



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Fjernelse af pesticider og chlorerede opløsningsmidler i vand Med UV-H₂O₂ AOP

MUDP Rapport

December 2020

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Martin Bymose; DGE Miljø- og Ingeniørfirma,
Ronny Rahbek; Insatech A/S,
Mathias Schouw; Insatech A/S

ISBN: 978-87-7038-260-1

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

Indhold

1.	Forord	5
2.	Resumé	6
3.	Summary	7
4.	Baggrund og formål	8
4.1	Baggrund	8
4.2	Formål	8
5.	Proof of concept	9
5.1	Proof of concept	9
5.2	Pilotforsøg med chlorerede opløsningsmidler	9
5.3	Pilotforsøg med desphenyl chloridazon	11
5.4	Opsummering af proof of concept	13
6.	Teori	14
6.1	Avancerede Oxidationsprocesser	14
6.2	UV/H ₂ O ₂ AOP	14
6.3	Hydroxylradikaler	16
6.4	Mineralisering	16
6.5	Pesticider og Chlorerede opløsningsmidler	16
6.5.1	Desphenyl chloridazon (DPC)	17
6.5.2	N,N-Dimethylsulfamid (DMS)	17
6.5.3	2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	17
6.5.4	Tetrachlorethylen (PCE), Trichlorethylen (TCE) og Vinylchlorid (VC)	17
6.6	Litteraturstudie	18
7.	Eksperimentelt arbejde	19
7.1	Udstyr, udvikling og udfærdigelse	19
7.2	Test: Region Hovedstaden	21
7.2.1	Resultater	21
7.2.2	Delkonklusion	32
7.3	Test: DTU Risø	32
7.3.1	Resultater	33
7.3.2	Delkonklusion	35
7.4	Test: Region Sjælland	35
7.4.1	Resultater	37
7.4.2	Delkonklusion	39
7.5	Test: SK Forsyning	39
7.5.1	Resultater	39
7.5.2	Delkonklusion	42
7.6	Konklusion	43
8.	Forretningsmodeller	44
8.1	Case-eksempler	45

8.1.1	Anskaffelsespris hos Region Hovedstaden	45
8.1.2	Driftsomkostninger hos Region Hovedstaden	46
8.1.3	Anskaffelsespris hos DTU Risø	47
8.1.4	Driftsomkostninger hos DTU Risø	47
8.1.5	Økonomiske betragtninger	48
8.2	Marked i Danmark	50
8.2.1	Drikkevand	50
8.2.2	Pump and Treat	51
8.3	Eksportmuligheder	51
9.	Vidensformidling	53
9.1	Følgegruppemøder	53
9.2	Netværksmøder og fremvisninger	53
9.3	Danske og udenlandske præsentationer	54
9.4	Øvrig omtale i medier og pressen	54
10.	Evaluerings og anbefalinger	56
11.	Referencer	57
Bilag 1.	Analyseresultater	58
Bilag 1.1	Region Hovedstaden	58
Bilag 1.2	DTU Risø	61
Bilag 1.3	Region Sjælland	66
Bilag 1.4	SK Forsyning	71

1. Forord

Pesticider og chlorerede opløsningsmidler udgør i dag en stadig større trussel mod grundvandet og drikkevandet i Danmark. Specielt fund af nye pesticidrester har fra 2017 resulteret i, at der er blevet udført flere screeninger af pesticider over hele Danmark (mst.dk, 2020) (Miljøtilstand.nu, 2020). Det vurderes at 40% af de ca. 6000 aktive drikkevandsboringer er påvirket af pesticider og nedbrydningsprodukter heraf og 11% er over grænseværdien. Fjernelsen af disse stoffer har ofte store og langvarige økonomiske konsekvenser for regioner og vandforsyninger. Der er områder, hvor der til trods for en fortsat og øget indsats i grundvandsbeskyttelse ikke kan findes nye kildepladser. Særligt pressede vandforsyninger må i dag fortrynde sig ud af problemerne eller alternativt afskrive vandressourcen.

Der anvendes i dag typisk aktivt kul til rensning af grundvand og drikkevand for de uønskede stoffer. Det er dog ikke altid optimalt at anvende aktivt kul, da nogle af de miljøfremmede stoffer kun i ringe grad bindes til kullene, hvilket medfører et højt kulforbrug, mange kulskift og deraf store driftsudgifter.

Nærværende projekt omhandler forsøg med en avanceret oxidations-proces (AOP) skabt af UV-lys i en specialdesignet UV-reaktor med et unikt refleksionssystem kombineret med præcis dosering af brintoverilte. AOP-processen er en effektiv metode til vandbehandling for chlorerede opløsningsmidler og pesticider og dermed et godt alternativ, både i effektivitet og økonomisk, set i forhold til behandling med aktivt kul.

Formålet er igennem en række forsøg at vise effektiviteten af den nye UV-teknologi til fjernelse af chlorerede opløsningsmidler og pesticider fra grundvand og drikkevand. Det har ligeledes været et mål at skabe en model til beregning af det nødvendige og mest optimale omfang af behandlingen samt de økonomiske og miljømæssige fordele og ulemper ved anvendelse af teknologien som videregående vandbehandling.

2. Resumé

UV-H₂O₂ AOP-teknologi har igennem senere tid været undersøgt som mulig vandbehandling. Under dette projekt er der udviklet en ny yderst nøjagtig behandlingsform med UV-H₂O₂ baseret AOP, døbt RemUVE. Der er opbygget et fuldskala mobilt testanlæg til test af RemUVE-processen på pesticidrester og chlorerede opløsningsmidler hos vandværker og ved afværgeboringer. Specielt er testet for pesticidresterne N,N-Dimethylsulfamid (DMS), Desphenyl Chloridazon (DPC), 2,6-dichlorbenzamid (BAM) og CGA 108906, som alle har vist effektiv behandling ved RemUVE-processen. Der er fundet klare sammenhænge mellem doseringen af energi og H₂O₂ i forhold til nedbrydningen, hvilket understreger vigtigheden af en yderst nøjagtig teknologi.

Chlorerede opløsningsmidler som tetrachlorethylen (PCE), trichlorethylen (TCE) og vinylchlorid (VC) er ligeledes undersøgt, og der er fundet effektiv og hurtig nedbrydning af disse stoffer gennem RemUVE anlægget.

Pesticidrester og chlorerede opløsningsmidler som desphenyl chloridazon, BAM, PCE, TCE og vinylchlorid er med RemUVE-teknologien nedbrudt til under de målbare niveauer. DMS er under dette projekt nedbrudt med mere end 75%.

Det er observeret, at det er vigtigt at denne type behandling kontrolleres nøje, så eventuelle intermedatprodukter viderenedbrydes og mineraliseres fuldt.

Der er fundet stor vigtighed af vandets renhed for hydroxyl-scavangers ved RemUVE-behandlingen, hvor der opnås højere effektivitet des højere vandets klarhed (UVT) er og des lavere indholdet af fx jern og mangan er.

Vandværker, forsyningsselskaber og regioner har alle udvist stor interesse for RemUVE løsningen, ligesom der udvises stor interesse udenfor de danske grænser.

På baggrund af de udførte test er det nu muligt at estimere anlægsstørrelse til behandling ved de allerede undersøgte forurenende stoffer ud fra afklaringer omkring ønsket nedbrydning, flow og vandets UVT-værdi samt indhold af hydroxyl-scavangers såsom jern og mangan.

Der er lavet økonomiske overvejelser for flere cases, så udgiften ved behandling af chlorerede opløsningsmidler og pesticidrester med RemUVE løsningen vises. Udgifterne er fundet så lave som 0,56 kr/m³ behandlet vand.

RemUVE-teknologien anses for at kunne indgå som både kosteffektiv og behandlingseffektiv videregående vandbehandling.

3. Summary

UV-H₂O₂ AOP technology has been examined as possible water treatment in later times. In this project, a new highly accurate treatment with UV-H₂O₂ based AOP, called RemUVE, has been developed.

A full-scale mobile test unit was built to test the RemUVE-process on pesticide residues and chlorinated solvents in both drinking water and in remediation situations. Specially the pesticide residues N,N-Dimethylsulfamide (DMS), Desphenyl Chloridazon (DPC), 2,6-dichlor-benzmid (BAM) and CGA 108906 was tested and all show effective treatment with the RemUVE-process. Clear correlations between the dosing of energy and H₂O₂ with the reduction is seen, which underlines the importance of a highly accurate technology.

Chlorinated solvents, such as tetrachloroethylene (PCE), trichloroethylene (TCE) and vinylchloride (VC) are also tested for reduction with RemUVE. Here an effective and rapid reduction is observed.

Pesticide residues and chlorinated solvents such as desphenyl chloridazon, BAM, PCE, TCE and vinylchloride are reduced to undetectable levels. DMS is through this project reduced with more than 75%.

An observation is made that it is important that this type of treatment is carefully controlled so that possible intermediate products are further reduced and fully mineralized.

The purity of the water from hydroxyl-scavengers is found to be of importance for the RemUVE treatment, where higher effectiveness is obtained when the clarity of the water (UVT) is higher and when the content of e.g. iron and manganese is lower.

A big interest in RemUVE has been shown from waterworks and regions both inside and outside of Denmark.

Based on the tests it is now possible to estimate the size of the RemUVE solution needed to treat contaminations on already known and tested contaminants combined with clarification of the reduction needed, the flow, UVT value of the water and the content of hydroxyl-scavengers such as iron and manganese.

Economic considerations are made for several cases showing the cost of treatment of chlorinated solvents and pesticide residuals with the RemUVE technology. The prices are found as low as 0.56 dkk/m³ treated water.

The RemUVE technology is considered able to use as effective advanced water treatment, both in regards of cost and treatment.

4. Baggrund og formål

4.1 Baggrund

Fjernelse af chlorerede opløsningsmidler i grundvandet har i dag store, langvarige og udgiftskrævende konsekvenser hos regionerne og hos vandforsyningsselskaberne. Forureningsfjernelse udføres typisk i såkaldte "pump & treat" (P&T) anlæg, hvor de aktive kul filtre (GAC) er den største faktor/begrænsning (Flaskehals) for anlæggenes kapacitet og varighed. Disse filtre er tillige kostbare og arbejdsmiljømæssige vanskelige at håndtere.

Pesticider i grundvandet er de seneste år blevet et større og større problem for vandværker og forsyninger i Danmark. Pesticidforureninger i grundvandet vil typiske resultere i at der skal laves nye borerer med udgifter på omkring 1 million kr./boring før den nye boring er i drift. Alternativt skal der etableres en videregående vandbehandling, som ofte omfatter aktive kul filtre, som for mange pesticider ikke er en særlig effektiv måde at behandle vandet, men ofte den eneste. Fremkomsten af "nye" pesticider som Desphenyl Chloridazon (DPC) og N,N-Dimethylsulfamid (DMS) har også resulteret i, at mindre vandværker helt har måtte lukke for deres anlæg og få vand fra alternative borerer.

4.2 Formål

Formålet med MUDP-projektet er at undersøge de tekniske, økonomiske og miljømæssige fordele ved at behandle vand fra afværge- og drikkevandsboringer, forurenede med chlorerede opløsningsmidler og pesticider som Desphenyl Chloridazon og N,N-Dimethylsulfamid ved hjælp af en avanceret oxidationsproces (AOP) baseret på H_2O_2 og en ny Hydro Optisk Desinfektion (HOD) Ultraviolet (UV) lysteknologi.

Målet er at påvise, at med anvendelse af den nye UV/ H_2O_2 teknologi kan udgiften til driften af eksisterende og fremtidige P&T-afværgeanlæg nedbringes samtidig med, at forbruget af aktivt kul ligeledes nedbringes, hvilket kunne være fordelagtigt for især regionerne. Ved disse besparelser kan der indirekte spares, ikke kun på omkostningerne til driften af disse anlæg, men også for hele håndteringen af de aktive kul anlæg som produktion, håndtering og bortskaffelse.

Målet er ligeledes, og er undervejs i projektet blevet endnu vigtigere for Danmark, at udvikle UV/ H_2O_2 teknologien så den kan anvendes til fjernelse af pesticider og derved sikre en drift uden større omlægninger på vandværker. En lille omkostning til drift af UV/ H_2O_2 teknologien sikrer, at selv mindre vandværker kan opretholde at produktionen til deres forbrugere.

5. Proof of concept

5.1 Proof of concept

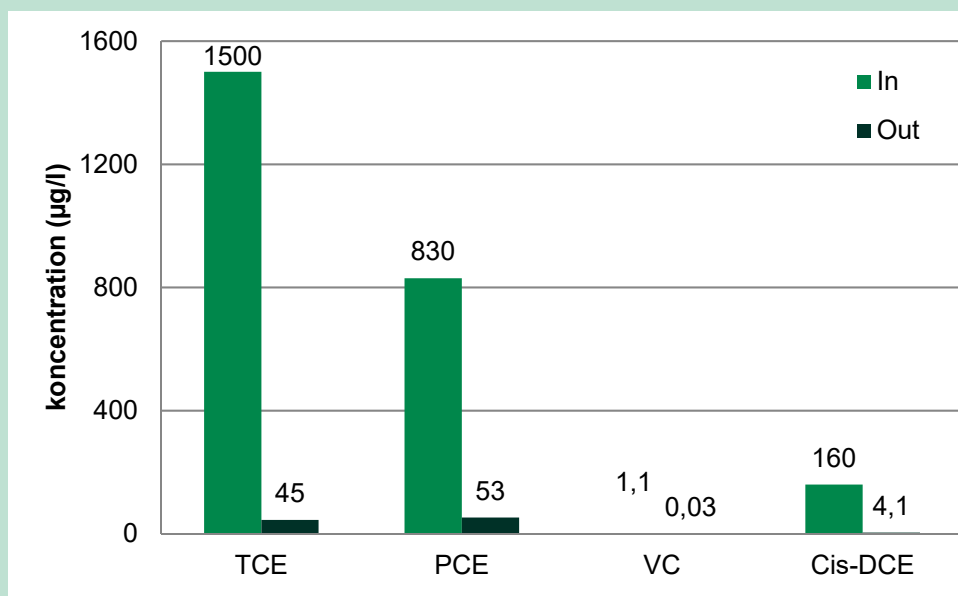
For at undersøge om UV/H₂O₂ metoden kunne finde anvendelse i Danmark, har det været nødvendigt at udføre pilotforsøg til undersøgelse af metodens virkningsgrad. Med hjælp fra hhv. Region Hovedstaden og Vordingborg Kommune lykkedes det at finde to testlokationer til udførelse af "Proof of Concept" pilotforsøg. Pilotforsøgene er udført med et simpelt mobilt setup af UV/H₂O₂ systemet.



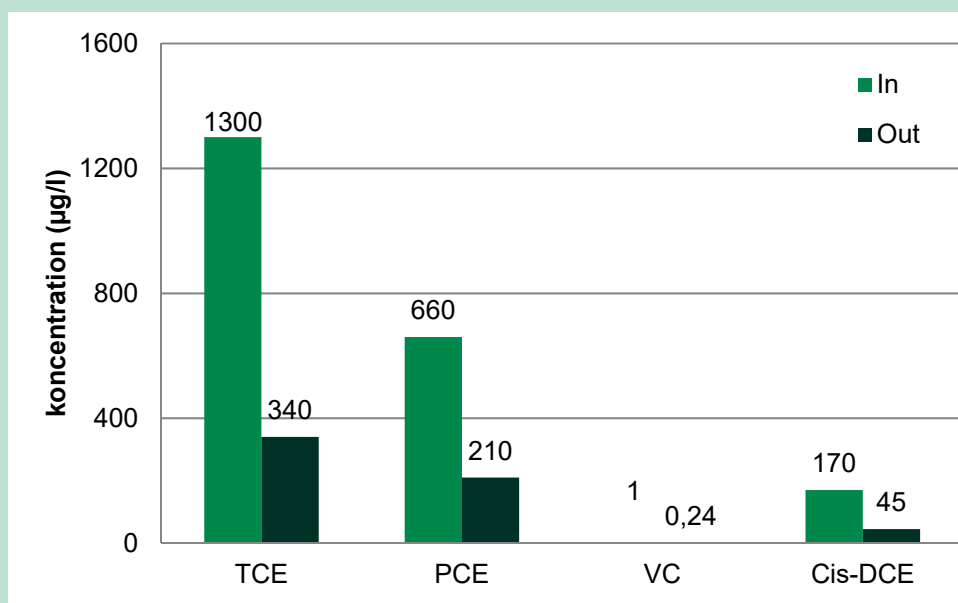
Pilotanlæg under test ved Langebæk Vandværk

5.2 Pilotforsøg med chlorerede opløsningsmidler

Første pilotforsøg blev udført på et af Region Hovedstadens afværganlæg i 2017, hvor der afværges for indhold af chlorerede opløsningsmidler med særligt fokus på TCE, PCE, VC og cis-DCE. Her blev UV- anlæggets effekt testet ved hhv. 1,5 m³/h og 3 m³/h, hvor der er tilsat samme mængde af H₂O₂ ved begge flowhastigheder. I FIGUR 1 og FIGUR 2 er vist resultatgraden af metodens effekt på indholdet af chlorerede opløsningsmidler i vandet.



FIGUR 1. Figuren viser nedbrydningen i koncentrationen af udvalgte chlorerede opløsningsmidler ved behandling med UV/H₂O₂ ved et flow på 1,5 m³/h



FIGUR 2. Figuren viser nedbrydningen i koncentrationen af udvalgte chlorerede opløsningsmidler ved behandling med UV/H₂O₂ ved et flow på 3 m³/h

Som det fremgår af figurene 1 og 2 fjerner UV/H₂O₂ behandlingen en betragtelig del af moderstofferne TCE (ca. 97%) og PCE (ca. 94%). Den største effekt af behandlingen ses ved et flow på 1,5 m³/h. Dette skyldes at massen af tilsat hydrogenperoxid var afstemt efter flowet på 1,5 m³/h.

Ved den dobbelte flowhastighed tilføres samme mængde UV-energi og hydrogenperoxid. Det betyder, at der er mindre hydrogenperoxid til stede i vandet som passerer UV-lampen. Det fremgår af figur 2, hvor resultaterne viser, at der fjernes mindre masse af chlorerede opløsningsmidler.

UV-behandlingen har også effekt på indholdet af chlorerede nedbrydningsprodukter. Som for moderstofferne ses den største effekt ved et flow på 1,5 m³/h hvor tilsætning af hydrogenperoxid er afstemt. Ved flowet på 1,5 m³/h ses en stor effekt på især Cis-DCE og vinylchlorid, der nedbrydes med ca. 95%. Ved det dobbelte flow ses det, at behandlingen kan nedbryde indholdet af Cis-DCE og vinylchlorid til ca. en tredjedel af udgangskoncentrationen.

Pilotforsøget skulle give "proof of concept" og resultaterne heraf viser tydeligt, at UV/H₂O₂ behandlingen kan fjerne indholdet af chlorerede opløsningsmidler og nedbrydningsprodukter i det behandlede vand. Pilotforsøget viser, at den største effekt opnås, når der anvendes UV-lys i kombination med hydrogenperoxid under afstemte forhold imellem tilsætning af hydrogenperoxid og flowhastigheden. Her kan der fjernes op til 95% af de chlorerede stoffer.

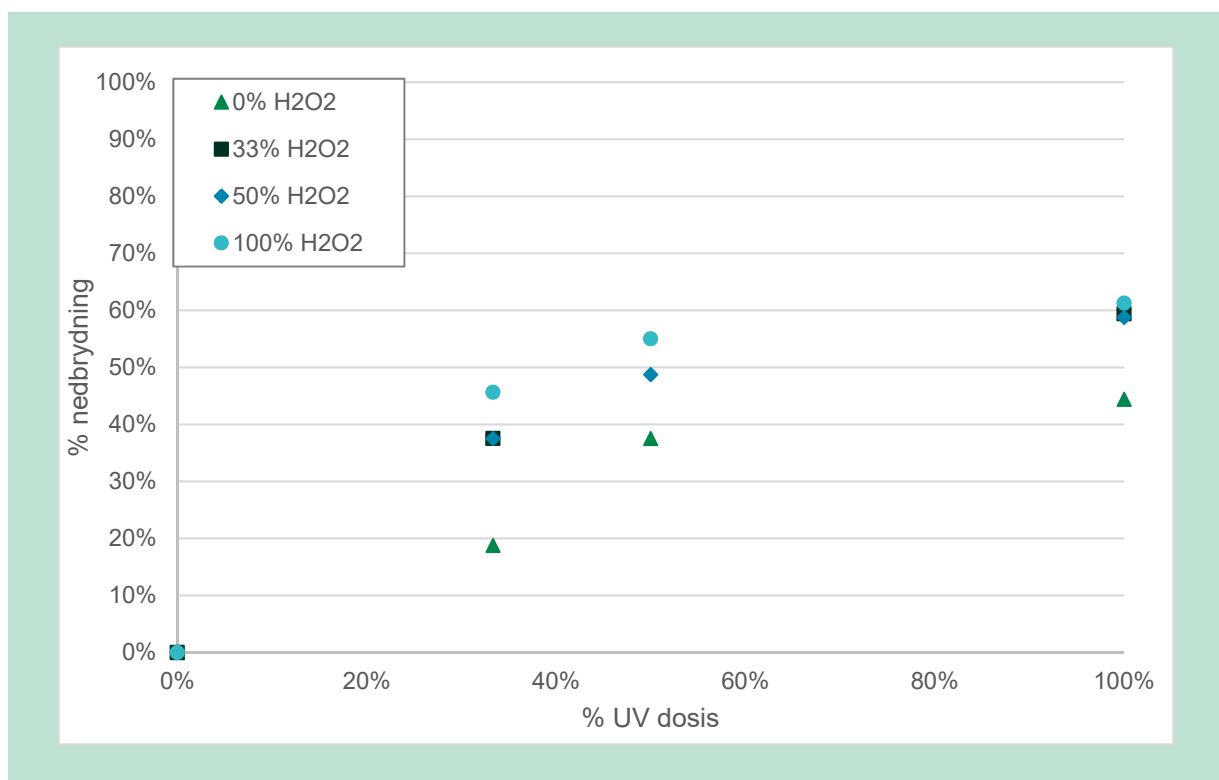
Med en fjernelsesgrad på op til 95% af chlorerede stoffer har UV/H₂O₂ teknologien stort potentiale for at indgå som element i regionernes Pump & Treat afværeløsnings, hvor UV/H₂O₂ kan levetidsforlænge de aktive kul med en faktor 10-20 og i nogle tilfælde erstatte kulfilteranlæg.

5.3 Pilotforsøg med desphenyl chloridazon

Det andet pilotforsøg er udført på et vandværk i Vordingborg Kommune, som er lukket pga. påvisning af Desphenyl Chloridazon (DPC) over grænseværdien på 0,1 µg/l. Testen er udført i 2017. Pilotforsøget har haft til formål at undersøge og dokumentere nedbrydningen af DPC ved brug af UV/H₂O₂ teknologien. Ydermere har testen haft det formål at give en forståelse for hvordan valg af energimængde, kombineret med dosering af H₂O₂, påvirker nedbrydningen af DPC samt den generelle vandkvalitet.

Doseringsmængden af H₂O₂ er valgt efter forventning om en fuld reaktion af mængden under påvirkning af UV-energien. For at sikre at der ikke findes en rest af H₂O₂ i vandet er efter behandlingen i UV-kammeret, er der løbende undersøgt med en håndholdt eXact iDip fotometer, med et opgivet range på 0.00 til 3.5 ppm H₂O₂ og 7% nøjagtighed.

Baseret på energitilførsel og dosering af H₂O₂ er der i FIGUR 3 opstillet et diagram der viser nedbrydningen af DPC under de forskellige konditioner



FIGUR 3. Procentvis nedbrydning af desphenyl chloridazon

Som ses på figur 3 gør det en væsentlig forskel på nedbrydningen af DPC, om der tilføres H_2O_2 eller ej. Det har ved dette forsøg været muligt at nedbryde DPC med op til 61%.

Under processen ses en nedbrydning af NO_3^- (nitrat) samt NVOC til NO_2^- (nitrit). Der er testet to punkter:

- AOP uden H_2O_2 med fuld energi; her er fundet en forøgelse af NO_2^- fra 0,007 mg/l til 0,55 mg/l.
- AOP baseret på UV/ H_2O_2 med 100% H_2O_2 og 33% energi har medført en forøgelse af NO_2^- fra 0,007 mg/l til 0,23 mg/l.

Pilotforsøget viser at UV/ H_2O_2 teknologien kan nedbryde indholdet af Desphenyl Chloridazon til under grænseværdien, men at der i processen skal findes en løsning eller balance for at holde nitrit under grænseværdien på 0,1 mg/l, men stadigvæk have tilstrækkelig nedbrydning af DPC.

Det blev på den baggrund aftalt med Vordingborg Kommune, at der blev udført en yderligere en test (Test 2), hvor målet var at finde den helt præcise tilførsel af energi og dosering af H_2O_2 således, at der kommer en tilfredsstillende balance mellem fjernelse af desphenyl chloridazon og dannelse af nitrit, således, at grænseværdier for begge parameter overholdes.

Test 2 viste, at det var muligt at nedbryde indholdet af desphenyl chloridazon til under grænseværdien samtidigt med en kun beskeden overskridelse af nitritgrænseværdien. I de fleste tilfælde vil det ikke være problematisk, så længe at behandlingen foretages før rentvandstanken, da der i denne ofte vil findes nitrificerende bakterier, der vil sørge for at nedbryde den overskydende nitrit.

5.4 Opsummering af proof of concept

De to pilotforsøg viste rigtig gode og lovende resultater og på den baggrund blev der ansøgt om midler via MUDP-ordningen til videreudvikling af UV/H₂O₂ teknologien som videregående vandbehandling for chlorerede opløsningsmidler og pesticider.

6. Teori

6.1 Avancerede Oxidationsprocesser

Avancerede Oxidationsprocesser, forkortet AOPs, kendetegner en række fotokemiske processer og teknologier, der også kan klassificeres som Avancerede Oxidations Teknologier (AOTs) eller Enhanced Oxidation Processes (EOPs). Underliggende er dog, at de alle følger samme oxiderende reaktionsmekanisme, som imiterer den naturligt forekommende foto-initierende proces, der foregår hvor sollys rammer overfladevand eller vand i jordens atmosfære. Disse processer beror sig hovedsageligt på kort-levede oxygenholdige intermediater som hydroxylradikaler ($\cdot\text{OH}$), og virker grundet den høje reaktivitet af sådanne specier. Hydroxylradikaler er yderst kraftige oxidanter, som samtidig er naturligt forekommende, kortlevende og yderst reaktive reagenter. Disse er lette at producere og leder til yderst hurtige og effektive kemiske oxidationsreaktioner, der kan nedbryde forskellige organiske stoffer.

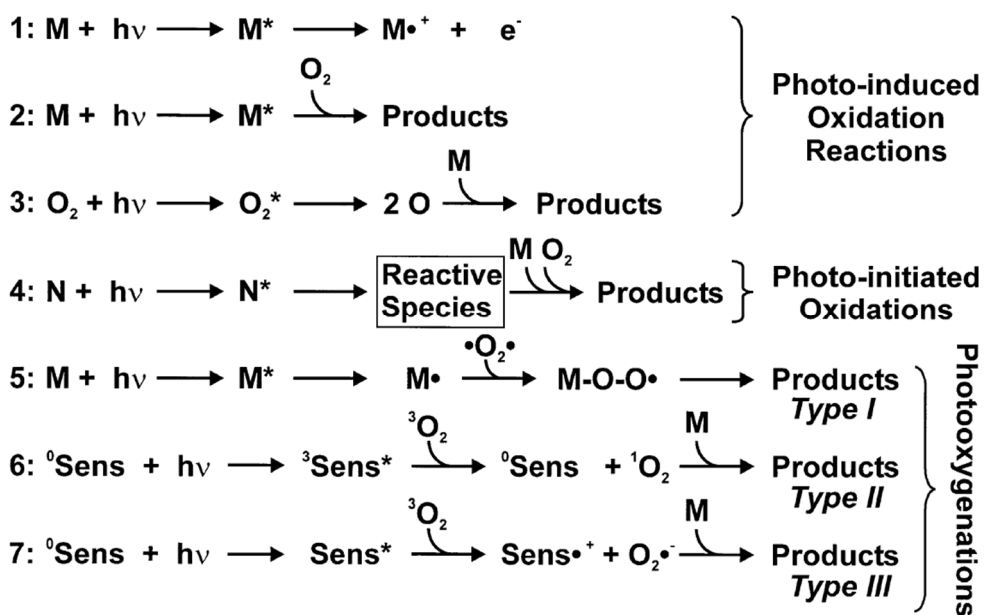
Helt grundlæggende kan siges, at disse AOPs bygger på kombination af lys og reagent. Dog skal man her være forsigtig da den gængse forståelse for ordet "lys" referer til den synlige del (VIS) af det elektromagnetiske spektrum. Dette dækker kun et lille segment af bølgelængderne, nemlig mellem 380 og 780 nm (begge værdier inkluderet), hvor der i dette projekt arbejdes primært med UV-lys – området fra 100 til 380 nm.

Avancerede oxidationsprocesser er historisk set en kendt og veldokumenteret teknologi. Processen er bl.a. tidligere nævnt af miljøministeriet i "Optimering af vandbehandling af pesticidforurennet grundvand" fra 2013 og "Kost effektiv og bæredygtig oprensning af forurennet grundvand – Test og vurdering af forskellige on site vandbehandlingsmetoder" fra 2011, samt en række forskningsartikler, lærebøger og på diverse hjemmesider. Specielt kan Thomas Oppenländer: Photochemical Purification of Water and Air fra 2003 fremhæves, da denne lærebog skaber et essentielt grundlag for en dybere forståelse af hvordan disse processer fungerer. Nogle af de tidligste forskningsresultater fra denne type UV/ H_2O_2 -proces stammer tilbage fra sidste halvdel af 20. århundrede, mens forskning helt tilbage fra 1879 har undersøgt hvordan H_2O_2 interagerer med solens UV-stråler.

6.2 UV/ H_2O_2 AOP

Denne UV/ H_2O_2 proces bygger på to fundamentale ingredienser: UV-lys fra en mellemtryks UV-lampe samt hydrogenperoxid (brintoverilte). Hydrogenperoxid (H_2O_2) er en naturligt forekommende forbindelse, som allerede er til stede i en naturlig vandmatrice. I havvand er den naturlige forekomst mellem 0,5 til 14 $\mu\text{g/l}$, mens ferskvand har en naturlig forekomst mellem 1 og 30 $\mu\text{g/l}$ (Oppenländer, 2003). Hydrogenperoxid er let at håndtere og benyttes blandt andet til drikke- og spildevandsbehandling, blegeprocesser og kemiske syntesereaktioner, hvilket også er kendetegnende for denne type AOP. En proces der kombinerer solide og effektive teknologier, der allerede er implementeret tusindvis af steder i verden. Dette værende enten i form af hydrogenperoxid dosering eller i form af mellemtryks UV-lamper, der i stor stil benyttes til drikkevandsbehandling for at beskytte mod bakterier og vira og med sit brede energispektrum generelt har en høj effektivitet.

Disse UV-drevne oxidationsprocesser kaldes photooxidationsreaktioner, og kan kategoriseres i 3 klasser; nemlig photo-inducerede, photo-initierede eller photooxygenations reationer. Et overblik findes på nedenstående reaktionsskema. Photo-inducerede oxidations reaktioner forløber typisk ved photoionisering af et molekyle der kan viderereagere med oxygen eller afgive en elektron fra det exciterede stadie og derved skabe en radikal kation.

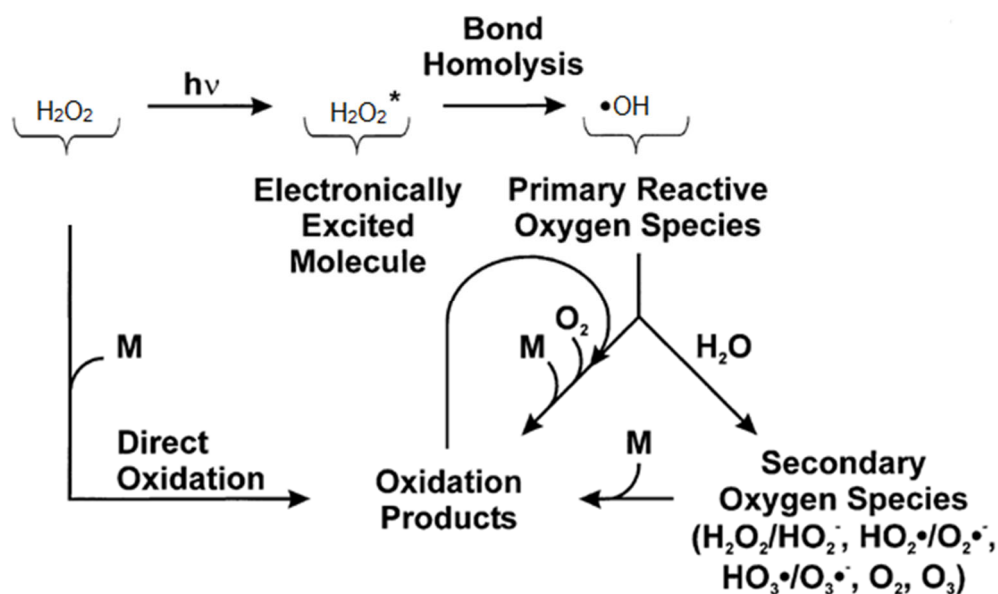


Oversigt over photooxidations reaktioner

M repræsenterer reaktant molekyle (kontaminant) mens N repræsenterer oxidationsmiddel (som H₂O₂) (Oppenländer, 2003)

En photo-initieret oxidationsreaktion, som vist simplificeret i nedenstående reaktionsskema, forløber typisk via et radikal, der er dannet fra en exciteret reagent, såsom H₂O₂. Dette er det typiske forløb for avancerede oxidationsprocesser. Hvad der ses på nedenstående figur er, at reaktionen primært forløber ved dannelsen af hydroxylradikaler ($\cdot\text{OH}$) fra H₂O₂. Photooxygenations reaktionerne er yderst komplekse og vil ikke blive dækket her, men der kan henvises til (Braun AM, 1991) hvis en dybere forståelse ønskes for disse reaktioner.

Det er dog væsentligt at fastholde, at avancerede oxidationsprocesser hovedsageligt vil forløbe over photo-initierede reaktioner, men baseret på den særlige situation af forurening i vandet kan photo-inducerede eller photooxygenations reaktioner konkurrere med de photo-initierede oxidationer. Dette kan resultere i komplekse reaktionsmekanismer og -skemaer.



Idealiseret skema af en photo-initieret oxidations reaktion

M repræsenterer reaktant molekyle. Modificeret figur fra (Oppenländer, 2003)

6.3 Hydroxylradikaler

Frie radikaler er specier med en eller flere uparrede elektroner. Dette er grunden til at radikalerne er så gode til at reagere med andre molekyler. Hydroxylradikalet ($\cdot\text{OH}$) er den neutrale form af hydroxidionen (OH^-), og er yderst kortlivet, da det er så højreaktivt, at det vil gå i reaktion med det samme. Ud over at være essentielt i disse AOPs, spiller hydroxylradikalet også en stor rolle i radikalkemi generelt og i naturen.

$\cdot\text{OH}$ radikaler kan dannes fra mange forskellige molekyler, og dannes i naturen fx i en proces i luften, hvor solens lys reagerer med vand og terpen (fra planter). I dette projekt udnytter vi muligheden for at skabe hydroxylradikaler ved at dissociere hydrogenperoxid med UV lys.

I 2000 berettede vanLoon og Duffy i deres artikel "Environmental Chemistry, A Global Perspective" udgivet i Oxford University Press, Oxford, at fordi grundvand og procesvand kan renses så effektivt med hydrogenperoxid og lys fra mellemtryks-UV lamper, så er det lille usynlige $\cdot\text{OH}$ radikale blevet et økonomisk og miljømæssigt vigtigt "industrielt kemikalie" over de sidste to årtier.

6.4 Mineralisering

Methyltertbutylether (MTBE), et benzinadditiv der kan tages som udgangspunkt for en mineraliseringsproces. Dette er et problemstof visse steder i dansk grundvand og er planlagt undersøgt med denne fjernelsesteknologi i forlængelse af dette projekt.

I disse mineraliseringsprocesser vil der forventeligt være en meget bred vifte af intermediatprodukter som stofferne nedbryder over.

Fælles for disse intermediater er, at de ved en ufuldkommen proces vil kunne findes i vandet, mens de ved en fuldendt proces vil viderenedbrydes til de endelige slutprodukter, som ved disse reaktioner vil være uorganiske molekyler.

Der er tidligere lavet laboratorieforsøg med MTBE for at kortlægge intermediater der findes indtil fuld mineralisering ved H_2O_2 -UV behandling (Stefan MI, 2000). Denne liste findes på nedenstående skema over intermediatprodukter.

Characterization	Compound	Formula
C ₅ Products	tert-Butyl formate (TBF)	$(\text{CH}_3)_3\text{C-O-CHO}$
	2-Methoxy-2-methyl-propionaldehyde (MMP)	$\text{H}_3\text{CO}(\text{CH}_3)_2\text{C-CHO}$
C ₄ Products	tert-Butyl alcohol (TBA)	$(\text{CH}_3)_3\text{C-OH}$
	Hydroxy-iso-butyraldehyde	$\text{HO}(\text{CH}_3)_2\text{C-CHO}$
	Hydroxy-iso-butyric acid	$\text{HO}(\text{CH}_3)_2\text{C-COOH}$
	iso-Butyraldehyde	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCHO}$
C ₃ Products	Acetone	H_3CCOCH_3
	Methylacetate	$\text{H}_3\text{CCOOCH}_3$
	Hydroxyacetone	$\text{HOCH}_2\text{COCH}_3$
	Pyruvaldehyde	H_3CCOCHO
	Pyruvic acid	$\text{H}_3\text{CCOCOOH}$
C ₂ Products	Acetic acid	CH_3COOH
	Oxalic acid	HOOC-COOH
C ₁ Products	Formaldehyde	HCHO
	Formic acid	HCOOH

Intermediatprodukter under mineralisering af MTBE under behandling med H_2O_2 -UV (Oppenländer, 2003)

6.5 Pesticider og Chlorerede opløsningsmidler

I dette MUDP-projekt er hovedfokus lagt på en række pesticider, pesticidrester, chlorerede opløsningsmidler samt nedbrydningsprodukter, der desværre findes i nogle grundvandsreservoir, nemlig: Desphenyl Chloridazon (DPC), N,N-dimethylsulfamid (DMS), 2,6-dichlorbenzamid (BAM), trichlorethylen (TCE), tetrachlorethylen (PCE) og vinylchlorid (VC).

Generelt for mange af disse stoffer, har det vist sig besværligt at fjerne eller nedbryde dem med andre metoder. Visse af stofferne er ikke rentable eller nærmest umulige at fjerne med gængse rensemetoder såsom kulfiltre.

6.5.1 Desphenyl chloridazon (DPC)

DPC er et nedbrydningsprodukt fra stoffet Chloridazon (Pyramin), der er blevet brugt som ukrudtsmiddel specielt ved produktion af roer, rødbeder og løg. Chloridazon blev solgt fra 1964 til 1996, hvor det blev forbudt i Danmark, da det blev vurderet at udgøre en uacceptabel risiko for forurening af grundvandet.

6.5.2 N,N-Dimethylsulfamid (DMS)

DMS er et nedbrydningsprodukt der kan stamme fra to forskellige moderstoffer. De to moderstoffer, tolylfuanid og dichlofuanid, har været anvendt som biocid, bl.a. i træbeskyttelse og maling. Desuden har tolylfuanid været anvendt som pesticid til en række planter som jordbær, tomater, frugttræer samt til prydblplanter. Efter 2007 har stofferne ikke været brugt som pesticider, og de bruges heller ikke længere i træbeskyttelsesmidler mod svamp.

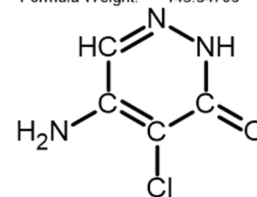
6.5.3 2,6-Dichlorbenzamid (BAM)

BAM er et nedbrydningsprodukt fra pesticiderne dichlobenil og chlorthiamid, der blev brugt i perioden fra 1965 til 1997, hvor stofferne blev forbudt. Pesticiderne er ukrudtsmidler og blev solgt under handelsnavnene Prefix og Casoron. I perioden fra 1965 til 1997 har der i gennemsnit været brugt 29.000 kg pr. år af de to aktive stoffer dichlobenil og chlorthiamid. BAM-forureningen kan spredes til grundvandet ved nedsivning langs utætte borer, ved nedsivning gennem jordlagene eller ved nedsivning fra vandløb, søer, regnvandsbassiner m.v. BAM er et meget stabilt stof og det transporteres nemt med det nedsivende regnvand gennem jordlagene og videre til grundvandsmagasinerne. Selv om der ikke har været brugt Prefix eller Casoron siden 1997 kan der stadig findes indhold af moderstoffet dichlobenil i jorde, på de steder, hvor ukrudtsmidlerne har været brugt. Der kan fortsat ske nedsivning af BAM fra disse kilder, men hovedparten af BAM synes allerede at være sivet ned fra overjorden.

6.5.4 Tetrachlorethylen (PCE), Trichlorethylen (TCE) og Vinylchlorid (VC)

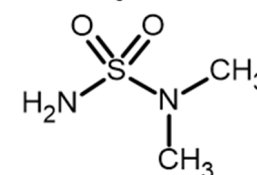
PCE, TCE og VC er alle chlorerede opløsningsmidler. TCE anvendes i vid udstrækning som affedningsmiddel i metalindustrien, som rensesvæske og som opløsningsmiddel for en lang række stoffer og produkter. TCE er derfor ofte forekommende ved jord- og grundvandsforureninger og er meget mobilt i jord. I miljøet kan det omdannes til dichlorethylene og vinylchlorid. PCE anvendtes tidligere som affedningsmiddel i metalindustrien men anvendes stadigvæk i tekstil- og renserivirksomheder som rensmiddel og generelt som opløsningsmiddel. Ligesom for TCE, forekommer PCE også ofte ved jord- og grundvandsforureninger og er ligeledes meget mobilt i jorden. Fra nedbrydningen af PCE kan dannes TCE, dichlorethylene og vinylchlorid. VC anvendes primært til fremstilling af PVC-plast og blandingspolymerer. I 1981 var produktionsmængden af VC ca. 20 mio. tons på verdensplan, hvoraf ca. 98% gik til fremstillingen af PVC-plast og blandingspolymerer. VC kan nedsive igennem jorden og kan derved ende i grundvandsreservoir, og kan desuden skabes fra TCE og PCE i nedbrydningsprocesser, både i jorden og i vandet.

Desphenyl Chloridazon
Molecular Formula: $C_8H_5Cl_2N_3O_2$
Formula Weight: 145.54706



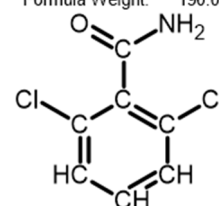
Strukturformel af DPC

N,N-dimethylsulfamid
Molecular Formula: $C_2H_8N_2O_2S$
Formula Weight: 124.16212



Strukturformel af DMS

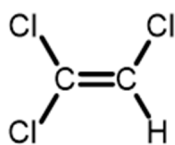
2,6-Dichlorbenzamid
Molecular Formula: $C_7H_5Cl_2NO$
Formula Weight: 190.0267



Strukturformel af BAM

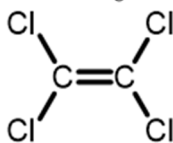
Trichlorethylen

Molecular Formula: C_2HCl_3
Formula Weight: 131.38834



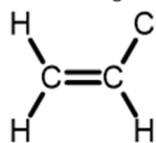
Tetrachlorethylen

Molecular Formula: C_2Cl_4
Formula Weight: 165.8334



Vinylchlorid

Molecular Formula: C_2H_3Cl
Formula Weight: 62.49822



Strukturformler af TCE, PCE og VC

6.6 Litteraturstudie

Der er udført et grundigt litteraturstudie i forbindelse med dette projekt, da enhver tidligere erfaring og information om virkemåder og potentiel risiko ved udførsel af disse AOPs på denne række af stoffer kan være essentiel i den eksperimentelle udførsel og fremgangsmåde, samt hvilke vandanalyser der udføres på det rensede vand.

Igennem dette litteraturstudie er der kigget på videnskabelige artikler, et udvalg af lærebøger og informationer fra Miljø- og Fødevarerministeriet samt European Food and Safety Association (EFSA), som fx J.nr. MST-433-00038, der advarer om dannelsen af N-Nitrosodimethylamin (NDMA) ved behandling af DMS ved ozonering. Selvom ozoneringsprocessen er lignende UV/ H_2O_2 -processen der undersøges her, er der en række fundamentale forskelle. Dog giver denne viden yderligere incitament til at undersøge for dannelsen af NDMA under testene.

Denne type AOP er ikke ny, og der er en signifikant mængde artikler og lærebøger der omfatter nedbrydning af organiske stoffer med UV/ H_2O_2 processen, dog er der en generel tendens i litteraturen: næsten alle udgivelser med lignende processer er udført under laboratorieforhold, hvor der stilles en skål med vand under en UV-lampe, som så belyses over en tidsperiode. Denne tidsperiode omregnes efterfølgende til en samlet mængde energi som vandet er tilført. Selvom dette kan give en idé om, om et specifikt molekyle kan rammes af denne proces, vil der typisk være store forskelle mellem hvad der ses under laboratorie eksperimenter og hvad der ses ved kontinuerlig pilot eller fuld skala forsøg. Desuden er de pesticidstoffer, der undersøges igennem disse forsøg først blevet af større interesse indenfor den seneste tid, hvorfor der ikke findes relevante udgivelser for undersøgelserne af disse med denne type proces.

7. Eksperimentelt arbejde

7.1 Udstyr, udvikling og udfærdigelse

Grundlæggende ses behovet for at teste vandbehandlingen direkte hos vandforsyninger eller ved afværgeboringer. Da behandlingen er en kontinuerlig proces, vil det alt andet lige altid give de bedste og mest troværdige resultater at udføre testen som en kontinuerlig test. Dette med et anlæg der potentielt kunne være identisk med det der ville kunne tilbydes som fast installation under de eksakte forhold tilstede hos forsyningsselskabet eller afværgeboringen. Testanlægget er derfor udviklet som en mobil enhed, indbygget i en trailer, som giver mulighed for at opstille og køre test der hvor behovet er og med udstyr tilsvarende det der i mange tilfælde ville bruges ved fuldskala vandbehandling. Ved opsætning skal traileren blot tilsluttes el og forsynes med en kontinuerlig vandstrøm samt monteres med en vandslange til afløb.



Testtrailer opstillet til test

Igennem anlægget måles en række parametre som alle uploades direkte til en cloud-baseret database, herunder værende flow, tryk ind og ud, temperatur ind og ud og UVT (UV-transmissionen i vandet).

Dosering [mJ/cm^2] betegner mængden af UV-lys som det enkelte stof minimum doseres med igennem UV-HOD (Hydro Optisk Desinfektion) anlægget, og er afhængig af vand-flow (opholdstiden i anlægget), UVT (hvor meget UV lys der trænger igennem vandet) og lampens effekt (lampen ældes igennem tiden). Ved konstant output af effekt fra lamperne vil dosen falde ved stigende flow. Det samme gør sig gældende ved faldende UVT – hvis der trænger mindre UV-lys igennem vandet, så vil dosen falde. Det specielle ved dette UV-anlæg er, at dosen nøje og automatisk overvåges og justeres. Anlægget får input fra en flowmåler og måler selv UVT i vandet ud fra 2 sensorer som samtidig måler lampernes effekt – altså kompenseres også for tab af lampernes effekt over tid. Ud fra disse parametre beregner anlægget selv den nøjagtige dose som vandet som minimum vil møde i dets passage igennem anlægget. Herved sikres en effektiv behandling hvor der hverken over- eller underdoseres energi, hvilket er positivt både for sikker vandbehandling, for økonomien og for anlæggets bæredygtighed.

Ligeledes har flowet betydning for doseringen af H_2O_2 til vandet, der foregår med en yderst nøjagtig specialudviklet løsning til dette formål, baseret på en membranpumpe og en mini-Coriolis masseflowcontroller.

Ydermere er der indbygget et sandfilter, således, at råvand kan grovfiltreres inden det indtræder i UV-systemet.

Igennem anlægget er placeret en række prøvehaner, så der kan udtages vandprøver ved indløb til traileren (før sandfilter), umiddelbart efter sandfilter, umiddelbart før H₂O₂ dosering, umiddelbart før UV-anlægget (efter homogenisering af vandstrømmen efter H₂O₂ er doseret) og efter UV-anlægget.

Anlægget er desuden monteret med en pumpe og en 1 m³ vandtank, så rensset vand kan pumpes tilbage igennem anlægget og benyttes til backflush af sandfilter. Denne vandtank kan også benyttes til at lave en citronsyreopløsning, som bruges til rensning af anlægget.



Testtraileren indvendigt



Testtraileren indvendigt

Der kan desuden ses en videogennemgang af systemet på <https://remuve.dk/>.

7.2 Test: Region Hovedstaden

Testen er udført ved Innovationsgaragen hos Region Hovedstaden, Skovlunde Byvej 96A, 2740 Skovlunde. Her findes et afværgeanlæg med kulfiltre, der har til formål at fjerne chlorerede opløsningsmidler fra vandet.

Under testens forløb var der vanskeligheder med kontinuerlig og stabil forsyning af vand, der blev udtaget lige efter anlæggets sandfilter (før kulfiltrene). Dette medførte, at der blev brugt væsentligt mere tid på at køre en test for 2 ppm tilført H_2O_2 , hvor den første plan havde været at undersøge flere doseringsmængder af H_2O_2 også. Dette var ikke muligt at nå indenfor tidsrammen til testudførelsen.

7.2.1 Resultater

Vandet fra Innovationsgaragen er specifikt undersøgt for trichlorethylen (TCE), tetrachlorethylen (PCE) og vinylchlorid (VC). Desuden er trans-1,2-dichlorethylen, cis-1,2-dichlorethylen, nitrit, nitrat, ammonium+ammoniak, NVOC m.fl. undersøgt. Alle vandanalyser er foretaget akkrediteret af ALS Denmark.

Der er kørt prøver over et forløb på 2 dage, med en referenceprøve for hver dag.

Referenceprøver	Dag 1	Dag 2
TCE	2,7 µg/l	2,7 µg/l
PCE	5,4 µg/l	5,4 µg/l
VC	0,022 µg/l	0,023 µg/l
Trans-1,2-dichlorethylen	0,071 µg/l	0,059 µg/l
Cis-1,2-dichlorethylen	4,9 µg/l	5,1 µg/l
Nitrit	0,001 mg/l	0,001 mg/l
Nitrat	0,16 mg/l	0,24 mg/l
Ammonium+Ammoniak	0,045 mg/l	0,076 mg/l
Chlorid	46 mg/l	41 mg/l
Hydrogencarbonat	370 mg/l	370 mg/l
NVOC	2,0 mg/l	2,0 mg/l

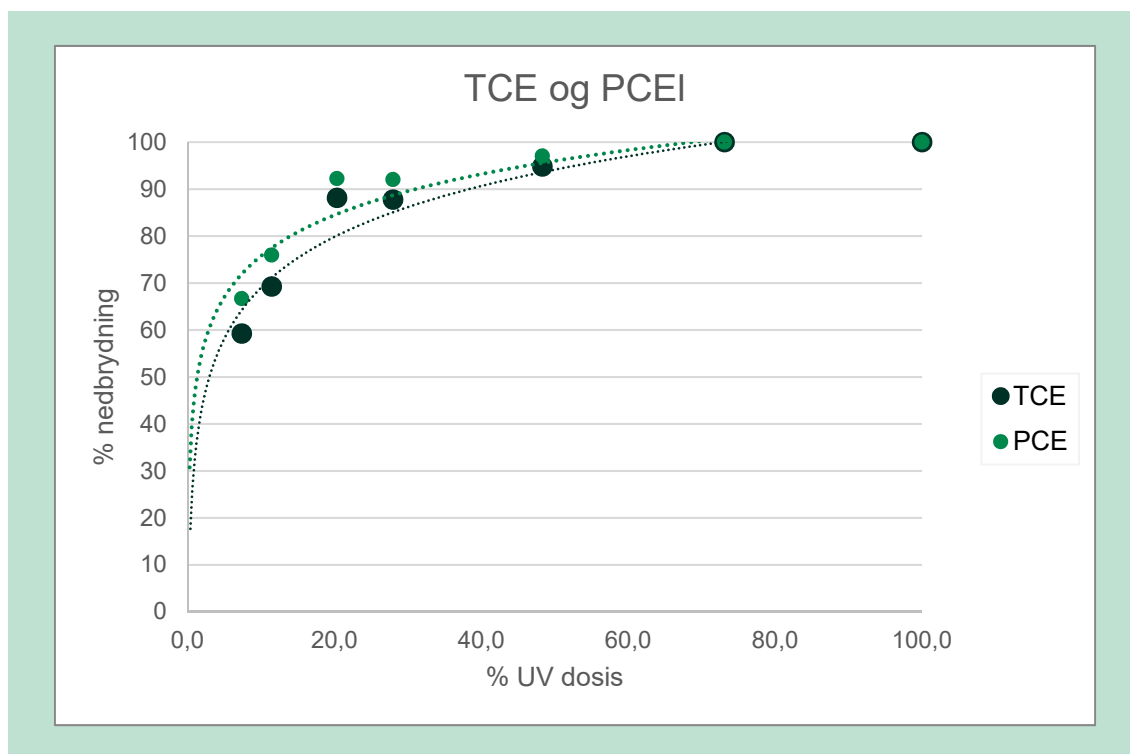
FIGUR 4. Oversigt over vandindhold i indløb på de to prøvedage

Grundet erfaringer fra de tidligere udførte pilottests, forventes det, at en optimal dosering af H_2O_2 til nedbrydning af TCE, PCE og Vinylchlorid ligger omkring 2 ppm. Den samme mængde er derfor brugt til disse tests, og det har som tidligere beskrevet ikke været muligt at udføre tests med flere doseringer af H_2O_2 her. Testresultaterne findes i figurene herunder, hvor den procentvis nedbrydede mængde findes på y-aksen og den procentvise UV-dose findes på x-aksen.

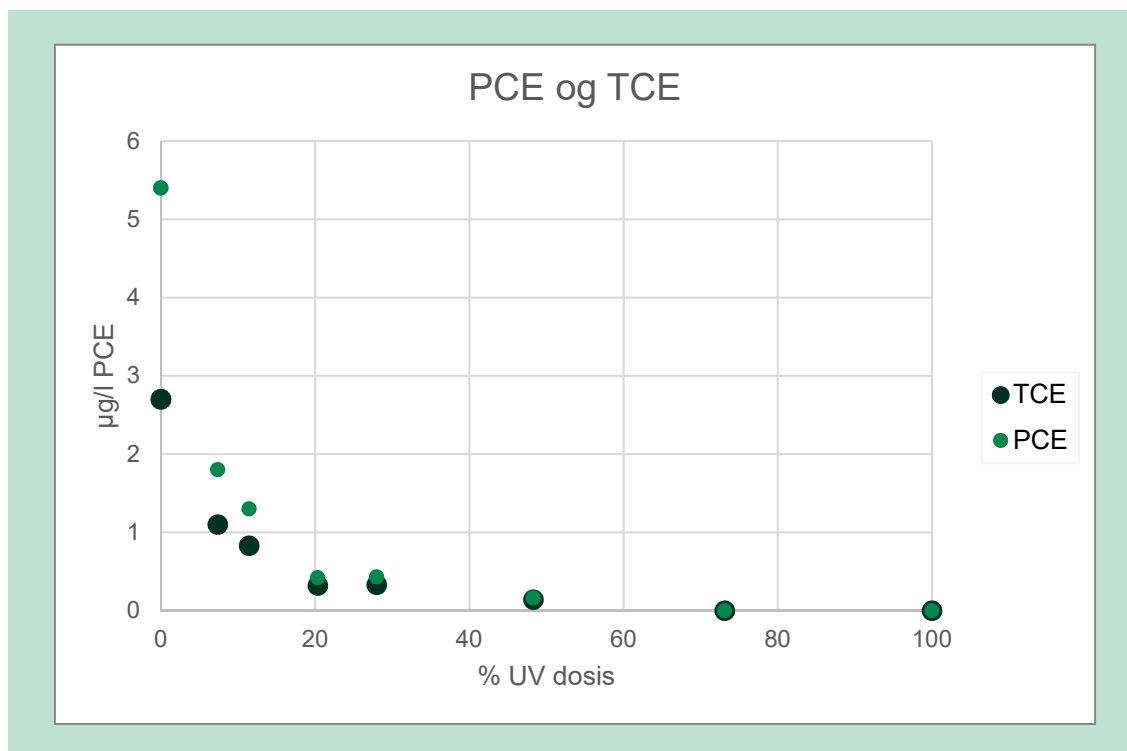
Hvert punkt på figuren er et testresultat, mens den stiplede linje er en matematisk regression tilpasset resultaterne, hvilket vil være gennemgående for samtlige resultater hvor dette giver mening og har været muligt.

FIGUR 5 viser nedbrydningen af PCE og TCE på samme graf, så sammenhængen mellem disse to stoffer let kan ses. Her ses, at nedbrydningerne af PCE har været lidt højere end for TCE ved samme testforhold, men de to stoffer følger hinanden tæt.

FIGUR 6 viser indholdet af PCE og TCE i vandprøverne, hvor punkterne der findes ved 0 % UV dosis er indhold i vand ved indløb.



FIGUR 5. Den procentvise nedbrydning af PCE og TCE ved 2 ppm H_2O_2 og variabel UV dosis. Ligeledes ses regressioner lavet fra testdata. De to stoffers nedbrydning følges ad.



FIGUR 6. Indhold [$\mu\text{g/l}$] af PCE og TCE i vandprøverne ved 2 ppm H_2O_2 og variabel UV dosis. Ved 0 % UV dosis findes resultater for det ubehandlede vand.

Som det ses, bliver TCE forholdsvis hurtigt nedbrudt selv ved mindre mængder af H_2O_2 og energi. Allerede ved 73% energi er der nedbrydning til under den målbare værdi for TCE ($<0,02 \mu\text{g/l}$). Udgangspunktet for TCE var $2,7 \mu\text{g/l}$, og allerede ved 5% energi er dette indhold mere end halveret.

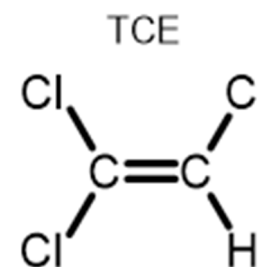
Det ses, at nedbrydningen af TCE går stærkt i starten – ved lave doser af energi. Specielt op til

omkring 65-70% nedbrydning, får man en meget stor nedbrydning for en lille energimængde. Grafen flader herefter lidt ud, og der kræves mere energi at få nedbrudt de sidste procenter af TCE. Faktisk kræver det tæt på en fordobling af energien (fra 35% energi til 70% energi) at gå fra 90% nedbrydning til 100% nedbrydning (under den målbare grænse).

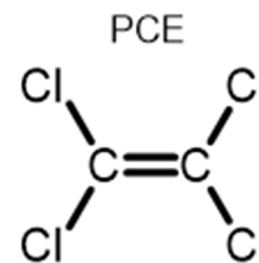
Dette skaber et grundlag for at sætte sig mål for nedbrydningen – hvis man ønsker en specifik værdi efter behandlingen. I dette tilfælde kunne målet fx sættes til at nedbryde $2,7 \mu\text{g/l}$ til $0,15 \mu\text{g/l}$, hvilket ville kræve ca. 50% energi, hvor man kunne opnå en nedbrydning fra $2,7 \mu\text{g/l}$ til $0,30 \mu\text{g/l}$ ved blot 30% energi.

Billedet der tegnes af behandlingen på tetrachlorethylen ligner til forveksling det tilsvarende billede for TCE. På grafen her ses ligeledes en tendens der peger på, at mængden af PCE nedbrudt stiger meget kraftigt i starten hvor energidosen hæves op igennem det helt lave område, og flader derefter ud når der opnås 75-80% nedbrydning, således, at de sidste procenter også er energimæssigt dyrere at få nedbrudt end de første.

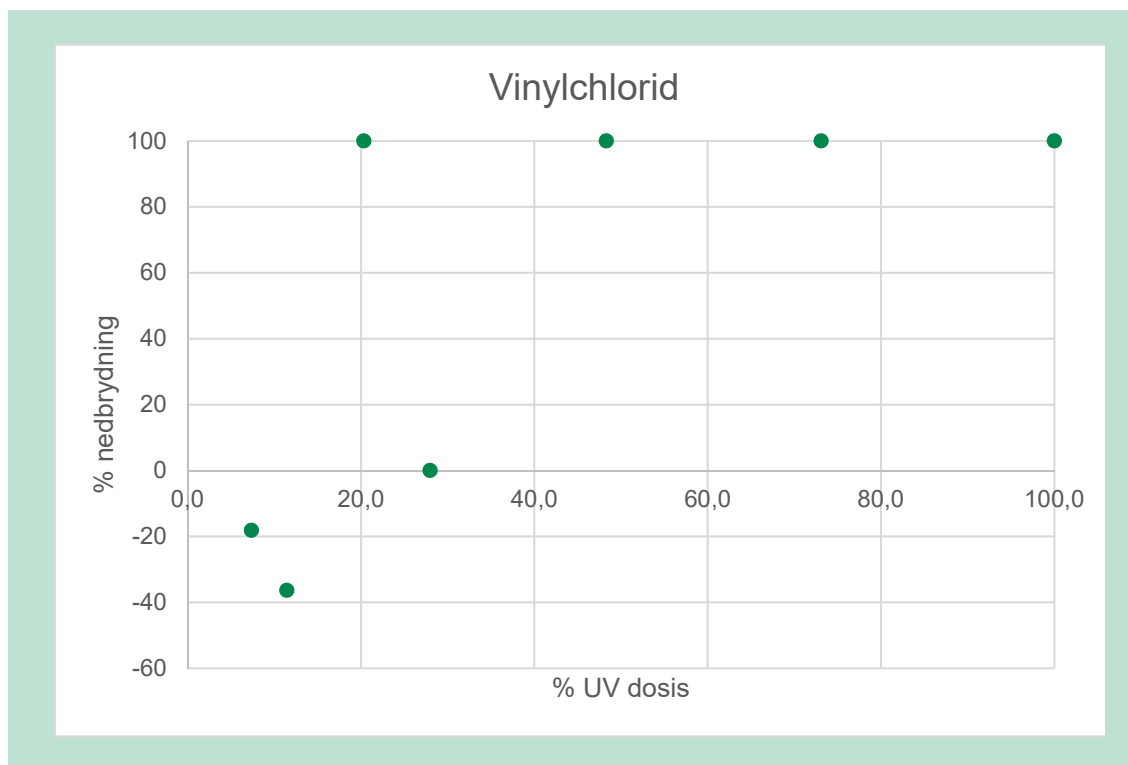
Generelt viser behandlingen god nedbrydning af PCE, og det har ligeledes her været muligt at nedbryde til under det målbare niveau ($<0,02 \mu\text{g/l}$) allerede ved 73% energi. Resultaterne viser en anelse højere nedbrydninger for PCE sammenlignet med TCE. Her er udgangspunktet på $5,4 \mu\text{g/l}$ PCE nedbrudt til blot $0,16 \mu\text{g/l}$ ved 50% energi.



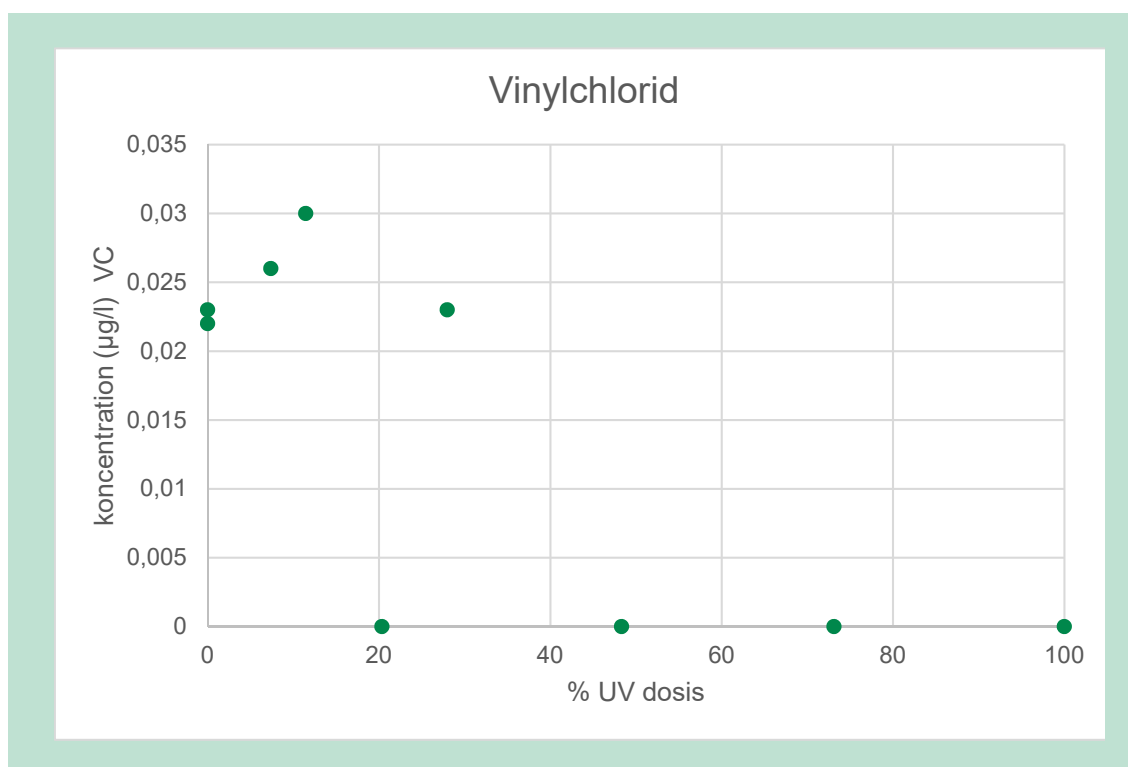
TCE strukturformel



PCE strukturformel



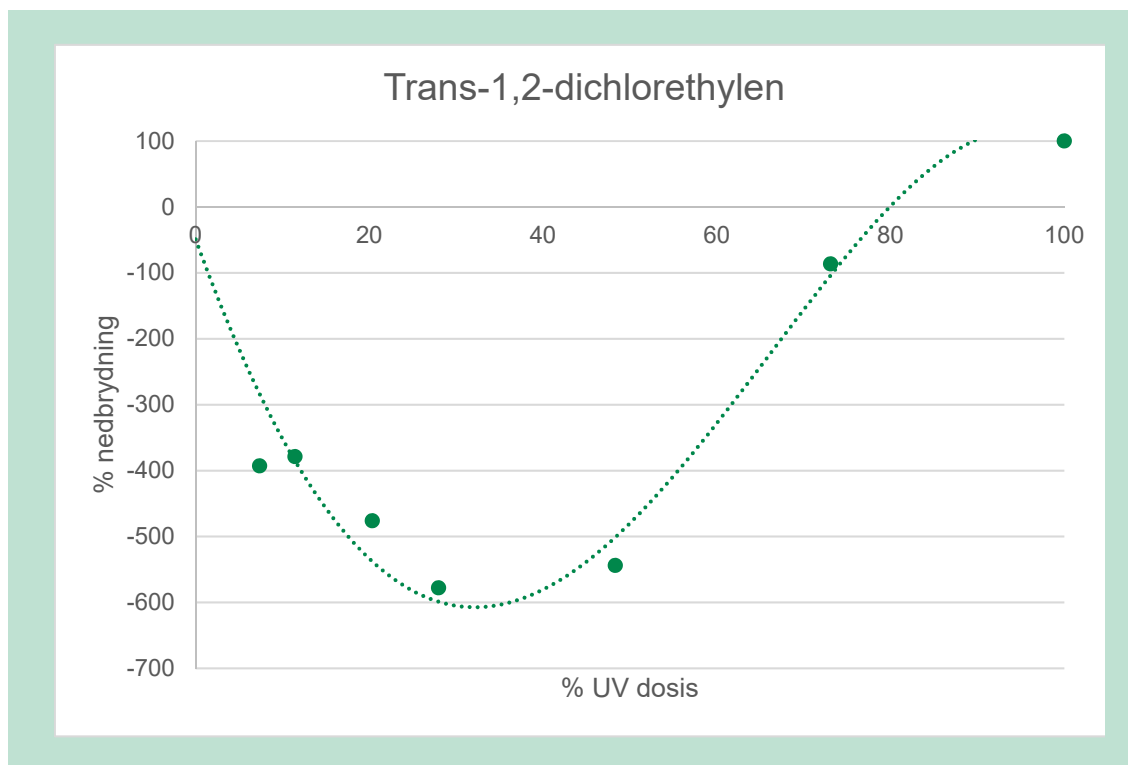
FIGUR 7. Den procentvise nedbrydning af VC ved 2 ppm H₂O₂ og variabel UV dosis.



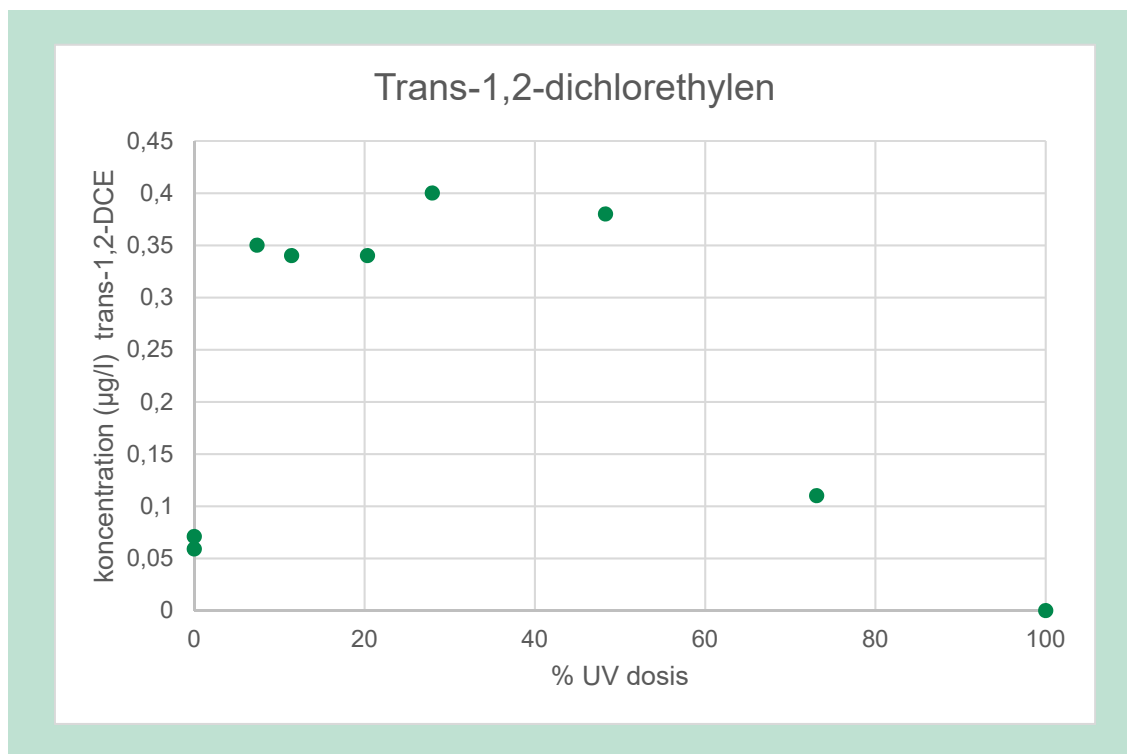
FIGUR 8. Indhold [µg/l] af VC i vandprøverne ved 2 ppm H₂O₂ og variabel UV dosis. Ved 0 % UV dosis findes resultater for det ubehandlede vand.

Desværre var indholdet af vinylchlorid så lavt (0,022 – 0,023 µg/l) at det ligger lige på grænsen af det målbare (0,020 µg/l). Der er derfor i dette eksempel store måleusikkerheder, hvorfor te-

sten i nogle få tilfælde viste små udsving i vinylchlorid og ellers er den i alle andre tilfælde under den målbare værdi. At der i den helt lave ende af energi-skalaen ses en lille forøgelse op til 0,03 µg/l kan yderligere skyldes, at PCE og TCE kan tænkes at nedbryde til vinylchlorid, og der i disse tilfælde muligvis ikke er overskudsenergi til også at fjerne den dannede vinylchlorid. Dog ligger alle resultater ved lidt højere energimængder under det målbare niveau, og bør altså være nedbrudt til under 0,020 µg/l. Desuden kan henvises til tidligere pilottests, hvor der findes gode resultater for nedbrydelsen af vinylchlorid.



FIGUR 9. Den procentvise nedbrydning af trans-1,2-dichlorethylen ved 2 ppm H₂O₂ og variabel UV dosis. Ligeledes ses regression lavet fra testdata. Vær opmærksom på, at en negativ nedbrydning, som ses her, tilsvarende en forøgelse af indholdet.



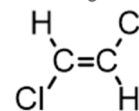
FIGUR 10. Indhold [µg/l] af trans-1,2-dichlorethylen i vandprøverne ved 2 ppm H₂O₂ og variabel UV dosis. Ved 0 % UV dosis findes resultater for det ubehandlede vand.

Dichlorethylen er endnu et forventet nedbrydningsprodukt fra PCE og TCE-nedbrydningen, hvilket specielt ses ved dannelsen af trans-1,2-dichlorethylen. Dette danner yderligere grundlag for en forventning om, at nedbrydningen af PCE og TCE forløber over dehalognationsreaktioner.

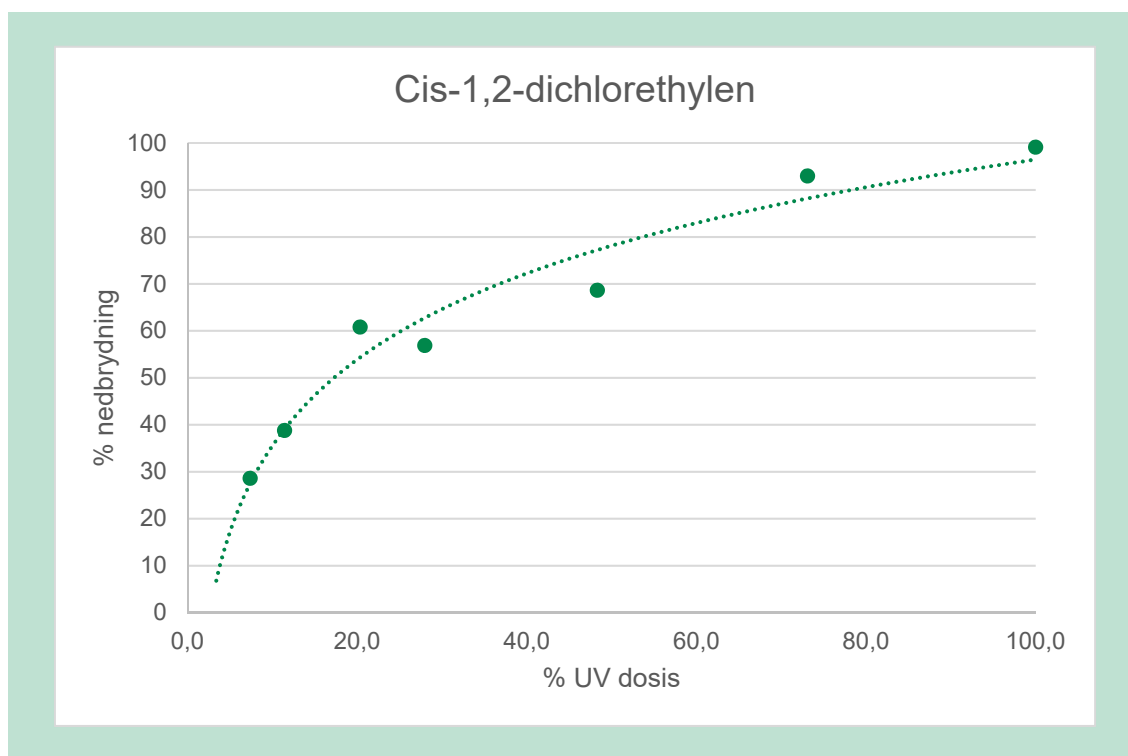
Som udgangspunkt er der fundet 0,071 µg/l og 0,059 µg/l trans-1,2-dichlorethylen i det ubehandlede vand under testene. Fra resultaterne ses, at der allerede ved lav energi er dannet en større del trans-1,2-dichlorethylen, og at der ligger et forventeligt optimum for dannelsen omkring 35% energi, hvor der findes helt op til 0,4 µg/l i det behandlede vand. Forøges energien yderligere end disse 40% begynder der at være energi til rådighed til også at nedbryde trans-1,2-dichlorethylen, hvor det forventes at ramme udgangspunktet i vandet ved omkring 80% energi og hurtigt herefter nå en nedbrydning til under det målbare.

Dette danner belæg for, at selvom man kan sigte efter en lavere energi for en gradvis nedbrydning af TCE, PCE og VC, er det vigtigt at være opmærksom på reaktionsveje og produkter, hvor en større mængde energi og et eventuelt overskud af energi vil tvinge reaktionerne til at løbe til ende.

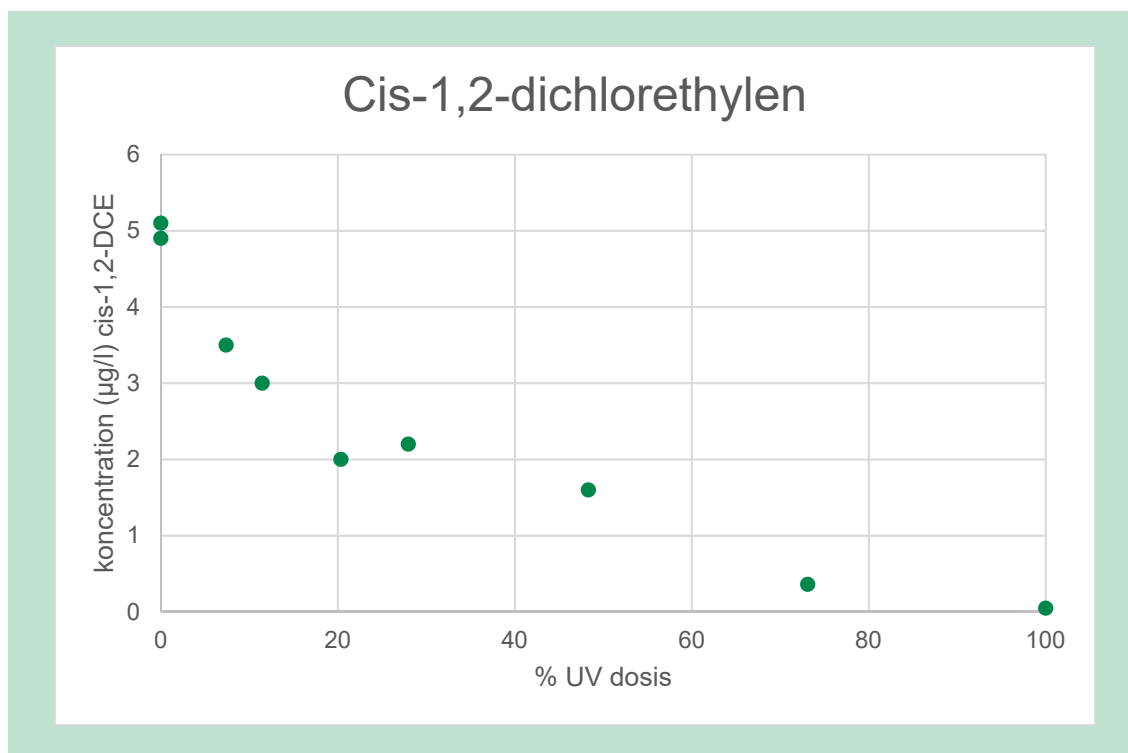
trans-1,2-dichloroethene
Molecular Formula: C₂H₂Cl₂
Formula Weight: 96.94328



Trans-1,2-dichlorethylen
strukturformel



FIGUR 11. Den procentvise nedbrydning af cis-1,2-dichlorethylen ved 2 ppm H₂O₂ og variabel UV dosis. Ligeledes ses regression lavet fra testdata.

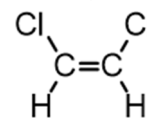


FIGUR 12. Indhold [µg/l] af cis-1,2-dichlorethylen i vandprøverne ved 2 ppm H₂O₂ og variabel UV dosis. Ved 0 % UV dosis findes resultater for det ubehandlede vand.

Cis-isomerer er den mere stabile af de to DCE-isomerer. Dog virker det ikke som om denne dannes ved nedbrydelsen af TCE og PCE. I det ubehandlede vand findes 4,9 – 5,1 µg/l cis-1,2-dichlorethylen. Koncentrationen falder allerede ved de laveste energiniveauer, dog ikke i

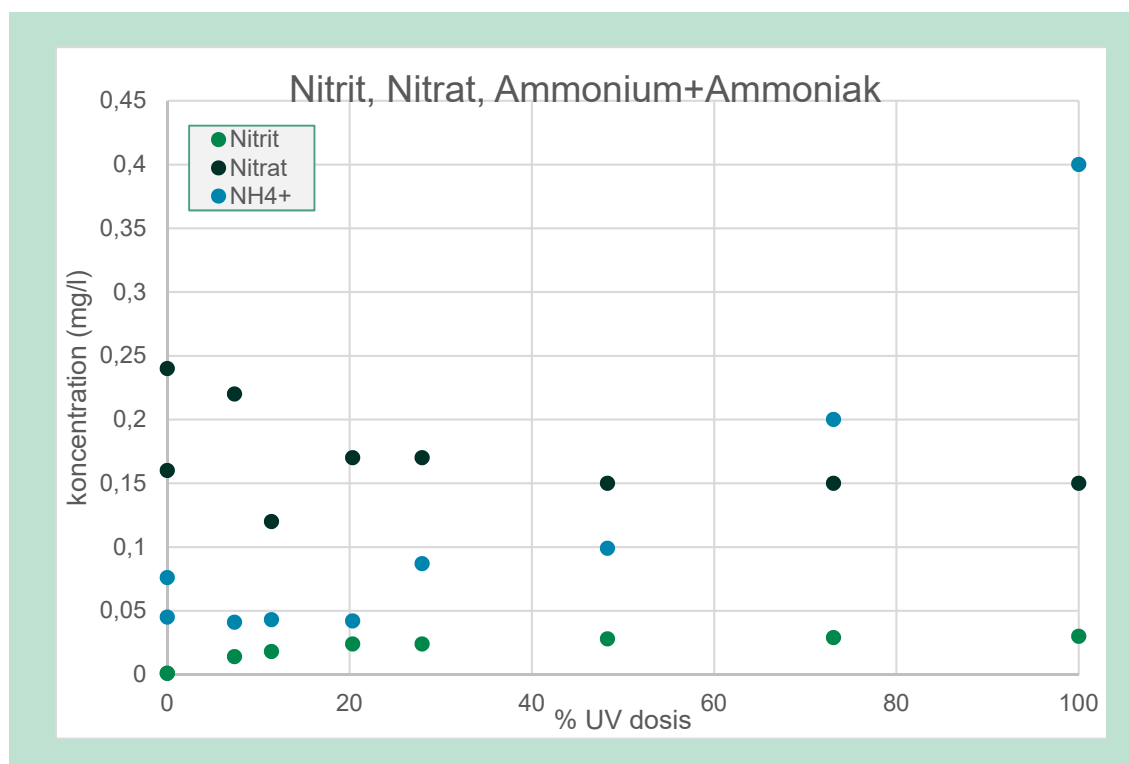
samme niveauer som det ses for TCE og PCE. Først ved omkring 20% energi forventes halvdelen af cis-1,2-dichloroethylenen at være nedbrudt, og energien skal op til omkring 75% før der ses en 90% reduktion i mængden af cis-1,2-dichlorethylen. Ved 100% energi nærmer den målbare grænse, hvor indholdet af cis-1,2-dichlorethylen er fundet til 0,047 µg/l. Denne metode kan altså godt benyttes til nedbrydning af cis-1,2-dichlorethylen, dog med et krav om større energimængder end for kun TCE og PCE. Det kunne være spændende at have set hvordan en højere dose af H₂O₂ ville have påvirket nedbrydningen, hvilket bør undersøges ved videre studier.

cis-1,2-dichloroethene
Molecular Formula: C₂H₂Cl₂
Formula Weight: 96.94328



Cis-1,2-dichlorethylen
strukturformel

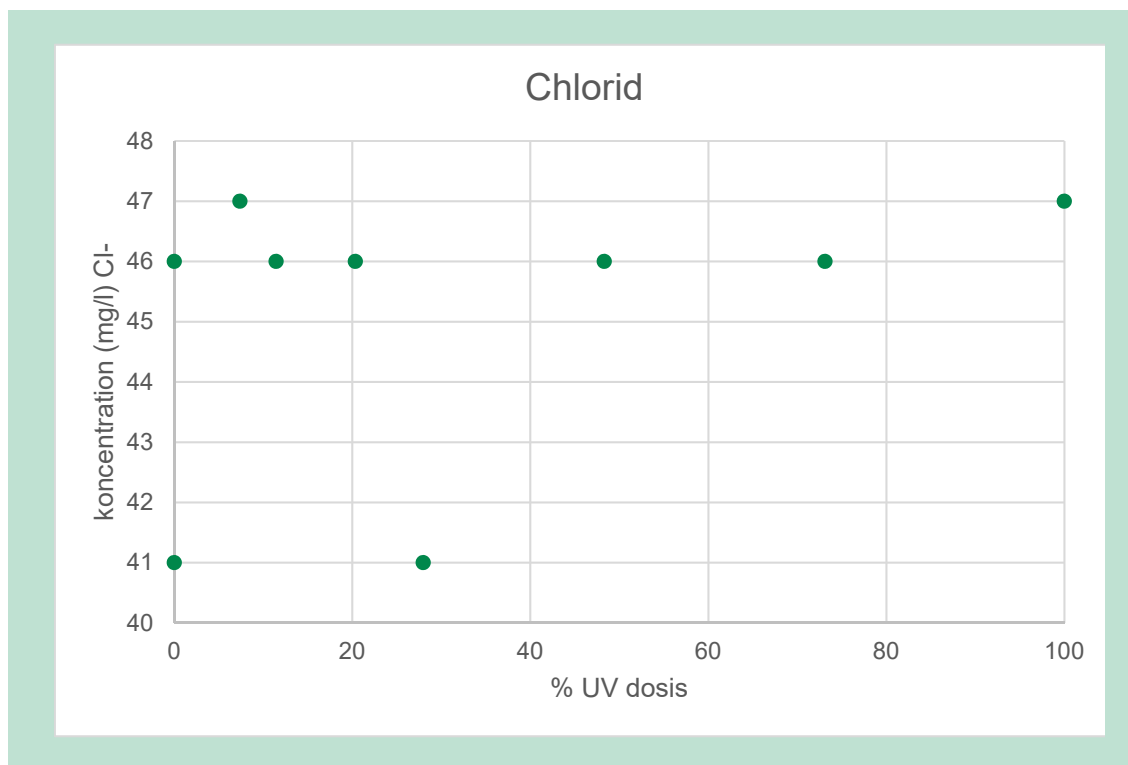
Ved biologisk dechlorering dannes typisk cis-1,2-dichlorethylen, mens der ved denne proces dannes mest trans-1,2-dichlorethylen, hvilket er en interessant betragtning og lære fra projektet.



FIGUR 13. Indhold [mg/l] af nitrit og nitrat samt ammonium+ammoniak i vandprøverne ved 2 ppm H₂O₂ og variabel UV dosis. Ved 0 % UV dosis findes resultater for det ubehandlede vand.

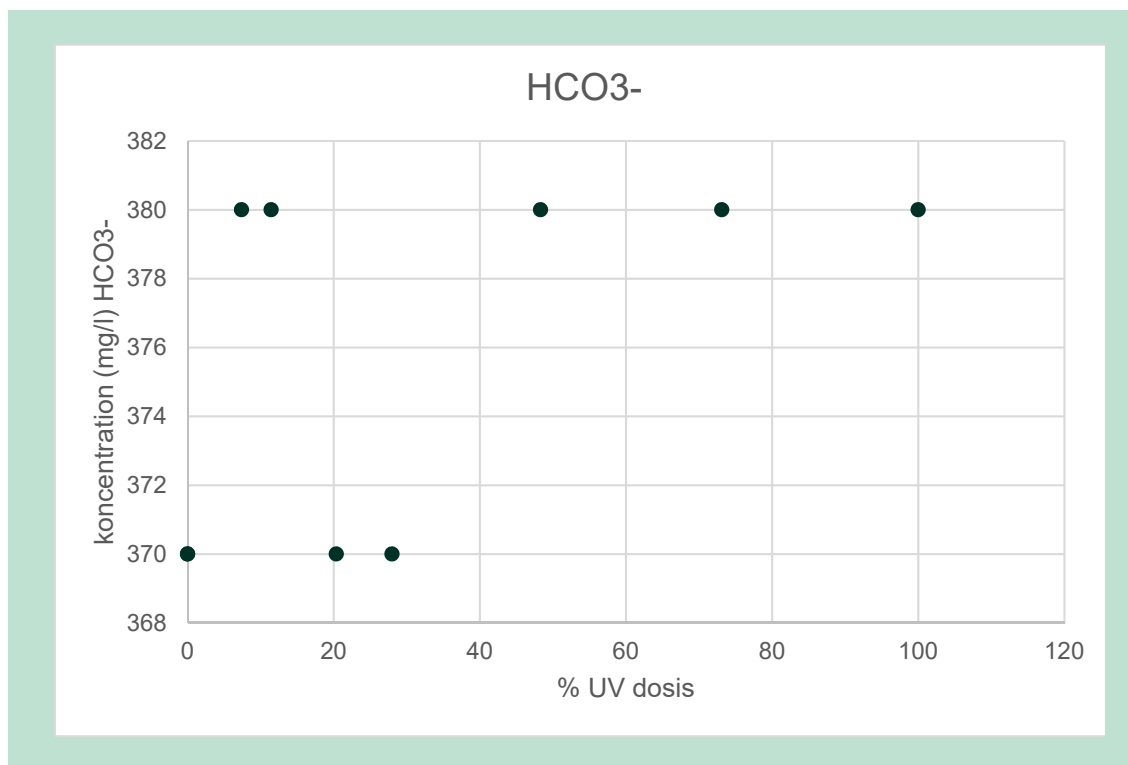
Nogle af de målbare forventelige nedbrydningsprodukter af de nitrogenholdige organiske stoffer er Nitrit, Nitrat, Ammonium og Ammoniak, hvor der ses en forøgelse i mængden specielt af nitrit. I det ubehandlede vand var nitritindholdet på 0,001 mg/l, hvor der ved begyndende behandling – allerede ved 7-10% energi – findes 0,014 – 0,018 mg/l nitrit, og op til 0,03 mg/l nitrit, og op til 100% energi.

Der ses igennem testen en nedbrydning i indholdet af nitrat, der som udgangspunkt lå på 0,16 – 0,24 mg/l, mens det samlede niveau af ammonium og ammoniak viser en lille nedbrydning i de lavere energiområder mens der er en dannelse af ammonium og ammoniak ved højere energier.



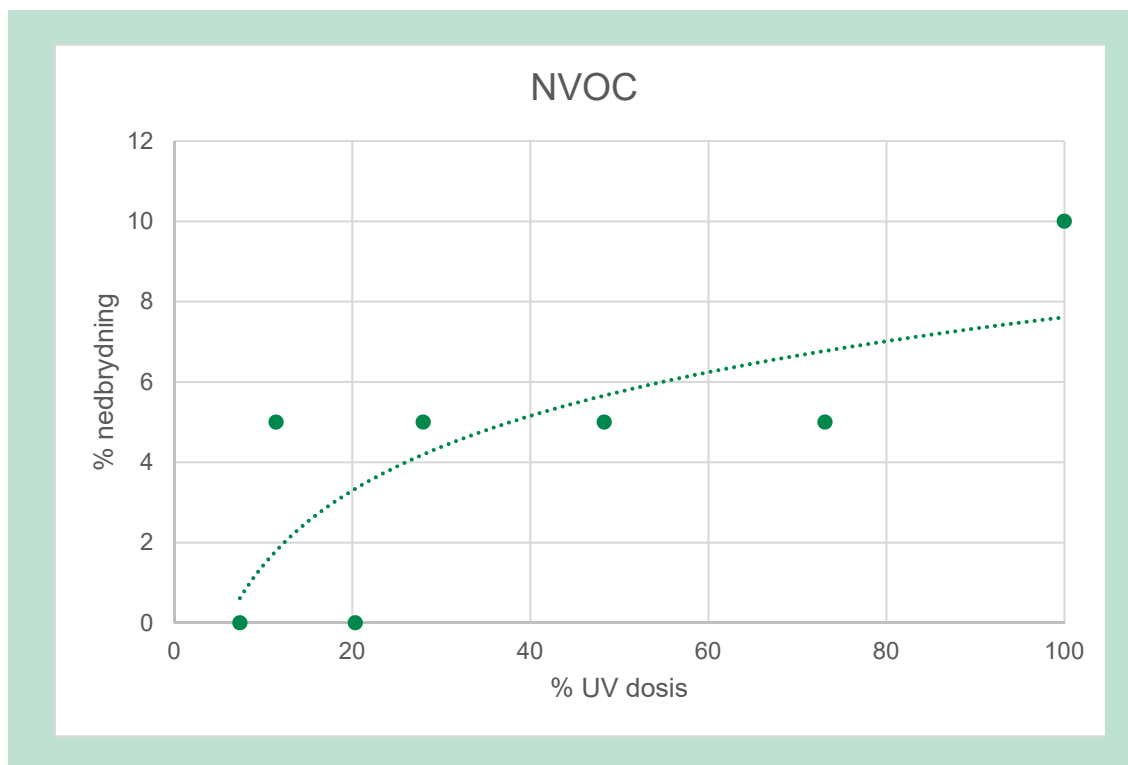
FIGUR 14. Indhold [mg/l] af chlorid i vandprøverne ved 2 ppm H₂O₂ og variabel UV dosis. Ved 0 % UV dosis findes resultater for det ubehandlede vand.

Chlorid (Cl⁻) er ligeledes et forventeligt nedbrydningsprodukt, hvor der ses en forøgelse fra 41 mg/l til 46-47 mg/l ved oxidationsprocessen. Specielt fra nedbrydningen af chlorerede opløsningsmidler vil der skabes chlorid eller klorholdige uorganiske molekyler ved fuld mineralisering.

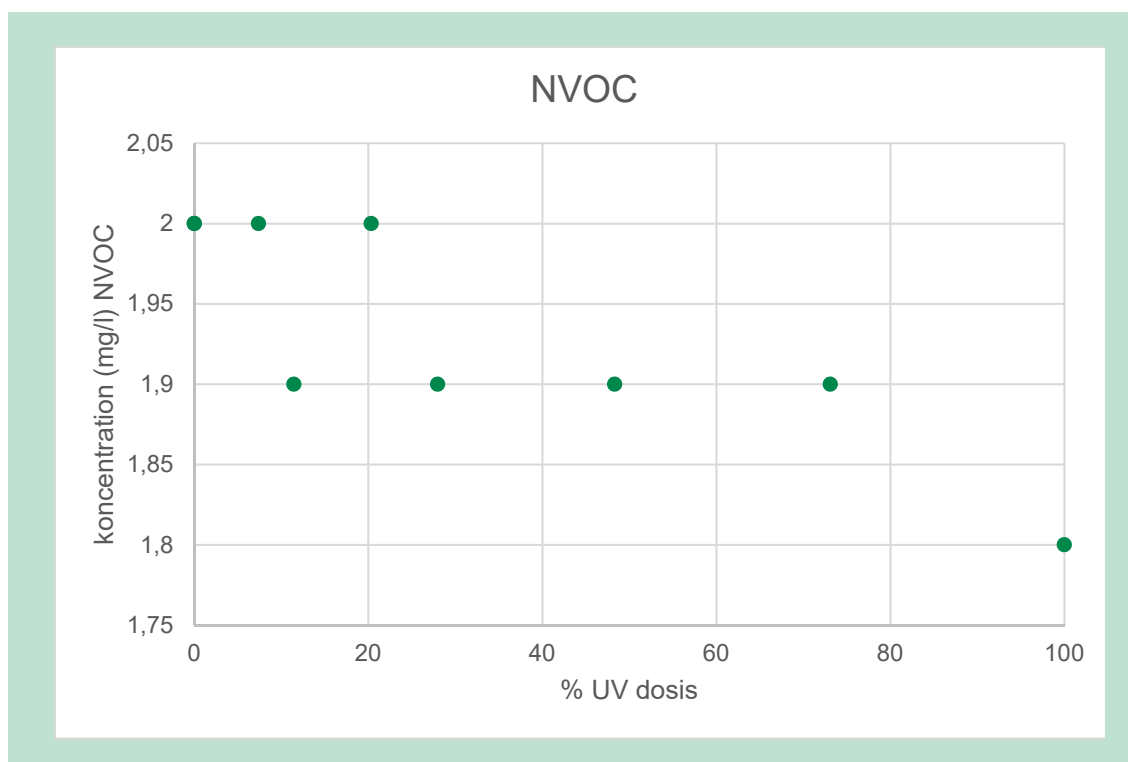


FIGUR 15. Indhold [mg/l] af hydrogencarbonat i vandprøverne ved 2 ppm H₂O₂ og variabel UV dosis. Ved 0 % UV dosis findes resultater for det ubehandlede vand.

Hydrogencarbonat (HCO₃⁻) er også undersøgt som et potentielt nedbrydningsprodukt. Indholdet i det ubehandlede vand er fundet til 370 mg/l, hvor der i de fleste prøver efter behandling er fundet 380 mg/l.



FIGUR 16. Den procentvise nedbrydning af NVOC ved 2 ppm H_2O_2 og variabel UV dosis. Ligeledes ses regression lavet fra testdata.



FIGUR 17. Indhold [mg/l] af NVOC i vandprøverne ved 2 ppm H_2O_2 og variabel UV dosis. Ved 0 % UV dosis findes resultater for det ubehandlede vand.

Som et udtryk for mineralisering bør vandets indhold af NVOC falde gradvist med en større energimængde, da der vil være mere energi til rådighed for at sikre en fuld mineralisering –

altså vil det tidligere organisk bundne kulstof ende i uorganiske forbindelser, hvilket også er hvad denne test viser.

7.2.2 Delkonklusion

Testen udført i Region Hovedstadens Innovationsgarage forløb ikke som ventet. Manglen på flere dataserier hvor der undersøges indvirkning af andre doseringer af H_2O_2 gør, at der ikke kan tegnes et billede af, hvor en optimal H_2O_2 -dosering ligger i forhold til disse chlorerede opløsningsmidler. Der kan på denne baggrund ikke konkluderes, om det ville være favorabelt eller rentabelt at dosere højere eller lavere mængder H_2O_2 for at modvirke dette med enten lavere eller højere mængder af energi.

Testen har dog vist, at blot 2 ppm H_2O_2 er tilstrækkeligt til nedbringe mængden af de primære interessante chlorerede opløsningsmidler; PCE, TCE og VC, som alle 3 er nedbrudt til under den målbare grænse. Cis-1,2-dichlorethylen viser tegn på at være sværere nedbrydeligt end TCE og PCE – dog er det stadigvæk nedbrudt til under den målbare værdi. Trans-1,2-dichlorethylen viser tydelige tegn på dannelse fra PCE og TCE ved lavere niveauer af energi, hvilket er en kritisk observation. Det er af stor vigtighed at undersøge ved vandbehandlingen, hvilket energiniveau, der er krævet for også at nedbryde den værende og dannede trans-1,2-dichlorethylen. Dette betyder, at selvom der opnås fuld nedbrydning af TCE og PCE ved lavere energiniveauer, kræver en fuld mineralisering yderligere energi, hvorved de kendte intermediat reaktionsprodukter ligeledes mineraliseres.

På de kendte reaktionsprodukter og på NVOC ses tydelige tegn på mineralisering. Der er en nedbrydning af NVOC samtidig med forøgelse i indholdet af chlorid, hydrogencarbonat, ammonium/ammoniak og nitrit.

7.3 Test: DTU Risø

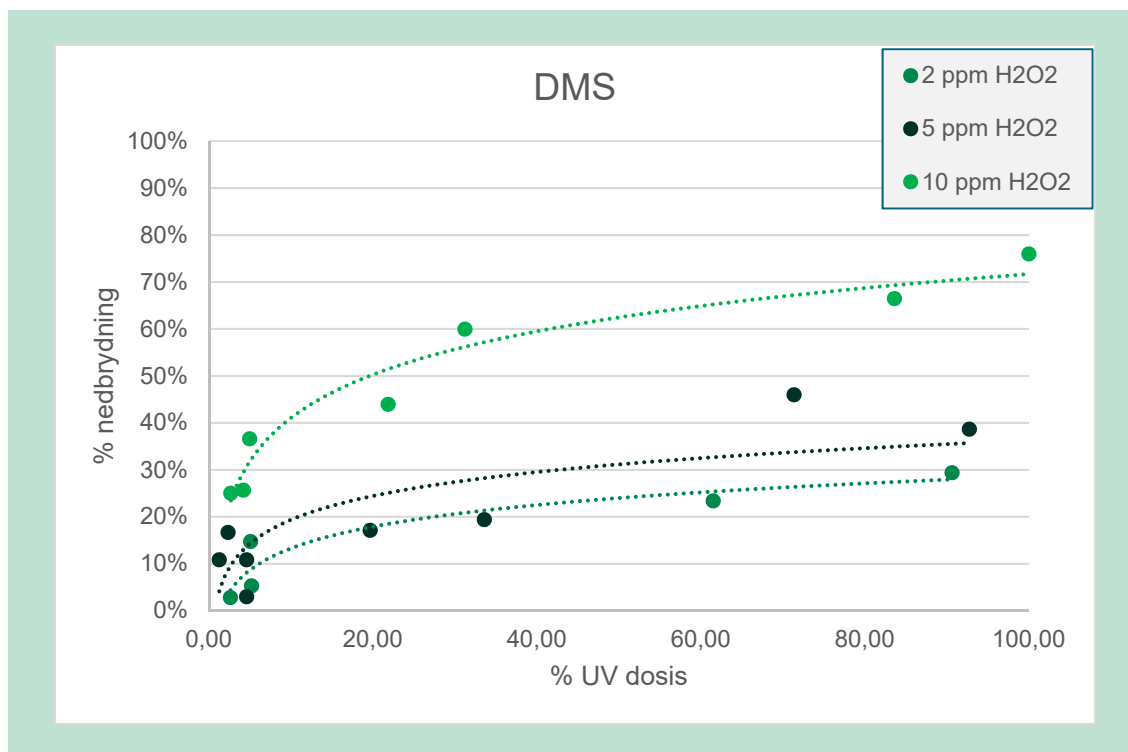
Testen er udført direkte på råvand over to omgange hos DTU Risøs vandværk, Risø Huse 50, 4000 Roskilde. Her findes et vandværk der forsyner Risø campus. I vandet er der i en periode fundet tre pesticidrester i en boring. Specielt har DMS været en udfordring i drikkevandet, hvorfor boringen ikke har været aktivt vandproducerende i perioden op til testen. Årsagen til at testen blev udført over to omgange var, at der på baggrund af resultaterne fra første test var et ukomplet billede af nedbrydningen. På baggrund af resultaterne fra den første test kunne fremlægges en ny testplan hvorved et mere komplet billede kunne tegnes af behandlingens virke på DMS og BAM.



Testtrailer under første test ved DTU Risø

7.3.1 Resultater

DMS er som udgangspunkt fundet i vandet på Risø til mellem 0,34 og 0,41 µg/l under første test, og mellem 0,44 og 0,49 µg/l under anden testudførelse. Alle vandanalyser af DMS er foretaget af analyselaboratoriet hos DTU Miljø. For alle testkonditioner foreligger vandprøver og analyseresultater før og efter behandling for DMS, og nedbrydningerne er beregnet direkte fra disse før og efter resultater som ses af resultaterne på de kommende sider.



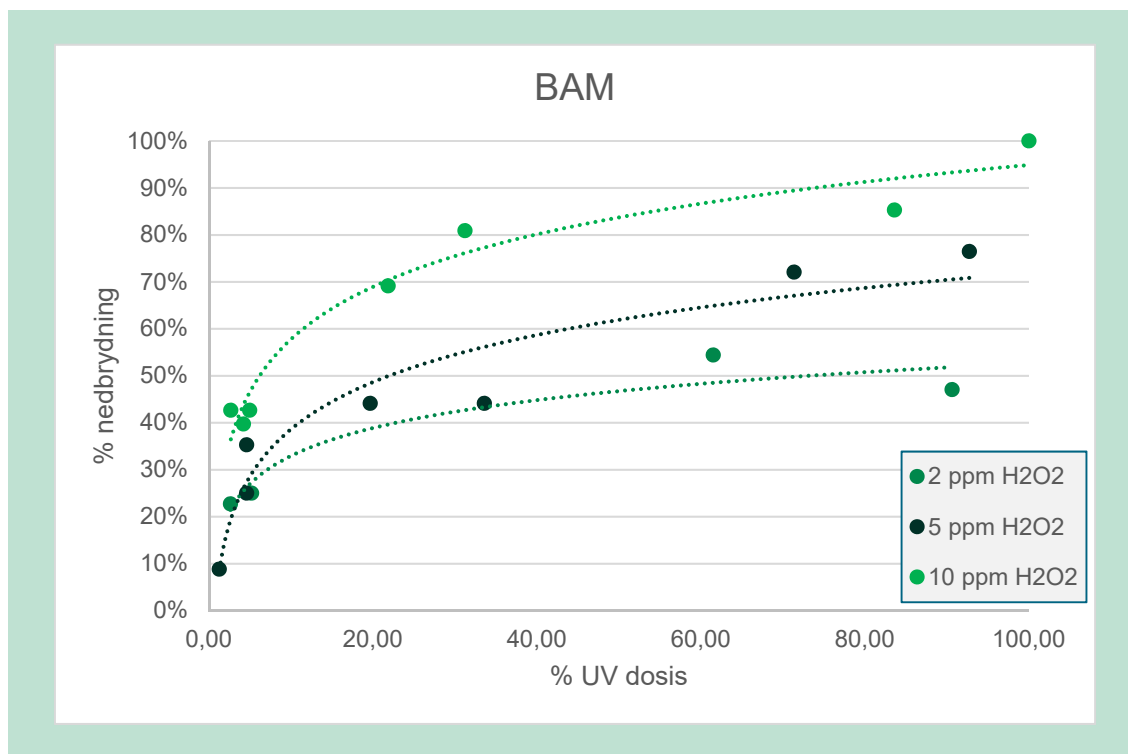
FIGUR 18. Den procentvise nedbrydning af DMS ved 2, 5 og 10 ppm tilsat H₂O₂ og variabel UV dosis. Ligeledes ses regressioner lavet fra testdata.

FIGUR 18 tegner et tydeligt billede der viser, at en øget dosering af både energi og H₂O₂ resulterer i en øget nedbrydning af DMS. Der skal på baggrund af dette både højere mængder af H₂O₂ og energi til, end det tidligere er set for chlorerede opløsningsmidler, for at opnå en høj nedbrydning. Den højeste nedbrydning opnået findes ved 10 ppm doseret H₂O₂ og ved den højest opnåede UV-dose under testene; DMS er nedbrudt fra 0,46 µg/l til 0,11 µg/l, svarende til en nedbrydning på 76%.

Fra disse resultater forventes det, at denne løsning kan nedbryde DMS selv for industrielle mængder af vand, dog skal anlægget dimensioneres herefter. Yderligere forventes det, på baggrund af resultaterne og forskellen der ses ved at hæve H₂O₂-doseringen fra 5 til 10 ppm, at et potentielt optimum af H₂O₂ kunne ligge højere end 10 ppm, og det kunne være en fordel at undersøge nedbrydningen ved fx 15 eller 20 ppm.

Alle vandprøver er ligeledes undersøgt for NDMA hvor der ingen spor er fundet, og denne behandlingsmetode burde desuden kunne benyttes til at nedbryde NDMA, hvis dette havde været til stede (Sedlak, 2006).

BAM er i baggrundsprøverne fundet til 0,066 og 0,068 µg/l under første test og til 0,067 og 0,069 µg/l under anden test. Vandanalyserne er foretaget akkrediteret af ALS Danmark. For BAM er der løbende taget baggrundsprøver over testdagene, og der foreligger derfor ikke prøver før og efter behandling 1:1, dog viste indholdet i det ubehandlede vand sig stabilt på testdagene.

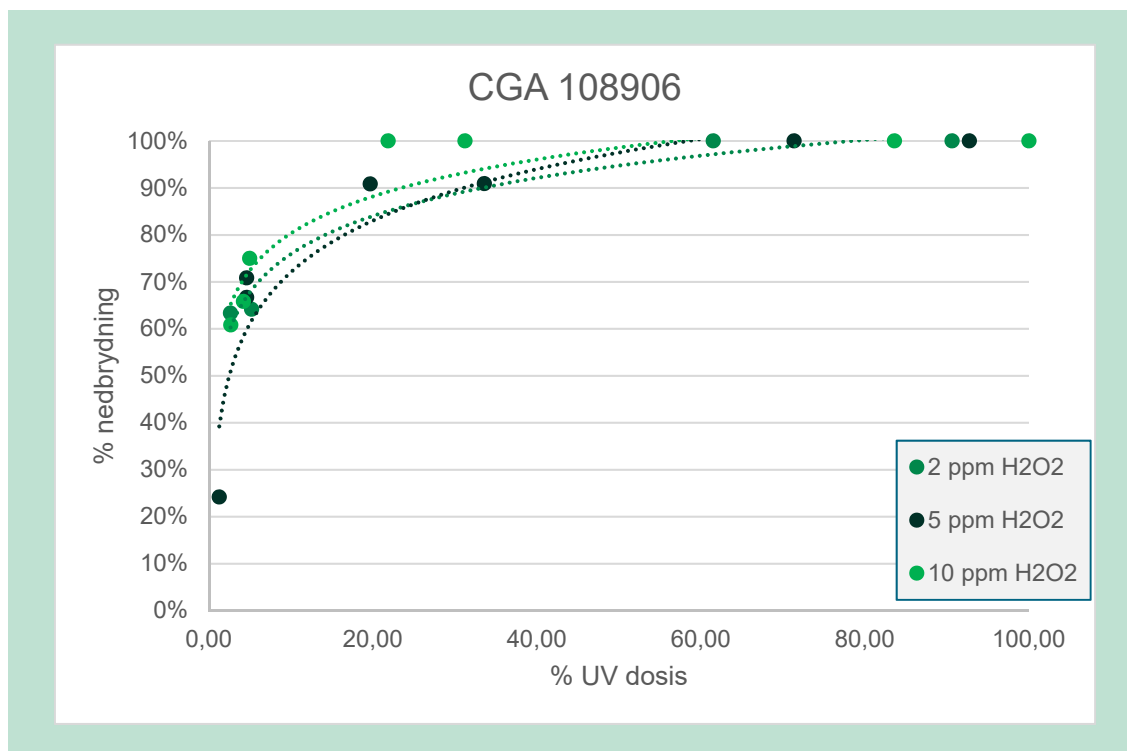


FIGUR 19. Den procentvise nedbrydning af BAM ved 2, 5 og 10 ppm tilsat H₂O₂ og variabel UV dosis. Ligeledes ses regressioner lavet fra testdata.

Nedbrydningen af BAM viser sig lettere end nedbrydningen af DMS, og der ses generelt omkring 20 procentpoint højere nedbrydninger ved de samme testkonditioner. Dog er det først ved den højeste nåede energi dose samt ved 10 ppm H₂O₂, at mængden af BAM er nedbrudt til under den målbare værdi.

Der ses her en tydelig korrelation mellem de forskellige niveauer af H₂O₂. Det er forventeligt, at øges mængden af H₂O₂ yderligere, nås den fulde nedbrydning ved lavere energi. Desuden kunne det tyde på, at der ikke er nok hydroxylradikaler til stede til en effektiv nedbrydning ved blot 2 ppm H₂O₂, og derfor kræver behandling af både BAM og DMS større mængder H₂O₂ end de chlorerede opløsningsmidler.

CGA 108906 er den sidste af de tre fundne pesticidrester i boringen. CGA 108906 er et nedbrydningsprodukt fra metalaxyl-M, ligesom nedbrydningsproduktet CGA 62826. Metalaxyl-M blev anvendt ved kartoffeldyrkning. I boringen findes CGA 108906 ved koncentrationer på 0,12 µg/l.



FIGUR 20. Den procentvise nedbrydning af CGA 108906 ved 2, 5 og 10 ppm tilsat H₂O₂ og variabel UV dosis. Ligeledes ses regressioner lavet fra testdata.

Disse 0,12 µg/l ses hurtigt kraftigt nedbrudt. Allerede ved de laveste niveauer af energi og H₂O₂ ses der nedbrydninger på mere end 60%, og selvom startkoncentrationen er over det dobbelte af DMS og BAM, er dette nedbrudt til under det målbare niveau (0,01 µg/l) allerede ved omkring 20% energi og 10 ppm H₂O₂. Ved blot 2 ppm H₂O₂ er CGA 108906 under det målbare niveau ved 60% energi.

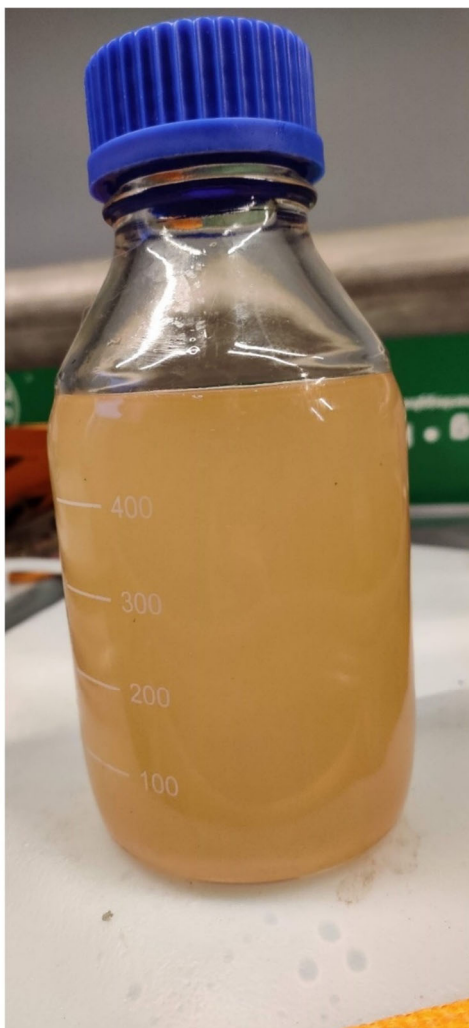
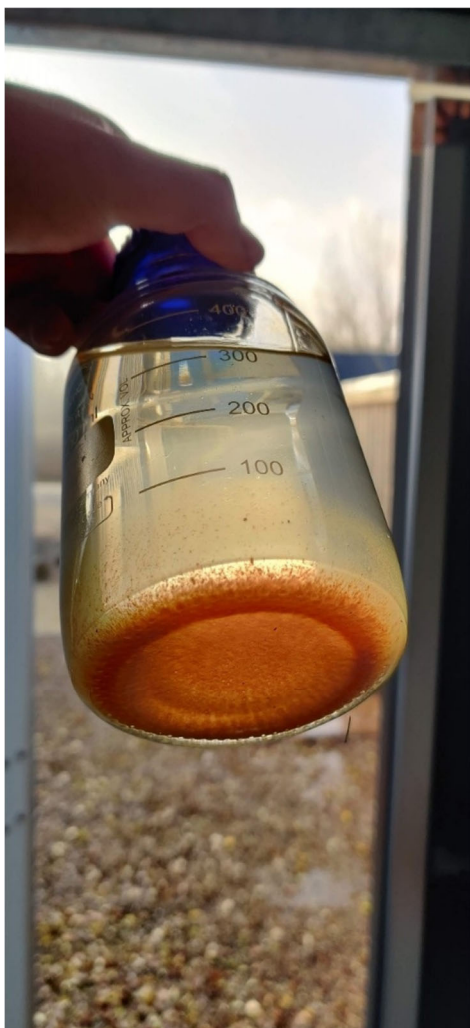
7.3.2 Delkonklusion

Testen på DTU Risø vandværk har givet værdifuld viden om behandlingens muligheder for at nedbringe koncentrationen af pesticidstofferne DMS, BAM og CGA 108906. Specielt CGA 108906 nedbrydes yderst effektivt af behandlingen, men DMS og BAM viser også gode og lovende resultater, med DMS værende den sværeste af de to at nedbryde.

7.4 Test: Region Sjælland

Testen hos Region Sjælland er foregået på afværgeanlægget på Stengården Testgrund i Hvalsø. Vandet herfra er stammer fra en tidligere grusgrav, der blev benyttet som losseplads i 1970-1980'erne, og vandet indeholder en bred vifte af uønskede stoffer i høje koncentrationer.

Testen er udført på råvand, dog er der meget høje koncentrationer af jern i dette råvand. Ikke oxideret jern fungerer som "scavenger" for hydroxylradikalerne, hvorfor en stor del af den doserede H₂O₂ og energi vil benyttes til at oxidere jern sideløbende med nedbrydningen af vandets indhold af uønskede stoffer. Samtidig er vandets UVT-værdi meget lav bl.a. grundet det høje indhold af jern, så de resulterende energidoser bliver meget lave i forhold til mængden af materiale, der skal oxideres.



Test vand ved Region Sjælland-testen. Til venstre ses jernudfældning efter stilstand og til højre efter omrystning.

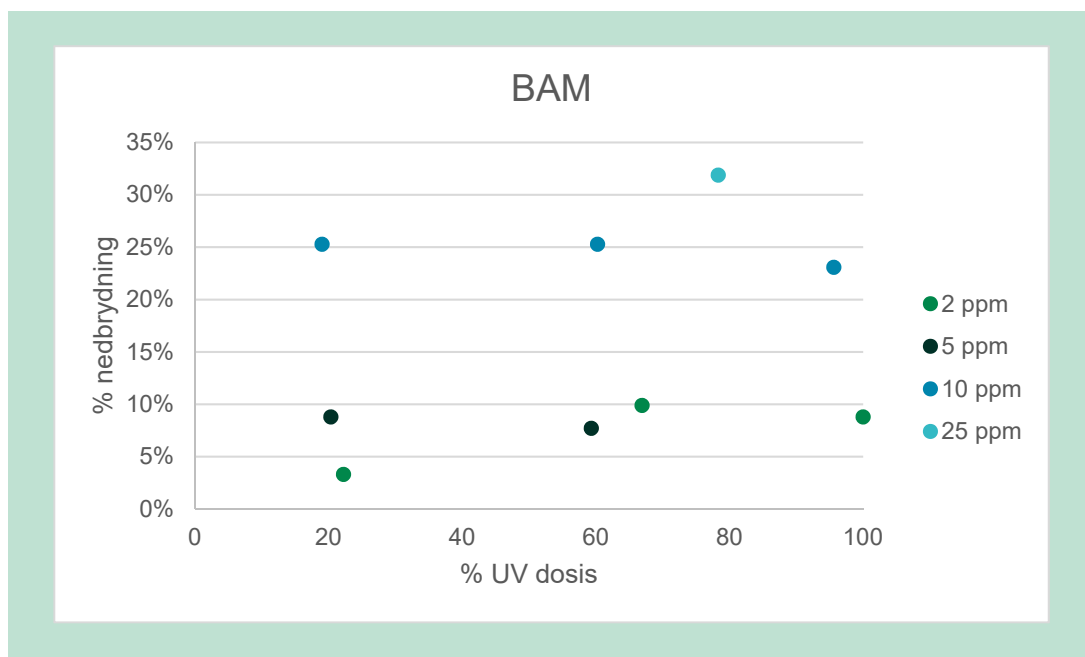
I vandet på testgrunden findes både chlorerede opløsningsmidler, pesticidrester og PFAS-forbindelser. I testen er alle de stoffer i disse kategorier der er kendskab til undersøgt.



Testvand ved Region Sjælland-testen. Til venstre ses vandprøver efter behandling/oxidation og til højre vandprøverne fra før behandling

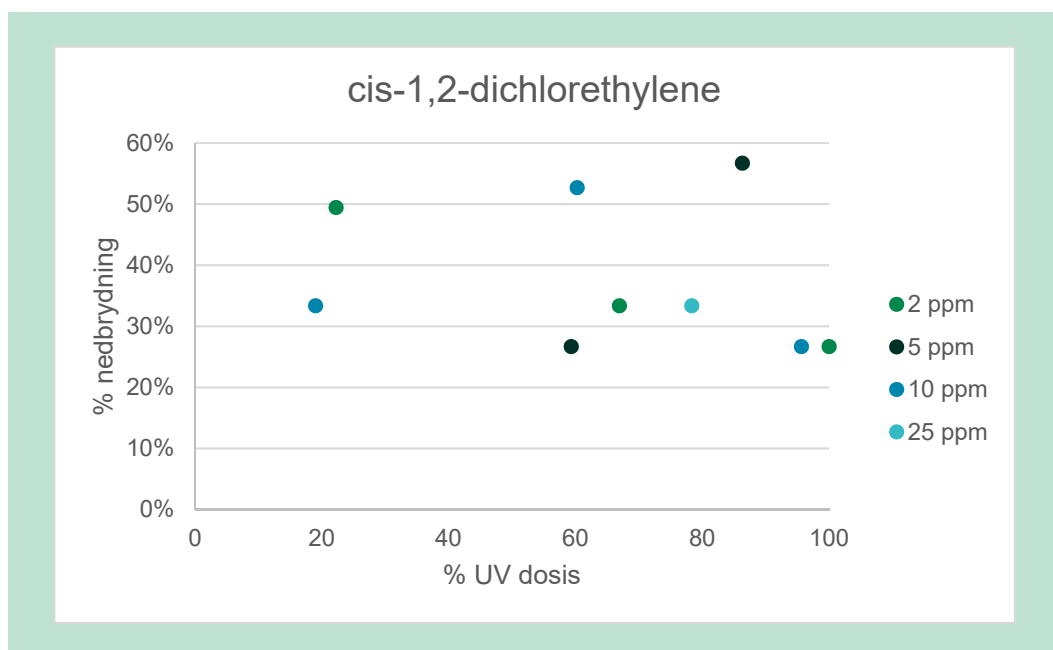
7.4.1 Resultater

Resultaterne fra denne test er udfordrende at tyde. Dels fordi der ikke ses samme klare billeder med sammenhænge mellem energi, H_2O_2 og nedbrydning som set tidligere, og dels fordi der ses ændringer i baggrundsindhold over testdagene på op til 62%. Fx 1,1-dichlorethan er målt til hhv. 0,31 $\mu\text{g/l}$ og 0,082 $\mu\text{g/l}$. Disse udsving gør det yderst besværligt at retfærdiggøre validiteten af testresultaterne, da behandlingsbilledet afhænger af det vand der behandles. For at imødegå disse udfordringer er et gennemsnit af baggrundsværdierne for samme testdag benyttet, men resultaterne skal forventes at indeholde store mængder usikkerhed.



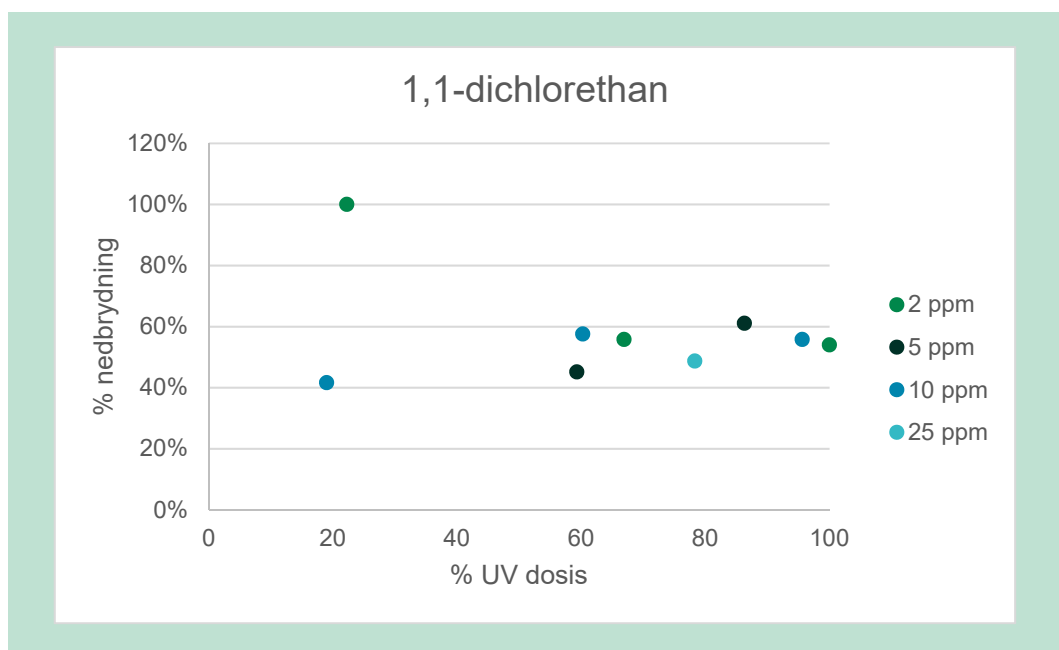
FIGUR 21. Den procentvise nedbrydning af BAM ved 2, 5, 10 og 25 ppm tilsat H_2O_2 og variabel UV dosis.

For BAM er der en smule sammenhæng i resultaterne. Omkring 2 ppm tilsat H_2O_2 opnås nedbrydninger på op til 10%, mens det samme er gældende for 5 ppm tilsat H_2O_2 . Der ses væsentligt højere nedbrydninger for de større mængder tilsat H_2O_2 hvor der opnås 25% nedbrydning ved 10 ppm og 32% ved 25 ppm. Fra resultaterne her ses en større tendens til, at H_2O_2 -tilsætningen har en stor betydning for nedbrydningen, mens energitilførslen ikke har en væsentlig betydning – kun i tilfældet med 2 ppm H_2O_2 ses en egentlig fordel ved at hæve energiniveauet.



FIGUR 22. Den procentvise nedbrydning af cis-1,2-dichlorethylen ved 2, 5, 10 og 25 ppm tilsat H₂O₂ og variabel UV dosis.

For cis-1,2-dichlorethylen ses generelt nedbrydninger på mellem 30 og 60% trods forholdene. Dog er der ingen tydelige sammenhænge mellem energi og H₂O₂ dosering at tyde fra resultaterne.



FIGUR 23. Den procentvise nedbrydning af 1,1-dichlorethan ved 2, 5, 10 og 25 ppm tilsat H₂O₂ og variabel UV dosis.

1,1-dichlorethan er i de fleste tilfælde nedbrudt mellem 40 og 60%, men igen uden tydelige sammenhænge i dose af H₂O₂ og energi.

7.4.2 Delkonklusion

Når man ser testresultaterne, er der ingen tvivl om, at der sker en nedbrydning. Dog ses i de fleste tilfælde ikke den forventelige tydelige sammenhænge mellem nedbrydningerne, energiniveau og dosering af H_2O_2 . Den ustabile vandkvalitet gør, at der ikke er fuld kontrol over nedbrydningerne og det er svært at konkludere noget brugbart fra testen, andet end at behandlingsmetoden her bliver udfordret i forhold til det nøjagtige nedbrydningsbillede der stræbes efter at skabe.

Der kunne med fordel kigges på en for-filtrering og behandling af vandet i denne proces, for at øge behandlingens effektivitet og virkning.

7.5 Test: SK Forsyning

Testen hos SK Forsyning er foregået på råvand ved Nordre Vandværk, Præstemarken 3, 4230 Skælskør. Specielt er en enkelt boring her fundet særligt hårdt ramt af pesticidresten Desphenyl Chloridazon (DPC), hvorfor drikkevandsproduktionen fra denne boring er kraftigt nedbrudt.



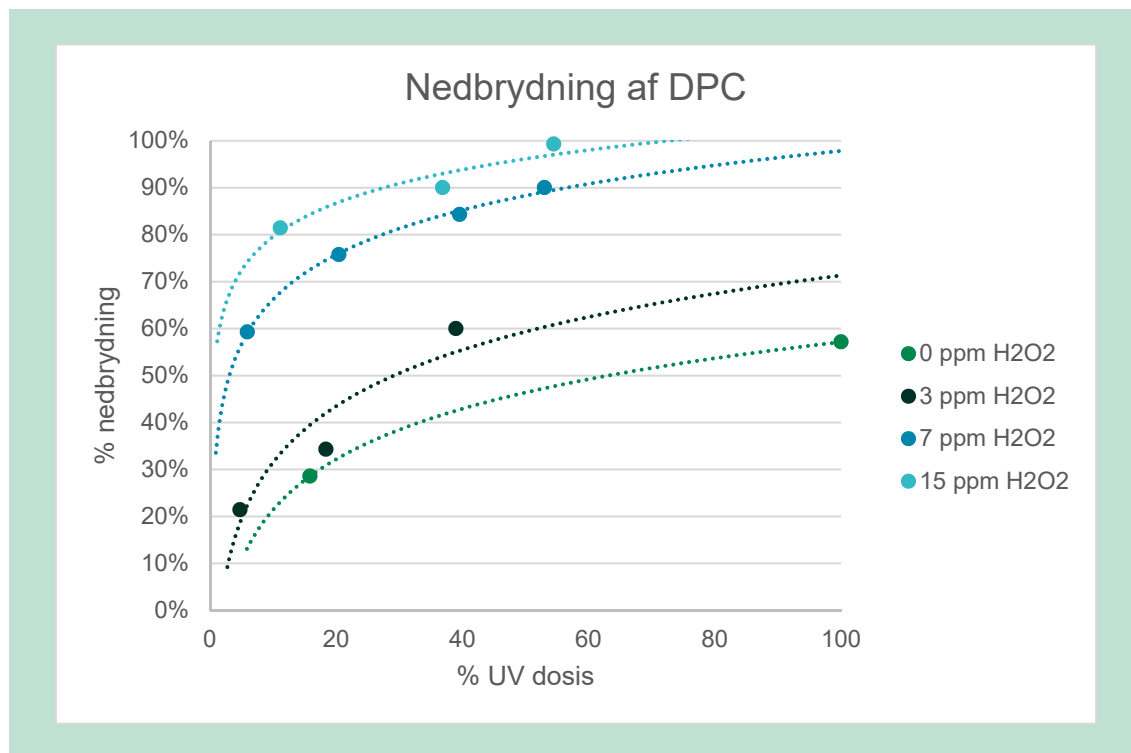
Trailer opstillet ved SK Forsynings vandværk



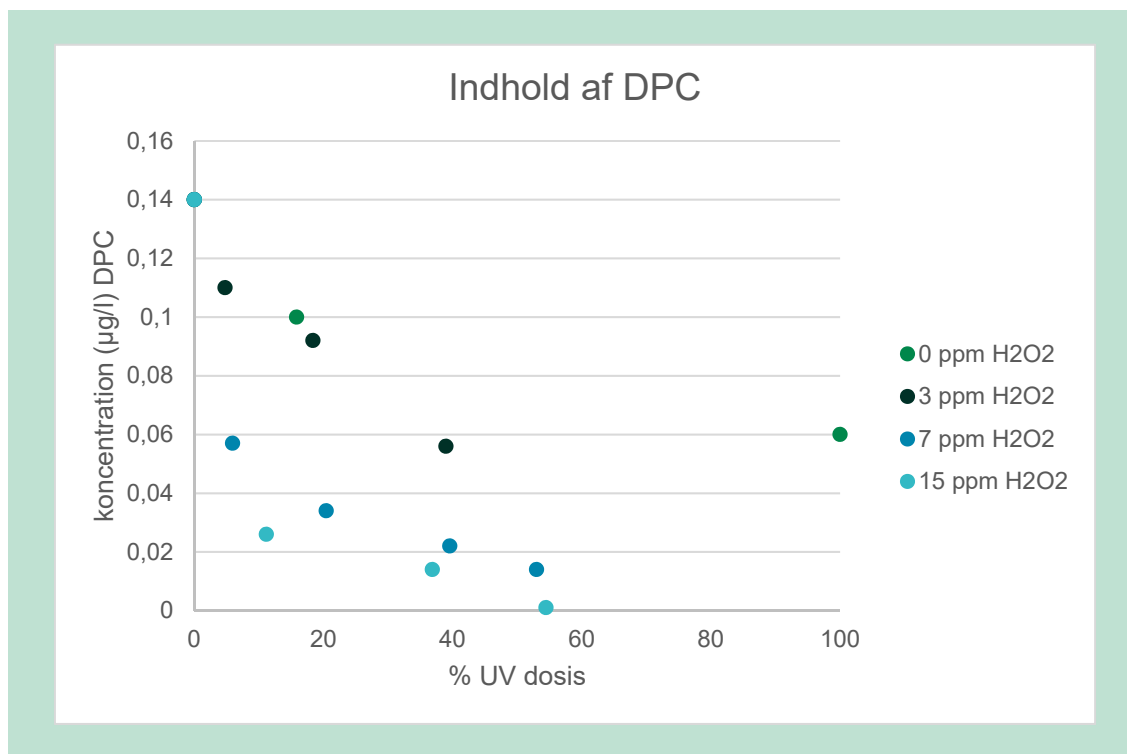
Trailer opstillet ved SK Forsynings vandværk

7.5.1 Resultater

Hos SK Forsyning er der specifikt kigget på at reducere mængden af DPC i vandet. Dog kommer råvandet fra en boring der kun er periodevis aktiv, hvorfor der kan forekomme større mængder af fx jern end normalt. Desuden kan der ved uregelmæssig drift forventes større udsving i vandets indhold af forskellige molekyler, end hvis der havde været kontinuerlig og stabil drift på boringen.

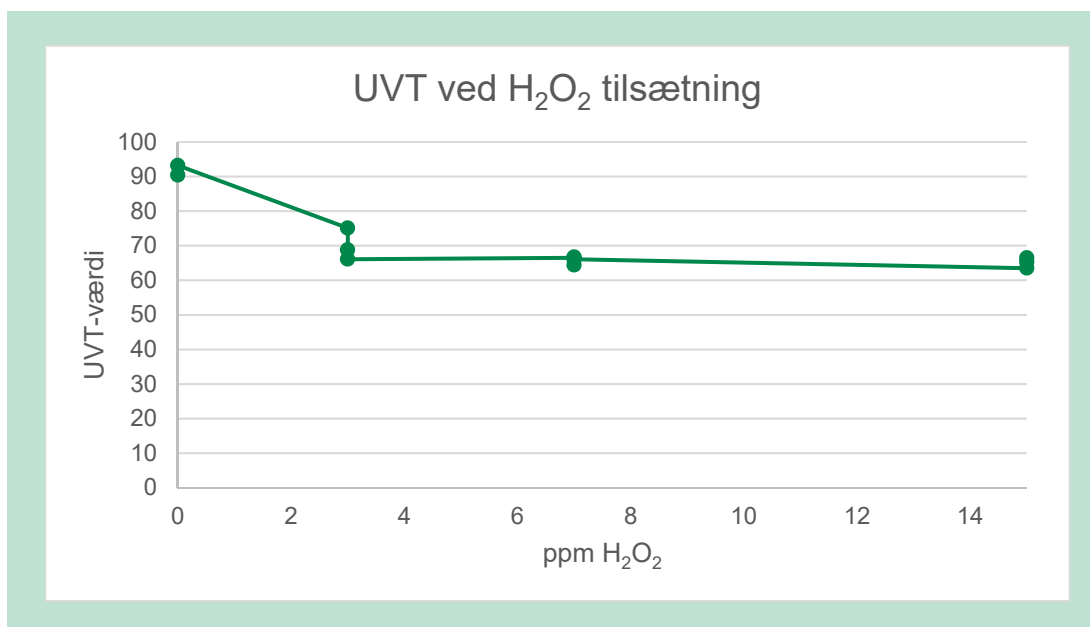


FIGUR 24. Den procentvise nedbrydning af desphenyl chloridazon ved 0, 3, 7 og 15 ppm tilsat H₂O₂ og variabel UV dosis. Ligeledes ses regressioner lavet fra testdata



FIGUR 25. Indhold [µg/l] af DPC i vandprøverne ved 0, 3, 7 og 15 ppm H₂O₂ og variabel UV dosis. Ved 0 % UV dosis findes resultater for det ubehandlede vand.

Der ses generelt en god nedbrydning på DPC ved behandlingen. Under forsøgene faldt vandets UVT-værdi ved tilsætning af H₂O₂, hvilket muligvis kan skyldes oxidation af jern og mangan. Dette resulterede i lavere doser af energi for testene med H₂O₂ involveret, men der er trods den lavere energimængde i vandet opnået en nedbrydning til under den målbare værdi.

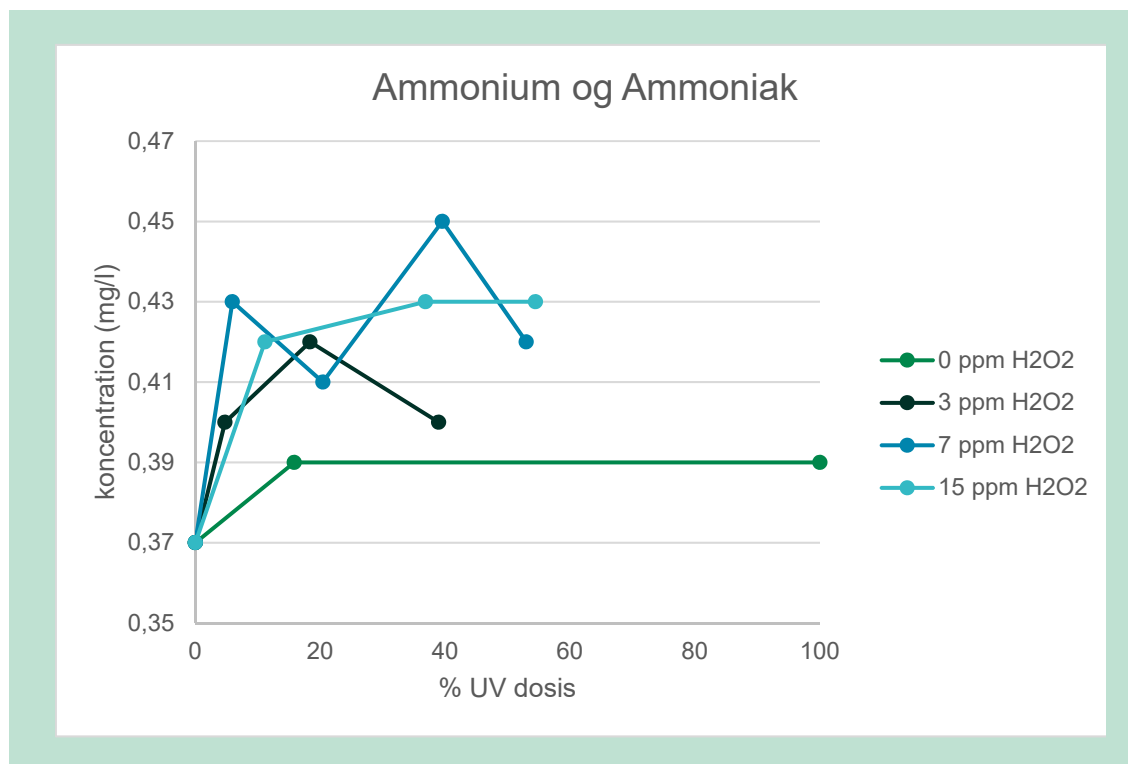


FIGUR 26. UVT-værdi igennem testen ved tilsætning af H₂O₂

Vandets UVT-værdi startede ved 91,6, men faldt igennem testen til at ligge omkring 68, hvilket er lavt og medfører stor modstand imod indtrængning af UV-lyset mod slutningen af testen.

Testen uden H_2O_2 viser også gode resultater, hvor der er opnået omkring 60% nedbrydning af DPC ved den højest doserede energimængde. Dog ses det, at energimængden kan nedbrydes betydeligt og stadigvæk have en væsentlig forøgelse af nedbrydningen ved tilsætning af H_2O_2 .

Under testen er der udover DPC målt på Mangan, Jern, Ammonium+Ammoniak, Nitrit, Nitrat, Total kvælstof, Chlorid og Hydrogencarbonat. I forhold til referenceprøverne taget på vandet i løbet af dagen, blev der ikke fundet betydelige udsving i hverken mangan, jern, nitrit, nitrat, total kvælstof og chlorid. Der er i det behandlede vand lidt øgede niveauer af hydrogencarbonat og ammonium+ammoniak, i størrelsesorden fra 340 til 370 mg/l hydrogencarbonat og 0,37 til 0,45 mg/l ammonium+ammoniak.



FIGUR 27. Indhold [mg/l] af ammonium+ammoniak i vandprøverne ved 0, 3, 7 og 15 ppm H_2O_2 og variabel UV dosis. Ved 0 % UV dosis findes resultater for det ubehandlede vand.

7.5.2 Delkonklusion

Anlægget viser gode resultater på DPC, som var forventet fra pilot-testene. Der er skabt evidens for hvordan dosen af H_2O_2 påvirker behandlingen, og trods lavere energiniveauer end forventet – grundet nedbrydningen i vandets UVT-værdi – er der dokumenteret stor kvantitativ reduktion i vandets DPC koncentration.

Da dette er en drikkevandsboring, er grænseværdien for DPC i vandet på 0,1 $\mu\text{g/l}$, hvortil vandets indhold kan nedbrydes selv ved meget lave energimængder og en beskeden dose af H_2O_2 , eller helt uden brug af H_2O_2 men ved brug af mere energi, hvis dette var ønskeligt.

Det var ved testen ikke muligt at teste vand fra efter vandværkets iltning og sandfiltre, hvor udfældning af jern og mangan ville være foregået. Det forventes at der skulle benyttes betydeligt mindre energi og H_2O_2 ved drift efter udfældningen, både grundet en højere UVT-værdi i vandet og da der fjernes store mængder hydroxyl-scavangers. Derved ville der være mere energi

og flere hydroxylradikaler til stede ved samme forbrug, som ville kunne benyttes til at nedbryde DPC i stedet.

7.6 Konklusion

De fire tests er alle gennemført med lovende resultater. Specielt testen på Region Sjællands afværgelanlæg har vist sig at været udfordrende grundet den svingende vandkvalitet med meget store mængder af opløst jern i indløbsvandet, hvilket resulterede i lave UVT-værdier som var en udfordring for behandlingen. Testen hos Region Hovedstadens afværgelanlæg har vist gode nedbrydninger på chlorerede opløsningsmidler selv ved lave mængder af energi og H_2O_2 . Resultaterne ligger flot efter forventningerne om større nedbrydning ved større mængder af energi.

Testene på pesticider hos både DTU Risø og hos SK Forsyning er forløbet godt og har vist gode resultater. Der var udfordringer med at opnå højere energiniveauer hos SK Forsyning grundet faldet i UVT igennem testen ved højere H_2O_2 -mængder. Til trods for dette er der opnået en nedbrydning til under den målbare værdi af DPC.

Der har været yderst fornuftige nedbrydninger af DMS og BAM, og CGA 108906 nedbrydes meget nemt. Specielt for DMS, BAM og DPC ses tydelige sammenhænge mellem tilsætningen af H_2O_2 og energi, hvorfor der er opsat modeller, så der let i fremtiden kan beregnes nedbrydninger af disse stoffer ved lignende betingelser.

Det er påvist at vandets UVT-værdi samt indhold af hydroxyl-scavangers såsom jern og mangan er af stor vigtighed for effektiviteten af behandlingen. Dog er der i mange tilfælde opnået gode resultater og nedbrydning af pesticidrester og chlorerede opløsningsmidler til under den målbare grænse trods at testene er kørt på råvand med høje mængder af jern og lave UVT-værdier.

Der er undersøgt for så mange potentielle nedbrydningsprodukter, både intermediater og slutprodukter, som det har været muligt fra laboratoriernes kapabiliteter. Fra dette kan det ses, at det er vigtigt at være opmærksom på overvågningen af disse intermediater, hvor en evt. ufuldkommen proces vil kunne spores. Samtidig er det specielt vigtigt i drikkevandssituationer at overvåge dannede slutprodukter som nitrit, da denne hurtigt kan overskride grænseværdien for drikkevand.

8. Forretningsmodeller

Den afprøvede AOP-teknologi som er testet i dette udviklingsprojekt er blevet navngivet RemUVE™. Navnet er baseret på et ordspil på det engelske ord remove som betyder fjerne. I navnet er UV fremhævet, med henvisning til den anvendte UV-teknologi.

Ud over funktionaliteten af RemUVE løsningen til rensning for pesticider og chlorerede opløsningsmidler, ligger også en sikkerhed i, at anlægget samtidigt vil behandle og beskytte mod bakteriologisk forurening.

Forretningsmodellen opdeles i undersøgelsesfasen, tilbudsfasen, design & ansøgningsfasen, installationsfase og idriftsættelse

1. Undersøgelsesfasen består hovedsageligt af indsamling af data som normal vandkemi, anlægstype og design, forureningstype, kundens ønsker og behov, krav til behandlingsniveau, lokale forhold og risici.
Der gennemføres en test til kortlægning af behandlingens effekt på en sidestrøm fra kundens anlæg. Hvis dette ikke er muligt, fx ved etableringen af et nyt anlæg, estimeres behandlingsbehovet. Det undersøges hvilke muligheder det eksisterende anlægs SRO-system har for integration med drift- og alarmsignaler fra RemUVE løsningen.
2. På baggrund af data fra undersøgelsesfasen kan tilbudsfasen gennemføres. Der udfærdiges et tilbud indeholdende løsningens størrelse, forbrug af kWh og H₂O₂ samt en service og vedligeholdelsesplan. Der tilbydes også en myndighedsansøgning for videregående vandbehandling jf. Vandforsyningslovens § 21, stk. 1.
3. Ved accept af tilbud udføres designfasen til kundens anlæg med et minimum af installationsomkostninger. På baggrund af designet af det tilbudte anlæg igangsættes ansøgningsfasen.
4. Installationsfasen påbegyndes efter myndighedernes godkendelse. Her opstartes produktion af anlægget, samt diverse rør og dele til levering. Herefter aftales tidspunkt og fremgangsmåde for installation med kunden. Installationen udføres af fagfolk med respekt for regler for hygiejne og kundens produktionsbehov.
5. Ved endt installation kan idriftsættelsen påbegyndes. Denne vil følge en forudbestemt plan for vandanalyser samt grundig undervisning af kundens personale. Afhængig af anlægstype kan der indgå løbende monitorering af forureningen.

8.1 Case-eksempler

I følgende afsnit gennemgås 2 case eksempler på totaløkonomi fra de gennemførte test under dette projekt.

8.1.1 Anskaffelsespris hos Region Hovedstaden

Hos Region Hovedstaden er der testet på vand efter sandfilter men før aktivt kul-filter. I indløbsvandet er fundet følgende koncentrationer af chlorerede opløsningsmidler:

- Trichlorethylen 2,7 µg/l
- Tetrachlorethylen 5,4 µg/l
- Vinylchlorid 0,022 µg/l
- cis-1,2-dichlorethylen 4,9 µg/l

Der foreligger en drikkevandsgrænseværdi på det totale indhold af chlorerede kulbrinter på 1,0 µg/l. Drikkevandsgrænseværdierne for enkeltstofferne er 1,0 µg/l, dog er vinylchlorid opgivet til en grænseværdi på 0,5 µg/l.

På lokationen står et Pump and Treat anlæg med et flow på 1,7 m³/h. Vandets UVT-værdi er under testen målt til omkring 90%. Der vil uden yderligere ændringer i flow og sandfilter kunne laves en fast installation på denne lokation.

Design data:

- Flow 1,7m³/h
- Tryk maks 4 bar
- Temp. 0-60°C
- UVT min. 90%
- NVOC 2.0 mg/l
- Fe 1.8 mg/l
- Mn 0.14 mg/l
- NO₂⁻ <0.001 mg/l
- NO₃⁻ <0.16 mg/l

Forurening indløbskoncentration (+/- 5%)

- Trichlorethylen 2,7 µg/l
- Tetrachlorethylen 5,4 µg/l
- Vinylchlorid 0,022 µg/l
- cis-1,2-dichlorethylen 4,9 µg/l

Nedbrydnings mål (funktionsgaranti) 85%

- Trichlorethylen 0,40 µg/l
- Tetrachlorethylen 0,85 µg/l
- Vinylchlorid <0,020 µg/l
- cis-1,2-dichlorethylen 0,74 µg/l

FIGUR 28. Designdata for eksempel på anskaffelsespris hos Region Hovedstaden

Følgende anlæg er valgt på baggrund af data i FIGUR 28 med en sikkerhedsfaktor på 20%:
RemUVE løsning med 0,9 kW 400VAC, DN150 PN10 RF Flanger og 2 ppm H₂O₂ dosering.

Anlægget består af UV-MP-HOD-system, masseflow dosering af H₂O₂, flowmåler, controllere og el-skab, dataopsamling, ind- og udløbsrør, afspærringsventiler og CIP-ventiler. Anlægget leveres monteret på ramme for vertikal installation. Løsningen doserer UV energi og H₂O₂ dynamisk i forhold til flow og UVT-forhold. Mulighed for alarm status til SRO via relæ udgang. Indbygningsmål 3100 mm. Anskaffelse pris ca. 420.000 kr.

8.1.2 Driftsomkostninger hos Region Hovedstaden

Til denne case vil der være et kWh forbrug på 0,52 kWh/m³ behandlet vand mens H₂O₂ forbruget vil være på 2 ppm, svarende til 9,71 g/h 35 wt% H₂O₂. Som udgangspunkt benyttes 1,5 kr/kWh og 5 kr/kg 35 wt% H₂O₂. Disse tal resulterer i en total driftsomkostning på 0,92 kr/m³ behandlet vand med drift i alle døgnets 24 timer.

Flow m ³ /h	1,7
Pris pr. kWh	1,50 kr.
Pris H ₂ O ₂ 35 wt% pr. kg	5,00 kr.
UV kWh	0,9
H ₂ O ₂ forbrug kg/h ved 2 ppm	0,00971
Direkte udgift pr. 1 m ³ behandlet vand	0,56 kr.
Samlet udgift pr. time	0,95 kr.
Drift timer pr. dag	24
Dag i drift pr. år	365
Årlig behandlet vand m ³	14892
Årlig driftsudgift	8.309,30 kr.
Forbrugsvarer	
Drift timer pr. år	8760
Lamper garanteret levetid 4000 timer	antal pr. år
Antal lamper + pakning pr år	1
Årlig udgift for forbrugsvarer	5.367,00 kr.
Årlig total driftsudgift	13.676,30 kr.
Årlig total driftsudgift pr. 1 m ³ behandlet vand	0,92 kr.

FIGUR 29. Driftsomkostninger for eksempel hos Region Hovedstaden

Hos Regionen Hovedstaden kan der kigges på en mulig besparelse af driften på nye og eksisterende afværge anlæg. Med denne løsning vil være potentiale for at kunne nedbryde oprensningsplanerne på 10-100 år ved GAC-filter løsning alene til en forventet 1-10 års periode ved implementering af RemUVE.

Region Hovedstaden har oplyst, at de regner med en pris på 0,47 til 2,78 kr./m³ til behandling med GAC-filer, til en opgave som på teststedet. Det kan således konkluderes, at der vil være en mulig økonomiske besparelse ved at anvende RemUVE-teknologien.

8.1.3 Anskaffelsespris hos DTU Risø

Hos DTU Risø er der testet på råvand fra en stillestående drikkevandsboring. I vandindløb er der fundet DMS i en koncentration på 0,40 µg/l, mens grænseværdien ligger på 0,1 µg/l for DMS i drikkevand. Vandets UVT-værdi er under testene svinget mellem 73,5% og 82,9%, hvilket er et forventeligt område for råvand. Behandlingen anbefales derfor udført efter iltning og sandfiltrering, hvor vandets UVT-værdi er testet til over 90%.

Design data:

· Flow 6,5m ³ /h	
· Tryk maks 4 bar	
· Temp. 0-60°C	
· UVT min. 90%	
· NVOC	2.2 mg/l
· Fe	1.8 mg/l
· Mn	0.14 mg/l
· NO ₂ ⁻	<0.0005 mg/l
· NO ₃ ⁻	<0.10 mg/l

Forurening indløbskoncentration (+/- 5%)

· 2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	0.066 µg/l
· CGA108906	0.12 µg/l
· DMS	0.40 µg/l

Nedbrydnings mål (funktionsgaranti) 80%

· 2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	0.0132 µg/l
· CGA108906	0.024 µg/l
· DMS	0.080 µg/l

FIGUR 30. Designdata for eksempel på anskaffelsespris hos DTU Risø

Følgende anlæg er valgt på baggrund af data i FIGUR 30 med en sikkerhedsfaktor på 20%: RemUVE løsning med 2,3 kW 400VAC, DN150 PN10 RF Flanger og 10ppm H₂O₂ dosering.

Anlægget består af UV-MP-HOD-system, masseflow dosering af H₂O₂, flowmåler, controllere og el-skab, dataopsamling, ind- og udløbsrør, afspærringsventiler og CIP-ventiler. Anlægget leveres monteret på ramme for vertikal installation. Løsningen doserer UV energi og H₂O₂ dynamisk i forhold til flow og UVT-forhold. Mulighed for alarm status til SRO via relæ udgang. Indbygningsmål 3100 mm. Anskaffelse pris ca. 600.000 kr.

8.1.4 Driftsomkostninger hos DTU Risø

Til denne case vil der være et kWh forbrug på 0,35 kWh/m³ behandlet vand mens H₂O₂ forbruget vil være på 10 ppm, svarende til 185,72 g/h 35 wt% H₂O₂. Som udgangspunkt benyttes

1,5 kr/kWh og 5 kr/kg 35 wt% H₂O₂. Den daglige drikkevandsproduktion hos DTU Risø er 70 m³.

Flow m ³ /h	6,5
Pris pr. kWh	1,50 kr.
Pris H ₂ O ₂ 35 wt% pr. kg	5,00 kr.
UV kWh	2,3
H ₂ O ₂ forbrug kg/h ved 10 ppm	0,18572
Direkte udgift pr. 1m ³ behandling vand	0,67 kr.
Samlet udgift pr. time	4,38 kr.
Drift timer dag	10,8
Dag i drift pr. år	365
Årlig behandlet vand m ³	25550
Årlig driftsudgift	17.211,27 kr.
Forbrugsvarer	
Drift timer pr. år	3931
Lamper garanteret levetid 4000 timer	Antal pr. år
Antal lamper + pakning pr år	1
Årlig udgift for forbrugsvarer	6.529,49 kr.
Årlig total driftsudgift	23.740,75 kr.
Årlig total driftsudgift pr. 1m ³ behandlet vand	0,93 kr.

FIGUR 31. Driftsomkostninger for eksempel hos DTU Risø

Hos DTU Risø vil vandværket opleve en total driftsudgift på 0,93 kr/m³ vand behandlet med RemUVE. Dette vil sikre DTU Risø mod DMS, BAM og CGA108906 og at de kan opretholde en drift fra de forurenede borer.

8.1.5 Økonomiske betragtninger

Hvis et vandværk ramt af DMS på samme måde som DTU Risø, købte et RemUVE-system kunne dette afskrives over fx 15 år. Med en vandproduktion tilsvarende den af DTU Risø resulterer dette i en samlet udgift på 2,49 kr/m³ behandlet vand for drift og afskrivning af RemUVE. Dette er en årlig omkostning på 63.581 kr.

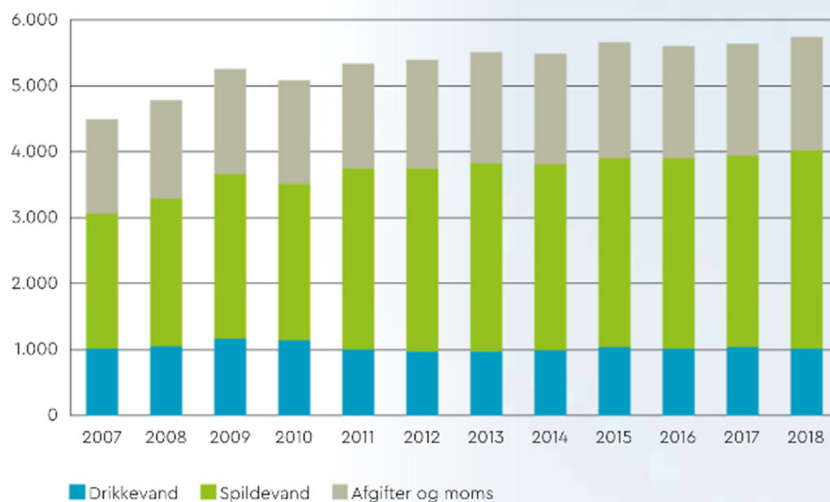
Til sammenligning kunne der muligvis etableres en ny boring (estimeret pris 1.500.000 kr (Jørgensen, 2020)) hvilket med afskrivning over 15 år ville være 100.000 kr/år.

For at undersøge forbrugernes udgifter kan der tages udgangspunkt i eksemplet fra DTU Risø. Forbrugerens vandpris var ifølge Danvas opgørelse "Vand i tal" i 2019 på 69,45 kr/m³ gennemsnitligt (Vand i tal, 2019). Drikkevandsandelen uden afgifter og moms udgør 12,33 kr/m³. Tillagt den totale driftsudgift fra RemUVE på 0,93 kr er den resulterende drikkevandsandel på 13,26 kr/m³ – en stigning på 7%. For den samlede vandpris inkl. afgifter og moms udgør stigningen 2,5%.

En gennemsnitsfamilie på 2,15 person har et gennemsnitligt årsforbrug på 38,45 m³ vand pr. person. Den gennemsnitlige årlige udgift for en familie ligger derfor på 5.595 kr. Behandling med RemUVE løsningen vil tillægge 140 kr om året svarende til 11,66 kr om måneden pr familie.

EN GENNEMSITLIG HUSTANDS VANDUDGIFT, 2007-2018

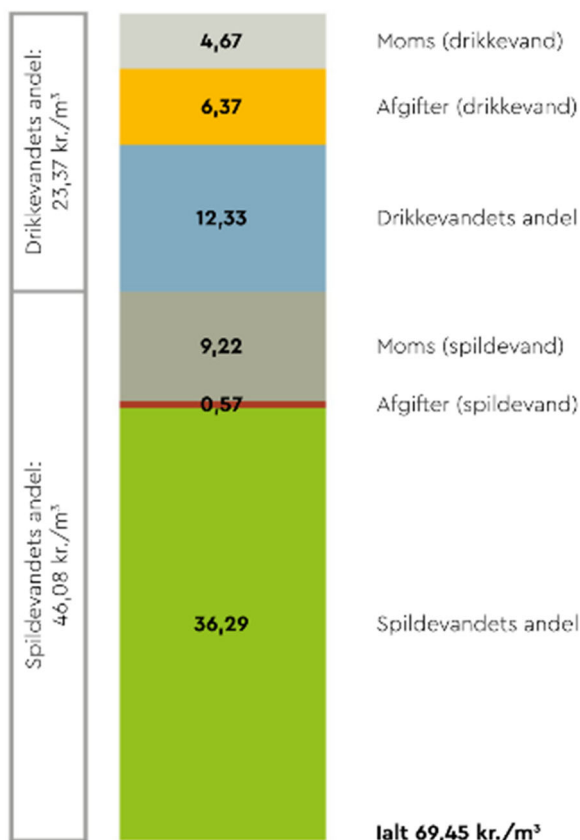
Kr./m³ (2018 priser)



Opgørelsen er for en gennemsnitsfamilie på 2,15 person med et gennemsnit forbrug pr. person på 38,46 m³/år.

Vandpriser for 2007-2018 for gennemsnitsfamilier. Fra Danvas Vand i tal. 2019.

VANDPRISENS SAMMENSÆTNING 2018



Vandprisen sammensætning i 2018. Fra Danvas Vand i tal. 2019.

8.2 Marked i Danmark

Primært ansues to markeder som oplagte for RemUve-løsningen. Disse værende hhv. drikkevandsforsyninger eller pump and treat afværgeanlæg, typisk drevet af regionerne. RemUve-løsningen kan være en stor hjælp i begge markeder; drikkevandsforsyningerne der skal levere rent drikkevand og regionerne som skal sikre rent grundvand.

8.2.1 Drikkevand

For drikkevandsforsyningerne gælder, at bliver de ramt af en forurening som pesticider eller chlorerede opløsningsmidler undersøges om det er muligt at opnå vand der overholder grænseværdierne ved omlægning af den eksisterende indvinding. Hvis dette ikke er muligt, er der 2 muligheder:

1. Finde en ny indvindingsmulighed med rent vand. Dette kan være yderst udfordrende da forhold som geologi, bebyggelse, afstand, lokalplan osv. kan have en stor betydning. Hvis der kan findes en ny indvindingsmulighed, vil omkostningen til etablering af denne typisk have en udgift på 1.500.000 kr. Dertil kommer at der er risiko for at denne nye indvinding ligeledes rammes af forureningen.
2. Behandle vandet fra nuværende indvinding. Her kan RemUve være aktuel, da løsningen kan etableres på det eksisterende anlæg som et ekstra behandlingstrin. Løsningen vil i de fleste tilfælde være økonomisk favorabel og der udføres behandling med sikkerhed for, at

forureningen ikke overskrider grænseværdierne. RemUVE kan også tilpasses så fremtidige stigninger af forureningskoncentrationer eller nyfundne forureninger kan imødekommes.

8.2.2 Pump and Treat

Når regionerne skal løse en forureningsopgave, benyttes en beregningsmodel. Hos Region Hovedstaden kaldes dette RemS, hvilket benyttes til at bestemme hvilken type af oprensning der skal anvendes. Region Hovedstaden har en målsætning om at igangsætte 4-6 nye oprensninger pr. år, mens de i dag driver ca. 50 anlæg som typisk anvender GAC-filtre. Deres typiske opgaver omhandler chlorerede opløsningsmidler (Region Hovedstaden, 2020).

Målsætningen hos andre regioner tilpasses til deres prioriteter og indsats på dette område, men fremgangsmåden er typisk identisk. Introduktionen af RemUVE muliggør besparelser ved disse opgaver.

8.3 Eksportmuligheder

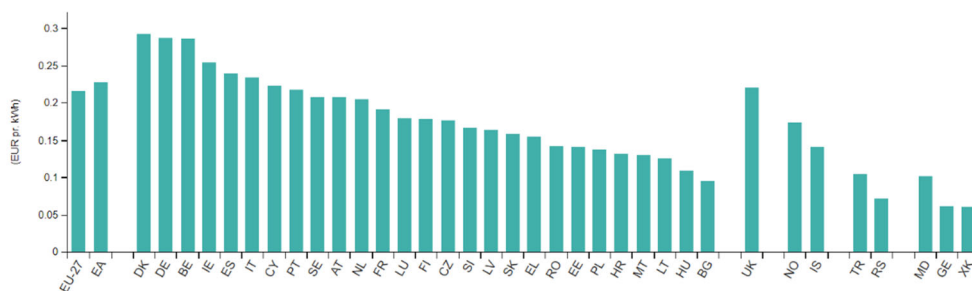
Udfordringer med både pesticider og chlorerede opløsningsmidler er ikke kun et dansk problem. Gennem dette projekt er RemUVE-løsningen formidlet til lande som Holland, Belgien, Tyskland og USA, hvorfra der er udvist stor interesse. AOP virker her velkendt og anvendt i videre udstrækning end i Danmark, men med væsentligt højere energiforbrug og usikkerhed end der er vist muligt med RemUVE.

Der efterspørges på mulighederne for fjernelse af fx 1,4-dioxan, MTBE og medicinrester. Der er endnu ikke testet for 1,4-dioxan og medicinrester med RemUVE, men det forventes at der kan skabes positive resultater. I forlængelse af dette projekt er det blevet testet for RemUVE-behandlingen på MTBE hos forsyningsselskabet Novafos. Her er fundet gode resultater.

Det vurderes at der vil være eksportmuligheder til lande med lignede fokus på grund- og drikkevand. En fremgangsmåde vil her være at benytte eksisterende kontakter skabt igennem projektet. Specielt for eksportmulighederne er konferencerne IWA2021 og IFAT 2022 af stor vigtighed, hvorfor det er planlagt at præsentere RemUVE på disse. Begge konferencer er flyttet fra 2020 grundet Covid-19.

RemUVE kan være en endnu mere konkurrencedygtig løsning i lande med lavere elpriser, hvilket vil mindske vandbehandlingsprisen yderligere. Dette fremgår tydeligt af nedenstående figur der viser elpriserne for en række lande (eurostat, 2020).

Elpriser for husholdninger (inkl. skatter), 2. halvår 2019



Elpriser for en række lande. Priser i € pr kWh. (eurostat, 2020)

9. Vidensformidling

Som en del af projektet har der været vidensformidling af projektet i form af følgegruppemøder, netværksmøder, præsentationer og indlæg på konferencer i både Danmark og udlandet.

9.1 Følgegruppemøder

Der er afholdt følgegruppemøder med Region Hovedstaden og Region Sjælland før opstart af test på deres testlokaliteter og igen da der forelå testresultater.

Der er ligeledes afholdt følgegruppemøde med DTU Risø og SK-Forsyning før test og efter resultaterne af testen forelå.

Følgegruppemøderne har haft fokus på at informere deltagerne i resultaterne af testen på netop deres lokalitet.

9.2 Netværksmøder og fremvisninger

Lige før opstart af testfasen i august 2019 blev UV-anlægget fremvist for Miljøminister Lea Wermelin.



Besøg af Lea Wermelin ved opstart af projektet hos Insatech i Bårse

Projektet har været på dagordnen på netværksmøder afholdt af Gladsaxe Kommune med deltagelse af flere andre kommuner. Det medførte bl.a. en opfordring til at kontakte forsyningsselskabet Novafos, en kontakt som i dag bidrager til en fortsat udvikling af teknologien.

Projektet er blevet præsenteret til et gå-hjem-møde i fagforeningen IDA's afdeling i København.

Region Sjælland lagde faciliteter til rådighed da Danske Vandværker var på besøgsdag mens testen blev udført på Region Sjællands testgrund i Hvalsø.



Danske Vandværker på besøg i test traileren

9.3 Danske og udenlandske præsentationer

Projektet er blevet præsenteret på flere konferencer og temadage. Det er blevet præsenteret med et indlæg ved Danish Water Forum "Water research conference 30. January 2020"

Ligeledes var det på programmet med en posterudstilling på konferencen Remediation Day 2020 som blev afholdt i Eindhoven i Holland. D 6. februar 2020.

Projektet og traileren med UV-anlægget blev præsenteret på et INOGEN Environmental Alliance EMEA regional meeting i Almera i Holland d. 19.-20. februar 2020 med deltager fra en række forskellige lande. <https://www.inogenalliance.com>

Efter præsentationen i Almera har der d. 2. april 2020 været afholdt en internetpræsentation af projektet og teknologien for specialister fra USA, Holland, Tyskland og Italien som specifikt efter-spurgte mere viden om projektet og teknologien.

Ligeledes blev projektet præsenteret på ATV's Vintermøde d. 3.-4. marts 2020 hvor traileren med UV-anlægget i stod til fremvisning.

Projektet skulle have været præsenteret på konferencen Renara Mark i Sverige, men grundet COVID-19 blev denne konference aflyst. Det forventes at projektet kommer med på konferencen når denne afholdes i 2021.

9.4 Øvrig omtale i medier og pressen

Der er skrevet en artikel udgivet i Sjællandske Tidende d. 24. august 2019 om projektet og ministerens besøg af projektet.

Der ligeledes skrevet en artikel om projektet som er udgivet i fagbladet Dansk Vand fra d. 3. april 2020.

Projektet og ministerens besøg er ligeledes omtalt og vist i TV2 Øst og der er lavet en radiorepotage om projektet på DR P4 i august 2019.

Der er udgivet en artikel i Ingeniørens Watertech afsnit d. 23. januar 2020 omkring løsningen.

10. Evaluering og anbefalinger

RemUVE-teknologien har vist sig at være en effektiv, økonomisk, fleksibel og kompakt behandlingsmetode, både til midlertidige og permanente behandlingsbehov.

Der er igennem projektet mødt en stor samarbejdsvilje fra alle involverede parter, hvilket har muliggjort at teste på rækken af forureningsstoffer. Målene for projektet er overordnet set opfyldt; der er undersøgt og fundet generelt gode resultater for behandlingsmetoden samt opsat nedbrydningsmodeller, hvor dette har været muligt. Ydermere er fundet og klarlagt situationer der kan besværliggøre behandlingen, så disse kan imødekommes fremover. Den mobile enhed er i mange situationer en god løsning, og har muliggjort undersøgelserne igennem dette projekt. Ydermere vil den mobile enhed muliggøre hurtig reaktion i ved forureningssituationer hvor dette er krævet. En fast installation vil også i mange tilfælde være en god løsning, hvis der er tale om kontinuerlig behandling af enten drikkevand eller forurenede grundvand ved afværgeløsninger. Ved afværgeløsninger kan denne type behandling installeres for både at forøge behandlingshastighed og nedbryde eller helt at fjerne behov for fx kulfiltre hvorved afværgeprojekter forkortes og gøres billigere.

Der er målt for de tænkelige og mulige stoffer, som der har været mulighed for ved testene ud fra nuværende viden og analyselaboratoriernes kapabiliteter. Dog har det været en udfordring i testen, at der er en begrænsning for, hvilke stoffer der kan analyseres for, samt hvilke mængder og nøjagtigheder der kan testes. Derfor har det i mange tilfælde ikke været muligt at påvise nedbrydningsprodukter andet end slutprodukter efter mineralisering.

Det er erfaret, at det vil være anbefalelsesværdigt at teste på det konkrete vand der er tale om. Ud fra de opstillede modeller vil det være muligt at estimere energi og H_2O_2 -behov for behandling af allerede testede stoffer, dog vil dette være et estimat og en egentlig test på det konkrete vand vil være ideel.

Projektets gennemførsel har gjort det klart, at der er stor interesse og efterspørgsel på denne type UV-HOD/ H_2O_2 AOP, der er blevet døbt RemUVE. Interessen kommer primært fra forsyningsselskaber samt fra regioner med ansvar for afværgeboringer og oprensningsprojekter.

Overordnet anbefaling på baggrund af vist funktion og rentabilitet er, at RemUVE ses som en videregående vandbehandlingsform for både vandværker og afværgeanlæg på lige fod med andre behandlingsmuligheder. Projektet har vist, at metoden virker, og at det i mange tilfælde er økonomisk fordelagtigt eller på lige fod med kendte behandlingsformer. Dette samtidigt med fordele som fx dynamisk dosering af både H_2O_2 og UV-energi med høj nøjagtighed og at anlægget ikke kræver meget plads ved installation. Hvis der bliver behov for at ændre flow eller forureningens koncentration ændres er anlægget modulopbygget og vil let kunne udbygges med fx flere lamper.

RemUVE er en effektiv løsning med gode resultater for alle testede forureninger, og dette til konkurrencedygtige omkostninger. MUDP-projektet har vist at RemUVE kan kommercialiseres og er en løsning der arbejdes og udvikles videre på, alt imens behandlingsløsningens potenti-ale er under konstant udvidelse.

11. Referencer

- Braun AM, M. M. (1991). *Photochemical Technology*. Chichester: John Wiley & Sons.
- eurostat. (maj 2020). Hentet fra Statistikker over elpriser:
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics/da
- Jørgensen, J. (2020). Driftschef, SK Forsyning.
- Miljøtilstand.nu. (14. april 2020). Hentet fra Pesticider i grundvandet: <https://xn--miljotilstand-yjb.nu/temaer/vandforsyning/pesticider-i-grundvandet/>
- mst.dk. (20. februar 2020). Hentet fra Første massescreening af grundvandet er afsluttet:
<https://mst.dk/service/nyheder/nyhedsarkiv/2020/feb/resultatet-af-massescreening-af-grundvand-2019/>
- Oppenländer, T. (2003). *Photochemical Purification of Water and Air*. WILEY-VCH.
- Region Hovedstaden. (april 2020). Hentet fra Oversigt over den forventede offentlige indsats i Region Hovedstaden på jordforureningsområdet i 2020 og nærmeste år:
https://www.regionh.dk/miljoe/jordforurening/projekter/Documents/Den_offentlige_ind_sats_i_2020_TG_070920.pdf
- Sedlak, D. (2006). *Removal and Destruction of NDMA and NDMA Precursors during Wastewater Treatment*. Berkeley: WaterReuse Foundation. Hentet fra Removal and Destruction of NDMA and NDMA Precursors during Wastewater Treatment:
https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/grants_loans/water_recycling/research/01_002_01.pdf
- Stefan MI, M. J. (2000). Degradation Pathways during the Treatment of Methyl tert-Butyl Ether by the UV/H₂O₂ Process. *Environ. Sci. Technol.* 34, No. 4, s. 650-658.
- Vand i tal. (2019). Hentet fra Danva: <http://www.e-pages.dk/danva/231/>

Bilag 1. Analyseresultater

Bilag 1.1 Region Hovedstaden



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 408 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4025 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

DGE Miljø- og ingeniørfirma a/s
Litterbuen 13
2740 Skovlunde
Att.: Martin Bymose

Udskrevet: 13-11-2019
Version: 1
Modtaget: 28-10-2019
Analyseperiode: 28-10-2019 -
13-11-2019
Ordrenr.: 530239

Sagsnavn: 18-0862
Lokalitet: 151-00015, Skovlunde Byvej 96A
Prøvested: Testgrunden
Udtaget: 28-10-2019
Prøvetype: Vand
Prøvetager: DGE/MASC
Kunde: Insatech A/S, Næstvedvej 73C, 4720 Præstø

Prøvenr.:	177940/19	177941/19	177942/19		
Prøve ID:	1.00	1.10	1.20		
Kommentar	*1	*1	*1		
Parameter	Enhed	Metode			
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	<0.0005	0.014	0.018	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Ammonium+ammoniak, NH ₄ ⁺	0.045	0.041	0.043	mg/l	SM 17udg. 4500-NH ₃
Nitrat, NO ₃ ⁻	0.16	0.22	0.12	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
Chlorid, Cl ⁻	46	47	46	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Hydrogencarbonat, HCO ₃ ⁻	370	380	380	mg/l	DS/EN ISO 9963-1:1996
NVOC	2.0	2.0	1.9	mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
HS Chlor. og nedbr.	-	-	-	-	AK210 - HS GC/MS
Trichlormethan (Chloroform)	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1,1-trichlorethan	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlormethan	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Trichlorethylen	2.7	1.1	0.83	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlorethylen	5.4	1.8	1.3	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Chlorethan	<0.10	<0.10	<0.10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Vinylchlorid	0.022	0.026	0.030	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethylen	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
trans-1,2-dichlorethylen	0.071	0.35	0.34	µg/l	AK210 - HS GC/MS
cis-1,2-dichlorethylen	4.9	3.5	3.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dibromethan	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dichlorethan	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethan	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
HS Polære opløsningsmidler	-	-	-	-	AK210 - HS GC/MS
Methanol	<10	<10	<10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Ethanol	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Isopropanol	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
n-Propanol	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Butylacetat	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Acetone	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Methylethylketon (MEK)	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Isobutanol	<10	<10	<10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1-Butanol (n-Butanol)	<10	<10	<10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Methylisobutylketon (MIBK)	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Diethylether	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS

side 1 af 2

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, med mindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om målesikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:
#: Ikke akkrediteret
<: mindre end
I.p.: Ikke påvist
>: Større end



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 408 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

DGE Miljø- og ingeniørfirma a/s
Literbuen 13
2740 Skovlunde
Att.: Martin Bymose

Udskrevet: 13-11-2019
Version: 1
Modtaget: 30-10-2019
Analyseperiode: 30-10-2019 -
13-11-2019
Ordrenr.: 539844

Sagsnavn: 18-0882
Lokalitet: 151-00015, Skovlunde Byvej 96A
Prøvested: Testgrunden
Udtaget: 30-10-2019
Prøvetype: Vand
Prøvetag: DGE/MASC
Kunde: Insatech A/S, Næstvedvej 73C, 4720 Præsto

Prøvenr.:	179681/19	179682/19	179683/19	179684/19	179685/19		
Prøve ID:	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40		
Kommentar	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	0.0010	0.024	0.024	0.028	0.029	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Ammonium+ammoniak, NH ₄ ⁺	0.076	0.042	0.087	0.099	0.20	mg/l	SM 17udg. 4500-NH ₃
Nitrat, NO ₃ ⁻	0.24	0.17	0.17	0.15	0.15	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
Chlorid, Cl ⁻	41	46	41	46	46	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Hydrogencarbonat, HCO ₃ ⁻	370	370	370	380	380	mg/l	DS/EN ISO 9963-1:1996
NVOC	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
HS Chlor. og nedbr.						-	AK210 - HS GC/MS
Trichlormethan (Chloroform)	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1,1-trichlorethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlormethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Trichlorethylen	2.7	0.32	0.33	0.14	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlorethylen	5.4	0.42	0.43	0.16	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Chlorethan	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Vinylchlorid	0.023	<0.020	0.023	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethylen	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
trans-1,2-dichlorethylen	0.059	0.34	0.40	0.38	0.11	µg/l	AK210 - HS GC/MS
cis-1,2-dichlorethylen	5.1	2.0	2.2	1.6	0.36	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dibromethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dichlorethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
HS Polære opløsningsmidler						-	AK210 - HS GC/MS
Methanol	<10	<10	<10	<10	<10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Ethanol	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Isopropanol	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
n-Propanol	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Butylacetat	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Acetone	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Methylethylketon (MEK)	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Isobutanol	<10	<10	<10	<10	<10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1-Butanol (n-Butanol)	<10	<10	<10	<10	<10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Methylisobutylketon (MIBK)	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Diethylether	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS

side 1 af 2

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, medmindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om måleusikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tolernfortolking
#: Ikke akkrediteret
<: mindre end
I.p.: Ikke påvist
>: Større end



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 406 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4625 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

Prøvenr.: 179686/19

Prøve ID: 2.50

Kommentar *1

Parameter		Enhed	Metode
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	0.030	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Ammonium+ammoniak, NH ₄ ⁺	0.40	mg/l	SM 17udg. 4500-NH ₃
Nitrat, NO ₃ ⁻	0.15	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
Chlorid, Cl ⁻	47	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Hydrogencarbonat, HCO ₃ ⁻	380	mg/l	DS/EN ISO 9963-1:1996
NVOC	1.8	mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
HS Chlor. og nedbr.		-	AK210 - HS GC/MS
Trichlormethan (Chloroform)	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1,1-trichlorethan	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlormethan	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Trichlorethylen	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlorethylen	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Chlorethan	<0.10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Vinylchlorid	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethylen	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
trans-1,2-dichlorethylen	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
cis-1,2-dichlorethylen	0.047	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dibromethan	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dichlorethan	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethan	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
HS Polære opløsningsmidler		-	AK210 - HS GC/MS
Methanol	<10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Ethanol	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Isopropanol	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
n-Propanol	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Butylacetat	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Acetone	6.1	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Methylethylketon (MEK)	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Isobutanol	<10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1-Butanol (n-Butanol)	<10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Methylisobutylketon (MIBK)	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Diethylether	<5.0	µg/l	AK210 - HS GC/MS

Kommentar

*1 Ingen kommentar

Ditte T.E. Strecker

Ditte Therese Ekman Strecker

side 2 af 2

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gængives i sin helhed, med mindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om måleusikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring

#: Ikke akkrediteret
<: mindre end
>: Ikke påvist
>: Større end

Bilag 1.2 DTU Risø

[illegible]



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 408 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

DGE Miljø- og ingeniørfirma a/s
Literbuen 13
2740 Skovlunde
Att.: Martin Bymose

Udskrevet: 29-11-2019
Version: 1
Modtaget: 14-11-2019
Analyseperiode: 14-11-2019 -
29-11-2019
Ordrenr.: 543086

Sagsnavn: 18-0862
Lokalitet: DTU - Risø
Udtaget: 12-11-2019
Prøvetype: Vand
Prøvetager: Rekv/MASC
Kunde: Insatech A/S, Næstvedvej 73C, 4720 Præste

Prøvenr.:	190430/19	190431/19	190432/19	190433/19	190434/19		
Prøve ID:	1.00	2.05	1.10	2.12	2.13		
Kommentar	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	<0.0005	<0.0005	0.0028	<0.0005	<0.0005	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Nitrat, NO ₃ -	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
NVOC	2.2	2.2	2.1	2.2	2.4	mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
Pesticider, BAM							AK78 - LC/MS/MS
2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	0.066	0.066	0.051	0.051	0.062	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
CGA108906 (Nedbr. af Metalaxyl)	0.12	0.12	0.044	0.043	0.091	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Prøvenr.:	190435/19	190436/19	190437/19	190438/19	190439/19		
Prøve ID:	2.15	2.16	2.17	2.18	2.19		
Kommentar	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Nitrat, NO ₃ -	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.14	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
NVOC	2.1	2.0	2.2	2.1	2.2	mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
Pesticider, BAM							AK78 - LC/MS/MS
2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	0.044	0.051	0.039	0.041	0.039	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
CGA108906 (Nedbr. af Metalaxyl)	0.035	0.040	0.047	0.041	0.030	µg/l	AK78 - LC/MS/MS

Kommentar

*1 Ingen kommentar

Ditte T. E. Strecker

Ditte Therese Ekman Strecker

side 1 af 1

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, med mindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om måleusikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:

≡ Ikke akkrediteret
< mindre end
I.p.: Ikke påvist
> Større end

LCMSMS analysis of liquid samples			
2020-01-13			
Mikael Olsson			
		DMS	NDMA
QL (ug/l)		0,050	0,020
Sample name	Sample no (lab)	Conc. [ug/l]	Conc. [ug/l]
Label unreadable	1	0,26	< 0.02
1.03	2	0,48	< 0.02
1.12	3	0,39	< 0.02
1.02	4	0,47	< 0.02
1.11	5	0,36	< 0.02
1.01	6	0,47	< 0.02
1.17	7	0,40	< 0.02
1.07	8	0,49	< 0.02
1.18	9	0,27	< 0.02
1.08	10	0,44	< 0.02
1.19	11	0,19	< 0.02
1.09	12	0,46	< 0.02
1.04	13	0,46	< 0.02
1.14	14	0,26	< 0.02
1.05	15	0,48	< 0.02
1.15	16	0,16	< 0.02
1.06	17	0,48	< 0.02
1.16	18	0,34	< 0.02
1.20	19	0,11	< 0.02
1.10	20	0,46	< 0.02



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 406 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

DGE Miljø- og ingeniørfirma a/s
Literbuen 13
2740 Skovlunde
Att.: Martin Bymose

Udskrevet: 23-01-2020
Version: 1
Modtaget: 09-01-2020
Analyseperiode: 09-01-2020 -
23-01-2020
Ordrenr.: 551388

Sagsnavn: 18-0862
Lokalitet: DTU - Risø
Udtaget: 08-01-2020
Prøvetype: Vand
Prøvetager: Rekv/MASC
Kunde: Insatech A/S, Næstvedvej 73C, 4720 Præstø, Att. Mathias Schouw

Prøvenr.:	5348/20	5349/20	5350/20	5351/20	5352/20		
Prøve ID:	1.01	1.05	1.10	1.11	1.12		
Kommentar	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Nitrat, NO ₃ -	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
NVOC	2.4	2.6	2.6	2.4	2.5	mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
Pesticider, BAM							-
2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	0.069	0.067	0.068	0.031	0.038	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
CGA108906 (Nedbr. af Metolaxyl)	0.12	0.11	0.11	<0.010	0.011	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Bromat	*2	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	µg/l	CZ SOP D06 02 098
Bromid, Br	*3	149	147	133	143	µg/l	ICP/SFMS SS EN ISO 17294-2: 2016
Prøvenr.:	5353/20	5354/20	5355/20	5356/20	5357/20		
Prøve ID:	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17		
Kommentar	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Nitrat, NO ₃ -	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
NVOC	2.3	2.5	2.3	2.4	2.4	mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
Pesticider, BAM							-
2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	0.019	0.021	0.010	0.036	0.038	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
CGA108906 (Nedbr. af Metolaxyl)	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Bromat	*2		<5.0		<5.0	µg/l	CZ SOP D06 02 098
Bromid, Br	*3		144		139	µg/l	ICP/SFMS SS EN ISO 17294-2: 2016

side 1 af 2

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, med mindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om målesikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:
Ikke akkrediteret
< mindre end
I.p.: Ikke påvist
> Større end



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 406 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

Prøvenr.:	5358/20	5359/20	5360/20		
Prøve ID:	1.18	1.19	1.20		
Kommentar	*1	*1	*1		
Parameter				Enhed	Metode
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	<0.0005	<0.0005	<0.0005	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Nitrat, NO ₃ -	<0.10	<0.10	<0.10	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
NVOC	2.4	2.4	2.3	mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
Pesticider, BAM					
2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	0.016	0.013	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
CGA108906 (Nedbr. af Metolaxyl)	<0.010	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Bromat	*2		<5.0	µg/l	CZ SOP D06 02 098
Bromid, Br	*3		141	µg/l	ICP/SFMS SS EN ISO 17294-2: 2016

Kommentar

*1 Ingen kommentar

*2 # Underleverandør: ALS Scandinavia AB, SWEDAC 2030

*3 Underleverandør: ALS Czech Republic s.r.o., CAI L1163

Ditte T. E. Strecker

Ditte Therese Ekman Strecker

side 2 af 2

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, medmindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om måleusikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:

≡ Ikke akkrediteret

<: mindre end

!p.: Ikke påvist

>: Større end

Bilag 1.3 Region Sjælland



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 406 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

DGE Miljø- og ingeniørfirma a/s
Literbuen 13
2740 Skovlunde
Att.: Martin Bymose

Udskrevet: 03-01-2020
Version: 1
Modtaget: 13-12-2019
Analyseperiode: 13-12-2019 -
03-01-2020
Ordrenr.: 548297

Sagsnavn: 18-0862
Lokalitet: Stengårdens Losseplads (Reg Sj)
Udtaget: 12-12-2019
Prøvetype: Vand
Prøvetager: Rekv/MASC
Kunde: Insatech A/S, Næstvedvej 73C, 4720 Præsto

side 1 af 5

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, med mindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om måleusikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:
≠ Ikke akkrediteret l.p.: Ikke påvist
<: mindre end >: Større end



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 406 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

Prøvenr.:	209838/19	209839/19	209840/19	209841/19	209842/19		
Prøve ID:	1.01	1.11	1.12	1.13	2.11		
Kommentar	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0014	0.00058	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Nitrat, NO ₃ ⁻	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
NVOC	10		9.9	9.8		mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
HS Chlor. og nedbr.							AK210 - HS GC/MS
Trichlormethan (Chloroform)	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020		µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1,1-trichlorethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020		µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlormethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020		µg/l	AK210 - HS GC/MS
Trichlorethylen	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020		µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlorethylen	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020		µg/l	AK210 - HS GC/MS
Chlorethan	0.33	0.21	0.24	0.24		µg/l	AK210 - HS GC/MS
Vinylchlorid	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020		µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethylen	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020		µg/l	AK210 - HS GC/MS
trans-1,2-dichlorethylen	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020		µg/l	AK210 - HS GC/MS
cis-1,2-dichlorethylen	0.17	0.086	0.10	0.11		µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dibromethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020		µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dichlorethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020		µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethan	0.031	<0.020	0.025	0.026		µg/l	AK210 - HS GC/MS
Pesticider, BAM							AK78 - LC/MS/MS
4-CPP, (4-Chlorprop)	2.7	1.1	0.52	0.29	0.99	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
4-chlor-2-methylphenol	0.29	0.12	0.074	0.040	0.12	µg/l	AK158 - GC/MS
Atrazin	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	0.089	0.088	0.082	0.083	0.083	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Chloridazon	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Desphenyl-chloridazon	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Dichlobenil	0.032	0.014	0.012	<0.010	0.018	µg/l	AK78 - GC/MS
Dichlorprop(2,4-DP)	0.14	0.14	0.12	0.12	0.13	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Diuron	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Mechlorprop(MCPP)	1.5	0.83	0.43	0.24	0.77	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
PFAS-forbindelser, MST 12 stoffer							DIN 38407-42:2011-03
PFBS	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFBA	0.022	0.025	0.019	0.019		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFPeA	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFlpA	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFltA	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFltA	0.0083	0.0078	0.0072	0.0075		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFNA	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFDA	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFOSA	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFOS	0.0054	0.0072	0.0053	0.0052		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFOA	0.011	0.0092	0.014	0.014		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
FTS 6.2	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010		µg/l	DIN 38407-42:2011-03
Sum af PFAS, 12 stoffer	0.047	0.049	0.045	0.045		µg/l	DIN 38407-42:2011-03

side 2 af 5

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, med mindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om måleusikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:
Ikke akkrediteret
< mindre end
I.p.: Ikke påvist
> Større end



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 406 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

Prøvenr.:	209843/19	209844/19	209845/19	209846/19	209847/19		
Prøve ID:	2.12	2.03	2.13	3.11	3.12		
Kommentar	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	0.0010	<0.0005	0.0015	0.0018	<0.0005	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Nitrat, NO ₃ -	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
NVOC	10	10	9.9		10	mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
HS Chlor. og nedbr.							AK210 - HS GC/MS
Trichlormethan (Chloroform)	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1,1-trichlorethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlormethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Trichlorethylen	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlorethylen	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Chlorethan	0.28	0.27	0.21	0.30	0.23	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Vinylchlorid	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethylen	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
trans-1,2-dichlorethylen	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
cis-1,2-dichlorethylen	0.11	0.13	0.065	0.10	0.071	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dibromethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dichlorethan	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethan	0.031	0.082	0.022	0.033	0.024	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Pesticider, BAM							AK78 - LC/MS/MS
4-OPP, (4-Chlorprop)	1.1	2.4	1.1	1.3	1.2	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
4-chlor-2-methylphenol	0.13	0.18	0.16	0.20	0.22	µg/l	AK158 - GC/MS
Atrazin	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	0.084	0.093	0.073	0.068	0.068	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Chloridazon	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Desphenyl-chloridazon	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Dichlobenil	0.013	0.022	0.014	0.018	0.020	µg/l	AK78 - GC/MS
Dichlorprop(2,4-DP)	0.13	0.14	0.10	0.10	0.097	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Diuron	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Mechlorprop(MCPP)	0.83	1.5	0.84	1.0	0.93	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
PFAS-forbindelser, MST 12 stoffer							DIN 38407-42:2011-03
PFBS	<0.0010	<0.0010	<0.0010		<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFBA	0.026	0.020	0.023		0.023	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFPeA	<0.0050	<0.0050	<0.0050		<0.0050	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFHpA	<0.0010	<0.0010	<0.0010		<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFHxS	<0.0010	<0.0010	<0.0010		<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFHxA	0.0065	0.0069	0.0077		0.0073	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFNA	<0.0010	<0.0010	<0.0010		<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFDA	<0.0010	<0.0010	<0.0010		<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFOSA	<0.0010	<0.0010	<0.0010		<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFOS	0.0053	0.0061	0.0053		0.0069	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFOA	0.013	0.014	0.013		0.010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
FTS 6:2	<0.0010	<0.0010	<0.0010		<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
Sum af PFAS, 12 stoffer	0.050		0.049		0.047	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
Bromat	*2	<5.0	<5.0		<5.0	µg/l	CZ SOP D06 02 098
Bromid, Br	*3	273	258		258	µg/l	ICP/MS ISO 17294-2

side 3 af 5

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, medmindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om måleusikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:
≠ Ikke akkrediteret
< mindre end
> Større end



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 406 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

Prøvenr.:	208848/19	208849/19		
Prøve ID:	3.13	4.11		
Kommentar	*1	*1		
Parameter			Enhed	Metode
Nitrit kvælstof, NO ₂ -N	0.0011	<0.0005	mg/l	DS/ISO 15923:2013
Nitrat, NO ₃ -	<0.10	<0.10	mg/l	DS/ISO 15923:2013 + beregning
NVOC	9.9	9.8	mg/l	DS/EN 1484:1997+SM 5310B:2014
HS Chlor. og nedbr.				
Trichlormethan (Chloroform)	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1,1-trichlorethan	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlormethan	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Trichlorethylen	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Tetrachlorethylen	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Chlorethan	0.31	0.28	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Vinylchlorid	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethylen	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
trans-1,2-dichlorethylen	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
cis-1,2-dichlorethylen	0.11	0.10	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dibromethan	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,2-dichlorethan	<0.020	<0.020	µg/l	AK210 - HS GC/MS
1,1-dichlorethan	0.025	0.029	µg/l	AK210 - HS GC/MS
Pesticider, BAM				
4-CP, (4-Chlorprop)	1.2	1.2	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
4-chlor-2-methylphenol	0.20	0.12	µg/l	AK158 - GC/MS
Atrazin	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
2,6-Dichlorbenzamid (BAM)	0.070	0.062	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Chloridazon	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Desphenyl-chloridazon	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Dichlobenil	0.017	0.15	µg/l	AK78 - GC/MS
Dichlorprop(2,4-DP)	0.098	0.096	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Diuron	<0.010	<0.010	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Mechlorprop(MCPP)	0.94	0.90	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
PFAS-forbindelser, MST 12 stoffer				
PFBS	<0.0010	<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFBA	0.026	0.020	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFPeA	<0.0050	<0.0050	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFHpA	<0.0010	<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFHxS	<0.0010	<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFHxA	0.0058	0.0068	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFNA	<0.0010	<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFDA	<0.0010	<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFOSA	<0.0010	<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFOS	0.0085	0.0026	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
PFOA	0.011	0.011	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
FTS 6:2	<0.0010	<0.0010	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
Sum af PFAS, 12 stoffer	0.051	0.041	µg/l	DIN 38407-42:2011-03
Bromat	*2	<5.0	µg/l	CZ SOP D06 02 098
Bromid, Br	*3	264	258	µg/l ICP/MS ISO 17294-2

side 4 af 5

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, med mindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om målesikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:
≠ Ikke akkrediteret
< mindre end
I.p.: Ikke påvist
> Større end



DANAK
TEST Reg. nr. 361

ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 406 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

Kommentar

- *1 Ingen kommentar
- *2 # Underleverandør: ALS Scandinavia AB, SWEDAC 2030
- *3 Underleverandør: ALS Czech Republic s.r.o, CAI L1163

Majken Maria Løyché

Majken Løyché

side 5 af 5

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, med mindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om målesikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:

≠ Ikke akkrediteret
<: mindre end
>: Større end

i.p.: Ikke påvist

Bilag 1.4 SK Forsyning



ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 408 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

DGE Miljø- og ingeniørfirma a/s
Literbuen 13
2740 Skovlunde
Att.: Martin Bymose

Udskrevet: 19-05-2020
Version: 1
Modtaget: 06-05-2020
Analyseperiode: 06-05-2020 -
19-05-2020
Ordrenr.: 572428

Sagsnavn: 18-0862
Lokalitet: Nordre Vandværk
Udtaget: 05-05-2020
Prøvetype: Vand
Prøvetager: DGE/MASC
Kunde: Insatech A/S, Næstvedvej 73C, 4720 Præstø, Att. Mathias Schouw

Prøvenr.:	101868/20	101869/20	101870/20	101871/20	101872/20		
Prøve ID:	1	2	3	4	5		
Kommentar	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Ammonium+ammoniak, NH4+	0.37	0.39	0.39	0.40	0.42	mg/l	SM 17udg. 4500-NH3
Nitrit, NO2-	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	mg/l	DS/ISO 15923-1:2013
Nitrat, NO3-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	mg/l	DS/ISO 15923-1:2013 + beregning
Total kvælstof, N	0.52	0.39	0.44	0.39	0.40	mg/l	DS/EN ISO 11905-1:1998
Chlorid, Cl-	67	66	66	67	65	mg/l	DS/ISO 15923-1:2013
Hydrogencarbonat, HCO3-	350	350	360	350	350	mg/l	DS/EN ISO 9963-1:1996
Mangan, Mn	0.090	0.082	0.086	0.085	0.090	mg/l	DS/EN ISO 11885:2009
Jern, Fe	2.1	1.9	2.0	2.1	2.4	mg/l	DS/EN ISO 11885:2009
Desphenyl-chloridazon	0.14	0.10	0.060	0.11	0.092	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Prøvenr.:	101873/20	101874/20	101875/20	101876/20	101877/20		
Prøve ID:	6	7	8	9	10		
Kommentar	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Ammonium+ammoniak, NH4+	0.40	0.43	0.38	0.41	0.45	mg/l	SM 17udg. 4500-NH3
Nitrit, NO2-	0.0012	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010	mg/l	DS/ISO 15923-1:2013
Nitrat, NO3-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	mg/l	DS/ISO 15923-1:2013 + beregning
Total kvælstof, N	0.40	0.41	0.38	0.39	0.42	mg/l	DS/EN ISO 11905-1:1998
Chlorid, Cl-	67	65	63	64	65	mg/l	DS/ISO 15923-1:2013
Hydrogencarbonat, HCO3-	350	370	340	350	340	mg/l	DS/EN ISO 9963-1:1996
Mangan, Mn	0.091	0.092	0.094	0.094	0.097	mg/l	DS/EN ISO 11885:2009
Jern, Fe	2.2	2.3	2.4	2.3	2.3	mg/l	DS/EN ISO 11885:2009
Desphenyl-chloridazon	0.056	0.057	0.13	0.034	0.022	µg/l	AK78 - LC/MS/MS

side 1 af 2

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, med mindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om måleusikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:
Ikke akkrediteret
< mindre end
I.p.: Ikke påvist
> Større end



DANAK
TEST Reg. nr. 361

ALS Denmark A/S
Bakkegårdsvej 406 A
DK-3050 Humlebæk
Telefon: +45 4925 0770
www.alsglobal.dk

ANALYSERAPPORT

Prøvenr.:	101878/20	101879/20	101880/20	101881/20	101882/20		
Prøve ID:	11	12	13	14	15		
Kommentar	*1	*1	*1	*1	*1		
Parameter						Enhed	Metode
Ammonium+ammoniak, NH4+	0.42	0.42	0.43	0.43	0.37	mg/l	SM 17udg. 4500-NH3
Nitrit, NO2-	<0.0010	<0.0010	0.0013	<0.0010	<0.0010	mg/l	DS/ISO 15923-1:2013
Nitrat, NO3-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	mg/l	DS/ISO 15923-1:2013 + beregning
Total kvælstof, N	0.38	0.38	0.40	0.40	0.38	mg/l	DS/EN ISO 11905-1:1998
Chlorid, Cl-	62	62	63	63	63	mg/l	DS/ISO 15923-1:2013
Hydrogencarbonat, HCO3-	350	350	360	360	340	mg/l	DS/EN ISO 9963-1:1996
Mangan, Mn	0.095	0.096	0.097	0.095	0.092	mg/l	DS/EN ISO 11885:2009
Jern, Fe	2.3	2.3	2.6	2.3	2.4	mg/l	DS/EN ISO 11885:2009
Desphenyl-chloridazon	0.014	0.026	0.014	<0.010	0.12	µg/l	AK78 - LC/MS/MS
Kommentar							

*1 Ingen kommentar

Ditte T. E. Strecker

Ditte Therese Ekman Strecker

side 2 af 2

Laboratoriet er akkrediteret af DANAK. Analyseresultaterne gælder kun for de(n) analyserede prøve(r).
Analyserapporten må kun gengives i sin helhed, med mindre skriftlig godkendelse foreligger.
Oplysninger om måleusikkerhed findes på www.alsglobal.dk

Tegnforklaring:
= Ikke akkrediteret
< mindre end
i.p.: Ikke påvist
> Større end

Fjernelse af pesticider og chlorerede opløsningsmidler i vand - Med UV-H₂O₂ AOP

I projektet er der udviklet en ny yderst nøjagtig vandbehandlingsform – døbt REMUVE – baseret på UV-H₂O₂ avanceret oxidations-proces (AOP).

Der er opbygget et fuldskala mobilt testanlæg til test af processen på pesticidrester og chlorerede opløsningsmidler hos vandværker og ved afværgeboringer. Specielt er der testet for pesticidresterne N,N-dimethylsulfamid (DMS), desphenylchloridazon (DPC), 2,6-dichlorbenzamid (BAM) og CGA 108906, som alle er vist effektivt nedbrudt ved REMUVE-processen. Der er fundet klare sammenhænge mellem doseringen af energi og H₂O₂ i forhold til nedbrydningen, hvilket understreger vigtigheden af en yderst nøjagtig teknologi.

Chlorerede opløsningsmidler som tetrachlorethylen (PCE), trichlorethylen (TCE) og vinylchlorid (VC) er ligeledes undersøgt, og der er fundet effektiv og hurtig nedbrydning af disse stoffer.

Det er observeret, at det er vigtigt, at denne type behandling kontrolleres nøje, så eventuelle intermediatprodukter viderenedbrydes og mineraliseres fuldt. Der er fundet stor vigtighed af vandets renhed for hydroxyl-scavangers, hvor effektiviteten er højere jo højere vandets klarhed (UVT) er og jo lavere indholdet af fx jern og mangan er.

På baggrund af de udførte test er det nu muligt at estimere anlægsstørrelse til behandling for de undersøgte forurenende stoffer ud fra data omkring ønsket nedbrydning, flow og vandets UVT-værdi samt indhold af hydroxyl-scavangers.

Der er lavet økonomiske overvejelser for udgiften ved behandling af chlorerede opløsningsmidler og pesticidrester for flere cases. Udgifterne er fundet så lave som 0,56 kr/m³ behandlet vand, og teknologien anses for at kunne indgå som både kosteffektiv og behandlingseffektiv videregående vandbehandling.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk