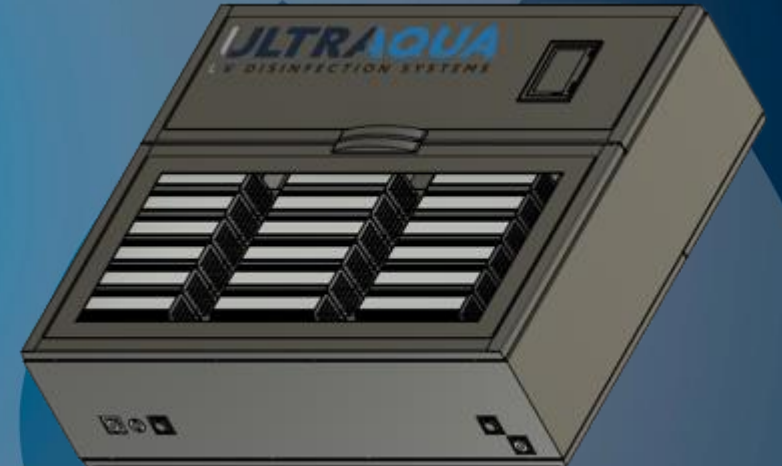
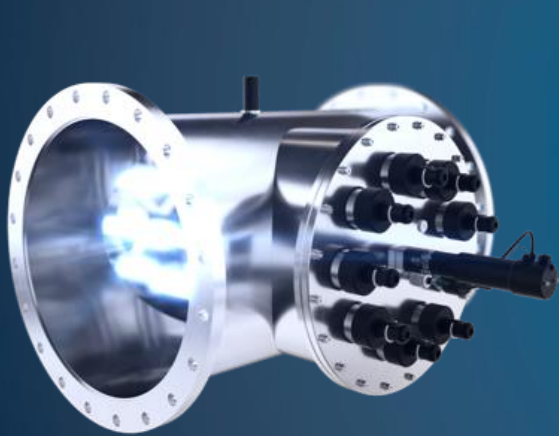


# Kemikaliefri Vakuum-UV baseret avanceret oxidation til fjernelse af miljøfremmede stoffer i vand– muligheder og udfordringer:

Eksempler fra drikkevand og spildevand, og indledende data på PFAS nedbrydning(ARP)



Morten Møller Klausen, MSc. Forskningschef. Ultraqua A/S

# INTRODUKTION - ULTRAAQUA

- Forskningsbaseret vandteknologivirksomhed
  - Fokus på UV baseret Desinfektions- og Oxidationsteknologi samt ozonteknologi
- Grundlagt i 1996 af to PhD studerende fra AAU
- Mere end **10.000** UV systemer i drift i mere end **120** lande verden over
- Hovedkvarter & Produktion i Aalborg (67 ansatte)
- Deltager løbende i nationalt eller internationalt støttede R&D projekter
- Patenteret teknologi & Valideret performance
- Hovedmarkeder for UV teknologi
  - Akvakultur
  - Spildevand
  - Drikkevand
  - Svømmebade
  - Øvrig industri (bla. Carlsberg, Vakuum-UV)



AMS



CE

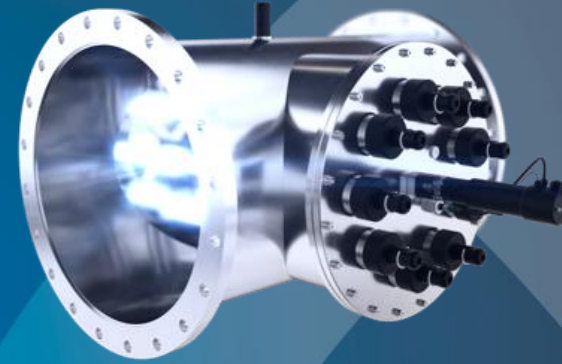
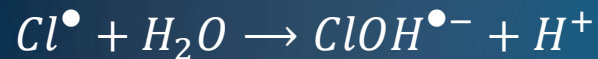
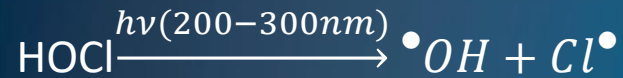
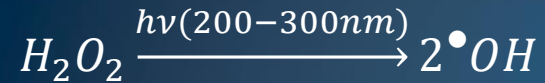


**ULTRAAQUA**  
UV DISINFECTION SYSTEMS



# AVANCEREDE OXIDATIONS PROCESSER (AOP)

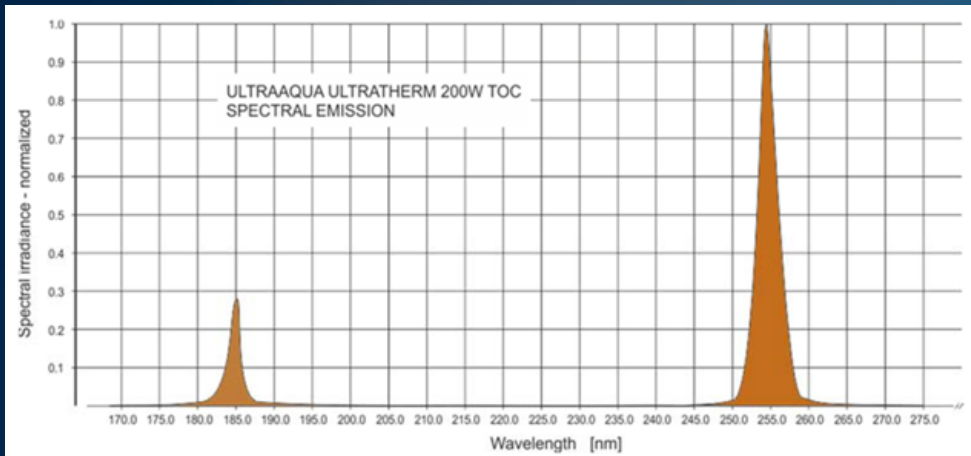
- Generel betegnelse for kemiske eller fotokemiske reaktionssystemer der genererer OH-radikaler ( $\bullet\text{OH}$ ) i vand med henblik på nedbrydning af miljøfremmede stoffer
- De mest udbredte AOP processer er MP-UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$ ; MP/LP-UV/HOCl



## Ulemper ved de mest udbredte AOP processer

- Brintoverilte og klor har relativt lave molære absorptionskoefficienter af UV-lys i hele området fra 200-300nm
  - Behov for høj oxidant koncentration og/eller høj UV-lysintensitet
  - Behov for teknologi til fjernelse af oxidant overskud (aktiv kul eller sulfid dosering)
  - Oxidanterne reagerer selv med OH-radikalet og for stoffer med lav reaktivitet med OH-radikalet bliver processen selv-inhiberende
  - Stor andel af MP-UV-lyset absorberes af andre komponenter i vand, eks. nitrat under dannelse af eksempelvis nitrit

