



Jes la Cour Jansen



Dato 23.06.2022
Ansvarlig Jes la Cour Jansen
Sags ID. Arbejdspakke 1

Notat om mulige designkriterier for anlæg, der kan reducere bromat i spildevand, som efter ozonering har et for højt indhold af bromat

Baggrund og mål med notatet

I forbindelse med etablering af projektet *Demonstration af metoder til reduktion af bromat produceret ved ozonering af spildevand med henblik på reduktion af miljøfremmede stoffer* blev projektgruppen opmærksom på at der på Lunds Universitet (LU) var en forsker - Per Falås, der i en periode havde arbejdet med problemstillingen. Per Falås har arbejdet med reduktion af lægemidler både som Ph.d. studerende i Lund og efterfølgende som forsker ved EAWAG i Schweiz, der kan anses for førende indenfor dette forskningsområde. Gruppen i Lund bestående af Per Falås og Docent Michael Cimbritz blev kontaktet og indvilgede i at indgå i projektet arbejdspakke 1 og 2. Hovedindsatsen skulle være at bidrage med designinformationer etableret i laboratoriet idet LU har udviklet testteknikker både til karakterisering af bromatdannelsen ved ozonering og til bromatreduktion i biofilmssystemer og i aktiv slam. Dette kunne så både bidrage til bedømmelsen af mulighederne for at etablere bromatreduktion på Kalundborg Centralrenseanlæg; men også til mere alment at fremtage designinformationer til bredere anvendelse. Derudover vil gruppen tage initiativ til yderligere international publicering om fuldskalaerfaringerne, hvis resultaterne herfra motiverer det. Denne type publicering er ikke en del af VUDP bevillingen. Finansieringen af gruppen sker gennem en svensk projektbevilling således at gruppen deltager uden omkostninger for projektet.

En beskrivelse af bromatdannelsen ved ozonering kan findes i *Notat om hvilke forhold der betinger bromatdannelse ved ozonering af bromidholdigt spildevand og hvordan dannelsen kan begrænses eller bromaten fjernes*, (la Cour Jansen, 2021).

Formålet med dette notat er at sammenfatte de resultater af designmæssig betydning, der er opnået i Lund indtil nu. Disse resultater skal benyttes til at evaluere potentialerne for bromatfjernelse på MBBR-anlægget i Kalundborg og senere bidrage til den brugermanual, der er projektets hovedpublikation.

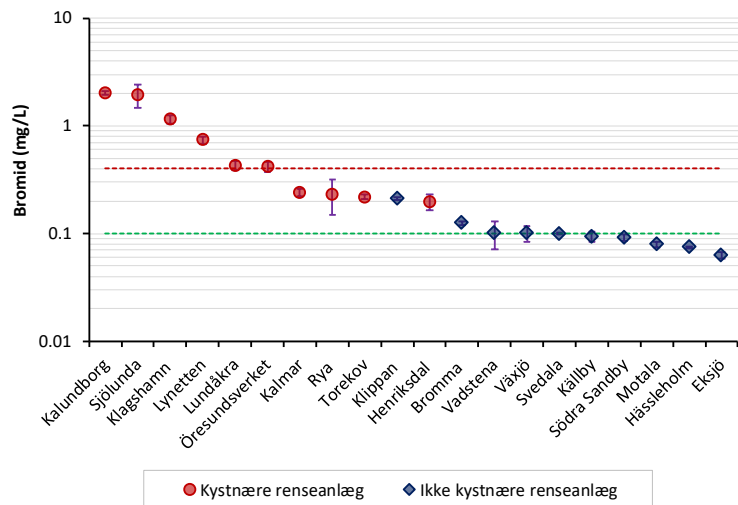
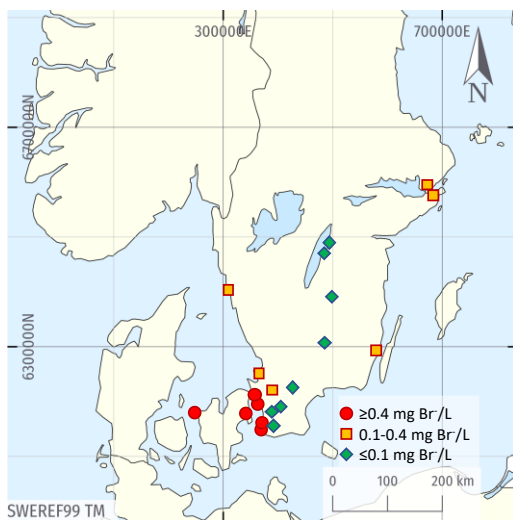
Notatet er udarbejdet af Jes la Cour Jansen, Per Falås fra Lunds Universitet og Kasper Sølvsten Rehn fra Kalundborg forsyning.

Resultaterne fra arbejdet i Lund er indtil nu præsenteret i en internationalt publiceret artikel (Falås m.fl., 2022), i 2 eksamensprojekter, (Dell, 2020) og (Fransson, 2021) samt i et conferenceindlæg (Falås m. fl., 2021). Der henvises til disse publikationer for nærmere detaljer om forsøgene og deres gennemførelse. Forsøgene er de første af denne type publiceret internationalt således at der er tale om etablering af det helt basale grundlag for at vurdere biologisk bromatfjernelse som potentiel metode til at reducere bromatindholdet efter ozonering af bromidholdigt spildevand.

Notatet er struktureret således at der først gives et overblik over hvilke anlæg som især skal være opmærksomme på potentielle problemer med bromatdannelse ved ozonering. Dernæst præsenteres baggrunden for ideen om biologisk bromatfjernelse og de laboratorieforsøg der dokumenterer ideens holdbarhed sammen med de nødvendige procesomstændigheder og proceshastigheder der kan forventes. Endeligt benyttes resultaterne til at beskrive en metode til at bedømme hvilken bromatfjernelse der potentielt kan etableres på det eksisterende efterdenitrifikationsanlæg i Kalundborg.

Anlæg der specielt skal være opmærksomme på potentielle problemer med bromatdannelse ved ozonering

Baggrunden for bromatdannelse ved ozonering af spildevand er beskrevet i Notat om hvilke forhold der betinger bromatdannelse ved ozonering af bromidholdigt spildevand og hvordan dannelsen kan begrænses eller bromaten fjernes og vil ikke blive gennemgået her. Det centrale element er hvilket bromidindhold der er spildevandet og den anvendte ozondosis. Kilder til bromid i spildevandet indgår som et væsentligt element i Arbejdspakke 5 hvor resultatet af en kortlægning i Danmark er beskrevet i: Bromat projekt, Arbejdspakke 5: Kortlægning af bromat. 10. november 2021. Nobel, 2021. Den helt centrale kilde til bromid i spildevand er indtrængende havvand i kystnære spildevandsledninger. Bromidanalyser i en række svenske og danske anlæg er kortlagt og præsenteret i (Falås m. fl., 2022) og vist i figur 1. Heri er også angivet de grænser for bromidindhold, der er anbefalet af den Schweiziske Spildevandsorganisation VSA for at helt undlade ozonering eller at foretage nærmere undersøgelse af bromatdannelsens afhængighed af ozondosen inden der træffes beslutning om at etablere teknologien.

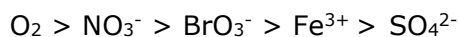


Figur 1. Geografisk placering og gennemsnitlig bromidkoncentration for kystnære og ikke kystnære renselanlæg. Standardafvigelsen, baseret på 3 døgnprøver er angivet omkring hvert punkt. Punkterede linjer angiver de vejledende grænser for bromid niveau for ozonering (grøn linje: bromid koncentration under 0,1 mg Br-/L egnet til ozonering; rød linje: bromid koncentration over 0,4 mg Br-/L uegnet til ozonering). (VSA, 2017).

Det ses at hovedparten af de kystnære renselanlæg har et bromidindhold, der i Schweiz ligger over eller i det kritiske område for ozonering og at kun få indlandsanlæg har et indhold der kan motivere nærmere undersøgelser inden etablering.

Biologisk reduktion af bromat til bromid

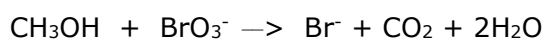
Bromat BrO_3^- indgår i rækken af oxiderende forbindelse, der kan udnyttes af bakterier til oxidation af organisk stof. En detaljeret gennemgang af bromats omdannelse til bromid kan findes i (Butler m. fl., 2005). Ud fra energiudbyttet ved oxidationen opstilles heri den rækkefølgen af spildevandsrelevante oxiderende forbindelser som bakterierne får mest ud af at benytte:



Det betyder at bakterierne foretrækker ilt fremfor nitrat, nitrat fremfor bromat og bromat frem for jern og til sidst kan sulfat udnyttes hvis ingen af de andre oxidanter er tilgængelige.

Da bromat ikke findes naturligt i naturen er der formentlig ikke nogen specifik nedbrydningsvej; men heterotrofe bakterier, der kan denitrificere forventes i hvert fald i betydeligt omfang også at kunne reducere bromat.

Forbruget af kulstof f.eks. metanol, kan beregnes ud fra redoxligningen nedenfor:



Der skal altså 128 g BrO_3^- til for at oxidere 32 g metanol. Da der er tale om meget lave bromatkoncentrationer dannet ved ozonering vil behovet for tilsætning af kulstof være meget stærkt begrænset. Det betyder samtidigt, at det vil være meget vanskeligt at fastholde biomassen i et anlæg hvor bromat udgør det væsentligste oxidationsmiddel, da der ikke kan vedligeholdes en aktiv biomasse alene ved den forventede lave bromatomsætning. Der vil derfor være behov for at biomassen sikres tilstrækkelige vækstvilkår.

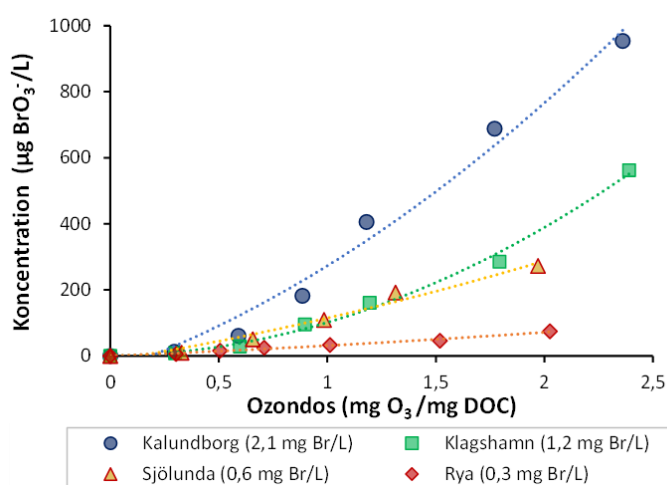
Laboratorieforsøg i Lund til kortlægning af proceshastigheder og nødvendige procesbetingelser for biologisk bromatfjernelse

Laboratoriearbejdet i Lund har fokuseret på 3 områder med hovedvægten på at karakteriserer bromatdannelsen ved ozonering og bromatreduktion i biofilmsystemer. Der er i begrænset omfang også lavet forsøg med bromatreduktion i aktiv slam. Hovedindsatsen har været at:

- Bestemme bromatproduktionen som funktion af bromidindholdet og ozondosen
- Bestemme bromatfjerneshastigheden med bæremateriale fra forskellige anlæg og med aktiv slam samt kortlægning af behovet for tilsætning af organisk stof til bromatfjernelsen
- Demonstrere nitrats indflydelse på bromatfjerneshastigheden

Bromatproduktion som funktion af spildevandets bromidindhold og ozondosen

Figur 2 viser forløbet af batchforsøg med bromatproduktion ved ozonering med biologisk rensset spildevand fra et udvalg af rensningsanlæg med meget forskelligt bromidindhold i eller over det område der i Schweiz opfattes som kritisk. Bemærk at der overalt nedenfor refereres til BrO_3^- som bromat, hvorimod bromid referere til Br^- . Det ses at bromatproduktionen er stærkt afhængigt af bromidkoncentrationen og af ozondosen når den er høj. De 3 anlæg med bromidindhold over den Schweiziske anbefalede grænse på 0,4 mg/L bromid ses alle at have betydelig bromatproduktion ved de ozondoser på 0,4 til 0,7 mg $\text{O}_3/\text{mg DOC}$, der anbefales i Schweiz. I alle tilfælde er bromatproduktionen ved disse ozondoser over den PNEC som i øjeblikket er gældende i Danmark for BrO_3^- på 11 $\mu\text{g}/\text{L}$ for marine recipienter. Hvis PNEC-værdien som forventet kan hæves til 110 $\mu\text{g}/\text{L}$ ses at kun anlæg med meget højt bromidindhold får problemer ved de relevante ozondoser.

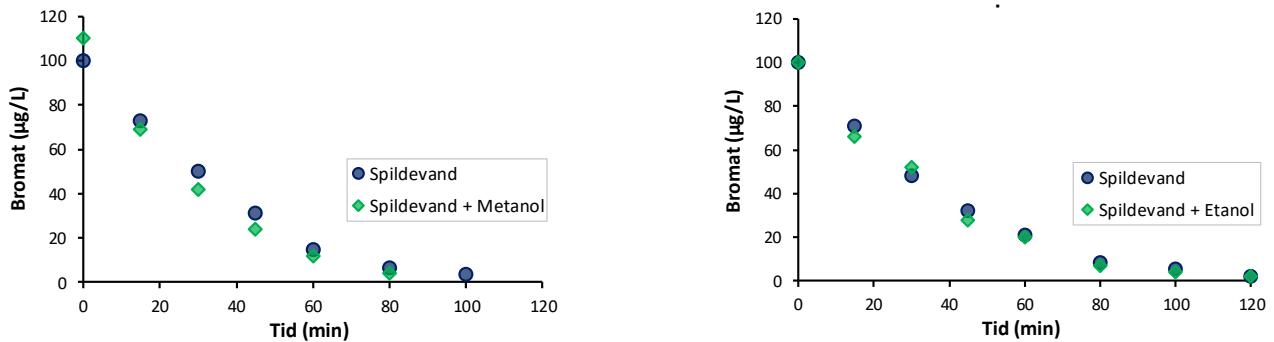


Figur 2. Produktion af bromat ved ozonering af biologisk rensset spildevand fra 4 rensningsanlæg med forskelligt indhold af bromid.

Som en tommelfingerregel kan man antage at ca. 10% af brodmidindholdet oxideres til bromat ved en ozon dosis på 1 mg O₃/mg DOC.

Bromatfjerneshastigheder i biofilmsystemer (Moving Bed Biofilm Reactors, MBBR) og betydning af dosering af eksternt kulstof

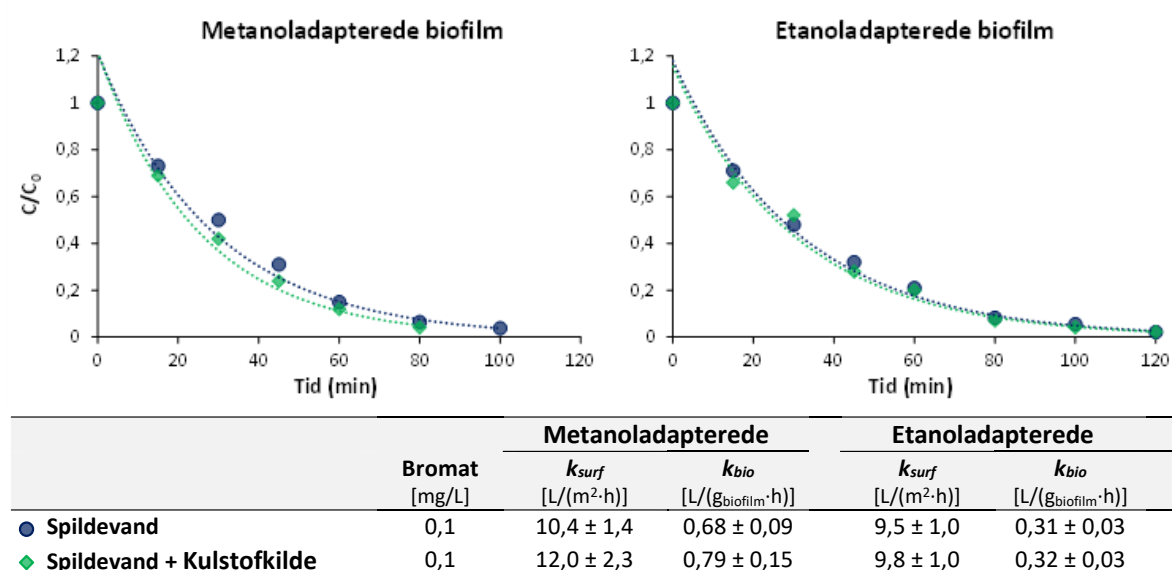
Bromatfjerneshastigheder ved højt og lavt bromatindhold, henholdsvis 1 mg/l BrO₃⁻ og 0,1 mg/l BrO₃⁻ er præsenteret i (Falås m. fl., 2022) med bæreremateriale fra 2 anlæg. Begge med efterdenitrifikation med henholdsvis metanol og etanol som kulstofkilde. I forsøgene er hastighederne kortlagt både med tilsætning af henholdsvis metanol og etanol og uden tilsætning af eksternt kulstof for at vurdere om den interne hydrolyse i biofilmen er tilstrækkelig til at sikre bromatreduktionen med de meget små mængder organisk stof, der skal til. I figur 3 er vist reduktionen i et batchforsøg med bærere med og uden kulstoffodsering ved den lave bromat startkoncentration da den vil være den relevante i praksis.



Figur 3. Bromatreduktion i batchforsøg med og uden dosering af kulstofkilde. Til venstre er benyttet metanol og til højre etanol, svarende til den normale kulstofkilde på de anlæg bærerne stammer fra.

For at generaliserer resultaterne kan reduktionen normeres med startkoncentrationen af bromat.

Figur 4 viser resultaterne efter en sådan normering og de hastighedskonstanter, der kan beregnes, hvis man forudsætter at reduktionen følger en 1. ordens reaktion, dvs. hastigheden er proportional med den til enhver tid eksisterende koncentration i væskefasen. I tabellen under figuren er de tilhørende hastighedskonstanter angivet både baseret på bærerematerialets effektive areal og på den biomasse, der har siddet på bærerne i de to systemer.



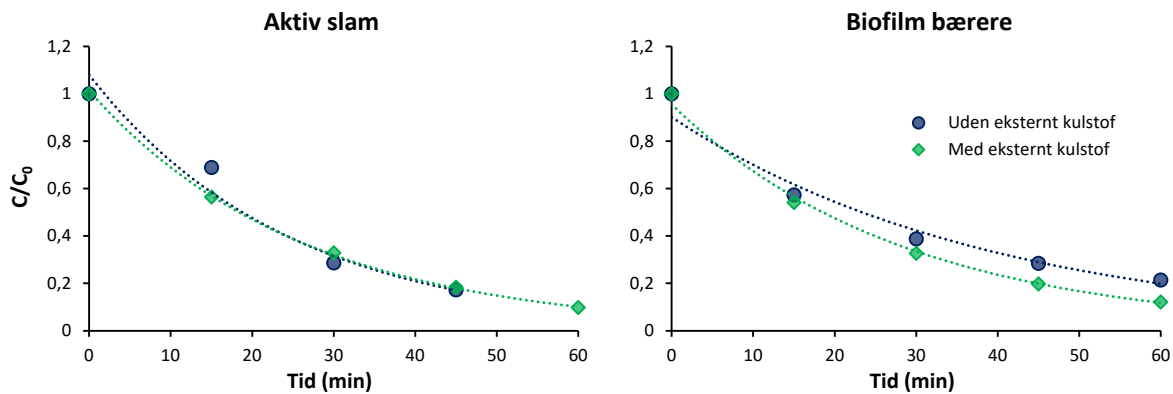
Figur 4. Relativ bromatreduktion i batcheksperimenter med metanol- og etanoladapterede biofilmbærere med og uden tilsætning af den kulstofkilde som sædvanligvis benyttes på anlæggene. I tabellen er beregnet reduktionshastighedskonstanter per overflade enhed og per biomasseenhed under antagelse af at reduktionsprocessen er 1. ordens. Desuden er angivet 95% konfidensintervaller for hastighederne.

Af figur og tabel ses først og fremmest at tilsætningen af eksternt kulstof stort set er uden betydning, den interne hydrolyse i biofilmen er altså tilstrækkelig til at sikre bromatreduktionshastigheden.

Derudover ses at fjernelseshastigheden målt pr arealenhed af bærermaterialet stort set er den samme for biofilmene uanset om den er adapteret til metanol eller etanol. Målt i forhold til biomassen er hastigheden for den etanoladapterede biofilm lavere da biomassen på disse bærere er væsentligt større end på de metanoladapterede.

Sammenligning af bromatreduktion i biofilm (MBBR) og i aktiv slam.

I (Fransson, 2021) er beskrevet forsøg med bromatfjernelse i aktiv slam parallelt med forsøg med biofilm bærere. Der blev benyttet slam fra et traditionelt fordenitrifikationsanlæg og tilsat natriumacetat som eksternt kulstofkilde. Bærerne var fra samme anlæg som ovenfor - efterdenitrifikation med metanol som kulstofkilde. Resultatet ses i figur 5.

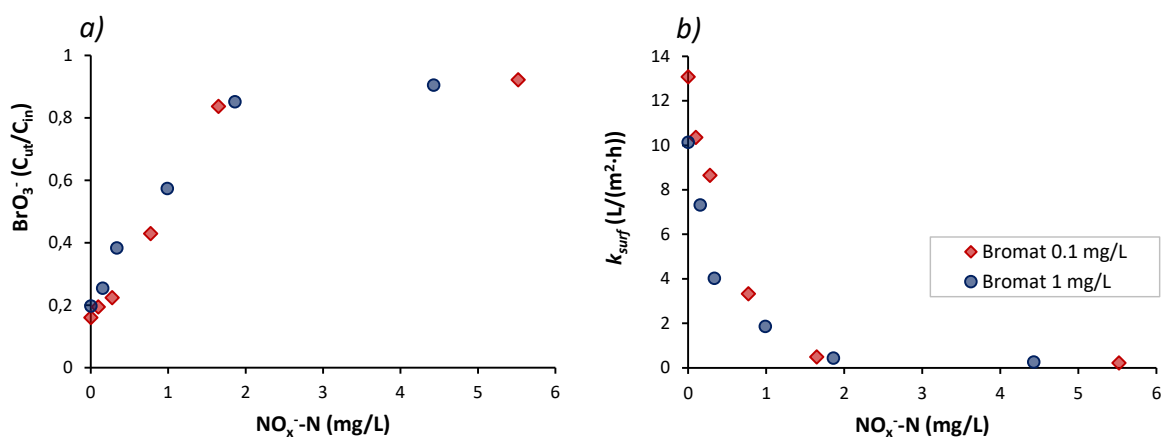


Figur 5. Relativ reduktion af bromat i batchforsøg med henholdsvis aktiv slam a) og biofilm bærere b).

For aktiv slam opnås samme hastighed medens der for biofilmsystemet opnås lidt højere hastighed når der tilsættes metanol i modsætning til forsøgene ovenfor. Antages 1. orden reaktion fås 1. ordens reaktionshastighederne baseret på biomasse k_{bio} til henholdsvis 0,69 og 0,64 L/(g_{biomasse}*h) for slam og (0,41 og 0,58 L/(g_{biomasse}*h) for biofilm uden og med kulstofdosering. Hastigheden for biofilm er på niveau med resultaterne ovenfor for bærerne fra det samme renseanlæg.

Nitrats påvirkning af bromatfjerneshastigheden

Da bakterierne foretrækker nitrat fremfor bromat som oxidationsmiddel er det centralt at vide hvilke nitratkoncentrationer der hæmmer bromatfjernelsen. I (Falås m. fl., 2022) er nitrats betydning både demonstreret i batchforsøg parallelt med ovennævnte forsøg; men også i kontinuert drevne laboratoriereaktorer med kort hydraulisk opholdstid (2 timer), hvor betydningen lettere kan kortlægges da nitratkoncentrationen kan holdes konstant. I Batchforsøgene var effekten tydelig (se Falås m. fl., 2022) med en meget kraftig reduktion i bromatfjernelsen ved moderate nitratindhold. Figur 6 viser resultat fra kontinuerede forsøg, hvor både restkoncentrationen og den relative bromatfjernelse er vist som funktion af nitratkoncentrationen i væskefasen.



Figur 6. a) Relativ tilbageværende bromatkoncentrationen i kontinuert drevne laboratoriereaktorer som funktion af koncentrationen af NO_x⁻-N (nitrat plus nitrit), og b) tilsvarende ændring i reduktionshastigheden per arealenhed.

Det ses at en nitratkoncentration på 2 mg/L NO_x^- -N stort set eliminerer bromatfjernelsen både ved høje og lave bromatkoncentrationer og at bare 1 mg/L NO_x^- -N reducerer hastigheden til 20-30%. Det ses også at det er uden væsentlig betydning hvilket bromatindhold, der er benyttet ved forsøgene.

Etablering af indikative designdata for anlægget i Kalundborg baseret på forsøgene i Lund

Forsøgene i Lund er gennemført ved temperaturer i området 18 til 20 °C som svarer til temperaturniveauet i fuldskalaanlægget i Kalundborg. Det forventes derfor at der kan opnås proceshastigheder her svarende til det der er opnået i laboratoriet. Hvis det baseres på fjernelseshastigheden pr overfladeenhed er hastighedskonstanten k_{surf} ca. 10 L/(m²·h). Det kræver dog at der er etableret og vedligeholdt en biomasse på bærerne svarende til den der normalt etableres på efterdenitrifikationsanlæg med bæremateriale.

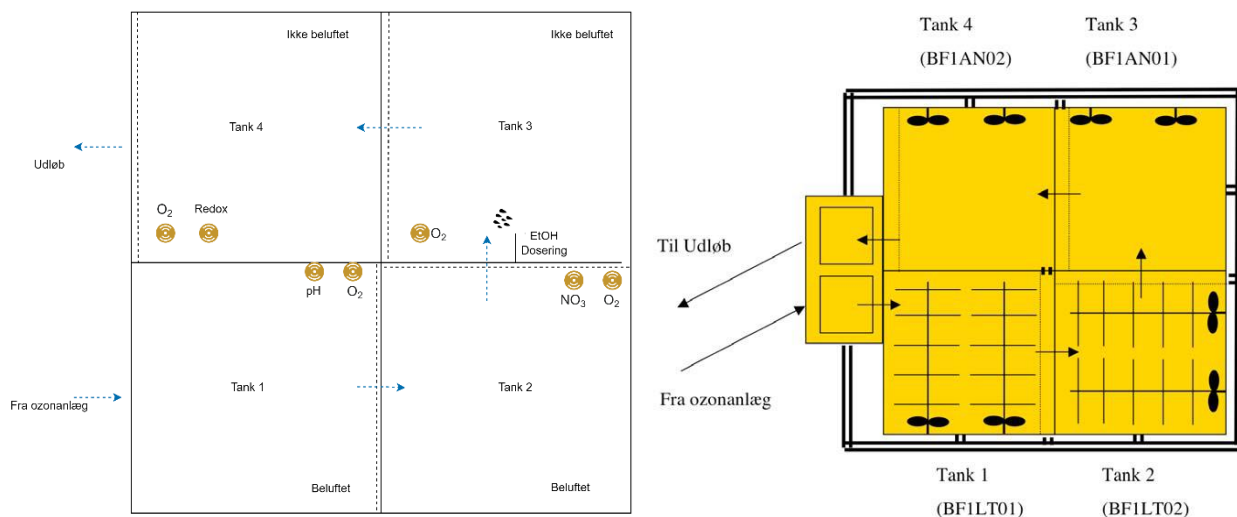
Nitratindholdets betydning for hastigheden kan bedømmes ud fra figur 6 b). Det kræver yderligere forsøg at kortlægge hvilken nitratkoncentration, der skal være i bromatreduktionstanken for på den ene side at sikre at der vedligeholdes en tilstrækkelig biomasse og på den anden side opnå så høj en bromatreduktionshastighed som muligt.

Bedømmelse af potentialerne for bromatfjernelse på MBBR-anlægget i Kalundborg

På baggrund af laboratorieforsøgene kan der laves en helt indledende bedømmelse af potentialet for bromatfjernelse på Kalundborg Centralrenseanlæg. Nedenfor er en sådan bedømmelse gennemført. Indledningsvist er givet en beskrivelse af efterpoleringstrinnet til denitrifikation og bromatfjernelse og de typiske driftsforhold og derefter er den typiske bromatreduktion bedømt ud fra resultaterne fra laboratorieforsøgene under forudsætning af at der kan etableres en biofilm på bærerne med egenskaber svarende til de anlæg der er benyttet ved forsøgene.

Generel beskrivelse af biofiltret på Kalundborg centralrenseanlæg

Biofilteret består af 4 stk. rektangulære tanke der kan rumme 300 m³ spildevand pr. stk. Dimensionerne på hver tank er 8 m x 8 m x 6,5 m og det totale volumen er tilsvarende 1200 m³. Flowraten ind i anlægget kan variere mellem 300-1200 m³/h. Herved variere den hydrauliske opholdstid i tankene mellem 1-4 timer. I hvert tank er der fyldt 76 m³ Kaldnes K1 bæreelegemer. Bæreelegeme har et overfladeareal på 500 m²/m³, hvilket svarer til 38000 m² overfladeareal pr. tank. På figur 7 er biofiltret skitseret. Til højre anlægsopbygningen og til venstre placering af on-linemålere.



Figur 7. Principskitse af biofiltrets opbygning (til højre) og sensorbestyknig til venstre.

I alle tanke er der to propelmørere der kører kontinuerligt og derudover etableret gitterbeluftning som muliggøre beluftning i små cyklusser således bæreelementerne ikke akkumuleres på de afskærmende riste imellem tankene. I Tank 1 og 2 (BF1LT01 og BF1LT02) er der derudover installeret bundbeluftning, 2 stk. beluftningsrør pr. tank, med det formål at afdrive ("strippe") overskuddet af ilt ud af vandet. Omkring bassinerne er ført en omløbsledning med mulighed for at udkoble et eller flere bassiner, hvorved vandet ledes via et skydespjæld (bag risten) ud til omløbsledningen og ind til den ønskede tank (gennem en skærmplyde med hul).

Fraktionen af inert organisk stof er relativt høj i spildevandet fra ozonanlægget og dermed er substratet den begrænsende faktor for denitrifikationen i Tank 3 og 4. For at skabe bedre forhold for denitrifikation doseres derfor 23,5% etanolopløsning som eksternt kulstofkilde i Tank 3. Belastningen i spildevandet fra ozonanlægget til biofilteret kan ses på tabel 1.

Tabel 1. Normal og peak belastning er angivet som 60- og 85% fraktil på historisk data på døgnprøver analyseret i perioden 01-01-2021 til 03-05-2022.

	Normal belastning (60% Fraktil)	Peak belastning (85% Fraktil)
Flow (m³/h)	556	594
NH₄-N (mg/L)	0,89	1,16
COD (mg/L)	83,20	106,75
SS (mg/L)	43,00	63,57
Total-N (mg/L)	7,20	9,48
NO₃-N (mg/L)	1,36	2,04

Bedømmelse af potentialet for bromatfjernelse på Kalundborg Centralrenseanlæg.

Med indretningen af Kalundborg Centralrensningsanlæg forventes iltindhold at være så højt i de 2 første tanke at der næppe kan ske bromatfjernelse her. I Tank 3 forventes ilten at være opbrugt; men der vil formentligt være et vidst nitratindhold der reducerer bromatfjernelsen i betydelig grad, idet bare et indhold på 1,5 til 2 mg/L NO₃-N forventes at eliminere bromatfjernelsen totalt.

Det forventes derfor mest relevant at overveje hvilken fjernelse, der kan ske i den sidste tank; men beregningsgangen nedenfor indrettes således at også en vis bromatfjernelse i Tank 3 kan medtages.

Bromatkoncentrationen i udløbet fra en tank kan beregnes under stationære forhold hvis den antages: at være fuldt opblandet, at der kan opnås bromatfjerneshastigheder svarende til de der er opnået ved laboratorieforsøgene ovenfor og at bromatreduktionen er en 1. ordens reaktion. I det tilfælde kan koncentrationen ud af én tank beregnes således:

$$c_{ud} = c_{ind}/(1+k*A/Q)$$

Hvor

c_{ud} = udløbskoncentrationen

c_{ind} er indløbskoncentrationen

$k*A$ er den specifikke overfladefjerneshastigheden gange biofilmarealet

Q er flowet

Formlen kan bruges direkte hvis det antages at bromatreduktionen kun sker i Tank 4.

Hvis det antages at der sker bromatreduktion i både Tank 3 og 4 fås tilsvarende:

$$c_{ud,4} = c_{ud,3}/(1+k_4*A_4/Q) \text{ og med indsættelse af } c_{ud,3} = c_{ind}/(1+k_3*A_3/Q)$$

$$c_{ud,4} = c_{ud,3}/(1+k_4*A_4/Q) = c_{ind}/(1+k_3*A_3/Q)/(1+k_4*A_4/Q)$$

Hastighedskonstanterne k_3 og k_4 kan findes af figur 6 b) når nitratindholdet i de 2 tanke er kendt.

For at illustrere potentialet er der nedenfor lavet beregningseksempler med 2 hydrauliske belastninger svarende til den minimale belastning på 300 m³/h og 60% fraktilen for belastningen på 556 m³/h.

Derudover er der gennemført beregninger for nitratindhold i Tank 3 på 0,7 og 1,5 mg/L svarende til den minimale og gennemsnitlige koncentration målt i en målekampagne over 2 uger.

Det antages at nitratindholdet i Tank 4 altid er tæt på 0.

Beregningerne er i alle tilfælde gennemført med en bromatindløbskoncentration på 200 µg/L idet der ikke er identificeret et typisk niveau som følge af de store variationer i bromidindholdet og den specifikke ozondosis.

Når anlægget i Kalundborg er kommet i normal drift kan beregningerne naturligvis tilpasses de faktiske forhold.

Bromat: 200 µg/L

Flow: 300 m³/h, Nitrat i Tank 3: 0,7 mg/L NO₃-N => $k_3 = 4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Ved indsættelse i formel 2 fås:

$$C_{ud} = 59 \mu\text{g/L}$$

Flow: 300 m³/h, Nitrat i Tank 3: 1,5 mg/L NO₃-N => k₃ = 0,5 L/(m²·h)

Ved indsættelse i formel 2 fås:

$$C_{ud} = 83 \mu\text{g/L}$$

Flow: 556 m³/h, Nitrat i Tank 3: 0,7 mg/L NO₃-N => k₃ = 4 L/(m²·h)

Ved indsættelse i formel 2 fås:

$$C_{ud} = 93 \mu\text{g/L}$$

Flow: 556 m³/h, Nitrat i Tank 3: 1,5 mg/L NO₃-N => k₃ = 0,5 L/(m²·h)

Ved indsættelse i formel 2 fås:

$$C_{ud} = 115 \mu\text{g/L}$$

Det ses at der ved de forventelige typiske driftsforhold opnås en rimelig bromatreduktion i alle tilfælde, naturligvis under forudsætning af at den specifikke overfladefjerneshastighed er på niveau med det, der er fundet i laboratorieforsøgene.

Sammenfatning

Indledende undersøgelser ved Lunds Universitet af bromatdannelsen ved ozonering af bromidholdigt spildevand og af biologisk bromatreduktion kan danne baggrund for etablering af mulige designkriterier for biofilmsystemer som poleringstrin for ozonering af spildevand med forhøjet bromidindhold.

Kortlægning af bromidindholdet i spildevand fra svenske og danske kystnære og ikke-kystnære rensningsanlæg har vist et betydeligt forhøjet bromidindhold for de kystnære anlæg, således at de fleste ligger over den grænse som anbefales i Schweiz for etablering af ozonering til lægemiddelreduktion. Årsagen skyldes formentlig i det væsentlige havvandsindtrængning i afløbsnettet.

Ozonering af spildevand med forhøjet bromidindhold fører til overskridelse af den for tiden angivne PNEC-værdi (Predicted no Effect Concentration) på 11 µg/L selv ved moderate ozondoser. Det vil derfor være vigtigt at få forbedret grundlaget for fastsættelse af PNEC-værdien således at applikationsfaktoren kan reduceres.

Denitrificerende biofilm fra 2 fuldskala MBBR-anlæg med henholdsvis metanol og etanol som kulstofkilde til denitrifikation viste begge betydelig bromatreduktionspotentiale. Hastigheden mål pr overfladeenhed var stort set den samme; men målt i forhold til biomassen på bærematerialet var hastigheden højest med biofilmen fra anlægget med metanoldosering.

Bromatfjernelsen blev kraftigt reduceret ved tilstedeværelse af nitrat, således at reduktionen stort set ophørte ved nitratindhold på 2 mg/L Nitrat.

Kulstofbehovet til bromatreduktion er så begrænset at kulstof produceret ved intern hydrolyse formentlig er tilstrækkeligt til at udnytte bromatreduktionspotentialet uden at tilsætte ekstra kulstof til dette formål.

Bedømmelsen af bromatreduktionspotentialet på efterpoleringstrinnet til denitrifikation af ozoneret spildevand på Kalundborg Centralrenseanlæg viser at det er kritisk om der kan sikres tilstrækkelig biofilm på anlæggets bæremateriale til at sikre bromatfjernelsen.

Hvis dette er muligt er der potentiale for at opnå en betydelig bromatreduktion, hvis anlægget drives med fuld denitrifikation.

Kun de igangværende fuldskalaforsøg på anlægget kan dog vise om processen kan etableres i praksis med tilstrækkelig effektivitet.

Referencer:

Butler, R., Godley, A., Lytton, L., Cartmell, E. 2005. Bromate environmental contamination: review of impact and possible treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 35, 193–217.

Dell, S. 2020. Yield of Bromate from Ozonated Wastewater and the Potential for Biological Reduction of Bromate in Wastewater in Sweden. L. A. Dell. Master's Thesis Lund University. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9019793>

Falås, R. Juárez, L. A. Dell, S. Karlsson, M. Cimbritz. 2021. Can bromate reduction in denitrifying MBBRs enable ozonation of bromide rich-wastewater in coastal areas? NORDIWA wastewater conference online 28 September – 1 October 2021.

Falås, R. Juárez, L. A. Dell, S. Fransson, S. Karlsson, M. Cimbritz M 2022. Microbial bromate reduction following ozonation of bromide-rich wastewater in coastal areas. *Science of the Total Environment*, 156694. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156694>

Fransson, S. 2021. Bromatreducering i den biologiska denitrifikationsprocessen – påverkan av bromat och nitrat. S. Fransson. Master's Thesis Lund University. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9068355>

la Cour Jansen, J. 2021. Notat om hvilke forhold der betinger bromatdannelse ved ozonering af bromidholdigt spildevand og hvordan dannelsen kan begrænses eller bromaten fjernes. Notat til Arbejdsgruppe 4 I projektet Demonstration af metoder til reduktion af bromat produceret ved ozonering af spildevand med henblik på reduktion af miljøfremmede stoffer.

Nobel, P. 2021. Bromat projekt, Arbejdspakke 5: Kortlægning af bromat. 10. november 2021.

VSA, 2017. Abklärungen verfahrenseignung ozonung, 2017. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute. https://micropoll.ch/wp-content/uploads/2020/06/2017_VSA_E_Abkl%C3%A4rungen-Verfahrenseignung_d.pdf