



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Miljøvenlig produktion af sikkert indtagsvand MUDP-projekt

MUDP Rapport

September 2024

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Tore Svendsen, Aquarden Technologies ApS

Maria C. Nymann, Aquarden Technologies ApS

Christian Holst Fischer, Teknologisk Institut

Laura M. Agneessens, Teknologisk Institut

Morten Møller, ULTRAAQUA

Hagbard Clausen, Danish Clean Water

Lars Gjedde, CK Environment

Peter Hvingel, Atlantic Sapphire

ISBN: 978-87-7038-646-3

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense| Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
[MUDP's hjemmeside](#)

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Forord	5
2.	Opsummering og konklusion	6
3.	Udvikling af teknologikoncept	8
3.1	Introduktion	8
3.2	Indledende koaguleringsstest af havvand	9
3.3	Koaguleringsmidler og fiskeopdræt	11
3.4	Forbedret kontakttid mellem CIP-kemi og membraner	11
3.5	Opbygning af membranfiltreringsanlæg i pilotskala	11
4.	Forudgående koagulering før membranfiltrering	13
4.1	Effekter af forudgående koagulering	14
4.1.1	Højere effektivitet af returskylninger	14
4.1.2	Længere driftsperioder og højere behandlingskapacitet	14
4.1.3	Lavere kemikalie- og strømforbrug	16
4.2	Opmærksomhedspunkter ved koagulering	16
4.3	Elektrokoagulering	19
4.4	Driftsøkonomi af koagulering	19
5.	Bakterie- og virusfjernelse ved membranfiltrering	22
5.1	Logreduktioner af vira- og bakterier i havvand	23
5.2	Fjernelse af partikulært materiale - turbiditet	25
5.3	Membranfiltrering af havvand fra fiskeslagteri	25
6.	Implementering af sensorteknologi	27
6.1	Sensorteknologi som dokumenteringsredskab af membranfiltreringen	27
6.1.1	Turbiditet	27
6.1.2	Absorbans	28
6.1.3	Kvantificering af mikrobiel fjernelse	29
6.2	Sensorteknologi som styringsredskab	30
6.2.1	Online måling af jern	30
6.3	CIP- og koagulantrester	31
7.	CIP med klor og ozon	32
7.1	CIP med Neuthox i forhold til almindelig klor	32
7.2	CIP med ozon	35
8.	Optimering af UV-reaktor	37
8.1	Anvendelse af MS2 bakteriofag som surrogatvirus	37
8.2	Collimated Beam-test	37
8.3	UV-reaktor fra UltraAqua til virafjernelse	40
8.4	Anvendelse af resultater til optimering af UV-reaktoren	41

1. Forord

Dette er slutrapporten for projektet "Miljøvenlig produktion af sikkert indtagsvand - SafeInWater" under Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet. Projektet fik en bevilling i 2019 og blev gennemført i perioden januar 2020 til november 2021 i et samarbejde mellem Aquarden Technologies, ULTRAAQUA UV Disinfection Systems, Danish Clean Water, C.K. Environment, Atlantic Sapphire Teknologisk Institut.

Projektets styregruppe bestod af:

- Tore Svendsen, Aquarden Technologies
- Morten Møller, ULTRAAQUA UV Disinfection Systems
- Hagbard Clausen, Danish Clean Water
- Lars Gjedde, C.K. Environment
- Christian Holst Fischer, Teknologisk Institut

Formålet med projektet var at udvikle et samlet, miljøeffektivt teknologikoncept, der kan levere vand af høj hygiejnisk kvalitet til opdræts- og fiskeindustrien.

2. Opsummering og konklusion

Projektet omfatter optimering, udvikling og demonstrering af et samlet teknologikoncept til at producere højkvalitetsvand til opdræts- og fiskeindustrien fra havvand. Teknologikonceptet beror på membranfiltrering (mikrofiltrering) efterfulgt af UV-behandling, der til formål at sikre fjernelsen af bakterier og virus ved den lavest mulige omkostning og miljøpåvirkning.

Optimering af membranfiltrering

I projektet er der arbejdet med en række indsatsområder, som har til formål at optimere driften af membranlægget. Disse er opsummeret i de nedenstående afsnit. Overordnet set bevirker de udviklede tiltag, at omkostningerne, som er forbundet med membranfiltreringen, er reduceret med 28 %, hvilket skyldes en øget behandlingskapacitet og mindre nedetid samt en reduktion i CIP-kemi med 98 % (se TABEL 1).

Forudgående koagulering øger flux og reducerer CIP

For at udvikle og optimere på teknologien under realistiske forhold blev der opstillet et pilotanlæg ved Atlantic Sapphire. Anlægget blev driftet over en periode på ni måneder under forskellige forudgående koaguleringskoncentrationer. Drift med koagulering forud for filtreringen viste positiv effekt på driften sammenlignet med driften uden koagulering. Med forudgående koagulering blev der opnået en højere genvinding af suetrykket efter hver returskylning. Endvidere medvirkede koaguleringen til, at suetrykket over membranen blev reduceret mindre over tid, hvilket resulterede i en længere driftsperiode og en øget produktionskapacitet samt et lavere forbrug af både CIP-kemi og strøm til pumpning. Desuden bevirkede koaguleringen, at membranlægget kun krævede CIP 1-2 gange pr. måned frem for 1-2 gange pr. uge. Brugen af koagulant viste sig - ved projektets anvendte koagulantkoncentrationer - ikke at kompromittere kvaliteten af indtagsvandet i forhold til jernkoncentration i det producerede vand.

Minimering af CIP-kemikalier og brug af alternative grønne CIP-kemikalier

Til at reducere forbruget af CIP-kemi, blev der udviklet en effektiv CIP-spraydoseringstype der kun krævede 8 % af volumen i forhold til den normalvis anvendte CIP-metode. Udover at minimere CIP-forbruget bevirker den nyudviklede metode, at nedetiden i forbindelse med CIP-proceduren minimeres.

I projektet er det endvidere undersøgt, om CIP-kemikalier produceret on-site kan anvendes i stedet for konventionelle CIP-produkter (klor, base, syre), som skal indkøbes udefra. Der er således gennemført flere forsøg med Neuthox (Danish Clean Water), som er en klorholdig væske. Neuthox med spraydosering og konventionel neddykning viste ingen genvinding af suetrykket, hvorimod ca. 90 % genvinding af suetrykket var mulig ved anvendelse af konventionel klor (formodentligt grundet den højere koncentration). I tillæg er der gennemført CIP-behandling af membranlægget med ozon, som viste sig at være meget effektiv. Rensningseffekten med ozon var afhængig af ozoneringstiden. Dog er det kun nødvendigt med en behandlingstid på få minutter, som sammenlignet med konventionel CIP-procedure er meget kort (timer).

Økonomiske og miljømæssige fordele ved forudgående koagulering og CIP-spraydosering

De driftsmæssige fordele medført af brugen af forudgående koagulering og CIP-spraydosering blev sammenholdt med membranfiltreringen alene (opsummeret i TABEL 1). Heraf

viste koaguleringen alene at kunne øge anlæggets volumenmæssige behandlingskapacitet med 48 %, mens prisen pr. behandlet volumen blev reduceret med 27 %. CIP-spraydoseringen alene bevirkede en relativt lille øgning af den volumenmæssige kapacitet med 4 % og en mindre reduktion på 14 % af prisen pr. volumen vand behandlet. Derimod bidrager metoden til en øget miljøgevinst, da der bruges 92 % mindre CIP-kemikalier. Kombinationen af koagulering og CIP-spraydoseringen kan dermed betragtes som en rentabel løsning til at sænke omkostningerne og øge bæredygtigheden af driften af membran anlægget.

TABEL 1. Opsummering af økonomien ved drift af membranen alene med forudgående koagulering, CIP-spraydosering og med forudgående koagulering og CIP-spraydosering.

	Membranen alene	Forudgående koagulering	CIP-spraydosering	Med koagulering og CIP-spraydosering
Behandlingskapacitet (m ³ /år)	817.600	48 % ^{a)}	4 % ^{a)}	49 % ^{a)}
CIP-omkostning (kr./år)	kr. 124.391	75 % ^{b)}	91 % ^{b)}	98 % ^{b)}
Omkostninger pr. m ³ vandbehandlet	kr. 1	27 % ^{b)}	14 % ^{b)}	28 % ^{b)}

a) Den procentuelle stigning relativ til case 1.

b) Den procentuelle reduktion relativ til case 1

Effektiv reduktion af bakterier og partikler, men ikke af virus

Membranens evne til at fjerne bakterier og partikler blev undersøgt, ikke kun under pilotforsøgene ved Atlantic Sapphire, men også ved pilottest på havvand fra andre lokationer. Forsøgene viste overordnet set en bakteriereduktion på log 3-4 (99,9-99,99 %), og at turbiditeten var lavere end 0,4 FNU uanset indløbsturbiditeten. Derimod blev der kun målt en begrænset reduktion af virus (MS2 bakteriofag) på membran anlægget (<90 %).

Dokumentering af vandkvalitet og driftsoptimering ved implementering af sensorer

Med henblik på at monitorere vandkvaliteten og optimere driften af membran anlægget blev der afprøvet en række sensorer, herunder turbiditet, absorbans og bakterier (flow cytometri). Sensorerne viste sig dog uegnede til at måle på vandet ved Atlantic Sapphire, idet det indgående vand har en meget høj kvalitet. Derimod viste testene med andre havvandskvaliteter, at fx turbiditet kan anvendes som indikation for membranintegritet. I projektet blev der ligeledes indarbejdet en online jernsensor (10-500 PPB) til monitorering af jernindhold (rester fra koagulering) i det producerede vand.

Endelig blev data fra membran anlægget anvendt moduleret, med det formål at kunne anvendes til styring af den forudgående koagulering.

Optimeret UV-behandling

Til generering af UV-dosis-respons-data blev der udviklet en Collimated Beam Test-forsøgsopsætning, hvor logreduktionen af virus blev målt med UV ved forskellige eksponeringstider. Herunder blev MS2 bakteriofagen anvendt som surrogat virus. Med udgangspunkt i de generede UV-dosis-respons data fra MS2 bakteriofagen, blev der gennemført en række optimeringsforsøg med en UV-reaktor ved forskellige driftsbetingelser. Forsøget viste en lineær sammenhæng mellem Reduction Equivalent Dose og middelopholdstid. Resultaterne vil blive anvendt til at validere 3D-multifysik-modellering af UV-reaktorer til brug for fremtidig dimensionering, udvikling og optimering af ULTRAAQUA's UV-reaktorer.

3. Udvikling af teknologikoncept

3.1 Introduktion

Som følge af det globalt stigende befolkningstal forventes den samlede madproduktion at skulle øges med 60 % inden 2050. Siden 1961 har den årlige vækst af fiskekonsum været dobbelt så høj som tilvæksten af mennesker på jorden. Tilvæksten har siden midten af 1980'erne udelukkende været forårsaget af en stigning i mængden af fisk, som produceres fra opdræt, og denne udvikling forventes at fortsætte i de kommende år.

På trods af at fiskeproduktion er meget effektiv i forhold til udnyttelse af foder, udledes der store mængder næringsstoffer til det omkringliggende nærmiljø. For at minimere denne miljøpåvirkning arbejdes der intensivt med at flytte produktionen på land, hvor næringsstofferne fra vandet kan renses. I mere udviklede lande er der inden for de seneste år bygget og projekteret mange landbaserede systemer til koldvandsopdrættede fisk, mens tendensen i Asien er en kraftig modernisering af tidligere jorddamssystemer til intensivt recirkuleret varmtvandsopdræt. Fælles for alle systemer er en øget intensitet med en kraftig stigning i biomasse og en øget fokus på hygiejne for at undgå sygdom og dødelighed i bestanden.

En af de største trusler i forhold til sygdom og dødelighed er indtagsvandet, som er vand pumpet ind fra havet. Der er imidlertid stor usikkerhed omkring den mikrobiologiske kvalitet af vandet, og der er derfor behov for robuste vandbehandlingssystemer til at minimere denne trussel. På nuværende tidspunkt foretages der mange steder en simpel sigtning af vandet, hvilket alene fjerner større partikler, og derfor ikke udgør en effektiv barriere i forhold til visse biologiske agenser. Tilsvarende er fødevarerindustrien kendt for sit meget store forbrug af ferskvand til forskellige dele af produktionen. Fødevarerindustri i fiskerisektoren er ofte fysisk placeret i nærheden af havet, og det er oplagt at anvende denne ressource, fx til transport af fisk. Inden for både saltvandsdambrug og fiskerisektoren er man afhængig af indtagsvand af ekstremt høj kvalitet, da konsekvenserne af dårlig kvalitet er katastrofale.

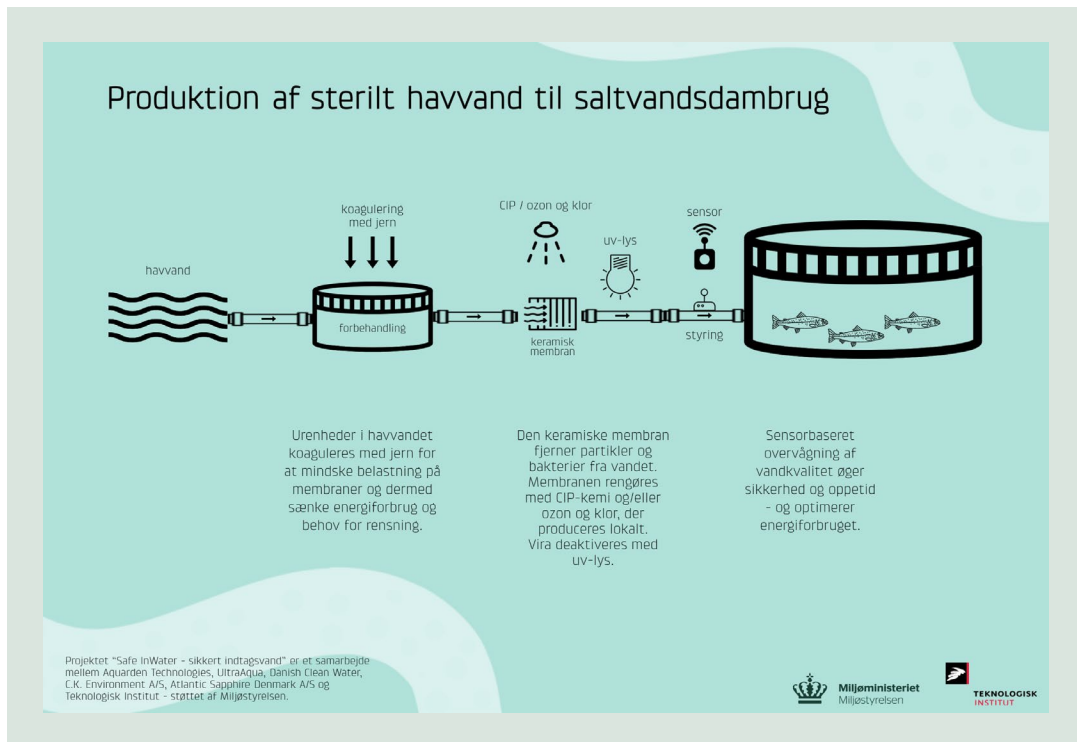
I projektet er der derfor arbejdet med at udvikle et samlet teknologikoncept, bestående af membranfiltrering og efterfølgende UV-behandling, der kan levere vand af høj hygiejnisk kvalitet til opdræts- og fiskeindustrien, og som i forhold til eksisterende løsninger:

- Sikrer fjernelse af bakterier, parasitter og virus i filtreringen og den efterfølgende UV-behandling
- Minimerer fouling af membraner og reducerer mængden af CIP-kemi (Cleaning In Place, CIP) gennem optimal kontakttid til membraner, hvormed omkostninger, miljøbelastning og nedetiden på anlægget reduceres
- Erstatte skrap CIP-kemi med miljøvenlige alternativer til rengøring af membraner, som produceres on-site.

Membranfiltrering af havvand er ikke nogen ny teknologi, men p.t. findes der ikke et samlet teknologikoncept som adresserer problemstillingerne ift. indtagsvand til fiskeopdræt.

