilaitoksen elinkaaren ajalle tai vaihtoehtoisesti kalvosuodatusyksikön rakenteiden toteuttaminen siten, että myös toisen toimittajan ratkaisu on sijoitettavissa prosessitiloihin. Kalvosuodatusyksikkö on suositeltavaa jakaa riittävän moneen yksikköön jouhean kunnossapidon ja saneerauksen mahdollistamiseksi laitoksen ollessa käytössä.

Suomalaisissa Itämeren vedenkäsittelyyn perustuvissa kalvosuodatuspilotoinneissa on tullut esille Itämeren korkean ravinnepitoisuuden ja orgaanisen aineen pitoisuuden riskit kalvojen tukkeutumiselle. Myös syntyvän rejektiveden purkaminen takaisin mereen on haaste.

Kalvoprosessin operointi poikkeaa tavanomaisiin prosessitekniikoihin perustuvasta talousvesilaitoksesta. Käyttöönottovaiheen riittävällä opastuksella, operoinnin tuella ja tarvittaessa prosessitoimittajan tarjoamalla käyttöpalvelulla voidaan kuitenkin vähentää operointiin liittyviä haasteita. Operoinnin ulkoistaminen voi myös olla yksi vaihtoehto käyttövarmuuden ylläpitämiseksi.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Kalvosuodatukseen, erityisesti käänteisosmoosiin, on Suomen talousveden tuotannossa turvauduttu lähinnä tilanteissa, joissa perinteisimmillä vedenkäsittelyprosesseilla ei voida saavuttaa esimerkiksi raakavedessä esiintyvien suolojen poistoa. Kalvosuodatus tarjoaa kuitenkin varteenotettavan vaihtoehdon perinteisille vedenkäsittelytekniikoille talousveden laadun hallitsemiseksi. Ratkaisujen vertailussa on syytä tarkastella sekä kustannukset että ympäristövaikutukset koko elinkaaren ajalta.

Kalvosuodatuksen hankintapäätöksen tueksi pilotoinnilla voidaan varmistaa tekniikan soveltuvuuden lisäksi mitoitus esi- ja jälkikäsittelytarpeineen. Hankinnan päätöksentekoa varten tarvitaan usein myös riittävä esisuunnitelma kustannusarvioiden laatimiseksi. Kompaktina ratkaisuna kalvosuodatus voi tarjota juuri riittävän olemassa olevan vesilaitoksen tehostamisratkaisun joko kapasiteetin kasvattamiseksi tai yksittäisen haitta-aineen hallitsemiseksi esimerkiksi osavirtaamaa käsittelemällä.

11 LÄHTEET

Akash F.A., Shovon S.M., Rahman W., Rahman M.A., Chakraborty P., Prasetya T.A.E., Monir M.U. 2024. Advancements in ceramic membrane technology for water and wastewater treatment: A comprehensive exploration of current utilizations and prospective horizons. Desalination and Water Treatment 319 (2024) 100569. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100569

Algieri C., Pugliese V., Coppola G., Curcio S., Galabro V., Chakraborty S. 2022. Arsenic removal from groundwater by membrane technology: Advantages, disadvantages, and effect on human health. Groundwater for sustainable development 19 (2022) 100815. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100815

Al-Jajan Y. 2017. RO Water Desalination Units Design. DOI: 10.13140/RG.2.2.12341.73447

AWWA (American Water Works Association and American Society of Civil Engineers), 2012. Water Treatment Plant Design. New York: McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-174572-7. s.

Chaudhary, M., Sela-Adler, M., Ronen, A. et al. Efficient PFOA removal from drinking water by a dual-functional mixed-matrix-composite nanofiltration membrane. npj Clean Water 6, 77. 2023. https://doi.org/10.1038/s41545-023-00286-2

Chandler, D. L. 2024. New filtration material could remove long-lasting chemicals from water. MIT News. 06.09.2024. https://news.mit.edu/2024/new-filtration-material-could-remove-long-lasting-water-chemicals-0906

EPA 2005, Membrane filtration guidance manual, United states environmental protection agency.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2020/2184, annettu 16 päivänä joulukuut 2020, ihmisten käyttöön tarkoitetun veden laadusta. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj

Foorgineshad S., Zerafat M.M., Ismail A.F., Goh P.S. 2025. Emerging membrane technologies for sustainable water treatment: a review on recent advances. Environ. Sci.: Adv.,2025,4, 530 DOI: 10.1039/d4va00378k

Galjaard G. 2024. SIWW2024 Advances in Membrane Technology “Back to Ceramics” Overview of flat sheet ceramic membranes. Esitys Singapore International Water Week -konferenssissa 21.7.2024.

Giovanni Souza Casella, Mariana Mendes Miranda, Guilherme Pinheiro Drumond, Guilherme Otávio Rosa e Silva, Fares Zouaoui, Gemima Santos Arcanjo, Míriam Cristina Santos Amaral, Eduardo Coutinho de Paula, Victor Rezende Moreira, Recent developments in membrane treatment technologies for PFAS removal from surface and groundwater, Journal of Environmental Chemical Engineering,Volume 14, Issue 1, 2026,120598, ISSN 2213-3437, https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.120598

Guo H., Li X., Yang W., Yao Z., Mei Y., Peng L.E., Yag Z., Shao S., Tang C.Y., Front. Chem. Sci. Eng. 2021. https://doi.org/10.1007/s11705-021-2103-5

Göteborgs Stad. 2026. Installation av ultrafilter för vatten, saatavilla osoitteesta: https://goteborg.se/wps/portal/start/goteborg-vaxer/sa-arbetar-staden-med-stadsutveckling/miljo-och-klimat-i-stadsutvecklingen/innovativ-miljoteknik/installation-av-ultrafilter-for-vatten, [Luettu 8/2026]

Heinonen, R. 2016. UF-syötteen vaihtelun selvittäminen ja näytteenoton optimointi. Opinnäytetyö.

Kettunen, R., Keskisalo, P. 2000. Combination of membrane technology and limestone filtration to control drinking water quality. Desalination 131, Issues 1-3, 271-283, Elsevier.

Lupa- ja valvontavirasto. 2024. Talousvesisäännösten soveltamisohje, Osa II, Enimmäisarvojen perusteet. https://lvv.fi/documents/242146171/253413088/Talousvesis%C3%A4%C3%A4nn%C3%B6sten+SO+OSA+II+2024.pdf

Metcalf & Eddy. 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4. painos. The McGraw Hills Companies Inc.1819 s. ISBN 0-07-112250-8.

Moona, N., Barkman, K., Wahlberg, T., Taoussi, M., Åhsberg, S., Eideborn, H., & Lipnizki, F. 2024. Hållbara membran för dricksvattenberedning: Uppföljning av användning och upphandling av membran för dricksvattenproduktion (SVU-rapport 2024-7). Svenskt Vatten.

Norsk Vann BA. 2024. Veiledning for design og drift av nanofilteranlegg, Rapport 287/2024

Region Gotland. 2026. Kommunalt dricksvatten, saatavilla osoitteesta: https://gotland.se/bygga-bo-och-miljo/vatten-och-avlopp/dricksvatten/kommunalt-dricksvatten, [Luettu 08/2026]

Sahlstein, J. 2005. Kalvotekniikat-opetusmoniste. Bio- ja elintarviketekniikan koulutusohjelma. Hämeen ammattikorkeakoulu.

Scottish Water. 2026. Bonnygraic Water treatment works, Saatavilla osoitteesta https://www.scottishwater.co.uk/about-us/news-and-views/2023/08/bonnycraig-water-treatment-works [Luettu 08/2026]

Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. 2008. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature, 452*, 301–310. https://doi.org/10.1038/nature06599

Smith, K. 2013. Spiral-wound membrane construction. Teoksessa Tamime, A.Y. (toim.) Society of Dairy Technology series: Membrane Processing: Dairy and Beverage Applications. Somerset, NJ, USA: Wiley Blackwell.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 2/2023, talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista annetun sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen muuttamisesta. Helsinki 9.1.2023. https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saadoskokoelma/2023/2

Suomen ympäristökeskus. 2021. Talousveden laatu. Vesi.fi. Viitattu 24.8.2026. https://www.vesi.fi/vesitieto/talousveden-laatu/

Terveydensuojelulaki 763/1994. https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/1994/763

Vaasan kaupunki. 2026. AHTI -Alueellista huoltovarmuutta turvaava idea. https://www.vaasa.fi/hankkeet/ahti-alueellista-huoltovarmuutta-turvaava-idea/ Haettu 24.5.2026

Ventresque C. et al. 2000. An outstanding feat of modern technology: the Mery-sur-Oise nanofiltration Treatment plant (340,000 m³/d). 2000. Desalination, (December 2000): 1-16. Elsevier B.V.

Vesihuoltolaki (119/2001). https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2001/119

Vesilaki (587/2011). https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2011/587

Vesilaitosyhdistys (VVY). 2019. Työkalu taudinaiheuttajien poistotehon arviointiin veden-tuotantoketjussa.

Vesilaitosyhdistys (VVY). 2022. Suunnitteluohjeet kemiallisen saostuksen toimintavar-muuden parantamiseksi vesihuollossa

Vesilaitosyhdistys (VVY). 2025a. Vesilaitostekniikka ja hygienia.

Vesilaitosyhdistys (VVY). 2025b. Vesihuoltolaitosten hankintojen vastuullisuustavoitteet

Wagner J. 2001. Membrane Filtration Handbook Practical Tips and Hits, 2nd Edition, Rev 2.

Warsinger, David M. et al. A Review of Polymeric Membranes and Processes for Potable Water Reuse. 2018. Progress in Polymer Science 81 (June 2018): 209–237, Elsevier B.V.

World Health Organization. 2017. Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). World Health Organization.

12 LIITTEET

LIITE 1 KOONTI LAITETOIMITTAJILLE SUUNNATUN KYSELYN TULOKSISTA

LIITE 2 OPPAAN LAADINTAAN TIETOJA TOIMITTANEET KALVOTOIMITTAJAT

LIITE 3 TALOUSVEDEN LAATUVAATIMUKSET JA -TAVOITTEET

LIITE 4 KALVOSUODATUKSESSA KÄYTÖSSÄ OLEVIA, TALOUSVEDEN TUOTANTOON KÄYTETTÄVIÄ MATERIAALEJA JA NIIDEN OMINAISUUKSIA

LIITE 5 SAAVUTETTUJA ARSEENIN POISTOTEHOKKUUKSIA ERI TUTKIMUKSISTA

LIITE 6 SAAVUTETTUJA TORJUNTA-AINEIDEN POISTOTEHOKKUUKSIA SYNTEETTISILLÄ VESILLÄ

LIITE 7 SAAVUTETTUJA KLORIDIN POISTOTEHOKKUUKSIA ERI TUTKIMUKSISTA

LIITE 8 HANKINTAKRITEEREISTÄ

LIITE 1 KOONTI LAITETOIMITTAJILLE SUUNNATUN KYSELYN TULOKSISTA

Taulukko 15. Kalvosuodatus pohjavedelle.

	Laitetoimittaja 1	**Laitetoimittaja 2**	**Laitetoimittaja 3**	**Laitetoimittaja 4**	**Laitetoimittaja 5**
Kapasiteetti	100 m³/h	100 m³/h	100 m³/h	100 m³/h	100 m³/h
Esikäsittely-prosessi	pH säätö 1 kpl ilmastussäiliö + puhaltimet 1 kpl Vastavirta huuhdeltava suodatin 1 sarja UF PES-membraanit	pH säätö ja hapetus Esisuodatus Ultrasuodatus	Prosessitoimittajan automatisoitu esisuodatus	Siivilöinti, saostuskemikaalin annostelu, pH-säätö, putkisekoitus, hapettimen annostelu	pH-säätö
Kalvosuodatusvaihe	3 kpl nanosuodatus 1 kpl CIP-pesu 4 kpl Kemikaalien valmistus ja pumppaus	12 kpl RO-laitteita 3 kpl esisuodatus 5 um, CIP 1. Vaihe 10 paineputkea 2. vaiheessa 5 paineputkea 3. Vaiheessa 2 paineputkea, putkissa 6 kalvoa Remineralisointi	30 kpl kalvomoduuleja ultrasuodatus 0.02 µm, PES ”inside-out”	6 moduulitornia, joissa 10 kalvomoduulia/torni, 2 suodatinpumppua, 2 vastavirtahuuhtelun pumppua 2 pesusprinkleriä, puhaltimet, pesukemikaalien säiliöt, permeaattisäiliö	Ultrasuodatus
Kalvotyyppi		ESPA-4 LD Eri kalvovalmistajien standardikalvot Kalvon vuo noin 21,7 l/m²h		Keraaminen ultrasuodatuskalvo	ei täsmennetty
Kemikaalit	HCl, NaOH, NaOCl, Oksaalihappo, antiskalantti	PAC, NaOH, HCl	ei ilmoitettu	saostuskemikaali esisaostukseen, HCl, NaOCl, sirtuunahappo	ei täsmennetty

	Laitetoimittaja 1	**Laitetoimittaja 2**	**Laitetoimittaja 3**	**Laitetoimittaja 4**	**Laitetoimittaja 5**
Saanto %	Vastavirtasuodatus aksepti 136 m³/h, rejekti 1 m³/h UF Permeaatti 136 m³/h, UF Rejekti ka. 11 m³/h NF Permeaatti 100 m³/h, NF Rejekti ka. 25 m³/h	RO 80 %, kokonaissaanto 72 %	Syöttövesimäärä 115 m³/h ja saanto 87 %	92 %	ei täsmennetty
Tilantarvearvio	14 x 17 m ilman säiliöitä	UF: 21 x 29 m RO: 15 x 30,5 m		kalvomoduuleille noin 5 m², noin 12 m³	ei täsmennetty
Sähkönkulutus	1 050 kW/vrk	UF: 0,05 kW/m³ RO: 0,29 kW/m³		0,04 kWh/m³	0,1 – 0,2 kWh/m³
Arvio kalvojen käyttöiästä	5–10 vuotta	5–10 vuotta		ei esitetty	7–10 vuotta

Taulukko 16. Kalvosuodatus pintaveden esikäsittelyyn.

	Laitetoimittaja 2	**Laitetoimittaja 3**
Kapasiteetti	1000 m³/h	1000 m³/h
Esikäsittelyprosessi	Kemiallinen puhdistus, hiekkasuodatus, esisuodatus	Automaattisesti puhdistuva esisuodatus kemiallisesti saostetulle pintavedelle
Kalvosuodatusvaihe	20 kpl Ultrasuodatuslinjaa + automaattinen CEB, manuaalinen CIP	Ultrasuodatus 0,02 µm
Kalvotyyppi	onttokuitukalvot	PES ”inside out”, kalvomodulin pinta-ala 80 m², modulien lukumäärä 288 kpl
Kemikaalit	PAC, NaOH, HCl	
Saanto %	UF: 90–95 %	87 % Permeaatti 1000 m³/h Rejekti 138 m³/h
Tilantarvearvio	UF: 21 x 29 m	

	Laitetoimittaja 2	Laitetoimittaja 3
Sähkönkulutus	UF: 0,05 kWh/m³	
Arvio kalvojen käyttöiästä	5–10 vuotta	

Taulukko 17. Kalvosuodatus pintaveden viimeistelyyn.

	Laitetoimittaja 1	Laitetoimittaja 2	Laitetoimittaja 3*	Laitetoimittaja 4*	Laitetoimittaja 5
Kapasiteetti	1000 m³/h		1000 m³/h	1000 m³/h	1000 m³/h
Esikäsittelyprosessi	4 kpl vastavirtahuuhdeltava suodatin 100 µm 4 kpl Ultrasuodatus PES-kalvolla, CEB	Hiekkasuodatus 20 kpl Ultrasuodatuslinjaa + CEB, onttokuitukalvot	Automatisoitu esisuodatus		esikäsittelyä ei ole tarkemmin määritelty tarjouksessa
Kalvosuodatusvaihe	8 kpl nanosuodatus 1 kpl CIP-pesu 5 kpl Kemikaalien valmistus ja pumppaus	12 kpl RO-laitteita 3 kpl esisuodatus 5 µm, CIP 1. Vaihe 10 paineputkea joissa 6 kalvoa 2. vaiheessa 5 paineputkea, joissa kussakin 6 kalvoa Jälkikäsittely remineralisointisuodattimella	Ultrasuodatus 0,02 µm	Ultrasuodatus	Nanosuodatus
Kalvotyyppi		ESPA-4 LD Eri kalvovalmistajien standardikalvot Kalvon vuo noin 21,7 l/m²h	PES ”inside out”, kalvomodulin pinta-ala 80 m^2, modulien lukumäärä 192 kpl	SIC kalvopinta-ala 4 630 m^2, modulien lukumäärä 675 kpl	
Kemikaalit	FeCl3, HCl, NaOH, NaOCl, Oksaalihappo, antiskalantti	PAC, NaOH, HCl		NaOCl, HCl, sitruunahappo	

	Laitetoimittaja 1	**Laitetoimittaja 2**	**Laitetoimittaja 3***	**Laitetoimittaja 4***	**Laitetoimittaja 5**
Saanto %	Permeaatti 1000 m³/h Rejekti ka. 282 m³/h	UF: 90–95 % RO: 80 %	93 % Permeaatti 1000 m³/h Rejekti 73 m³/h	96 % Permeaatti 1000 m³/h Rejekti 46 m³/h	
Tilantarvearvio	32 x 25 m ilman säiliöitä	UF: 21 x 29 m RO: 15 x 30,5 m			
Sähkönkulutus	15 300 kW/vrk	UF: 0,05 kW/m³ RO: 0,29 kW/m³		UF: 0,035 kWh/m³	n. 0,4 kWh/m³
Arvio kalvojen käyttöiästä	3–10 vuotta	5–10 vuotta			5–7 vuotta

*Tarjottu laitteisto ei täysin vertailukelpoinen muiden tarjottujen laitteistojen kanssa, koska yleensä UF:lla ei saavuteta haitta-aineiden poiston tavoitteita.

Taulukko 18. Kalvosuodatus meriveden käsittelyyn.

	Laitetoimittaja 1	**Laitetoimittaja 2**	**Laitetoimittaja 3***	**Laitetoimittaja 4**
Kapasiteetti	1416 m³/h (tuotto 1000 m³/h)	1550 m³/h (tuotto 1000 m³/h)	24850 m³/d (tuotto 24 000 m³/pv)	1 448 m³/h (tuotto 1 100 m³/h)
Esikäsittelyprosessi	Ultrasuodatus Automaattinen CEB	Esisuodatus, hiekkasuodatus ja ultrasuodatus	UF-prosessia edeltävää esikäsittelyä ei ole tarjottu UF-prosessin esikäsittelynä esim. kemiallinen hapetus ja koagulointi Ultrasuodatus	Ei tarjottu Esimerkiksi perinteinen raakavedenkäsittelyprosessi on soveltuva esikäsittely
RO-vaihe	Käänteisosmoosi	Varosuodattimena patruunasuodatin Käänteisosmoosi Remineralisointisuodatin CIP-pesu	Ei tarjottu	2-vaiheinen RO
Kalvotyyppi	Murtovesikalvo, PES (Polyethersulfone)	ESPA-2 LD (Energy Saving Polyamide)	SiC	Murtovesikalvo, LG BW 400 R G2
Saanto %	70 %	Hiekkasuodatus 90–95 % RO 70 %	UF 96 %	75 %
Rejektit	127 m³/h (esikäsittelyt) 282 m³/h (RO)	74 m³/h (KEMPU) 420 m³/h (DEMI)	UF rejekti 850 m³/pv	RO rejekti 91 m³/h
Tilantarvearvio	800 m² ilman säiliöitä	Noin 850 m²	Ei määritelty	180 m² (vain käänteisosmoosilaitteisto)
Sähkönkulutus	24 000 kWh/pv	20 000 kWh/pv	UF 0,035 kWh/m³	0,95 kWh/m³
Kemikaalit	Ferrikloridi, suolahappo, lipeä, natriumhypokloriitti, oksaalihappo, antiskalantti	PAC, rikkihappo, lipeä, suolahappo	NaOCl, HCl, sitruunahappo Ei sisällä esikäsittelyn kemikaaleja	Ei määritelty
Arvio kalvojen käyttöiästä	3–10 vuotta	5–10 vuotta	Ei määritelty	Ei määritelty

*Tarjottu laitteisto ei täysin vertailukelpoinen muiden tarjottujen laitteistojen kanssa, koska yleensä UF:lla ei saavuteta haitta-aineiden poiston tavoitteita

LIITE 2 OPPAAN LAADINTAAN TIETOJA TOIMITTANEET KALVOTOIMITTAJAT

Aquator Oy
https://www.aquator.fi/

Azelis Finland Oy
https://www.azelis.com

Flootech Oy
www.flootech.com

ProMinent Finland Oy
https://www.prominent.fi

Veolia Aquaflow Finland Ltd
www.veoliawatertechnologies.fi

WatMan Engineering Ltd Oy
www.watmanengineering.fi

LIITE 3 TALOUSVEDEN LAATUVAATIMUKSET JA -TAVOITTEET

Taulukko 19. Talousveden laatuvaatimukset (STM 1352/2015).

Laatuvaatimukset	**yksikkö**	**enimmäisarvo**
Mikrobiologiset laatuvaatimukset		
Escherichia coli	pmy/100 ml	0
Enterokokit	pmy/100 ml	0
Kemialliset laatuvaatimukset		
Pääosin raakavedestä peräisin olevat muuttujat		
Arseeni	µg/l	10
Bentseeni	µg/l	1
boori	mg/l	1,5
1,2-dikloorietaani	µg/l	3
Elohopea	µg/l	1
Fluoridi	mg/l	1,5
Nitraatti (NO_3^-)	mg/l	50
Seleeni	µg/l	20
Syanidit	µg/l	50
Tetrakloorieteeni ja trikloorieteeni yhteensä	µg/l	10
Torjunta-aineet	µg/l	0,1
Torjunta-aineet yhteensä	µg/l	0,5
Uraani	µg/l	30
Mikrokystiini-LR	µg/l	1
PFAS-aineiden summa	µg/l	0,1
Desinfioinnin sivutuotteet		
Bromaatti	µg/l	10
Haloetikkahapot	µg/l	60
Kloraatti	mg/l	0,25
Kloriitti	mg/l	0,25
Trihalometaanit yhteensä	µg/l	100
Pääosin vedenkäsittelykemikaaleista ja verkostomateriaaleista peräisin olevat muuttujat		
pH		9,5
Akryyliamidi	µg/l	0,1
Epikloorihydriini	µg/l	0,1
Vinyylikloridi	µg/l	0,5
Polysykliset aromaattiset hiilivedyt yhteensä	µg/l	0,1
Bentso(a)pyreeni	µg/l	0,01
Muuttujat, joihin kiinteistön vesilaitteisto voi vaikuttaa merkittävästi		
Antimoni	µg/l	10
Bisfenoli-A	µg/l	2,5
Kadmium	µg/l	5
Kromi	µg/l	25
Kupari	mg/l	2
Lyijy	µg/l	5
Nikkeli	µg/l	20
Nitriitti (NO_2^-)	mg/l	0,5
Radioaktiivisuuden laatuvaatimukset		
Radon	Bq/l	1000
Tritium	Bq/l	100
Viitteellinen annos	mSv/vuosi	0,1

Taulukko 20. Talousveden laatutavoitteet (STM 1352/2015).

Muuttuja	**Arvo ja yksikkö**
Riskinarvioinnin perusteella tutkittavat mikrobiologiset muuttujat	
Clostridium perfringens, mukaan lukien itiöt	0 pmy/100 ml
Veden syövyttävyyteen vaikuttavat muuttujat	
pH	6,5–9,5
Kloridi	alle 250 mg/l
Sulfaatti	alle 250 mg/l
Sähkönjohtavuus	alle 2 500 µS/cm
Muut muuttujat, joihin vedenkäsittely voi vaikuttaa merkittävästi	
Alumiini	alle 200 µg/l
Ammonium (NH_4^+)	alle 0,50 mg/l
Natrium	alle 200 mg/l
Muuttujat, joihin rakennuksen vesilaitteisto voi vaikuttaa merkittävästi	
Koliformiset bakteerit	0 pmy/100 ml
Pesäkkeiden lukumäärä (22 °C)	ei epätavallisia muutoksia
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC)	ei epätavallisia muutoksia
Haju ja maku	ei epätavallisia muutoksia ja käyttäjien hyväksyttävissä
Väri	ei epätavallisia muutoksia ja käyttäjien hyväksyttävissä
Sameus	ei epätavallisia muutoksia ja käyttäjien hyväksyttävissä
Lämpötila	enintään 20 °C
Hapettuvuus (COD_{Mn}-O_2)	alle 5,0 mg/l O_2
Mangaani	alle 50 µg/l
Rauta	alle 200 µg/l

LIITE 4 KALVOSUODATUKSESSA KÄYTÖSSÄ OLEVIA, TALOUSVEDEN TUOTANTOON KÄYTETTÄVIÄ MATERIAALEJA JA NIIDEN OMINAISUUKSIA

Taulukko 21. Prosessitoimittajien tarjouksia ja kirjallisuuden lähteitä mukaillen Warsinger et al., 2018.

	Lyhenne	**Yleisin käyttö-kohde**	**Edut**	**Haasteet**	**Mekaaninen kestävyys**	**Kloorin kestävyys**	**Hydrofiilisyys ja kontakti-kulma (WCA)***	**pH**	**Käyttöikä**
Keraamiset									
	mm. SiC	UF	Hyvä mekaaninen lujuus, kemiallisesti kestävä		hyvä	hyvä	Hyvä	2-13	10-20
Polymeeriset									
Polysulfoni	PSU tai PSF	MF ja UF	Hyvä mekaaninen lujuus, kemiallisesti kestävä		hyvä	hyvä	kohtalainen, n. 75	1-13**	5-8
Polyeetteri-sulfoni	PES	MF ja UF	Hyvät lämpöominaisuudet, jäykkä, tiivistymistä kestävä, erittäin permeaabeli, hapettimia kestävä, kapea huokosjakauma		hyvä	hyvä	kohtalainen, n. 75	1-13**	7-10
Polyakryylinitriili	PAN	MF ja UF			kohtalainen		hyvä, n. 60		5-8
Polyvinyylideenifluoridi	PVDF	MF ja UF	Kestää erittäin hyvin hapettimia ja klooria	Laaja huokosjakauma	hyvä	kohtalainen	heikko, n. 100	2-11**	8-15
Polyeteeni	PE	(harvinainen) MF ja UF	Kestää hyvin orgaanisia liuottimia, alhainen	Kestää heikosti lämmönvaihte-	kohtalainen	heikko	heikko		5-10

	Lyhenne	Yleisin käyttö-kohde	Edut	Haasteet	Mekaaninen kestävyys	Kloorin kestävyys	Hydrofiilisyys ja kontakti-kulma (WCA)*	pH	Käyttöikä
			hinta, kestää hapettimia	lua, likaantuu helpommin					
Polypropeeni	PP	(harvinainen) MF ja UF	Kestää hyvin orgaanisia liuottimia, kohtuullinen mekaaninen lujuus	Likaantuu helpommin, ei kestä hapettimia	kohtalainen	heikko	kohtalainen	2-13	5-10
Polyvinyylikloridi	PVC	Satunnaisesti MF ja UF		Kestää heikosti lämmönvaihtelua, ei kestä hapettimia	heikko		heikko		3-6
Selluloosaasetaatti	CA	RO, myös MF ja UF	Uusiutuva raaka-aine	Altis mikrobiselle hajoamiselle	heikko	hyvä	erinomainen	5-8.5	3-5
Polyamidi	PA	RO, NF ja satunnaisesti MF ja UF	Pienet huokoset ja erinomainen erotuskyky	Heikko happo- ja alkalinkesto, altis tiivistymiselle	kohtalainen	heikko	hyvä, n. 55	1-13***	3-7

*Kuvaa kuinka hyvin vesi leviää kalvon pinnalle. Hydrofiilinen pinta likaantuu vähemmän. Kontaktikulma mittaa hydrofiilisyyttä, pieni kontaktikulma (< 90°) kuvaa hydrofiilistä pintaa.

**Heikko pitkäaikainen kestävyys emäksissä olosuhteissa.

***Heikko pitkäaikainen kestävyys happamissa tai emäksissä olosuhteissa

LIITE 5 SAAVUTETTUJA ARSEENIN POISTOTEHOKKUUKSIA ERI TUTKIMUKSISTA

Taulukko 22. Mukaillen Foorgineeshad et al. 2025 ja Algieri et al. 2022.

Kalvotyyppi	**Kalvomateriaali**	**Nanohiukkanen**	**Vedenläpäisevyys (L m^{-2} h^{-1} bar^{-1})**	**Epäpuhtaus**	**Poistoteho (%)**	**Referenssi**
	PE/PA	TiO_2	5	As(V)	100	Amiri et al. 2023
ES-10	Aromaattinen polyamidi			As(V)	>95	Y et al. 2002
NTR-729HF	Polyvinyylialkoholi			As(V)	>95	Y et al. 2002
NTR-7250	Polyvinyylialkoholi			As(V)	>95	Y et al. 2002
ES-10	Aromaattinen polyamidi			As(III)	>75	Y et al. 2002
NTR-729HF	Polyvinyylialkoholi			As(III)	<22	Y et al. 2002
NTR-7250	Polyvinyylialkoholi			As(III)	<22	Y et al. 2002
	ZVI-Kaolin ja PES			As(III)	50	Selvan et al. 2022
	Cu/CuO/poly/ethylene terephthalate) composiitit			As(III)	48,70	Mashentseva et al. 2020
	5% Zn/AlO_3/Polysulfone			As(V)	>87	Sherugar et al. 2021
	P-605-EDTA membraani			AsV)	(>96,75	Roy et al. 2020
	PPSU/ZrO2/CA onttokuitukalvo			As(V)	87,24	Kumar et al. 2020a
	PPSU/ZrO2/CAP onttokuitukalvo			As(III)	70,48	Kumar et al. 2020b
NF levykalvo				As(V)	72	Elcik et al. 2015a
RO				As(V)	99	Elcik et al. 2015b
	Komposiittikalvo aromaattisella polyamidi selektiivisellä kerroksella			As(V)	40	Chang et al. 2014
	NF-300 TFC polyamidi			As(V)	>95	Saitua et al. 2011
	NF90-4040 polyamidi TFC			As(V)	94	Harfoush et al. 2018a

Kalvo-tyyppi	Kalvomateriaali	Nano-hiukka-nen	Vedenlä-päisevyys (L m^{-2} h^{-1} bar^{-1})	Epä-puh-taus	Poisto-teho (%)	Refe-renssi
	NF90-4040 poly-amidi TFC			As(III)	90	Harfoush et al. 2018b
	Dow/FilmTec NF 90 polyamidi			As(V)	98	Jadbav et al. 2017
	TFN			As(V)	98,6	He et al. 2017
	AF-NF			As(V)	>72	161
	NF-90 mem-braani			As(V)	98,4	Figoli et al. 2010
UF	PSU			As	10,9	Shah et al. 2013
UF	PSU	Amide-MWCNT		As	79,4	Shah et al. 2013
UF	PSU	Azide-MWCNT		As	80,9	Shah et al. 2013
UF	PSU	Oxi-dized-MWCNT		As	83,6	Shah et al. 2013
UF	PSU	GO		As	83,65	Rezaee et al. 2015

LIITE 6 SAAVUTETTUJA TORJUNTA-AINEIDEN POISTOTEHOKKUUKSIA SYNTEETTISILLÄ VESILLÄ

Taulukko 23. Torjunta-aineiden poistotehokkuuksia. Lähde: Cevalloz-Mendoza et al. 2022.

Torjunta-aineluokka	**Nimi**	**Pro-sessi**	**Poly-meeri**	**Poistoteho %**
Bentsimidatsoli-fungisidi Triatsoli-fungisidit	Carbendazim Difenokonatsoli Hexaconazole Propiconazole Tetraconazole	NF	PA[Tf] PA[Tf] PA[Tf] PVA/PA PA[Tf]	64.15 100 79.38 96.9 72.94
Karbamaatti-insektisidit	Carbaryl Carbofuran Esprocarb Fenobucarb Thiram Molinate	NF	PVA/PA PA[Tf] PA[Tf] PVA/PA – –	86–92 89.98 99.94 94.8 97.7 98.5
Klooriasetamidiher-bisidit	Alachlor Butachlor	NF	PA[Tf]	86.18 100
Kloorifenoksijohdannai-set	2,4-dikloorifenoli	UF*	PVDF	99.9
Neonikotinoidit	Acetamiprid Imidacloprid Thiacloprid Thiamethoxam	NF	PA[Tf] PVA/PA – PA[Tf]	81.05 89.17 97.6 66.61
Organo-kloori-insekti-sidit	Aldrin α-HCH β-Endosulfan β-HCH δ-HCH Dicofol Dieldrin Endosulfan sulphate γ-HCH op-DDD op-DDE op-DDT pp-DDD pp-DDE pp-DDT	NF	PA[Tf]	89.61 90 100 90.41 88.18 72.17 82.56 100 99.85 94.47 95.07 94.84 94.13 95.95 96.02
Organofosfaatit	Chlorpyrifos Diazinon Dimethoate Dichlorvos Isoxathion Ethion Malathion Methyl parathion Monocrotophos Parathion	NF	PA[Tf] PVA/PA PA[Tf] PVA/PA PVA/PA PA[Tf] – PVA/PA PA[Tf] –	86.9 >99.9 73.67 86.7 99.84 90.94 55.51 99.64 37.82 55.61
Fenyyliamidi-fungisidit	Metalaxyl	NF	PA[Tf]	85.64
Fosfonaattifungisidit	Isoprothiolane	NF	PVA/PA	99.76

Torjunta-aineluokka	Nimi	Pro-sessi	Poly-meeri	Poistoteho %
Pyretroidit	α-Cypermethrin Bifenthrin Permethrin	NF	PA^{Tf}	84.27 87.26 80.14
Tiasolit	Mefenacet Tricyclazole	NF	PVA/PA	99.1 81.05
Triatsiinit	Atrazine Simazine Simetryn	NF	PVA/PA	93–97.5 96.7 98.6
Urea-herbisidit	Isoproturon	NF	PA^{Tf}	87.25

*Nanomateriaali β-CDP ja lisäaine PVP

LIITE 7 SAAVUTETTUJA KLORIDIN POISTOTEHOKKUUKSIA ERI TUTKIMUKSISTA

Taulukko 24. Kloridin poistotehokkuuksia (mukaillen Foorgineeshad et al. 2025 ja Li et al. 2022).

Kalvo-tyyppi	**Kalvomateri-aali**	**Nanohiukka-nen**	**Vedenlä-päise-vyys (L m^{-2} h^{-1} bar^{-1})**	**Permeaattivuo (L m^{-2} h^{-1})**	**Epäpuhtaus**	**Lähtöpitoi-suus (mg/l)**	**Poisto-teho (%)**	**Referenssi**
	PVDF	Perfluoroktyyli-amiini-grafeeni nanolevyt	~1.28		NaCl		99.86	Luque-Alled et al. 2023
ES-10	Aromaattinen polyamidi				NaCl		99,6	Y et al. 2002
NTR-729HF	Polyvinyylialko-holi				NaCl		93,0	Y et al. 2002
NTR-7250	Polyvinyylialko-holi				NaCl		70,0	Y et al. 2002
	modifioitu NF270	Vesiliuos		5,0	Cl^-	2000	98	Welch et al. 2021
	LBL-NF-CS-BCM	Vesiliuos		12,08	Cl^-	500	36,11	Li et al. 2021
	IP-BC/CS-NFM	Vesiliuos		15,64	Cl^-	500	40,26	Weng et al. 2020
	PPA/GO NF	Vesiliuos		87,6	Cl^-	2000	56,80	Wang et al. 2016
	Asetaatti/LSCF NF	Vesiliuos		14,3	Cl^-	1000	27,30	Han et al. 2018
	PDAD-MAC/PSS NF	Vesiliuos		80	Cl^-	2000	13	Wang et al. 2012
	MOF MMM	Vesiliuos		NA	Cl^-	1000	11,46	Shu et al. 2020
	Fe/TFC NF	Vesiliuos		75,2	Cl^-	2000	30,60	Zhu et al. 2019

Kalvo-tyyppi	Kalvomateri-aali	Nanohiukka-nen	Vedenlä-päise-vyys (L m^{-2} h^{-1} bar^{-1})	Permeaattivuo (L m^{-2} h^{-1})	Epäpuhtaus	Lähtöpitoi-suus (mg/l)	Poisto-teho (%)	Referenssi
RO	Selluloosa ase-taatti mem-braani	Vesiliuos		0,334	Cl^-	3545	98	Reid & Breton 1959
	HBPAC-based TFC	Vesiliuos		45,32	Cl^-	2000	98,90	H. Wu et al. 2020
	ZIF-8 PDA TFN	Vesiliuos		57,97	Cl^-	2000	98,68	G. Zhang et al. 2020
	PANI decora-ted	Vesiliuos		NA	Cl^-	3545	95,40	Hosseini et al. 2019a
	ABS-aktiivi-hiili/Ag	Vesiliuos		NA	Cl^-	3545	84	Zendehnam et al. 2013
	PVC-SBR-aktii-vihiili/Ag	Vesiliuos		NA	Cl^-	3545	99	Khodabakhsi et al. 2011
	Ralex AMH-PES	Vesiliuos		NA	Cl^-	17,725	>90	Dlugolecki et al. 2008

LIITE 8 HANKINTAKRITEEREISTÄ

Kalvosuodatusprosessin toimittajille suunnatuissa budjettitarjouspyynnöissä käytettiin tässä hankkeessa seuraavassa esitettyä sisältöä.

Kalvosuodatukseen perustuvan vesienkäsittelyjärjestelmän tulee sisältää:

- mahdollinen kalvojen vaatima esikäsittely
- kalvosuodatuslaitteisto, sisältäen mm. kalvojen paineastiat ja pumppaukset
- suodatuskalvot
- kalvojen clean-in-place -laitteisto (kemikaalisäiliöt ja -pumput)
- prosessin toimivuuden kannalta tärkeimmät mittaukset ja ohjausyksiköt. Laitteiston pitää voida toimia oman automaationsa varassa.
- Laitteiston odotettu käyttöikä on yli 30 vuotta.

Laitteisto tulisi suunnitella ja valmistaa apulaitteineen toimittajan vakiintuneen, hyväksi todetun suunnittelun mukaisesti, jolla on osoitettu menestystä vastaavassa käyttöympäristössä. Alla olevassa taulukossa on esitetty esimerkinomaisesti toimitusrajoja, joita käytettiin mm. tämän hankkeen budjettitarjouspyynnöissä.

Taulukko 25. Esimerkki toimitusrajoista.

Toimitus	**Laitetoimittaja**	**Asiakas**
Koagulointi ja flotaatio/lamellisel-keytys		X
Mahdollinen kalvojen esikäsittely	X	
Kalvoyksikön syöttöpumppu	X	
Kalvoyksikkö	X	
Mahdolliset prosessivaiheiden väliset säiliöt	X	
Kalvot	X	
CIP-järjestelmä	X	
Sähköistys		
PLC	X	
Kenttäinstrumentit	X	
Sähkön syöttö		X
Putkisto		
Putkisto laitteiston tulolaippaan		X
Kalvoprosessitoimituksen sisäiset putket ja putkiosat	X	
Putkisto laitteistolta seuraavaan prosessivaiheeseen		X
Rakenteet		
Laitteiden perustukset		X
Betonityöt		X
Rakennus		X
Hoitotasot		X
Kuljetus		
Kuljetus	X	(X)
Asennus		
Laitteiden asennus	(X)	X
Sähköistyksen ja instrumentoinnin käyttöönotto		X

Taulukko 26. Kalvosuodatusprosessin hankintakriteereistä ja takuuehdoiksi soveltuvista toimintaparametreistä on esimerkkejä seuraavassa taulukossa. Parametrinä esitetyt x ja y ovat tilaajan ja suunnittelijan määritettävissä.

Hankintakriteeri	**Esimerkki 1**	**Esimerkki 2**	**Esimerkki 3**
Kapasiteetti	vaatimus veden tuotolle x m³/h ja y m³/d	Vedentuotantokapasiteetti, tuotantoseisakkien enimmäiskesto x h/d	
Saanto	x %	Konsentraatin ja pesuvesien enimmäismäärä x m³/d	
Energiatehokkuus	energiankulutuksen vuosikeskiarvo x kWh/m³ tuotettua vettä		
Vaatimukset veden laadulle	sameus alle 0,1 FTU tai TOC-reduktio x %	Talousvesiasetuksen mukainen veden laatu alkaliteettitavoitetta lukuun ottamatta	Kloridipitoisuus alle x mg/l
Takuuarvo kalvojen elinkaarelle	x vuotta takuuarvojen mukaisella vedentuotannolla		
Pesukemikaalien kulutus	pesukemikaalien maksimikulutus x t/a		
Huolto ja kunnossapito	Huolto- ja kunnossapitosopimus, (etä)käytön tuki 24/7	Huolto ja kunnossapito saavutettavissa 24 h sisällä	Täysi (etä)operointivastuu prosessitoimittajalla
Vaatimukset materiaaleille	Kuten muussakin vesilaitosrakentamisessa, kts. 2.3.3.		NSF/ANSI/CAN 61
Vaatimukset koneistolle	yksi varalaite, jonka kapasiteetti 20 % koko tuotantokapasiteetista	Kaikki pumput ja venttiilit yhteneviä laitoksella nykyisin käytössä olevan koneiston kanssa huollon jouhevoittamiseksi ja varaosien saatavuuden varmistamiseksi	Kunnossapitosopimus prosessitoimittajan kanssa sisältää täyden varaosapalvelun ja kalvojen vaihdon