# Vakuum-UV som potentiel AOP til pesticidfjernelse i drikkevand



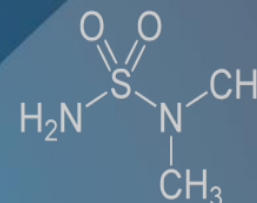
## Ultrarent vand



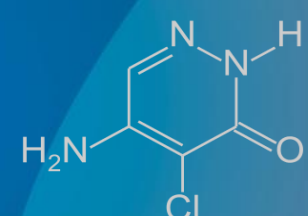
56 elementære kædereaktioner

VUDP støttet projekt med:

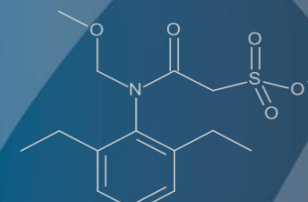
- HOFOR A/S, NOVAFOS A/S, ULTRAAQUA A/S, DTU SUSTAIN



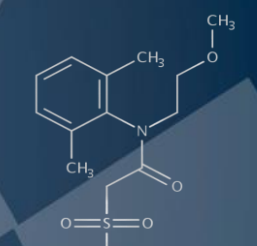
DMS



DPC



A-ESA



D-ESA

Pesticidrest	$k_{OH}$ [ $M^{-1}s^{-1}$ ]
DMS	$1,5 \times 10^9$
DPC	NA
Alachlor ESA	$7 \times 10^9$
Dimethachlor ESA	NA

# Vakuum-UV som potentiel AOP til pesticidfjernelse i drikkevand

## Drikkevand



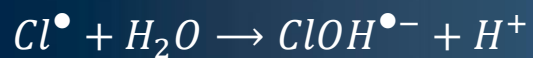
24 elementære kædereaktioner



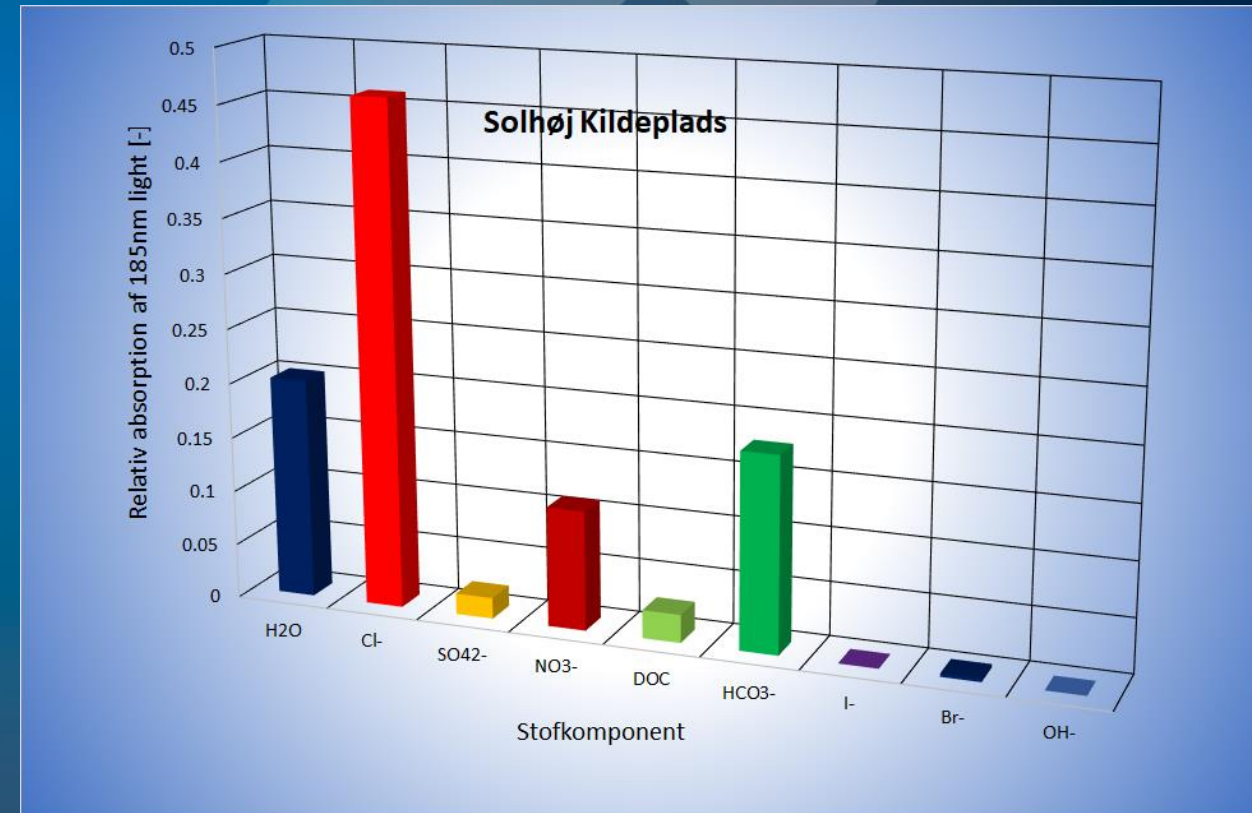
60 elementære kædereaktioner



21 elementære kædereaktioner



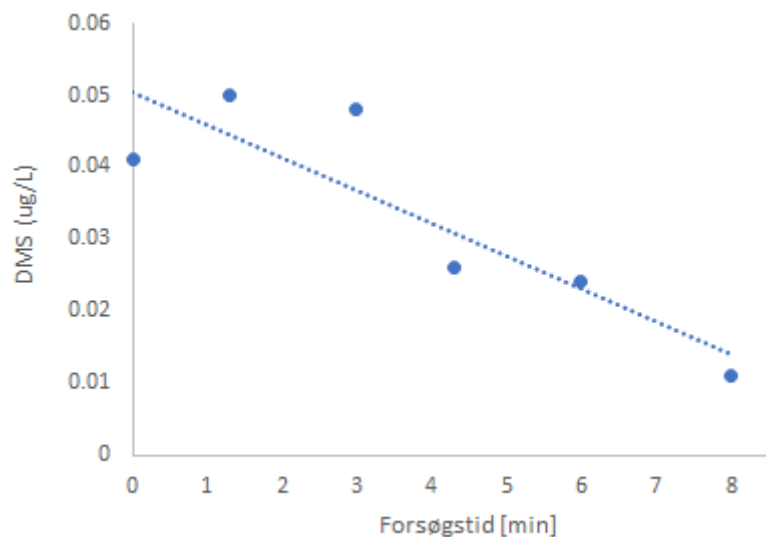
53 elementære kædereaktioner



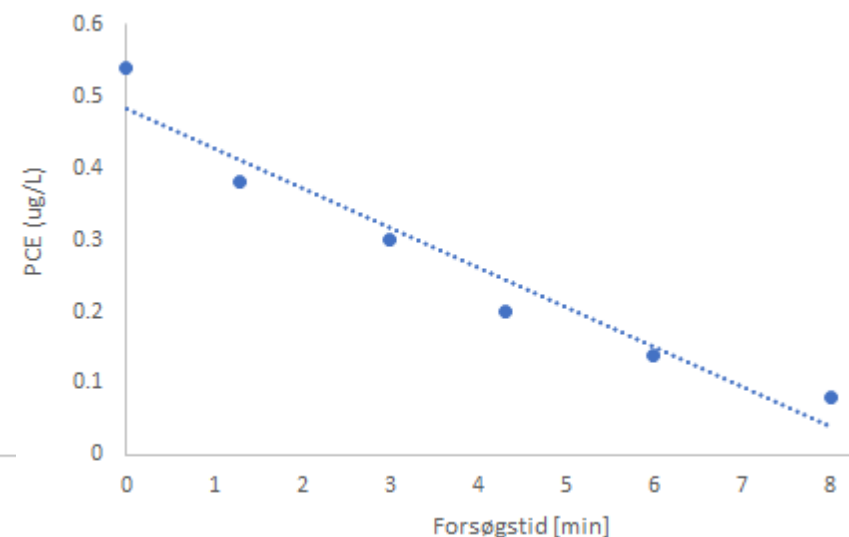
# Vakuum-UV som potentiel AOP til pesticidfjernelse i drikkevand



N,N-Dimethylsulfamide (DMS)



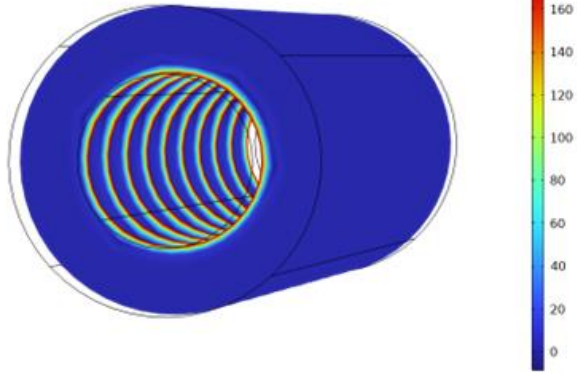
Perchloroethylene (PCE)



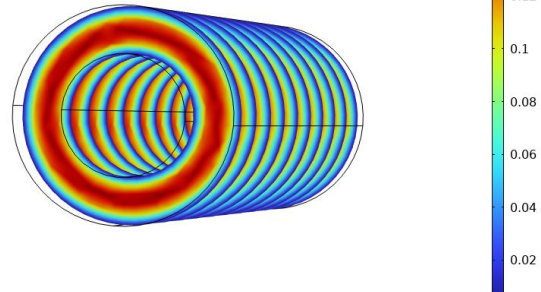
Forsøgstid	NDEA	NDMA	NDPA	NDBA	NMEA	NMOR	NPIP	NPYR
0	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 10
1.3	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 10
3	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 10
4.3	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 10
6	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 10
8	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 10

# Vakuum-UV som potentiel AOP til pesticidfjernelse i drikkevand

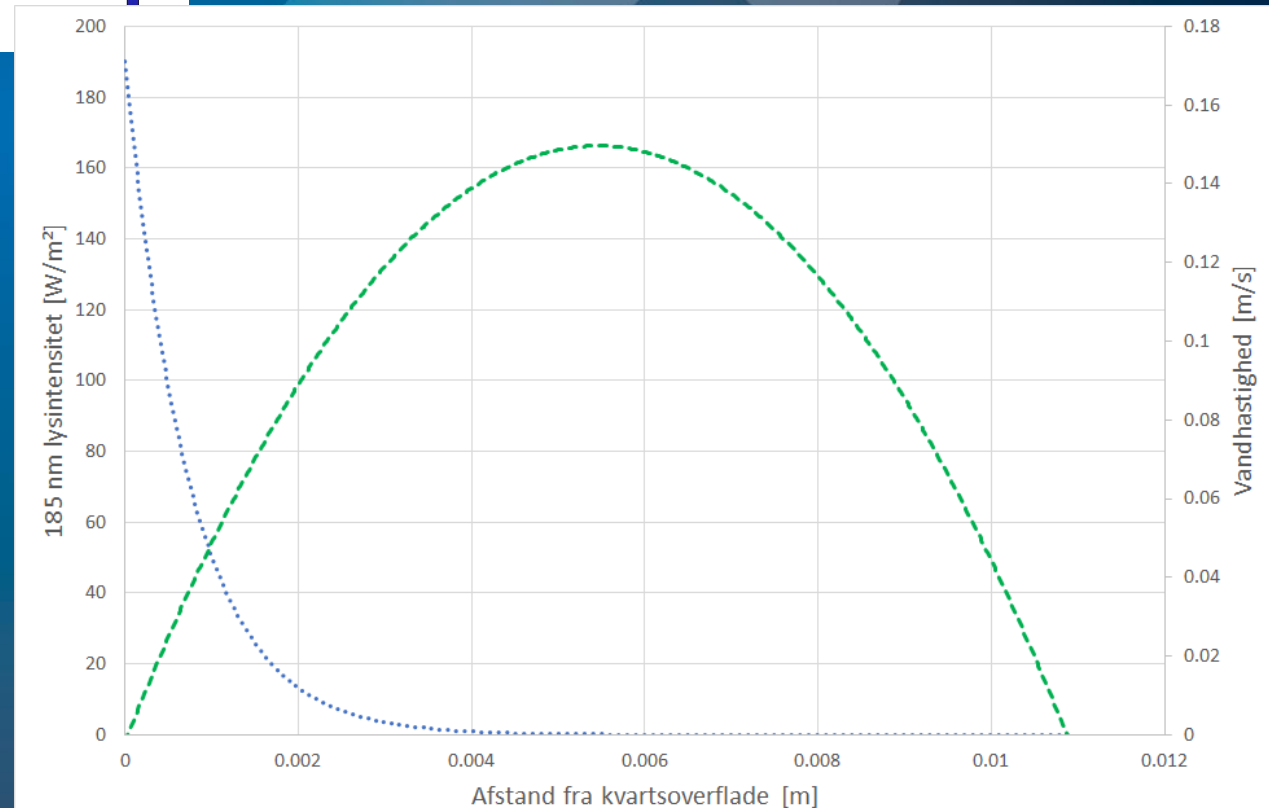
185 nm Lysintensitet



Vandhastighed

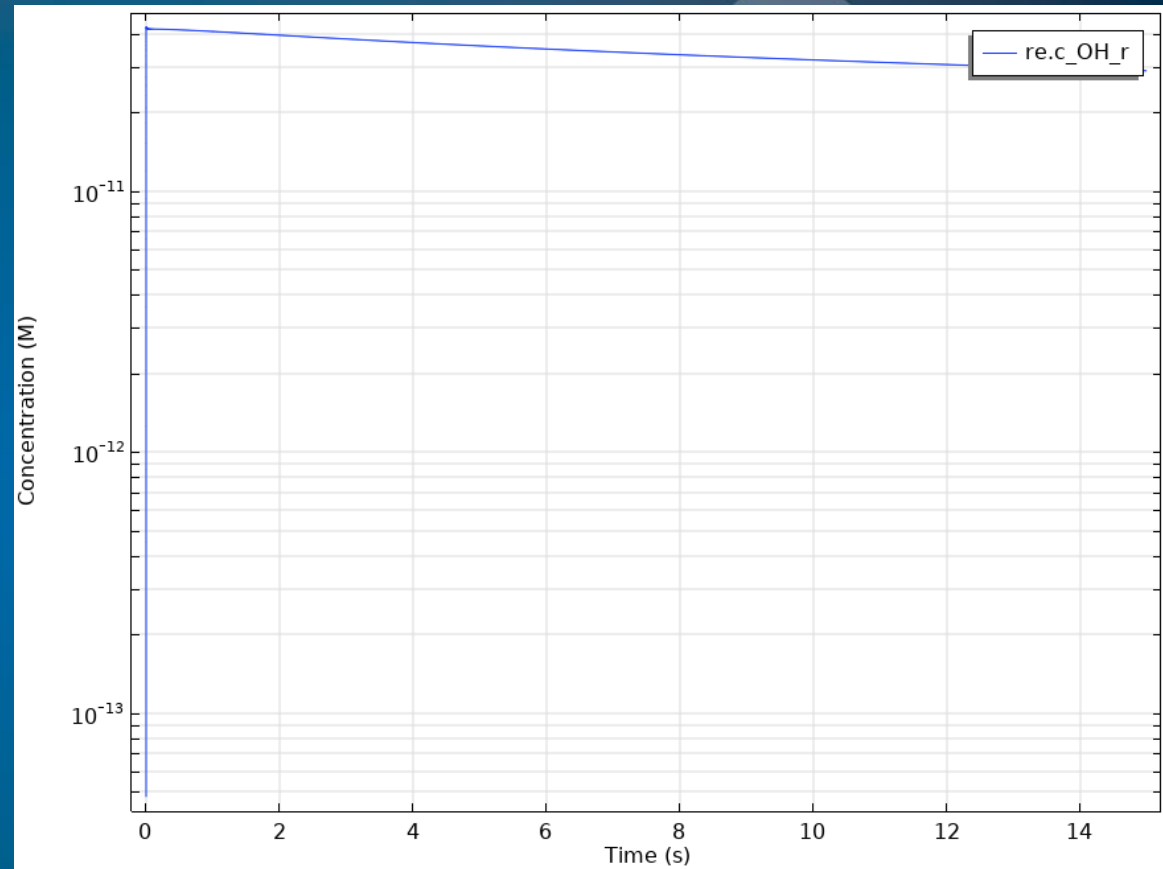
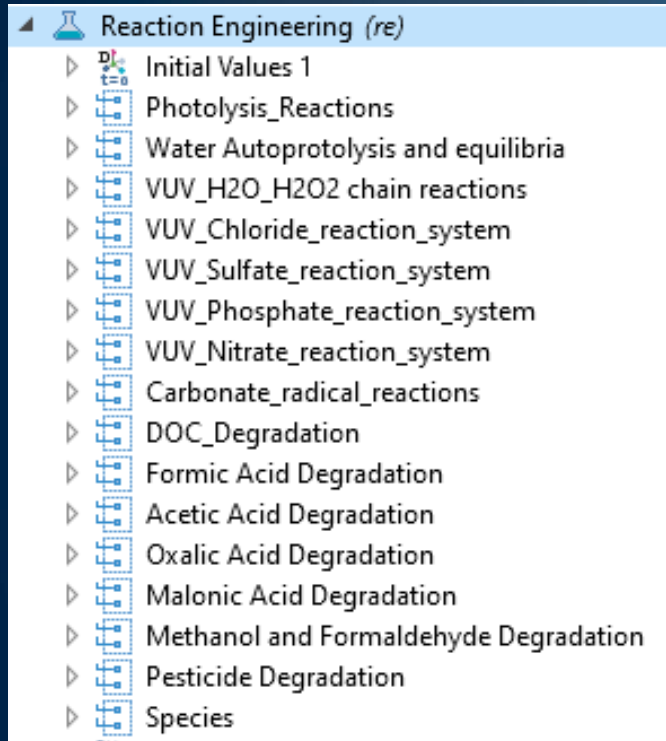


- En stor del af vandet passerer reaktoren i områder hvor der er meget lidt lys hvilket er en ulempe ved VUV-teknologi
- For at optimere performance/energieffektivitet skal en VUV reaktor hydraulisk optimeres
- Den vægtede volumengennemsnitlige 185nm lysintensitet - dvs. den intensitet hele vandvolumet i reaktoren i gennemsnit oplever i reaktoren er modelleret til **9.9 W/m<sup>2</sup>**



# Vakuum-UV som potentiel AOP til pesticidfjernelse i drikkevand

VUV-AOP reaktionsmodel med mere end 300 koblede reaktioner, udviklet i modelleringsværktøjet COMSOL MULTIPHYSICS

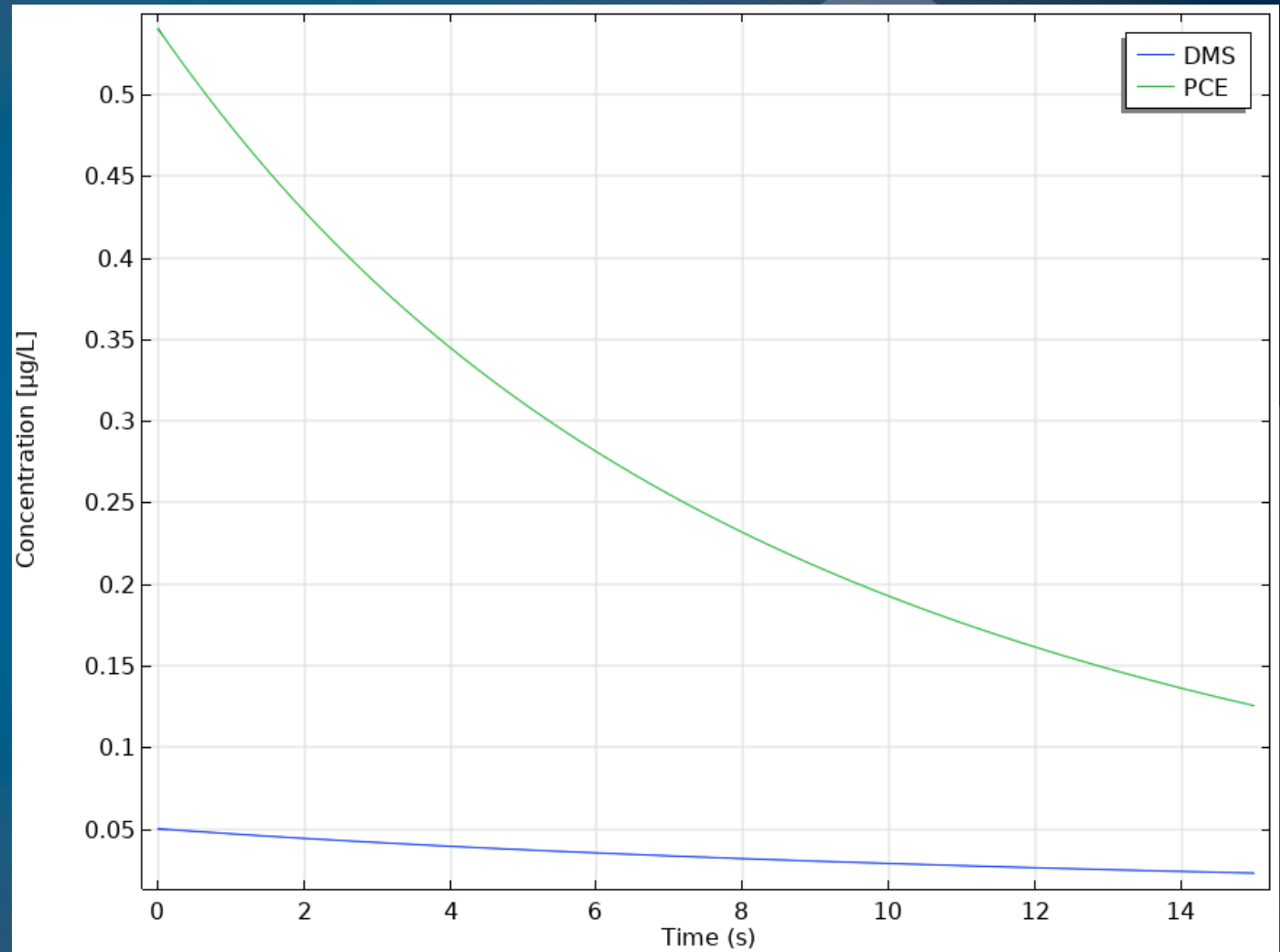


Gennemsnitlig OH-radikal koncentration på  $2,5 \times 10^{-11}$  M



# Vakuum-UV som potentiel AOP til pesticidfjernelse i drikkevand

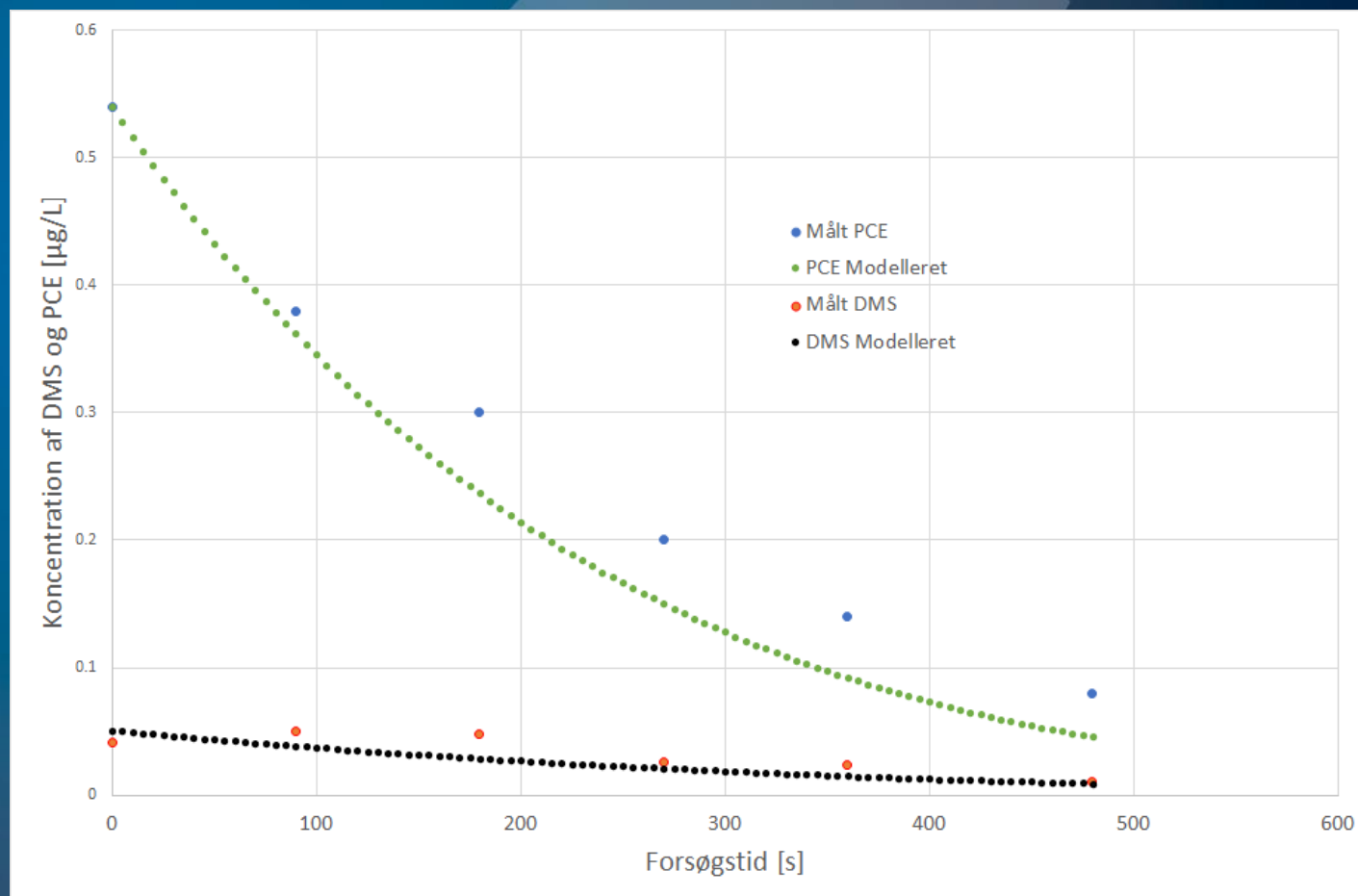
- PCE og DMS reduceres med hhv. 76% og 54% per passage af VUV-reaktoren
- Halveringstider på hhv. 6.4 og 13.2 sekunder
- Ratekonstanter for VUV reaktorens nedbrydning af PCE og DMS i på hhv.  $0.11$  og  $0.05 \text{ s}^{-1}$



# Vakuum-UV som potentiel AOP til pesticidfjernelse i drikkevand

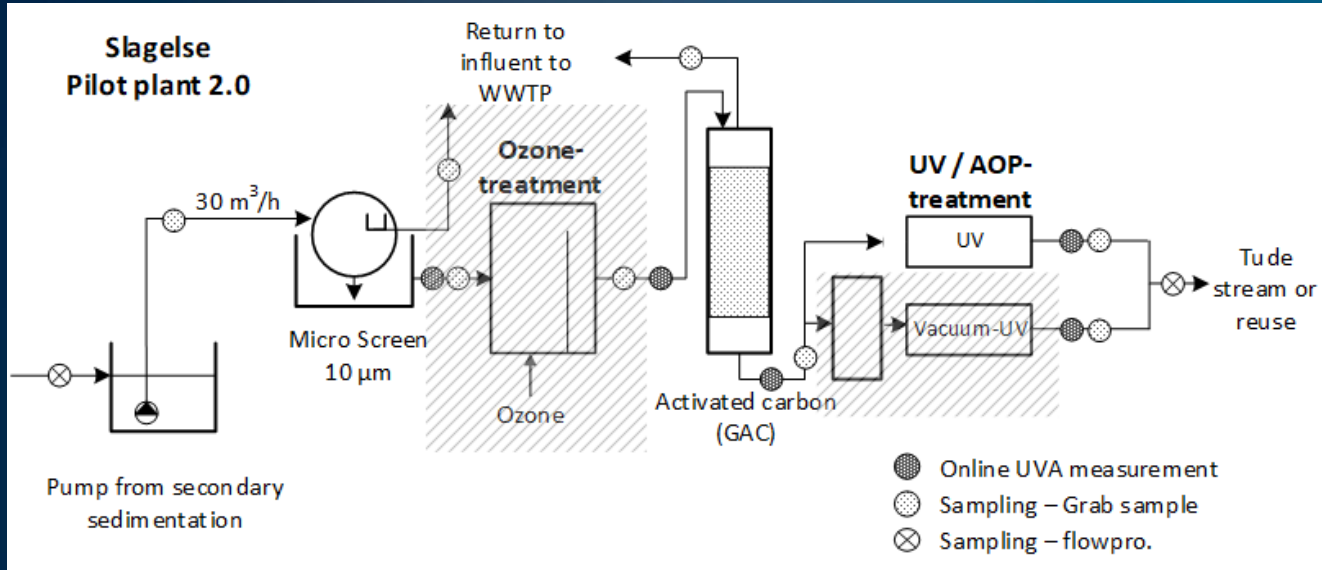


- Ved anvendelse af VUV reaktorens ratekonstanter for PCE og DMS nedbrydning i en numerisk model for forsøgstillingen kan vi relativt præcist beskrive den observerede PCE og DMS nedbrydning
- ⇒ Den elementære VUV-AOP reaktionsmodel giver en fornuftig beskrivelse af hvad der sker i reaktoren og kan dermed bruges til opskalering som er næste skridt



# Vakuum-UV som potentiel AOP til lægemiddelfjernelse i spildevand

MUDP OxiTreat: Storskala-udvikling af ozon/AOP til fjernelse af lægemidler og andre miljøfremmede stoffer på renseanlæg



**envafors**  
energi · vand · forsyning

- Fokus på 37 lægemiddelstoffer
- Target stoffer der viste gennembrud i tidligere projekt med GAC alene:
  - Diclofenac
  - Tramadol
  - Azithromycin
  - Sertralin
  - Venlafaxin

**ULTRAQUA**  
UV DISINFECTION SYSTEMS

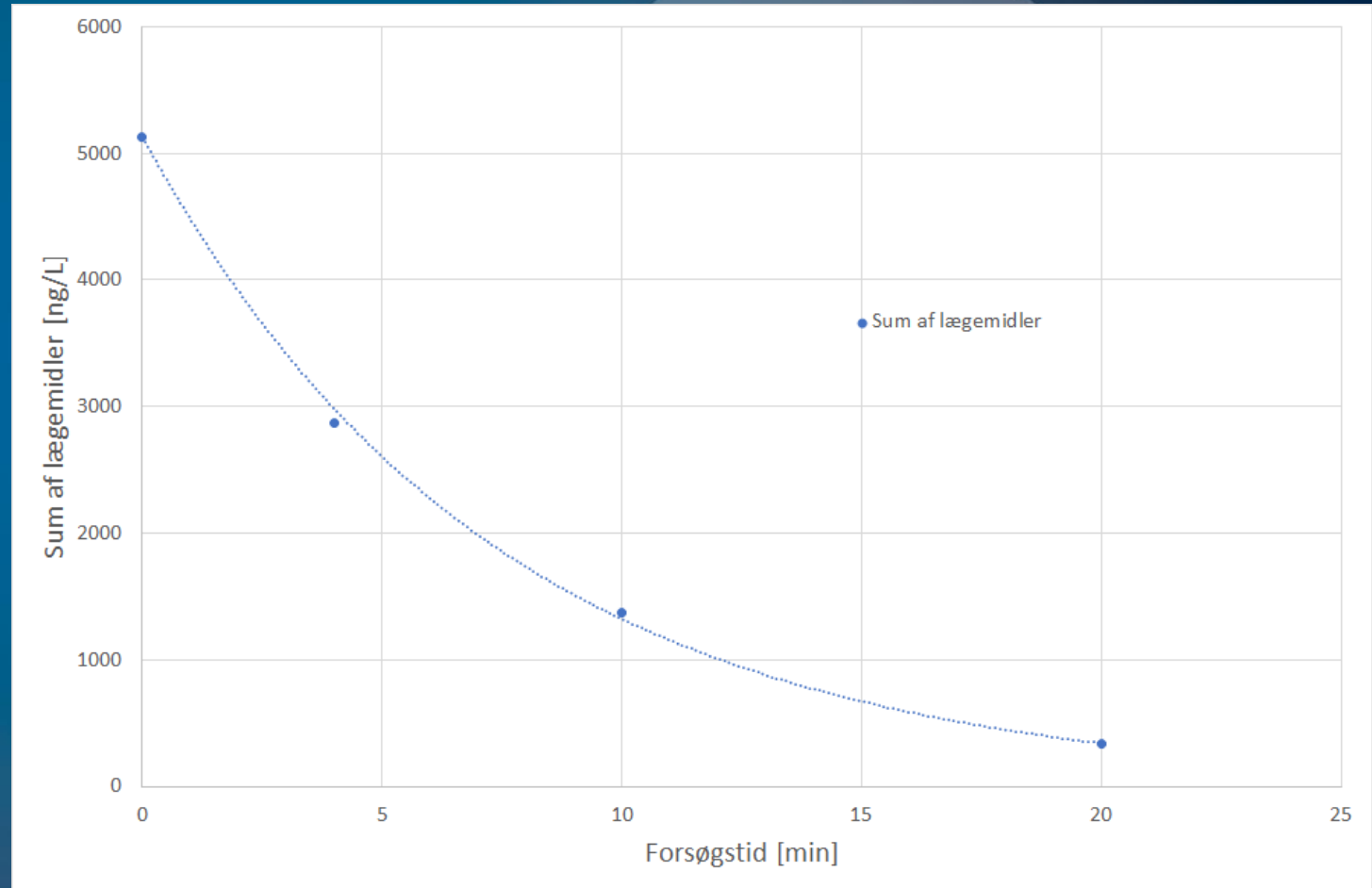
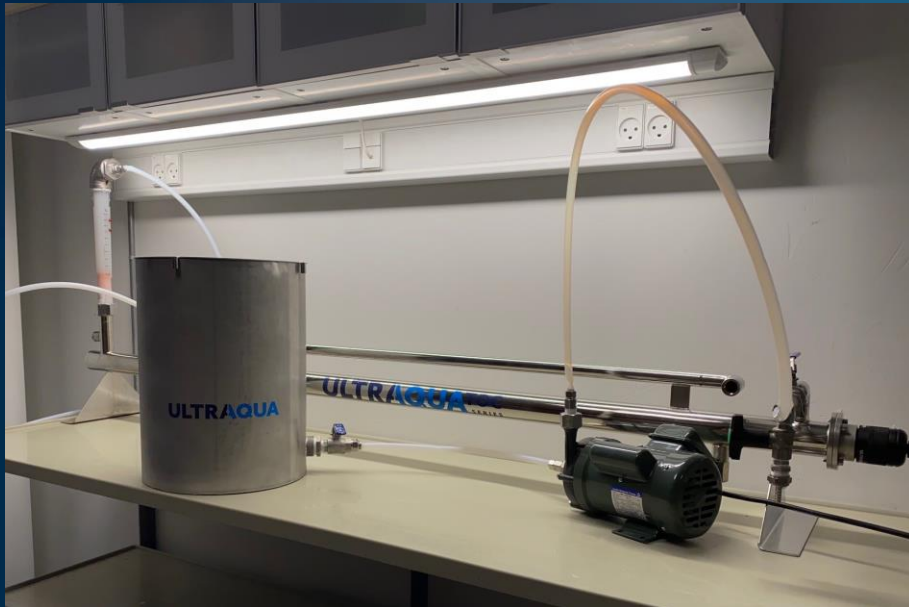
# Vakuum-UV som potentiel AOP til lægemiddelfjernelse i spildevand

MUDP OxiTreat: Storskala-udvikling af ozon/AOP til fjernelse af lægemidler og andre miljøfremmede stoffer på renselanlæg



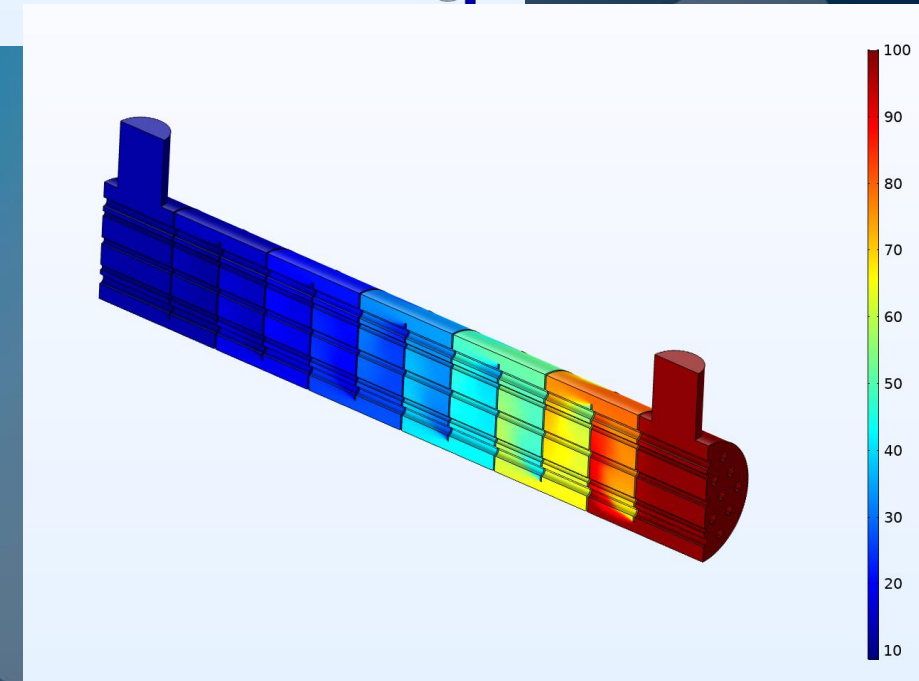
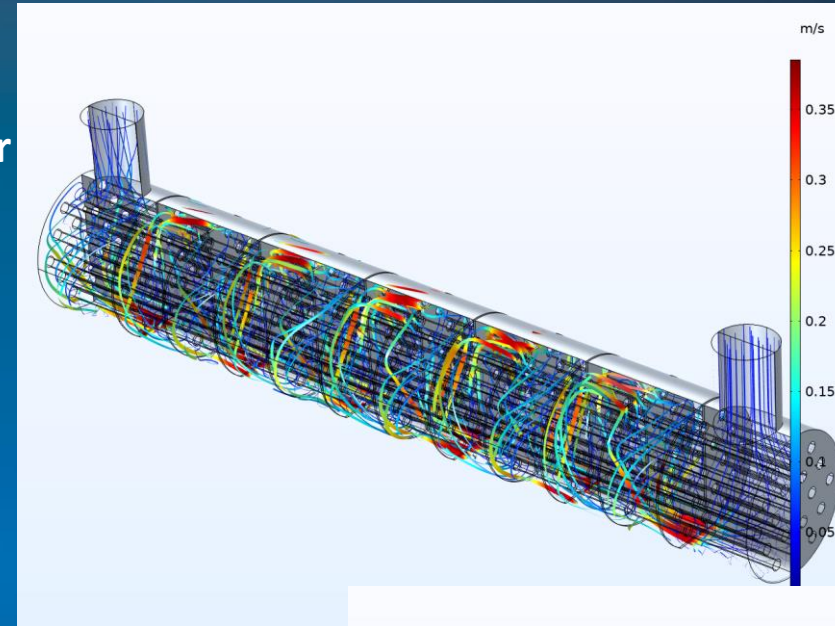
# Vakuum-UV som potentiel AOP til lægemiddelfjernelse i spildevand

- Indledende laboratorietest i samme VUV forsøgssetup som ved drikkevandsforsøget

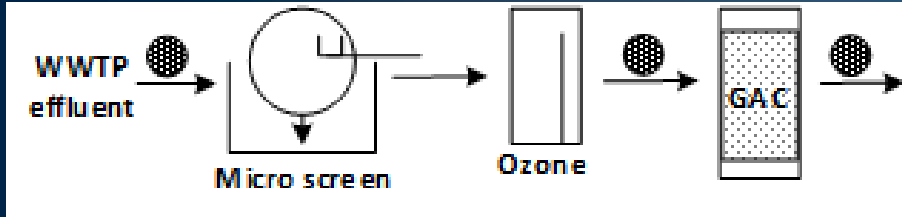


# Vakuum-UV som potentiel AOP til lægemiddelfjernelse i spildevand

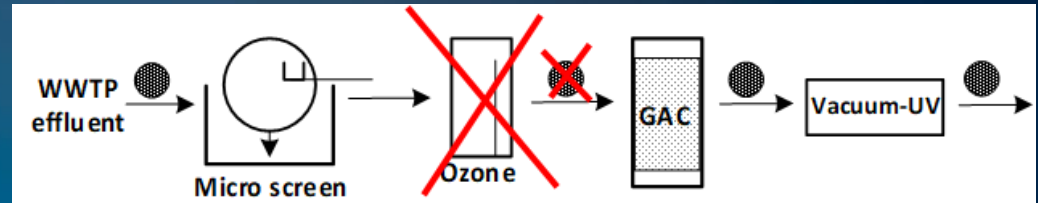
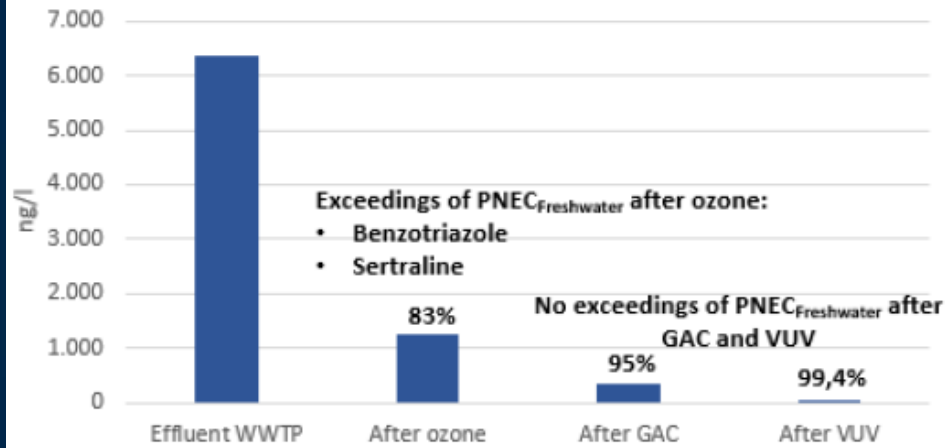
- Nedbrydningsdata for Tramadol/Venlafaxin fra VUV laboratorietest er anvendt til opskalering til pilotskala reaktor
- Opskalering skal sikre at udløbskoncentrationer er under  $PNEC_{\text{Freshwater}}$
- Iterativ opskalering hvor vi har modelleret lysintensitets- og flowfordelingen for en række reaktordesigns og koblet den med en stoftransport model med en stoffjernelse der 185nm lysintensitetsafhængig
- Design energiforbrug 1.8 kWh/m<sup>3</sup> - sammenligneligt med eller lidt højere end O<sub>3</sub>+Kul tilsammen



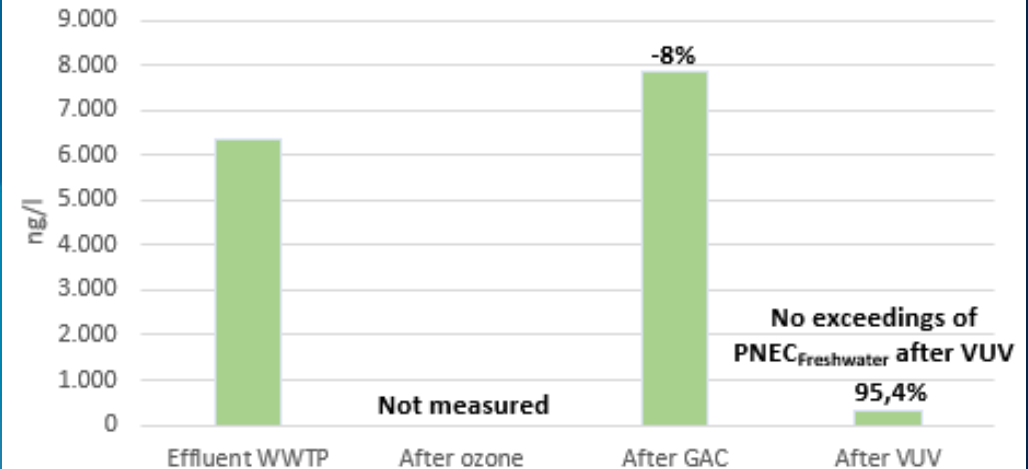
# Vakuump-UV som potentiel AOP til lægemiddelfjernelse i spildevand



Removal of EU Urban Dir. substances  
Ozone dose: Medium



Removal of EU Urban Dir. substances  
Ozone dose: 0 mg/mg DOC



- Ozon-GAC kan sikre en effektiv fjernelse af lægemidler (>95%) – og uden overskridelser af PNEC.
- Energiforbrug inkl. Ilt, O<sub>3</sub> og GAC produktion 1.45 kWh/m<sup>3</sup>
- Bromatdannelse kan være kritisk

- VUV kan alene sikre fjernelse af lægemidler (>95%) – og uden overskridelser af PNEC og Bromatdannelse
- Energiforbrug 1.8 kWh/m<sup>3</sup>
- Undersøgelse af optimering af energiforbrug er i gang.

# PFOA-destruktion med VUV ARP – første resultater

MUDP-for- og hovedprojekt: PFASA- PFAS-rensningsteknologier baseret på separation og avancerede reduktionsprocesser (ARP)

- Forsøg: PFOA 4,5 µg/l i 30 liter vand
- Tilsætning af reaktanter, pH-justering samt iltfrit miljø
- Recirkulering over VUV lampe

*Figurer endnu ikke rapporteret og er derfor taget ud*



- Intet PFOA tilbage efter 1 time – kun 14 ng PFHpA/l. Efter 3 timer intet PFAS-22
- Fluorid-måling, efter opkoncentrering ved inddampning, viste 116-178% defluorering
- Total organisk fluor (AOF) viste 3,7 µg/l (0 h) og <1 µg/l (5 h)



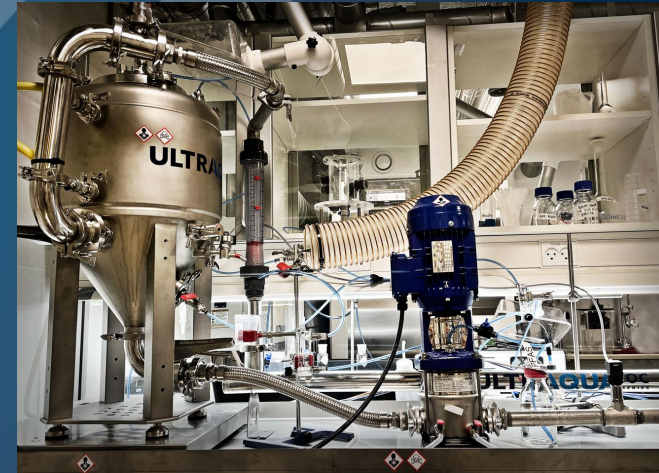
# PFAS-destruktion af drænvand fra Brandøvelsesplads fra Aalborg lufthavn Sigteøvelsespladsen

- Forsøg: 30 liter drænvand med 5,5 µg PFAS-22/l



*Figurer endnu ikke rapporteret og er derfor taget ud*

- Stort set alt andet end 6:2 FTS er fjernet efter 1 time
- Alt 6:2 FTS er fjernet efter 5 timer
- Fluorid-måling ikke mulig, da drænvandet fra start indeholdt 0,4 mg/l



# Vakuum-UV som potentiel AOP til drikkevand og spildevand

## Vigtigste konklusioner/budskaber

- Vakuum-UV er en simpel AOP teknologi med potentiale til nedbrydning af såvel pesticider i drikkevand som lægemidler i spildevand uden tilsætning af kemikalier
- PFAS kan defluorerer ved brug af vakuum-UV under iltfrie forhold
- Foreløbige resultater indikerer at dannelsen af biprodukter er mindre sammenholdt med kendte AOP teknologier
- I en relativt simpel vandmatrice som drikkevand er det muligt, relativt præcist, at modellere de elementære VUV radikalreaktioner og forudsige stofnedbrydningen og anvende dette ved reaktordesign
- Vakuum-UV teknologien har nogle iboende ulemper i forhold til lysudbredelse og vandstrømning der bevirker et relativt højt energiforbrug der dog kan optimeres med passende reaktordesign



# TAK FOR JERES TID



Morten Møller Klausen – [mmk@ultraqua.com](mailto:mmk@ultraqua.com)

**ULTRAQUA**  
UV DISINFECTION SYSTEMS