I forhold til eksisterende membranfiltreringsanlæg var det målet med projektet at indarbejde en række tiltag i det samlede teknologikoncept, som sikrer kvaliteten af vandet, reducerer omkostningerne til og miljøpåvirkningen af CIP-procedurene, reducerer nedetiden på anlægget og dermed driftsomkostningerne. Det overordnede teknologikoncept er skitseret i den nedenstående figur.

Hovedparten af udviklingen er sket med udgangspunkt i et udviklet pilotskalaanlæg, som blev opstillet ved Atlantic Sapphire. Dette skyldes, at langtidseffekter og stabilitet kunne undersøges under realistiske forhold. Forud for opbygning af pilotanlægget blev der gennemført en række aktiviteter med det formål at generere den nødvendige information/viden. Disse aktiviteter er beskrevet i de nedenstående afsnit.



FIGUR 1. Oversigt på teknologikoncept.

3.2 Indledende koaguleringsstest af havvand

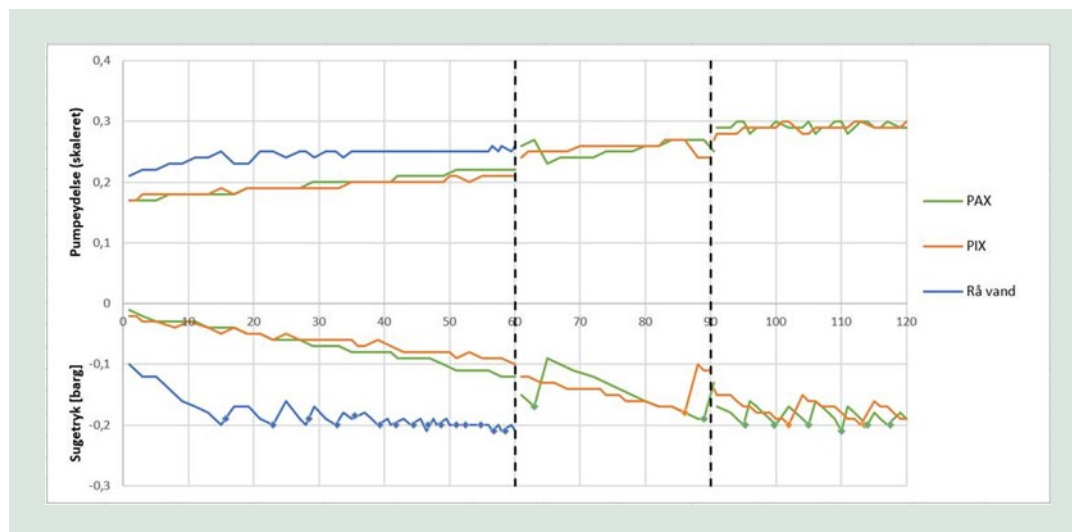
Den store udfordring i anvendelse af membraner er tilstopning (fouling), som giver mindre flow, og som medfører yderligere kemisk rengøring (CIP). Foulingpotentialet af det indgående vand blev forsøgt ændret igennem koagulering med det formål at øge flux og gøre rengøringen (CIP) og returskyl af membranerne mere effektivt. Anvendelsen af koagulering forud for membranfiltreringen har tidligere vist sig effektiv i forhold til filtrering af overfladevand til drikkevand, men er ikke tidligere blevet anvendt til behandling af havvand, der anvendes som indtagsvand.

For at undersøge effekten af et koaguleringsstrin og for at generere data til dimensioneringen af koaguleringsstrinnet på pilotanlægget blev der gennemført en række membranfiltreringsforsøg med og uden forudgående koagulering på havvand fra Frederiksværk Havn. Havvandet fra Frederiksværk Havn blev valgt grundet et højt indhold af organisk materiale, hvilket bidrager til foulingpotentialet. Forsøgene blev gennemført på et mindre membranfiltreringsanlæg med et membranareal på ca. 1 m² ved dosering af de uorganiske koagulanter jernklorid og aluminiumklorid (PIX og PAX) ved en koagulantdosering på 50 g/m³. I FIGUR 2 er pumpeydelsen og sugetrykket vist som funktion af tid. I den første periode er flux sat til 100 l/time og i de efterfølgende to perioder til hhv. 125 l/time og 150 l/time. Havvandet uden forudgående koagulering (råvand) er kun gennemført for den første periode pga. hurtig fouling. Når sugetrykket falder til -0,2 bar, aktiveres et returskyl af membranerne (markeret med en firkant på figuren). Efter hvert forsøg er membranerne rengjort (CIP-proces med syre/base/klor) og før hvert forsøg er rentvands-fluxen målt for at sikre, at udgangspunktet er det samme.

Der observeres et betydeligt hurtigere fald i sugetrykket for det havvand, som ikke er koaguleret. Således gennemføres der i den første time 15 returskylninger for det ikke-koagulerede havvand, hvorimod der ikke gennemføres nogen returskylninger for det havvand, som er koaguleret med PIX/PAX (se TABEL 2). I de efterfølgende perioder øges antallet af returskylninger pga. den øgede flux. Der observeres et lavere antal returskylninger for det havvand, som er koaguleret med jernklorid (PIX) i forhold til aluminiumklorid (PAX).

Der observeres desuden en øget effekt af returskylningerne, når vandet er koaguleret (større effekt på genvinding af sugetrykket) i forhold til returskylningerne af det havvand, som ikke er koaguleret. Dette kunne indikere, at det organiske materiale ikke penetrerer så dybt ind i membranen, når havvandet er koaguleret. Der er ikke den store forskel mellem PIX og PAX, dog observeres der lidt færre returskylninger i de sidste to perioder ved anvendelse af PIX i forhold til PAX.

I forbindelse med forsøgene blev der udtaget vand fra indgående vand og af permeatet for at dokumentere, om indholdet af jern/aluminium stiger pga. den tilsatte koagulant. Overordnet set observeres der en mindre reduktion i aluminium- og jernkoncentrationen, når det ikke-koagulerede havvand membranfiltreres. Derimod observeres der en mindre stigning (20 %) i jernkoncentrationen i permeatet, når jernklorid doseres, og en markant stigning (200 %) i aluminiumkoncentrationen i permeatet, når aluminiumklorid doseres (data ikke vist). De målte koncentrationer er dog væsentligt lavere end grænseværdierne for indholdet af jern/aluminium for fiskeopdræt (se afsnit Opmærksomhedspunkter ved koagulering). Det kan ikke afvises, at der er overdoseret jern/aluminium.



FIGUR 2. Pumpeydelse og sugetryk ved membranfiltrering uden koagulering (Rå vand) og med koagulering (PIX og PAX).

TABEL 2. Antal returskylninger i perioderne uden forudgående koagulering (rå vand) og med koagulering (PIX og PAX).

	0 – 60 minutter (100 L/h)	60 – 90 minutter (125 L/h)	90 – 120 minutter (150 L/h)
Rå vand	15	-	-
PIX	0	1	2
PAX	0	2	6

3.3 Koaguleringsmidler og fiskeopdræt

Anvendelse af koaguleringsmidler forud for filtreringen vil bevirke, at den fraktion, som ikke bindes til partiklerne og dermed tilbageholdes på membranerne, vil være til stede i permeatet (produceret indtagsvandet). Det er derfor vigtigt, at koncentrationerne af koagulant i permeatet ikke kompromitterer den efterfølgende anvendelse, idet et forhøjet indhold af jern og aluminium i vandet kan have negative eller skadelige effekter på fisk.

Der blev indledningsvis taget kontakt til relevante fagpersoner, ligesom der blev indhentet data fra relevante toksikologiske studier, herunder de publicerede vandkvalitetsparametre for opdræt fra det norske fødevareministerie.

Undersøgelsen viste, at koncentrationen bør være mindre end 5 ppb labil aluminium, 50 ppb totalt aluminium og 250 ppb jern.

Den tilladte koncentration af aluminium er således noget lavere end den tilladte koncentration af jern. Desuden blev den umiddelbare effekt af PIX også bedre end effekten af at tilsætte PAX. Således blev det besluttet af arbejde videre med PIX-dosering i de efterfølgende forsøg.

3.4 Forbedret kontakttid mellem CIP-kemi og membraner

Traditionel CIP udføres ved, at membrantanken tømmes for vand og fyldes med en enten sur eller basisk rensesvæske, hvorefter membranerne henstår neddykket i en periode. Denne metode er meget effektiv til at genskabe membranernes flux, men kræver store mængder kemi og vand. I projektet blev effekten undersøgt af at spraye kemien ud over membranerne for derefter at gøre dem fugtige. Disse forsøg viste desværre ikke en tilstrækkelig effektivitet. Membranerne er, som tidligere beskrevet, udført i keramik og tåler både alle typer kemi og en hårdhændet fysisk påvirkning. Med udgangspunkt i hvordan almindelig køkkenkeramik rengøres, blev der udviklet et system, som minder meget om de systemer, der anvendes i en traditionel opvaskemaskine. I stedet for at neddykke membranerne blev der med en specialdyse sprayet en kraftig rengøringsopløsning ud over membranerne, og som noget nyt blev denne herefter recirkuleret over membranerne. På denne måde var det muligt at simulere en komplet neddykning, men kun anvende cirka 8 % af den tidligere CIP-kemi volumen. Som en yderligere fordel ved den mindre vandmængde var det nu også muligt at anvende varmt vand, da det var meget mindre væskemængder, der skulle anvendes. Effektiviteten af CIP øges mange gange ved øget temperatur, helt tilsvarende forskellen på at vaske op i koldt og varmt vand. Der blev udført en række forsøg med denne teknik hos Aquarden med meget lovende resultater, og teknikken blev derfor indbygget i pilotanlægget (se beskrivelse herunder).

3.5 Opbygning af membranfiltreringsanlæg i pilotskala

Teknologien baserer sig på en ny teknologi, nemlig danskproducerede, keramiske flat sheet-membraner, der sikrer en stor robusthed af anlægget.

Membrananlægget, der blev anvendt til projektet, blev opbygget i PP-plastik og udført på en metalramme. På billedet herunder ses anlægget under lastning. Membranerne er flat sheet-membraner, som neddykkes i vandet, og selv filtreringen foregår ved, at vandet suges igennem membranerne. Til selve filtreringen anvendes en traditionel pumpe, og trykket på tryksiden af pumpen anvendes til at pumpe vandet videre fra membrananlægget.

I forhold til et traditionelt sugefiltreringsanlæg er der implementeret en række nye features, der sikrer mere stabil drift af anlægget, herunder:

- Automatisk system til evakuering af membranerne. Et af de største problemer med neddykkede membraner er luft i systemerne. Luft medfører, at sugepumpen har svært ved at suge an og derfor kommer til at kavitere. På membrananlægget blev der

installeret en tryklufdsdrevet injektor, som ved opstart anvendes til at evakuere systemet.

- Automatiseret CIP-anlæg. Som beskrevet ovenstående blev der udviklet et nyt system til CIP, hvor CIP-væsken recirkuleres over tanken. Der blev testet en række dyser til denne "spray-CIP" og fundet dyser, som spreder tilstrækkeligt, samtidig med at lysningen er stor nok til at undgå tilstopning
- Implementering af flow/tryk-mode. I traditionel filtrering arbejdes normalt med at opretholde et specifikt flow fra anlægget, men i takt med at membranerne tilstoppes, skal pumpen arbejde hårdere og hårdere for at opretholde dette flow. Dette medfører et højere og højere tryk i systemet, og erfaringer har vist, at der findes en grænse, hvor foulingen bliver irreversibel. Der blev derfor implementeret et styringsmode, hvor anlægget automatisk skiftede fra flow til trykstyring i takt med fouling.



FIGUR 3. Opsætning af pilotanlæg ved Alantic Sapphire.

Det anvendte membranlæg anvendte 5 af Cembranes standardmoduler med hvert et areal på 6 m², så der samlet var 30 m² i anlægget. Anlægget har en maksimal kapacitet på 11 m³ i timen. Under almindelige driftsforhold blev anlægget drevet ved et væsentligt lavere flow.

Anlægget, der er udrustet med en PLC-styring med online adgang, blev under forsøgene løbende fulgt fra Aquarden. Data blev logget fra anlægget og anvendt til senere dataanalyse.

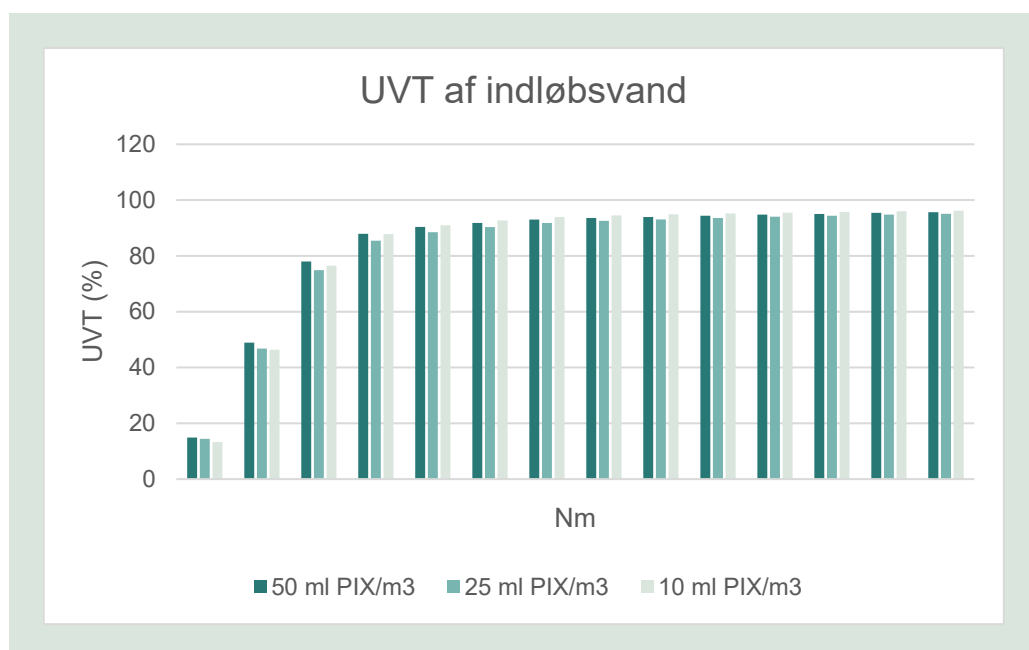
4. Forudgående koagulering før membranfiltrering

Det udviklede pilotmembranfiltreringsanlæg (beskrevet i afsnit Opbygning af membranfiltreringsanlæg) blev over en periode på 9 måneder anvendt ved Atlantic Sapphire, mhp. at udvikle og optimere teknologikonceptet. I perioden blev der gennemført fire forsøgsperioder, hvor mængden af koagulant blev varieret:

- Igen koagulant
- 50 ml/m³ koagulant
- 25 ml/m³ koagulant
- 10 ml/m³ koagulant.

Hver periode var på minimum fem uger, med det formål at opnå flere CIP-sekvenser (anlægget CIP-behandles en gang om ugen) og se eventuelle langtidseffekter. Herudover blev der løbende eksperimenteret med at anvende sensorteknologi som dokumenterings- og styringsredskab (se kapitel Implementering af sensorteknologi), og der blev gennemført forsøg med nye CIP-procedurer og kemikalier (se kapitel CIP med klor og ozon).

For alle perioder er der løbende udtager prøver af det indgående vand og af det producerede indtagsvand (permeat). Turbiditet samt UV-absorbans (210-700 nm) er blevet bestemt af de udtagne prøver. Med udgangspunkt i UV-absorbansen er UV-transmittansen (UVT) beregnet. I FIGUR 4 er den gennemsnitlige UVT (gennemsnit af min. 6 prøver for hver periode) for de tre perioder med dosering af PAX vist. Der observeres kun mindre variationer i kvaliteten af det indgående vand, hvilket gør det muligt at sammenligne driften af membrananlægget over de fire perioder.



FIGUR 4. UV-transmittans af indløbsvandet i de forskellige driftsperioder.

4.1 Effekter af forudgående koagulering

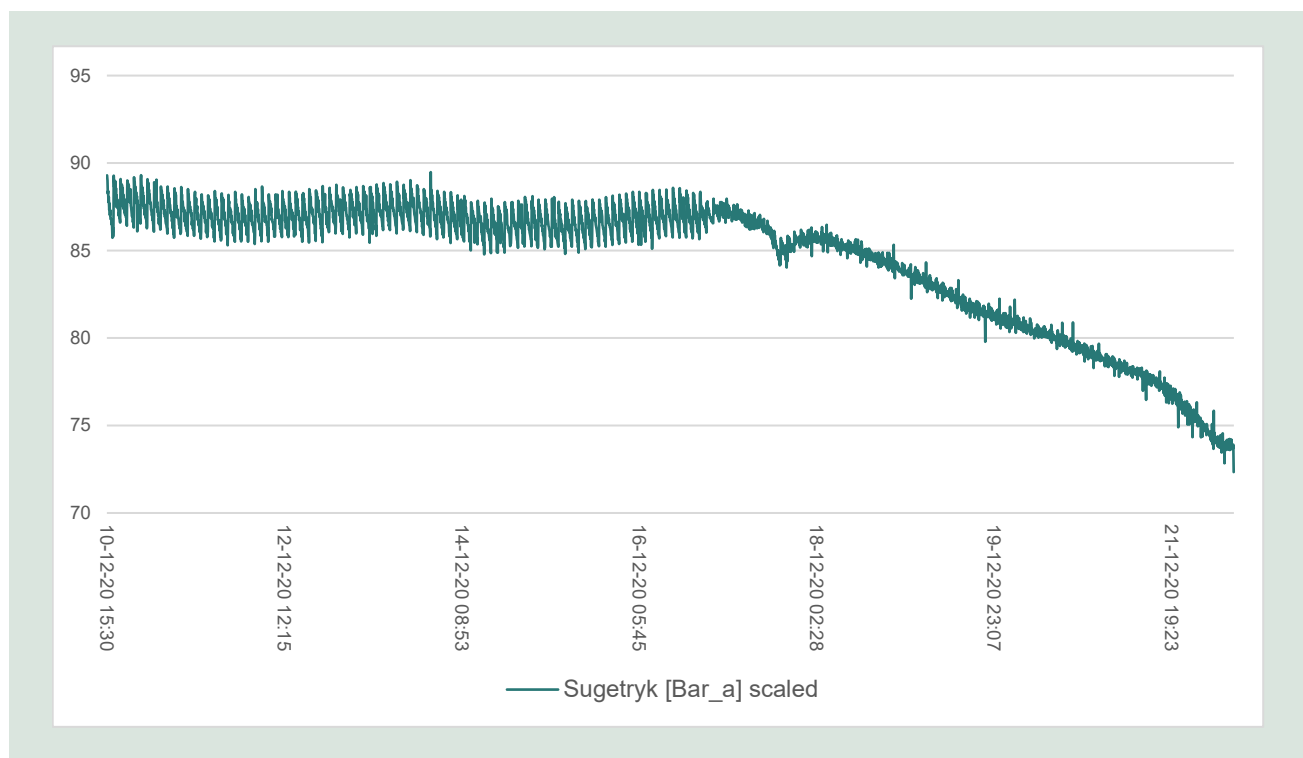
Som allerede vist ved de indledende membranfiltreringsforsøg, har den forudgående koagulering en meget positiv effekt på driften af membranfiltreringsanlægget. Således observeres der for alle afprøvede doseringsniveauer af koagulant en forbedret drift membranfiltreringsprocessen ift. perioden uden tilsætning af koagulant, hvilket bl.a. kan ses ved:

- Højere effektivitet af returskylninger
- Længere driftsperioder og højere behandlingskapacitet
- Lavere kemikalie- og strømforbrug

4.1.1 Højere effektivitet af returskylninger

Membrananlægget returskylles kortvarigt hver halve time for at løsrive materiale, som sidder løst bundet til membranarealet. For alle perioder med dosering af koagulant observeres der en positiv effekt af returskylningen i form af genvinding af sugetryk. Dette er illustreret i den nedenstående graf, hvor koaguleringen blev afbrudt 17-12. I perioden med koagulering (10-12 til 17-12) genvindes sugetrykket efter hver returskylning, hvorimod effekten af returskylning er meget begrænset i perioden (17-12 til 21-12). Den manglende effekt af returskylningen bevirker, at sugetrykket falder kraftigt i den efterfølgende periode.

Den egentlige årsag til, at koaguleringen påvirker effektiviteten af returskylningen, kendes ikke, men kunne muligvis være forårsaget af, at det partikulære materiale ikke penetrerer så dybt ind i membranen, idet de koagulerede partikler forventeligt er større.



FIGUR 5. Sugetryk ved konstant flow. Den 17/12 doseres der ikke længere koagulant, hvorefter sugetrykket stiger (undertryk).

4.1.2 Længere driftsperioder og højere behandlingskapacitet

Der logges allerede løbende en række data fra membranlægget, herunder pumpebelastning og sugetryk. Pumpebelastningen/sugetrykket kombineret med fluxdata giver et øjebliksbillede af, hvor tilstoppet/foulet membranen er på et specifikt tidspunkt, og udviklingen over tid giver samtidig et indblik i, hvor belastet vandet.

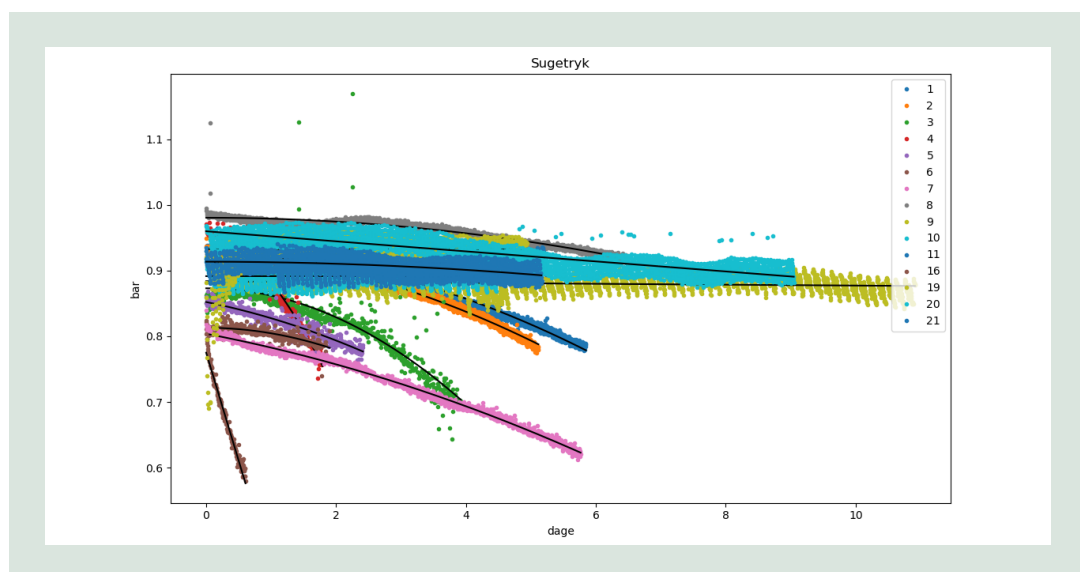
Data for sugetryk/pumpebelastningen fra de fire forsøgsperioder er anvendt til at beskrive effekten af koaguleringen ved at fitte data til et andengradspolynomie:

$$f(t) = a t^2 + b t + c,$$

hvor t er tidsforskellen fra seneste CIP-sekvens. Andengradspolynomiet er valgt, da hældningen både for pumpeeffekten og sugetrykket accelererer over tid. C-værdien vil angive, hvor effektivt den gennemførte CIP-sekvens har været ift. at genvinde sugetrykket/pumpebelastningen. B-værdien i et andengradspolynomium angiver ændringen (hældning) lige efter CIP-sekvensen, og dermed hvor hurtigt foulingen sker i starten. A-værdien angiver, hvor hurtigt accelerationen sker over tid. Ved fitning er det valgt, at $a \geq 0$ og $b \geq 0$ for pumpeeffekten og $a \leq 0$ og $b \leq 0$ for sugetrykket.

Der er udført et fit af data for pumpeeffekt og sugetryk til et andengradspolynomie for størstedelen af de gennemførte perioder mellem CIP-sekvenser. Enkelte er dog ikke inkluderet pga. gennemførelse af andre forsøg, som påvirker data, eller mindre problemer med pilotanlægget. Generelt er spredningen af datapunkterne på sugetrykket mindre end for pumpeeffekten, hvorfor data fra pumpeeffekten er udeladt fra rapporten. Overordnet set er effekterne på sugetryk og pumpeeffekt ens for perioderne (blot med modsat fortegn).

I FIGUR 6 er sugetryk som funktion af tid (angivet som dage fra seneste CIP) og resultaterne samt standardafvigelse for fittene er angivet i TABEL 3.



FIGUR 6. Sugetryk som funktion af tid (angivet som dage fra seneste CIP). 1-21 angiver de forskellige driftsperioder.

TABEL 3. Konstanter i 2.gradspolynomium i de forskellige driftsperioder.

Sugetryk						
PIX (ml PIX/m3)	a	std a	b	std b	c	std c
0	-8,92E-3	3,72E-3	-4,63E-2	3,46E-3	0,88	1,18E-3
25	-2,59E-4	2,14E-4	-2,55E-3	1,17E3	0,94	1,40E-3
50	-1,38E-15	1,56E-4	-2,23E-4	8,31E-4	0,896	9,97E-4

Uden koagulering observeres der kraftige og accelererende fald i sugetrykket, hvorimod sugetrykket kun falder meget langsomt, når vandet er koaguleret (se FIGUR 6). Dette kan ligeledes

aflæses på de A-værdien og B-værdien, som er betydelig mindre negativ både for perioden, hvor der doseres 25 ml PIX/m³, og for perioden, hvor der doseres 50 ml PIX/m³, sammenlignet med perioden, hvor der ikke doseres PIX. Der observeres på tilsvarende vis en mindre effekt af 25 ml PIX/m³ og 50 ml PIX/m³, hvilket med tydelighed viser, at data fra sugetrykket vil kunne anvendes til at regulere/styre den forudgående koagulering.

Overordnet set betyder dette, at driftsperioderne imellem hver CIP-sekvens kan være meget længere. Med den testede vandkvalitet var det muligt at reducere frekvensen fra 1-2 gange pr. uge til 1-2 gange pr. måned. Ved hver CIP-sekvens, som varer adskillige timer, produceres der ikke indtagsvand (permeat). En reduktion i CIP-frekvensen fra 1 gang pr. uge til 1 gang pr. måned vil resultere i en kapacitetsforøgelse på næsten 3 % pga. den reducerede nedetid af membrananlægget. Endvidere anvendes der et lavere sugetryk, og dermed strømforbrug på pumpen, for at producere det behandlede vand.

4.1.3 Lavere kemikalie- og strømforbrug

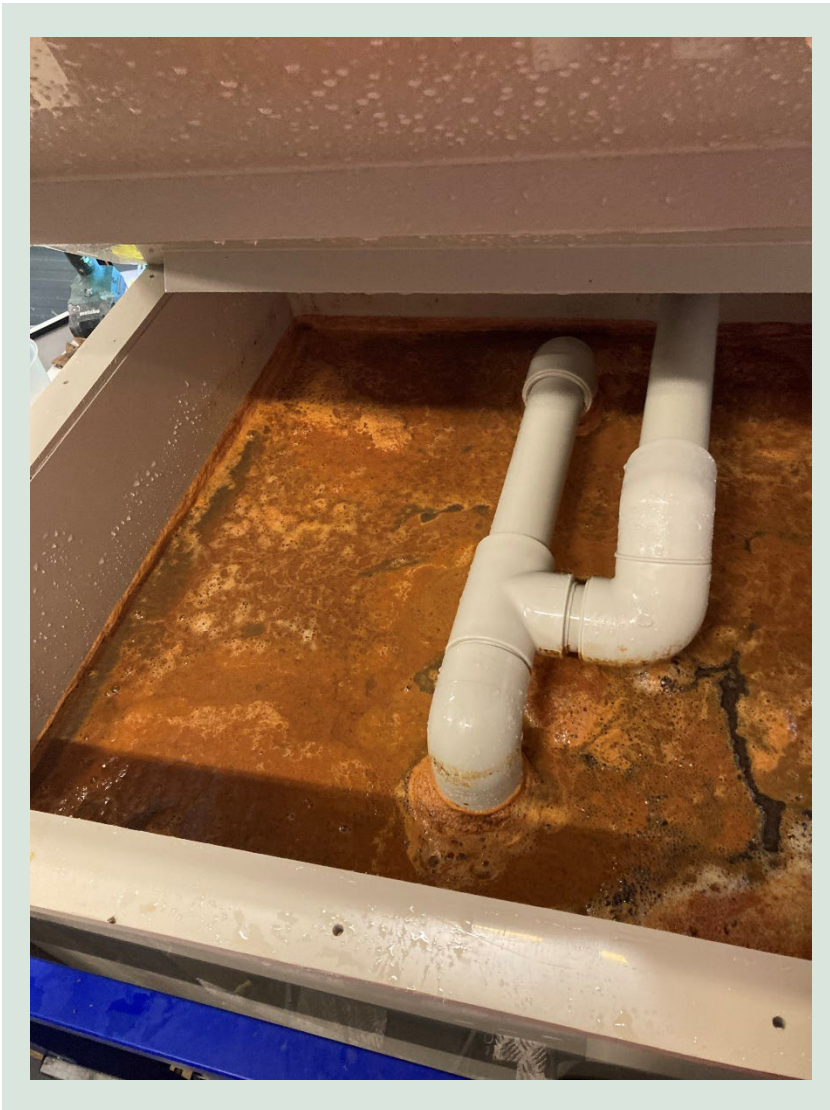
Ved hver CIP-sekvens bruges der betydelige mængder af syre og klor. Med den ovenstående reduktion i CIP-frekvensen vil mængden af CIP-kemi således kunne reduceres med 25-50 %, hvilket både vil være en økonomisk og miljømæssig gevinst. Endvidere anvendes der opvarmet CIP-kemikalier, hvorfor det samlede energiforbrug også påvirkes af en lavere CIP-sekvens.

4.2 Opmærksomhedspunkter ved koagulering

Den gennemførte pilotafprøvning med forudgående koagulering har ligeledes genereret en vigtig erfaring ift. driften af membrananlægget. Således er der undervejs blevet ændret på en række parametre i forhold til, hvordan membrananlægget normalvis driftes, hvilket bl.a. indbefatter:

Højere udskiftning af vand efter returskyllning

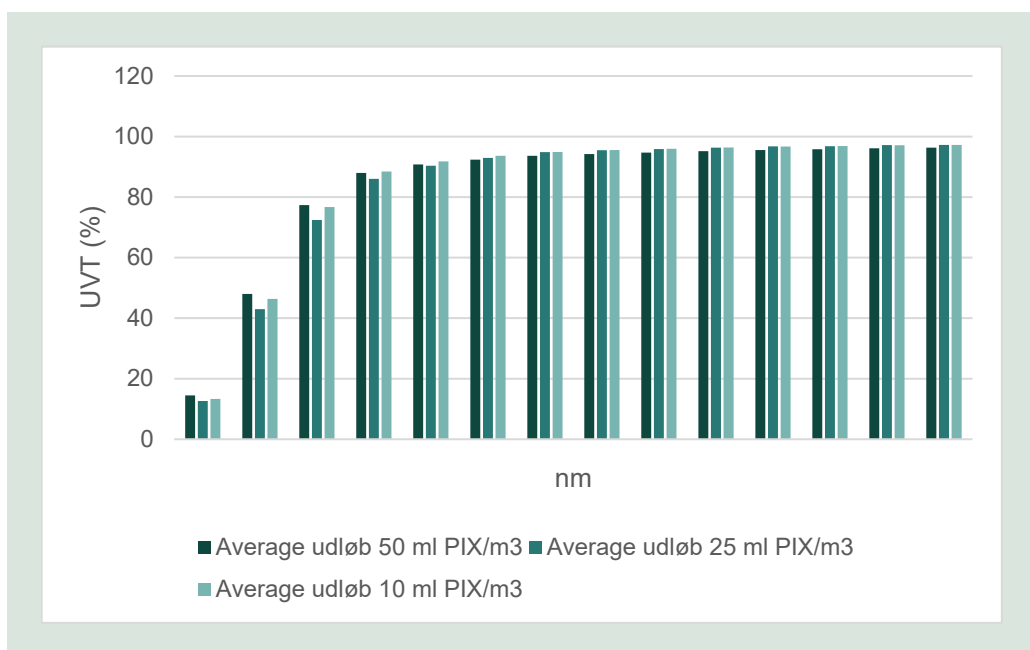
Idet der doseres koagulant til det indgående vand, dannes der slamflokke. Disse har tendens til at blive i membrananlægget. For at minimere ophobning af slamflokkene, har der været nødvendigt at øge mængden af vand, som fjernes fra membrankammeret, efter hver returskyllning (se FIGUR 8).



FIGUR 7. Membrankammer med tydeligt lag af jern i overfladen.

Effekt på UV-transmittans ift. og fouling af UV-reaktor

Det er af stor vigtighed, at koaguleringen ikke har nogen negativ indvirkning på den efterfølgende UV-behandling, hvilket kunne forekomme, hvis UV-transmittansen reduceres, eller der opstår en jernfouling af UV-reaktoren. I den nedenstående figur er UV-transmittansen vist for det behandelende vand i de tre perioder med dosering af jern. Tages spredningen på data i betragtning, observeres der ingen forskel i UV-transmittansen for de tre perioder.



FIGUR 8. UV-transmittans af indtagsvandet (permeat) i de forskellige driftsperioder.

Undersøgelse af UV-reaktor efter pilotperiode

Fænomenet fouling af UV-reaktoren er betydende for UV-lysets gennemsligtighed på det omkringliggende kvartsglas, som beskytter selve UV-lampen. Efter endt pilotperiode, skulle der foretages foulingtest af reaktoren for at konkludere, om der har været en væsentlig foulingfaktor i perioden. Til undersøgelse af fouling blev kvartsrøret, som har været i brug i pilotperioden, monteret i en testreaktor. I denne testreaktor indsættes en testlampe, som gennemlyser kvartsrøret, og dermed kan der observeres en UV-intensitet. Efterfølgende bliver et fabriksnyt kvartsrør monteret, og samme test udføres. Testen viste en foulingfaktor på 6 %, hvilket ikke anses for en problematisk faktor.

Forøgelse i jernkoncentration

I forbindelse med pilotforsøgene er der løbende udtaget prøver, hvor jernkoncentrationen af det indgående og producerede indtagsvand (permeat) løbende er blevet bestemt (ICP-MS). Langt størstedelen af prøverne er, for både det indgående vand og permeatet, under detektionsgrænsen på 2 µg/l (2 ppb), hvilket er en faktor 100 under den tilladte værdi for jern i forhold til lakseopdræt (se afsnit Koaguleringsmidler og fiskeopdræt). For to prøvetagningstidspunkter observeres der en mindre stigning i jernkoncentration fra indløb til permeat: <2 ppb til 20 ppb (50 ml PIX/m³) og fra 9 ppb til 34 ppb (25 ml PIX/m³). Begge permeatkoncentrationer er dog stadig væsentligt (faktor 7-10) under grænseværdien for lakseopdræt.

TABEL 4. Jernindhold i det producerede indtagsvand (permeat).

PIX-dosering		ug Fe/l (ppb)
50 ml/m ³	Indløb 12/10	<2
	Udløb 12/10	20
	Udløb 4/12	<2
	Udløb 21/21	<2
25 ml/m ³	Indløb 15/1	9
	Udløb 15/1	34
	Udløb 5/2	<2
	Udløb 26/2	<2
10 ml/m ³	Indløb 12/3	<2
	Udløb 12/3	<2
	Udløb 22/3	<2
	Udløb 7/4	<2

Brug af syre til CIP

For at forbedre effektiviteten af CIP-sekvensen blev der i pilotforsøgene arbejdet med at tilføje membranlægget en syrebehandling. Forsøgene viste, at dette har en positiv indvirkning, når der anvendes koagulering med PIX. Dette formodes at være forårsaget af en forbedret udvaskning af jern grundet den øgede opløselighed i surt miljø.

4.3 Elektrokoagulering

Kemisk koagulering med FeCl₃ inkluderer en række fordele, der som tidligere nævnt indbefatter højere effektivitet af returskylninger, længere driftsperioder og reduktion i forbruget af CIP-væsker. Derimod er ulemperne ved kemisk koagulering ofte associeret med en højere slamflokproduktion (nævnt tidligere i Opmærksomhedspunkter ved koagulering) og forbruget af selve koagulanten. Elektrokoagulering (EK) er et alternativ til de mere konventionelle kemiske koaguleringsmetoder, der er baseret på tilsætningen af jern eller aluminiumsalte. EK baseres på elektrolytisk oxidering af et anodemateriale af jern eller aluminium neddykket i vandet, der resulterer i frigivelsen af de tilsvarende metalioner til opløsningen. Sammenlignet med kemisk koagulering har EK vist 1) at kunne producere mindre slamflokke, 2) ikke at være afhængig af brugen af kemiske koagulanter, 3) ikke at ændre den overordnede pH i opløsningen og 4) at kræve lavere vedligeholdelse. Således er EK et alternativ til FeCl₃-koagulering, hvorfor anvendelsen af EK også tillader andre muligheder end kemisk koagulering. Dette inkluderer bl.a. tilkoblingen af EK til at bruge mere vedvarende teknologier såsom overskudsenergi fra vindmøller.

4.4 Driftsøkonomi af koagulering

Som beskrevet ovenstående resulterer den forudgående koagulering i en række driftsmæssige (afsnit Effekter af forudgående koagulering) fordele. I det følgende redegøres membranens driftskapacitet og -omkostninger (i forhold til både CAPEX og OPEX) ud fra fire cases, der inkluderer:

1. Traditionel membranfiltrering alene
2. Membranfiltrering med forudgående FeCl₃-koagulering
3. Membranfiltrering med CIP-spraydosering
4. Membranfiltrering med forudgående FeCl₃-koagulering og CIP-spraydosering.

Koaguleringsforsøgene medførte til en stigning af den behandlede vandfluks fra 100 m³/h til 140 m³/h, svarende til en flukstigning på 40 %. Tages dette samt den forlængede driftsperi-

ode (nævnt i afsnit Længere driftsperioder og højere behandlingskapacitet) i betragtning, medvirker koaguleringen alene (case 2) til en forøgelse af den volumenmæssige behandlingskapacitet med 48 % sammenlignet med case 1. Stigningen i længden af driftsperioden reducerer også behovet for CIP-rengøring, hvorfor den årlige omkostning med CIP reduceres med 75 % for case 2. I tillæg kan der også til pumpeomkostningerne tilskrives en reduktion på 47 % til case 2 grundet mindre tab af sugetrykket over tid. Forbehandling med koagulering medfølger driftsomkostninger, som inkluderer indkøb af koagulant samt en relativ stigning i vedligeholdelsesomkostningerne. Relativt til case 1 følger der 8 % højere, årlige omkostninger (inkl. CAPEX og OPEX) med case 2. Derimod er behandlingskapaciteten øget og CIP-forbruget reduceret, hvilket medvirker en 27 % reduktion af prisen pr. volumen vand behandlet.

Case 3, CIP-spraydoseringen, medvirker, grundet det lave forbrug af CIP-kemikalier, til en overordnet besparelse af de årlige CIP-omkostninger på 91 % ift. case 1. For case 3 opnås der en besparelse af den totale årlige omkostning på 11 % parallelt med 14 % reduktion af den volumenmæssige behandlingspris. Dertil medfører case 3, 4 % forøgelse af den volumenmæssige behandlingskapacitet forårsaget af den lavere nedetid, metoden kræver (nævnt i afsnit Forbedret kontakttid mellem CIP-kemi og membraner). Dette udgør således en væsentligt mindre procentuel forøgelse sammenlignet med case 2. På trods af dette kan der samlet tilskrives en reduktion af kemikalieforbruget til CIP på 92 %. Med bæredygtighed for øje bidrager case 3 således til de største miljømæssige fordele sammenlignet med case 1 og 2, da der udledes mindre kemi til recipienten.

Spraydosering har således en lavere effekt på prisen pr. volumen vand behandlet, hvilket også afspejles af case 4, der beror på kombinationen mellem koagulering og CIP-spraydoseringen. Lignende case 2 ses der for case 4 en samlet stigning på 7 % af de årlige omkostninger, mens prisen pr. behandlet volumen reduceres med 28 %. Prismæssigt er der således en marginal forskel mellem case 2 og 4. Dog indebærer sidstnævnte også en samlet reduktion på 98 % af forbruget for CIP-kemikalier, hvilket kan anses som en betydelig forbedring bæredygtigheds-mæssigt.

TABEL 5. Oversigt driftsomkostningerne for case 1, 2, 3 og 4.

	Case 1: membranen alene	Case 2: med for- udgående koa- gulering	Case 3: med CIP-spraydo- sering	Case 4: med for- udgående koagu- lering og CIP- spraydosering
Flux (m ³ /hr)	100	140	100	140
Koagulantomkostninger (kr./år)	kr. 0	kr. 223.165	kr. 0	kr. 225.381
Omkostninger til vedligehold (kr./år)	kr. 65.700	kr. 73.000	kr. 80.300	kr. 87.600
Antal mulige filtreringsdage om året (dage)	341	359	355	363
Behandlingskapacitet (m ³ /år)	817600	1206295 48 % ^{a)}	851667 4 % ^{a)}	1218278 49 % ^{a)}
CIP-omkostning (inkl. kemikalie og vandforbrug) (kr./år)	kr. 124.391	kr. 30.588 75 % ^{b)}	kr. 10.696 91 % ^{b)}	kr. 2.550 98 % ^{b)}
%-CIP-kemikalie reduktion		75 %	92 %	98 %
Pumpeomkostninger (kr./år)	kr. 130.816	kr. 68.931 47 % ^{b)}	kr. 136.267 -4 % ^{b)}	kr. 69.616 47 % ^{b)}
CAPEX (kr./år)	kr. 571.429 ^{c)}	kr. 571.429 ^{c)}	kr. 571.429 ^{c)}	kr. 571.429 ^{c)}
OPEX (kr./år)	kr. 303.972	kr. 391.519	kr. 227.263	kr. 385.147
Totale omkostninger (kr./år)	kr. 892.335	kr. 967.112 -8 % ^{b)}	kr. 798.691 11 % ^{b)}	kr. 956.576 -7,2 % ^{b)}
Omkostninger pr. m ³ vandbehandlet	kr. 1,07	kr. 0,8 27 % ^{b)}	kr. 0,94 14 % ^{b)}	kr. 0,79 28 % ^{b)}

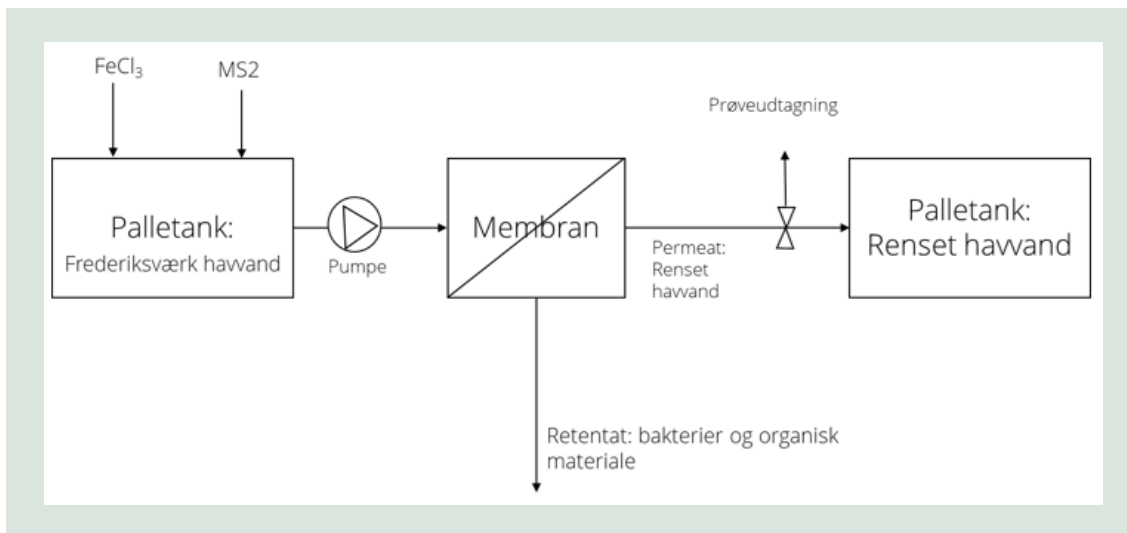
a) Den procentuelle stigning relativ til case 1

b) Den procentuelle reduktion relativ til case 1

c) Baseret på afskrivninger over 7 år

5. Bakterie- og virusfjernelse ved membranfiltrering

Hvis rensset havvand skal bruges til opdrætsfisk/fødevarereproduktionen, er det af stor vigtighed, at vandet kan overholde strenge mikrobielle krav. For at undersøge effekten af bakterie- og virusfjernelse med membranfiltrering blev der gennemført membranfiltreringsforsøg med havvand fra Frederiksværk Havn. Dette blev gjort ved tre forskellige membranforhold; ved ren og foulet membran samt med og uden forudgående koagulering (med FeCl_3). Forsøgsopstillingen er illustreret på FIGUR 9. Havvandet blev opbevaret i en palletank og blev pumpet igennem samme membrantype som beskrevet i afsnit Opbygning af membranfiltreringsanlæg i pilot-skala. Prøveudtagning af permeatvandet blev derefter udtaget under de forskellige driftsforhold til efterfølgende bakterie- og plakstælling med henblik på at måle reduktionen af hhv. bakterier og vira.



FIGUR 9. Forsøgsopsætning for bakterie- og virafjernelse med membranfiltrering af beskidt havvand fra Frederiksværk Havn. Vandet blev tilsat MS2-kultur (og FeCl_3 under gældende forhold) og sendt igennem membran til en anden palletank.



FIGUR 10. Opsætning af membran anlæg på Frederiksværk Havn.

Det anvendte havvand til udvikling og optimering af koaguleringen (se afsnit Forudgående koagulering før membranfiltrering), som blev foretaget ved Atlantic Sapphire, er meget lavt belastet i forhold til indhold af organisk materiale og bakterier. I løbet af disse forsøg blev der løbende målt på bakterieindhold i det indgående og behandlede havvand. For alle prøverne blev der målt en reduktion af bakterier (data ikke vist), men det meget lave indhold gør det vanskeligt at kvantificere en egentlig bakteriereduktion over membranen. I dette forsøg er der således anvendt havvand fra havneområdet ved Frederiksværk Havn, som pga. aktivitet i havneområdet og tilførsel af organisk materiale forventes at have et meget højere bakterieload.

Mikrofiltrering er kendt for at kunne fjerne bakterier, parasitter og større suspendede partikler, men grundet porestørrelsen på 0,1-0,2 μm kan der forventes en begrænset tilbageholdelse af vira (~0,025 nm) baseret alene på størrelsesseparation. Dog har visse studier vist, at foulet membraner har kunnet tilbageholde vira, og at vira potentielt kan tilbageholdes ved at adsorbere på positive ladet partikler (grundet jern-koagulant). For at evaluere membranens evne til at fjerne vira blev havvandet derfor inokuleret med en kendt koncentration af MS2 bakteriofagen som surrogatvirus (FIGUR 9).

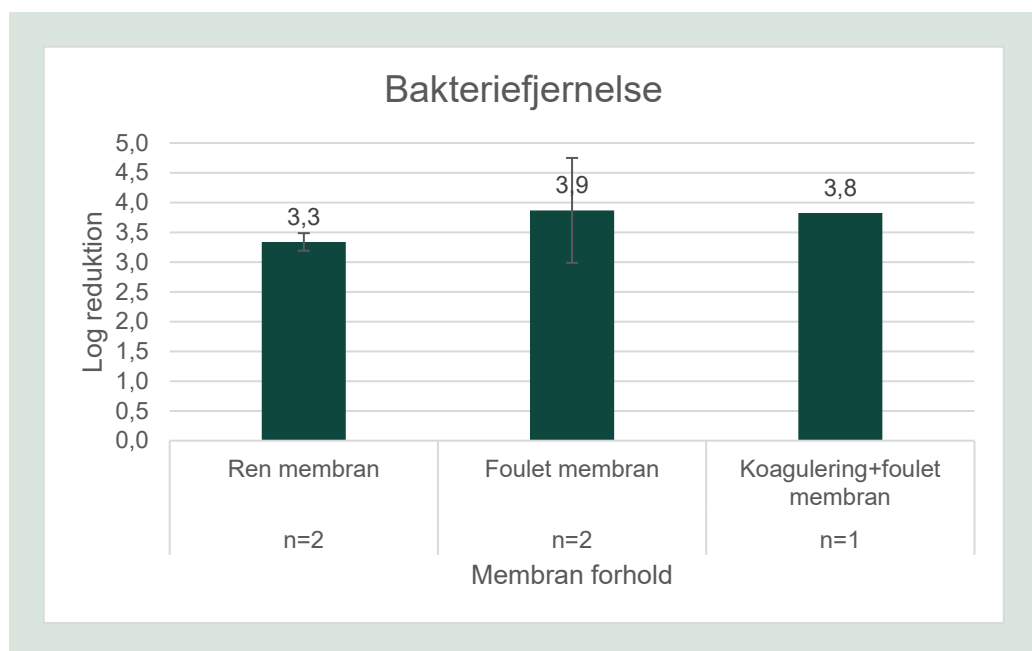
5.1 Logreduktioner af vira- og bakterier i havvandet

Membranfiltreringsforsøget viste markant reduktion af bakterier med den rene og foulede membran samt med forudgående koagulering kombineret med membranfouling (se FIGUR 11). Den højeste logreduktion, på 3,9 ($\pm 0,9$), blev observeret, da membranen var foulet. Tages standardafvigelsen i betragtning, blev der dog ikke observeret en betydelig forskel mellem de forskellige membranforhold.

Dette indikerer således, at membranen ville kunne bibeholde en tilstrækkelig bakteriel tilbageholdelse under foulede forhold med en marginal forskel i logreduktion sammenlignet med de øvrige membran scenarier på FIGUR 11. Derfor er en forudgående koagulering med FeCl_3 ikke

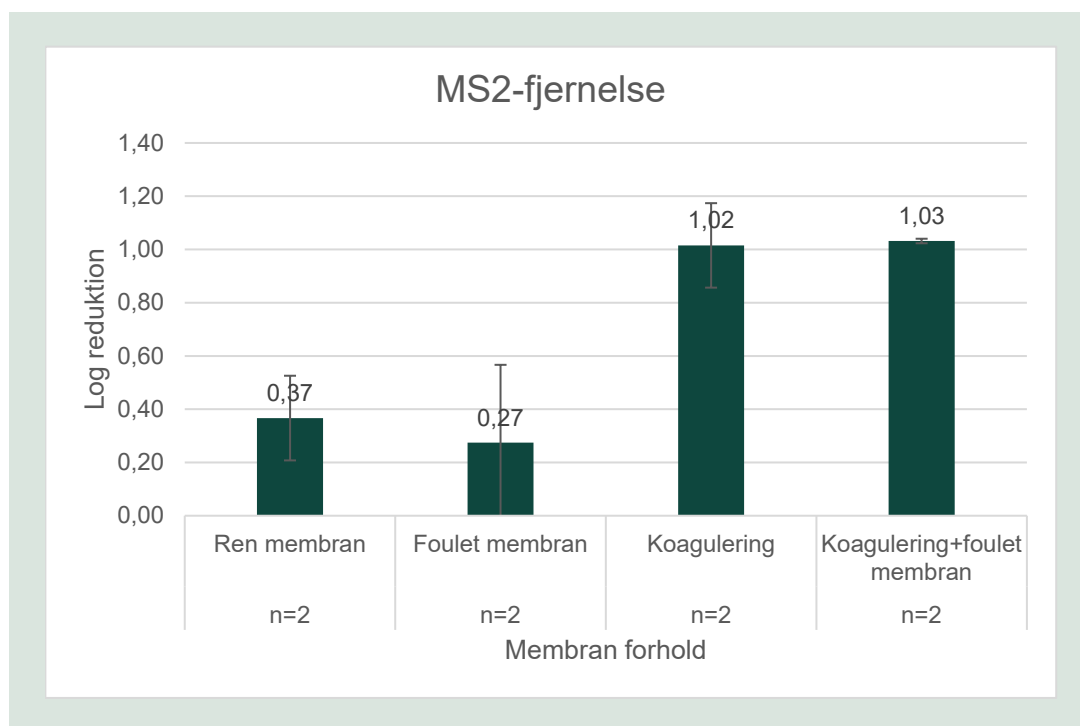
nødvendig, hvis bakteriefjernelse alene er målet, hvorfor koagulering kun bør anvendes til fjernelse af suspenderede partikler fra vandet.

Det bør dog adresseres, at det anvendte havvand er udtaget fra et beskidt havneområde, hvorfor forsøget afspejler membranfiltreringsevnen under et worst case-scenarie.



FIGUR 11. Logreduktion af bakterier med membranfiltrering. n er antallet af eksperimentelle gentagelser.

Derimod udviste membranen utilstrækkelig reduktionsevne i forhold til viratilbageholdelse. Her blev der observeret en logreduktion på højst $1,03 \pm 0,009$ (se FIGUR 12) ved anvendelse af forudgående koagulering med FeCl_3 , mens filtreringen med den rene og fulede membran viste tilnærmelsesvis samme, men lavere logreduktion. Det observerede indikerer, at FeCl_3 -koagulering har en positiv effekt overfor viratilbageholdelse, men i et begrænset omfang. For at opnå en komplet fjernelse af vira er det derfor nødvendigt med en yderligere desinfektionsproces som uddybes nærmere i afsnit Optimering af UV-reaktor.



FIGUR 12. Logreduktion af MS2 med membranfiltrering. n er antallet af eksperimentelle gentagelser.

I forbindelse med forsøgsvariabilitet bør vigtigheden af sterile forhold og risiko for kontaminering af prøver ved prøveudtagningen også nævnes. Da forsøget blev foretaget i et ikke sterilt miljø, kan der potentielt opstå kontaminering af de udtagne prøver. Dette kan potentielt være med til at forårsage en overestimering af bakteriekoncentrationen, hvilket vil influere på den beregnede reduktion af bakterier over membranen. Derudover er det kun antallet af dyrkbare bakterier, som er kvantificeret. Reduktionen af bakterier sker dog på baggrund af en størrelsesseparation, som forventes at være nogenlunde den samme for dyrkbare og ikke-dyrkbare bakterier.

5.2 Fjernelse af partikulært materiale - turbiditet

I forbindelse med forsøgene ved Frederiksværk Havn blev der ligeledes målt turbiditet af havvandet, det koagulerede havvand og det membranfiltrerede havvand. Overordnet set viste forsøge, at turbiditeten i alle tilfælde blev reduceret til ca. samme niveau 0,2-0,3 FNU fra et niveau på ca. 7-8 FNU for det ikke-koagulerede havvand og 15-20 FNU for det koagulerede havvand. Således blev der observeret en stigning i turbiditeten ved tilsætning af jernklorid (PIX).

5.3 Membranfiltrering af havvand fra fiskeslagteri

For at eftervise de førnævnte reduktioner af turbiditet og bakterieindholdet blev et membran anlæg i pilotskala opsat til at filtrere på havvand ved et fiskeslagteri. Dog opstod der tekniske komplikationer mellem det opsatte membran anlæg og dambrugets egne anlæg. Således blev de udtagne prøver kontamineret af vand, som tilbageløb fra et køletårn med havvand, der ikke var membranfiltreret. Af denne grund kunne prøverne udtaget over forsøgsperioden ikke anvendes som dokumentationsredskab for membranperformance.

I tillæg blev der derfor gennemført kortvarige test, hvor havvandet blev pumpet igennem en af membranpladerne fra det opstillede membran anlæg. Herved blev der opnået en logreduktion af bakterier på 3, hvilket er på lige fod med de observerede bakteriereduktioner (i.e., 3,3-3,8)

for vandet fra Frederiksværk Havn (nævnt i afsnit Logreduktioner af vira- og bakterier i hav-
vandet).

6. Implementering af sensorteknologi

I projektet er der arbejdet med sensorteknologi med det formål at kunne:

- Dokumentere fjernelsen af bakterier og organisk materiale
- Styre den forudgående koagulering
- Sikre, at rester af CIP-kemi og koagulant ikke kommer ind i fiskeopdrættet.

6.1 Sensorteknologi som dokumenteringsredskab af membranfiltreringen

Det overordnede formål med membranfiltreringen er at fjerne organisk materiale, parasitter og bakterier inden den efterfølgende UV-behandling, som skal eliminere virus.

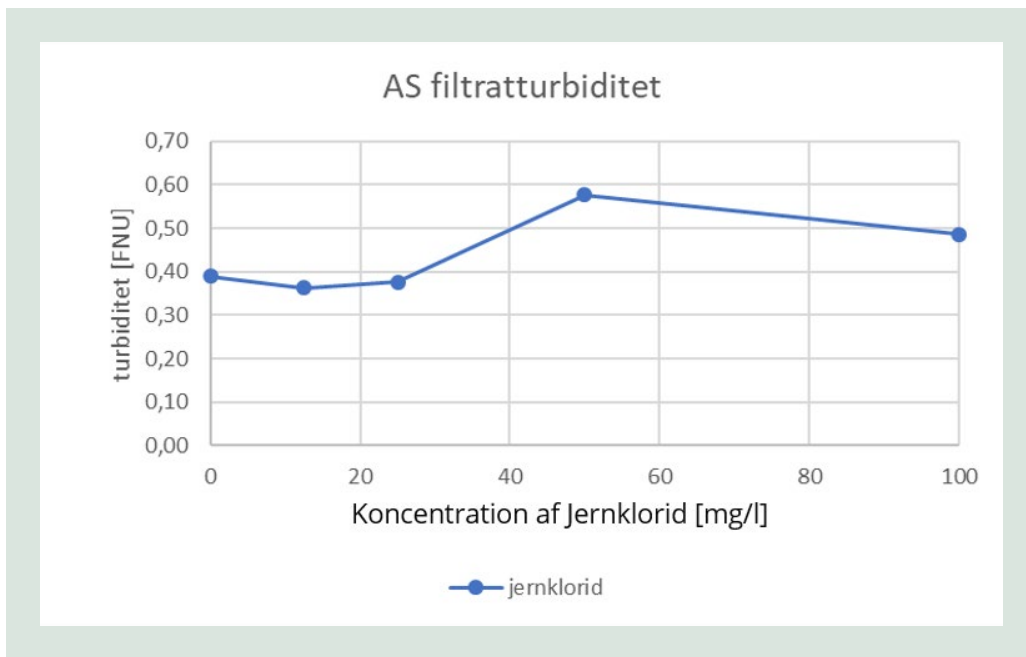
Afprøvningen af relevante sensorteknologier tog udgangspunkt i pilotmembrananlægget, som efter udvikling blev afprøvet ved Atlantic Sapphire. Det indgående vand pumpes fra en strandbrønd, hvorfor indholdet af partikulært og organisk materiale er meget lavt. Dette sætter store krav til følsomheden af sensorteknologien.

6.1.1 Turbiditet

I flere perioder blev turbiditeten af det indgående havvand efter tromlesigten og efter membrananlægget målt (ved brug af in-situ AT500). Der blev kun observeret mindre variationer i turbiditeten af det indgående havvand (0,5-0,6 FNU) og kun en mindre reduktion efter membranfiltrering (0,3-0,6 FNU). Således er det vanskeligt at anvende turbiditet som et dokumenteringsredskab pga. de lave variationer og forskelle mellem indgående og membranfiltreret havvand. I forbindelse med projektet er der ligeledes gennemført forsøg med havvand fra andre lokationer (se Fjernelse af partikulært materiale - turbiditet), hvor indholdet af partikulært materiale er højere. Her kunne der derimod måles store variationer i turbiditeten af det indgående vand samt en meget høj reduktionsgrad i turbiditet (fra 6-15 FNU til 0,3-0,6 FNU). Således vil en turbiditetsmåling kunne anvendes som et dokumenteringsredskab samt et early-warning, hvis et teknologikoncept skulle opstilles på lokationer, hvor den indgående vandkvalitet var af lavere kvalitet.

Turbiditetsmålere med ISO7027 (90° C/880 nm) fås også som in-line. Disse on-line målere udmærker sig i begge tilfælde på en meget høj præcision på ca. +/-0,003FNU. Der er i begge tilfælde tale om instrumenter, hvor luftbobler undgås, og optikken ikke er i berøring med vandet, hvilket begrænser en gradvis kontaminering af optikken betydeligt.

Indledningsvis blev der gennemført turbiditetsmålinger af det producerede indtagsvand (permeatvandet) ved anvendelse af forskellige doseringer af jernklorid (PIX). Fra 0-30 ml PIX pr. m³ havvand var turbiditeten uændret. Derimod blev der observeret en svag stigning i turbiditet ved koncentrationer højere end 50 ml PIX pr. m³. Således blev denne koncentration anvendt som den øvre koncentration til pilotforsøgene (se kapitel Forudgående koagulering før membranfiltrering).



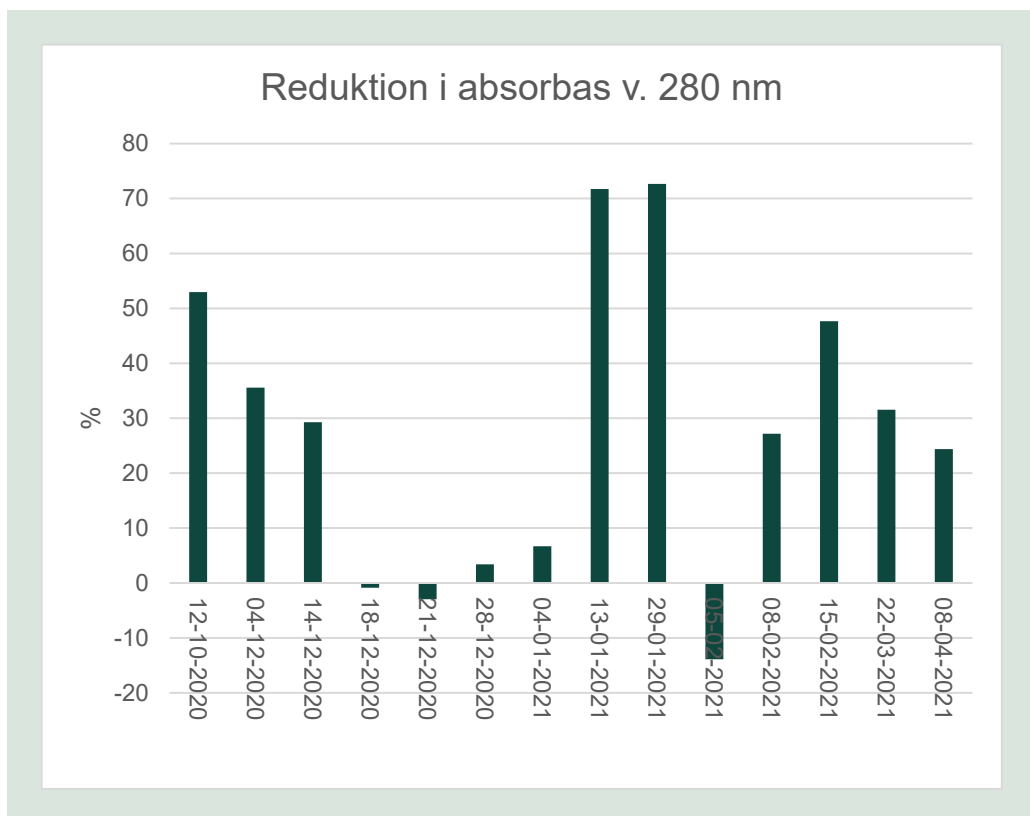
FIGUR 13. Turbiditet af filtreret havvand ved forskellige koncentrationer af jernklorid.

6.1.2 Absorbans

Fra pilotforsøgene ved Atlantic Sapphire er der løbende udtager prøver af det indgående samt udgående vand. På udvalgte prøver er der målt absorbans fra 200 nm til 600 nm med et interval på 5 nm.

Der observeres kun mindre variation i absorbans af det indgående vand over forsøgsperioden. Således måles der en absorbans på 0,02-0,03 for 15 ud af 16 målte prøver ved 280 nm, hvor proteiner normalvis har maksimal absorption.

Der observeres for hovedparten af prøverne en reduktion i absorbans ved 280 nm, som oftest anvendes som et mål for protein, når indløbsprøven sammenlignes med den membranfiltrerede prøve. Tilsvarende målingerne for turbiditet er absorbansniveauerne meget lave for vandet ved Atlantic Sapphire, hvilket gør det vanskeligt at anvende absorbans som et online/atline dokumenteringsredskab til fjernelse af partikulært materiale. Ved en anvendelse af havvand med et højere organisk indhold kunne absorbansmålinger ligeledes anvendes som et dokumenteringsredskab.



FIGUR 14. Reduktion i absorbas (inkløb ift. udløb) ved 280 nm.

6.1.3 Kvantificering af mikrobiel fjernelse

Der findes i dag flere producenter af at-line og online udstyr til kvantificering af bakterier, heriblandt BactoBox og BactoSense, som begge baserer sig på flowcytometri. I projektet er BactoBox anvendt med det formål at dokumentere reduktionen af bakterier over membranen.

Pga. målemetoden er det nødvendigt at fortynde prøverne med hanevand for at kompensere for den høje ledningsevne i havvand. Dette bevirkede, at det ikke var muligt at kvantificere bakterieindholdet i indløbsvandet ved Atlantic Sapphire med det anvendte udstyr, idet målingerne var under detektionsgrænsen (200/ml). Efter udpladning på dyrkningsmedie viste det sig, at indholdet (af dyrkbare bakterier) også var under detektionsgrænsen for BactoBox. Online måling af bakterier er ligeledes mulig med online flowcytometeret, herunder Bnovate Bactosense, som forhandles af CKE. Detektionsgrænsen er 100 celler/ml, og måleområdet er 1.000-2.000.000 celler/ml. Der er mulighed for at måle intakte celler og totalt antal celler. Systemet renser sig selv mellem hver måling. Hurtigste måleinterval er ned til en måling pr. 20. minut. Bnovate Bactosense er i stand til at måle på saltvand, men mere frekvent udskiftning af slanger og andre kontaktpunkter i apparatet må påregnes. Kravene til ledningsevne skal være under 100.000 microsiemens, hvilket er inden for kravene til almindeligt havvand. Dog var koncentrationen af bakterier ved Atlantic Sapphire ligeledes under detektionsgrænsen på Bnovate Bactosense

Der blev sideløbende udtaget prøver fra Ringkøbing Fjord, som forventes at have et højere indhold af bakterier (sammenlignet med vandet fra strandbrønden). For disse prøver var det, efter fortynding, muligt at bestemme indholdet. Således vil BactoBox (eller lignede) kunne anvendes som et dokumenteringsværktøj for tilbageholdelsen af bakterier, hvis det indgående vand var mere belastet.

6.2 Sensorteknologi som styringsredskab

Det udviklede membranfiltreringsanlæg blev over en periode på 9 måneder anvendt ved Atlantic Sapphire, mhp. at udvikle og optimere teknologikonceptet. I perioden blev der gennemført fire forsøgsperioder, hvor mængden af koagulant blev varieret:

- Igen koagulant
- 50 ml/m³ koagulant
- 25 ml/m³ koagulant
- 10 ml/m³ koagulant.

Hver periode var på minimum fem uger med det formål at opnå flere CIP-sekvenser (anlægget CIP-behandles en gang om ugen) og se eventuelle langtidseffekter. Som allerede beskrevet i det ovenstående sås kun mindre ændringer i det indgående vand over tid ved måling med de afprøvede sensorer, hvilket gør det vanskeligt at anvende disse data til en styring af den forudgående koagulering. I projektet er der i stedet afprøvet to indirekte principper, som potentielt vil kunne anvendes til styring af den forudgående koagulering:

- Anvendelse procesdata fra membranlægget
- Online måling af frit jern i det producerede vand (permeat).

6.2.1 Online måling af jern

Den tilsatte koagulant PIX virker via laddningsneutralisering, som sker ved, at det positivt ladede jern binder sig til de negativt ladede partikler i vandet. En overdosering af jern forventes således ikke at binde sig til partiklerne og vil derfor ikke sammen med partiklerne blive tilbageholdt af membranen. Således forventes en overdosering af PIX at resultere i en stigning i frit jern i det producerede vand (permeatet), hvilket potentielt vil kunne anvendes som en styringsparameter af den forudgående koagulering.

På pilotmembranlægget blev der derfor opstillet en online jernmåler (Iotron Aquacon FE10), som løbende kan måle jern i koncentrationsområdet 10-500 PPB, hvilket dækker området fra det naturlige indhold af jern i havvand og til den øvre tilladte grænseværdi for jern til lakseopdræt. Jernmålere er billige i indkøb, kræver minimalt vedligehold og vil have en forventet udgift på ca. 15.000 kr. om året (kemikalier og stumper), afhængigt af målefrekvensen.

Aquacon FE10, som virker gennem en fotometrisk bestemmelse af et farvekompleks, blev opsat på det udviklede pilotskalamembranlæg og målte i de to sidste perioder (25 og 10 ml PIX/m³) løbende jernkoncentrationen i det producerede indtagsvand (permeatet).

I projektet var der en del problemer med driften og stabiliteten af sensoren, hvorfor det i projektet ikke var muligt at anvende data herfra til en aktiv styring af koaguleringsprocessen. Efter afslutning af forsøgsperioden blev der gennemført en række forsøg med sensoren, som viste, at koncentrationen af jern kunne måles med forholdsvis stor præcision i vandet tilsat 3,5 % salt (svarende til havvand, se TABEL 6). Problemerne med sensoren bør derfor kunne løses gennem optimering af vandtilførsel og evt. længere skylning af målkammer i sensoren.

TABEL 6. Test af Aquacon FE10.

Referencestandard	Måling nr.				
	1.	2.	3.	4.	5.
Demivand, 0 ppb Fe	28 ppb	17 ppb	11 ppb	0ppb	0ppb
Demivand med 200 ppb Fe	200 ppb	215 ppb	206 ppb	203 ppb	204 ppb
100p pb Fe	107 ppb	103 ppb	101 ppb	99 ppb	100 ppb
*Øget saltholdighed:					
Demivand 100 ppb Fe med NaCl	103 ppb	100 ppb	99 ppb	98 ppb	96 ppb
Sluttest:					
Demivand, 0 ppb Fe	0 ppb	0ppb	0ppb		

6.3 CIP- og koagulantrester

Som beskrevet i det ovenstående afsnit kan Aquacon FE10 anvendes til at måle koncentrationen af jern i det producerede vand (permeatet). Det er af yderste vigtighed, at jern doseringen ikke kompromitterer den efterfølgende anvendelse af permeatet, hvorfor koncentrationen af jern skal holdes under den opsatte grænseværdi. En løbende monitorering af koncentrationen af jern vil således give en dokumentering af, om vandet indeholder rester af den tilsatte koagulant og dermed, om vandet har den fornødne kvalitet i forhold til den efterfølgende anvendelse.

I projektet blev der arbejdet med at rengøre membranerne med ozon (se kapitel: CIP med klor og ozon), som er kraftigt oxidativt. Der er derfor af stor vigtighed, at vand indeholdende ozon fra CIP-behandling ikke anvendes til indtagsvand til fiskeopdrættet. I forbindelse med forsøgene blev ozonindholdet i membrankammeret målt i perioden efter afsluttet CIP med ozon. Der blev, som forventet, observeret et forholdsvis hurtigt henfald af ozon i vandet i membrankammeret. Der er i projektet ikke arbejdet med sensorer til direkte eller indirekte målinger (fx Oxidation reduction potential, ORP) af ozon i forbindelse med forsøgene. Dog vurderes dette at kunne gennemføres forholdsvis simpelt; således vil den sensor, som blev anvendt til måling af turbiditet (AT 600), ligeledes kunne anvendes til at måling af ORP. Ozon kunne ligeledes være målt online med DPD-metode (DIN38404-3) ved anvendelse af fx Swan Codes 2 eller Sigrist ColorPlus O3 vha. 254 nm bølglængde (DIN 19627 (en relativ måling)).

7. CIP med klor og ozon

Fouling i keramiske membranlæg forårsages typisk af naturligt forekommende organisk materiale såsom humus, protein og polysakkaridderivater og kræver normalvis CIP-behandling med base, klor og syre. Keramiske membraner har vist sig at være modstandsdygtige overfor mekaniske, termiske og kemiske forhold, hvorfor sidstnævnte tillader en relativt aggressiv kemisk rensningsproces, fx med ozon, uden at membranens indre struktur kompromitteres. Med det sagt er der stadig miljømæssige og økonomiske aspekter forbundet med CIP-forbruget, hvorfor det er vigtigt at få identificeret den mest egnede CIP-behandling.

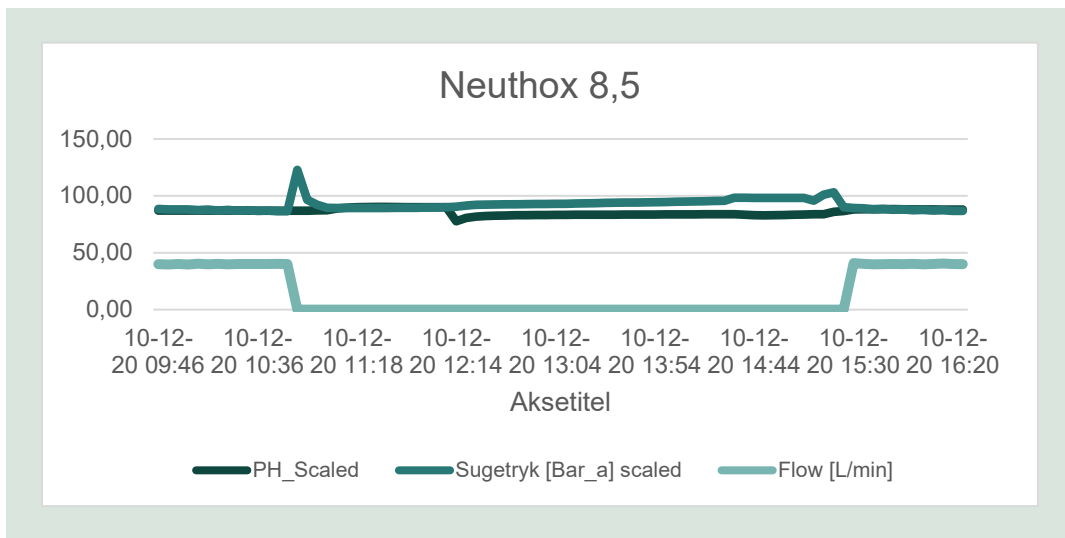
I projektet er alternative CIP-procedurer med kemikalier, som kan produceres on-site, blevet testet og sammenlignet med de gængs anvendte kemikalier. I projektet er CIP med ozon og CIP med klor i form af Neuthox blev afprøvet.

Forsøgene med Neuthox blev foretaget i forbindelse med pilotforsøgene ved Atlantic Sapphire, mens CIP med ozon blev foretaget på et mindre membranlæg, som blev opstillet ved Frederiksværk Havn. Begge kemikalier er testet ved cykliske test, dvs. at rengøringen med den gældende CIP-procedure blev initieret, hver gang membranen havde nået et tilstrækkelig foulingspunkt (dvs. når sugetrykket var steget tilstrækkeligt). Rensningsevnen blev derefter evalueret baseret på, hvor meget af sugetrykket, der blev genvundet i forhold til en konventionel CIP med klor, base og syre.

7.1 CIP med Neuthox i forhold til almindelig klor

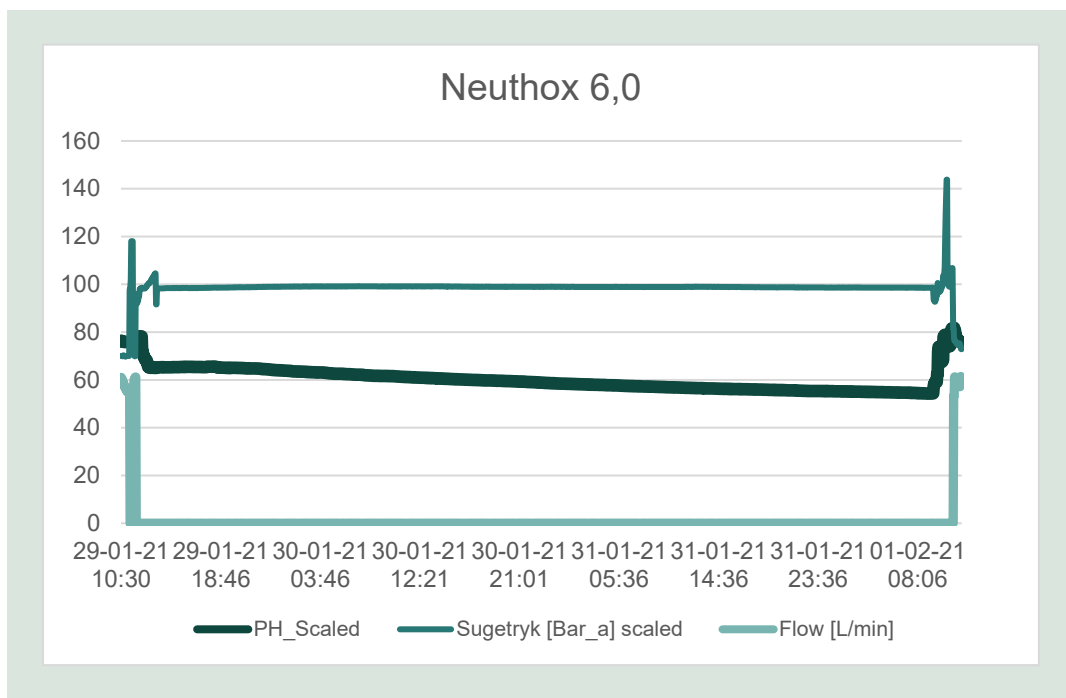
Neuthox er en kommerciel hypoklorsyre (HOCl) opløsning, der er produceret af projektpartneren Danish Clean Water, som normalvis anvender Neuthox til at kontrollere bakterielvækst i vandssystemer. HOCl desinficerer bakterier ved at penetrere igennem cellevæggen, og derved deaktivere de vitale metaboliske systemer. Penetrering forekommer dog kun, når syren er på neutral form, hvorfor desinfektionseffekten af hypoklorsyren afhænger af pH. I projektet er der undersøgt to forskellige kommercielle klor typer, nemlig Neuthox 8,5 og Neuthox 6. Førstnævnte opløsning har en pH på 6 med en forventet sammensætning på 5 % og 95 % af dens deprotonerede form, OCl⁻. Til kontrast har Neuthox 6 en pH på 6 og består af 95 % HOCl og 5% OCl⁻.

FIGUR 15 viser resultaterne for CIP med Neuthox pH 8,5, der blev sprayet over membranen over to timer. Forsøgene blev gennemført i perioden, hvor der blev anvendt en koagulantdoserings (PIX) på 50 mL/m³. Forsøget viste ingen ændring af sugetrykket, der var på henholdsvis 0,88 bar før CIP og 0,88 bar efter CIP med Neuthox 8,5. Gennem CIP-perioden lå pH-værdien for Neuthox 8,6 i spændet 7,5-9 (FIGUR 15).



FIGUR 15. pH, sugetryk og flow før, under og efter CIP-behandling med Neuthox 8,5 gennem spraying. Før CIP-behandling blev der anvendt en PIX-koncentration på 50 mL/m³ til foregående koagulering. I overstående graf er pH skaleret med en faktor 10, mens sugetrykket er skaleret med en faktor 100. CIP blev initieret til tiden 10.46 10/12/20 og sluttede ved 15:20 10/12/20.

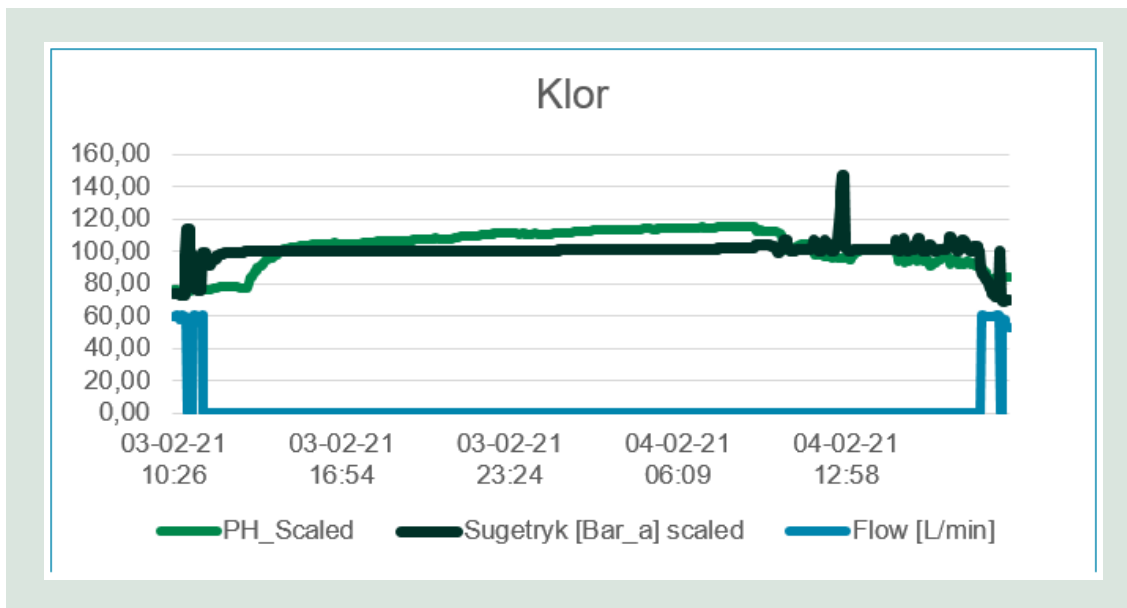
CIP med Neuthox 6 blev udført ved at lade membranen stå i blød i opløsningen over weekenden, efter at foulingen havde fundet sted. Til forskel fra det første forsøg var behandlingstiden således kraftigt forøget. Den anvendte koagulantkoncentration var her på 25 mL PIX/m³ (FIGUR 16). Forsøget udviste et relativ større fald i pH fra 9 til 5,5 gennem CIP-perioden sammenlignet med anvendelse af Neuthox 8,5. Endvidere blev der ved brug af Neuthox 6 observeret en marginal ændring af sugetrykket på 0,76 og 0,75 fra henholdsvis før og efter CIP-rensningen (FIGUR 16). Tages målevariationerne i betragtning, kunne det formodes, at Neuthox 6 ikke viste tilstrækkelig fjernelse af foulingsmaterialet på membranen, hvorfor det blev besluttet at udføre CIP med konventionel klor den efterfølgende dag (FIGUR 17).



FIGUR 16. pH, sugetryk og flow før, under, og efter perioden hvor membranen blev lagt i blød i Neuthox 6. Før CIP-behandling blev der anvendt en PIX-koncentration på 25 mL/m³ til foregående koagulering. I overstående graf er pH skaleret med en faktor 10, mens sugetrykket er skaleret med en faktor 100. CIP-behandlingen blev initieret til tiden 12:01 29/01/21 og sluttede ved 09:56 01/02/21.

Sammenlignet med forsøgene med Neuthox 8,5 og 6, der begge viste utilstrækkelig genvinding af sugetrykket, udviste CIP-behandling med konventionel klor over 1,5 dag en stigning af sugetrykket til 0,88 bar fra 0,76 bar (FIGUR 17). Dette svarer til en genvinding med op til ca. 90 % af sugetrykket relativt til den rene membran, hvilket kan betragtes som værende en effektiv rensningsgrad, da klor alene ikke kan forventes at fjerne alt foulingsmateriale fra membranen. Ydermere resulterede anvendelsen af klor til CIP i en stærk stigning af pH fra ~7,5 til ~11,5, der efterfølgende aftog til initial PH'en på omkring 7,5 efter at CIP-behandlingen blev afsluttet.

På baggrund af disse forsøg vurderes det derfor, at CIP med Neuthoxopløsningerne ville have en marginal rensningseffekt på membranen, mens CIP med klor udviste høj rensningsevne. Dette udelukker dog ikke potentialet for at kunne anvende Neuthox ift. desinfektion af membranlægget i andre sammenhænge. Membranfiltreringen medvirker til en tilbageholdelse af en stor fraktion af bakterier (se afsnit Bakterie- og virusfjernelse ved membranfiltrering), hvoraf en mindre fraktion stadig vil kunne passere igennem membranen. Såfremt permeatsiden ikke rengøres jævnlige, vil der over tid kunne dannes og akkumuleres biofilm på indersiden af rørene, og denne vil kunne kontaminere det filtrerede vand.



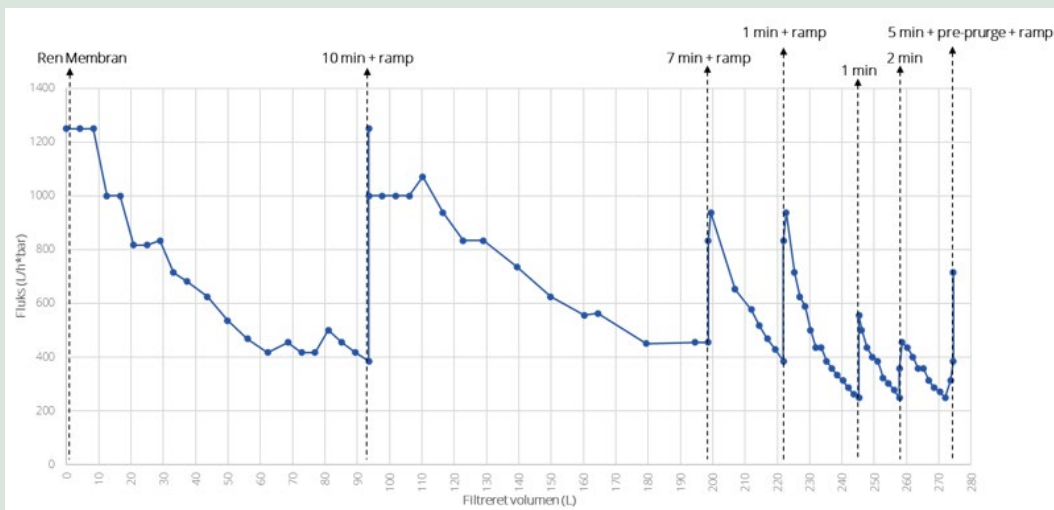
FIGUR 17. pH, sugetryk og flow før, under og efter CIP-behandling med konventionel klor der blev pumpet igennem branden over en dag. Den anvendte koagulantkoncentration lå på 25 mL PIX/m³. På grafen er pH skaleret med en faktor 10, mens sugetrykket er skaleret med en faktor 100. CIP blev initieret til tiden 10:26 03/01/21 og sluttede ved 19:23 04/02/21.

7.2 CIP med ozon

I tillæg til CIP med Neuthox og konventionel klor blev rensningsevnen ved brug af CIP med ozon også undersøgt. Den anvendte ozon blev genereret ved elektrisk koronaudladning. Ved anvendelse af en ozongenerator omdannes ilt til ozon (vha. en Primozone Ozongenerator). Det specielle ved denne type ozongenerator er, at den kan levere ozon under tryk, så ozonen derved kan bruges til "returskyl" med ozongas. Den anvendte ozongenerator er en GM2 fra Primozone, der kan levere 100 g/ozon. Den dannede ozon er en blanding af ozon og ilt.

Membranrensningen blev evalueret baseret på forskellige ozoneringstider samt med og uden ramp (FIGUR 18). En ozongenerator er bygget til at producere ozon konstant og kan ikke starte/stoppe på få sekunder. Der er normalt en indkøringsperiode (ramp), hvor spændingen i cellen øges og ozonkoncentrationen stiger. Ved ramp, som varer 2,5 min, går koncentration af ozon fra 0 % til 100 %. En ramp tilføjer dermed ca. 2,5 min til den samlede ozoneringstid.

Den bedste rensningsevne blev observeret med den højeste ozoneringstid på 10 min med ramp, hvor omkring 105 L vand blev membranfiltreret, før fluksen blev reduceret ned til 450 L/h*bar. Denne ozoneringstid resulterede i en nær identisk ydeevne, når der sammenlignes med den rene membran, der filtrerede op til 94 L vand, før fluksen nåede ned på 385 L/h*bar. Derimod resulterede 1 min og 2 min kun i en mindre genvinding af sugtrykket/fluks. Dette er ikke overraskende, da nedbrydningsraten for komponenterne i vandet forventes at være afhængig af den tilladte kontakttid i systemet. Således kan det forventes, at rensningsevnen for CIP med ozon er proportional til ozoneringstiden i den indledende fase, hvor der er meget organisk materiale til stede på membranerne. Dette var også en tendens for forsøget, hvor kortere ozoneringstid resulterede i en lavere rensningseffektivitet (se FIGUR 18).



FIGUR 18. Ændring af fluksen (L/h*bar) som funktion af mængden af vand filtreret efter CIP med forskellige ozoneringsstider med/uden ramp.

Ozon alene fjerner ikke alt foulingsmateriale, hvorfor der kan forventes en akkumulering heraf over tid. Resultaterne for ozonforsøget illustrerer derfor kortsigtede resultater ved forskellige ozoneringsstider, hvorfor der ikke tages forbehold for membranslid og akkumulering af foulingsmateriale over tid. Forsøget giver derfor ikke et repræsentativt indblik i CIP med ozon over et langsigtet perspektiv, men afdækker derimod, at ozon effektivt kan rense membranen, og at rengøringsgraden er kontrollerbar og proportionel med ozoneringsstiden. Endvidere viser forsøget, at behandlingstiden er inden for få minutter med ozon (FIGUR 18) sammenlignet med klor med en behandlingstid op til flere timer (FIGUR 17). Således tillader anvendelse af ozon til CIP en lavere nedetid, samt eliminering af behovet for transport af CIP-væsker til processitet. Endelig dannes der ikke en brugt rengøringsvæske, der efterfølgende skal håndteres

Såfremt ovenstående er fuldt sammenligneligt med traditionel CIP, vil der for større anlæg (>20 m³/time) være en stor besparelse på anvendelse af ozon fremfor kemi. Der er dog en betydelig initial udgift til ozongenerator og PSA til produktion af ilt. Udfordringen ved ozonrens er, at ozon meget hurtigt henfalder til ilt, og det er derfor nødvendigt at producere alt ozon direkte, når den skal bruges. Det medfører, at der skal anvendes en stor ozongenerator med stor CAPEX. Der er en række parametre der får stor betydning for økonomien i at anvende ozon, lige fra transportafstand for traditionel økonomi og strømpriser, til hvor hyppigt der skal udføres CIP. Samtidig er det ikke sikkert, at det er nødvendigt at foretage CIP, som renser fuldstændigt. Med så korte nedetider kan det være relevant at give membranerne et kortere CIP, fx 2 gange dagligt. Hele paradigmet med drift af membraner ændres dermed, og dette påvirker sammenligningen. Konklusion er derfor, at ozon-CIP har et endog meget stort potentiale, men der er fortsat en række parametre, der skal fastsættes.

8. Optimering af UV-reaktor

FIGUR 12 viser, at membranfiltreringen alene ikke kan reducere viruskoncentrationen tilstrækkelig, hvorfor en supplerende desinfektionsproces er nødvendig. Da membrananlægget fjerner suspendede partikler og dermed resulterer i en lavere turbiditet, hvilket øger penetreringsgrad af lys, i havvandet, vil en efterfølgende UV-behandling til fjernelse af vira være et oplagt valg.

For at opnå lavere energiforbrug i UV-behandling og samtidig kunne sikre en acceptabel mikrobiel kvalitet af indtagsvandet til opdrætsapplikationer kræves der valide UV-dosis-respons-data. I dag findes der dog ikke pålidelige UV-dosis-respons-data for mange af de mikroorganismer, der er relevante for akvakultur, hvilket har ført til over- og underdimensionerede UV-systemer. Det har dog ikke indenfor rammerne af projektet vist sig muligt at kvantificere og arbejde med disse organismer, da særlige teknikker og laboratoriefaciliteter påkræves. Derimod er det valgt at arbejde med en surrogatorganisme og derigennem undersøge den opnåede UV-dose. Den opnåede viden kan anvendes til at optimere design og forbedre mulighederne for korrekt dimensionering af UV-anlægget. Der vil i dette projekt således blive generet UV-dosis-respons data for virus i havvandet gennem en Collimated Beam-test. I tillæg vil effekten af en UV-reaktor fra ULTRAQUA blive testet ved forskellige flow, hvoraf virafjernelse evalueres i forhold hertil.

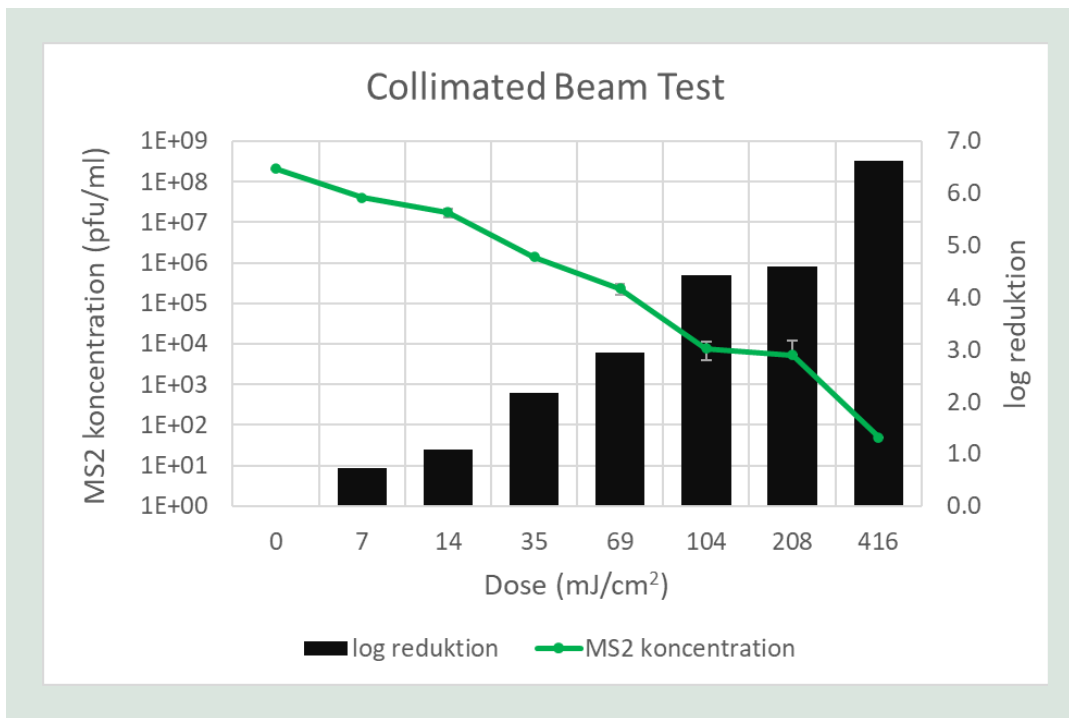
8.1 Anvendelse af MS2 bakteriofag som surrogatvirus

Bakteriofagen MS2, med en størrelse på 0,025 µm (lignende bl.a. Hepatitis A og poliovirusen), er blandt de mindste vira, hvilket gør den egnet som indikatorvirus i et worst case-scenarie for mikrofiltreringen. Ydermere er bakteriofagen nonpatogen og kræver derfor begrænsede sikkerheds- og bortskaffelsesforanstaltninger. Virussen er oftest brugt som indikatororganisme i forbindelse med spildevandsbehandling og til effektivitetsevaluering af filtrerings- og desinfektionsprocesser indenfor drikkevand. Endelig er den hyppigt anvendt til valideringsstudier af UV-behandling, hvilket gør den egnet som surrogatorganisme til test udført i projektet.

8.2 Collimated Beam-test

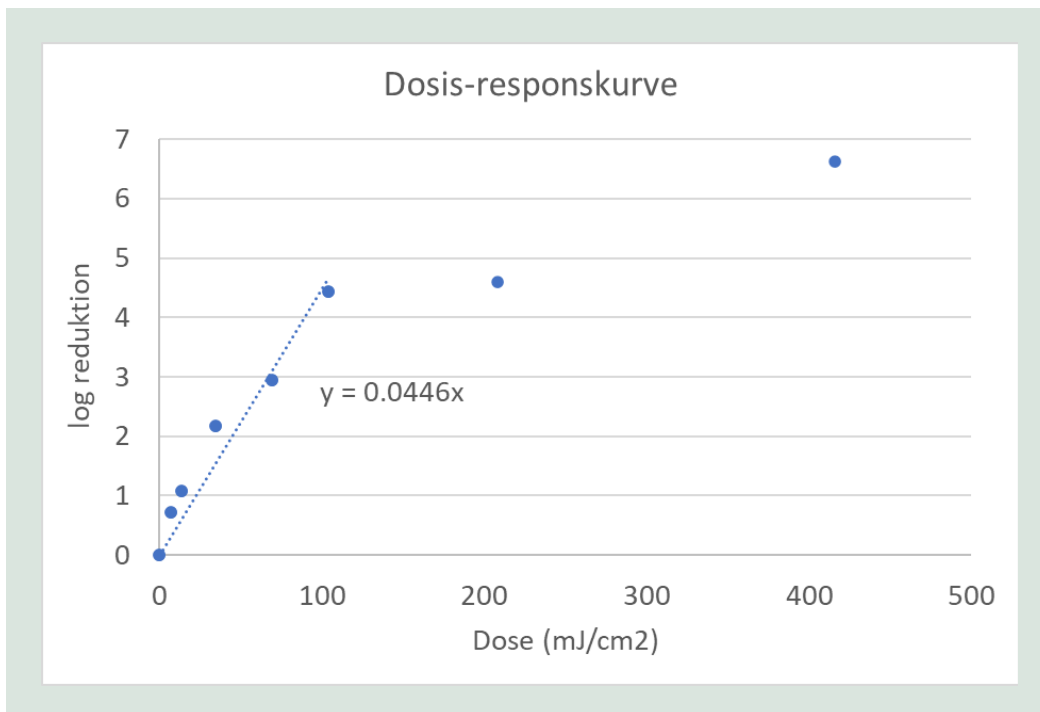
Til generering af UV-dosis-respons-data blev der opsat en Collimated Beam-test med MS2 bakteriofagen som surrogatvirus. I testen blev en bakteriofagsuspension bestående af $2,13 \cdot 10^8$ pfu/mL i hanevand eksponeret med UV-bestråling, hvoraf der blev udført plakstælling over tid. Resultaterne for forsøget er vist på FIGUR 19.

Forsøget viste en inkrementel logreduktion af MS2, hvor der allerede efter 1 min blev observeret en logreduktion på 0,7, som blev efterfulgt af en logreduktion på 4,4 efter 15 min. Ved forsøgets afslutning (efter 60 min) blev der opnået en logreduktion på 6,6.

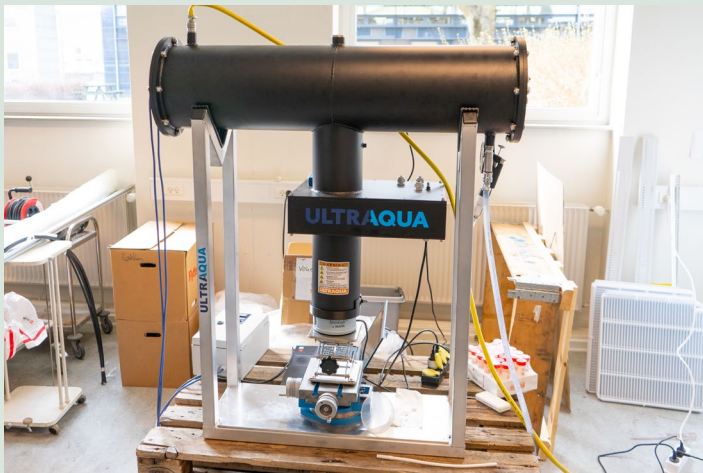


FIGUR 19. Logreduktion og plaskoncentration af MS2 over tid ved Collimated Beam-test.

På baggrund af resultaterne fra Collimated Beam-test er udarbejdet en dosis-respons-kurve (se FIGUR 20). Der observeres en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng mellem dose og logreduktion ved lave doser (<100 mJ/cm²), hvorefter kurven flader mere ud. Der er foretaget lineær regression på kurven for doser <100 mJ/cm² med henblik på at etablere en sammenhæng mellem dose og logreduktion.



FIGUR 20. Dosis-respons-kurve for MS2.

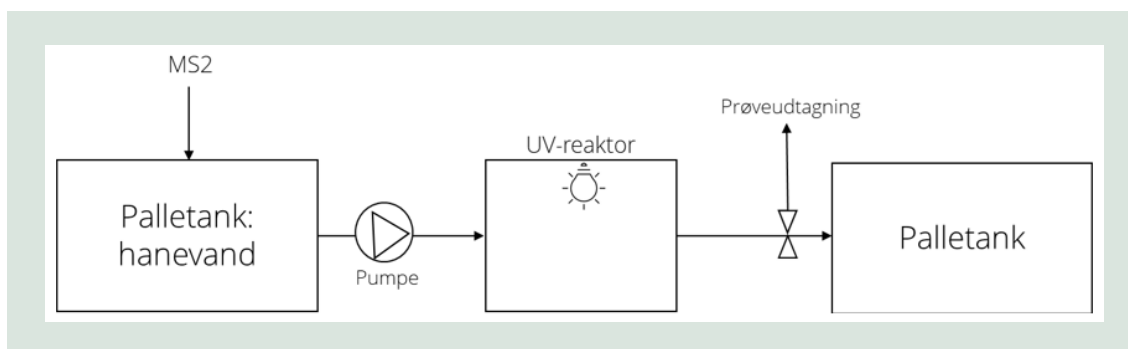


FIGUR 21. Collimated Beam-test opstilling.

8.3 UV-reaktor fra UltraAqua til virafjernelse

Collimated Beam-testen viser stigende logreduktion af vira proportional med UV-dosen. Formålet med Collimated Beam-testen er at udarbejde en dosis-respons-kurve under forhold, hvor alle organismer kan antages at have modtaget den samme UV-dosis. Dette opnås delvist ved anvendelse af collimatoren og dels ved at benytte en omrørt prøve med lav lysvej. Testen belyser således sammenhængen mellem UV-dosis og log-reduktion under idealiserede betingelser. I en UV-reaktor, der gennemstrømmes af vand, vil der være en fordeling i hastighed og fluence rate. Derved bliver den opnåede dose ligeledes en fordeling frem for en enkelt værdi. Ved hjælp af dosis-respons-kurven kan en logreduktion målt på en reaktor omsættes til en tilsvarende dose, hvis alle organismer havde modtaget samme dose. Denne dose benævnes Reduction Equivalent Dose (RED).

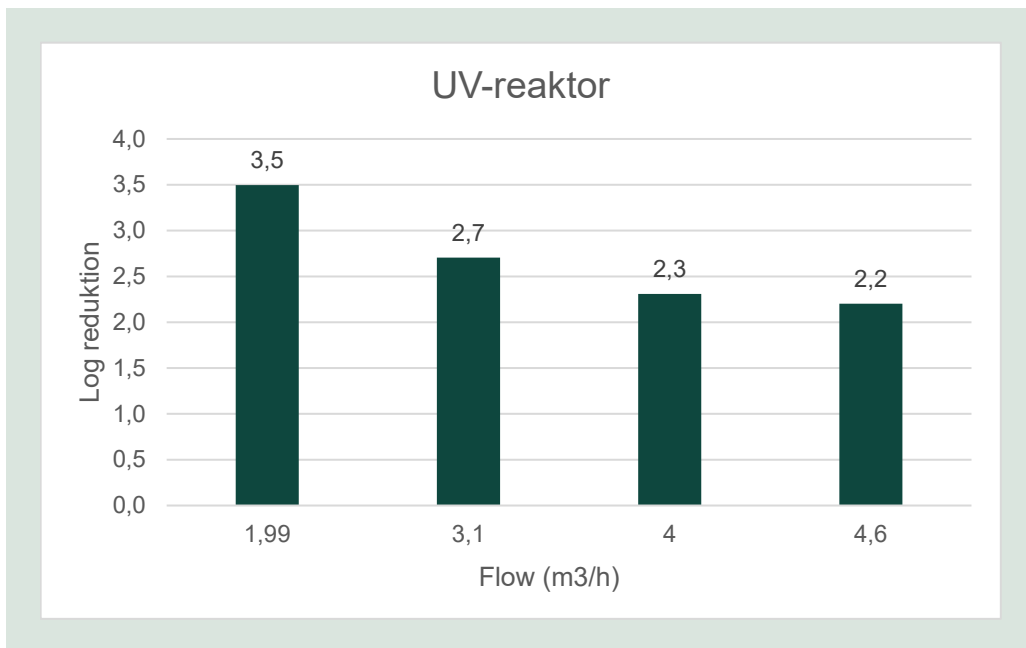
For at evaluere graden af virafjernelse med UV-bestråling er der i projektet blevet foretaget forsøg med en UV-reaktor fra ULTRAAQUA under forskellige flow. Forsøgsopstillingen er vist på FIGUR 22. Da UV-reaktoren i praksis vil være placeret efter membranfiltreringen resulterende i lav turbiditet af permeatvandet, blev der i forsøget anvendt hanevand fremfor havvand. Her blev MS2 bakteriofagen inokuleret i hanevand til en initialkoncentration på $2,8 \cdot 10^7$ ($\pm 3 \cdot 10^6$, $n=2$) pfu/mL og opbevaret i en palletank, hvorfra vandet blev sendt igennem UV-reaktoren med forskellige flow på 1,99, 3,1, 4 og 4,6 m³/h. Løbende blev der udtaget prøver fra udløbsstrømmen af UV-reaktoren til efterfølgende plakstælling.



FIGUR 22. Forsøgsopstilling med UV-reaktor fra ULTRAAQUA.

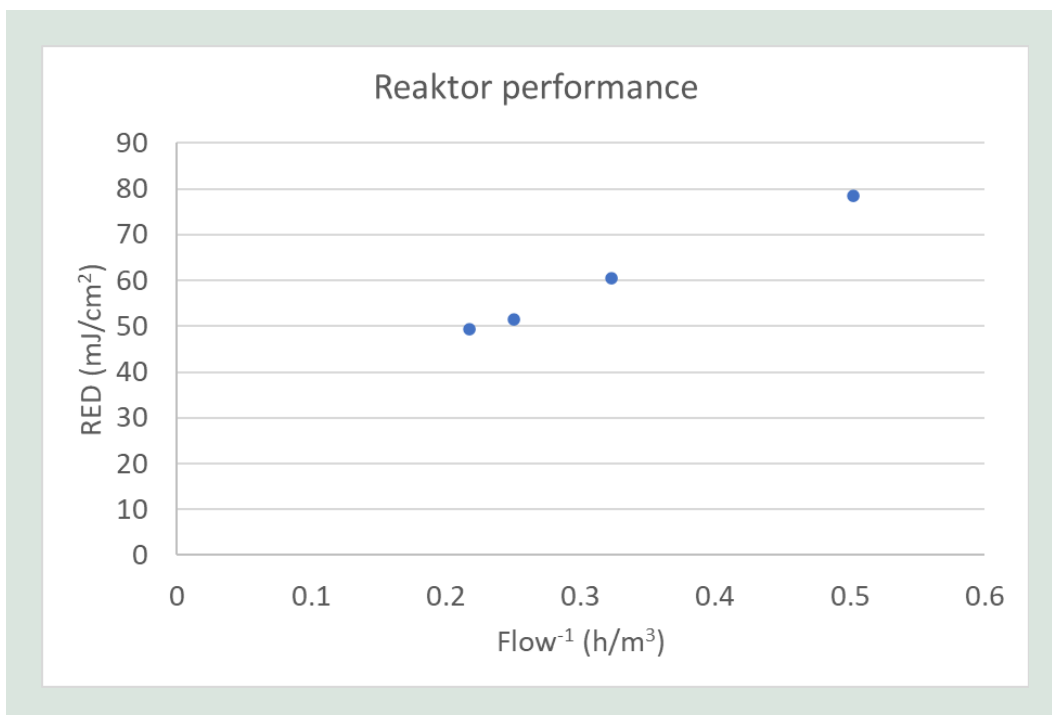
Forsøget viste en faldende logreduktion med stigende flow (se FIGUR 23). Da flowet definerer eksponeringstiden, hvor et lavere flow resulterer i længere eksponering, viser dette forsøg samme tendens, som blev set i Collimated Beam-testen (se afsnit Collimated Beam-test).

Det laveste anvendte flow på 1,99 m³/h resulterede i den højeste logreduktion af vira (FIGUR 23).



FIGUR 23. Logreduktionen af MS2 bakteriofag med UV-bestråling ved forskellige flow.

De observerede log reduktioner er vha. dosis-respons-kurven omregnet til RED-værdier. Disse fremgår af FIGUR 24, hvor de er plottet mod det reciproke flow, der er proportionalt med middelopholdstiden i reaktoren.



FIGUR 24. Sammenhæng mellem RED og reciprok flow for den anvendte UV-reaktor.

Det fremgår, at RED stiger lineært med middelopholdstid, hvilket indikerer, at reaktorens effektivitet er uafhængig af flow i det undersøgte område.

8.4 Anvendelse af resultater til optimering af UV-reaktoren

De opnåede resultater har etableret et solidt dimensioneringsgrundlag for den pågældende reaktor. ULTRAAQUA er påbegyndt et simuleringsarbejde, hvori de opnåede data for reaktoren

anvendes til at validere en 3D-multifysikmodel af desinfektionsprocessen i en UV-reaktor. Med baggrund i den validerede model kan der foretages dimensionering af en lang række forskellige UV-reaktorer med varierende flow. Endvidere giver modellen mulighed for at foretage reaktoroptimering gennem virtual prototyping.

Miljøvenlig produktion af sikkert indtagsvand

Projektet har fokuseret på at optimere og udvikle et teknologikoncept til produktion af højkvalitetsvand til fiskeindustrien fra havvand. Konceptet omfatter keramisk membranfiltrering efterfulgt af UV-behandling for at fjerne bakterier og virus med lavest mulig omkostning og miljøpåvirkning.

I projektet er der udviklet en forbehandling (koagulering) og CIP-spraydosering som har reduceret driftsomkostningerne med 28% og forbruget af CIP-kemi med 98%. Koaguleringen reducerede energiforbruget og CIP-behovet og forlængede driftsperioderne uden at kompromittere vandkvaliteten.

I projektet er UV-behandling blevet optimeret gennem Collimated Beam Test forsøg mhp. bedre at kunne modellere UV-reaktorer til fremtidig dimensionering.

Projektet har også undersøgt sensorer til overvågning af vandkvalitet og anvendelse af on-site producerede CIP-kemikalier. Samlet set har projektet resulteret i effektive metoder til at forbedre vandbehandlingsprocessen og reducere omkostninger og miljøpåvirkning.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk