

**BTO 2005.057**  
December 2005

# **Vorming van bijproducten tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie**

Een overzicht

**BTO 2005.057**  
December 2005

# Vorming van bijproducten tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie

Een overzicht

© 2005 Kiwa N.V.  
Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag  
worden verveelvoudigd,  
opgeslagen in een  
geautomatiseerd  
gegevensbestand, of  
openbaar gemaakt, in enige  
vorm of op enige wijze,  
hetzij elektronisch,  
mechanisch, door  
fotokopieën, opnamen, of  
enig andere manier, zonder  
voorafgaande schriftelijke  
toestemming van de  
uitgever.

**Kiwa N.V.**  
**Water Research**  
Groningenhaven 7  
Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein

Telefoon 030 60 69 511  
Fax 030 60 61 165  
Internet [www.kiwa.nl](http://www.kiwa.nl)

# Colofon

**Titel**

Vorming van bijproducten tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie: een overzicht

**Projectnummer**

11.1469.012

**Projectmanager**

Erwin F. Beerendonk

**Kwaliteitsborger(s)**

Guus F. Ijpelaar en John van Genderen

**Auteur(s)**

Danny J.H. Harmsen en Minne B. Heringa

Dit rapport is verspreid onder medewerkers van BTO-participanten en is openbaar.

# Samenvatting

## *Aanleiding en doel*

Toepassing van UV-licht voor desinfectie van drinkwater wordt sinds eind jaren zeventig in Nederland toegepast. De toepassing van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> voor de omzetting van organische microverontreinigingen gecombineerd met desinfectie is van recentere datum. Tijdens het toepassen van UV-desinfectie of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie worden bijproducten gevormd. Het is van belang om inzichtelijk te krijgen welke effecten bijproductvorming tijdens toepassing van UV-desinfectie of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie op de waterkwaliteit kan hebben. In dit kader is het BTO onderzoek 'Vorming van bijproducten tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie: een overzicht' verricht.

Om een overzicht samen te stellen van de huidige kennis van vorming van bijproducten en degradatieproducten tijdens de toepassing van UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie is gebruik gemaakt van resultaten uit het bedrijfstakonderzoek, meetresultaten bij de waterleidingbedrijven en informatie uit de literatuur.

De resultaten zijn geëvalueerd met betrekking tot de toepasbaarheid/risico's met inachtneming van de watersamenstelling, type zuiveringsproces (UV of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), toegepaste technologie (lagedruk- en middendruklampen, kwartsbuizen met een 'cut-off' bij 240 nm) en de UV-dosis. Daarnaast zijn de witte vlekken vastgesteld ten aanzien van de noodzakelijke kennis om genoemde UV-processen beheerst te kunnen toepassen.

## *Bijproducten volgens de huidige stand van de techniek*

Bijproducten waarmee tijdens de toepassing van UV-processen rekening moet worden gehouden zijn nitriet, AOC (nagroei), algengroei, genotoxiciteit (mutageniteit) en degradatieproducten die tijdens de oxidatieve afbraak van organische microverontreinigingen zoals bestrijdingsmiddelen worden gevormd.

## *AOC, nitriet en algengroei*

Uit de verkregen meetgegevens/literatuurstudies komt naar voren dat nitriet- en AOC-vorming en algengroei tijdens UV-behandeling uitvoering zijn bestudeerd/beschreven. Tijdens UV-processen wordt nitriet gevormd uit nitraat en AOC uit organische stof (TOC/DOC). Hierbij absorberen nitraat volledig en organische stof hoofdzakelijk UV-licht in het golflengtegebied tussen 200 en 240 nm.

Uit metingen met praktijkinstallaties in Nederland en studies uitgevoerd in zowel Nederland als het buitenland komt naar voren dat AOC en nitriet worden gevormd tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie. De mate van vorming is sterk afhankelijk van het lamptype en de toegepaste dosis. Zo vindt bij gebruik van zowel lagedruklampen als bij middendruklampen met een cut-off bij 240 nm nauwelijks vorming van AOC en nitriet plaats. Dit is conform de verwachting. Bij gebruik van middendruklampen waarbij het

volle UV-C spectrum (200 – 285 nm) wordt benut, kunnen afhankelijk van de gebruikte dosis significante hoeveelheden AOC en nitriet worden gevormd. De AOC- en nitrietvorming is sterk afhankelijk van de watersamenstelling van het behandelde water. De vorming van AOC is voornamelijk afhankelijk van het DOC-gehalte en de concentratie en absorptie van andere stoffen die een negatieve invloed hebben op de UV-transmissie van het behandelde water. De nitrietvorming tijdens UV-processen wordt sterk bepaald door de nitraatconcentratie. Hoe hoger de nitraatconcentratie, des te hoger de nitrietvorming. Daarnaast hebben de UV-transmissie, de pH en het DOC-gehalte invloed op de vorming van nitriet waarbij de nitrietvorming toeneemt bij hogere pH en bij hogere DOC-gehalten. Kennis van de watersamenstelling van het behandelde water is dus belangrijk.

Tijdens UV-desinfectie van (voorbehandeld) natuurlijk water wordt AOC in enkele microgrammen Ac-C/l gevormd bij een dosis tussen 20 – 40 mJ/cm<sup>2</sup>. Bij een dosis van 70 mJ/cm<sup>2</sup> heeft Evides 6 – 8 µg Ac-C/l gemeten. De nitrietvorming tijdens UV-behandeling is sterk afhankelijk van de watersamenstelling. Indicatief kunnen de volgende getallen worden gegeven, gebaseerd op de toepassing van middendruklampen zonder cut-off en een initiële nitraatconcentratie van 8 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l: 5 – 20 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l tijdens UV-desinfectie bij een dosis van 20 – 40 mJ/cm<sup>2</sup> en 10 – 40 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l bij een dosis van 70 mJ/cm<sup>2</sup>. Tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie kan de nitrietconcentratie bij 8 mg/l nitraat oplopen tot enkele honderden microgrammen NO<sub>2</sub><sup>-</sup> per liter. De schaalgrootte kan een significante rol spelen bij de vorming van bijproducten tijdens UV-processen.

In het algemeen kan worden gesteld dat tijdens UV-desinfectie (> 70 mJ/cm<sup>2</sup>) en tijdens het UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> proces significante hoeveelheden AOC en nitriet worden gevormd. Een extra zuiveringsstap na UV is noodzakelijk om AOC en nitriet te verwijderen. De gevormde AOC kan effectief worden verwijderd door actieve-koolfilters met een voldoende hoge contacttijd na het oxidatieproces te plaatsen. Dit kan leiden tot een stimulans van de biologische processen in de koolfilters. Uit ervaring bij PWN blijkt dat nitriet effectief wordt verwijderd tijdens de nageschakelde actieve-koolfiltratie welke qua contacttijd gericht is op de omzetting van AOC.

Het fenomeen algengroei kan plaatsvinden tijdens UV-desinfectie en vooral in water met een lage UV-transmissie. Op plaatsen die niet door UV-licht, maar wel door zichtbaar licht worden bereikt, kan extreme groei van algen plaatsvinden. Algengroei treedt voornamelijk op bij toepassing van middendruklampen, maar ook bij gebruik van lagedruklampen kan dit proces plaatsvinden.

Er wordt nergens melding gemaakt van algengroei tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Waarschijnlijk overleven algen de hoge(re) UV-doses en het gebruik van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie niet.

#### *Toxiciteit*

Wat betreft vorming van toxische bijproducten tijdens UV-desinfectie of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> zijn studies uitgevoerd in zowel Nederland als het buitenland. Het

gaat hierbij vooral om studies uitgevoerd naar mutageniteit (Ames test) en clastogeniteit (chromosoom aberraties). Proefinstallatieonderzoek uitgevoerd door Evides in 2001 naar mutageniteit met de Amestest ('Reduction Equivalent Fluence': 60 mJ/cm<sup>2</sup>) toonde geen significante verhoging aan, maar er was wel een indicatie voor een toename in mutageniteit. Het beperkte aantal studies, met veel verschillende experimentele parameters, maakt het echter onmogelijk om duidelijke conclusies te trekken over de invloed van de relevante factoren. Het aantal studies naar de vorming van toxische producten bij UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> waarvan de resultaten zijn gepubliceerd, is zeer beperkt. Verder zijn er nog maar weinig verschillende toxische eindpunten (effecten, voor drinkwater gericht op genotoxiciteit en hormoonverstoring) bestudeerd. Veel studies geven (te) beperkte informatie over het UV-systeem, de samenstelling van het water, de opwerking van het water voor de chemische of toxicologische analyse en/of over de analysetechniek zelf.

Geconcludeerd wordt dat de kennis over eventuele vorming van toxische stoffen tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie onvoldoende is. Er zijn aanwijzingen dat toxische bijproducten gevormd kunnen worden bij toepassing van UV-licht in de drinkwaterzuivering, maar een duidelijk beeld op dit gebied is er niet. Derhalve is aanvullend onderzoek nodig.

#### *Degradatieproducten*

Over vorming van degradatieproducten, bijvoorbeeld van bestrijdingsmiddelen, tijdens UV-desinfectie of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> is zeer weinig bekend. Slechts éénmaal is melding gemaakt van onderzoek naar degradatieproducten na UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie. Vanwege de lage doses (< 100 mJ/cm<sup>2</sup>) is vorming van degradatieproducten tijdens UV-desinfectie niet te verwachten. De vorming van degradatieproducten speelt bij de toepassing van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> zeker een rol. Aanvullend onderzoek naar de aanwezigheid van degradatieproducten in het effluent van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatiesystemen en actieve-koolfilters gericht op toxiciteit is gewenst. Vanwege de mogelijke vorming van een scala aan degradatieproducten, is stofgericht onderzoek geen reële optie. Voorgesteld wordt om tot een somparameter te komen die de toxische effecten van degradatieproducten beschrijft. In geval van bestrijdingsmiddelen zoals atrazin waarvan de degradatieroute bekend is, kunnen de degradatieproducten desgewenst stofgericht worden geanalyseerd.

#### *Aanbevelingen*

Voorgesteld wordt om een uitgebreide studie uit te voeren met effectgerichte metingen naar de toxiciteit van het water na UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie. Het onderzoek zou hierbij gericht moeten zijn op mutageniteit/genotoxiciteit, clastogeniteit en hormoonverstoring.

Belangrijke parameters zijn:

- type lamp (lagedruk, middendruk, middendruk met een cut-off bij 240 nm);
- UV-dosis (UV-desinfectie) en UV- en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-dosis (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie);
- samenstelling van het behandelde water;
- fase van gezuiverd water na UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en na actieve-koolfiltratie.

Om installatie-effecten (schaalgrootte, voorkeurstroming) zoveel mogelijk te vermijden, is toepassing van een UV-installatie met voldoende grote capaciteit essentieel.

In een dergelijk uitgebreid onderzoek kunnen tevens de effecten van eventueel gevormde degradatieproducten worden meegenomen. Hiervoor wordt oxidatief behandeld water evenals effluent van actieve-koolfilters onderzocht. Het toxicologisch onderzoek kan desgewenst worden uitgebreid met een stofgerichte studie naar de vorming van bekende degradatieproducten en hun individueel toxisch effect.

# Voorwoord

In dit rapport is getracht een zo volledig mogelijk overzicht te geven van de huidige kennis van vorming van bijproducten tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie van voorbehandeld natuurlijk water in Nederland en buitenland.

Dit heeft ertoe geleid dat het rapport veel feiten en nieuwe informatie bevat waardoor sommige paragrafen als minder gemakkelijk leesbaar kunnen worden ervaren. Om hieraan tegemoet te komen, zijn in verschillende paragrafen tussentijdse conclusies opgenomen. Daarnaast bevat het rapport een uitgebreide samenvatting en een hoofdstuk gericht op evaluatie van en witte vlekken in de huidige kennis.





# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>1</b>
	<b>Voorwoord</b>	<b>5</b>
	<b>Inhoud</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>9</b>
1.1	Aanleiding en doel	9
1.2	Projectomschrijving	9
1.3	Opbrengsten	10
1.4	Uitvoering	10
<b>2</b>	<b>Achtergrond</b>	<b>11</b>
2.1	Werking van UV-licht	11
2.2	Lamptechnologie	11
2.3	Vorming van bijproducten	12
2.3.1	Nitrietvorming	12
2.3.2	AOC-vorming	13
2.3.3	Algengroei	14
2.3.4	Toxiciteit	15
2.3.4.1	Introductie	15
2.3.4.2	Aanpak toxiciteitsonderzoek	15
2.3.4.3	Conditie voor het ontstaan van toxische stoffen	16
2.4	UV-installaties	17
2.4.1	Fundamentele aspecten	17
2.4.2	UV-dosis	18
2.4.3	Monitoring	18
<b>3</b>	<b>Bijproductvorming bij UV-desinfectie</b>	<b>19</b>
3.1	Inleiding	19
3.2	Ervaringen nitrietvorming in Nederland	19
3.2.1	Lagedrukklampen	19
3.2.2	Middendrukklampen	20
3.2.3	Ervaringen nitrietvorming in het buitenland	21
3.3	AOC-vorming	23
3.3.1	Ervaringen in Nederland	23
3.3.2	AOC-vorming tijdens UV-behandeling in het buitenland	25
3.4	Algengroei	26
3.5	Toxiciteit	31
3.5.1	Ervaringen in Nederland	31
3.5.2	Ervaringen in het buitenland	31

<b>4</b>	<b>Bijproductvorming tijdens UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	<b>35</b>
4.1	Inleiding	35
4.2	Nitrietvorming	35
4.2.1	Ervaringen in Nederland	35
4.2.2	Ervaringen in het buitenland	35
4.3	AOC-vorming	36
4.4	Toxiciteit bij toepassing van UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	38
4.4.1	Ervaringen in Nederland	38
4.4.2	Ervaringen in het buitenland	38
<b>5</b>	<b>Evaluatie en witte vlekken</b>	<b>41</b>
5.1	AOC, nitriet en algengroei	41
5.2	Toxiciteit	42
5.3	Degradatieproducten	43
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>45</b>
6.1	Conclusies	45
6.2	Aanbevelingen	46
<b>7</b>	<b>Literatuur</b>	<b>49</b>

# 1 Introductie

## 1.1 Aanleiding en doel

Toepassing van UV-licht voor desinfectie van drinkwater wordt sinds eind jaren zeventig in Nederland toegepast. In het merendeel van de gevallen gaat het om nadesinfectie van het behandelde water ter verwijdering van *Aeromonas* of *E.coli* in grondwater of verlaging van de kolonieggetallen na toepassing van actieve-koolfiltratie (AKF).

Toepassing van nadesinfectie met UV-licht in Nederland gedurende meer dan twee decennia heeft veel kennis opgeleverd. In het onderzoekstraject naar toepassing van UV-licht voor primaire desinfectie bij de drinkwaterbereiding heeft Evides de vorming van ongewenste bijproducten bestudeerd. De toepassing van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> voor de omzetting van organische microverontreinigingen gecombineerd met desinfectie is van recentere datum. Na een diepgaand meerjarig onderzoek is de eerste UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-installatie in Nederland in oktober vorig jaar door PWN in gebruik genomen. Onder meer over de vorming van bijproducten tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> heeft PWN veel kennis opgedaan.

Alle partijen binnen de bedrijfstak zijn gebaat bij publicatie en evaluatie van de beschikbare meetresultaten. In de eerste plaats om inzichtelijk te hebben welke effecten toepassing van UV-technologie op de waterkwaliteit kan hebben. Bijproducten waarmee tijdens de toepassing van UV-processen rekening moet worden gehouden zijn nitriet, AOC (nagroei) en genotoxiciteit (mutageniteit). De vorming van afbraakproducten – dit zijn degradatieproducten die tijdens de oxidatieve afbraak van organische microverontreinigingen zoals bestrijdingsmiddelen worden gevormd – speelt bij de toepassing van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> zeker een rol. In de loop der jaren zijn analysemethoden voor het aantonen van bijproducten en afbraakproducten aanzienlijk verbeterd. Dit biedt de mogelijkheid om eventuele nadelige effecten van behandelingsprocessen inzichtelijk te maken. Op het gebied van genotoxiciteit zijn analysemethoden beschikbaar gekomen die, in tegenstelling tot de Amestest, zijn gericht op het effect voor de mens. Dit biedt bredere en diepere kennis over de eventuele aanwezigheid van genotoxische verbindingen na UV-behandeling. Toepassing van UV kan tot verhoging van het AOC-gehalte leiden. Het AOC-gehalte kan significant variëren wat gerelateerd is aan de waterkwaliteit en de toegepaste UV-technologie.

Bij het opstellen van een compleet overzicht wordt kenbaar op welke gebied kennis over vorming van bijproducten en afbraakproducten ontbeert. De bij de evaluatie aangetoonde witte vlekken kunnen aanleiding geven tot gericht aanvullend onderzoek.

## 1.2 Projectomschrijving

Maak gebruik van resultaten uit het BTO, meetresultaten bij de waterleidingbedrijven en informatie in de literatuur en afvalwaterzuivering om een overzicht op te stellen van de huidige kennis over de vorming van

bijproducten en afbraakproducten tijdens de toepassing van UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie.

Stel de witte vlekken vast ten aanzien van de noodzakelijke kennis om genoemde UV-processen beheerst te kunnen toepassen.

### **1.3 Opbrengsten**

Aan het eind van dit project staat de beschikbare kennis over toepassing van UV-technologie met betrekking tot bijproductvorming beschreven in een:

- BTO-rapport;
- H<sub>2</sub>O-artikel.

### **1.4 Uitvoering**

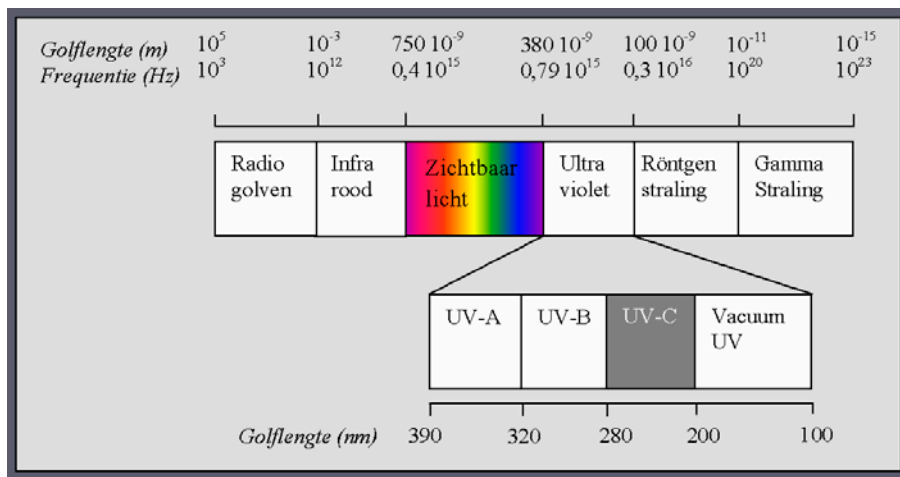
De door de waterleidingbedrijven en Kiwa (BTO) beschikbaar gestelde meetresultaten en kennis over bijproductvorming tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie van grond- en oppervlaktewater worden verzameld. De resultaten worden geëvalueerd met betrekking tot de toepasbaarheid/risico's met inachtneming van de waterkwaliteit, type zuiveringsproces (UV of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en toegepaste technologie (lagedruk- en middendrukklampen, kwartsbuizen op basis van gedoteerd kwarts en de UV-dosis).

Waterbedrijven in Nederland die UV-technologie toepassen, zijn gevraagd hun kennis over bijproductvorming tijdens UV-processen voor dit project beschikbaar te stellen.

## 2 Achtergrond

### 2.1 Werking van UV-licht

In het elektromagnetisch spectrum neemt UV-licht de plaats in tussen Röntgenstraling ( $\leq 10$  nm) en zichtbaar licht ( $> 400$  nm). Het bereik van UV-licht is tussen 10 en 390 nm (zie figuur 2.1). Het meest toegepaste deel (390 – 200 nm) is onderverdeeld in UV-A (390 – 315 nm), UV-B (315 – 280 nm) en UV-C (280 – 200 nm).



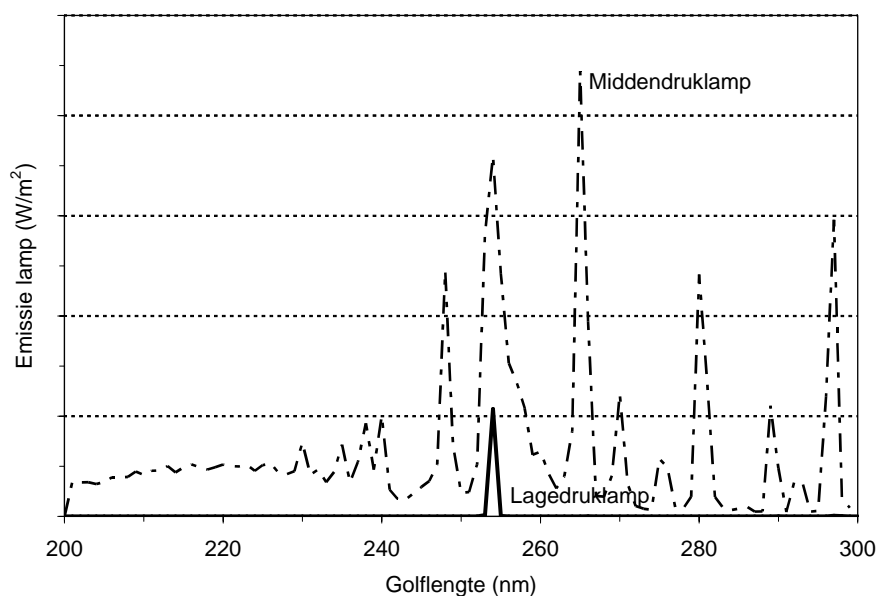
Figuur 2.1: Elektromagnetisch spectrum.

Voor toepassing van UV-licht voor desinfectie is UV-C licht van belang. UV-licht bestaat uit distincte energiepakketjes (*fotonen*) waarmee het doel (micro-organismen of chemische verbindingen) wordt gebombardeerd. In het algemeen geldt dat hoe lager de golflengte van het licht hoe hoger de energie. Indien de energie van het licht – deze is dus golflengteafhankelijk – gelijk is aan het energieverval tussen de grondtoestand en de aangeslagen toestand van een atoom kunnen chemische (covalente) bindingen tussen atomen in een molecuul worden verbroken. Voorbeeld is de vorming van nitriet ( $\text{NO}_2^-$ ) uit nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ) door absorptie van UV-licht. Als gevolg hiervan wordt een N-O binding verbroken. Hieruit volgt dat UV-licht reducerend van aard is en niet oxiderend! Het verbreken van chemische bindingen in moleculen door UV-licht wordt ook wel *fotolyse* genoemd. Volgens de wet van Grothius-Dräper (1<sup>e</sup> wet in de fotochemie) zijn alleen die fotonen actief die geabsorbeerd zijn.

### 2.2 Lamptechnologie

Om iets te kunnen zeggen over de intensiteit van UV-licht en het effect op de vorming van bijproducten dienen eerst de UV-lampen te worden toegelicht. De conventionele kwiklampen zijn gebaseerd op het aanslaan van het in gasvorm gebrachte kwik in de lamp. Vanuit de aangeslagen toestand vallen de kwikatomen terug naar de grondtoestand onder uitzending van UV-licht.

Volgens dit principe worden voor desinfectie van water lagedruklampen (LD-UV) en middendruklampen (MD-UV) onderscheiden. Het direct waarneembare verschil tussen LD-UV en MD-UV zit in het geëmitteerde spectrum. De lage druk in LD-UV lampen ( $\sim 1$  Pa ofwel  $10^{-5}$  atm) zorgt voor een smalle, maar sterke piek in het UV-spectrum bij 253,7 nm. Als gevolg van de veel hogere druk in MD-UV lampen ( $10^4 - 10^6$  Pa) wordt een breed spectrum uitgezonden van  $<200$  nm tot ver voorbij de grens waarin UV-licht wordt uitgezonden (zie figuur 2.2). Hieruit volgt dat MD-UV lampen niet alleen UV-licht maar ook zichtbaar licht uitzenden (vandaar dat UV-licht 'blauw' ziet). Het vermogen van LD-UV lampen is typisch in het bereik 4 - 120 Watt. Lagedruklampen met een hoog vermogen ('low-pressure high-output', LP-HO) maken veelal gebruik van een kwiklegering. De huidige generatie LP-HO lampen hebben een vermogen tot circa 400 Watt, terwijl er signalen zijn dat het vermogen van dit type lamp naar verwachting hoger zal worden. Daarnaast, in tegenstelling tot de conventionele lagedruk kwiklampen, is de emissie van deze lampen min of meer ongevoelig voor de omgevingstemperatuur in het bereik 5 - 40 °C (Van der Pol en Krijnen, 2005). Echter, middendruklampen zijn te verkrijgen met een vermogen tot circa 30 kiloWatt.



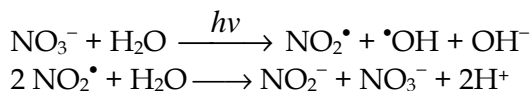
Figuur 2.2: Emissiespectra van een lagedruk- en een middendruklamp (bron: Berson UV-techniek).

## 2.3 Vorming van bijproducten

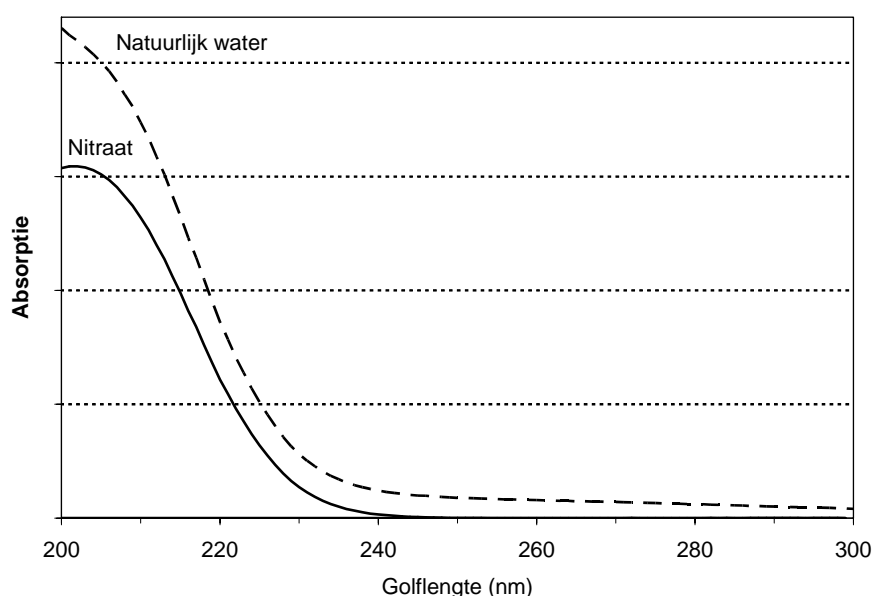
### 2.3.1 Nitrietvorming

Nitrat absorbeert UV-licht tussen  $<200$  en 240 nm waarbij nitriet wordt gevormd. Dit is een complex proces waarbij ook diverse waterkwaliteitsparameters zoals de nitraatconcentratie en de pH van het water betrokken zijn (Ijpelaar *et al.*, 2005a). De transmissie (doordringbaarheid) van water voor licht van lage golflengten is echter gering waardoor in de praktijk golflengten  $< 200$  nm worden tegengehouden.

Dit betekent dat nitrietvorming in praktijkinstallaties gebaseerd is op de absorptie van UV-licht door nitraat in het 200 - ~ 240 nm golflengtegebied (zie figuur 2.3). In vereenvoudigde vorm kan dit proces als volgt worden weergegeven:



Ondanks het feit dat de meeste natuurlijke waterkwaliteiten in Nederland in meer of mindere mate nitraat bevatten (variërend van enkele tienden van milligrammen tot circa 50 mg/l) hoeft nitrietvorming niet op te treden. Indien de UV-installatie is voorzien van lagedrukklampen zal nitrietvorming niet of nauwelijks optreden. Met middendrukklampen zonder cut-off kan nitrietvorming in water met nitraat niet worden voorkomen.



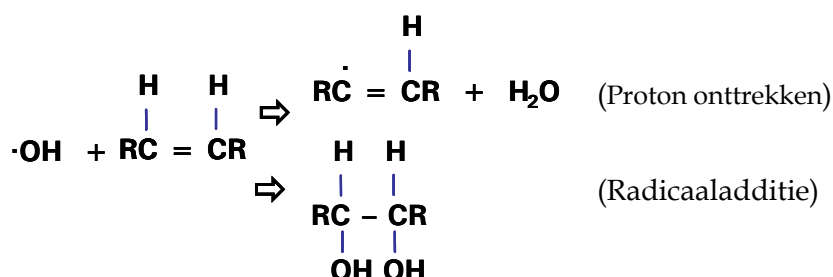
Figuur 2.3: Absorptiespectrum van nitraat en van een typisch natuurlijk water.

### 2.3.2 AOC-vorming

Assimileerbaar organische koolstof (AOC) is een algemene benaming voor organische verbindingen die relatief eenvoudig door micro-organismen worden geconsumeerd. Het betreft vaak kleine organische zuren zoals carboxylzuren (bijvoorbeeld mierzuur, oxaalzuur en azijnzuur). Veruit het grootste deel van het AOC wordt gevormd uit de opgeloste natuurlijke organische matrix (DOC). Deze onder meer uit humuszuren en fulvinezuren bestaande matrix zit in zowel grond- als oppervlaktewater, maar kan per locatie van karakter verschillen. DOC absorbeert UV-licht vooral tussen 200 en circa 230 nm (zie de curve van natuurlijk water in figuur 2.3). Voor de vorming van AOC kan geen algemeen geldende (set van) reactievergelijking(en) worden gegeven.



Grofweg kan het mechanisme worden opgesplitst in een reductieproces en een oxidatieproces. Bij het reductieproces worden bindingen (zoals C - C, C - N, N - O bindingen) in de organische moleculen verbroken, geïnduceerd door toevoer van energie zoals via UV-licht. Het oxidatieproces kenmerkt zich door de additie van een oxiderend molecuul (O<sub>3</sub> of het hydroxylradicaal, •OH) aan de organische verbinding. Hierbij wordt een polair product gevormd of een intermediair dat vervolgens uiteenvalt in kleinere organische verbindingen. De volgende vergelijkingen kunnen als voorbeeld worden gezien:



### 2.3.3 Algen groei

Een verschijnsel dat kan optreden tijdens UV-desinfectie met kwiklampen is de groei van algen. Dit ongewenste effect is het gevolg van het feit dat kwiklampen in meer (middendruklampen) of mindere (lagedruklampen) mate zichtbaar licht uitzenden waardoor fotosynthese kan plaatsvinden. Bij het aanslaan van kwik in UV-lampen wordt UV-licht en zichtbaar licht geëmitteerd. Door absorptie van het zichtbare licht zijn algen in staat via fotosynthese te groeien. Dit fenomeen vindt plaats in leidingen kort voor en na UV-reactoren wordt veroorzaakt doordat zichtbaar licht verder in water doordringt dan UV-C straling. Algen groei treedt dan ook vooral op in water met een relatief lage transmissie voor UV-C licht. Algen die tijdens hun verblijf in de UV-reactor niet zijn geïnactiveerd, kunnen zich hechten aan de wand van de leiding buiten de UV-reactor en zich vervolgens uitbreiden. Theoretisch is bij gebruik van lagedruk UV-lampen niet of nauwelijks algen groei te verwachten, omdat bij deze lampen het aandeel zichtbaar licht slechts circa 5% is. Toch wordt ook bij installaties met lagedruklampen algen groei geconstateerd. Leveranciers en gebruikers van installaties voor UV-desinfectie melden algen groei bij gebruik van vooral middendruk UV-lampen. Het aandeel aan zichtbaar licht dat middendruklampen uitzenden, kan tot circa 25% van de totale emissie bedragen. Het effect hiervan kan worden versterkt doordat UV-licht wordt gereflecteerd door de reactorwanden en leidingen die veelal van RVS zijn gemaakt. In welke mate algen groei door de meeste van deze factoren wordt beïnvloed, is niet aan te geven.

## 2.3.4 Toxiciteit

### 2.3.4.1 Introductie

Er wordt wel beweerd dat, omdat UV niet oxiderend maar reducerend van karakter is, er geen toxische bijproducten kunnen ontstaan (Kennicott, 2002). Met UV (met in name in combinatie met H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) worden chemische bindingen tussen atomen verbroken, waardoor grote organische moleculen worden afgebroken tot kleine(re) moleculen. Er wordt verondersteld dat deze kleinere moleculen minder toxisch zijn (Rapaport, 1994). Dit zou inderdaad het geval zijn bij totale mineralisatie van de organische moleculen tot onder meer CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O. In de literatuur wordt echter nauwelijks totale mineralisatie gerapporteerd en wordt melding gemaakt van het ontstaan van organische tussenproducten (b.v. Andreozzi *et al.*, 2003; Chang en Young, 2000; Lau *et al.*, 2005; Trapido *et al.*, 1997). Met name bij toepassing van geavanceerde oxidatie met H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kunnen deze tussenproducten juist toxischer zijn dan de uitgangsstoffen. Door toevoeging van een OH-groep bijvoorbeeld, worden de stoffen meer polair, waardoor ze toxischer kunnen worden. Naar inschatting van de auteurs kan daarom UV-behandeling, vooral gericht op oxidatie, leiden tot reactievere (= meer toxische) bijproducten.

### 2.3.4.2 Aanpak toxiciteitsonderzoek

Om te onderzoeken of er toxische bijproducten ontstaan bij behandeling met UV, kan stofgericht of effectgericht worden gemeten. Bij stofgerichte metingen wordt specifiek naar de aanwezigheid van bepaalde stoffen gekeken, waarna de gegevens over de toxiciteit in de openbare literatuur kunnen worden opgezocht. Daarnaast kunnen effectgerichte metingen toegepast worden: metingen naar de mate waarin het watermonster een bepaald toxisch effect geeft voor en na UV-behandeling. Daarbij hoeft niet bekend te zijn welke stoffen gevormd worden, maar kan een inschatting worden gemaakt van het gezondheidsrisico.

Stoffen kunnen diverse toxische effecten veroorzaken. Om na te gaan of er toxische bijproducten worden gevormd door een zuiveringstechniek, zou dus in principe naar alle verschillende effecten gekeken moeten worden. Echter, omdat de concentraties van stoffen in de bron veelal laag zijn, zullen de concentraties aan bijproducten eveneens laag zijn. Bij deze lage concentraties zijn over het algemeen maar een beperkt aantal toxische effecten relevant, zoals genotoxiciteit, carcinogeniteit en hormoonverstoring. Genotoxiciteit is het effect van DNA schade, wat tot kanker kan leiden. Carcinogeniteit kan echter ook op andere manieren plaatsvinden dan via genotoxiciteit. Het is echter nog niet praktisch om watermonsters na UV-bestraling te testen op carcinogeniteit, omdat de testen hiervoor uitgevoerd worden in ratten en 2 jaar duren (OECD Richtlijn nummer 453). Onderzoek naar het ontstaan van toxische bijproducten zou zich dus vooral moeten richten op verhoging van genotoxiciteit en/of het hormoonverstoring vermogen in behandelde watermonsters.

Er zijn twee vormen van DNA schade: genmutaties en chromosoom aberraties. Bij mutaties wordt het DNA op kleine schaal beschadigd, door verandering van de code. Bij chromosoom aberraties wordt het DNA op grote schaal beschadigd, bijvoorbeeld door breuken in de chromosomen. Stoffen

die breuken in het DNA veroorzaken worden clastogeen genoemd. Er zijn verschillende testen voor de twee vormen van genotoxiciteit: mutageniteitstesten zoals de Amestest en chromosoom aberratietesten zoals de 'Comet assay' en de 'micronucleus assay'. Voor beide soorten genotoxiciteit zou moeten worden getest.

Bij de Amestest worden nog eens verschillende stammen van de bacterie *Salmonella typhimurium* gebruikt, de bekendste zijn TA98 en TA100. Deze stammen detecteren verschillende soorten mutageniteit. Daarnaast wordt de Amestest uitgevoerd met en zonder S9, wat een mix is van metaboliserende enzymen. Die enzymen kunnen onschuldige stoffen omzetten in mutagene stoffen, zoals dat in het menselijk lichaam ook kan gebeuren. Bij de Amestest worden de bacteriën blootgesteld aan een reeks verdunningen van een geconcentreerd extract van een watermonster. De hoeveelheid van een stof in een dergelijke verdunning is equivalent aan de hoeveelheid in een bepaald aantal liter van het watermonster. Daarom wordt deze dosering uitgedrukt in liter equivalenten (L eq). De gemeten respons van de bacteriën is het aantal revertanten, ofwel het aantal bacteriën waarin een specifieke mutatie is opgetreden. Ook zonder de aanwezigheid van een mutagene stof treden mutaties op, zoals te zien is bij de controle. Deze gemuteerde bacteriën heten spontane revertanten. Een stof is pas als mutageen te beschouwen als het significant meer revertanten veroorzaakt dan het aantal spontane revertanten. Bij Kiwa is altijd de norm geweest dat een stof pas mutageen is als er bij 1 liter equivalent minstens twee keer zoveel revertanten gevonden zijn dan het aantal spontane revertanten, en er een lineaire relatie is gevonden tussen de opklimmende dosis en de stijging in het aantal revertanten.

Voor hormoonverstoring bestaan ook verschillende testen, elk voor een ander hormoonsoort: oestrogenen, progestagenen (zwangerschapshormoon-achtigen), androgenen (zoals testosteron) en thyroïd (schildklier) hormonen.

#### 2.3.4.3 *Conditie voor het ontstaan van toxische stoffen*

Belangrijke theoretische voorwaarden voor het ontstaan van nieuwe (mogelijk toxische) stoffen door UV straling zijn:

- de aanwezigheid van verontreinigingen in het water (de precursors);
- de golflengte van de straling (chemische verbindingen absorberen UV; vooral bij een golflengte kleiner dan 240 nm, zie ook Kruithof *et al.* (2000);
- de aanwezigheid van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>;
- de UV-dosis;
- de mate waarin de straling doordringt in het water (UV transmissie van het water).

Belangrijke voorwaarden voor het detecteren van toxiciteit zijn:

- effectgericht meten in plaats van stofgericht;
- het toxisch eindpunt van de test (mutaties, chromosoom aberraties, oestrogeniteit, etc.);
- de gevoeligheid van de test;
- de voorbehandeling (invloed op verlies van stoffen) en concentratiefactor van het watermonster;
- aanwezigheid van bindende macromoleculen, die de toxische werking van gebonden stoffen verhinderen of maskeren.

Al deze voorwaarden worden zo veel mogelijk meegenomen in het overzicht van gevonden bijproducten na behandeling met UV-licht (desinfectie en oxidatie).

## 2.4 UV-installaties

### 2.4.1 Fundamentele aspecten

Het ontwerp en opbouw van een UV-reactor is niet zo simpel als een "buis met lampen". Om elk volume water de benodigde UV dosis te geven, is het van belang dat de spreiding in UV-intensiteit over en verblijftijd van het water in de reactor zo klein mogelijk is. Als hieraan wordt voldaan, zal de variatie in UV-dosis dat elk volume water dat de reactor doorloopt minimaal zijn. De ideale situatie – geen spreiding in intensiteit en verblijftijd en dus geen kortsluitstroming – wordt echter nooit verkregen.

Het stromingsprofiel in een lange rechte buis wordt verstoord als het water de reactor ingaat. Dit is het gevolg van (1) de overgang van de ene geometrie (pijp) naar de andere geometrie (die van de reactor) en (2) het botsen van het water tegen de UV-lampen. Als gevolg hiervan ontstaan snelheidsverschillen van het water in de reactor. Om het nadelige effect van het eerste punt te minimaliseren, is het van belang dat de overgang van buis naar reactor zo gelijkmatig mogelijk verloopt. Ondanks dat dit vrij logisch klinkt, is het niet zo gemakkelijk. Het feit dat diverse reactormodellen commercieel beschikbaar zijn die qua geometrie sterk verschillen, illustreert dit. De laatste jaren maken producenten van UV-reactoren in toenemende mate gebruik van computermodellen om de stroming te karakteriseren en te optimaliseren. Deze modellen zijn veelal gebaseerd op "Computational Fluid Dynamics" (CFD). Bij deze techniek wordt de reactor middels een 3-dimensionaal raster in een groot aantal zeer kleine volumina verdeeld. De waarde van parameters die de stroming bepalen, wordt in het model ingevoerd, zoals onder meer de geometrie van de reactor en de geometrie van 'obstakels' zoals de UV-lampen, de stromingssnelheid  $v_0$ , het karakter van de vloeistof zoals o.a. de viscositeit. Ook het aantal lampen en de plaatsing van de lampen in de reactor wordt hier meegenomen. Vervolgens wordt in elk klein volume de stroming bepaald. Zodoende wordt een groot aantal stromingslijnen door de reactor berekend waaruit stromingsprofielen over het reactorvolume kunnen worden opgesteld.

Om een optimale lichtintensiteit en verdeling ervan over het volume van de reactor te realiseren, dienen keuzes te worden gemaakt ten aanzien van het lampvermogen en (daarmee) het aantal lampen. De verdeling van de UV-intensiteit over het reactorvolume wordt sterk bepaald door de transmissie van het te behandelen water. De combinatie van stromingssnelheid (waterdebiet) en locale UV-intensiteit bepalen welke UV-dosis het water ter plekke ontvangt. Zo wordt de UV-dosis langs de stromingslijn dat een "waterdeeltje" door de reactor volgt opgebouwd. Bij een (te) lage transmissie ontvangt het water dat op grotere afstand de lamp passeert een te lage UV-intensiteit. Het gevolg is dat de "waterdeeltjes" die langs deze lijn door de reactor stromen per saldo een te lage UV-dosis opbouwen. Hierbij is geen

sprake van kortsluitstroming, maar een verkeerde afstemming van lampvermogen en waterdebiet ten opzichte van de kwaliteit (transmissie) van het inkomende water.

#### 2.4.2 *UV-dosis*

De UV-dosis is een belangrijke parameter voor het goed functioneren van UV-installaties gericht op het produceren van de gewenste waterkwaliteit. Voor de eenheid van de UV-dosis worden nationaal en internationaal  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  en  $\text{J}/\text{m}^2$  vaak gebruikt ( $1 \text{ mJ}/\text{cm}^2 = 10 \text{ J}/\text{m}^2$ ). Daarnaast wordt de dosering ook wel als elektrisch vermogen, uitgedrukt in  $\text{kWh}/\text{m}^3$ , aangeduid. De waarde in  $\text{kWh}/\text{m}^3$  kan niet zomaar met behulp van een omrekeningsfactor worden omgezet in de UV-dosis. Aspecten zoals de stroming en de verdeling van UV-licht over het volume van de reactor hebben invloed op de omrekening. Zoals in de vorige paragraaf al aangegeven voor het karakteriseren van reactoren wordt CFD ook steeds vaker gebruikt bij het berekenen van de UV-dosis. Ondanks de hoge importantie van de juiste UV-dosis wordt in veel (oudere) publicaties vaak niet vermeld hoe de dosis is bepaald.

De UV-dosis voor desinfectiedoeleinden wordt doorgaans anders bepaald dan de dosis voor de omzetting van chemische verbindingen. De rekenkundige desinfectiedosis wordt vaak (maar zeker niet altijd) bepaald door te corrigeren voor de absorptie door DNA. Dit is belangrijk omdat niet elke golflengte even effectief is voor het realiseren van de benodigde DNA-schade. Omdat is gebleken dat de berekende dosis vaak afwijkt van de werkelijke dosis wordt de werkelijke dosis in toenemende mate met biosimetrie vastgesteld. Hierbij wordt een bekende concentratie van gekalibreerde micro-organismen door de reactor geleid. Na vaststelling van het aantal geïnactiveerde cq. afgedode micro-organismen wordt de (biosimetrische) UV-dosis met behulp van de kalibratielijne bepaald.

#### 2.4.3 *Monitoring*

Uit het voorgaande volgt dat de aan het water geleverde dosis gevoelig is voor variatie in de watertransmissie en -debiet en het (totale) lampvermogen. Variaties in waterdebiet kunnen worden beperkt. Echter, de UV-intensiteit van de lampen neemt af door veroudering van het kwartsglas. Daarnaast zijn fluctuaties in waterkwaliteit nauwelijks te voorkomen. Om te garanderen dat water ten allen tijden afdoende wordt gedesinfecteerd, is het van belang dat de lampintensiteit en de watertransmissie continue worden gemonitord.

## 3 Bijproductvorming bij UV-desinfectie

### 3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten en ervaringen van studies naar bijproductvorming tijdens UV-desinfectie in Nederland en het buitenland. De resultaten van de ervaringen en studies naar UV-desinfectie in Nederland zijn samengevat in tabel 3.3.

Bij studies naar bijproductvorming tijdens UV-desinfectie in het buitenland wordt tijdens de experimenten na UV-desinfectie regelmatig chloor toegevoegd. Dit is begrijpelijk omdat bij drinkwaterzuivering in het buitenland op veel plaatsen desinfectie door middel van chloring wettelijk verplicht is. Studies waarbij chloor wordt toegevoegd aan het behandelde water worden in dit rapport niet vermeld, daar het principe van chloring na UV niet van toepassing is op de Nederlandse situatie.

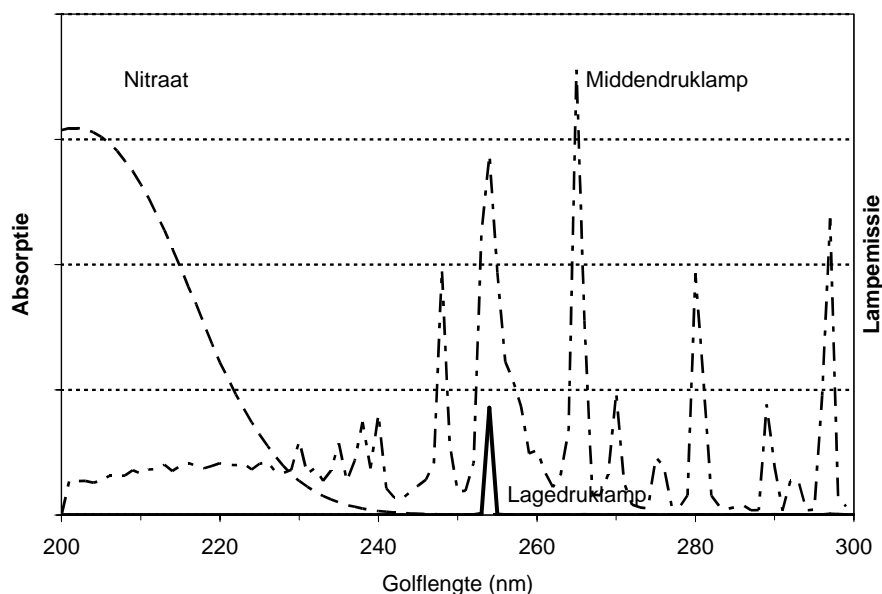
De resultaten van studies in het buitenland naar bijproductvorming tijdens UV-desinfectie staan samengevat in tabel 3.4. In tabel 3.5 staan de resultaten van buitenlandse studies naar bijproductvorming tijdens UV-desinfectie in afvalwater. De tabellen 3.3, 3.4 en 3.5 staan aan het eind van dit hoofdstuk.

### 3.2 Ervaringen nitrietvorming in Nederland

#### 3.2.1 Lagedruklampen

Nitriet wordt onder invloed van UV-licht gevormd uit nitraat. De vorming van nitriet is sterk afhankelijk van het type lamp dat wordt gebruikt en de watersamenstelling van het behandelde water. Zo wordt bij het gebruik van een lagedruklamp nauwelijks nitriet gevormd. Uit gegevens ontvangen van Vitens over ps Weerseloseweg waarbij gebruik wordt gemaakt van een installatie met lagedruklampen blijkt dat de gemiddelde concentratie van nitriet na UV <math><10 \mu\text{g NO}\_2/\text{l}</math> is (8,6 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$ ; UV-transmissie (UV-T): 90%). Ijpelaar en Beerendonk (2001) vonden in een laboratoriumopstelling (waterdiepte, gedefinieerd als de afstand lamp - reactorwand: 0,5 cm, lagedruklamp) geen nitriet na behandeling van snelfiltraat van de Berenplaat (10,6 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$ ; UV-dosis: 91  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ). Tijdens onderzoek uitgevoerd met een collimated beam laboratoriumopstelling voorzien van een lagedruk UV-lamp op voorbehandeld IJsselmeerwater (14 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$ ; UV-dosis: 123  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) werd 7  $\mu\text{g NO}_2/\text{l}$  gemeten (Ijpelaar *et al.*, 2005a).

Dat nitrietvorming bij gebruik van lagedruklampen nauwelijks optreedt, is te verklaren doordat 253,7 nm UV-licht dat wordt geëmitteerd door lagedruklampen niet noemenswaardig door nitraat wordt geabsorbeerd (zie figuur 3.1). In alle gevallen blijkt de vorming van nitriet in systemen uitgevoerd met lagedruklampen ver onder de norm voor drinkwater van 100  $\mu\text{g NO}_2/\text{l}$  uit te vallen zoals aangegeven in het waterleidingbesluit (Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden, 2001).



Figuur 3.1: Absorptiespectrum van nitraat en de emissiespectra van een lagedruk- en een middendruk lamp.

### 3.2.2 Middendruk lampen

Ook uit studies waarbij gebruik werd gemaakt van middendruk lampen met een cut-off van 240 nm, blijkt dat nitrietvorming niet optreedt (Oostelbos en van Staveren, 1995; Ijpelaar en Beerendonk, 2001). De praktijkinstallatie in het onderzoek van Oostelbos en van Staveren was geplaatst op het reine water van ps. Buren (UV-T: 82%) waarbij UV-doses tot 14000 mJ/cm<sup>2</sup> werden toegepast. Het is niet duidelijk hoe deze doses waren bepaald. In overeenstemming met lagedruk lampen wordt UV-licht dat door middendruk lampen met een cut-off bij 240 nm (licht met golflengte < 240 nm wordt eruit gefilterd) wordt uitgezonden niet door nitraat geabsorbeerd. Bij middendruk lampen waarbij het volle spectrum (200 - 400 nm) wordt toegepast, wordt wel melding gemaakt van nitrietvorming. Resultaten van onderzoek met behulp van een collimated beam laboratoriumopstelling tonen aan dat nitrietvorming door UV sterk afhankelijk is van de watersamenstelling. Nitraat is de belangrijkste parameter voor de mate van nitrietvorming: hoe hoger de nitraatconcentratie, hoe hoger de nitrietvorming. Daarnaast hebben de UV-transmissie, de pH en het DOC-gehalte invloed waarbij de nitrietvorming toeneemt bij hogere pH en bij hogere DOC-gehalten. Tabel 3.1 toont de resultaten van het collimated beam onderzoek (Ijpelaar *et al.*, 2005a).

Tabel 3.1 Invloed watersamenstelling op vorming van nitriet tijdens UV-behandeling uitgevoerd met een collimated beam laboratoriumopstelling (Ijpelaar et al., 2005a).

Dosis	Bijproduct	Watersamenstelling		
	Nitriet	Nitraat	DOC	pH
mJ/cm <sup>2</sup>	µg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /l	mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	mg C/l	
20	20	3,5	3	7,87
70	70	3,5	3	7,87
70	105	15	3	7,87
70	100	12,3	4,1	7,00
70	140	12,3	4,1	9,05
70	65	3,5	3	7,87
70	75	2,9	4,6	7,89

Uit de resultaten van metingen uitgevoerd door Evides op de Berenplaat waarbij gebruik wordt gemaakt van middendruklampen blijkt dat significante hoeveelheden nitriet worden gevormd. In Biesboschwater met een nitraatgehalte van 15 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l werd 20 - 40 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l gevormd bij een met biosimetrie bepaalde UV-dosis van 70 mJ/cm<sup>2</sup>. De nitrietvorming in Biesboschwater met een nitraatgehalte van 8 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l bedroeg 10 - 20 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l bij een dosis van 70 mJ/cm<sup>2</sup>. Deze resultaten bevestigen dat de nitrietvorming sterk afhankelijk is van de watersamenstelling met nitraat als belangrijkste parameter. Ook op locatie Ceintuurbaan (Vitens) is nitrietvorming geconstateerd tijdens UV-desinfectie met middendruklampen. Gemiddeld genomen werd 20 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l gemeten bij een dosis van 25 mJ/cm<sup>2</sup> en een nitraatconcentratie van het water van 3,6 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l. Deze waarden komen overeen met de resultaten van het onderzoek met behulp van een collimated beam laboratoriumopstelling voorzien van een middendruklamp. Tijdens dit onderzoek werd IJsselmeerwater (3,5 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> /l; DOC: 3 mg C/l; pH 7,87) behandeld. Bij een dosis van 20 mJ/cm<sup>2</sup> werd 20 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l gevormd (Ijpelaar *et al.*, 2005a).

### 3.2.3 Ervaringen nitrietvorming in het buitenland

In de literatuur wordt nauwelijks melding gemaakt van nitrietvorming tijdens UV of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> met een lagedrukklamp. Volgens metingen van Von Sonntag en medewerkers (1992) wordt in water met 50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l bij toepassing van een lagedrukklamp 1,8 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l gevormd. De berekende UV-dosis bedroeg 25 mJ/cm<sup>2</sup>.

Bij gebruik van een middendrukklamp met een cut-off bij 235 nm werd 30 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l gevormd (50 mg/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l) bij een dosis van 50 mJ/cm<sup>2</sup> (Bernhardt, 1994). Onder dezelfde condities (50 mg/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l; 50 mJ/cm<sup>2</sup>) werd 147 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l gevormd bij toepassing van een middendrukklamp met het volledige spectrum. Resultaten van onderzoek uitgevoerd door Sharpless en Linden (2001) met behulp van een collimated beam laboratoriumopstelling (middendrukklamp) tonen aan dat nitrietvorming door UV sterk afhankelijk is van de watersamenstelling. Uit de resultaten kan worden geconcludeerd dat



nitraat de belangrijkste parameter is voor de mate van nitrietvorming: hoe hoger de nitraatconcentratie, hoe hoger de vormingsgraad van nitriet. Daarnaast hebben ook de UV-transmissie, de pH en het DOC gehalte invloed op de nitrietvorming. De vorming van nitriet neemt toe bij een hogere pH en bij hogere DOC gehalten.

Tabel 3.2 geeft de resultaten weer van het collimated beam onderzoek uitgevoerd door Sharpless en Linden (2001). De resultaten van dit onderzoek bevestigen de uitkomst van het onderzoek beschreven door Ijpelaar en medewerkers (2005a). Verschil in beide onderzoeken is het initiële nitraatgehalte van het water: in het Amerikaans onderzoek was dit 3 tot 10 keer hoger dan in het Nederlandse onderzoek.

Tabel 3.2 Invloed watersamenstelling op vorming van nitriet tijdens behandeling met UV-licht (Sharpless en Linden, 2001).

Dosis mJ/cm <sup>2</sup>	bijproduct	watersamenstelling		
	Nitriet µg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /l	Nitraat mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	DOC mg C/l	pH
20	184	45	5	8
20	242	45	15	8
20	110	45	5	6

Peldszus *et al.* (2000) hebben proefinstallatieonderzoek uitgevoerd met een doorstroomreactor (middendrukklampen). De installatie was aan het eind van het zuiveringsproces geplaatst. Bij doses tussen de 500 en 2000 mJ/cm<sup>2</sup> wordt 150 tot 500 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l gevormd. Het behandelde water bevatte 19 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l. Vertaald naar Nederlandse eisen voor UV-desinfectie, mag worden aangenomen dat het nitrietgehalte bij UV-doses in het desinfectiegebied (< 100 mJ/cm<sup>2</sup>) volgens dit onderzoek onder de gestelde norm voor drinkwater in Nederland blijft.

## Conclusies

- Nitriet wordt onder invloed van UV-licht gevormd uit nitraat.
- Gemeten nitrietconcentraties tijdens UV-desinfectie met lagedrukklampen of bij gebruik van middendrukklampen met een 'cut-off' bij 240 nm zijn verwaarloosbaar:  $< 10 \text{ NO}_2^-/\text{l}$ .
- Nitrietvorming bij toepassing van middendrukklampen met het volle spectrum is doorgaans wel significant. Vanwege het feit dat nitraat in het golflengtegebied tussen 200 en 240 nm absorbeert, is dit conform de verwachting.
- De mate waarin nitrietvorming optreedt, wordt sterk bepaald door de watersamenstelling en de schaalgrootte.  
De nitrietvorming neemt toe naar mate de nitraatconcentratie, de DOC concentratie of de pH hoger zijn. Het effect van de nitraatconcentratie in het te behandelen water is hierbij het grootst.  
Kleine laboratoriuminstallaties kunnen een vertekend beeld geven waardoor de resultaten niet naar praktijkinstallaties kunnen worden vertaald.
- Afhankelijk van de watersamenstelling en de toegepaste UV-dosis kan de gevormde hoeveelheid nitriet aanleiding geven tot aanvullende behandeling.
- De ervaringen in het buitenland zijn overeenkomstig de resultaten in Nederland.

## 3.3 AOC-vorming

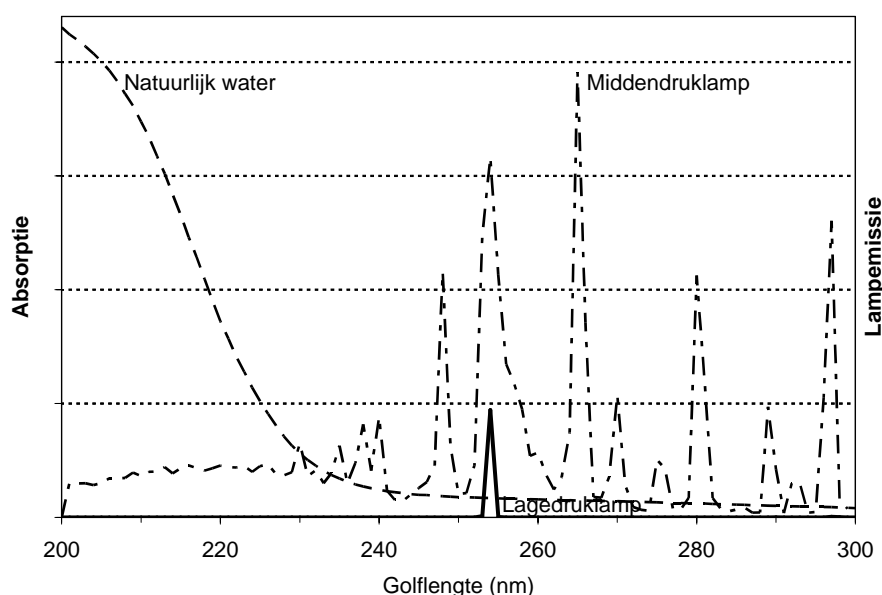
### 3.3.1 Ervaringen in Nederland

Studies naar AOC-vorming tijdens UV desinfectie met lagedrukklampen geven een eenduidig beeld te zien. Er wordt nauwelijks AOC gevormd. Dit blijkt onder andere uit gegevens van ps Weerseloseweg (gegevens Vitens) waar AOC is gemeten van het reine water. Er wordt  $6,6 \mu\text{g Ac-C/l}$  gemeten (DOC = 2,1 - 4,2 mg C/l, UV-T = 83-90%). De UV-dosis tijdens dit proces evenals de AOC-concentratie in het onbehandelde water is niet bekend. Aangenomen mag worden dat het onbehandelde water ook AOC bevat. Ijpelaar en Beerendonk (2001) hebben een studie uitgevoerd waarbij ondermeer AOC is gemeten na UV-desinfectie. Tijdens testen met Biesboschwater (snelfiltraat met een DOC van 2 mg C/l) uitgevoerd in een laboratoriumopstelling voorzien van een lagedrukklamp (waterdiepte 0,5 cm) werd geen AOC gemeten. In dezelfde studie werd  $15 \mu\text{g Ac-C/l}$  gevormd bij een biosimetrisch bepaalde dosis van  $91 \text{ mJ/cm}^2$  (Ijpelaar *et al.*, 2005b). Bij gebruik van een middendrukklamp met een cut-off bij 240 nm werd geen AOC gemeten (Ijpelaar en Beerendonk, 2001). Hieruit kan worden opgemaakt dat AOC-vorming hoofdzakelijk plaatsvindt in het golflengtegebied  $< 240 \text{ nm}$ . In onderzoek naar de vorming van AOC in een proefinstallatie voorzien van middendrukklampen ( $180 \text{ m}^3/\text{h}$ , waterdiepte 5 cm) van Evides met

Biesboschwater (DOC 2 mg C/l, UV-T 90%) werd 2,8 µg Ac-C/l AOC gevormd bij een biosimetrische bepaalde UV dosis van 58 mJ/cm<sup>2</sup>, terwijl 8,2 µg Ac-C/l werd gemeten bij een dosis van 95 mJ/cm<sup>2</sup> (Ijpelaar *et al.*, 2005b). Dit onderzoek heeft tevens aangetoond dat AOC effectief wordt verlaagd door een nageschakelde actieve-koolfiltratie.

Geconcludeerd werd dat er geen of een zeer beperkte vorming van AOC met lagedruk UV-licht plaatsvindt. Bij een middendruk lamp met een cut-off bij 240 nm is het gehalte aan AOC hoger dan bij de lagedruk lamp, maar lager dan bij de normale middendruk lamp. Van de onderzochte UV-lampen zendt alleen de normale middendruk lamp UV-licht uit dat qua golflengten overeenkomt met de absorptie van de matrix (waaronder humuszuren). Met deze lamp werd dan ook de hoogste concentratie AOC gemeten.

Door absorptie van 200 - 250 nm UV-licht (voornamelijk de opgeloste organische stof, DOC) in natuurlijk water wordt AOC gevormd (zie figuur 3.2).



Figuur 3.2: Absorptiespectrum van een typisch natuurlijk water en de emissiespectra van een lagedruk- en een middendruk lamp.

AOC wordt geanalyseerd op basis van de groei van de stammen P17 en Nox. Uit onderzoek is gebleken dat de totale AOC van 17,8 µg Ac-C/l na UV-behandeling was opgebouwd uit 3,8 Ac-C/l bepaald met de P17 en 14 Ac-C/l met de Nox stam. De bij deze testen toegepaste dosis bedroeg 91 mJ/cm<sup>2</sup>. Op basis van deze resultaten blijkt dat AOC voornamelijk wordt bepaald door groei van de Nox stam (Ijpelaar *et al.*, 2005b). Het is bekend dat de Nox stam vooral kleine carbonzuren als oxaalzuur consumeert (van der Kooij en Hijnen, 1984). Dit zou enerzijds kunnen betekenen dat de organische stof (humuszuren) op een zodanige wijze door UV-licht wordt gedegradeerd dat grotendeels kleine carbonzuren worden gevormd. Anderzijds kan hier mogelijk informatie aan worden ontleend over de samenstelling van de organische stof in het inkomende ruwe water van locatie Berenplaat.

Gegevens van andere drinkwaterbedrijven in Nederland waar UV-desinfectie wordt toegepast met middendruklampen, tonen aan dat nauwelijks AOC wordt gevormd. Metingen in UV-behandeld water op ps Ceintuurbaan (Vitens) geven een AOC getal aan van 7,1  $\mu\text{g Ac-C/l}$  (DOC: 2 mg C/l) bij een berekende dosis van 25  $\text{mJ/cm}^2$ . De waarde voor AOC in het water voor de UV-behandeling is niet bekend.

Studies uitgevoerd door Kruithof *et al.* (1992) op de locaties ps Hardinkveld en ps Zevenbergen tonen aan dat nauwelijks AOC wordt gevormd na UV-desinfectie. Op ps Hardinxveld, waar gebruik wordt gemaakt van een UV-installatie met middendruklampen, werd bij doses tussen de 20 en 30  $\text{mJ/cm}^2$  maximaal 3,6  $\mu\text{g Ac-C/l}$  gevormd. Ook op ps Zevenbergen, waar gebruik werd gemaakt van een UV-installatie met middendruklampen werd geen significante hoeveelheid AOC gevormd bij doses tussen de 32 en 40  $\text{mJ/cm}^2$ . Gegevens over de waterkwaliteit zijn niet bekend.

Uit de beschikbare gegevens komt naar voren dat AOC-vorming in Nederland tijdens nadesinfectie met UV-licht laag is. De AOC-concentratie na UV bij doses tot circa 40  $\text{mJ/cm}^2$  is beperkt. Tenzij metingen hebben aangetoond dat biologisch stabiel wordt gevormd, wordt desondanks geadviseerd UV niet eindstandig in te zetten.

### 3.3.2 AOC-vorming tijdens UV-behandeling in het buitenland

In de beschikbare literatuur worden nauwelijks mededelingen gedaan over het effect van UV-behandeling op de vorming van AOC en algengroei. Féliers *et al.* (2003) hebben gekeken of BDOC (biodegradeerbare DOC) wordt gevormd tijdens UV-desinfectie. Het onderzoek is uitgevoerd in een batchreactor met middendruklampen. Bij onderzoek naar 4 waterkwaliteiten (geen gegevens beschikbaar over de watersamenstelling) werd geen BDOC gemeten bij UV-doses oplopend tot 4000  $\text{mJ/cm}^2$ .

#### Conclusies

- Absorptie van organische stof (DOC) treedt met name op in het golflengtegebied 200 - 230 nm wat kan leiden tot significante AOC-vorming.
- Er wordt geen of zeer beperkt AOC gevormd tijdens UV-desinfectie met lagedruklampen of met middendruklampen met een cut-off bij 240 nm.
- Bij UV-doses tot 40  $\text{mJ/cm}^2$  gerealiseerd met middendruklampen wordt AOC in lage concentraties gevormd.
- Ondanks de beperkte AOC-vorming bij UV-doses zoals toegepast tijdens UV-desinfectie wordt geadviseerd UV alleen dan eindstandig toe te passen als het geproduceerde water aantoonbaar biologisch stabiel is.
- Kleine laboratoriuminstallaties kunnen een vertekend beeld geven waardoor de resultaten niet naar praktijkinstallaties kunnen worden vertaald.
- Bij hogere UV-doses kan de AOC-vorming bij toepassing van middendruklampen ongewenst hoog worden. In dat geval is nabehandeling van het water met bijvoorbeeld actieve-koolfiltratie (AKF) nodig.

### 3.4 Algen groei

Uit gegevens die zijn verstrekt door de waterleidingbedrijven blijkt dat algen groei op diverse locaties voorkomt in leidingen voor en na de UV-reactor. Algen groei is geconstateerd bij UV-systemen voorzien van lagedrukklampen (ps Weerseloseweg, Vitens) en middendrukklampen (ps Ceintuurbaan, Vitens en ps C. Rodenhuis, Hydron Zuid Holland (Nieuwenhuizen, 1997)).

Het proces van algen groei kan optreden in allerlei waterkwaliteiten waarbij diverse soorten algen betrokken kunnen zijn (Beerendonk *et al.*, 2004).

Vanwege de aard van het ingenomen water is de kans op algen groei in de zuivering van oppervlaktewater groter dan in grondwaterzuiveringen. De kans dat algen via bijvoorbeeld filtermateriaal of via de lucht in de zuiveringsinstallatie voor grondwaterbehandeling terechtkomen is weliswaar klein, maar is wel aanwezig. Indien voedingsstoffen in voldoende hoge concentratie aanwezig zijn, kan algen groei optreden.

Vanwege de lage transmissies voor UV-C licht treedt algen groei vooral in afvalwater vaak op. Dit komt doordat afvalwater voornamelijk in open installaties wordt behandeld waardoor het water toegankelijk is voor zichtbaar licht.

Literatuur over ervaringen met algen groei in het buitenland is niet gevonden.

#### Conclusies

- Groei van algen wordt veroorzaakt door absorptie van zichtbaar licht geëmitteerd door kwik UV-lampen.
- Zichtbaar licht dringt verder in water door dan UV-C licht waardoor de inactivatie van algen bij lage UV-transmissie vaak onvolledig is.
- Algen groei vindt hoofdzakelijk plaats bij gebruik van middendrukklampen vanwege het grote aandeel aan zichtbaar licht dat dit lamptype emitteert (circa 25%).
- Algen groei is beperkt bij gebruik van lagedrukklampen. Het aandeel zichtbaar licht bij deze lampen is circa 5%.

Tabel 3.3 Overzicht bijproductvorming tijdens UV-desinfectie in Nederland

Bijproduct	analyse gegevens bijproducten	UV installatie gegevens				watersamenstelling				bijzonderheden	ref
		lamp	fluence mJ/cm <sup>2</sup>	merk	opstelling	Bedrijf	type	waterkwaliteit			
AOC	2,8 - 8,2 µg Ac-C/I	MD	58-96	F200 kwartsbuis Berson	praktijk	Evides	Berenplaat	11 mg NO <sub>3</sub> /l; 2 mg C/I(DOC)	dosis opgegeven als biocide fluence	1	
AOC	2,8 - 8,2 µg Ac-C/I	MD	100-197	F200 kwartsbuis Berson	praktijk	Evides	Berenplaat	pH 7,25; UV-T 90%	dosis opgegeven als BLUV3D		
nitriet	12 - 40 µg NO <sub>2</sub> /l	MD	40-110	Trojan SWIFT 10L30	praktijk	Evides	Bieboschwater		dosis opgegeven als biocide fluence	2	
nitriet	gem 20, max 40 µg NO <sub>2</sub> /l	MD (B2020)	25	Berson UV - inline R2500	praktijk	Vitens	reinwater Ps Ceintuurbaan	3,6 mg NO <sub>3</sub> /l; 1,7-2,4 mg C/I(DOC) pH 7,75; UV-T 78%	berekende dosis	3	
AOC	7,1 µg Ac-C/I (1999)										
Algen-groei	Zeer ernstig										
nitriet	900 µg NO <sub>2</sub> /l	MD (B2020)	91	Berson	lab (doorstroom inst.)	Evides	effluent snelfilter Berenplaat	10,6 mg NO <sub>3</sub> /l; UV-T = 90%	dosis opgegeven als biocide fluence	4	
	geen nitriet vorming	MD (B2020 cut-off 240 nm)	91	Berson	lab (doorstroom inst.)				waterdiepte installatie 0, 5 cm		
	geen nitriet vorming	LD (B160VIK)	91	Berson	lab (doorstroom inst.)						
	20 - 60 µg NO <sub>2</sub> /l	MD (B2020)	50-200	F200 kwartsbuis	proefinstallatie	Evides	effluent snelfilter Berenplaat	13-15 mg NO <sub>3</sub> /l; UV-T = 90%	dosis = biocide fluence, waterdiepte 5 cm		
AOC	5,4 en 14,7 µg Ac-C/I	MD (B2020)	91	Berson	lab (doorstroom inst.)	Evides	effluent snelfilter Berenplaat	10,6 mg NO <sub>3</sub> /l; UV-T = 90%	dosis opgegeven als biocide fluence	5	
	geen significante AOC vorming	MD (B2020 cut-off 240 nm)	91	Berson	lab (doorstroom inst.)				waterdiepte installatie 0, 5 cm		
	geen significante AOC vorming	LD (B160VIK)	91	Berson	lab (doorstroom inst.)						
	17,8 µg Ac-C/I (3,8 µg Ac-C/I P17 en 14 µg Ac-C/I NO MD (B2020)	MD (B2020)	95	F200 kwartsbuis	proefinstallatie	Evides	effluent snelfilter Berenplaat	13-15 mg NO <sub>3</sub> /l; UV-T = 90%	dosis = biocide fluence, waterdiepte 5 cm		
Algen-groei	er komt algengroei voor	LD (SLF 28-48)		Wedeco 6-6-K48.1(7 bar)	praktijk	Vitens	Weerseeloseweg- infiltratiezuivering	8,6 mg NO <sub>3</sub> /l; 1,4-2,6 mg C/I(DOC) pH 7,7; UV-T 90%		6	
nitriet	niet aantoonbaar (zit onder de oa grens)	MD7 (B2001.cut-off 240nm)	0 tot 14000	4 lamps installatie (Berson)	praktijk ?	Vitens	rein water PS Buren(Ameland)	temp 9,90C; pH 8,2; Cl 75 mg/l; Fe 0,02 mg/l; Mn <0,01 mg/l NH <sub>4</sub> 0,02 mg/l; KMnO <sub>4</sub> red 13 mg/l kleur 20 mg/l; UV-T 82%		7	
AOC	variërend van 0 tot 3,6 µg Ac-C/I	MD	20 - 30	Berson HD-100/4 disinfectator	praktijk	Hydron ZH	als laatste stap in zuiveringsproces PS Hardinxveld		Voor water van PS zevenbergen wordt aangegeven dat de resultaten voor AOC hetzelfde zijn als voor Hardinxveld geen exacte getallen bekend	8	
AOC	zie opmerkingen	MD	32-40	Berson HD100/2	praktijk	BW	gezuiverd opp.water				
nitriet	onder de onderste analysegrens (3,6 µg NO <sub>2</sub> /l)	MD (B2020)	25-95	inline 1000, HXJSW4 Berson	praktijk	Hydron ZH	installatie voor reinwater ps Zwijndrecht	UV-ext 86 - 97%; 10,2 mg NO <sub>3</sub> /l	dosis nieuwe lamp 95 mJ/cm <sup>2</sup>	9	
Algen-groei	aangehouden direct naar installatie	B2000		HCLW2*8 Berson	praktijk	Hydron ZH	water ps. C. Rodenhuis	UV-ext 92 - 97%	dosis oude lamp 25 mJ/cm <sup>2</sup>		
AOC	waarden in reinwater van diverse pompstations maar geen gegevens van waarden voor de UV installatie									10	
nitriet	7 µg NO <sub>2</sub> /l	LD	123	Collimated Beam	lab (collimated beam)	Kiwa	conventioneel voorbehandeld IJsselmeerwater	14 mg NO <sub>3</sub> /l	voor resultaten met middendruk lamp zie tabel 1 paragraaf 2.2.2	11	
mutageniteit (Ames)	- (geen details)	MD	20-30	Berson HD-100/4	praktijk		gezuiverd oeverfiltraat			12	
	- (geen details)	MD	32-40	Berson HD100/2	praktijk		gezuiverd opp.water				
	- (geen details)	LD	25-40	Katadyn G9	praktijk		gezuiverd opp.water				
mutageniteit (Ames)	- (TA 98-S9)	MD (B2020)	60	Berson	pilot	Evides	gezuiverd opp.water	90% Transmissie	conc. factor 40000 waterdiepte installatie 5 cm	13	
	- (TA 100+/-S9, TA 98+S9)										
mutageniteit (Ames)	- (TA98-S9)	LD (B160VIK)	47	Berson	lab (doorstroom inst.)	Evides	gezuiverd opp.water	90% Transmissie	alleen TA98-S9 resultaten gegeven, +S9 wel getest	14	
	- (TA98-S9)		91								
	+ (TA98-S9)	MD (B2020)	27	Berson	lab (doorstroom inst.)		gezuiverd opp.water	90% Transmissie	conc. factot 40000 waterdiepte installatie 0, 5 cm		
	+ (TA98-S9)		91								
	- (TA98-S9)	MD (B2020) doped	<10	Berson	lab (doorstroom inst.)		gezuiverd opp.water	90% Transmissie			
clastogeniteit (Comet)	onduidelijk	MD	48	Trojan SWIFT 12	pilot	PWN	gezuiverd opp. water			15	
mutageniteit (Ames)	+ (TA 98+/-S9)		70								
	+ (TA 98+/-S9)		48						in TA100 ook verhoogd aantal revertanten, maar door hoge achtergrond niet significant genoeg		
			70								
mutageniteit (Ames)	- (TA98 en TA 100+/-S9)		120	Berson BEL-UVA-D1	pilot		ruw rivier water		conc. factor 2000-4000	16	
benzeen	+		120	Berson BEL-UVA-D1			ruw rivier water				
tolueen	+		120	Berson BEL-UVA-D1			ruw rivier water				
dihydrotrimethylquinoine	+		120	Berson BEL-UVA-D1			ruw rivier water				

Referenties:

- 1,2 Gegevens Evides  
 3 Gegevens Vitens  
 4,5 Ijpelaar et al. (2001)  
 6 Gegevens Vitens  
 7 Oostelbos et al. (1995)  
 8,12 Kruithof et al. (1992)  
 9,10 Nieuwenhuizen et al. (1997)  
 11,15 Ijpelaar et al. (2005a)  
 13 Veenendaal et al. (2001)  
 15 Ijpelaar et al. (2005b)  
 16 Zoeteman et al. (1982)

Tabel 3.4 Overzicht bijproductvorming tijdens UV-desinfectie in het buitenland

analyse gegevens bijproducten		UV installatie gegevens			watersamenstelling			ref	
Bijproduct	concentratie	lamp	fluence mJ/cm <sup>2</sup>	merk	opstelling	type	waterkwaliteit	bijzonderheden	
nitriet	1.8µg NO <sub>2</sub> /l	LD	25 mJ/cm <sup>2</sup>				50 mg NO <sub>3</sub> /l	theoretisch aangenomen mbv berekening (niet aangetoond)	1
nitriet	147µg NO <sub>2</sub> /l 30 µg NO <sub>2</sub> /l	MD MD (cut-off bij 235 nm)		50 mJ/cm <sup>2</sup> 50 mJ/cm <sup>2</sup>	lab		50 mg NO <sub>3</sub> /l 50 mg NO <sub>3</sub> /l		2
nitriet	184 µg NO <sub>2</sub> /l	MD	20 mJ/cm <sup>2</sup>	Collimated Beam	lab	syntheties water	45 mg NO <sub>3</sub> /l; 5 mg C/l(DOC); pH 8		3
nitriet	242 µg NO <sub>2</sub> /l	MD	20 mJ/cm <sup>2</sup>	Collimated Beam	lab	syntheties water	45 mg NO <sub>3</sub> /l; 15 mg C/l(DOC); pH 8		
nitriet	110 µg NO <sub>2</sub> /l	MD	20 mJ/cm <sup>2</sup>	Collimated Beam	lab	syntheties water	45 mg NO <sub>3</sub> /l; 5 mg C/l(DOC); pH 6		
nitriet	82 tot 742µg NO <sub>2</sub> /l	MD	350 tot 3274	111L flow-through tower type reactor	pilot	gezuiverd water	19 mg NO <sub>3</sub> /l; DOC 1,8 mg/l; pH 7,4		4
nitriet	644µg NO <sub>2</sub> /l	MD	3430 mJ/cm <sup>2</sup>	111L flow-through tower type reactor	pilot	gezuiverd water	16,8 mg NO <sub>3</sub> /l; DOC 1,8 mg/l; pH 7,4		
nitriet	565µg NO <sub>2</sub> /l	MD	3424mJ/cm <sup>2</sup>	111L flow-through tower type reactor	pilot	gezuiverd water	22,6 mg NO <sub>3</sub> /l; DOC 1,8 mg/l; pH 7,4		
nitriet	647µg NO <sub>2</sub> /l	MD	3588 mJ/cm <sup>2</sup>	111L flow-through tower type reactor	pilot	gezuiverd water	23,9 mg NO <sub>3</sub> /l; DOC 1,8 mg/l; pH 7,4		
BDOC BDOC BDOC	wordt niet gevormd	MD MD (cut-off bij 240 nm)	4000 mJ/cm <sup>2</sup>	Batch reactor (3.6L glas reactor, h= 24.7cm d=14.1cm)	praktijk	4 types; 3x oppervlaktewater nm. Yffiniac(Fr); Pont ar Bled(Fr); Rennes(Fr) 1x pondwater ,Beaufort(Fr)			5
clastogeniteit (MN, plant)	+	LD		U-VAU-DES	praktijk	gezuiverd vervuild grondwater		60 W lamp, concentratiefactor 0 of juist verdund	6
clastogeniteit (MN, plant)	-		150	Katadyn EK 36	lab	drinkwater		waterdiepte 0,43cm	
clastogeniteit (MN, plant)	+		150	Katadyn EK 37	lab	vervuild grondwater voor GAC		waterdiepte 0,43cm	
clastogeniteit (MN, plant)	+		50-150	Katadyn EK 38	lab	vervuild grondwater na GAC		waterdiepte 0,43cm	
mutageniteit (Ames)	- (TA 100+/-S9, TA 98+S9)	LD	80		lab	grondwater		conc. Factor 10000	7
	+	LD	80		lab	grondwater		alleen in 1 van 5 watermonsters; conc. Factor 10000	
clastogeniteit (MN, plant)	-	LD	80		lab	grondwater		conc. Factor 0	
clastogeniteit (MN, levercel)	-	LD	80		lab	grondwater		conc. Factor 0	
mutageniteit (Ames)	+	MD	80	HPK 125 W	lab	"natuurlijk water"		met hoge TOC conc. Factor 10	8
clastogeniteit (MN, plant)	+	MD	80	HPK 125 W	lab	"natuurlijk water"		conc. Factor 0	
clastogeniteit (Comet)	+	MD	80	HPK 125 W	lab	"natuurlijk water"		conc. Factor 0	
mutageniteit (Ames)	-	LD	80	LCD 9310	lab	"natuurlijk water"		conc. Factor 10	
clastogeniteit (MN, plant)	-	LD	80	LCD 9310	lab	"natuurlijk water"		conc. Factor 0	
clastogeniteit (Comet)	-	LD	80	LCD 9310	lab	"natuurlijk water"		conc. Factor 0	
mutageniteit (Ames)	-	LD	25-50		pilot	ruw rivierwater	15 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	30 mW/cm <sup>2</sup> , 1-2 seconden	9
bromaten	-	LD	25-50		pilot	ruw rivierwater	16 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	15% verlies aan UV in opstelling	
totaal haloformen	-	LD	25-50		pilot	ruw rivierwater	17 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	non-contact bestraling	
fenolen	-	MD	0-935	Rayox®	full scale	gezuiverd rivierwater			10
aldehyden	alleen formaldehyde	MD	0-936	Rayox®	full scale	gezuiverd rivierwater			
organische zuren	-	MD	0-937	Rayox®	full scale	gezuiverd rivierwater			

Referenties:

- <sup>1</sup> Van Sonntag *et al.* (1992)    <sup>5</sup> Feliers *et al.* (2003)    <sup>9</sup> Carnimeo *et al.* (1995)  
<sup>2</sup> Bernhardt (1994)    <sup>6</sup> Helma *et al.* (1994)  
<sup>3</sup> Sharpless *et al.* (2001)    <sup>7</sup> Haider *et al.* (2002)  
<sup>4,10</sup> Peldszus *et al.* (2000)    <sup>8</sup> Haider *et al.* (2001)

Tabel 3.4 Overzicht bijproductvorming tijdens UV-desinfectie in het buitenland(vervolg)

analyse gegevens bijproducten		UV installatie gegevens			watersamenstelling			ref
Bijproduct	concentratie	lamp	fluence mJ/cm <sup>2</sup>	merk	opstelling	type	waterkwaliteit	
mutageniteit (Ames)	-	LD	250	Sterisol NN30/89		gespiked schoon water		spike met pesticide, aminozuur of suiker
	-	HD	250	TQ 150		gespiked schoon water		
clastogeniteit (SCE)	-	LD	250	Sterisol NN30/89		gespiked schoon water		
	-	HD	250	TQ 150		gespiked schoon water		
trihalomethanen	-	LD	40 en 140		cb lab	gezuiverd rivier water	>95% transmissie	tijdens alle exp. waterdiepte (petri schaal)
	-	MD	40 en 140		cb lab	gezuiverd rivier water	>95% transmissie	lange tijd tussen bestraling en meting
halo-azijnzuren	-	LD	40 en 140		cb lab	gezuiverd rivier water	>95% transmissie	
	-	MD	40 en 140		cb lab	gezuiverd rivier water	>95% transmissie	
carboxylzuren	-	LD	40 en 140		cb lab	gezuiverd rivier water	>95% transmissie	
	-	MD	40 en 140		cb lab	gezuiverd rivier water	>95% transmissie	
Trihalomethanen	-	MD	40-5000	Hanovia #6806A441	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%	waterdiepte 38/4
	-	MD	40-5000	Hanovia #6806A441	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	waterdiepte 38/4
	+/-	LD	40-5000	GE #G15T8	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%	alleen bij 400 J/m <sup>2</sup> geen vorming; waterdiepte 38/4
	-	LD	40-5000	GE #G15T8	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	waterdiepte 38/4
	-/+	P	40-5000	Pulsar (2 Hz)		synthetisch water	UV-T=90%	alleen bij 10.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming
	-/+	P	40-5000	Pulsar (2 Hz)		synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	alleen bij 5000 en 10.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming
	-	P	40-5000	Innovatech (10Hz)		synthetisch water	UV-T=90%	
	-	P	40-5000	Innovatech (10Hz)		synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	
halo-azijnzuren	-	MD	40-5000	Hanovia #6806A441	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%	waterdiepte 38/4
	-/+	MD	40-5000	Hanovia #6806A441	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	waterdiepte 38/4
	-	LD	40-5000	GE #G15T8	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%	alleen bij 400 J/m <sup>2</sup> geen vorming; waterdiepte 38/4
	-	LD	40-5000	GE #G15T8	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	waterdiepte 38/4
	-	P	40-5000	Pulsar (2 Hz)		synthetisch water	UV-T=90%	
	-/+	P	40-5000	Pulsar (2 Hz)		synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	alleen bij 5000 en 10.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming
	-	P	40-5000	Innovatech (10Hz)		synthetisch water	UV-T=90%	
	-	P	40-5000	Innovatech (10Hz)		synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	
aldehydes	-/+	MD	40-5000	Hanovia #6806A441	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%	alleen bij 50.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming; waterdiepte 38/4
	-/+	MD	40-5000	Hanovia #6806A441	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	alleen bij 1400 J/m <sup>2</sup> wel vorming; waterdiepte 38/4
	-/+	LD	40-5000	GE #G15T8	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%	alleen bij 50.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming; waterdiepte 38/4
	+/-	LD	40-5000	GE #G15T8	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	alleen bij 400 en 1400 J/m <sup>2</sup> geen vorming; waterdiepte 38/4
	-/+	P	40-5000	Pulsar (2 Hz)		synthetisch water	UV-T=90%	alleen bij 50.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming
	-/+	P	40-5000	Pulsar (2 Hz)		synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	alleen bij 50.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming
	-/+	P	40-5000	Innovatech (10Hz)		synthetisch water	UV-T=90%	alleen bij 50.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming
	-/+	P	40-5000	Innovatech (10Hz)		synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	alleen bij 50.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming
carboxylzuren	-/+	MD	40-5000	Hanovia #6806A441	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%	alleen bij 50.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming; waterdiepte 38/4
	-	MD	40-5000	Hanovia #6806A441	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	waterdiepte 38/4
	-	LD	40-5000	GE #G15T8	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%	waterdiepte 38/4
	+/-	LD	40-5000	GE #G15T8	cb lab	synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	alleen bij 400 en 1400 J/m <sup>2</sup> geen vorming; waterdiepte 38/4
	-/+	P	40-5000	Pulsar (2 Hz)		synthetisch water	UV-T=90%	alleen bij 50.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming
	-/+	P	40-5000	Pulsar (2 Hz)		synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	alleen bij 50.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming
	+	P	40-5000	Innovatech (10Hz)		synthetisch water	UV-T=90%	
	-/+	P	40-5000	Innovatech (10Hz)		synthetisch water	UV-T=90%; 100 mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /l	alleen bij 10.000 en 50.000 J/m <sup>2</sup> wel vorming

Referenties:

<sup>11</sup> de Veer *et al.* (1994)

<sup>12</sup> Kashinkunti *et al.* (2004)



Tabel 3.5 Overzicht bijproductvorming tijdens UV-desinfectie in afvalwater (buitenland)

analyse gegevens bijproducten		UV installatie gegevens				watersamenstelling			
Bijproduct	concentratie	lamp	fluence mJ/cm <sup>2</sup>	merk	opstelling	type	waterkwaliteit	bijzonderheden	ref
nitrofenolen en nitrosamines	-	LD			pilot	gezuiverd afvalwater		UVA; 100-160 mWs/cm <sup>2</sup> conc. Factor 2000	1
mutageniteit (Ames)	-		4.1-6.2		pilot	gezuiverd afvalwater		UV-C; 64W lamp;	2
clastogeniteit (MN +CA, plant)	-		4.1-6.2		pilot	gezuiverd afvalwater		UV-C; 64W lamp;	
clastogeniteit (MN, plant)	-		4.1-6.2		pilot	gezuiverd afvalwater		UV-C; 64W lamp;	
acute toxiciteit (LUMISTox)	-(juist verlies)		4.1-6.2		pilot	gezuiverd afvalwater		UV-C; 64W lamp;	

Referenties:

<sup>1</sup> Liberti *et al.* (2002)

<sup>2</sup> Monarcati *et al.* (2000)

## 3.5 Toxiciteit

### 3.5.1 *Ervaringen in Nederland*

In Nederland is tot nu toe vooral gekeken naar toename in mutageniteit (Amestest) van het water door UV-behandeling. Zoeteman *et al.* (1982) vonden geen mutageniteit met de Amestest in opgeslagen Rijn- en Maaswater dat met UV-licht gedesinfecteerd was (dosis: 120 mJ/cm<sup>2</sup>). Het is echter niet duidelijk of deze testen met een lagedruk- of een middendrukklamp zijn uitgevoerd. De watermonsters werden in deze studie een factor 10 minder geconcentreerd dan in de andere studies, wat de uitkomst mogelijk heeft beïnvloed.

Kruithof *et al.* (1992) vonden geen mutageniteit na UV-behandeling van gezuiverd oeverfiltraat en gezuiverd oppervlaktewater met zowel middendruk – als lagedrukklampen. De UV-doses die hierbij werden toegepast, waren laag: 20 – 40 mJ/cm<sup>2</sup>. Details over de voorbehandeling van de watermonsters voor de Amestest en over de Amestest zelf zijn niet gevonden.

Bij Amestesten uitgevoerd op voorbehandeld water van locatie Berenplaat (Evides) bij Kiwa (Ijpelaar en Beerendonk, 2001; Ijpelaar *et al.*, 2005b; Veenendaal en Noij, 2001) werd in een laboratoriumopstelling (waterdiepte: 0,5 cm) geen mutageniteit gevonden na behandeling met een lagedrukklamp (berekende doses van 47 en 91 mJ/cm<sup>2</sup>) en met een middendrukklamp met cut-off bij 240 nm (<10 mJ/cm<sup>2</sup>). Bij gebruik van een middendrukklamp met het volle spectrum (27 en 91 mJ/cm<sup>2</sup>) werd wel mutageniteit gemeten in TA98 – S9. De UV-doses toegepast in deze testen waren hoger dan in de studies van Kruithof en medewerkers. Mutageniteit werd in de Kiwa-testen alleen op bacteriestam TA98 getest, wél met en zonder S9. Deze laboratoriumtesten werden tevens uitgevoerd door Evides in de Berson proefinstallatie op locatie Berenplaat. Onder gelijke condities (UV-doses, type middendrukklamp, maar 5 cm waterdiepte) werd géén significante verhoging in mutageniteit in TA98 – S9 gemeten, maar er was wél een indicatie van een toename in mutageniteit.

#### Conclusies:

- Er zijn verschillende bevindingen over de verhoging van mutageniteit in het water na UV-desinfectie, met name voor de stam TA98.
- De verschillen lijken te maken te hebben met de condities van de UV-behandeling, maar duidelijke trends zijn er niet.
- Over verhoging van clastogeniteit of hormoonversturende potentie zijn geen gegevens beschikbaar.

### 3.5.2 *Ervaringen in het buitenland*

In Oostenrijk zijn studies gedaan naar de vorming van mutageniteit en clastogeniteit (vorming van DNA breuken) door UV-desinfectie. In de studie

van Helma *et al.* (1994) vertoonde drinkwater geen verhoogde clastogeniteit na UV-behandeling in een laboratoriumopstelling bij 150 mJ/cm<sup>2</sup> (type lamp niet vermeld). Vervuild grondwater voor en na koolfiltratie gaf echter wel een duidelijke verhoging in clastogeniteit na behandeling met UV onder dezelfde condities. Ook na UV-behandeling van het voorgezuiverde vervuilde grondwater in een zuiveringsinstallatie voorzien van een lagedrukklamp (dosis niet vermeld) werd een verhoogde clastogeniteit gemeten.

Hier staat tegenover dat Haider *et al.* (2002) geen verhoogde clastogeniteit vonden bij UV-desinfectie van verschillende grondwatermonsters in een laboratoriumopstelling met een lagedrukklamp (biodosimetrisch bepaalde dosis van 80 mJ/cm<sup>2</sup>). Dit verschil zou wellicht veroorzaakt kunnen zijn door de lagere dosis in de testen van Haider en medewerkers.

Haider *et al.* vonden wel een verhoogde mutageniteit na UV-behandeling met lagedrukklampen in de Amestest met TA98 zonder S9 bij één van de vijf grondwatermonsters van verschillende locaties. Met deze stam en S9-conditie werd in Nederland ook mutageniteit gevonden, maar dan na behandeling met middendrukklampen. Dit verschil is niet te verklaren met het verschil in concentratiefactor van het watermonster, want die is juist lager in het werk van Haider en medewerkers. Een verklaring voor de verschillen ligt mogelijk in de interpretatie van de resultaten van de Amestest.

Ook vonden Haider en medewerkers (2001) verhoogde clastogeniteit en mutageniteit bij het gebruik van middendrukklampen (80 mJ/cm<sup>2</sup>) op monsters die met lagedrukklampen geen effect te zien gaven. Verhoogde clastogeniteit werd wel gevonden na UV-behandeling (100 mJ/cm<sup>2</sup>, biodosimetrisch bepaald) van drinkwater met een hogere concentratie aan humuszuren waar ammonium, nitraat en nitriet aan toegevoegd waren. Bij deze testen bleek de clastogeniteit na toepassing van 200 - 400 nm UV-licht (middendrukklamp) hoger dan na behandeling met UV-licht van 240 - 400 nm (middendrukklamp met cut-off bij 240 nm) en 253,7 nm (lagedrukklamp) (Haider *et al.*, 2005). De auteurs geven aan dat het verschil mogelijk is veroorzaakt door de verhoogde nitrietvorming met de middendrukklamp waardoor mogelijk genotoxische N-nitrosoverbindingen zijn gevormd. Desondanks geven de Oostenrijkse studies over het geheel geen duidelijke scheidslijn tussen lagedruk- en middendrukklampen bij de vorming van genotoxische bijproducten. Meer onderzoek op dit vlak is nodig.

Carnimeo *et al.* (1995) melden negatieve Amestest resultaten bij UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 'predesinfectie' van ruw rivierwater met lagedrukklampen bij 25 of 50 mJ/cm<sup>2</sup>. De Veer *et al.* (1994) vonden geen mutageniteit en clastogeniteit na UV-behandeling van schoon water waaraan enkele pesticiden, aminozuren en suikers waren gedoseerd, met zowel lage- als middendruk lampen bij een dosis van 50 mJ/cm<sup>2</sup>.

Naast effectgerichte metingen zijn er ook stofgerichte studies uitgevoerd. Hierbij is vooral gezocht naar bekende desinfectieevenproducten, zoals bromaat (bij desinfectie met ozon) en trihalomethanen (bij gebruik van chloormiddelen). In het algemeen wordt er geen vorming van bromaat (Carnimeo *et al.*, 1995), haloformaten (Carnimeo *et al.*, 1995), fenolen (de Veer *et al.*, 1994), aldehyden (de Veer *et al.*, 1994; Linden *et al.*, 2004b), organische zuren (de Veer *et al.*, 1994), trihalomethanen (Zheng *et al.*, 1999; Kashinkunti *et al.*, 2004; Linden *et al.*, 2004b), haloazijnzuren (Zheng *et al.*, 1999; Kashinkunti

*et al.*, 2004; Linden *et al.*, 2004b), en carboxylzuren (Kashinkunti *et al.*, 2004; Linden *et al.*, 2004b) gevonden bij toepassing van UV-licht voor desinfectiedoeleinden. Alleen onder sommige condities worden enkele van deze stoffen gevormd (zie tabel 3.4). In tegenstelling tot deze resultaten suggereren de resultaten van Ijpelaar *et al.* (2005b) op basis van onderzoek naar de vorming van AOC dat carboxylzuren wel kunnen worden gevormd tijdens UV-desinfectie.

De resultaten van twee studies naar de vorming van toxische bijproducten bij UV-desinfectie van afvalwater staan samengevat in tabel 3.5. Liberti *et al.* (2002) hebben geen vorming van nitrofenolen en nitrosamines (genotoxische stoffen) gedetecteerd bij behandeling met UV-A licht met een lagedrukklamp. Monarca *et al.* (2000) vonden geen verhoging van mutageniteit, clastogeniteit of acute toxiciteit bij behandeling van gezuiverd afvalwater (samenstelling niet bekend) met UV-C.

Conclusies:

- De gegevens uit het buitenland over UV-desinfectie vullen de Nederlandse gegevens aan, met name door de toepassing van de clastogeniteitstesten in Oostenrijk. Desondanks kunnen geen harde conclusies over de vorming van toxische producten worden getrokken.
- De resultaten zijn op het eerste gezicht echter soms tegenstrijdig en maken het daardoor moeilijker om een beeld te krijgen welke condities de vorming van toxische bijproducten bevorderen.
- Evenals in Nederland zijn in het buitenland geen metingen naar verhoogde hormoonverstoring verricht.



## 4 Bijproductvorming tijdens UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

### 4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten en ervaringen van studies naar bijproductvorming tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie in Nederland en het buitenland. De resultaten van de ervaringen en studies in Nederland zijn samengevat in tabel 4.3. De resultaten van studies in het buitenland naar bijproductvorming tijdens UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> staan samengevat in tabel 4.4.

Er zijn geen publicaties gevonden over AOC-vorming tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie in het buitenland. Zowel het proces als de AOC-analysemethode worden buiten Nederland zeer beperkt toegepast.

### 4.2 Nitrietvorming

#### 4.2.1 Ervaringen in Nederland

Studies uitgevoerd door PWN (gegevens PWN) naar de vorming van nitriet tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tonen aan dat significante hoeveelheden nitriet worden gevormd (zie tabel 3.3). De gevormde hoeveelheid nitriet varieert van 40 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l tot 330 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l bij een elektrisch vermogen van 0,56 kWh/m<sup>3</sup>. De vorming van nitriet is afhankelijk van de watersamenstelling zoals ook al uit testen bij UV-desinfectie met middendrukklampen naar voren kwam (paragraaf 3.2.2). Het nitraatgehalte is de belangrijkste parameter voor de mate van nitrietvorming: hoe hoger de nitraatconcentratie, hoe hoger de nitrietvorming.

Uit resultaten met een proefinstallatie voorzien van 4 middendrukklampen heeft PWN nitrietconcentraties gemeten variërend van 110 tot 310 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l bij een vermogen tussen 0,11 en 0,56 kWh/m<sup>3</sup>. Het behandelde water is conventioneel voorbehandeld IJsselmeerwater met 12 - 13 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l; 3,1 mg C/l waaraan 6 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/l was gedoseerd.

PWN heeft ook testen uitgevoerd met UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bij verschillende H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-concentraties. Bij een H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-dosering van 0; 5,5 en 14,5 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/l werd bij een instelling van 0,56 kWh/m<sup>3</sup>, respectievelijk 250, 230 en 200 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l gevormd. Het onderzochte water had een nitraatgehalte van 12 mg/l en een DOC gehalte van 4,5 mg/l. Hieruit volgt dat de aanwezigheid van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> voor lagere nitrietconcentraties zorgt.

Over het algemeen kan worden gesteld dat nitriet bij toepassing van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in significante hoeveelheden kan worden gevormd wat niet in het drinkwater thuishoort. Uit ervaring bij PWN blijkt dat nitriet tijdens de nageschakelde actieve-koolfiltratie voor de omzetting van AOC effectief wordt verwijderd.

#### 4.2.2 Ervaringen in het buitenland

De resultaten van een studie uitgevoerd door Sharpless en medewerkers (2003) met behulp van een collimated beam laboratoriumopstelling zijn weergegeven in tabel 4.4. De studie is uitgevoerd met een middendrukklamp bij een berekende dosis van 150 mJ/cm<sup>2</sup> waarbij verschillende H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-concentraties werden gebruikt (0, 10 en 15 mg/l). Verder is er gemeten bij

twee pH-waarden (6,5 en 8,3). De nitraat- en TOC-concentraties zijn tijdens alle experimenten gelijk.

Zheng *et al.* (1999) hebben geconstateerd dat de concentraties aan totaal trihalomethanen (TTHM) en haloazijnzuren lineair oplopen met de UV-dosis (tot 2000 mJ/cm<sup>2</sup>) in aanwezigheid van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Bij een dosis van 100 mJ/cm<sup>2</sup> en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-concentraties variërend van 3,6 tot 51 mg/l bedroeg de toename 2 - 7% voor TTHM en 2 - 6% voor haloazijnzuren. Tijdens dit onderzoek was de UV-installatie geplaatst na ozonisatie en biologische filtratie, maar vóór de chloring.

Toevoeging van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> geeft een verhoging van nitrietvorming te zien ten opzichte van behandeld water zonder peroxide. Ook de verhoging van de pH bevordert de nitrietvorming. Dit komt overeen met resultaten die werden gevonden bij studies gericht op bijproductvorming tijdens UV-desinfectie door Ijpelaar *et al.* (2005a).

Tabel 4.1: Invloed watersamenstelling op vorming van nitriet na UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> uitgevoerd met een collimated beam laboratoriumopstelling (Sharpless *et al.*, 2003).

Dosis mJ/cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> mg/l	Bijproduct	Watersamenstelling		
		Nitriet µg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /l	Nitraat mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	DOC mg C/l	pH
150	0	110	45	2,8	6,3
150	5	160	45	2,8	6,3
150	15	170	45	2,8	6,3
150	0	160	45	2,8	8,3
150	5	190	45	2,8	8,3
150	15	195	45	2,8	8,3

#### Conclusies

- Combinatie van een hoge UV-dosis en aanwezigheid van nitraat kan tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> voor hoge concentraties nitriet in het effluent zorgen.
- De gevormde hoeveelheid nitriet is afhankelijk van de watersamenstelling; dit komt overeen met resultaten tijdens UV-desinfectie.
- Dosering van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> verhoogt de nitrietvorming tijdens laboratoriumonderzoek. Dit wordt niet bevestigd tijdens proefinstallatieonderzoek.
- Actieve-koolfiltratie, gedimensioneerd voor de omzetting van eveneens gevormd AOC, is effectief voor de omzetting van nitriet.

### 4.3 AOC-vorming

Tijdens laboratoriumonderzoek uitgevoerd naar bijproductvorming tijdens het UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> proces werden bij een berekende UV-dosis van 775 mJ/cm<sup>2</sup> significante hoeveelheden AOC in het uitgaande water gemeten (Ijpelaar en Beerendonk, 2000). Bij dit onderzoek werd gebruik gemaakt van een kleine

doorstroominstallatie voorzien van een middendrukklamp (waterdiepte 0,5 cm). Bij 775 mJ/cm<sup>2</sup> en een H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-dosering van 4 mg/l werd 130 µg Ac-C/l gemeten (Ijpelaar en Beerendonk, 2000). Het behandelde water is effluent 'Maasputten' straat ps. Roosteren (watersamenstelling onbekend). De resultaten van onderzoek uitgevoerd door PWN met een proefinstallatie voorzien van 4 middendrukklampen bevestigen de uitkomsten van het hierboven beschreven laboratoriumonderzoek. De resultaten van een aantal metingen is in tabel 4.2 weergegeven. Het behandelde water was conventioneel voorbehandeld IJsselmeerwater. Het elektrische vermogen tijdens deze testen bedroeg 0,56 kWh/m<sup>3</sup>.

Tabel 4.2: Resultaten van studies naar bijproductvorming tijdens UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> uitgevoerd met een proefinstallatie (bron: PWN).

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> mg/l	Watersamenstelling					Bijproduct	
	Nitraat mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	TOC mg C/l	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	UV-T %	AOC µg Ac-C/l	Nitriet µg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /l
6,1	4,4	3,1	7,42	132	86	106	103
4,0	8,0	3,4	7,54	130	86	39	269
5,4	12,5	3,7	6,96	138	81	70	330
6,1	7,6	3,6	7,30	129	84	91	205
6,9	3,4	3,7	7,94	126	83	131	40
5,9	10,8	4,4	7,96	156	80	27	237

De gevormde hoeveelheid AOC ligt tussen de 27 µg Ac-C/l en 131 µg Ac-C/l (bij een elektrische energie van 0,56 Kwh/m<sup>3</sup>). Uit de meetresultaten van PWN blijkt dat de vorming van AOC afhankelijk is van de watersamenstelling. Dit wordt mogelijk verklaard met de absorptiespectra van organische stof (200 - ~ 250 nm) en nitraat (200 - 240 nm) als precursors bij de vorming van respectievelijk AOC en nitriet. Het feit dat deze precursors in hetzelfde golflengtegebied absorberen, kan resulteren in een competitie om de fotonen. Zo lijkt de mate waarin nitrietvorming optreedt omgekeerd evenredig te zijn op de AOC-vorming.

In het algemeen kan worden gesteld dat tijdens het UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> proces significante hoeveelheden AOC worden gevormd. Uit ervaringen bij PWN blijkt dat de gevormde AOC effectief wordt verwijderd door actieve-koolfiltratie met een voldoende hoge contacttijd.

#### Conclusies

- De AOC-concentraties in water behandeld met UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> zijn significant hoger dan na UV-desinfectie. AOC-concentraties kunnen een factor 10 - 20 hoger liggen
- De gevormde AOC is afhankelijk van de toegepaste UV-dosis en de watersamenstelling (DOC-gehalte en nitraatconcentratie).
- De gevormde AOC kan effectief worden verwijderd met actieve-koolfiltratie.



## 4.4 Toxiciteit bij toepassing van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

### 4.4.1 *Ervaringen in Nederland*

Wat betreft de vorming van toxische bijproducten bij toepassing van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie van chemische waterverontreinigingen is in Nederland alleen gekeken naar de vorming van bromaat (Kruithof *et al.*, 2000). Vorming van bromaat bleef achterwege bij de toegepaste condities van 0,4 kWh/m<sup>3</sup>; 15 g/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en 0,9 kWh/m<sup>3</sup>; 4 g/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Dit bevestigt het door Von Gunten en Oliveras (1997) beschreven mechanisme dat bromaatvorming niet optreedt zolang er een overmaat H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in het water aanwezig is. Dit is het geval bij toepassing van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> voor oxidatiedoeleinden.

### 4.4.2 *Ervaringen in het buitenland*

De resultaten van twee studies naar de vorming van toxische bijproducten bij UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie staan samengevat in tabel 4.4. In deze studies is naar acute toxiciteit en oestrogeniteit gekeken, niet naar genotoxiciteit.

Parkinson *et al.* (2001) vonden geen acute toxiciteit in meerdere testsystemen na het behandelen van ruw oppervlaktewater (UV-T 47-75%) met UV-A, UV-B en UV-C, de laatste met en zonder 50 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. De verschillende testsystemen waren de Microtox™ test met *Vibrio fischeri* bacteriën, een test met apenniercellen en een test met de watervlooien *Daphnia carinata*. Alleen bij de *Daphnia carinata* werd toxiciteit gevonden, maar dat werd waarschijnlijk veroorzaakt door vrijgekomen koper als gevolg van degradatie van het bindingsmateriaal van het koper (zoals humuszuren). Koper is veel minder toxisch voor de mens dan voor *Daphnia*. Toch is het een belangrijke vondst dat het bindingsmateriaal van mogelijk toxische stoffen tijdens een oxidatief proces verdwijnt, waardoor deze stoffen actief kunnen worden.

Linden *et al.* (2004a) vonden een verlaging van de oestrogeniteit van schoon water waaraan bisphenol-A was toegevoegd en vervolgens behandeld met een lagedruk UV-lamp, zowel met als zonder H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Het niveau van oestrogeniteit bleef uiteindelijk stabiel bij hogere doses, terwijl bisphenol-A verdween. Met het verwijderen van oestrogene stoffen is dus niet per definitie de oestrogeniteit weg; er kunnen nieuwe oestrogene stoffen worden gevormd. De onderzoekers concludeerden daarom dat oestrogene reactieproducten ontstonden uit bisphenol-A, maar het is niet gebleken om welke stoffen het hier gaat.

Tabel 4.3 Overzicht bijproductvorming tijdens UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in Nederland

analyse gegevens bijproducten		UV installatie gegevens					watersamenstelling				
Bijproduct	concentratie	H2O2 mg/l	lamp	fluence mJ/cm <sup>2</sup>	merk	opstelling	Bedrijf	type	waterkwaliteit	bijzonderheden	ref
AOC	130 en 160 µg Ac-C/l	4	MD (B2500)	775 en 2325	Berson	lab (doorstroom inst.)	WML	ontgas water PS Roosteren			1
AOC	120 en 140 µg Ac-C/l	11									
AOC nitriet			MD	0,56 kWh/m <sup>3</sup>	Trojan	proefopstelling	PWN	coventioneel voorbehandeld IJsselmeerwater		Voor resultaten zie tabel 2.3	2
nitriet	110 µg NO <sub>2</sub> /l 310 µg NO <sub>2</sub> /l 250 µg NO <sub>2</sub> /l 230 µg NO <sub>2</sub> /l 210 µg NO <sub>2</sub> /l	6 6 0 5,5 14,5	MD	0,11 kWh/m <sup>3</sup> 0,56 kWh/m <sup>3</sup> 0,56 kWh/m <sup>3</sup> 0,56 kWh/m <sup>3</sup> 0,56 kWh/m <sup>3</sup>	Trojan	proefopstelling	PWN	coventioneel voorbehandeld IJsselmeerwater	12-13 mg NO <sub>3</sub> /l; 3,1 mg C/l(DOC)		2
bromaat	-	0-25	MD	0.1-2.5 kWh/m <sup>3</sup>		proefopstelling	PWN	gefiltreerd opp. water			3

Referenties:

<sup>1</sup> Ijpelaar *et al.* (2000) <sup>3</sup> Kruithof *et al.* (2000)

<sup>2</sup> Gegevens PWN

Tabel 4.4 Overzicht bijproductvorming tijdens UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in het buitenland

analyse gegevens bijproducten		UV installatie gegevens					watersamenstelling			
Bijproduct	concentratie	H2O2 mg/l	lamp	fluence mJ/cm <sup>2</sup>	merk	opstelling	type	waterkwaliteit	bijzonderheden	ref
nitriet	30 - 110 µg NO <sub>2</sub> /l 30 - 160 µg NO <sub>2</sub> /l 30 - 170 µg NO <sub>2</sub> /l 30 - 160 µg NO <sub>2</sub> /l 30 - 190 µg NO <sub>2</sub> /l 32 - 195 µg NO <sub>2</sub> /l	- 5 10 - 5 10	MD	25 - 150	Collimated Beam	lab	synthetisch water	45 mg NO <sub>3</sub> /l; 2,8 mg C/l(DOC); pH 6,3  45 mg NO <sub>3</sub> /l; 2,8 mg C/l(DOC); pH 8	dosis berekend als germicidale dosis	1
estrogeniteit (YES) reactieproducten	- +	0-50 ppm 0-50 ppm	LD LD	1000-5000 1000-5000			quasi cb	schoon water met bisphenol-A	door degradatie bis-A totale vermindering en die reactie-	2
acute toxiciteit ( <i>Daphnia</i> )	+ + - - -	- 50 mg/L - - -		34.000-202.000 2808-12.000 50.000-302.000 55.000-332.000 34.000-202.000	Sylvania G15 W (UV-C) Sylvania G15 W NEC Blacklight (UV-A) Vilbert-Loumart T-15 M (UV-B)	lab lab lab lab	opp. water opp. water opp. water opp. water	UV-T 67-88% UV-T 67-88% UV-T 67-88% UV-T 67-88%	toxiciteit door vrijgekomen koper voor alle metingen geldt waterdiepte 7cm; conc. factor = 1	3
acute toxiciteit (Microtox)	-	-		34.000-202.000	Sylvania G15 W	lab	opp. water	UV-T 67-88%		
acute toxiciteit (AS/NZS)	-	-		34.000-202.000	Sylvania G15 W	lab	opp. water	UV-T 67-88%		
	-	50 mg/L		2808-12.000	Sylvania G15 W	lab	opp. water	UV-T 67-88%		

Referenties:

<sup>1</sup> Sharpless *et al.* (2003) <sup>3</sup> Parkinson *et al.* (2001)

<sup>2</sup> Linden *et al.* (2004a)



## 5 Evaluatie en witte vlekken

### 5.1 AOC, nitriet en algengroei

Uit metingen met praktijkinstallaties in Nederland en studies uitgevoerd in zowel Nederland als het buitenland komt naar voren dat AOC en nitriet worden gevormd tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie en dan vooral bij toepassing van middendruklampen. Het fenomeen algengroei kan plaatsvinden tijdens UV-desinfectie. Algengroei vindt voornamelijk plaats bij middendruklampen. Er wordt nergens melding gemaakt van algengroei tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Dit is te verklaren door aan te nemen dat algen de hoge(re) UV-doses en het gebruik van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie niet overleven. Over vorming van AOC en nitriet tijdens UV-desinfectie is uitvoerig gepubliceerd voor toepassing van zowel lagedruk- als middendruklampen. Middendruklampen met een 'cut-off' bij 240 nm zoals voorgesteld in de Oostenrijkse ÖNORM M 5873-2 bieden mogelijkheden om de bijproductvorming te verminderen. Toepassing van dit type UV-lamp wordt in Nederland tot op heden nauwelijks of niet in overweging genomen. Vanwege het feit dat het UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatieproces beperkt op grote schaal wordt toegepast, is het aantal publicaties over bijproductvorming in UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> praktijkinstallaties lager dan voor UV-desinfectie. Uit studies blijkt dat AOC- en nitrietvorming sterk afhankelijk zijn van de samenstelling van het behandelde water. Echter, gegevens over de waterkwaliteit worden vaak niet vermeld. De resultaten wat betreft bijproductvorming kunnen beter met elkaar worden vergeleken als de watersamenstelling van het behandelde water bekend is. Een punt van aandacht is dan ook dat bij onderzoeken/metingen van bijproductvorming tijdens UV de waterkwaliteit van het behandelde water wordt bepaald. Hierbij zijn de pH, nitraat, DOC/TOC concentratie en de UV-transmissie de belangrijkste parameters. Daarnaast dient ook te worden gekeken of het gemeten bijproduct zich in het water bevindt voor de UV-behandeling.

Ervaringen in binnen- en buitenland leren dat over nitrietvorming voldoende informatie beschikbaar is. Dit geldt zowel voor toepassing van UV-desinfectie als voor UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie en voor toepassing van lagedruk- en middendruklampen. De beschikbare kennis over omzetting van nitriet tijdens de nageschakelde actieve-koolfiltratie is gebaseerd op de (hoge) contacttijd die nodig is voor de omzetting van AOC. Voor UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> behandeling van water met een laag DOC-gehalte en een hoog nitraatgehalte wat kan leiden tot lage(re) AOC-gehalten maar hoge nitrietconcentraties kan de situatie anders zijn. Voor de omzetting van nitriet in dergelijke gevallen is geen informatie beschikbaar.

De kennis over AOC-vorming tijdens UV-desinfectie is toereikend. De AOC-vorming tijdens UV-desinfectie is over het algemeen laag, maar kan wel bijdragen aan biofilmvorming in het distributienet. Vanwege de toenemende kans op aanwezigheid van resistente micro-organismen zoals adenovirussen in waterbronnen gaat de discussie bij UV-desinfectie inmiddels over hogere

UV-doses dan voorheen. Hierdoor kan UV-desinfectie niet zo gemakkelijk meer eindstandig worden ingezet.

#### Conclusies

- AOC- en nitrietvorming tijdens UV-desinfectie is uitvoerig beschreven. Kennis over AOC- en nitrietvorming tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> is beschreven, maar hiervoor zijn minder publicaties voorhanden.
- Algengroei vindt alleen plaats tijdens UV-desinfectie en niet bij UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en voornamelijk bij gebruik van middendruklampen.
- Bij onderzoek naar bijproductvorming dient het effect van de watersamenstelling (pH, nitraat- en DOC/TOC concentratie en UV-T) te worden meegenomen.
- Huidige kennis van omzetting van nitriet in nageschakelde koolfilters is gebaseerd op de hoge contacttijd voor de omzetting van AOC. Bij andere waterkwaliteiten (bijvoorbeeld weinig DOC en veel nitraat) dient de contacttijd mogelijk op de omzetting van nitriet te worden ingesteld.

## 5.2 Toxiciteit

In onderzoek naar de vorming van toxische bijproducten bij UV-behandeling is veelal gekeken naar de vorming van stoffen die bij desinfectie met chloorproducten en met ozon worden gevormd. Dit geldt met name voor onderzoek uitgevoerd in het buitenland. Omdat niet bekend is welke stoffen er precies kunnen ontstaan bij UV-behandeling is een stofgerichte aanpak bij het bestuderen van toxische bijproductvorming niet praktisch.

Beter is om een effectgericht onderzoek uit te voeren. Dat is in beperkte mate gedaan, vooral met de Amestest voor mutageniteit en met testen voor clastogeniteit. Er zijn echter nog geen eensluidende resultaten verkregen. Sommige resultaten lijken aan te geven dat lagedrukklampen geen genotoxische bijproducten veroorzaken en middendrukklampen wel. Dit is theoretisch plausibel, omdat lagedrukklampen maar één golflengte (253,7 nm) uitzenden, die wel het DNA van micro-organismen aantast, maar waarbij minder stoffen het licht absorberen. Middendrukklampen emitteren ook andere golflengtes die wel worden geabsorbeerd door chemische stoffen. Deze stoffen worden daardoor tot kleinere moleculen gedegradeerd welke voor een hogere (geno)toxiciteit kunnen zorgen. Hiervoor is aanvullend onderzoek nodig.

Andere factoren van invloed zijn het ontwerp van de UV-installatie en de UV-dosis. De mogelijke verschillen in de uitvoering en interpretatie van de Amestest maken het ook lastig de studies van verschillende laboratoria te vergelijken. Het beperkte aantal studies, met vele verschillen in experimentele parameters, maakt het onmogelijk om duidelijke conclusies te trekken over de invloed van deze factoren. Er is vooral een gebrek aan studies naar de bijproductvorming bij UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie.

Verder zijn er nog maar weinig verschillende toxische eindpunten bestudeerd. De Amestest is het meest toegepast, maar niet altijd compleet met

alle benodigde stammen, met en zonder S9. Clastogeniteit lijkt een belangrijk effect te zijn, maar is slechts door twee onderzoekers bestudeerd. Ook hiervoor zijn er verschillende uitkomsten, die wellicht ook te relateren zijn aan verschillen in de uitvoering van de UV-testen en in hoe de clastogeniteitstest is uitgevoerd. Oestrogeniteit is één keer bekeken, acute toxiciteit vaker.

Veel studies geven (te) beperkte informatie over het UV-systeem, de waterkwaliteit, van de opwerking van het water voor de chemische of toxicologische analyse en/of van de analyse zelf. Vaak worden watermonsters geconcentreerd voor een toxiciteitstest, waarbij de concentratiefactor bepalend is voor de detectie van een effect.

**Conclusie:**

De kennis over eventuele vorming van toxische stoffen tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie is onvoldoende om harde conclusies te kunnen trekken. Er zijn aanwijzingen dat toxische bijproducten kunnen worden gevormd bij toepassing van UV-licht in de drinkwaterzuivering maar een consistent beeld op dit gebied is er niet. Derhalve is aanvullend onderzoek nodig.

### 5.3 Degradatieproducten

Over vorming van degradatieproducten tijdens UV-desinfectie of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> is zeer weinig bekend. Slechts is éénmaal is melding gemaakt van onderzoek naar degradatieproducten. Kruithof *et al.* (2000) hebben de vorming van degradatieproducten tijdens het UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> proces onderzocht in een proefinstallatie uitgevoerd met middendrukklampen. Het maximale elektrisch vermogen bedroeg 2 kWh/m<sup>3</sup> en er werd 25 mg/l H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gedoseerd. In het effluent van de proefinstallatie werd alleen desethylatrazin als product van atrazin aangetoond (< 0,1 µg/l). Of er werkelijk degradatieproducten worden gevormd die toxisch zijn of de kans op nagroei bevorderen, is niet bekend. Vanwege de lage doses (< 100 mJ/cm<sup>2</sup>) is vorming van degradatieproducten tijdens UV-desinfectie niet te verwachten. Aanvullend onderzoek naar de vorming van degradatieproducten tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie gericht op toxiciteit is gewenst. Vanwege de mogelijke vorming van een groot scala aan degradatieproducten, is stofgericht onderzoek geen reële optie. Voorgesteld wordt om tot een somparameter te komen die de toxische effecten van metaboliëtvorming beschrijft.

In geval van bestrijdingsmiddelen zoals atrazin waarvan de degradatieroute bekend is, kunnen de degradatieproducten eventueel stofgericht worden geanalyseerd.



# 6 Conclusies en aanbevelingen

## 6.1 Conclusies

### *Samenvatting*

In algemene zin kan worden gesteld dat de vorming van bijproducten afneemt naarmate een lagere UV-dosis (UV-desinfectie) of een milder oxidatieregime (lagere UV- en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-dosis bij UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) wordt toegepast.

Bij aanwezigheid van organische stof en nitraat wordt bij toepassing van lagedruk UV-lampen (UV-desinfectie) verwaarloosbaar weinig nitriet en beperkt tot zeer beperkt AOC gevormd. Dit geldt ook voor gebruik van middendrukklampen voorzien van een speciale kwartsbuis waardoor UV-licht met golflengten kleiner dan 240 nm wordt tegengehouden ('cut-off'). Dit biedt mogelijkheden voor eindstandige desinfectie van drinkwater, maar voorzichtigheid is geboden: geadviseerd wordt om te allen tijde na te gaan of de biologische stabiliteit van het water na UV-desinfectie is gegarandeerd. Bij toepassing van middendrukklampen waarbij het gehele spectrum wordt gebruikt wordt tijdens UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie zowel nitriet als AOC geproduceerd. Vanwege de veel hogere UV-dosis tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie (8 - 20 maal hoger dan de UV-dosis bij UV-desinfectie) worden significant hogere nitriet- en AOC-concentraties na oxidatie gemeten dan na UV-desinfectie.

Indien eindstandige UV-desinfectie wordt overwogen, wordt toepassing van middendrukklampen zonder 'cut-off' ontraden.

### *AOC-vorming*

- AOC wordt met behulp van UV-licht gevormd uit organische stof (hoofdzakelijk DOC).
- Absorptie van organische stof treedt met name op in het golflengtegebied 200 - 240 nm.
- Er wordt nauwelijks tot geen AOC gevormd tijdens UV-desinfectie (tot 70 mJ/cm<sup>2</sup>) met lagedrukklampen en met middendrukklampen met een 'cut-off' bij 240 nm.
- Er worden lage concentraties AOC gevormd tijdens UV-desinfectie met middendrukklampen (tot 70 mJ/cm<sup>2</sup>).
- Vanwege de reactie van hydroxylradicalen met organische stof worden tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie significante hoeveelheden AOC gevormd. De gevormde AOC kan effectief worden verwijderd met actieve-koolfiltratie.

### *Vorming van nitriet*

- Nitriet wordt onder invloed van UV-licht gevormd uit nitraat.
- Concentraties aan nitriet gevormd tijdens UV-desinfectie met lagedrukklampen en met middendrukklampen met een 'cut-off' bij 240 nm zijn verwaarloosbaar. De gemeten concentraties zijn ruimschoots lager dan 100 µg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/l zoals beschreven in het Waterleidingbesluit. Dit blijkt uit studies uitgevoerd in zowel Nederland en het buitenland.



- Nitrietvorming treedt op tijdens UV-desinfectie (40 - 70 mJ/cm<sup>2</sup>) met middendruklampen zonder cut-off bij 240 nm; de mate waarin hangt nauw samen met de nitraatconcentratie.
- Afhankelijk van de nitraatconcentratie in het water worden kunnen tijdens UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> grote hoeveelheden nitriet worden gevormd. Nitriet kan worden omgezet tijdens de actieve-koolfiltratie welke qua contacttijd is ingesteld op de omzetting van AOC. In de praktijk zal moeten worden vastgesteld of nitriet onder alle omstandigheden voldoende wordt verwijderd tijdens actieve-koolfiltratie.
- De mate van nitrietvorming is afhankelijk van de watersamenstelling van het behandelde water. De nitrietvorming zal toenemen naar mate de nitraatconcentratie, het DOC-gehalte en/of de pH hoger zijn. Hierbij is de vorming van nitriet het sterkst afhankelijk van de nitraatconcentratie.

#### *Algen groei*

- Algen groei kan optreden in gevallen van UV-desinfectie waarbij significante hoeveelheden zichtbaar licht aan het water wordt gedoseerd.
- Algen groei vindt beperkt plaats bij gebruik van lagedruk lampen vanwege de lage emissie van zichtbaar licht (circa 5%). Algen groei vindt hoofdzakelijk plaats bij gebruik van middendruk lampen zonder cut-off vanwege het hoge aandeel aan zichtbaar licht (tot 25%).
- Met name water met een lage UV-transmissie is gevoelig voor algen groei tijdens UV-desinfectie van het water
- Bij toepassing van UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> speelt algen groei niet. Dit is naar verwachting het gevolg van de hoge(re) UV-doses en aanwezigheid van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

#### *Toxiciteit*

Er zijn aanwijzingen dat toxische bijproducten kunnen worden gevormd bij toepassing van UV-licht in de drinkwaterzuivering. Een goed beeld op dit gebied is er echter niet. Aanvullend onderzoek is daarom nodig.

## 6.2 Aanbevelingen

#### *Toxiciteit*

Voorgesteld wordt om een uitgebreide studie uit te voeren met effectgerichte metingen van de toxiciteit van het water na UV-desinfectie en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie. Tevens wordt geadviseerd onderzoek te doen naar de rol van actieve-koolfiltratie na UV en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gericht op de verwijdering van eventueel gevormde toxische producten. Het onderzoek zou hierbij gericht moeten zijn op mutageniteit/genotoxiciteit, clastogeniteit en hormoonverstoring.

Belangrijke parameters zijn:

- type lamp (lagedruk, middendruk, middendruk met een cut-off bij 240 nm);
- UV-dosis (UV-desinfectie) en UV- en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-dosis (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidatie);
- samenstelling van het behandelde water;
- fase van gezuiverd water na UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en na actieve-koolfiltratie.

Om schaafeffecten zoveel mogelijk te vermijden, is toepassing van een UV-installatie met voldoende grote capaciteit essentieel. In een dergelijk uitgebreid onderzoek zitten tevens de effecten van eventueel gevormde degradatieproducten. Het toxicologisch onderzoek kan verder worden uitgebreid met een stofgerichte studie naar de vorming van bekende degradatieproducten en hun individueel toxisch effect. De opwerking van de watermonsters voor de toxiciteitstesten moet daarbij de nodige aandacht krijgen, omdat hierbij stoffen verloren kunnen gaan en de concentratiefactor bepalend kan zijn voor de uitkomst van de test. Om degradatie van stoffen in de tijd te voorkomen, dienen de watermonsters voor de toxiciteitstesten snel na bemonstering te worden geanalyseerd.

#### AOC

De vorming van AOC kan afhankelijk van het proces, lamptype en waterkwaliteit sterk variëren. De toepassing van actieve-koolfiltratie na UV als hoofddesinfectieproces en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> is in Nederland algemeen geaccepteerd. Om onder alle condities een effectieve AOC-verwijdering in de koolfilters te realiseren, is het van belang dat het filtratieproces een continu karakter heeft. Hierbij is het meten van de nagroeipotentie van het filtraat essentieel. Aanbevolen wordt het filtraat gedurende lange tijd met een biofilmmonitor te analyseren.



## 7 Literatuur

- Andreozzi, R.; Caprio, V.; Marotta, R.; Vogna, D.;** 2003. Paracetamol oxidation from aqueous solutions by means of ozonation and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV system, *Water Res* (37) 993-1004.
- Beerendonk, E. F.; Reijnen, G.; van der Veer, A. J.; Ijpelaar, G. F.;** 2004. Mogelijke oorzaken en oplossingen voor algengroei door UV-desinfectie in drinkwaterbereiding, *H<sub>2</sub>O* (20) 25-26.
- Bernhardt, H.;** 1994. Desinfektion aufbereiteter Oberflächenwasser mit UV-Strahlen, *gwf-Wasser/ Abwasser* (135) .
- Carnimeo, D.; Di Marino, R.; Donald, F.; Liberti, L.; Ranieri, E.; Pitzurra, M.; Savino, A.;** 1995. Comparison between H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV and ClO<sub>2</sub> disinfection of drinking water, *Water Supply* (13) 159-169.
- Chang, P. B. L.; Young, T. M.;** 2000. Kinetics of methyl-tert-butyl ether degradation and by-product formation during UV/hydrogen peroxide water treatment, *Wat Res* (34) 2233-2240.
- de Veer, I.; Moriske, H. J.; Ruden, H.;** 1994. Photochemical decomposition of organic compounds in water after UV-irradiation: investigation of positive mutagenic effects, *Toxicol Lett* (72) 113-9.
- Féliers, C.; Lotierzo, M.; Saby, S.; Grandguillot, G.; Couvert, A.;** 2003. Investigation of by-product formation during the irradiation of drinking water with a medium pressure lamp, *Conference proceedings, Vienna (Austria); International Ultraviolet Association.*
- Haider, T.; Sommer, R.; Knasmüller, S.; Eckl, P.; Pribil, W.; Cabaj, A.; Kundi, M.;** 2002. Genotoxic response of Austrian groundwater samples treated under standardized UV (254 nm)--disinfection conditions in a combination of three different bioassays, *Water Res* (36) 25-32.
- Haider, T.; Sommer, R.; Knasmüller, S.; Eckl, P.; Pribil, W.; Cabaj, A.; Kundi, M.;** 2001. Application of a test combination of three different bioassays for the investigation of genotoxic effects induced by UV-irradiation in water, *First International Congress on Ultraviolet Technologies , Washington , D.C., June 14-16; International Ultraviolet Association.*
- Haider, T.; Sommer, R.; Majer, B.; Ehrlich, V.; Knasmüller, S.; Cabaj, A.; Kundi, M.;** 2005. Wave length dependency of genotoxic effects of drinking water samples treated with medium pressure and low pressure UV-lamps, *3d International Congress on Ultraviolet Technologies, Whistler (Canada), May 24-27; International Ultraviolet Association.*
- Helma, C.; Sommer, R.; Schulte-Hermann, R.; Knasmüller, S.;** 1994. Enhanced clastogenicity of contaminated groundwater following UV irradiation detected by the *Tradescantia* micronucleus assay, *Mutat Res* (323) 93-8.
- Ijpelaar, G. F.; Beerendonk, E. F.;** 2000. Toepassing van UV-technologie bij WML. Kiwa NV, Nieuwegein (NL); BTO 2000.221 (C).
- Ijpelaar, G. F.; Beerendonk, E. F.;** 2001. Vorming van nevenproducten bij UV-desinfectie. Vergelijking van diverse UV-stralers op laboratoriumschaal. Kiwa NV, Nieuwegein (NL); BTO 2001.193 (C).
- Ijpelaar, G. F.; Harmsen, D.; Sharpless, C. M.; Linden, K. G.; Kruithof, J. C.;** 2005a. Fluence monitoring in UV disinfection systems. Kiwa NV, Nieuwegein

- (NL); BTO 2005.054 (C).
- Ijpelaar, G. F.; van der Veer, A. J.; Medema, G. J.; Kruithof, J. C.;** 2005b. By-product formation during ultraviolet disinfection of a pretreated surface water, *J Environ Eng Sci* (4) S51-S56.
- Kashinkunti, R. D.; Linden, K. G.; Shin, G.-A.; Metz, D. H.; Sobsey, M. D.; Moran, M. C.; Samuelson, A. M.;** 2004. Investigating multibarrier inactivation for Cincinnati, *J AWWA* (96) 114-127.
- Kennicott, C.;** 2002. Survey throws light on UV, *Water Waste Treat* (45) 12-13.
- Kostiouchenko, S.; Giller, H.;** 2005. New Generations of Germicidal Equipment based on Low Pressure High Output Amalgam Lamps, 3de internationaal congres over Ultraviolet technologie, IUVA, 24 - 27 mei, Whistler, Canada
- Kruithof, J. C.; Kamp, P. C.; Belosevic, M.;** 2000. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-treatment: the ultimate solution for pesticide control and disinfection, *Water Sci Technol Water Supply* (2) 113-122.
- Kruithof, J. C.; van der Leer, R. C.; Hijnen, W. A. M.;** 1992. Practical experiences with UV disinfection in the Netherlands, *J Water SRT-Aqua* (41) 88-94.
- Lau, T. K.; Chu, W.; Graham, N.;** 2005. The degradation of endocrine disruptor di-n-butyl phthalate by UV irradiation: A photolysis and product study, *Chemosphere* (60) 1045-53.
- Liberti, L.; Notarnicola, M.; Petruzzelli, D.;** 2002. Advanced treatment for municipal wastewater reuse in agriculture. UV disinfection : parasite removal and by-product formation, *Desalination* (152) 315-324.
- Linden, K. G.; Rosenfeldt, E. J.; Chen, P. J.; Kullman, S. W.;** 2004a. UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> degradation and subsequent toxicity of endocrine disrupting chemicals in water, UV-Karlsruhe conference proceedings, Karlsruhe; International Ultraviolet Association.
- Linden, K. G.; Sharpless, C. M.; Andrews, S. A.; Atasi, K. Z.; Korategere, V.; Stefan, M.; Suffet, I. H. M.;** 2004b. Innovative UV technologies to oxidize organic and organoleptic chemicals. Awwa Research Foundation, Denver, USA; 91033F.
- Monarca, S.; Feretti, D.; Collivignarelli, C.; Guzzella, L.; Zerbini, I.; Bertanza, G.; Pedrazzani, R. ;** 2000. The influence of different disinfectants on mutagenicity and toxicity of urban wastewater, *Wat Res* (34) 4261-4269.
- Nieuwenhuizen, A.;** 1997. UV-desinfectie onder de loep (afstudeerverslag). Watermaatschappij Zuid-Holland Oost, Gouda (NL); W-97-35.
- Oostelbos, P. G. J. M.; Van Staveren, P. J.;** 1995. Ervaring met UV-desinfectie op pompstation Buren (Ameland): optreden ongewenste foto-chemische reacties bij UV-desinfectie is beheersbaar, *H<sub>2</sub>O* (28) 334-338.
- Parkinson, A.; Barry, M. J.; Roddick, F. A.; Hobday, M. D.;** 2001. Preliminary toxicity assessment of water after treatment with UV-irradiation and UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, *Water Res* (35) 3656-64.
- Peldszus, S.; Souza, R.; Bolton, J. R.; Dussert, B. W.; Smith, F.; Andrews, S. A.;** 2000. Impact of medium pressure UV-disinfection on the formation of low molecular weight organic by-products and nitrite, and the reduction of bromate, *Water Quality Technology Conference Proceedings*, Salt Lake City; American Water Works Association.

- Pol, S.; van der, Krijnen, S.;** 2005. Optimal UV output in different application of low-pressure UV-C lamps, 3de internationaal congres over Ultraviolet technologie, IUVA, 24 - 27 mei, Whistler, Canada
- Rapaport, D.;** 1994. UV/oxidation cleans up polluted groundwater cost-effectively, *Water Wastewater Int* (9) 45-46.
- Sharpless, C. M.; Linden, K. G.;** 2001. UV Photolysis of Nitrate: Effects of natural organic matter and dissolved inorganic carbon and implications for water disinfection, *Environ Sci Technol* (35) 2949-2955.
- Sharpless, C. M.; Page, M. A.; Linden, K. G.;** 2003. Impact of hydrogen peroxide on nitrite formation during UV disinfection, *Wat Res* (37) 4730-4736.
- Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden;** 2001. Besluit van 9 januari 2001 tot wijziging van het waterleidingbesluit in verband met de richtlijn betreffende de kwaliteit van voor menselijke consumptie bestemd water, *Staatblad* 31.
- Trapido, M.; Hirvonen, A.; Veressinina, Y.; Hentunen, J.; Munter, R.;** 1997. Ozonation, ozone/UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> degradation of chlorophenols, *Ozone: Sci Engin* (19) 75-96.
- van der Kooij, D.; Hijnen, W. A. M.;** 1984. Substrate utilization of an oxalate-consuming *Spirillum* species in relation to its growth in ozonated water, *Appl Environ Microbiol* (47) 551-559.
- Veenendaal, H.; Noij, T.;** 2001. Mutageniteitsonderzoek Berenplaat en Kralingen. Kiwa NV, Nieuwegein (NL); BTO 2001.201(c).
- von Gunten, U.; Oliveras, Y.;** 1997. Kinetics of the reaction between hydrogen peroxide and hypobromous acid: Implication on water treatment and natural systems, *Wat Res* (31) 900-906.
- Von Sonntag, C.; Schuchmann, H.-P.;** 1992. UV disinfection of drinking water and by-product formation- some basic considerations, *J Water SRT-Aqua* (41) .
- Zoeteman, B. C.; Hrubec, J.; de Greef, E.; Kool, H. J.;** 1982. Mutagenic activity associated with by-products of drinking water disinfection by chlorine, chlorine dioxide, ozone and UV-irradiation, *Environ Health Perspect* (46) 197-205.
- Zheng, M.; Andrews, S.A.; Bolton, J.R.;** 1999. Impacts of Medium-Pressure UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Treatments on Disinfection Byproduct Formation, *Proceedings Awwa Annual, Chicago Illinois, 20 - 24 juni 1999, Sectie TU24 Universities Forum II.*