

MASTER- OG DOKTORGRADSARBEIDER

Desinfeksjon av drikkevann: en undersøkelse av mulige synergieffekter ved å kombinere UV-bestråling og klorering/kloraminering

Av Kai Preben Fosse

Kai Preben Fosse er utdannet master i teknologi/sivilingeniør (2008) ved Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB), Ås

Sammendrag

Våren 2008 er det utført en mastergradsoppgave hvor man har undersøkt for mulige synergieffekter ved å kombinere UV-bestråling og klorering eller kloraminering. Den praktiske delen av masteroppgaven er utført ved Folkehelseinstituttet, Avdeling for vannhygiene. I forsøkene er det benyttet bakteriesporer, som regnes for å være svært hardføre overfor tradisjonelle desinfeksjonsprosesser. Resultatene viser at synergieffekter kan oppstå under kontrollerte og gunstige betingelser i laboratoriet, men at synergieffektene forsvinner ved vanntemperaturer som kan forventes under norske forhold.

Summary

In the Spring of 2008 work was carried out at the Department of Water Hygiene, National Institute of Public Health as part of a Master of Science degree thesis. This thesis examined the effects of combining Ultra Violet radiation with either chlorine or chloramine treatment on contaminated water samples. Endospores of *Bacillus subtilis*, which are very resistant to traditional disinfection processes, were used as the test organism. The experiments showed that a synergistic effect exists under both disinfection combinations when carried out under controlled and favourable laboratory conditions.

There was no synergistic effect observed when low temperature natural water samples were spiked with *Bacillus* spores and treated in the same way.

Innledning

Det har i de senere år oppstått et behov for økt kunnskap om effekten av å kombinere ulike desinfeksjonsprosesser, da undersøkelser har avdekket at ingen desinfeksjonsprosess alene er effektiv mot alle typer mikrober. En synergieffekt opptrer når virkningen av å kombinere to desinfeksjonsprosesser er større enn den additive effekten (Kouame & Haas 1991). Internasjonal forskning har vist at det kan oppnås til dels betydelige synergieffekter ved å kombinere ulike desinfeksjonsprosesser. Formålet med denne mastergradsoppgaven har vært å studere mulige synerieffekter ved å kombinere UV-bestråling med prosessene klorering eller kloraminering, og dermed avdekke om disse kombinasjonene kan øke inaktivering av bakteriesporer ved norske vannbehandlingsanlegg. Kombinasjonen UV-bestråling og klorering benyttes ved en del vannbehandlingsanlegg hvor UV-bestråling nylig er innført, mens kombinasjonen UV-bestråling og kloraminering kun benyttes ved et fåtalls anlegg. For øvrig har kloramin (monokloramin), som er bundet klor som dannes når fritt klor reagerer med ammonium/ammoniakk, i de senere år fått en viss oppmerksomhet siden forbindelsen er mindre reaktiv enn fritt klor og dermed gjør det lettere å

bevare en klorrest i ledningsnettet. Kloraminering har derfor blitt aktualisert ved innføring av UV-bestråling i stedet for klorering, som et tiltak for å redusere biofilmdannelse i ledningsnettet. Kloramin i seg selv er imidlertid et meget svakt desinfeksjonsmiddel i forhold til fritt klor (Butterfield 1948).

Tidligere arbeid

Den desinfiserende virkningen av UV-bestråling eller klorering alene overfor bakteriesporer er godt dokumentert gjennom både norsk og internasjonal forskning. Bl.a. viste Lund & Ormerod (2005) at UV-bestråling med dose 40 mJ/cm² ga minimum en 2 log₁₀-inaktivering (99 %) av bakteriesporer av *Bacillus* spp. Det ble også vist at klorering alene hadde en svært begrenset effekt på inaktivering av samme typer bakteriesporer.

Videre er effekten av å kombinere UV-bestråling og klorering for inaktivering av bakteriesporer studert av flere utenlandske forskergrupper, til dels med avvikende resultater. Bl.a. er det vist at UV-bestråling av sporer av *Bacillus subtilis* (ATCC 9372) med dose 40 mJ/cm² etterfulgt av klorering med en forholdsvis stor Ct-verdi medfører en betydelig synergieffekt (Zhang, Liu & Zhang 2006). Samtidig har andre i tilsvarende forsøk med sporer av *Bacillus subtilis* (ATCC 6633) ikke kunnet påvise noen synergieffekt (Cho, Kim & Yoon 2006). Med andre ord synes det fortsatt uklart om en synergieffekt eksisterer når UV-bestråling og klorering kombineres.

Ingen kjente publikasjoner tar for seg inaktivering av bakteriesporer ved kombinasjonen av UV-bestråling og kloraminering. Kombinasjonen er imidlertid utprøvd på Adenovirus type 2. Ballester & Malley (2004) oppnådde en betydelig synergieffekt ved å kombinere de to prosessene. I senere, identiske forsøk kunne derimot ikke den samme synergieffekten påvises, selv ved langt høyere Ct-verdier for kloramin (Baxter et al. 2007).

Med bakgrunn i tidligere arbeid var det derfor fortsatt uklart om kombinasjonen av UV-bestråling og klorering eller kloraminering ville medføre synergieffekter ved inaktivering av bakteriesporer.

Materiale og metode

Generelle forsøksbetingelser

For å oppnå kontrollerte forsøksbetingelser benyttes ofte ultrarent vann i desinfeksjonsforsøk som utføres i laboratorieskala. Dette forenkler sammenligning med tidligere arbeid. I forsøkene ble det derfor hovedsakelig benyttet ultrarent, autoklavert vann fra et ELGA vannbehandlingsanlegg for laboratoriebruk. Det er imidlertid kjent at mikroorganismer har større motstandsevne mot UV- og klordesinfeksjon i naturlig vann enn i ultrarent vann (Mamane-Gravetz & Linden 2004). Noen forsøksrunder er derfor utført med vann fra innsjøen Farris, uttatt etter fellingstrinnet ved Vestfold interkommunale vannverk (VIV) sitt vannbehandlingsanlegg på Seierstad. VIV-vannet hadde farge på ca. 3,0 mg/l Pt og turbiditet på ca.

0,07 FTU. Forsøkene med VIV-vann er utført for å simulere kloraminering under norske forhold. Forsøkene hvor det ble benyttet ultrarent, autoklavert vann er utført ved 20 °C, siden denne temperaturen ofte er benyttet i tidligere arbeid. I de forsøkene hvor norske forhold ble simulert ble det derimot valgt en forsøkstemperatur på 4 °C.

Forsøkene er utført med bakteriesporer av standardstammen *Bacillus subtilis* ATCC 6633, som også benyttes ved biodosimetrisk testing av UV-aggregater etter tyske og østerrikske standarder. Sporene ble mottatt i frysetørret form fra leverandøren i Østerrike. De frysetørrede sporene ble fortynnet i ultrarent, autoklavert vann til en konsentrasjon på ca. 108 sporer/ml og deretter til en sluttkonsentrasjon på ca. 106 sporer/ml forsøksvann. Etter utførte desinfeksjonsforsøk ble antallet overlevende bakteriesporer bestemt ved platespredning på Plate Count Agar (PCA-agar). Petriskålene ble deretter inkubert ved 37 °C og platetelling utført etter 24 og 48 timer. De fleste forsøkene er utført i minimum triplikat.

Forsøk med UV-bestråling

Det ble utført desinfeksjonsforsøk der UV-bestråling ble benyttet alene eller i kombinasjon med klorering/kloraminering. Alle UV-bestrålingsforsøk ble utført med et Wedeco CBD lavtrykks UV-bestrålingsapparat (Collimated Beam Device). Tilsvarende UV-bestrålingsutstyr ble benyttet av Lund & Ormerod (2005). Intensiteten på UV-lyset ble fastsatt

med uridinaktinometriske målinger (DVGW 1997). Ved kjent intensitet på UV-lyset kunne bestrålingstiden for å oppnå en bestemt UV-dose fastsettes. Bestrålt vannvolum var 200 ml forsøksvann ved hver bestråling. Det ble i forsøkene benyttet UV-bestråling med dose 40 mJ/cm² som er kravet til minimumsdose i Norge dersom prosessen skal kunne anses som en hygienisk barriere mot bakteriesporer.

Forsøk med klorering

Kloreringsforsøk ble utført enten som eneste behandling eller i etterkant av UV-bestråling. Alle klorforsøk ble utført i glassflasker som på forhånd var gjort klorforbruksfrie. Forsøksvannet ble i forkant av kloreringsforsøkene tilsatt fosfatbuffer til en pH på 7,0. Det ble benyttet 5 % natriumhypokloritt. Etter klortilsetning til forsøksvannet ble vannets konsentrasjon av fritt klor målt spektrofotometrisk med DPD-metoden (DPD1-reagens). Etter endt kontakttid på 30 minutter ble ny klormåling foretatt og forsøksvannet deklorert ved tilsetning av natriumtiosulfat.

Forsøk med kloraminering

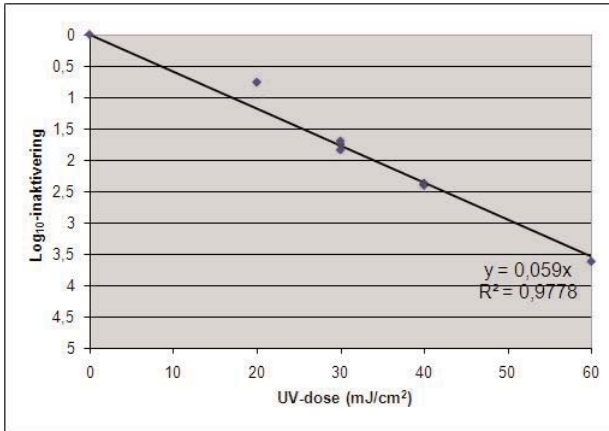
Tilsvarende som for kloreringsforsøkene ble kloramineringsforsøk utført både som eneste behandling og i etterkant av UV-bestråling. Forsøkene ble utført i klorforbruksfrie glassflasker og med boratbufret forsøksvann med en pH på 8,3. Også vannet uttatt ved VIV ble tilsatt boratbuffer til en pH på 8,3. Det ble benyttet forhåndstillaget kloramin med en konsentrasjon tilsvarende 200

mg/l Cl₂. Forhåndstillaget kloramin (monokloramin) ble daglig tilberedt ved å blande sammen natriumhypokloritt og ammoniumklorid i boratbufret forsøksvann til et Cl₂:N-vektforhold på 3:1. Dannelse av monokloramin finner sted ved et Cl₂:N-vektforhold på 5:1 eller mindre, og skjer hurtigst ved en pH på 8,3 (White 1999). Etter tilsetning av forhåndstillaget kloramin ble vannets konsentrasjon av kloramin i form av bundet klor målt spektrofotometrisk med DPD-metoden (DPD3-reagens). Kloraminkonsentrasjonen ble oppgitt som den ekvivalente mengden klor (mg/l Cl₂). Etter endt kontakttid på normalt 30 minutter ble ny klormåling foretatt og forsøksvannet deklorert ved tilsetning av natriumtiosulfat. I forsøksrundene hvor norske forhold ble simulert var startkonsentrasjonen av kloramin alltid om lag 0,20 mg/l Cl₂.

Resultater og diskusjon

Inaktivering ved UV-bestråling

Innledningsvis ble det utført rene UV-bestrålingsforsøk, primært for å få bekreftet at de tilsendte bakteriesporene hadde om lag samme sensitivitet overfor UV-bestråling som det som allerede var kjent gjennom tidligere arbeider (ÖNORM 2001, Lund og Ormerod 2005). Resultatene er presentert i Figur og er samlet sett i god overensstemmelse med bl.a. sporeleverandørens egen inaktiveringskurve (HAI-SO GmbH 2007). Det fremgår av resultatene at man med UV-bestråling med dose 40 mJ/cm² oppnår i overkant av en 2 log₁₀-inaktivering (99 %) av de



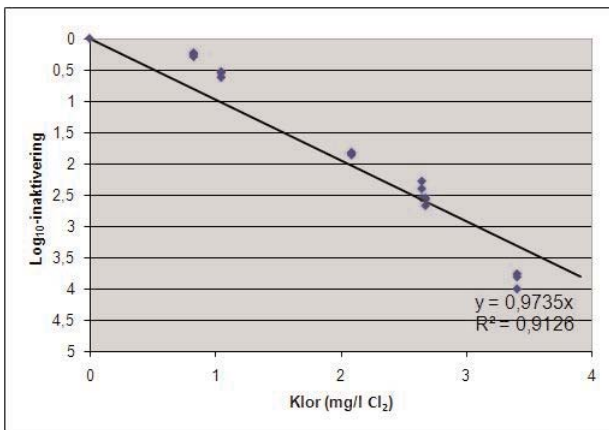
Figur 1. Inaktiveringskurve for UV-bestråling av sporer av *Bacillus subtilis* (ATCC 6633).

aktuelle sporene. For øvrig viste den innledende forsøksfasen at prosedyrene for oppløsning av frysetørrede sporer var av betydning for sporenes sensitivitet overfor UV-bestråling.

Inaktivering ved klorering

Inaktiveringskurven for *Bacillus*

subtilis ved klorering er vist i Figur 1. Resultatene viser med tydelighet at klorering alene ikke kan regnes som en hygienisk barriere overfor bakteriesporer, i det en klorkonsentrasjon på over 2,0 mg/l Cl₂ gjennom en kontakttid på 30 minutter er nødvendig for å oppnå en 2 log₁₀-



Figur 2. Inaktiveringskurve for klorering av sporer av *Bacillus subtilis* (ATCC 6633) ved 20 °C, pH = 7,0 og en kontakttid på 30 minutter.

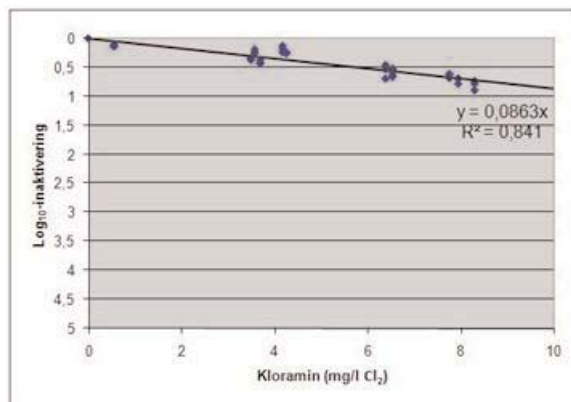
inaktivering (99 %). I Norge praktiseres normalt svaklorering hvor langt lavere klorkonsentrasjoner anvendes. Vi må derfor ha som utgangspunkt at klorering alene kun fører til en ubetydelig inaktivering av bakteriesporer ved norske vannverk.

Inaktivering ved kloraminering

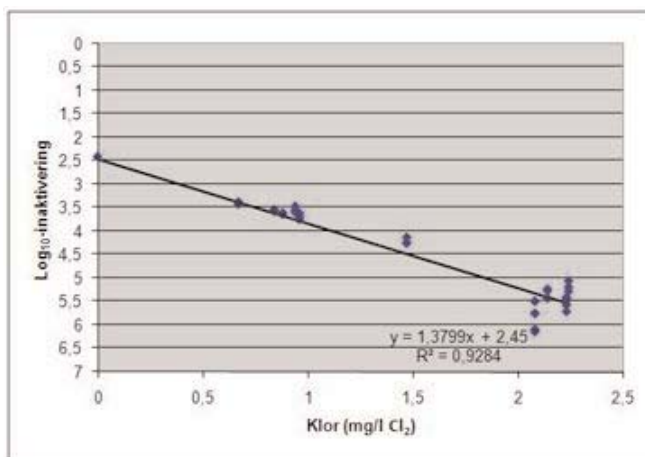
Figur 2 viser inaktiveringskurven for *Bacillus subtilis* ved kloraminering som eneste behandling. Legg merke til at det er benyttet betydelig høyere konsentrasjoner enn i kloreringsforsøkene. Likevel er inaktiveringen svært beskjeden, selv ved de høyeste kloraminkonsentrasjonene som tilsvarer Ct-verdier på nærmere 300 mg·min/l Cl₂. Fra utlandet rapporteres det at enda høyere Ct-verdier har vist seg å være nødvendige for å oppnå en 1 log₁₀-inaktivering (90 %) under tilsvarende betingelser og med lignede bakteriesporer (Dow et al. 2006; Larson & Marinas 2003). Dette er i overensstemmelse med teorien om

at kloramin i seg selv kun er et meget svakt desinfeksjonsmiddel, der den desinfiserende effekten antas å skyldes en kombinasjon av flere ulike prosesser, deriblant oksidasjon av enzymer samt klorering av aminosyrer og proteiner (Wolfe, Ward & Olson 1984).

Figur 3 viser resultatene fra forsøkene hvor bakteriesporene først ble UV-bestrålt med dose 40 mJ/cm² for deretter å gjennomgå klorering. Hensikten med dette var å avdekke eventuelle synergieffekter for inaktivering av bakteriesporer når disse to prosessene kombineres. På forhånd var det antatt at en synergieffekt kunne oppstå, med bakgrunn i at sporene svekkes ved UV-bestråling og av den grunn kan bli mer sårbare overfor klorering. For å kunne vurdere eksistensen av en eventuell synergieffekt er resultatene fra forsøkene med klorering og UV-bestråling/klorering sammenstilt i Figur 4. Kurvene bygger på lineær



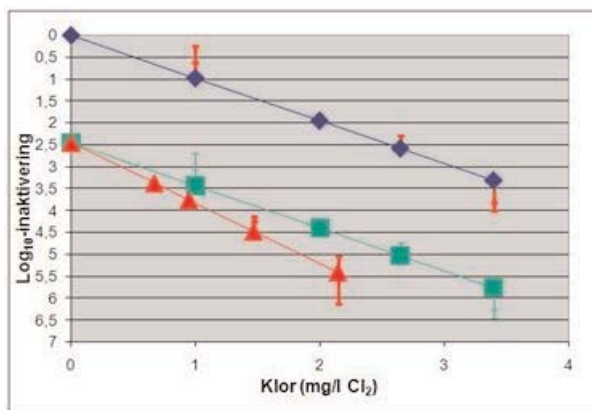
Figur 3. Inaktiveringskurve for kloraminering av sporer av *Bacillus subtilis* (ATCC 6633) ved 20 °C, pH = 8,3 og en kontaktid på 30 minutter. Inaktivering ved UV-bestråling og klorering



Figur 4. Inaktiveringskurve for UV-bestråling (40 mJ/cm²) av sporer av *Bacillus subtilis* (ATCC 6633) etterfulgt av klorering ved 20 °C, pH = 7,0 og en kontaktid på 30 minutter.

regresjon. Det er også tegnet inn en kurve for den teoretiske additive effekten, som er funnet ved å summere inaktiveringen oppnådd i forsøkene med UV-bestråling og klorering alene. Av kurvene i Figur 4 kan det antydes at en synergieffekt ser ut til å eksistere når UV-bestråling (40 mJ/cm²) etterfølges av klorering.

Synergieffekten tiltar med økende klorkonsentrasjon, dvs. med økende Ct-verdi. Den praktiske nytten av en slik synergieffekt er likevel begrenset, siden merkbare synergieffekter først oppstår ved klorkonsentrasjoner som er langt høyere enn det som anvendes ved norske vannbehandlingsanlegg.



Figur 5. Sammenstilling av resultater fra forsøk med klorering (ruter) og forsøk med UV-bestråling/klorering (trekanter) samt teoretisk additiv effekt (firkanter).

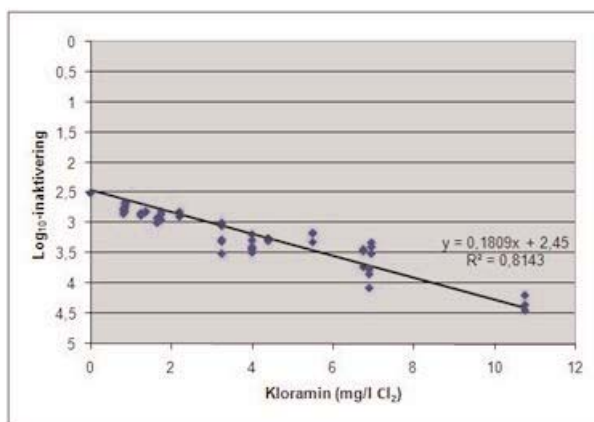
Inaktivering ved UV-bestråling og kloraminering

Inaktiveringen ved først å UV-bestråle (40 mJ/cm²) bakteriesporene og deretter la dem gjennomgå behandling med kloraminering er vist i Figur 5. I Figur 6 er resultatene fra forsøkene med kloraminering og UV-bestråling/klorering presentert sammen med en kurve for den teoretiske additive effekten. Sistnevnte kurve er funnet ved å summere inaktiveringen oppnådd i forsøkene med UV-bestråling og kloraminering alene. Av de rette kurvene i Figur 6 kan det antydes at en synergieffekt ser ut til å eksistere ved å kombinere UV-bestråling og kloraminering. Tilsvarende som ved UV-bestråling og klorering ser synergieffekten ut til å øke med økende Ct-verdier. Høye Ct-verdier er påkrevd for at en synergieffekt skal oppstå, men den saktegående nedbrytningen av kloramin

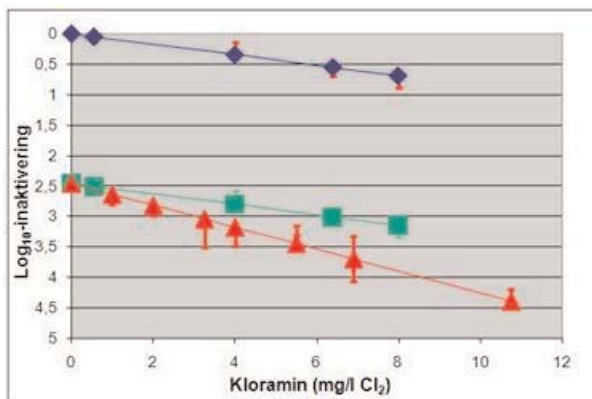
kombinert med oppholdstid i ledningsnettet gjør det lettere å oppnå høye Ct-verdier med kloramin enn med fritt klor. Av resultatene fremkommer det at en 3 log₁₀-inaktivering (99,9 %) av bakteriesporene oppnås en kloramin-konsentrasjon på om lag 3,5 mg/l Cl₂ i 30 minutter, tilsvarende en Ct-verdi på 105 mg-min/l Cl₂. Om man tar utgangspunkt i at en kloramin-konsentrasjon tilsvarende 0,20 mg/l Cl₂ kan være aktuelt ved norske vannverk, vil en Ct-verdi på 105 mg-min/l Cl₂ oppnås etter om lag 9 timers kontaktid.

Inaktivering ved UV-bestråling og kloraminering: norske forhold

Til sist i forsøksperioden ble det utført forsøk for å simulere norske forhold, dvs. ved en temperatur på 4 °C og med naturlig vann uttatt ved VIV. Startkonsentrasjonen av kloramin ble



Figur 6. Inaktiveringskurve for UV-bestråling (40 mJ/cm²) av sporer av *Bacillus subtilis* (ATCC 6633) etterfulgt av kloraminering ved 20 °C, pH = 8,3 og en kontaktid på 30 minutter.

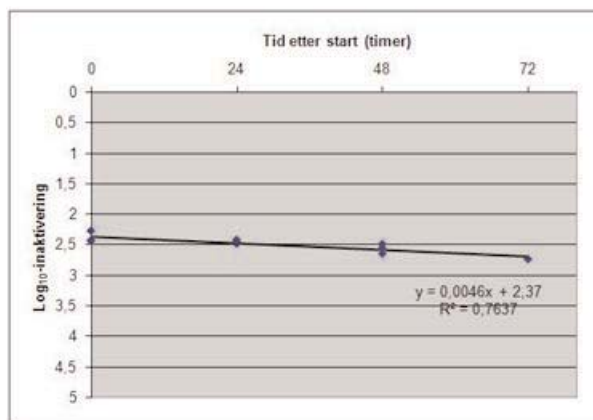


Figur 7. Sammenstilling av resultater fra forsøk med kloraminering (ruter) og forsøk med UV-bestråling/kloraminering (trekanter) samt teoretisk additiv effekt (firkanter).

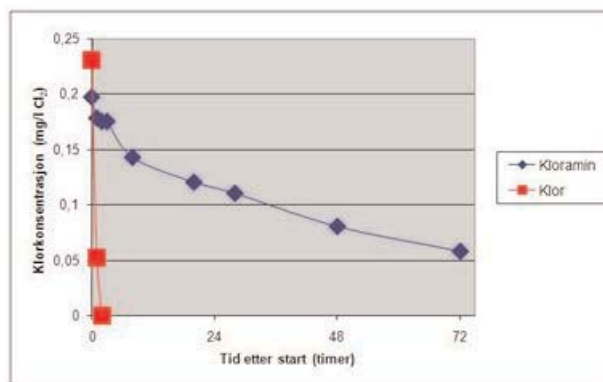
satt til om lag 0,20 mg/l Cl₂, som vurderes å være en realistisk verdi under norske forhold. På grunn av den lave startkonsentrasjonen måtte forsøkene pågå over flere døgn for å oppnå samme Ct-verdi som i de øvrige forsøkene, hvor høyere konsentrasjoner og 30 minutters kontaktid ble benyttet. Inaktiveringskurven for disse forsøkene er presentert i Figur 7. I tilknytning til disse forsøkene ble det også foretatt målinger av nedgangen i kloraminkonsentrasjonen over tid, vist i Figur 8. For å få dannet et bilde av kloramins stabilitet i forhold til fritt klor, ble det også foretatt klormålinger i vann med startkonsentrasjon på 0,20 mg/l Cl₂ fritt klor etter at vannets klorbehov var forsøkt dekket. Målingene illustrerer at kloramin er langt mer stabilt i naturlig vann enn fritt klor. Den frie klorresten er borte innen 2 – 3 timer, mens kloramin kan påvises selv etter 72 timer. Den

praktiske betydningen av dette er at større Ct-verdier kan oppnås og at en klorrest kan bevares lenger ut på ledningsnettet.

Resultatene som fremkommer av Figur 7 er imidlertid ikke som forventet ut fra forsøkene som ble utført med ultrarent vann og ved 20 °C. Om man regner at midlere kloraminkonsentrasjon gjennom forsøksperioden på 72 timer er om lag 0,1 mg/l Cl₂, skulle dette tilsvare en Ct-verdi på 432 mg-min/l Cl₂. Ut fra resultatene fra forsøkene som ble utført med ultrarent vann ved 20 °C kan man forvente en tilnærmet 5 log₁₀-inaktivering (99,999 %) ved kombinasjonen av UV-bestråling (40 mJ/cm²) og kloraminering med denne Ct-verdien, jfr. Figur 5. Inaktivering av bakteriesporene er likevel beskjeden, og ender på omtrent en 2,75 log₁₀-inaktivering etter 72 timer. Tatt i betraktning at UV-bestråling alene ga en 2,45 log₁₀-inaktivering,



Figur 7. Inaktiveringskurve for UV-bestråling (40 mJ/cm²) av sporer av *Bacillus subtilis* (ATCC 6633) etterfulgt av kloraminering ved 4 °C og pH = 8,3. Det ble benyttet vann fra VIV.



Figur 8. Klormålinger foretatt under forsøkene ved 4 °C og pH = 8,3. Det ble benyttet vann fra VIV.

er kloraminens bidrag på om lag 0,3 log₁₀ gjennom totalt 72 timer. Den lave inaktivering som er oppnådd kan muligens tilskrives forsøksvannets lave temperatur. Tidligere er

det rapportert at temperaturen har stor innvirkning på effekten av kloramin (Larson & Marinas 2003; Sirikanchana, Shisler & Marinas 2008).

Konklusjoner

UV-bestråling (40 mJ/cm²) etterfulgt av klorering eller kloraminering ser ut til å gi en viss synergieffekt når forsøkene utføres under kontrollerte og gunstige betingelser i laboratoriet. Når kombinasjonsforsøk med UV-bestråling (40 mJ/cm²) og kloraminering (0,20 mg/l Cl₂) utføres med naturlig vann ved 4°C forsvinner imidlertid denne synergieffekten, muligens på grunn av den lave vann-temperaturen. Virkningen av å supplere med klorering eller kloraminering i etterkant av UV-bestråling for å inaktivere bakteriesporer synes derfor å være begrenset, tatt i betraktning lave vann-temperaturer og de lave klor- og kloramin-konsentrasjonene som er aktuelle å benytte ved norske vannverk. Dette gjelder UV-bestråling både med dose 30 og 40 mJ/cm². Imidlertid viser forsøkene at kloramin i naturlig vann med lav temperatur nedbrytes betydelig langsommere enn fritt klor og derfor vil kunne ha en begrensende effekt på mikrobiologisk vekst utover i ledningsnettet.

Avslutning

Avslutningsvis rettes en særlig takk til:

- Vidar Lund, forsker ved Avdeling for vannhygiene ved Folkehelseinstituttet, for å ha kommet med forslag til tema for mastergradsoppgaven og for å ha fungert som praktisk hovedveileder gjennom forsøksperioden.
- Øvrige ansatte ved Avdeling for vannhygiene for å ha gjort

forsøksperioden våren 2008 til en lærerik tid i et trivelig miljø.

- Jon Fredrik Hanssen, forsker ved UMB, for å ha stilt som tilleggsveileder innenfor fagfeltet miljømikrobiologi.
- VIV for å ha støttet innkjøp av frysetørrede bakteriesporer fra Østerrike.

Referanser

Ballester, N. A. & Malley, J. P. (2004). Sequential disinfection of adenovirus type 2 with UV-chlorine-chloramine. *Journal American Water Works Association*, 96 (10): 97-103.

Baxter, C. S., Hofmann, R., Templeton, M. R., Brown, M. & Andrews, R. C. (2007).

Inactivation of adenovirus types 2, 5, and 41 in drinking water by UV light, free chlorine, and monochloramine. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 133 (1): 95-103.

Butterfield, C. T. (1948). Bactericidal properties of chloramines and free chlorine in water.

Public Health Reports, 63 (29): 934-940.

Cho, M., Kim, J. H. & Yoon, J. (2006). Investigating synergism during sequential inactivation of *Bacillus subtilis* spores with several disinfectants. *Water Research*, 40 (15): 2911-2920.

Dow, S. M., Barbeau, B., von Gunten, U., Chandrakanth, M., Amy, G. & Hernandez, M.

(2006). The impact of selected water

- quality parameters on the inactivation of *Bacillus subtilis* spores by monochloramine and ozone. *Water Research*, 40 (2): 373-382.
- DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (1997). *UV Disinfection Devices for Drinking Water Supply - Requirements and Testing*. Technical Standard W294.
- HAI-SO GmbB (2007), *Sporodos – Bidosimeter. PRODUCT DESCRIPTION*. Datert 22. oktober 2007.
- Kouame, Y. & Haas, C. N. (1991). Inactivation of *Escherichia coli* by combined action of free chlorine and monochloramine. *Water Research*, 25 (9): 1027-1032.
- Larson, M. A. & Marinas, B. J. (2003). Inactivation of *Bacillus subtilis* spores with ozone and monochloramine. *Water Research*, 37 (4): 833-844.
- Lund, V. & Ormerod, K. (2005). Inaktivering av sporeformende bakterier i drikkevann og implikasjoner for framtidig desinfeksjonspraksis. VANN 2-2005: 121-129.
- Mamane-Gravetz, H. & Linden, K. G. (2004). UV disinfection of indigenous aerobic spores: implications for UV reactor validation in unfiltered waters. *Water Research*, 38 (12): 2898-2906.
- Sirikanchana, K., Shisler, J. L. & Marinas, B. J. (2008). Inactivation kinetics of adenovirus serotype 2 with monochloramine. *Water Research*, 42 (6): 1467-1474.
- White, G. C. (1999). *Handbook of chlorination and alternative disinfectants*. New York, Wiley. 1569 s.
- Wolfe, R. L., Ward, N. R. & Olson, B. H. (1984). Inorganic chloramines as drinking-water disinfectants - a review. *Journal American Water Works Association*, 76 (5): 74-88.
- Zhang, Y., Liu, W. & Zhang, L. (2006). Synergistic Disinfection of *Bacillus subtilis* Spores by UV Irradiation and Chlorine. *Environmental Science*, 27 (2): 329-332.
- ÖNORM – Österreichisches Normungsinstitut (2001). *Plants for the disinfection of water using ultraviolet radiation. Requirements and testing. Low pressure mercury lamp plants*. ÖNORM M 5873-1.