

A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size, with some being significantly larger than others, and they are interconnected in a complex, non-linear fashion.

Bedrijfstakonderzoek  
BTO 2022.029 | December 2022

# Alternatieven voor chloordioxide nadesinfectie

Bedrijfstakonderzoek

**KWR**

Bridging Science to Practice



# Rapport

## Alternatieven voor chloordioxide nadesinfectie

BTO 2022.029 | December 2022

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

### Opdrachtnummer

402045-219

### Projectmanager

Michiel Hootsmans

### Opdrachtgever

BTO - Bedrijfsonderzoek

### Auteurs

Patrick Smeets, Michiel in 't Zandt, Luuk de Waal

### Kwaliteitsborgers

Paul van der Wielen

### Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

### Keywords

Desinfectie, nagroei, adenovirus, *Campylobacter*

Jaar van publicatie  
2022

### Meer informatie

Dr. Ir. Patrick Smeets  
T +31 (0)30 6069584  
E [patrick.smeets@kwrwater.nl](mailto:patrick.smeets@kwrwater.nl)

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
F +31 (0)30 60 61 165  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)

**KWR**

December 2022 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - 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.

# Managementsamenvatting

## Langzame zandfiltratie en membraanfiltratie meest geschikte technieken voor vervanging nadesinfectie met chloordioxide

**Auteur(s)** dr.ir. Patrick Smeets, dr. Michiel in 't Zandt, Luuk de Waal MSc

In een studie naar alternatieve technieken voor het doseren van chloordioxide als nadesinfectie bij de drinkwaterzuivering, komen langzame zandfiltratie en membraanfiltratie als het meest kansrijk naar voren. Aanleiding voor dit onderzoek is het feit dat bij chloordioxide het gehalte aan chloride en chloraat stijgt en de biologische stabiliteit van het drinkwater afneemt. Drinkwaterbedrijven zijn daarom op zoek naar alternatieve technieken die dezelfde mate van desinfectie opleveren, de biologische stabiliteit verbeteren en nagroei in de reinwaterkelders tegengaan. Uit het onderzoek blijkt dat bij een goed ontwerp van langzame zandfiltratie en een adequate bedrijfsvoering, de virusverwijdering voldoende is en de biologische stabiliteit toeneemt. Vanwege het grote ruimtebeslag van deze techniek is wel verder onderzoek nodig om de noodzakelijke condities in kaart te brengen. Voor membraanfiltratie geldt dat de virusverwijdering ruim voldoende is en wordt eveneens de biologische stabiliteit verbeterd. De kosten van deze techniek liggen echter aanzienlijk hoger. Andere technieken die zijn geanalyseerd betreffen , UV-desinfectie, geavanceerde oxidatie en gammadoorstraling. Met de resultaten van dit onderzoek is de basis gelegd voor drinkwaterbedrijven om de meest gunstige alternatieve techniek te kiezen voor chloordioxidedosering, waarbij rekening moet worden gehouden met locatiespecifieke factoren. Ook voor andere situaties biedt de studie een basis bij het selecteren van zuiveringstechnieken met het oog op biologische aspecten van veiligheid en biologische activiteit. Daarnaast zijn belangrijke onderzoeksvragen gesteld over technieken die al worden toegepast of overwogen, wat kansen biedt voor het optimaliseren en valideren hiervan.



Voorbeeld van een proefopstelling voor langzame zandfiltratie

### **Belang: vraag naar alternatief voor chloordioxide dosering**

Het doseren van chloordioxide bij de drinkwaterzuivering is een goedkope en effectieve vorm van nadesinfectie, maar kent ook nadelen. De methode draagt bij aan de vorming van chloride en chloraat, waardoor de gehalten hiervan oplopen richting de toelaatbare norm. Om deze reden willen

drinkwaterbedrijven chloordioxide vervangen door een methode zonder dit ongewenst bijeffect.

### **Aanpak: evaluatie van bekende en innovatieve zuiveringstechnieken**

Alle bekende en innovatieve zuiveringstechnieken zijn geëvalueerd op hun mate van desinfectie, met name die van adenovirussen. Ook de invloed van de

technieken op de biologische stabiliteit is onderzocht. Hiervoor is informatie verzameld uit eerdere (BTO-)onderzoeken, een literatuurscan en gesprekken met experts. Op basis van de bevindingen is een shortlist opgesteld van veelbelovende technieken. Voor deze technieken zijn verschillende aspecten berekend of geschat: de kosten, duurzaamheid, ruimtebeslag en robuustheid. Op grond van de resultaten zijn aanbevelingen gedaan welke technieken het meest geschikt lijken en welke onderzoeksvragen moeten worden beantwoord voor toepassing in de praktijk.

### **Resultaten: langzame zandfiltratie en membraanfiltratie het meest kansrijk**

Alle onderzochte technieken zijn aanzienlijk duurder dan de chloordioxidedosering, maar bieden tegelijk synergetische voordelen. Twee technieken springen uit de analyse naar voren: langzame zandfiltratie en membraanfiltratie. Langzame zandfiltratie blijkt de goedkoopste techniek voor zowel voldoende desinfectie als een verbetering van de biologische stabiliteit. Wel vormt het grote ruimtebeslag een knelpunt. Vastgesteld moet worden wat de ideale bedrijfsvoeringparameters van deze techniek zijn, zodat gedurende het hele jaar de virussen voldoende worden verwijderd. Ook membraanfiltratie biedt ruim voldoende virusverwijdering en het verbetert de biologische stabiliteit. In principe zijn ultrafiltratiemembranen voldoende om de beoogde doelen te bereiken. Door een dichter membraan te kiezen zijn meer synergetische voordelen mogelijk, zoals verwijdering van organische microverontreinigingen of PFAS. Een locatiespecifieke studie is nodig om te bepalen of deze meerwaarden ook opwegen tegen de hogere kosten. Met UV-desinfectie, een andere techniek die is bekeken, is voldoende desinfectie te realiseren tegen relatief lage kosten. Nadeel is dat dit ook de biologische stabiliteit negatief kan beïnvloeden. Daarnaast spelen bij UV-desinfectie een aantal onderzoeksvragen, zoals het optimale reactorontwerp voor voldoende inactivatie van adenovirussen. De vraag is of middendrukklampen – met kortere golflengtes die effectiever zijn maar minder doordringen in het water – of lagedrukklampen – waarvan zeer veel lampen nodig zijn voor de benodigde dosis – het meest geschikt

zijn. Ook is nog niet duidelijk welke bijproducten in dergelijke geoptimaliseerde reactoren worden gevormd en wat het effect is van twee achtereenvolgende UV-behandelingen. De techniek van geavanceerde oxidatie is minder geschikt. Door AOC-vorming neemt hierbij de biologische stabiliteit af en moet na een zuivering met actiefkool opnieuw worden gedesinfecteerd. Tot slot is gekeken naar gammadoorstraling, dat voor desinfectie veel op voedingsmiddelen wordt toegepast, maar niet op drinkwater. De techniek lijkt duurder en er is veel onzekerheid over de ontwerpparameters, wat veel onderzoek vraagt. Daarnaast kunnen klanten gammastraling als iets engs en ongezonds ervaren.

### **Toepassing: optimalisatie per locatie**

Resultaten van dit onderzoek bieden de betreffende drinkwaterbedrijven handvatten om de meest gunstige alternatieve techniek voor chloordioxidedosering te kiezen. Welke alternatieve techniek het meest geschikt is, hangt af van locatiespecifieke factoren zoals de watersamenstelling, verontreinigingen en bestaande zuiveringsstappen. Enerzijds is het effect van een techniek op de biologische stabiliteit moeilijk voorspelbaar op basis van alleen waterkwaliteitsparameters. Anderzijds bieden de meeste alternatieve technieken synergetische voordelen, zoals verwijdering van organische microverontreinigingen of PFAS. Een balans moet worden gevonden tussen membraandichtheid (verwijdering verontreinigingen), kosten en duurzaamheid.

Ook voor andere drinkwaterbedrijven biedt de studie een basis bij het selecteren van zuiveringstechnieken met het oog op biologische aspecten van veiligheid en biologische activiteit. Daarnaast zijn belangrijke onderzoeksvragen gesteld over technieken die al worden toegepast of overwogen, wat kansen biedt voor het optimaliseren en valideren hiervan.

### **Het rapport**

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Alternatieven voor chloordioxide nadesinfectie* (BTO-2022.029).

# Inhoud

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Rapport</b>   | <b>2</b>  |
| <b><i>Managementsamenvatting</i></b>                             | <b>3</b>  |
| <b>Inhoud</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1 Inleiding en doel</b>                                       | <b>7</b>  |
| 1.1 Projectomschrijving  | 7         |
| 1.2 Belang en doel   | 7         |
| 1.3 Opbrengsten en toepassing                                    | 7         |
| 1.4 Doelgroep  | 8         |
| 1.5 Activiteiten   | 8         |
| 1.6 Dwarsverbanden met andere BTO-onderdelen                     | 8         |
| 1.7 Projectorganisatie   | 9         |
| <b>2 Aanpak</b>  | <b>10</b> |
| 2.1 Beoordelingscriteria   | 10        |
| 2.1.1 Desinfectiecapaciteit                                      | 10        |
| 2.1.2 Bijproducten   | 11        |
| 2.1.3 Nagroeipotentie  | 11        |
| 2.1.4 Haalbaarheid   | 12        |
| 2.2 Randvoorwaarden  | 12        |
| 2.3 Brede screening  | 13        |
| 2.4 Uitwerking shortlist   | 13        |
| <b>3 De brede screening van alternatieven voor chloordioxide</b> | <b>14</b> |
| 3.1 Longlist met alternatieven voor chloordioxide                | 14        |
| 3.1.1 Chemische methoden   | 14        |
| 3.1.2 De combinatie van chemische en fysische methoden           | 17        |
| 3.1.3 Fysische methoden  | 18        |
| 3.1.4 Fysisch-biologische methoden                               | 23        |
| 3.1.5 De shortlist van veelbelovende methoden                    | 25        |
| 3.2 Shortlist voor alternatieven chloordioxide                   | 26        |
| 3.2.1 Geavanceerde oxidatie (UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )  | 31        |
| 3.2.2 Membraanfiltratie: ultrafiltratie                          | 32        |
| 3.2.3 Langzame zandfiltratie                                     | 33        |
| 3.2.4 UV-desinfectie   | 34        |
| 3.2.5 Gammadoorstraling  | 34        |
| <b>4 Conclusies en aanbevelingen</b>                             | <b>37</b> |
| 4.1 Conclusies   | 37        |
| 4.2 Aanbevelingen voor vervolg                                   | 38        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>5</b> | <b>Referentielijst</b>                            | <b>40</b> |
| 5.1      | BTO rapporten                                     | 40        |
| 5.2      | Wetenschappelijke literatuur                      | 41        |
| <b>I</b> | <b>Longlist alternatieve zuiveringstechnieken</b> | <b>43</b> |

# 1 Inleiding en doel

## 1.1 Projectomschrijving

Deze bureaustudie onderzoekt de alternatieven voor nadesinfectie met chloordioxide in de drinkwaterzuivering en verschaft inzicht in de voor- en nadelen van alternatieve technieken op gebied van (na)desinfectie, vorming van bijproducten en biologische stabiliteit in het distributienet.

## 1.2 Belang en doel

Bij een aantal oppervlaktewaterzuiveringen van Evides (Berenplaat, Baanhoek, Braakman en Kralingen) en PWN (Andijk) vindt nadesinfectie met een lage concentratie chloordioxide plaats. Het belangrijkste doel is het afdoden van micro-organismen afkomstig uit de actiefkoolfilters om te voldoen aan de richtlijnen voor KG22 en *Aeromonas*. Daarnaast is het vanuit het oogpunt van de AMVD bijzonder effectief tegen (adeno)virussen en *Campylobacter* (Hornstra, 2014; Schijven et al., 2019). Verder beperkt chloordioxide nagroei in de reinwaterkelder, en een operationeel voordeel is dat de dosis relatief gemakkelijk kan worden verhoogd, als dit nodig is. Het behandelen met chloordioxide heeft ook nadelen. Bij desinfectie met chloordioxide worden ongewenste bijproducten, zoals chlooraat en chloriet gevormd. Een ander nadeel is dat desinfectie met chloordioxide organische verbindingen afbreekt in kleinere organische verbindingen. Deze kleinere organische verbindingen dienen als voedingsbron voor bacteriën in het distributienet, waardoor groei in het distributienet toeneemt, en de biologische stabiliteit van het water afneemt. Bij Evides speelt daarnaast dat de dosering van chloordioxide in combinatie met de toegepaste transportchloring in de Biesbosch (tegen mossellarven) er voor zorgt dat de gezondheidkundige richtwaarde voor chlooraat (70 µg/l) in het geproduceerde drinkwater wordt benaderd. Het is niet bekend of andere (combinaties van) desinfectietechnieken ook de beoogde desinfectiedoelinden kunnen halen, en resulteren in minder vorming van bijproducten en een hogere biologische stabiliteit. Dit project heeft tot doel om nieuwe en bestaande desinfectiestrategieën te evalueren op deze punten, met als voornaamste doel het verminderen van de problematiek rondom de vorming van bijproducten en biologische stabiliteit.

Hierbij zijn de belangrijkste randvoorwaarden:

- Geen/zeer beperkte vorming van ongewenste bijproducten.
- Sterke reductie van micro-organismen afkomstig van de AKF om te voldoen aan de richtlijn voor KG22 en *Aeromonas* en beperkte groei in de reinwaterkelders.
- Geen hogere nagroeipotentie in het distributienet na de desinfectiestap.
- Handhaven van voldoende desinfectiecapaciteit (AMVD) voor bacteriën en virussen, met name *Campylobacter* en adenovirussen.

## 1.3 Opbrengsten en toepassing

Het onderzoek heeft als doel om, met de huidige kennis van de positieve en negatieve aspecten van chloordioxidedosering als nadesinfectie, alternatieven te onderzoeken die een gelijke desinfectiecapaciteit laten zien, maar resulteren in minder bijproducten en biologische-stabiliteitsproblemen. Hiervoor worden bestaande en nieuwe desinfectie-technologieën/strategieën geëvalueerd, en kunnen na deze studie de volgende vragen worden beantwoord:



- Hoe effectief zijn alternatieve desinfectietechnieken in het verminderen van micro-organismen afkomstig uit de AKF?
- Hoe effectief zijn de alternatieve desinfectietechnieken in het inactiveren van pathogene micro-organismen, in het bijzonder adenovirussen en *Campylobacter*?
- Resulteren alternatieve technieken in de vorming van desinfectiebijproducten?
- Zorgen de alternatieve desinfectiemethoden voor meer of minder nagroei in het distributienet in vergelijking met de huidige situatie?
- Zijn er ander negatieve of positieve invloeden op waterkwaliteit of drinkwatersysteem?

Van de meest veelbelovende alternatieven is vervolgens bepaald in hoeverre andere parameters, zoals kosten, impact op de productiecapaciteit, duurzaamheid, gemak en veiligheid, bij operationele inzet mee moeten worden gewogen. Op basis hiervan kan dan een vervolgotraject worden uitgezet, dat als uitgangspunt dient voor het daadwerkelijke onderzoek naar het inzetten van deze alternatieven in de praktijk. Het huidige onderzoek is dus slechts de 1<sup>e</sup> stap naar het eventueel aanpassen van de huidige zuiveringen.

**Opbrengst 1:** Inzicht in nieuwe desinfectiemogelijkheden en geschiktheid als vervanger voor chloordioxide.

**Opbrengst 2:** Beoordeling van de alternatieven en of deze geschikter zijn dan chloordioxide op basis van de hierboven gestelde criteria.

**Opbrengst 3:** Een concrete aanbeveling over de geschiktheid van nieuwe desinfectie strategieën voor reductie van KG22, *Aeromonas* en ziekteverwekkers, met oog voor vorming van bijproducten en consequenties voor nagroei in het distributienet. Kennishiaten worden duidelijk aangegeven, zodat deze met een volgend onderzoek kunnen worden opgevuld.

## 1.4 Doelgroep

Binnen Nederland wordt chloordioxide als nadesinfectie toegepast door Evides en PWN. Zij zijn daarmee de direct belanghebbenden van dit onderzoek. Het is echter niet uit te sluiten dat alternatieve desinfectiemethoden, waar in dit onderzoek naar wordt gekeken, breder kunnen worden ingezet, dus ook door andere drinkwaterbedrijven.

## 1.5 Activiteiten

Activiteit 1: Literatuurstudie naar desinfectiestrategieën als vervanger van chloordioxide.

- Brede screening naar desinfectiemogelijkheden van AKF-effluent.
- Kwantificeren van inactivatie van bacteriën en virussen door deze nieuwe technieken op basis van bestaande kennis.

Activiteit 2: Selectie van meest veelbelovende opties, en weging van additionele eisen zoals kosten, impact op de productiecapaciteit, duurzaamheid, operationele inzet en veiligheid.

Activiteit 3: Rapportage en advies over implementatie.

## 1.6 Dwarsverbanden met andere BTO-onderdelen

Het effect van zuiveringstechnieken op de inactivatie van (pathogene) micro-organismen en op biologische stabiliteit wordt binnen het thema Biologische Veiligheid zowel in thematische als in bedrijfsonderzoeken onderzocht. Het referentiedocument AMVD is en wordt binnen thematische onderzoeken ontwikkeld en omvat van veel zuiveringstechnieken de effectiviteit voor de afdoding of verwijdering van micro-organismen. Die kennis is ook in voorliggend onderzoek gebruikt. Gegevens voor een aantal (nieuwe) technieken in het huidige onderzoek zullen ook aan het referentiedocument worden toegevoegd. Daarnaast vindt binnen het thema Zuivering onderzoek plaats naar diverse technieken. Kennis en expertise uit dat thema en het KWR-team, zijn ook in dit onderzoek

gebruikt om karakteristieken van zuiveringstechnieken te bepalen of schatten, zoals effect op watermatrix, kosten, energieverbruik en afvalstromen.

## 1.7 Projectorganisatie

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Verantwoordelijk onderzoeker: | Patrick Smeets (KWR, Onderzoeker microbiologie)  |
| Onderzoekers:                 | Kimberly Learbuch (KWR, microbioloog), Michiel in 't Zandt (KWR, microbioloog), Luuk de Waal (KWR, onderzoeker waterbehandeling) |
| Projectmanager:               | Michiel Hootsmans (KWR)  |
| Kwaliteitsborger:             | Paul van der Wielen (KWR, microbiologie)   |
| Projectbegeleiding:           | Leonie Marang (Evides), Giovanni Sandrini (Evides), John Boogaard (PWN), Emmanuelle Prest (PWNT)                                 |

## 2 Aanpak

### 2.1 Beoordelingscriteria

#### 2.1.1 Desinfectiecapaciteit

Voor de desinfectie-capaciteit wordt gekeken naar de gedocumenteerde logverwijdering van indexpathogenen (*Cryptosporidium*, *Giardia*, *Campylobacter*, enterovirussen en adenovirussen) en indicator-organismen (het koloniegetal bij 22°C (KG22), *Aeromonas*, *Escherichia coli*, Enterococcon, bacteriën van de coligroep en *Clostridium perfringens*) (Tabel 2-1 Overzicht van de beoordelingscriteria voor de desinfectie-capaciteit). In de uitwerking zijn alleen de organismen genoemd waarvoor informatie beschikbaar was, dus voor ontbrekende organismen is geen literatuur gevonden. Voor het onderzoek wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van overzichtsstudies zoals het Referentiedocument AMVD (PCD 8-1) en review artikelen. Nieuwe technieken zullen hierin vaak ontbreken en daarvoor wordt een literatuurscan uitgevoerd. Daarbij worden uit enkele artikelen kentallen afgeleid, waarbij de ervaring leert dat deze sterk kunnen verschillen tussen studies. Het valt buiten de scope van deze studie om dit voor alle processen diepgaand te kwantificeren. In voorkomende gevallen zullen experts bepalen wat ‘haalbare’ effectiviteit van een goed ontworpen en bedreven proces zal zijn, dat kan worden vergeleken met bestaande technieken. De ondergrens van een range betreft dus niet de minimaal gerapporteerde effectiviteit, maar de minimaal haalbare effectiviteit bij een geoptimaliseerd proces. Aangezien het hier een scan betreft met een interpretatie door experts, zijn niet alle gerapporteerde waarden voorzien van een referentie. Een dergelijke gedetailleerde studie zou in een vervolgonderzoek kunnen plaatsvinden.

Hierbij wordt nadrukkelijk gekeken of de alternatieve methoden over voldoende desinfectie-capaciteit beschikken voor de verwijdering van adenovirussen en *Campylobacter*, aangezien chloordioxide daarbij in de huidige opzet een belangrijke rol speelt. Tevens wordt gekeken naar het mechanisme van de methode en of het hierbij om inactivatie of afbraak van organismen gaat.

Voor de huidige methode met chloordioxide geldt dat er een beperkte nadesinfectie-capaciteit aanwezig is wanneer het water wordt opgeslagen in de reinwaterkelders. Dit wordt voor de fecale indexpathogenen beschouwd als de desinfectiecapaciteit van het proces. Deze nadesinfectie-capaciteit reduceert echter ook biologische activiteit in de reinwaterkelders. Er wordt niet specifiek ingegaan op nagroei van opportunistische pathogenen en indicatororganismen in de reinwaterkelders en het distributienet. In het algemeen kan worden gesteld dat dit minder plaats vindt bij een lagere nagroeipotentie (los van andere condities zoals temperatuur).

Tabel 2-1 Overzicht van de beoordelingscriteria voor de desinfectie-capaciteit

|                    |  |                                       |
|--------------------|--|---------------------------------------|
| <b>Desinfectie</b> | <b>Indexpathogenen<br/>(logverwijdering)</b>     | <i>Cryptosporidium</i>                |
|                    |  | <i>Giardia</i>                        |
|                    |  | <i>Campylobacter</i>                  |
|                    |  | Enterovirussen                        |
|                    |  | Adenovirussen                         |
|                    | <b>Indicatororganismen<br/>(logverwijdering)</b> | Koloniegetal (KG22)                   |
|                    |  | <i>Aeromonas</i>                      |
|                    |  | <i>E. coli</i>                        |
|                    |  | Enterococcen                          |
|                    |  | Bacteriën van de coligroep/coliformen |
|                    |  | SSRC/ <i>Clostridium perfringens</i>  |
|                    | <b>Watermatrix</b>                               |                                       |
|                    | <b>Inactivatie/verwijdering</b>                  |                                       |

### 2.1.2 Bijproducten

Voor bijproducten wordt enerzijds gekeken naar de kans op vorming ervan, het optreden van andere relevante processen en de effecten op de watermatrix. Bij de effecten op de watermatrix wordt hierbij gefocust op potentiële degradatie van organisch-materiaalfractionen. Ook wordt de invloed van de gebruikte technieken en producten op de waterkwaliteit en organoleptische kenmerken (geur, kleur en smaak) meegenomen.

Tabel 2-2 Overzicht van de beoordelingscriteria voor bijproducten

|                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| <b>Bijproducten</b> | Kans op vorming         |
|                     | Toxiciteit              |
|                     | Andere processen        |
|                     | Kwaliteit               |
|                     | Organoleptische stoffen |
|                     | Watermatrix             |

### 2.1.3 Nagroeipotentie

Bij de nagroeipotentie wordt gekeken naar de effecten van de toegepaste methode en eventuele toegevoegde stoffen op de nagroeipotentie van het drinkwater. Daarnaast wordt gekeken of de toegepaste methode kan leiden tot een verhoogde nagroeipotentie door veranderingen in de organisch materiaal samenstelling van het drinkwater. Ook wordt de link gelegd met de andere, bestaande zuiveringsprocessen om uitspraken te kunnen doen over de optimale inpassing van de alternatieve methode in het huidige systeem.

Tabel 2-3 Overzicht van de beoordelingscriteria voor de nagroeipotentie

|                        |                                     |
|------------------------|-------------------------------------|
| <b>Nagroeipotentie</b> | Toegevoegde stoffen                 |
|                        | Link met andere zuiveringsprocessen |
|                        | Watermatrix (gevormde producten)    |

#### 2.1.4 Haalbaarheid

Voor de haalbaarheid wordt enerzijds gekeken naar de toepasbaarheid van de methode. Hierbij gaat het om de inpasbaarheid, ofwel in hoeverre de methode kan worden toegevoegd aan de huidige zuivering qua opzet en benodigde ruimte (footprint). Ook belangrijk hierbij zijn de kosten. Er zal een kostenrange worden gegeven voor een onderlinge vergelijking van alternatieven. Voor bestaande technieken wordt gebruik gemaakt van de RHDHV kostencalculator (RHDHV 2022). Voor nieuwe technieken zal op basis van expertkennis een inschatting van het kostenniveau worden gedaan, met name ten opzichte van andere technieken. Daarnaast wordt de duurzaamheid, door impact op aspecten zoals energie, afvalstoffen en eventueel waterverlies, de zekerheid en de beproefdheid van de methode, kort besproken. Ook wordt gekeken naar de eventuele praktische dosis, de procesbewaakbaarheid (monitoring) en het gebruiksgemak van de methode.

Tabel 2-4 Overzicht van de criteria voor de beoordeling van de haalbaarheid

|                     |                                   |
|---------------------|-----------------------------------|
| <b>Haalbaarheid</b> | Praktische dosis                  |
|                     | Zekerheid                         |
|                     | Procesbewaakbaarheid (monitoring) |
|                     | Beproefdheid (schaal)             |
|                     | Kostenrange                       |
|                     | Footprint (ruimte)                |
|                     | Duurzaamheid/impact               |
|                     | Gebruiksgemak                     |
|                     | Waterverlies                      |

## 2.2 Randvoorwaarden

Een techniek moet aan bepaalde randvoorwaarden voldoen om in aanmerking te komen voor toepassing in drinkwater. Voor een aantal van de genoemde beoordelingscriteria kunnen harde, kwantitatieve eisen worden gesteld. Drinkwaterveiligheid en -kwaliteit vormen harde randvoorwaarden. Andere criteria zijn zachter waarbij de ene techniek beter kan scoren dan de andere op specifieke criteria. De uiteindelijke voorkeur is daarbij doorgaans afhankelijk van de specifieke situatie zoals de overige bestaande zuiveringsstappen, de schaal en prioriteiten van het bedrijf.

Als harde randvoorwaarden zijn gesteld:

- Minimaal evenveel benodigde logreductie van pathogenen als chloordioxide in de huidige dosering\*
- Geen overschrijding van drinkwaternormen door toevoeging of vorming van stoffen
- Geen duidelijke verhoging van de nagroeipotentie van het water

\* De huidige logreductie door chloordioxide is afhankelijk van de lokale condities en instellingen. Ook is de huidige logreductie niet altijd nodig om aan de AMVD te voldoen. Op basis van de studie van Evides zijn ook de maximaal benodigde logreducties voor de verschillende pathogenen opgenomen als referentiewaarden in de overzichtstabellen. Een logreductie van adenovirussen van gemiddeld 3,3 (95-percentiel 2,8 log) is bijvoorbeeld maatgevend voor zuivering Berenplaat. Daarbij is ervan uitgegaan dat de desinfectie bij de Petrusplaat in de toekomst wordt vervangen door een alternatief zonder desinfectiecapaciteit (zoals microzeven) en 1 log marge t.o.v. de wettelijke grens van het infectierisico.

### 2.3 Brede screening

In de brede screening is een overzicht opgesteld van beschikbare alternatieve methoden voor nadesinfectie met chloordioxide. Deze methoden beslaan chemische, fysisch-chemische en fysische desinfectiemethoden. De werking van de methode is kort beschreven. Daarnaast zijn via een literatuurscan de karakteristieken van de verschillende methoden bepaald voor de verschillende beoordelingscriteria. Deze karakteristieken zijn verzameld in een grote overzichtstabel. Niet alle criteria konden volledig worden beoordeeld, omdat deze nog niet altijd zijn onderzocht in (drink)watertoepassingen. Waar mogelijk zijn deze ingeschat via expert judgement. Wanneer een techniek duidelijk niet geschikt bleek op basis van een of enkele criteria, zijn niet alle andere criteria ook onderzocht. De overzichtstabel vormde de basis voor de selectie van processen voor de shortlist.

### 2.4 Uitwerking shortlist

Op basis van de randvoorwaarden voor de alternatieven en de informatie uit de brede screening is een shortlist gemaakt met de meest veelbelovende alternatieven voor nadesinfectie. De methoden op de shortlist zijn nader uitgewerkt waarbij ieder aspect in Tabel 2-1 tot en met Tabel 2-4 zo veel mogelijk is gekwantificeerd. De schaalgrootte heeft een groot effect op kosten en beïnvloedt ook een aantal andere aspecten. Voor de uitwerking is in verband met de grootte van de oppervlaktewaterzuiveringen van Evides en PWN uit gegaan van een grote zuivering van circa 50 mln m<sup>3</sup>/j. Deze uitwerking heeft plaats gevonden via nader literatuuronderzoek, raadplegen van experts en globale berekeningen op kengetallen. Daarbij zijn alle vier de aspecten (desinfectie, bijproducten, nagroeipotentie en haalbaarheid) opnieuw beoordeeld.

## 3 De brede screening van alternatieven voor chloordioxide

### 3.1 Longlist met alternatieven voor chloordioxide

Voor de brede screening is in Bijlage 1 een uitgebreid overzicht samengesteld van alternatieve methoden voor chloordioxide. Deze alternatieve methoden beslaan grofweg chemische methoden waarbij de toevoeging van stoffen aan het water centraal staat en fysische methoden, waarbij fysieke barrières worden toegepast. Ook bestaan er een aantal technieken waarbij chemische en fysische methoden worden gecombineerd. Op de beschikbare methoden wordt hieronder in 3.1.1 t/m 3.1.3 ingegaan.

#### 3.1.1 Chemische methoden

Een overzicht van chemische methoden als alternatief voor chloordioxide is hieronder in Tabel 3-1 weergegeven.

Tabel 3-1 Overzicht van chemische desinfectiemethoden, inclusief chloorgebaseerde methoden.

|           | Methode  |
|-----------|--|
| Halogenen | Jodium (iodine; I <sub>2</sub> )                                       |
|           | Broom (bromine; Br <sub>2</sub> )                                      |
|           | Chloor (Cl <sub>2</sub> )  |
|           | Chloordioxide (ClO <sub>2</sub> )                                      |
|           | Chlooramines (monochloramine: NH <sub>2</sub> Cl)                      |
|           | Hypochloriet/chloorbleekloog (ClO <sup>-</sup> )                       |
|           | Minerale oxychlorides (M <sub>x</sub> Cl <sub>y</sub> O <sub>z</sub> ) |
| Metalen   | Zilverionisatie (nanopartikels)  |
|           | Zilver-hydroxyapatiet  |
|           | Koper-zilverionisatie  |
|           | Ferraat (FeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )                              |
|           | Permanganaat (MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )                          |
| Radicalen | Ozon (O <sub>3</sub> )   |
|           | Waterstofperoxide (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )                     |
|           | Peroxone (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>3</sub> )             |
|           | Perazijnzuur (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> )           |
| Overigen  | Chitosan   |
|           | Ionenwisselaar (ion exchange)  |
|           | Geavanceerde oxidatie* (UV + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )           |

\*Voor geavanceerde oxidatie wordt de methode met UV en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> uitgelicht

#### Halogenen

Voor de chloorgebaseerde desinfectiemethoden geldt dat deze voornamelijk onwenselijk zijn door de vorming van trihalomethanen, chloriet (ClO<sup>-</sup>) en chloraat (ClO<sub>3</sub><sup>-</sup>). De toediening van chloorgebaseerde methoden kan er toe

leiden dat de interne bedrijfsnormen voor chloriet (70 µg/L in drinkwater bij Evides) en chloraat (7 µg/L in drinkwater bij Evides) worden benaderd of overschreden. Door variaties in het toedienen en door hogere temperaturen kan in de zomer zelfs de gezondheidkundige richtlijn van het RIVM voor chloraat worden benaderd (70 µg/L in drinkwater). Zie hiervoor ook de bureaustudie chloordioxide uitgevoerd door Evides in 2022 (TB-00386 NIP Evides).

- Voor de chloorgebaseerde methoden naast **chloordioxide**, te weten **chloor**, **chloramines**, **hypochloriet** (ofwel chloorbleekloog) en **minerale oxychlorides** (algemene samenstelling van  $M_xCl_yO_z$ , waarbij M een metaal is) geldt eenzelfde problematiek als bij chloordioxide. De methoden zijn onwenselijk vanwege de vorming van chloriet en chloraat. In het algemeen worden bacteriën en virussen effectief geïnactiveerd door chloorgebaseerde desinfectiemethoden, maar is de inactivatie van protozoa beperkt of nihil. De inactivatie is afhankelijk van het type desinfectant, de gevormde reactieve producten (afhankelijk van pH en andere stoffen in het water), temperatuur, de concentratie (die in de tijd afneemt) en contacttijd. Bij lage temperaturen die bij oppervlaktewatersystemen voorkomen, zijn desinfectieprocessen minder effectief en zijn onderlinge verschillen tussen technieken duidelijker. In het overzicht is de potentiële desinfectiecapaciteit opgenomen onder condities die in de praktijk worden toegepast: 5 °C ; 1 min·mg/l  $ClO_2$  ; 10 min·mg/l  $Cl_2$  ; 1 mg/l  $NH_2Cl$  ; 10 min·mg/l  $NaOCl$ . Dit heeft tot doel de potentiële desinfectiecapaciteit onderling te vergelijken. Bij toepassing op een specifieke locatie gelden mogelijk beperkingen wegens vorming van desinfectiebijproducten, of kan zelfs een hogere dosis worden toegepast met resulterend meer desinfectie. Dergelijke verfijning vraagt om een locatiespecifieke vervolgstudie.
- **Jodium** (iodine) en **broom** (bromine) zijn twee alternatieve desinfectiemethoden met halogenen. Het gebruik van broom leidt tot de vorming van bromide (het ion  $Br^-$ ) en de vorming van carcinogene bijproducten. Daarmee is de toepassing van broom niet geschikt voor drinkwater. Ook voor jodium geldt dat na toevoeging jodide gevormd wordt (het ion  $I^-$ ) en tevens mogelijk carcinogene bijproducten. In het algemeen kan daarom worden geconcludeerd dat halogenen als jodium en broom geen goed alternatief bieden voor chloordioxide.

### Metaalionen

Metaalionen en zouten kunnen tevens worden toegepast als nadesinfectiemethode van drinkwater. Op de in Tabel 3-1 genoemde stoffen wordt hieronder kort ingegaan.

- **Zilverionisatie** berust op de toepassing van zilveren nanopartikels in de watermatrix. Over het algemeen worden hiervoor lage concentraties zilver gebruikt, in de parts per billion range (ppb). Voor *E. coli* en enterococci is bijvoorbeeld bekend dat groei op een agar medium volledig geremd wordt bij 30 ppb (Valcheva, Ignatov, & Huether, 2020). Over virusverwijdering door zilverionisatie is minder bekend, al wordt algemeen aangenomen dat zilveren nanopartikels de virusreproductie remmen (Kim, Lee, Cho, & Yoon, 2008). Een logverwijdering van 3,5 is gedocumenteerd voor de bacteriofaag MS-2 die veel als indicator voor humaanpathogene virussen wordt gebruikt (Kim et al., 2008). Het grote nadeel van zilveren nanopartikels is dat na toepassing een aanvullende zuivering noodzakelijk is, doorgaans membraanfiltratie, waarmee de zilverpartikels en eventueel gevormde ionen kunnen worden teruggewonnen. Dit maakt dat deze methode niet direct een aanvullend voordeel heeft op bijvoorbeeld de directe toepassing van nanofiltratie en reverse osmose (RO). Op kleine schaal, zoals keramische potfilters, wordt zilver op dragermateriaal toegepast. Daarbij lijkt zilver de groei van algen en bacteriën in het gefilterde water te beperken. Er zijn geen studies gevonden over het effect op biologische stabiliteit.
- **Zilver-hydroxyapatiet** is gebaseerd op de binding tussen zilveren nanopartikels en hydroxyapatiet ( $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ). Hierbij gelden dezelfde limitaties als voor directe toepassing van zilverionisatie. Ook is de bereiding van zilver-hydroxyapatiet complex, waardoor toepassing op grote schaal niet rendabel is.



- **Koperzilverionisatie** wordt in de praktijk toegepast voor de verwijdering van *Legionella* in watersystemen op specifieke risicolocaties (bijvoorbeeld KIWA rapport 304824.014 voor effecten bij sauna's en KWR 07.042 voor leidingwaterinstallaties bij de Rijksgebouwendienst). Bij dit proces worden met elektroden koper- en zilverionen in het water gebracht. Daarbij worden concentraties in de orde van 500 µg/l koper en 50 µg/l zilver toegepast. Koper heeft een desinfecterende werking op bacteriën, net als zilver (zie zilverionisatie). De ionen accumuleren in de biofilm waardoor groei van *Legionella*, en wellicht andere bacteriën wordt beperkt. Grootschalige toepassing in centrale drinkwatervoorziening vindt niet plaats, omdat dit zou leiden tot onacceptabele koper en zilverconcentraties in het afvalwater.
- De toepassingsmogelijkheden van **ferraat** als desinfectiestap zijn relatief goed verkend binnen het BTO-onderzoek (BTO 2006.047, BTO 2014.205s, BTO 2015.073). Een grote uitdaging voor de toepassing in drinkwater is dat ferraat niet stabiel is in de aanwezigheid van zuurstof. Aangezien anaerobe condities praktisch niet haalbaar en wenselijk zijn in de drinkwaterbereiding, is toepassing van ferraat niet realistisch. Aanvullend staat ferraat bekend als goede virucide, maar matige bactericide. Waardoor de werking naar verwachting onvoldoende is. Tevens leidt toevoeging van ferraat tot vorming van assimileerbaar organisch koolstof (AOC, assimilable organic carbon) uit opgelost organisch koolstof (DOC: dissolved organic carbon) (Rougé et al., 2020). Ferraat wordt doorgaans in situ met chloorbleekloog gevormd, waarbij bijproducten in het water kunnen ontstaan. Recent is een stabiele vorm van ferraat ontwikkeld waarbij dat niet nodig is. Het is niet duidelijk is of stabiel ferraat bijproducten bevat (H2O 2021).
- Over de toepassingsmogelijkheden van **permanganaat** ( $MnO_4^-$ ) voor desinfectie van drinkwater is relatief weinig bekend. Het is een sterke oxidator en daarom wordt vergaande inactivatie van bacteriën verwacht, maar minder inactivatie van virussen en nauwelijks voor protozoa. Permanganaat lijkt niet te worden ingezet met desinfectie als hoofddoel. Het wordt voornamelijk toegepast om ijzer-, mangaan en arseenverwijdering te bevorderen in de bodem of bij filtratie. Ook kan verbetering van geur, kleur en smaak optreden, al kan ook een paarse kleur ontstaan. Er is geen documentatie gevonden over toepassing voor desinfectie. In het algemeen geldt dat door de noodzaak van mangaanverwijdering de methode niet direct geschikt is voor drinkwaterzuivering. Net als bij ferraat geldt dat door toevoeging van permanganaat AOC uit DOC gevormd kan worden (Rougé et al., 2020).

### Radicalen

Onder de radicalen vallen de toepassing van ozon ( $O_3$ ) en methoden met waterstofperoxide ( $H_2O_2$ ), combinaties van beiden en chemicaliën die bij toevoeging leiden tot de vorming van waterstofperoxide. Waterstofperoxide wordt snel afgebroken, waardoor het van belang is dat de dosering voldoende is voor een toereikende CT (contacttijd x concentratie). Daarnaast speelt ook menging een belangrijke rol.

- **Ozon** is een sterkere oxidator dan chloordioxide. Sterkere oxidanten hebben in het algemeen een sterker afdodend effect op microbiel leven en zorgen tevens voor grotere afbraak van aanwezig organisch materiaal. Inderdaad is voor ozon bekend dat de hoeveelheid AOC sterk wordt verhoogd (Van der Kooij 1984; Collivignarelli et al., 2018; Gehr et al., 2003). Met een contacttijd >30 minuten en een dosis die in de regel boven de 2 mg/L ligt kan een efficiënte afdoding van indexpathogenen en indicatororganismen worden behaald (tot 6-log verwijdering voor *Campylobacter*, enterovirussen en adenovirussen en tot 4,7-log afdoding van enterococcon getest in afvalwater) (Collivignarelli et al., 2018; Gehr et al., 2003). Voor *Cryptosporidium* en *Giardia* geldt een hogere resistentie (2 log verwijdering bij ozondosis van respectievelijk 2-4 mg/L en 0,3 mg/L) (Collivignarelli et al., 2018). Ook *Clostridium perfringens* laat een hoge resistentie voor ozon zien met 0 tot 0,5 log afdoding (Collivignarelli et al., 2018). Voor ozon geldt tevens dat de vorming van toxische bijproducten een belangrijke rol speelt, voornamelijk de vorming van bromaat ( $BrO_3^-$ ) uit bromide-ionen.

- **Waterstofperoxide** is net als ozon een sterkere oxidator dan chloordioxide. Er is relatief weinig bekend over de toepassing van waterstofperoxide als enige methode voor desinfectie tijdens de drinkwaterbereiding (Pedahzur et al., 1995). Waterstofperoxide wordt wel regelmatig in combinatie met UV-behandeling toegepast in geavanceerde oxidatie. Hier wordt onder 'Geavanceerde oxidatie' dieper ingegaan.  
Voor waterstofperoxide geldt dat in de aanwezigheid van metaalionen hydroxylradicalen ( $\text{OH}\cdot$ ) worden gevormd. Ook fotolyse leidt tot de vorming van deze hydroxylradicalen. De hydroxylradicalen reageren met membraanlipides, DNA en eiwitten. De reactie is effectief maar traag, waardoor een lange contacttijd noodzakelijk is. Ook geldt dat de hydroxylradicalen naast levende biomassa ook met het overige aanwezige organische materiaal reageert en dus ook de vorming van AOC stimuleert.
- **Peroxone** is een combinatie van waterstofperoxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) en ozon ( $\text{O}_3$ ) en wordt ook wel gezien als geavanceerde oxidatie. Hierbij wordt minder bromaat gevormd dan met alleen ozon, en de reactie is sneller waardoor kleinere contactkelders nodig zijn. Energieverbruik is 20-25% hoger dan alleen ozon voor het maken van peroxide (Hofman-Caris 2017, KWR 2017.063). Ook bij de combinatie van ozon en peroxide zal AOC toenemen en daarmee het water minder biologisch stabiel worden.
- De toepassing van **perazijnzuur** ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$ ) is gebaseerd op de vorming van waterstofperoxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) en azijnzuur ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) in de reactie met water. Aangezien azijnzuur door micro-organismen wordt afgebroken, zal het gebruik van perazijnzuur in drinkwater leiden tot verhoogde nagroei en is daarmee dus onwenselijk.

### Overigen

- **Chitosan** is een polymeer van D-glucosamine en N-acetyl-D-glucosamine en het wordt bereid uit het exoskelet van schaaldieren. Chitosan is als desinfectiemiddel effectief bij een lage pH, waardoor directe toepassing in drinkwater niet haalbaar is. Zeenat et al (2016) noemen optimale pH bereik tussen 4 en 5.
- **Ionenwisseling** is gebaseerd op het uitwisselen van ongewenste ionen in het water door niet ongewenste of minder ongewenste ionen. Vaak worden in de praktijk calcium- en magnesiumionen vervangen voor natriumionen. Ook kan de methode gebruikt worden voor het verwijderen van negatief geladen organisch materiaal als humuszuren en organische zuren. De methode is echter niet geschikt voor de verwijdering van bacteriën en virussen, waardoor de desinfectiecapaciteit nihil is.

Uit het overzicht en de korte analyse van chemische desinfectiemethoden kan worden geconcludeerd dat deze methoden geen geschikt alternatief voor chloordioxide in de nadesinfectie biedt. Dit heeft te maken met een beperkte desinfectiecapaciteit, de vorming van toxische bijproducten en/of de vorming van AOC dat negatieve effecten heeft op de biologische stabiliteit van het drinkwater.

Ook bestaat vanuit de drinkwaterbedrijven nadrukkelijk de wens om minder chemicaliën toe te passen in de drinkwaterzuivering. In lijn met bovenstaande conclusies worden de methoden uit Tabel 3-1 daarom niet verder onderzocht als alternatieven voor chloordioxide.

### **3.1.2 De combinatie van chemische en fysische methoden**

In de brede screening zijn tevens fysisch-chemische combinatiemethoden opgenomen (Tabel 3-2). Ook hiervoor geldt in brede zin dat deze methoden niet direct geschikt zijn voor toepassing voor nadesinfectie. Dit heeft vooral te maken met de sterke oxiderende werking van de combinatietechnieken, waardoor de degradatie van DOM naar AOC een belangrijke rol speelt. Anderzijds wordt ook bij deze methoden gebruik gemaakt van mineralen en chemicaliën, wat niet de voorkeur verdient. Voor de toepassing van metaalionen, als chemicaliën, geldt dat vaak gebruik gemaakt wordt van nanopartikels om het contactoppervlak te vergroten. Hierdoor is tevens een

membraanfiltratiestap noodzakelijk om de nanodeeltjes na behandeling uit het drinkwater te verwijderen. Eén van de combinatie fysisch-chemische methoden is titaniumdioxide (TiO<sub>2</sub>) en UV kort toe te lichten. Deze methode berust ook op radicalenvorming (o.a. hydroxyl-radicalen) wanneer titaniumdioxide wordt bestraald met UV-licht. Doordat titaniumoxide hierboven nog niet is behandeld, wordt deze gecombineerde methode kort toegelicht. Voor titaniumdioxide werd verondersteld dat het niet toxisch is voor mens en milieu. Momenteel is er wel discussie carcinogeniteit bij andere toepassingen zoals in zonnebrand, waarbij vooral inademing van deeltjes relevant lijkt (RIVM 2020). Er worden vrijwel geen desinfectiebijproducten gevormd (Richardson et al. 1996). Er is veel onderzoek naar de methode gedaan, maar deze wordt desondanks niet breed toegepast, waarschijnlijk vanwege bovengenoemde nadelen. Recent onderzoek liet slechts een beperkte verbetering van virusinactivatie zien ten opzichte van UV-desinfectie zonder TiO<sub>2</sub> (Augsburger et al., 2021). Doordat de hydroxylradicalen zullen resulteren in verhoogde AOC-concentraties, is de methode niet geschikt om als alternatief voor chloordioxide te gebruiken. De brede beperkingen voor de in Tabel 3-2 genoemde fysisch-chemische desinfectiemethoden betekenen dat deze methoden geen geschikt alternatief bieden voor nadesinfectie.

Tabel 3-2 Overzicht fysisch-chemische desinfectiemethoden

|                      | Methode   |
|----------------------|---|
| <b>Metalen + UV</b>  | Titaniumdioxide (TiO <sub>2</sub> ) + UV                    |
|                      | Zinkoxide (ZnO) + UV  |
|                      | Zilver-Koper-Titaniumdioxide (Ag-Cu-TiO <sub>2</sub> ) + UV |
|                      | Zilverionisatie (Ag <sup>2+</sup> ) + UV                    |
| <b>Chemisch + UV</b> | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV (geavanceerde oxidatie)  |
|                      | Perazijnzuur + UV   |

### 3.1.3 Fysische methoden

Voor de drinkwaterbereiding wordt een breed scala aan fysische zuiveringsmethoden toegepast (Tabel 3-3). Grofweg kan een onderscheid gemaakt worden tussen fysische methoden op basis van licht/UV, membraanfiltratie, sedimentatie, coagulatie en flocculatie of fysische stimulatie.

Tabel 3-3 Overzicht fysische desinfectiemethoden

|                                | Methode                                       |
|--------------------------------|---|
| <b>Licht/UV</b>                | Fotodesinfectie (zonlicht, oxidatieve stress) |
|                                | UV-behandeling                                |
| <b>Membranfiltratie</b>        | Microfiltratie                                |
|                                | Ultrafiltratie                                |
|                                | Nanofiltratie                                 |
|                                | Omgekeerde osmose (RO)                        |
|                                | Keramische (membraan)filtratie 0,2µm          |
| <b>Coagulatie/sedimentatie</b> | Coagulatie/flocculatie                        |
|                                | Sedimentatie                                  |
|                                | Flotatie (Dissolved Air Flotation, DAF)       |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Overigen</b>             | Ultrasonicatie/ sonodesinfectie               |
|                             | Pulsed electric fields/<br>electrodesinfectie |
|                             | Sono-electrodesinfectie                       |
|                             | Ultrasound + UV                               |
|                             | Microgolven                                   |
|                             | Magnetically-enhanced<br>disinfection         |
|                             | Gamma-doorstraling                            |
| <b>Biologische methoden</b> | Sterilisatie (temperatuur)                    |
|                             | Bacteriofagen ("faagtherapie")                |
|                             | Protozoa (grazers)                            |

### Zonlicht en UV-desinfectie

**Fotodesinfectie** is vooral gebaseerd op het in zonlicht aanwezige UV-licht. In het algemeen geldt dat de methode lastig toepasbaar is door I) een niet constante beschikbaarheid van zonlicht en II) de noodzaak van een groot contactoppervlak tussen het water en het zonlicht. Het gebruik van kunstmatig UV-licht biedt een beter alternatief waarop hieronder wordt ingegaan.

**UV-behandeling** kan worden toegepast met verschillende doses ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) en/of verschillende lampen/golflengtes (UVA: 315-400 nm; UVB: 280-315 nm; UVC: 100-280 nm). Hierbij geldt dat UV van een kortere golflengte een sterker effect heeft, maar minder ver doordringt in bijvoorbeeld de watermatrix.

Een van de grootste aandachtspunten bij UV-behandeling is de relatief beperkte effectiviteit op de verwijdering van adenovirussen. Voor een 4-log verwijdering van adenovirussen (type 40 en 41) is bij middendruk UV-lampen een UV-dosis van  $70 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  nodig op basis van laboratoriumexperimenten (Schijven et al., 2019). Met lage druk UV-lampen is circa  $350 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  nodig (Augsburger et al., 2021). In vergelijking, een 4-logreductie van enterovirussen kan met een dosis rond de  $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  worden gehaald (Collivignarelli et al., 2018). In het algemeen geldt dat een goed reactorontwerp nodig is om het UV-licht voldoende in de watermatrix te laten doordringen en kortsluitstroming te voorkomen.

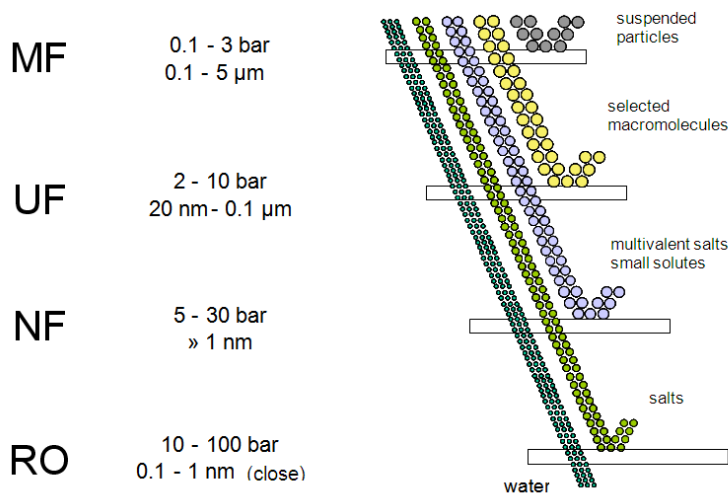
Een nadeel van UV-behandeling is dat UV-desinfectie tevens organische moleculen afbreekt (BTO 2015.038). UV-behandeling kan bij een dosis van  $20\text{-}40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  leiden tot een afname in de biologische stabiliteit van het behandelde drinkwater. Zo nam op 1 locatie de biomassa accumulatiesnelheid met  $15 \text{ pg ATP}/(\text{cm}^2 \cdot \text{dag})$  en de biomassaproductiepotentie met  $4 \text{ ng ATP}/\text{l}$  toe. Eerder onderzoek liet een sterkere afname van de stabiliteit zien bij middendruk- dan bij lagedruk UV-lampen (Kruithof et al. 2009). De watersamenstelling lijkt echter het meest bepalend voor het effect op de biologische stabiliteit, maar dit effect kan nog niet worden voorspeld. Vanwege het ontbreken van een eenduidig verband tussen toepassing van eindstandige LD-UV of MD-UV en het effect hiervan op de biologische stabiliteit van het behandelde water, dienen optimalisatiemogelijkheden steeds per zuiveringsstation te worden geverifieerd (BTO 2015.038).

*NOOT: Na afronden van deze studie werd bekend dat inmiddels een full-scale LED-UV installatie met een capaciteit van  $125.000 \text{ m}^3/\text{d}$  en een dosis van  $22 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  is gebouwd in Cumbria, Verenigd Koninkrijk (Hunter et al. 2022). Daarmee blijkt deze ontwikkeling verder dan gedacht en is een nadere studie naar de mogelijkheden interessant.*

### Membraanfiltratie

Voor membraanfiltratie geldt een toenemende mate van filtratiecapaciteit door verkleinende poriegrootte van microfiltratie (MF) naar ultrafiltratie (UF), nanofiltratie (NF) en reverse osmose (RO) (Figuur 1 **Error! Reference**

source not found.). Een korte uitleg over de filtercapaciteit van de verschillende membraanfiltermethoden is in het onderschrift bij de figuur gegeven.



*Figuur 1* Overzicht van microfiltratie (MF), ultrafiltratie (UF), nanofiltratie (NF) en reverse osmose (RO). In bovenstaande figuur wordt een overzicht gegeven van de range in grootte van de poriën bij MF, UF, NF en RO. Ook wordt erboven de toegepaste druk in bar weergegeven die nodig is om het water door de membranen te laten stromen. In het rechterdeel is een overzicht gegeven van de stoffen die voornamelijk door de betreffende filtertechniek kunnen worden verwijderd. MF: opgeloste deeltjes, waaronder bacteriën; UF: bepaalde macromoleculen en tevens virussen en eiwitten; NF: multivalente ionen zoals het calciumion ( $Ca^{2+}$ ) en kleine opgeloste stoffen; RO: zouten (ionen), kleurstoffen en zeer kleine opgeloste stoffen.

- **Microfiltratie (MF)** wordt toegepast voor de verwijdering van grote gesuspendeerde deeltjes. De filtercapaciteit is voldoende voor de verwijderingen van met name protozoën en bacteriën, maar niet voor de verwijdering van virussen (Collivignarelli et al., 2018; Jacangelo, Rhodes Trussell, & Watson, 1997). Dit maakt microfiltratie niet geschikt voor toepassing na de AKF.
- **Ultrafiltratie (UF)** verwijdert zwevend stof in water, inclusief virussen. Ultrafiltratie is daarmee een zuiveringstechniek die geschikt is voor verwijdering van alle indexpathogenen en indicatororganismen (Collivignarelli et al., 2018). Voor virussen worden de laagste logverwijderingen waargenomen (2,5 - 6 logverwijdering voor virussen versus 3,5 - >6,0 logverwijdering voor bacteriën en protozoën) (Collivignarelli et al., 2018). De dichtheid van het geselecteerde membraan bepaalt de maximaal haalbare verwijdering. In de praktijk wordt deze doorgaans beperkt tot circa 3 logverwijdering voor de indicatororganismen door kleine lekkages in verouderende membranen, aansluitingen en afdichtingen (Reeve et al. 2016). De effectiviteit of integriteit in de praktijk kan met diverse methoden worden bepaald die verschillen in gevoeligheid, kosten, uitvoerbaarheid e.d. Veel toegepaste methoden zijn deeltjestellingen, troebelheidsmetingen en druktesten. Doorgaans kan met diverse indicatororganismen de effectiviteit nauwkeuriger en op een hoger niveau worden bepaald (Hornstra et al., 2019, BTO 2022.028). Bij eindstandige membraanfiltratie kan dit problematisch zijn, omdat de voeding dan al weinig deeltjes of organismen bevat. Eindstandige ultrafiltratie is een robuuste zuiveringsstrategie om de biologische stabiliteit van behandeld water na zuivering te verbeteren (BTO 2016.008).
- **Nanofiltratie (NF)** verwijdert naast zwevende stof ook multivalente zouten als calcium- en magnesiumzouten en tevens kleine opgeloste stoffen als suikers en organische zuren die niet door ultrafiltratie verwijderd kunnen worden. Met nanofiltratie kan een logverwijdering van protozoën, bacteriën en virussen van boven de 6 worden gerealiseerd (Collivignarelli et al., 2018). Net als bij UF kan in de praktijk tot circa 3 logeenheden worden aangetoond. Voor een optimale verbetering van de biologische

stabiliteit lijkt een vergaande verwijdering van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen met volstroom hogedruk-membraanfiltratie (nanofiltratie of omgekeerde osmose) een zeer interessante route (BTO 2016.008). Ook kunnen microverontreinigingen met nanofiltratie uit het water worden gehaald (Collivignarelli et al., 2018). Een nadeel van nanofiltratie is dat het gebruik van ‘antiscalants’ nodig is, dit zijn chemicaliën die de vorming en neerslag van mineralen op de NF-membraan tegengaan. Mogelijk is ook remineralisatie nodig, afhankelijk van het gekozen membraan en de waterkwaliteit.

- Bij **reverse osmose** (RO) wordt meer dan 99% van alle in het water aanwezige stoffen verwijderd. De verwijdering van protozoën, bacteriën en virussen is in theorie volledig, net als bij nanofiltratie (Collivignarelli et al., 2018). Net als bij UF en NF kan de effectiviteit in de praktijk echter worden beperkt tot enkele logeenheden. Voor een optimale verbetering van de biologische stabiliteit lijkt een vergaande verwijdering van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen met volstroom hogedruk-membraanfiltratie (nanofiltratie of omgekeerde osmose) een zeer interessante route (BTO 2016.008). Na reverse osmose moet het water worden geremineeraliseerd, vanwege de zeer volledige verwijdering van zouten in het proces. Dit is nodig om de gewenste ionenbalans voor consumptie te herstellen.
- Bij **keramische (membraan)filtratie <math><0,2 \mu\text{m}</math>** wordt gebruik gemaakt van een keramische matrix om een filtercapaciteit vergelijkbaar met MF te behalen.

#### Coagulatie/sedimentatie

- Voor **coagulatie/flocculatie** worden in de praktijk verschillende coagulanten gebruikt, zoals ijzer(III)chloride, polyaluminium chloride, aluin, lime softening met calciumhydroxide. Dergelijke processen worden aan het begin van de zuivering toegepast, wanneer grote niet-opgeloste deeltjes uit het water verwijderd dienen te worden. Coagulatiemethoden worden ook toegepast in kunstmatige wetlands of bassins, waarna bezinking of grove filtering plaatsvindt. Het is niet wenselijk als eindstandig proces, omdat dit tot toename van deeltjes in het leidingnet kan leiden.
- **Sedimentatie** kan zowel onder natuurlijke als onder gestimuleerde condities plaatsvinden. In het geval van natuurlijke sedimentatie wordt vaak gebruik gemaakt van stagnatiebassins. Wanneer stimulering wordt toegepast, worden coagulanten zoals beschreven bij coagulatie/flocculatie toegepast. Het is niet wenselijk als eindstandig proces, omdat dit tot toename van deeltjes in het leidingnet kan leiden.
- **Flotatie (Dissolved Air Flotation, DAF)** wordt toegepast om grotere gesuspendeerde deeltjes uit het water te verwijderen. De methode werkt niet voor de verwijdering van virussen, en slechts matig voor de verwijdering van protozoën (1,3-1,7 logreductie voor *Giardia*) (Andreoli & Sabogal-Paz, 2019), waardoor het niet geschikt is als alternatief voor chloordioxide.

#### Overige fysische methoden

- Bij **ultrasonicatie** of **sonodesinfectie** wordt gebruik gemaakt van ultrasoon geluid voor de productie van vrije radicalen. Tijdens ultrasonicatie worden hydroxylradicalen, atomisch zuurstof, waterstofperoxide en ozon gevormd. Ook wordt chloor uit chloride-ionen gevormd. De effectiviteit is afhankelijk van de blootstellingstijd. De methode is alleen onderzocht in het laboratorium (Martinez-Huitle and Brillas 2008). Gezien de hoge energieconsumptie lijkt deze niet geschikt voor de bereiding van drinkwater en daarnaast zal het waarschijnlijk ook leiden tot AOC-vorming.
- Het mechanisme van **pulsed electric fields** en **elektrodesinfectie** is gebaseerd op eenzelfde principe als ultrasonicatie. Voor elektrodesinfectie geldt dat deze methode de grootste effectiviteit heeft wanneer chloride-ionen in het water aanwezig zijn, door de elektrochemische reductie naar chloor. Voor *E. coli*

geldt een 2 log hogere reductie indien chloride-ionen aanwezig zijn (Kerwick, Reddy, Chamberlain, & Holt, 2005). Voor dezelfde reden als voor ultrasonatie lijkt ook deze methode niet geschikt voor drinkwater.

- De combinatie tussen ultrasonatie en elektrodesinfectie wordt **sono-electrodesinfectie** genoemd. Hiervan is de mate van desinfectie niet bekend, maar bevat de methode dezelfde tekortkomingen als die voor ultrasonatie en elektrodesinfectie.
- De combinatie van **ultrasound + UV** maakt gebruik van de productie van vrije radicalen door zowel ultrasound (geluidsgolven > 20 kHz) als UV. In theorie leiden vrije radicalen in combinatie met directe schadelijke effecten van UV-desinfectie op organismen tot een hogere logreductie. Hiervan zijn echter geen gegevens gevonden. De methode zal waarschijnlijk wel leiden tot AOC-vorming.
- De toepassing van **microgolven** voor de reiniging van water is gebaseerd op sterilisatie door verhitting of versnelling van chemische processen. Zie hiervoor de uitwerking onder het kopje sterilisatie.
- **Magnetically-enhanced disinfection** is gebaseerd op de aanwezigheid van magnetische deeltjes die door hun lading organisch materiaal, bacteriën en virussen kunnen binden. Deze deeltjes worden vervolgens met een magneet uit het water gevestigd. Het maken van een homogene coating voor een goede en brede binding van deeltjes blijkt echter lastig, waardoor hoge logverwijdering in de praktijk lastig te halen zal zijn.
- **gammadoorstraling** is een penetrerende vorm van elektromagnetische straling die vrijkomt tijdens het radioactief verval van elementen. gammadoorstraling is ioniserend en leidt tot schade aan moleculen waarmee het in aanraking komt. Het is daarmee een zeer effectieve methode voor de afdoding van alle levensvormen en virussen. Een voordeel van gammadoorstraling is dat het een hoog penetratievermogen heeft, waardoor de straling diep in de watermatrix doordringt.  
gammadoorstraling kent een brede toepassing in de conservering van voedsel. gammadoorstraling wordt echter (nog) niet breed toegepast in de zuivering van drinkwater.  
Een onderzoek naar bacteriële verwijdering in drinkwater heeft aangetoond dat bij een bestraling van 160 Gy met Cobalt-60 "100%" van de coliformen wordt verwijderd (Aminet al., 2013). Een studie liet zien dat minimaal 5 logreductie van *E. coli* in de praktijk haalbaar is, maar dat de kosten vergeleken met conventionele behandeling met chloordioxide zeker tien keer zo hoog zijn (Thompson, 1997). Een onderzoek naar de verwijdering van de bacteriofagen Phi-X 174 (enkelstrengs DNA), MS2 (enkelstrengs RNA) en B40-8 (dubbelstrengs DNA) in drinkwater laat de hoogste verwijdering van MS2 zien (>4 logreductie bij 150 Gy) en een flink lagere verwijdering van de enkel- en dubbelstrengs DNA virussen (3 log verwijdering van Phi-X 174 bij 700 Gy en 4-log verwijdering van B40-8 bij 600 Gy) (Sommer et al., 2001). *E. coli* had ter vergelijking een >4 logreductie bij 250 Gy. Een minimale dosis van 50.000 Gy bleek nodig om infectie met *Cryptosporidium* bij muizen te voorkomen (Yu et al. 2003). Anderzijds wordt 500 Gy toegepast om spike-testen met *Cryptosporidium* en *Giardia* te steriliseren (Johnson et al. 2012). Doses voor voedingsmiddelen variëren van 1.000 tot 30.000 Gy (<https://www.foodtechservice.com/aboutfoodirr.asp>)  
De Codex Alimentarius Commissie concludeerde dat een dosis lager dan 10.000 Gy niet tot toxicologische risico's leidt (EFSA 2011).
- **Sterilisatie** maakt gebruik van hoge temperaturen voor het verwijderen, afdoden en deactiveren van (micro-)organismen. Dit is bij één minuut koken zeer effectief voor vrijwel alle micro-organismen (>10 logreductie) met uitzondering van enkele sporen die echter niet relevant zijn voor drinkwater in Nederland (0 tot 1,5 logreductie) (KWR 2011.050). De verwarming van 1 m<sup>3</sup> water van 20 naar 100°C kost ongeveer 180 kWh aan elektriciteit. Bij een hoge doorstroom van water in de conventionele drinkwaterbereiding is naast de zeer hoge energiebehoefte ook de verwarmingscapaciteit een probleem. Daarmee is het op grote schaal steriliseren van water geen geschikte methode.



### Biologische methoden

- De toepassing van **bacteriofagen** (virussen die bacteriën infecteren) voor de inactivatie van bacteriën wordt ook wel faagtherapie genoemd. De methode kan gebruikt worden voor de zeer specifieke verwijdering van bacteriën (veelal op soortsniveau), door gebruik te maken van bacteriofagen die specifieke bacteriesoorten infecteren en zo inactiveren. Er is voornamelijk kennis over faagtherapie in medisch onderzoek als vervanging voor antibiotica, maar toepassing is (nog) beperkt. Toepassingen voor zuiveringsprocessen zijn nog in de onderzoeksfase en richten zich op afvalwater. De concentraties van bacteriën in de drinkwaterbereiding zijn relatief laag, terwijl de watervolumes hoog zijn. Hierdoor zou een constante toediening van bacteriofagen noodzakelijk zijn. Doordat virussen bestaan uit eiwitten en DNA of RNA, wordt met faagtherapie relatief veel afbreekbaar organisch materiaal toegevoegd, wat zou kunnen leiden tot nagroeiproblematiek. Tevens geldt dat het toevoegen van virussen aan water tot weerstand bij de consument kan leiden. Daarmee lijkt de methode voor drinkwatertoepassingen niet geschikt. Bovendien is de methode nog in een verkennende onderzoeksfase en zou implementatie vele jaren onderzoek vragen.
- Er zijn diverse biologische zuiveringsprocessen die kunnen bijdragen aan de inactivatie van pathogene micro-organismen door concurrentie met andere bacteriën en begrazing door **protozoa**. De schmutzdecke bij langzame zandfiltratie is grotendeels een biologisch proces. Ook bij snelle zandfiltratie en actiefkoolfiltratie vindt dit plaats, maar in veel beperktere mate. Door de lage concentratie micro-organismen in drinkwater treden deze processen in de waterfase nauwelijks op. In de genoemde processen treedt het filtermateriaal op als dragermateriaal. Door alleen een schmutzdecke te creëren zonder het onderliggende langzame zandfilter zou mogelijk een compactere zuivering kunnen worden gerealiseerd. Pre-coat filtratie op doek (bijvoorbeeld Exxflow) of microfiltratie zou daarvoor een vorm kunnen zijn, waarbij een dunne laag filtermateriaal op een drager (microfiltratie membraan) wordt aangebracht of vanzelf ontstaat. In dat materiaal zou dan een schmutzdecke kunnen worden gevormd. Dergelijke filters zijn vooral onder afvalwatercondities onderzocht, waarbij niet de focus op microbiologische activiteit lag. In drinkwater is de focus doorgaans op het voorkomen van biologische groei op membranen om zo een voldoende hoge flux te realiseren. Er is geen onderzoek bekend dat zich richt op biologische verwijdering, inactivatie en stabiliteit bij dit proces. Daarom kan niet worden voorspeld in hoeverre de voordelen van langzame zandfiltratie (substantiële reductie van pathogenen en verbetering biologische stabiliteit) kunnen worden gerealiseerd en tegen welke kosten en voetafdruk. Momenteel loopt een relatief groot NWO-Zandfiltratieproject voor drinkwater, waarin meerdere AIOs onderzoeken of langzame zandfiltratie en snelfiltratie effectiever kunnen worden ingezet.

#### 3.1.4 Fysisch-biologische methoden

Bij mediafiltratie is doorgaans sprake van zowel fysische filtratieprocessen als biologische en chemische omzettingsprocessen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van media zoals zand voor de behandeling van water. Men spreekt ook wel van “natuurlijke filtratie”.

Tabel 3-4 Overzicht fysische desinfectiemethoden

|                 | Methode                    |
|-----------------|----------------------------|
| Media-filtratie | Langzame zandfiltratie     |
|                 | Snelle zandfiltratie       |
|                 | Roughing filtration        |
|                 | Diatomeeënaarde            |
|                 | Wetlands (surface flow)    |
|                 | Wetlands (subsurface flow) |



---

## Bekkenpassage (lagoon storage)

---

- **Langzame zandfiltratie** biedt een goede verwijdering van protozoën (4 - 6 logreductie) en bacteriën (3,9 logreductie voor *Campylobacter*; 2,1-4,1 voor *E. coli* en 3,7 voor enterococcon) (Bauer et al., 2011; Bellamy et al., 1985; Hijnen et al., 2004; Hijnen and Medema 2010). Voor virussen is voornamelijk onderzoek gedaan naar de verwijdering van somatische fagen, K13-fagen en MS2-fagen. De maat van verwijdering is afhankelijk van veel factoren. De schmutzdecke leeftijd, korrelgrootte en filtratiesnelheid lijken de belangrijkste parameters die de verwijdering bepalen. De schmutzdecke is de laag van biologisch materiaal die zich op het oppervlak van de langzame zandfilter vormt en naarmate deze rijpt neemt ook de verwijdering van micro-organismen toe. Onderzoeksresultaten lopen sterk uiteen en 0 tot 4 logreductie van virussen is waargenomen (Bauer et al., 2011; Hijnen et al., 2004; Schijven et al., 2008; Hijnen and Medema 2010; BTO 2019.026).

De grote uitdaging rondom langzame zandfiltratie is het benodigd oppervlak (ruimtegebruik op de zuivering) en de tijd die nodig is om een schmutzdecke te ontwikkelen na het schrapen van het filter waarbij deze eens per jaar tot meerdere jaren wordt verwijderd.

- Voor **snelle zandfiltratie** geldt dat door een verhoogde doorstroom van water in vergelijking met langzame zandfiltratie een veel kleiner oppervlak nodig is. De log-reductie van virussen is bij snelle zandfiltratie in het algemeen kleiner dan 1 log en voldoet daarmee niet als eindstandige desinfectie. (Hijnen & Medema, 20210).
- **Actiefkool filtratie** heeft dezelfde werking als snelle zandfiltratie maar is minder effectief in de verwijdering van micro-organismen met maximaal 0,7 logreductie van virussen (Hijnen & Medema, 2010).
- Bij **roughing filtration** wordt gebruik gemaakt van een serie filters waarbij de matrix steeds fijner wordt. In de eerste stap van roughing filtration zullen grovere deeltjes verwijderd worden, terwijl de laatste stap, afhankelijk van de soort filter, gericht is op het verwijderen van kleine deeltjes die in het water voorkomen. Roughing filtration wordt over het algemeen vooral aan het begin van de waterzuivering gebruikt en heeft vanwege de stapsgewijze filtering vooral een meerwaarde voor ongezuiverd water. De laatste filtratiestap komt ongeveer overeen met snelle zandfiltratie en biedt als eindstandig proces geen meerwaarde daarvoor aangezien er nog maar weinig deeltjes in het water zitten.
- **Diatomeeënaarde** biedt vooral een matrix voor de filtering van water. Diatomeeënaarde bestaat uit de skeletjes van kiezelwieren, ofwel diatomeeën. Het vormt een zeer fijne filtermatrix waarin de diatomeeënaarde zelf als een sorptiemiddel werkt. De logreductie van protozoën met diatomeeënaarde ligt boven de 6 en ook voor bacteriën, waaronder *E. coli* is een 2-logreductie aangetoond (Johnson et al., 2020; Langé et al., 1986; Ongerth & Hutton, 2001). Voor virussen werd vrijwel geen verwijdering gevonden (Brown et al. 1974)  
Diatomeeënaarde kan gecombineerd worden met bijvoorbeeld snelle zandfiltratie. Hierbij kan een laag diatomeeënaarde de logreductie-capaciteit van een snelle zandfilter verhogen.
- **Wetlands (surface flow en subsurface flow)** kunnen worden toegepast als een eerste zuiveringsstap van oppervlaktewater. Afhankelijk van het ontwerp wordt tot 2 logreductie van micro-organismen bereikt (Paraskevopoulos 2019). Wetlands zijn natuurlijke filtratiesystemen die in daardoor een open verbinding hebben met de omgeving, waardoor herbesmetting met fecale ziekteverwekker optreedt. Hierdoor zijn ze niet geschikt als tussenstap of eindstap in de zuivering.

- Bij **bekkenpassage (lagoon storage)** worden micro-organismen gereduceerd door bezinking, natuurlijk UV-licht en predatie. Opslag is om eenzelfde reden als beschreven voor wetlands niet geschikt als alternatief.

### 3.1.5 De shortlist van veelbelovende methoden

In Annex 1 zijn de bevindingen met betrekking tot de technieken op de longlist samengevat in overzichtstabellen. Uit de hierboven beschreven longlist met alternatieve methoden voor chloordioxide als nadesinfectie is een shortlist opgesteld met veelbelovende alternatieven. Daarbij zijn de volgende overwegingen gemaakt. Chemische desinfectie gebaseerd op chloor of andere halogenen leidt tot ongewenste effecten op de waterkwaliteit en nevenproducten. Ook de toepassing van metalen, al dan niet in combinatie met UV-licht, lijkt niet haalbaar vanwege mogelijke neveneffecten op de gezondheid. Geavanceerde oxidatie (AOP) met H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-UV is opgenomen in de shortlist, omdat dit proces het voordeel heeft van afbraak van organische microverontreinigingen en adenovirussen voldoende afdoodt. De overige AOP-processen zijn niet opgenomen in de shortlist, omdat deze grotendeels dezelfde voor- en nadelen hebben. Bij de keuze voor een AOP proces zal een uitgebreide studie nodig zijn voor alle aspecten van de betreffende locatie en watersamenstelling. Voor membraanfiltratie is uit gegaan van ultrafiltratie, omdat die voldoende desinfectie geeft (wat de focus van de studie is). Meer dichte membranen kunnen ook worden toegepast waarmee meer synergistische voordelen te behalen zijn zoals het verwijderen van microverontreinigingen. Dat vraagt echter een integrale studie naar alle waterkwaliteitsaspecten en bestaande zuivering op specifieke locaties, wat buiten de scope van de studie valt. UV-desinfectie is een voor de hand liggende desinfectietechniek en in de shortlist wordt dieper in gegaan op de uitdagingen rond adenovirussen. Van de media-filtratie technieken is alleen langzame zandfiltratie effectief genoeg om te worden toegepast. Zie verder de evaluaties in meer detail in voorgaande paragrafen.

Coagulatie-sedimentatie processen zijn niet effectief genoeg en niet geschikt als laatste processtap en daarom niet opgenomen in de shortlist. De overige fysische methoden zijn nog erg experimenteel en doorgaans weinig effectief of moeilijk op te schalen naar benodigde capaciteit en daarom ook niet opgenomen in de shortlist. Een uitzondering daarop is gammaamdoorstraling, die wel is opgenomen omdat dit op grotere schaal wordt toegepast op voedingsmiddelen. Van de mediafiltratietechnieken heeft alleen langzame zandfiltratie voldoende desinfectiecapaciteit om te worden toegepast en deze techniek is daarom ook opgenomen in de shortlist. Van de biologische methoden is faagtherapie niet geschikt om in drinkwater toe te passen, terwijl de biologische processen van langzame zandfilters al wordt meegenomen, omdat deze techniek op de shortlist staat. Zie verder de evaluaties in meer detail in voorgaande paragrafen.

De shortlist, zoals hieronder weergegeven, wordt in detail uitgewerkt in 3.2.

- Geavanceerde oxidatie (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (3.2.1)
- Membraanfiltratie: ultrafiltratie, nanofiltratie, reverse osmose (3.2.2)
- Langzame zandfiltratie (3.2.3)
- UV-desinfectie (3.2.4)
- gammadoorstraling (3.2.5)

## 3.2 Shortlist voor alternatieven chloordioxide

Voor de methoden op de shortlist is een meer uitgebreide analyse gedaan op de criteria zoals beschreven (Hoofdstuk 2). De uitkomsten zijn samengevat in onderstaande Tabel 3-5. Uit deze samenvatting volgt dat niet alle relevante informatie beschikbaar is voor de verschillende technieken op de shortlist. Ook werden in de literatuur verschillende waarden gevonden voor bepaalde kenmerken. In de Tabel 3-5 is opgenomen wat in principe haalbaar is aan log-verwijdering, dus niet de volledige range die in de verschillende studies zijn gerapporteerd. Waar nodig is op basis van expert judgement een keuze gemaakt uit de gerapporteerde informatie die het beste aansluit bij de Nederlandse drinkwater situatie. De methoden worden in paragraaf 3.2.1 t/m 3.2.5 nader uitgewerkt op basis van de in Hoofdstuk 2 genoemde criteria.

Tabel 3-5 Samenvatting van eigenschappen van de processen op de shortlist in vergelijking met chloordioxide (Tabel is opgedeeld in 6 deeltabellen maar kan als een grote horizontale tabel worden gelezen)

| Desinfectie  |                  |                                   |                |                      |                |                 |                                       |                  |                |             |                            |                              |
|--|------------------|-----------------------------------|----------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------------------------------|------------------|----------------|-------------|----------------------------|------------------------------|
| Methode  | Afkorting        | Indexpathogenen (logverwijdering) |                |                      |                |                 | Indicatororganismen (logverwijdering) |                  |                |             |                            |                              |
|  |                  | <i>Cryptosporidium</i>            | <i>Giardia</i> | <i>Campylobacter</i> | Enterovirussen | Adenovirus      | Koloniegetal (KVE)                    | <i>Aeromonas</i> | <i>E. coli</i> | Enterococci | Bacteriën van de coligroep | SSRC / <i>C. perfringens</i> |
| Geavanceerde oxidatie (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV) | GO               | >4,2                              | >4,1           | >8                   | 6              | 5,2             | >6,2                                  |                  | >8             | 5           | >8                         | 3                            |
| Membraanfiltratie (ultrafiltratie – conventioneel)         | UF               | 3->6                              | 3->6           | 3->6                 | 3->6           | 3->6            |                                       | 3->6             | 3->6           | 3->6        | 3->6                       | 3->6                         |
| Langzame zandfiltratie                                     | LZF              | 4->6,5                            | 4-6            | 3,9                  | 0-4            |                 |                                       | 2,1-4,2          | 3,7            |             |                            | 2                            |
| UV-behandeling (MD 40 mJ/cm <sup>2</sup> )                 | UV               | 3                                 | 3              | 4,3                  | 4,3            | 3               |                                       | 2,0->4,0         |                |             |                            | 1                            |
| Gammadoorstraling (500-10.000 Gy)                          | GS               | >2                                |                |                      |                | 3-4 (DNA fagen) |                                       | >5               |                |             |                            |                              |
| Chloordioxide (0,07 mg/L in winter) (referentie)           | ClO <sub>2</sub> | 0                                 | 0              | >5                   | 2,3-4,5        | 2,3-4,5         | 2                                     | 4,3              |                |             |                            |                              |
| Benodigde/gewenste verwijdering alternatief                |                  | 0                                 | 0              | 1,6                  | 1,4            | 3,3             | 3                                     |                  |                |             |                            |                              |

| Desinfectie |                                      |                          |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------|
|             | Werking                              |                          |
| Afk.        | Invloed van watermatrix              | Inactivatie/verwijdering |
| GO          | Troebelheid, UV transmissie          | Inactivatie              |
| UF          | Gesuspendeerde stof                  | Verwijdering             |
| LZF         | Temperatuur                          | Inactivatie+verwijdering |
| UV          | Troebelheid, UV transmissie          | Inactivatie              |
| GS          |                                      | Inactivatie              |
| CIO2        | Organische stof, gesuspendeerde stof | Inactivatie              |

| Bijproducten |                       |  |  |                                      |                           |
|--------------|-----------------------|--|--|--------------------------------------|---------------------------|
| Afk.         | Kans op vorming       | Toxiciteit                               | Andere processen                           | Organoleptische stoffen              | Watermatrix               |
| GO           | Hoog, toename AOC     | Laag (in combinatie met AKF)             | Radicalen reageren met organisch materiaal | Geen (mogelijk indirect via nagroei) | Geen                      |
| UF           | Geen                  | Geen                                     | Reductie zwevende stof                     | Reductie troebelheid, sediment       | Geen                      |
| LZF          | Geen                  | Geen                                     | Microbiële afbraak in zandfilter           | Geen/beperkt                         | Verhoging koloniegetal    |
| UV           | Gering, toename AOC   | Laag (bij dosis <70 mJ/cm <sup>2</sup> ) | Radicalen reageren met organisch materiaal | Geen (mogelijk indirect via nagroei) | Geen                      |
| GS           | Verwachte toename AOC | Mogelijk toxische bijproducten uit OM    | Geen/onbekend                              | Geen (mogelijk indirect via nagroei) | Geen                      |
| CIO2         | Toename AOC           | Chloraat en andere bijproducten          |  | Geen/beperkt                         | Verhoging chloridegehalte |

| Nagroeiopotentie |   |   |                   |
|------------------|---|---|-------------------|
| Afk.             | Toegevoegde stoffen                     | Link met andere zuiveringsprocessen   | AOC vorming       |
| GO               | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (vervalt) | AOC en DBP reductie door nageschakelde AKF nodig  | Toename           |
| UF               | Geen                                    | Deeltjesverwijdering in voorzuivering reduceert de verstopping en terugspoelfrequentie  | Reductie          |
| LZF              | Geen                                    | Deeltjesverwijdering in de voorzuivering reduceert verstopping en frequentie van schrapen   | Reductie          |
| UV               | Geen                                    | Reductie troebelheid door voorzuivering nodig.<br>Reductie organische stof door voorzuivering verhoogt UV transmissie en verlaagt (energie)kosten | Gelijk of toename |
| GS               | Geen                                    | Mogelijk AOC en DBP reductie door nageschakelde AKF nodig   | Toename           |
| CIO2             | Chloride (geen AOC)                     | Reductie organische stof door voorzuivering verlaagt CIO2 dosis/verbruik  | Toename           |

| Haalbaarheid-operationeel |   |  |  |                       |
|---------------------------|---|--|--|-----------------------|
| Afk.                      | Praktische dosis  | Zekerheid  | Procesbewaakbaarheid (monitoring)          | Beproefdheid (schaal) |
| GO                        | 10 mg/L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + 730 Wh/m <sup>3</sup> | Gevoelig voor elektriciteitsuitval, afhankelijk van levering chemicaliën | UV sensor, energieverbruik en redox sensor | Praktijk              |
| UF                        | Robuust   | Goede barrière, afhankelijk van elektra voor pompen                      | Troebelheid/deeltjes                       | Praktijk              |
| LZF                       | Robuust   | Robuust, variaties van schmutzdecke leeftijd en temperatuur              | Level switch/drukverschilmeters            | Praktijk              |
| UV                        | 54 Wh/m <sup>3</sup>  | Gevoelig voor elektriciteitsuitval                                       | UV sensor, energieverbruik                 | Praktijk              |
| GS                        | 500 Gy  | Bestraling met Cobalt-60 is robuust en veilig                            | Stralingsdosis?                            | Lab/pilot             |
| CIO2                      | 0,12 g CL <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>                        | Afhankelijk levering chemicaliën   | Doseerpomp                                 | Praktijk              |

| Haalbaarheid-kosten |   |                   |                  |   |                                |            |              |
|---------------------|---|-------------------|------------------|---|--------------------------------|------------|--------------|
| Afk.                | Kostenrange (500 m <sup>3</sup> /u installatie) |                   |                  | Footprint (ruimtebeslag)                        | Duurzaamheid/<br>impact        | Monitoring | Waterverlies |
|                     | Investeringskosten                              | Exploitatiekosten | Kuub-kosten      |   |                                |            |              |
|                     | €   | €/jaar            | €/m <sup>3</sup> |   |                                |            |              |
| GO                  | 300.000   | 380.000           | 0,09             | 15 m <sup>2</sup> 2,5 m <sup>3</sup> opslagtank | 1577 ton CO <sub>2</sub> /jaar | Intensief  | 0,10%        |
| UF                  | 5.400.000                                       | 650.000           | 0,17             | 160 m <sup>2</sup>                              | 532 ton CO <sub>2</sub> /jaar  | Beperkt    | 10,00%       |
| LZF                 | 2.400.000                                       | 180.000           | 0,04             | 1250 m <sup>2</sup> filteroppervlak             | 8,13 ton CO <sub>2</sub> /jaar | Beperkt    | 0,30%        |
| UV                  | 260.000   | 70.000            | 0,02             | 10 m <sup>2</sup>                               | 110 ton CO <sub>2</sub> /jaar  | Beperkt    | 0,10%        |
| GS                  | ±400.000  | ±100.000          | ±0,03            | onbekend  | onbekend                       | Beperkt    | 0,10%        |
| CIO2                | 40.000  | 10.000            | 0,002            | 5 m <sup>2</sup> 0,5 m <sup>3</sup> opslagtank  | 5 ton CO <sub>2</sub> /jaar    | Beperkt    | 0%           |

### 3.2.1 Geavanceerde oxidatie (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

#### Desinfectie

De UV dosis die bij geavanceerde oxidatie wordt toegepast is met circa 600 mJ/cm<sup>2</sup> veel hoger dan de 40-90 mJ/cm<sup>2</sup> die gebruikelijk is bij toepassingen voor alleen desinfectie. De desinfectiecapaciteit is daarom voor verschillende organismen bij de lagere doses bepaald. Men is terughoudend bij het extrapoleren naar hogere doses, omdat in veel gevallen 'tailing' is waargenomen, waarbij de inactivatie van een organisme niet meer (lineair) toeneemt bij een hogere dosis. Daarnaast wordt de mate van desinfectie beperkt door de experimentele condities, zoals de concentratie micro-organismen die wordt blootgesteld. In Tabel 3-5 is de bovengrens weergegeven van de gerapporteerde desinfectie in de literatuur.

Voor de doelstelling in dit onderzoek is de beoogde 3,3 log inactivatie van adenovirussen, een UV-persistent organisme, maatgevend. Hier is uitgegaan van middendruklampen, omdat daarvoor circa 8 maal lagere dosis nodig is dan voor lagedruklampen. Kosten van een lagedrukinstallatie voor deze dosis zullen een veelvoud zijn van een middendrukinstallatie, en de inpasbaarheid zou lastiger zijn vanwege het ruimtebeslag van het grote aantal lampen.

#### Bijproducten

Bij toepassing van geavanceerde oxidatie kunnen ongewenste desinfectiebijproducten (DBP's) ontstaan, waaronder sommige met mutagene activiteit. Voor verwijdering van de bijproducten zijn vervolgstappen in de bereiding van drinkwater nodig, bijvoorbeeld met actiefkoolfiltratie. Vorming van de bijproducten bij geavanceerde oxidatie wordt beïnvloed door de aanwezigheid van natuurlijk organisch materiaal (NOM) en nitraat, gecombineerd met UV-desinfectie. Het type lamp en kwartsbuis heeft invloed op de ontwikkeling van genotoxiciteit, waarbij middendruklampen tot meer toename van genotoxiciteit leiden dan lagedruklampen. Over de identiteit van de bijproducten bestaat nog veel onduidelijkheid. Na actiefkoolfiltratie wordt geen verhoogde genotoxiciteit meer waargenomen.

#### Nagroeipotentie

Geavanceerde oxidatie leidt tot een toename van AOC en daarmee tot een toename van de nagroeipotentie van het geproduceerde drinkwater. Het is niet duidelijk welke procesfactoren (UV- versus H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-dosis, type lamp) de mate van AOC-vorming bepaalt. De watersamenstelling (na voorzuivering), met name NOM samenstelling, is ook bepalend voor het AOC-gehalte en de biologische stabiliteit van het water. Per locatie zou kunnen worden bepaald of de dit binnen acceptabele grenzen blijft. Zo niet, dan is aanvullende zuivering, zoals een biologische actiefkoolfiltratie nodig, waarna dan weer reductie van koloniegetal met bijvoorbeeld lage dosis UV-desinfectie nodig is. Daarmee is geavanceerde oxidatie alleen interessant bij inpassing in een totaal zuiveringsconcept, waarbij de andere voordelen (zoals afbraak microverontreinigingen) een belangrijke rol spelen. .

#### Haalbaarheid

Geavanceerde oxidatie met UV en peroxide wordt reeds op praktijkschaal toegepast bij de (voor)behandeling van drinkwater, maar niet als eindstandige desinfectiemethode. Het ruimtegebruik en het waterverlies is beperkt, maar de kosten zijn stevig in vergelijking met de toepassing van chloordioxide (Tabel 3-5). De milieu-impact is hoog, maar wat betreft het elektriciteitsverbruik sterk afhankelijk van de hoeveelheid groene energie in het Nederlandse elektriciteitsnetwerk.

De methode is gevoelig voor stroomuitval en afhankelijk van levering van chemicaliën. Het desinfectieproces kan online worden bewaakt met een UV sensor.

#### Conclusie

Geavanceerde oxidatie biedt ruim voldoende desinfectiecapaciteit om chloordioxide te laten vervallen. Het kan echter niet als directe vervanging van eindstandige desinfectie worden ingezet vanwege de AOC vorming en kosten en energieverbruik zijn relatief hoog. De technologie is alleen interessant bij inpassing in het totale



zuiveringsconcept en is alleen zinvol wanneer afbraak van microverontreinigingen nodig of gewenst is. Biologische actiefkoolfiltratie en UV-desinfectie zijn logische zuiveringsstappen die na geavanceerde oxidatie zouden moeten volgen. Voor de huidige studie is geavanceerde oxidatie eigenlijk een vorm van UV-desinfectie met zeer hoge dosis (zie 3.2.4).

### 3.2.2 Membraanfiltratie: ultrafiltratie

Voor membraanfiltratie gaan we uit van conventionele ultrafiltratie met capillaire membranen. PWN past keramische membranen toe met een poriegrootte op de grens van microfiltratie en ultrafiltratie (0,1 µm). Metingen met natuurlijke virussen laten tot 4,1 logreductie zien. Daarbij wordt de kanttekening geplaatst dat de grootte van natuurlijke virussen nog niet bekend is, terwijl een aantal pathogene virussen relatief kleine afmetingen heeft. Door toepassing in de voorzuivering kunnen andere deeltjes in het water ook bijdragen aan virusverwijdering door verdichting van de poriën en voor aan deeltjes gehechte virussen. De effectiviteit als eindstandige zuivering zou nader onderzocht moeten worden. De overige aspecten (kosten, duurzaamheid, robuustheid) zijn niet gerapporteerd en zijn erg specifiek voor de enkele locaties waar deze techniek is gerealiseerd. Daarom is deze vorm van membraanfiltratie niet apart beoordeeld. Een nadere studie is nodig om te bepalen of er voordelen zijn ten opzichte van conventionele UF membranen als eindstandige desinfectie.

#### Desinfectie

Ultrafiltratie vormt in theorie een absolute barrière voor alle micro-organismen, omdat de poriegrootte kleiner is dan virussen. In de praktijk blijkt echter dat de verwijdering wordt beperkt door variaties in het membraan, defecte capillairen, de sealings van de membraanmodules en de koppelingen tussen membraanmodules. Meer dan 3 logreductie is wel haalbaar in de praktijk, en daarmee vormt het een alternatief voor chloordioxide. Integriteitsbewaking en -verificatie is essentieel in de praktijk. Deeltjestellers zijn de meest gevoelige methoden die hiervoor worden ingezet. Nieuwe ontwikkelingen zoals natuurlijke virussen kunnen tot verificatie van een hogere logverwijdering in de praktijk leiden.

#### Bijproducten

Ultrafiltratie leidt niet tot de vorming van bijproducten. Chemicaliën die bij reiniging worden gebruikt en eventuele gevormde bijproducten, worden afgevoerd met het spoelwater. Bij spoelwaterhergebruik kunnen deze stoffen en de omzettingsproducten weer in het drinkwaterproces komen. In dat geval moet worden nagegaan of dit tot relevante concentraties leidt en of de navolgende zuiveringsstappen deze concentratie reduceren.

#### Nagroeipotentie

Ultrafiltratie reduceert de nagroeipotentie, afhankelijk van de watersamenstelling. Door deeltjes te verwijderen wordt ook daaraan gebonden organisch materiaal verwijderd, wat de nagroeipotentie verlaagt (Schurer et al., 2019). De kleinere hoeveelheid deeltjes heeft ook tot gevolg dat er minder opbouw plaatsvindt van sediment in het leidingnet. Daarmee is er ook minder biofilm in het sediment aanwezig. Ook blijven leidingen schoner en is spuien minder vaak nodig bij minder deeltjes.

#### Haalbaarheid

Ultrafiltratie wordt veelvuldig op praktijkschaal ingezet (voorbehandeling voor RO en spoelwaterbehandeling). De kosten zijn het hoogst van alle alternatieven (€0,1651 per m<sup>3</sup>), maar omdat rein water minder zwevende stof bevat dan de referenties voor de kostenraming kan mogelijk een hogere flux worden toegepast. Dan is minder membraanoppervlakte nodig waardoor de kosten kunnen dalen. Het ruimtegebruik en de milieu-impact zijn gemiddeld, het waterverlies is relatief hoog (circa 10%) maar in belangrijke mate afhankelijk van de terugspoelfrequentie. Het spoelwater kan doorgaans weer eerder in de zuivering worden teruggebracht om spoelverlies te beperken. In dat geval komen chemicaliën en omzetproducten van de membraanreiniging ook in het productieproces terug en moet worden bepaald of dat tot problemen kan leiden. De integriteit van de installatie dient gemonitord te worden, waarbij bij inzet op drinkwater de gevoeligheid van de monitoring mogelijk lager is

dan de gewenste logreductie. Uitvoering in meerdere straten/stacks is nodig om bijfalen voldoende restcapaciteit te behouden.

### Conclusie

Ultrafiltratie biedt een aantrekkelijk alternatief voor chloordioxide. De microbiologische barrière kan bij juiste keuzes, bouw, bedrijfsvoering en monitoring voldoende effectief zijn. Het reduceren van de hoeveelheid deeltjesmateriaal dat in het leidingnet komt is een voordeel. Verder leidt ultrafiltratie niet tot een verandering in waterkwaliteit. Ultrafiltratie kan de biologische stabiliteit verbeteren. Aandachtspunten zijn het waterverlies dat voldoende capaciteit in de voorzuivering vraagt en de hoge kosten.

## 3.2.3 Langzame zandfiltratie

### Desinfectie

Langzame zandfiltratie vormt een barrière tegen alle micro-organismen, maar is voor virussen minder effectief dan chloordioxide. Het is niet bekend hoe effectief adenovirussen worden verwijderd. Volgens de colloid-filtratie theorie worden ze minder goed verwijderd dan MS2. De meeste verwijdering vindt echter plaats in de schmutzdecke, waarop die theorie niet van toepassing is. Op dit moment is daarom de beste schatting dat MS2 en adenovirussen in gelijke mate worden verwijderd. Validatie voor verwijdering van virussen in het algemeen en adenovirussen in het bijzonder vergt gericht onderzoek, waarbij procesparameters, zoals smutzdeckeleeftijd, zandfractie, beddikte en filtratiesnelheid kunnen worden geoptimaliseerd. Het is een zeer robuust en volledig natuurlijk proces dat op diverse locaties in Nederland wordt toegepast als laatste zuiveringsstap.

### Bijproducten

Organische stoffen worden middels biologische processen omgezet. Er worden zover bekend geen bijproducten met negatief effect op de gezondheid geproduceerd.

### Nagroeipotentie

Door de intensieve afbraak van organische stof in de filters neemt het AOC-gehalte af en wordt de nagroeipotentie gereduceerd. Een oppervlaktewaterzuivering waar langzame zandfiltratie wordt toegepast produceert een AOC lager dan 0,7 µg C/l. Zonder langzame zandfiltratie bedraagt dit 4 tot 11 µg C/l.

### Haalbaarheid

Langzame zandfiltratie is voorbehouden aan productielocaties waar veel ruimte voorhanden is. De kosten zijn dan met €0,04 relatief laag. De techniek is robuust en wordt al geruime tijd op praktijkschaal toegepast. De milieu-impact is zeer beperkt, evenals het waterverlies. Monitoring is slechts in beperkte mate noodzakelijk.

### Conclusie

Langzame zandfiltratie kan een alternatief vormen voor chloordioxide, met voordeel voor biologische stabiliteit. Knelpunten zijn wel het benodigde bouwoppervlak en onzekerheid over effectiviteit voor adenovirussen. Langzame zandfiltratie wordt al meer dan 100 jaar toegepast voor drinkwaterbereiding en er is in die tijd weinig innovatie geweest. Innovatie op materialen, filtratiesnelheid en bouwmethoden met de huidige inzichten en technieken zou tot een compact en effectief nieuw ontwerp kunnen leiden. Dergelijk onderzoek vindt momenteel plaats in het NWO-project 'Zandfiltratie'.

### 3.2.4 UV-desinfectie

#### Desinfectie

UV-desinfectie is effectief voor alle indexpathogenen, maar vraagt gebruik van middendruklampen (Tabel 3-5). De meerwaarde van middendruklampen wordt in de praktijk echter beperkt. Middendruklampen resulteren in collimated beam testen weliswaar tot meer desinfectie van adenovirussen doordat ook kortere golflengtes worden uitgezonden. Deze golflengtes dringen echter minder diep door in water, waardoor het effect in een praktijkreactor beperkt is. Een alternatief reactor ontwerp dat uit gaat van transmissie van kortere golflengtes, met in principe meer lampen, zou maximale effectiviteit kunnen bereiken. Dit vraagt een nadere studie. Andere innovaties zoals led-UV met specifieke golflengtes zouden mogelijk ook verbetering in kunnen brengen. Er zijn echter nog geen onderzoeken die zich hierop hebben gericht. Ook zijn er nog geen LED-reactoren ontwikkeld voor de praktijk. Daarnaast zouden ook andere waterkwaliteitsparameters, waaronder de biologische stabiliteit, daardoor kunnen worden beïnvloed.

#### Bijproducten

Nitriet is het bekendste bijproduct van UV-desinfectie. De mate van vorming is afhankelijk van de watermatrix (nitraat), het lamptype, reactorontwerp en UV-dosis. Vorming van andere bijproducten is beperkt bij de dosis van 40 tot 90 mJ/cm<sup>2</sup> die voor desinfectie wordt toegepast.

#### Nagroeipotentie

AOC kan toenemen door de omzetting van organische stof. Dit is bij een dosis voor desinfectie echter beperkt. Er zijn situaties geweest waarbij algengroei plaatsvond. Deze problemen zijn opgelost in de huidige ontwerpen.

#### Haalbaarheid

UV-desinfectie wordt op veel conventionele zuiveringen toegepast als eindstandige desinfectie. De milieu-impact is relatief hoog door het hoge energieverbruik, maar is daarmee sterk afhankelijk van de hoeveelheid groene stroom in de Nederlandse elektriciteitsmix. De benodigde ruimte is beperkt en monitoring kan grotendeels online plaatsvinden.

#### Conclusie

In theorie kunnen adenovirussen, en alle andere indexpathogenen en nagroei-organismen, voldoende worden afgedood door middendruk-UV met een dosis van 40-90 mJ/cm<sup>2</sup>. Aandachtspunt is echter de beperkte doordringing van de kortere, effectievere golflengtes in het water. Bij de huidige reactoren hebben deze golflengtes weinig effect. Het ontwikkelen van een reactor hiervoor zou nog enig onderzoek en ontwikkeling vragen en het resultaat kan anders scoren op aspecten als kosten, duurzaamheid, bijproducten en biologische stabiliteit. Een tweede aandachtspunt is het toepassen van meerdere UV-desinfectiestappen in de zuivering. Voor afdoding van indexpathogenen uit de bron zou men de totale dosis moeten beschouwen om de effectiviteit, inclusief tailing, te bepalen. Voor nagroei-organismen speelt dit natuurlijk niet.

*NOOT: Na afronden van deze studie werd bekend dat inmiddels een full-scale LED-UV installatie met een capaciteit van 125.000 m<sup>3</sup>/d en een dosis van 22 mJ/cm<sup>2</sup> is gebouwd in Cumbria, Verenigd Koninkrijk (Hunter et al. 2022). Daarmee blijkt deze ontwikkeling verder dan gedacht en is een nadere studie naar de mogelijkheden interessant.*

### 3.2.5 Gammadoorstraling

gammadoorstraling wordt momenteel breed toegepast binnen voedselveiligheid (en medische sterilisatie). EFSA (2011) beschrijft een groot aantal studies naar de toepassing van gammadoorstraling voor de desinfectie van voedingsmiddelen inclusief vers fruit en sappen. Het is onduidelijk of doorstraling in de praktijk wordt toegepast voor conservering van vloeistoffen. Toepassing van doorstraling in Nederland is alleen toegestaan voor specifieke

producten, waarbij geen vloeistoffen genoemd staan

(<https://www.voedingscentrum.nl/encyclopedie/doorstralen.aspx>).

De methode wordt momenteel niet toegepast voor drinkwater. In 1997 is een promotieonderzoek uitgevoerd naar de haalbaarheid voor drinkwaterbereiding (Thompson 1997), echter dit proefschrift is (nog) niet volledig beschikbaar. Onderstaande conclusies en bevindingen zijn afkomstig uit dit onderzoek, tenzij een andere specifieke referentie wordt genoemd. Zoals toegelicht in 3.1.3 vormt gammadoorstraling een interessant alternatief dat een hoge logreductie van indicatororganismen en indexpathogenen kan bereiken. Echter, gammadoorstraling kan waarschijnlijk ook voor een belangrijk deel bijdragen aan de vorming van AOC, maar dat dient verder te worden onderzocht.

### Desinfectie

In literatuur wordt doorgaans sterilisatie met gammadoorstraling gerapporteerd als 'volledige sterilisatie'. De genoemde log-desinfectie is dan gebaseerd op de initiële aantallen organismen bij die experimenten. De gerapporteerde doses kunnen sterk uiteen liggen, zoals bij *Cryptosporidium*. Daarbij moet worden bedacht dat infectiviteit van deze organismen met uiteenlopende methoden is bepaald (bijvoorbeeld muizen en cellijnen met PCR).

Bij lage temperaturen is gammadoorstraling minder effectief doordat gevormde radicalen minder snel door het water verplaatsen en daardoor minder micro-organismen en hun DNA bereiken (Harrel et al. 2018). De dosis zou daarom temperatuurafhankelijk moeten zijn.

### Bijproducten

Thompson (1997) concludeert op basis van bioassays dat er minder toxische stoffen worden gevormd bij gammadoorstraling dan bij conventionele chloordesinfectie. Harrel et al. (2018) concluderen echter dat gammabestraalde voedingsmiddelen in dierstudies tot genominstabiliteit kon leiden wat een verhoogd kankerrisico tot gevolg kan hebben. Deze uitkomsten vragen echter om aanvullend onderzoek in drinkwater.

### Nagroeipotentie

Bij sterilisatie van monsters met behulp van gammadoorstraling voor onderzoek naar afbraak van microverontreinigingen bleek dit tot een significante verandering in de NOM-structuur te leiden (BTO 2021.050). Dit zou voor drinkwater relevant kunnen zijn ten aanzien van nagroei of vorming van bijproducten. Afhankelijk hiervan zou mogelijk weer een vervolgstap voor verwijdering van bijproducten of verbeteren van de biologische stabiliteit nodig zijn (bijvoorbeeld biologische actiefkoolfiltratie met desinfectie). Op dit moment is echter niet duidelijk of dit optreedt en hoe dit samenhangt met watersamenstelling en condities. Hiervoor dient aanvullend onderzoek in drinkwater te worden uitgevoerd.

### Haalbaarheid

Thompson (1997) concludeert dat desinfectie van drinkwater haalbaar is maar dat kosten een orde hoger liggen dan conventionele desinfectie met chloor. Er zijn geen ontwerpparameters bekend voor gammadoorstraling van vloeistoffen. Cobalt 60 wordt doorgaans gebruikt als bron voor gamma-doorstraling. De dosis wordt uitgedrukt als Gray (Gy) wat overeenkomt met 1 Joule per kg blootgestelde massa. Een dosis van 500 Gy komt dan overeen met 500 kJ/m<sup>3</sup>. Ter vergelijking, bij UV-desinfectie wordt orde grootte 0,1 kJ/m<sup>3</sup> aan effectieve energie ingebracht (afhankelijk van UV transmissie). Voor een productie van 37,8 m<sup>3</sup>/d (10 MGD) wordt geschat dat 100 milliCurie per jaar aan radioactieve bron nodig is. Deze bron zou kunnen worden verkregen uit nucleair afval, wat een nuttige

toepassing hiervan zou betekenen. Er is niet nagegaan of er voldoende materiaal beschikbaar is in Nederland, in welke vorm deze te verkrijgen is en de kosten hiervan.

Gammadoorstraling heeft, als radioactieve straling, een negatief imago en kan daarom op weerstand van de consument stuiten. Het wordt onder meer geassocieerd met stralingsrisico zoals bij de Fukushima ramp (BTO 2014.013).

### **Conclusie**

Doorstraling van drinkwater met gammadoorstraling wordt nog niet toegepast en implementatie zou nog veel onderzoek vergen. Voordelen lijken een goede desinfectiecapaciteit, ongevoelig voor de watermatrix en minder toxische bijproducten dan bij chloor-desinfectie. Nadelen lijken de kosten, de mogelijke vorming van AOC en mogelijke nevenproducten, het verkrijgen van toestemming voor toepassing op drinkwater en het negatieve imago van straling bij de consument. De beschikbaarheid van voldoende bronmateriaal voor gammadoorstraling is onbekend. Verder onderzoek zou nodig zijn om te bepalen in hoeverre de mogelijke voordelen zwaarder wegen dan de mogelijke nadelen. Het negatieve imago van gammadoorstraling zal echter blijven en vormt wellicht het grootste struikelblok voor acceptatie van de methode.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

### 4.1 Conclusies

Chloordioxide wordt op dit moment toegepast om hoge bacterieaantallen uit de actiefkoolfilters en nagroei in de reinwaterkelders te reduceren. Daarnaast draagt het bij aan de microbiologische veiligheid van het drinkwater door inactivatie van eventueel aanwezige pathogenen. Met name voor adenovirussen is deze bijdrage soms nodig om te voldoen aan de grenswaarde van het infectierisico in de AMVD. Chloordioxide leidt echter ook tot een afname van de biologische stabiliteit van het water. Aangezien al het chloordioxide in de reinwater reservoirs wegereageert wordt nagroei in het distributienet niet geremd.

Om diverse redenen overwegen drinkwaterbedrijven te stoppen met gebruik van chloordioxide. In dit onderzoek zijn zowel bewezen drinkwaterzuiveringsprocessen als meer experimentele technieken of technieken voor andere toepassingen onderzocht als alternatief voor desinfectie met chloordioxide als laatste stap in de drinkwaterbereiding. Het alternatief zou idealiter eindstandig kunnen worden toegepast en minimaal evenveel desinfectiecapaciteit hebben voor pathogenen (met nadruk op adenovirussen). Daarnaast zou de ideale techniek de biologische stabiliteit verbeteren zodat nagroei in de reinwaterkelders en het distributienet beperkt blijft (een restgehalte desinfectant om nagroei te beperken is niet gewenst). Naast deze karakteristieken zijn ook kosten, robuustheid, duurzaamheid en inpasbaarheid belangrijk voor de haalbaarheid van een alternatieve techniek.

Uit het onderzoek volgt geen ideaal alternatief voor chloordioxide. Na een brede screening is een shortlist met de volgende technieken uitgewerkt voor de verschillende aspecten. In Tabel 4-1 zijn de belangrijkste bevindingen samengevat, zie Tabel 3-5 voor de volledige informatie.

*Tabel 4-1 Overzicht meest geschikte technieken om in te zetten bij vervallen van chloordioxide. (+ betekent gunstig effect, - negatief effect, 0 geen effect). Zie Tabel 3-5 voor uitgebreide informatie.*

|                        | Desinfectie | Stabiliteit | Kosten<br>€/m <sup>3</sup> | Opmerkingen   |
|------------------------|-------------|-------------|----------------------------|---|
| Membraanfiltratie      | +           | +           | 0,17                       | Dichter membraan meer stabiliteit en verwijdering (micro)verontreinigingen. Echter hogere kosten, minder duurzaam |
| Langzame zandfiltratie | +           | +           | 0,04                       | Ruimtebeslag zeer groot. Virusverwijdering vraagt optimalisatie   |
| UV-desinfectie         | ?           | 0/-         | 0,02                       | Onduidelijk of adenovirus in een praktijkinstallatie voldoende kan worden geïnactiveerd (en kosten daarvan)       |
| Geavanceerde oxidatie  | +           | -           | 0,09                       | Niet eindstandig. Ook afbraak (micro)verontreinigingen. Mogelijk vorming toxische omzettingsproducten             |
| Gamma-doorstraling     | +?          | -?          | 0,03?                      | Niet eindstandig. Wordt nog niet op drinkwater toegepast, wel op voedingsmiddelen.                                |
| CLO <sub>2</sub>       | +           | -           | 0,002                      |   |

Alle technieken hebben hun voor- en nadelen voor toepassing in de praktijk. Voor alle technieken zijn de geraamde kosten per kuub 6 tot 50 keer hoger dan voor chloordioxide. Daarbij moet worden bedacht dat de werkelijke kosten

sterk afhankelijk zijn van keuzes in het ontwerp en/of de aangeboden waterkwaliteit. Membraanfiltratie en langzame zandfiltratie kunnen eindstandig worden ingezet en kunnen zowel voldoende desinfectie als verbetering van de biologische stabiliteit bieden, maar de hoge kosten respectievelijk het grote benodigde bouwoppervlak zijn beperkende factoren. Veel technieken bieden echter meer dan alleen desinfectie en/of verbetering van biologische stabiliteit. Dergelijke voordelen kunnen opwegen tegen de hogere kosten. Dichtere membranen kunnen bijvoorbeeld ook microverontreinigingen verwijderen en geavanceerde oxidatie kan microverontreinigingen omzetten. Indien microverontreinigingen een probleem vormen, kan dit voordeel opwegen tegen de hogere kosten.

Een aantal technieken kan niet eindstandig worden ingezet, omdat de biologische stabiliteit afneemt. Voor geavanceerde oxidatie geldt bijvoorbeeld dat een nageschakelde actiefkoolfiltratie nodig zal zijn en mogelijk ook voor gammadoorstraling en UV-desinfectie. Een dergelijke nageschakelde actiefkoolfiltratie leidt echter weer tot verhoging van het koloniegetal, waarop weer desinfectie nodig zou zijn. Inpassing eerder in de zuivering is dan logischer. Zo blijkt uit de studie dat een gehele heroverweging van toegepaste zuiveringsstappen en de volgorde daarvan doorgaans nodig is om tot een optimale oplossing te komen voor alle waterkwaliteitsaspecten (niet alleen desinfectie en nagroei).

Voor een aantal technieken zou innovatie de haalbaarheid kunnen vergroten. Gammadoorstraling bijvoorbeeld is al gebruikelijk voor voedingsmiddelen, maar (nog) niet voor drinkwater. Hiervoor zou met name een schaalvergroting nodig zijn, en de (neven)effecten op drinkwaterkwaliteit zoals bijproducten en AOC-vorming dienen in kaart te worden gebracht. Langzame zandfiltratie lijkt een aantrekkelijk alternatief, waarbij innovatie om de virusverwijdering te verbeteren en de benodigde bouwoppervlakte te beperken de haalbaarheid zou kunnen vergroten. UV-desinfectie in de praktijk zou kunnen worden verbeterd voor adenovirussen door het reactorontwerp aan te passen op de lagere transmissie van kortere golflengtes van UV-licht met middendrukklampen of op een hogere dosis met lagedruk UV-lampen. LED-UV desinfectie zou kunnen worden ontwikkeld voor specifieke golflengtes en reactorconfiguraties. Een recente ontwikkeling is dat LED-UV met de gebruikelijke golflengte van 254 nm inmiddels in de praktijk wordt toegepast op een locatie in Engeland.

## 4.2 Aanbevelingen voor vervolg

Uit voorliggende verkennende studie volgt een aantal vragen die beantwoord moeten worden om een goede keuze te kunnen maken. Hieronder staan de belangrijkste onderzoeksvragen:

- Is de afdoding van adenovirus in een praktijkinstallatie met middendrukklampen werkelijk 3 log bij 40 mJ/cm in verband met de lage UV-transmissie van korte, effectieve golflengtes? Kan dit worden verbeterd met het reactorontwerp en wat worden dan de kosten- en duurzaamheidscores?
- Kun je een dosis van 350 mJ/cm<sup>2</sup> met middendrukklampen realiseren tegen aanvaardbare kosten? Vindt er dan geen vorming van bijproducten plaats?
- Wat is de effectiviteit van meerdere UV-desinfectie stappen in de zuivering? (nu berekend vanuit totale dosis, waarbij dus niet bij iedere stap opnieuw het eerste deel van de inactivatiecurve wordt meegenomen)
- Wat is de ideale membraandichtheid waarmee ook andere waterkwaliteitsdoelen kunnen worden gehaald tegen redelijke kosten?
- Kan voldoende virusverwijdering door langzame zandfiltratie worden geborgd onder alle bedrijfsvoeringscondities (incl. temperatuur)?

- Kan het ontwerp van langzame zandfilters worden geoptimaliseerd (combinatie filtermaterialen) om het ruimtebeslag te minimaliseren?
- Welke dosis gammadoorstraling is nodig voor het inactiveren van de (index)pathogenen in water?
- Wat zijn redelijke ontwerpparameters voor gammadoorstraling in water en is zo'n ontwerp en bedrijfsvoering haalbaar (kosten, duurzaamheid, beschikbaarheid stralingsbron)?
- Wat voor effecten heeft gammadoorstraling op andere waterkwaliteitsparameters, bijproductvorming, acceptatie etc.?

Voor de betreffende bedrijven geldt dat nu duidelijk is dat er geen makkelijk alternatief is voor chloordioxide. Welke aanpassing van de zuivering optimaal is zal per locatie verschillen. Door een techniek(en) te kiezen die ook andere voordelen heeft, zoals verwijdering of afbraak van organische microverontreinigingen, wordt het vervangen van chloordioxidedesinfectie financieel interessanter. Dit vraagt een ontwerpstudie per locatie, naast het beantwoorden van bovenstaande onderzoek. Experimenten met de lokale waterkwaliteit zullen vaak nodig zijn om het (neven)effect van een behandeling te bepalen. Voor een realistische kostenraming dient eerst een voorontwerp te worden ontwikkeld, waarin ook keuzes voor inpassing in de bestaande zuivering en uitvoeringsvorm worden gemaakt. Voorliggende studie biedt de basis om de meest veelbelovende techniek(en) voor een locatie te selecteren en geeft aan welke aspecten aandacht verdienen bij uitwerking in een vervolgstudie.

*NOOT: Na afronden van deze studie werd bekend dat inmiddels een full-scale LED-UV installatie met een capaciteit van 125.000 m<sup>3</sup>/d en een dosis van 22 mJ/cm<sup>2</sup> is gebouwd voor United Utilities in Cumbria, Verenigd Koninkrijk (Hunter et al. 2022). Daarmee blijkt deze ontwikkeling verder dan gedacht en is een nadere studie naar de mogelijkheden interessant.*



## 5 Referentielijst

### 5.1 BTO rapporten

#### Chemische desinfectiemethoden:

- BTO 2019.005 Effect van desinfectie op detectie van indicatororganismen met RT-PCR
- KWR 2010.087 Toepassing van centrale dosering van monochlooramine ter preventie van legionellagroei
- BTO 2011.030(s) Werking van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en chloorbleekloog tijdens regeneratie van deeltjesverstoppende putten
- KWR 07.042 Optimalisatie van koperzilver-ionisatie in leidingwater-installaties bij de Rijksgebouwendienst
- BTO 2006.047 Ferraat nog niet interessant voor toepassing bij waterzuivering
- KOA 96.053 Toxicologische evaluatie van de aanwezigheid van nevenproducten van chloor chloordioxide en ozon in drinkwater
- KWR 2020.040 RO-leidingsysteem Rijnstate Ziekenhuis
- KWR 2014.058 Screenen naar (bij)producten na waterstofperoxide dosering aan water van spaarbekken De Grote Rug
- SWO 90.277 Verwijdering organische stof, ijzer en mangaan door ozon en waterstofperoxyde productiebedrijf Empel
- KWR 2020.040 RO-leidingsysteem Rijnstate Ziekenhuis
- BTO 2004.019 Ionenwisseling als alternatief voor korrereactoren en andere toepassingen
- BTO 2014.205s The use of ferrate for oxidation and disinfection

#### Fysisch-chemische desinfectiemethoden:

- BTO 2013.055 Vorming van nevenproducten tijdens UV en UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processen
- KWR 2011.050 Effectiviteit van een thermische behandeling van water voor de inactivatie van pathogene micro-organismen

#### Fysische desinfectiemethoden:

- BTO 2015.038 Effecten van LD-MD-UV op de biologische stabiliteit van drinkwater
- BTO 2007.001 Membraanfiltratie in BTO 2007-2011
- BTO 2011.005 Vervuiling bij en prestaties van keramische membraanfiltratie van grondwater en oppervlaktewater: 3.5.1 logverwijdering bacteriën en virussen
- BTO 2019.026 Verwijdering MS2 bacteriofagen, *E. coli* en Cryptosporidium door langzame zandfiltratie
- BTO 2013.012 Virusverwijdering uit oppervlaktewater door coagulatie sedimentatie en snelle zandfiltratie
- KWR 2010.044 Using constructed wetlands for water quality improvement
- BTO 2013.012 Virusverwijdering uit oppervlaktewater door coagulatie sedimentatie en snelle zandfiltratie
- BTO 2020.043 CFD modellering DAF en reinwaterkelder
- BTO 2016.008 De rol van deeltjesgebonden en opgeloste organische stoffen op de biologische stabiliteit in relatie tot zuiveringsprocessen
- BTO 2022.028 Verwijdering van natuurlijke en pathogene virussen tijdens drinkwaterproductie

## 5.2 Wetenschappelijke literatuur

- Amin, M., Giahi, M., & Mansourian, M. (2013). Assessment of the feasibility of anaerobic composting for treatment of perchlorate - contaminated soils in a war zone. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 2(1), 16-16. doi:10.4103/2277-9183.157713
- Andreoli, F. C., & Sabogal-Paz, L. P. (2019). Coagulation, flocculation, dissolved air flotation and filtration in the removal of *Giardia* spp. and *Cryptosporidium* spp. from water supply. *Environmental Technology*, 40(5), 654-663. doi:10.1080/09593330.2017.1400113
- Augsburger, N., Rachmadi, A. T., Zaouri, N., Lee, Y., & Hong, P. Y. (2021). Recent Update on UV Disinfection to Fulfill the Disinfection Credit Value for Enteric Viruses in Water. *Environmental Science & Technology*, 55(24), 16283-16298.
- Bauer, R., Dizer, H., Graeber, I., Rosenwinkel, K.-H., & López-Pila, J. M. (2011). Removal of bacterial fecal indicators, coliphages and enteric adenoviruses from waters with high fecal pollution by slow sand filtration. *Water Research*, 45(2), 439-452. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.047
- Bellamy, W. D., Silverman, G. P., Hendricks, D. W., & Logsdon, G. S. (1985). Removing *Giardia* Cysts With Slow Sand Filtration. *Journal AWWA*, 77(2), 52-60. doi:https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1985.tb05492.x
- Brown, T. S., Malina Jr, J. F., & Moore, B. D. (1974). Virus Removal by Diatomaceous-Earth Filtration—Part 1. *Journal-American Water Works Association*, 66(2), 98-102.
- EFSA (2011). Statement summarising the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels1. European Food Safety Authority (EFSA), Parma, Italy
- Dullemond Y.J. (2002) Literatuurscan naar nieuwe DOC-verlagende methodieken. Gemeentewaterleidingen Amsterdam
- Joint, F., & Organization, W. H. (1983). Report of the fifteenth session of the Joint FAO/WHO Codex Alimentarius Commission, Rome, 4 July-15 July 1983 Report of the fifteenth session of the Joint FAO/WHO Codex Alimentarius Commission, Rome, 4 July-15 July 1983. Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Benigna, I., Sorlini, S., & Torretta, V. (2018). Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and Drinking Water Treatment Plants. *Sustainability*, 10(1), 86.
- Gehr, R., Wagner, M., Veerasubramanian, P., & Payment, P. (2003). Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. *Water Research*, 37(19), 4573-4586. doi:https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00394-4
- Hijnen, W. A. M., Schijven, J. F., Bonné, P., Visser, A., & Medema, G. J. (2004). Elimination of viruses, bacteria and protozoan oocysts by slow sand filtration. *Water Science and Technology*, 50(1), 147-154. doi:10.2166/wst.2004.0044
- Hijnen, W. A. M., & Medema, G. J. (2010). Elimination of micro-organisms by water treatment processes. London: IWA Publishing.
- Hofman-Caris, C.H.M. , W.G Siegers, B.A. Wols, D.J.H. Harmsen, (2017). Geavanceerde oxidatie en reductie: trends, ontwikkelingen en mogelijkheden BTO 2017.063
- Hornstra, L. M., Da Silva, T. R., Blankert, B., Heijnen, L., Beerendonk, E., Cornelissen, E. R., & Medema, G. (2019). Monitoring the integrity of reverse osmosis membranes using novel indigenous freshwater viruses and bacteriophages. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(9), 1535-1544. Jacangelo, J. G., Rhodes Trussell, R., & Watson, M. (1997). Role of membrane technology in drinking water treatment in the United States. *Desalination*, 113(2), 119-127. doi:https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00120-3
- Hunter, G., Ray Ehrhard, Oliver Lawal, Mike Hemingway, Bill Decker, Helen Buse, Jim Goodrich (2022) UVC-LED: The Wave of The Future, IWA Webinar *The future of disinfection in drinking water & wastewater 9-11-2022* https://iwa-network.org/learn/the-future-of-disinfection-in-drinking-water-wastewater/
- Johnson, T., Brineman, R., Schultze, C., & Barkovskii, A. L. (2020). Efficient removal of bacteria from aqueous media with kaolinite and diatomaceous earth products. *Journal of Applied Microbiology*, 129(3), 466-473. doi:https://doi.org/10.1111/jam.14642
- Kerwick, M. I., Reddy, S. M., Chamberlain, A. H. L., & Holt, D. M. (2005). Electrochemical disinfection, an environmentally acceptable method of drinking water disinfection? *Electrochimica Acta*, 50(25), 5270-5277. doi:https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.02.074
- Kim, J. Y., Lee, C., Cho, M., & Yoon, J. (2008). Enhanced inactivation of *E. coli* and MS-2 phage by silver ions combined with UV-A and visible light irradiation. *Water Research*, 42(1), 356-362. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.024

- Kruithof, J., B. van der Veer en B. Martijn (2009). Schadelijke desinfectiebijproducten: feit of fictie? *H2O*, (3): 31- 34.
- Langé, K. P., Bellamy, W. D., Hendricks, D. W., & Logsdon, G. S. (1986). Diatomaceous Earth Filtration of Giardia Cysts and Other Substances. *Journal AWWA*, 78(1), 76-84. doi:<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1986.tb05682.x>
- Martínez-Huitle, C. A., & Brillas, E. (2008). Electrochemical alternatives for drinking water disinfection. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(11), 1998-2005.
- Ongerth, J. E., & Hutton, P. E. (2001). Testing of Diatomaceous Earth Filtration for Removal of Cryptosporidium Oocysts. *Journal AWWA*, 93(12), 54-63. doi:<https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2001.tb09355.x>
- Pedahzur, R., Lev, O., Fattal, B., & Shuval, H. I. (1995). The interaction of silver ions and hydrogen peroxide in the inactivation of *E. coli* : A preliminary evaluation of a new long acting residual drinking water disinfectant. *Water Science and Technology*, 31(5), 123-129. doi:[https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00252-I](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00252-I)
- Paraskevopoulos, S., de Jong, S. S. U., & Smeets, P. W. M. H. S. (2019). Quantifying the log reduction of pathogenic microorganisms by constructed wetlands as a basis for QMRA of water reuse applications (Stageverslag, Master thesis). Retrieved from <https://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/60038683>
- Qilin Li, Shaily Mahendra, Delina Y. Lyon, Lena Brunet, Michael V. Liga, Dong Li, Pedro J.J. Alvarez, Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications, *Water Research*, Volume 42, Issue 18, 2008, Pages 4591-4602
- Reeve, P., Regel, R., Dreyfus, J., Monis, P., Lau, M., King, B., & Van Den Akker, B. (2016). Virus removal of new and aged UF membranes at full-scale in a wastewater reclamation plant. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(6), 1014-1021.
- Richardson, S. D., Thruston, A. D., Collette, T. W., Patterson, K. S., Lykins, B. W., & Ireland, J. C. (1996). Identification of TiO<sub>2</sub>/UV disinfection byproducts in drinking water. *Environmental science & technology*, 30(11), 3327-3334
- RIVM (2020). Titaniumdioxide mogelijk kankerverwekkend (<https://www.rivm.nl/nanotechnologie/gezondheid/titaniumdioxide-mogelijk-kankerverwekkend>) accessed 31/10/2022
- Rougé, V., von Gunten, U., Lafont de Sentenac, M., Massi, M., Wright, P. J., Croué, J.-P., & Allard, S. (2020). Comparison of the impact of ozone, chlorine dioxide, ferrate and permanganate pre-oxidation on organic disinfection byproduct formation during post-chlorination. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(9), 2382-2395. doi:10.1039/DOEW00411A
- Schoenbach, K. H., Joshi, R. P., Stark, R. H., Dobbs, F. C., & Beebe, S. J. (2000). Bacterial decontamination of liquids with pulsed electric fields. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(5), 637-645. doi:10.1109/94.879359
- Schoenbach, K. H., Peterkin, F. E., Alden, R. W., & Beebe, S. J. (1997). The effect of pulsed electric fields on biological cells: experiments and applications. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 25(2), 284-292. doi:10.1109/27.602501
- Schurer, R., Schippers, J. C., Kennedy, M. D., Cornelissen, E. R., Salinas-Rodriguez, S. G., Hijnen, W. A. M., & Van der Wal, A. (2019). Enhancing biological stability of disinfectant-free drinking water by reducing high molecular weight organic compounds with ultrafiltration posttreatment. *Water research*, 164, 114927.
- Sommer, R., Pribil, W., Appelt, S., Gehringer, P., Eschweiler, H., Leth, H., . . . Haider, T. (2001). Inactivation of bacteriophages in water by means of non-ionizing (uv-253.7nm) and ionizing (gamma) radiation: a comparative approach. *Water Research*, 35(13), 3109-3116. doi:[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00030-6)
- Valcheva, N., Ignatov, I., & Huether, F. (2020). Microbiological Research of the Effects of EVODROP Silver Nanoparticle on Escherichia coli, Enterococci and Coliforms. *Journal of Advances in Microbiology*, 22-31. doi:10.9734/jamb/2020/v20i1130297
- Van der Kooij, D. (1984). The growth of bacteria on organic compounds in drinking water. Wageningen University and Research.
- Zeenat MA, Abdul Jabbar L, Abdul Khaliq A, Mohammad Y K: Extraction and characterization of chitosan from Indian prawn (*Fenneropenaeus indicus*) and its applications on waste water treatment of local ghee industry. *IOSR J. Eng.* 2013; 3:10

# I Longlist alternatieve zuiveringstechnieken

In deze studie is een beperkt literatuuronderzoek gedaan. In onderstaande tabellen is informatie die bij literatuuronderzoek is gevonden kort samengevat. Dit betekent dat de gegevens in de tabel een indicatie zijn van de huidige kennis, maar getallen kunnen niet direct worden gebruikt als representatieve waarden vanwege de beperkte omvang van de studie en de details die verloren gaan bij het samenvatten. Informatie over de technieken op de shortlist staat in Tabel 3-5 in paragraaf 3.2. Lege cellen geven aan dat over dat aspect geen informatie is gevonden, maar dat betekent niet dat bij meer uitgebreid literatuuronderzoek niet alsnog informatie blijkt te zijn. Dergelijk uitgebreid onderzoek naar effectiviteit van zuiveringstechnieken vindt bijvoorbeeld plaats in het kader van het referentiedocument AMVD.

|           | Methode/stof/matrix                              | Algemene opmerking  | Referenties   |
|-----------|--|---|---|
| Metalen   | Zilverionisatie (nanopartikels)                  | Effectiviteit in combinatie met UV 2.5-3,0 log groter (Kim et al., 2008); Effectiviteit met peroxide van 2,87 naar 5,0 (Pedahzur et al., 1995); voor Campylobacter getest op 5 stammen (Duffy et al., 2018); algemene aanwijzing dat virusreproductie wordt geremd                                      | Abebe et al., 2015; Kim et al., 2008; Pedahzur et al., 1995; Duffy et al., 2018; Valcheva et al., 2020; Hassan et al., 2019 |
|           | Zilver-hydroxyapatiet                            | Bereiding is complex, effectiviteit neemt toe met verlengde blootstelling, algemeen antibacterieel effect   | Reddy et al., 2007  |
|           | Koper-zilverionisatie                            | Mechanisme: celschade (celwand-permeabiliteit, eiwit-oxidatie, DNA-schade, interruptie transport, productie ROS), Effectiviteit bewezen voor Legionella, verwijdering ionen noodzakelijk, werkt met verzachter/verzachtingsmethode. Weinig data beschikbaar, veelal gecombineerd met chloor in VS en VK | Shih et al., 2010; Stüken et al., 2018; Taner et al., 2011  |
|           | Ferraat ( $\text{FeO}_4^{2-}$ )                  | Verwijdering ongewenste componenten uit drinkwater zeer beperkt, kleur wordt verwijderd en micro-organismen worden geïnactiveerd. Ferraat is instabiel, stabiel ferraat is (nog) niet commercieel verkrijgbaar. Anaerobe omstandigheden nodig voor hoge effectiviteit, niet haalbaar in de praktijk.    | Disinfectants, 1987; Rougé et al., 2020; BTO 2006.047; BTO 2015.073   |
|           | Permanganaat ( $\text{MnO}_4^-$ )                | Niet geschikt voor drinkwater, degradatie NOM speelt grote rol  | Disinfectants, 1987; Rougé et al., 2020   |
| Halogenen | Jodium (iodine)                                  | Niet geschikt voor drinkwater   | Disinfectants, 1987   |
|           | Bromine  | Niet geschikt voor drinkwater   | Disinfectants, 1987   |
|           | Chloor ( $\text{Cl}_2$ )                         | Chloorgebaseerd, desinfecterend vermogen vergelijkbaar met chloordioxide, effectieve afdoding gram-negatieve bacteriën en virussen bij 0,1-0.2 mg/L voor enkele uren, meer nodig voor protozoën (BTO 2002.006)  | Collivignarelli et al., 2017; Tree et al., 2003; BTO 2002.006   |
|           | Chloordioxide ( $\text{ClO}_2$ )                 | Chloorgebaseerd, desinfecterend vermogen vergelijkbaar met chloor, leidt tot vorming chloriet en chloraat, geur en smaakklachten  | TB-00386 NIP Evides;  |
|           | Chlooramines                                     | Stabieler dan chloor, langer werkzaam residu dat dieper in biofilm en sediment doordringt, relevant voor Legionella-verwijdering, toxiciteit  | Disinfectants, 1987; BTO 2002.106   |
|           | Hypochloriet/ chloorbleekloog ( $\text{ClO}^-$ ) | Vanwege toxiciteit ongewenst in drinkwater  |   |
|           | Minerale oxychlorides                            |   |   |
| Radicalen | Ozon ( $\text{O}_3$ )                            | Data vooral beschikbaar voor afvalwater, effecten ozon lopen sterk uiteen voor verschillende organismen; Data Betancourt voor Crypto en Giardia met dosis; Data coliformen Gehr et al., 2003  | Collivignarelli et al., 2017; Betancourt et al., 2004; Gehr et al., 2003; Silva et al., 2010                                |

|                      |   |   |  |
|----------------------|---|---|--|
|                      | perazijnzuur (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> ), vorming H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + azijnzuur       | Vorming organische stof (AOC) (azijnzuur) met nadelige effecten op nagroei  | Caretti & Lubello, 2003; Gehr et al., 2003   |
|                      | Peroxone (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>3</sub> )  | Combinatie waterstofperoxide en ozon, effectiviteit vooral afhankelijk van ozondosering en type behandeld water; HPC bacteria in algemeen enkele ordegrottes resistenter dan E. coli. Effectief, maar vorming AOC | Wolfe et al., 1989   |
|                      | Waterstofperoxide (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )  |   | Pedahzur et al., 1995  |
|                      | <b>Overigen</b>   | Chitosan  | Chitosan is effectief bij lagere pH (Li et al., 2008) Minimum inhibitory concentration (MIC) tussen 18-5000 ppm, afhankelijk van organisme, pH, samenstelling chitosan, aanwezigheid vetten en eiwitten, groter effect voor chitosan met quaternair ammonium. Minimaal bactericidale concentratie getest voor enkele bacteriën (Qi et al., 2004) |
|                      | Ionenwisselaar (ion exchange)   |   |  |
|                      | geavanceerde oxidatie   | Omvat o.a. UV-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> -UV  | BTO 2017.063   |
| <b>Metalen + UV</b>  | Titaniumdioxide + UV  | Gebaseerd op radicalenvorming met UV-licht, TiO <sub>2</sub> is katalysator, nadeel (vorming) nanodeeltjes  | Li et al., 2008  |
|                      | Zinkoxide + UV  | Gebaseerd op radicalenvorming met UV-licht, nadeel (vorming) nanodeeltjes   | Li et al., 2008  |
|                      | Zilver-Koper-Titaniumdioxide + UV   | Zogeheten 'metal doping' van titaniumdioxide met zilver en koper versterkt effecten. Nadeel (vorming) nanodeeltjes  | Rao et al., 2016; Li et al., 2008  |
|                      | Zilverionisatie + UV  | Sterker effect met UV-A dan licht   | Kim et al., 2008   |
| <b>Chemisch + UV</b> | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV  |   |  |
|                      | Perazijnzuur + UV   |   |  |
| <b>Licht/UV</b>      | Fotodesinfectie (zonlicht, oxidatieve stress)   |   | Collivignarelli et al., 2017   |
|                      | Fotodesinfectie met dopants (Se-doped TiO <sub>2</sub> , N-doped TiO <sub>2</sub> en Se-N-co-doped TiO <sub>2</sub> ) |   | Collivignarelli et al., 2017   |
|                      | UV-behandeling  | Zeer afhankelijk van dosis (mJ/cm <sup>2</sup> ) en matrix (Betancourt et al., 2004), voldoende hoge dosis nodig voor verwijdering adenovirussen  | Collivignarelli et al., 2017; Betancourt et al., 2004; TB00386 Evides  |

|                     |                                      |   |  |
|---------------------|--------------------------------------|---|--|
| Membraanfiltratie   | Microfiltratie                       | Verwijdert zwevende stof en bacteriën, geen virussen  | Collivignarelli et al., 2017; RIVM Toekomstverkenning drinkwatervoorziening; BTO 2007.001                        |
|                     | Ultrafiltratie                       | Verwijdert zwevende stof en bacteriën, ook virussen. Kan toegepast worden zonder anti-scalants  | Collivignarelli et al., 2017; RIVM Toekomstverkenning drinkwatervoorziening; BTO 2007.001                        |
|                     | Nanofiltratie                        | Zeer effectief, filtert ook tweewaardige ionen en microverontreinigingen. Toepassing anti-scalants noodzakelijk   | Collivignarelli et al., 2017; RIVM Toekomstverkenning drinkwatervoorziening; BTO 2007.001                        |
|                     | Omgekeerde osmose (RO)               | Zeer effectief, verwijdert zouten en microverontreinigingen. Toepassing anti-scalants noodzakelijk  | Collivignarelli et al., 2017; RIVM Toekomstverkenning drinkwatervoorziening; Hornstra et al., 2019; BTO 2007.001 |
|                     | Keramische (membraan)filtratie 0,2µm | Effectiviteit zeer afhankelijk van grootte poreuze medium, kan tot niveau ultrafiltratie. In praktijk soms gecombineerd met zilvernanopartikels, maar grootste effect komt van keramische filtercapaciteit. | Collivignarelli et al., 2017; Abebe et al., 2015   |
| Media-filtratie     | Langzame zandfiltratie               |   | Bauer et al., 2010; Bellamy et al., 1985; Hijnen et al., 2004; BTO 2019.026; Hijnen et al., 2006 in H2O          |
|                     | Snelle zandfiltratie                 |   | Hijnen and Medema 2011   |
|                     | Actiefkoolfiltratie                  |   |  |
|                     | Roughing filtration                  | Opeenvolging van zuivering met steeds fijner verdeelde media, beste performance met gravel  | El-Taweel et al., 2000   |
|                     | Diatomeeënaarde                      |   | Langé et al., 1989   |
|                     | Wetlands (surface flow)              |   | Collivignarelli et al., 2017   |
|                     | Wetlands (subsurface flow)           |   | Collivignarelli et al., 2017   |
| Coagulatie/sediment | Bekkenpassage (lagoon storage)       |   | Collivignarelli et al., 2017; van Breemen et al., 1998   |
|                     | Coagulatie/flocculatie               | Verschillende coagulanten gebruikt (ijzer(III)chloride, polyaluminium chloride, aluin, lime softening met calciumhydroxide), geschikt voor het begin van de zuivering                                       | Betancourt et al. 2004; Abbaszadegan et al., 2007; Wang et al., 2005   |

|                        |  |   |  |
|------------------------|--|---|--|
| Fysische stimulatie(s) | Sedimentatie                                 | Geschikt als beginstap in de zuivering  |  |
|                        | Flotatie (Dissolved Air Flotation, DAF)      | Gebaseerd op verwijdering gesuspendeerde deeltjes, werkt niet tegen virussen  | Andreoli et al., 2017  |
|                        | Ultrasonicatie / sonodesinfectie             | Afhankelijk van blootstellingstijd; Gebaseerd op vorming vrije radicalen (hydroxyl-radicaal, atomisch zuurstof, waterstofperoxide en ozon); ook vorming chloor uit chloride-ionen   | Martinez-Huitle & Brillas 2008   |
|                        | Pulsed electric fields of electrodesinfectie | Afhankelijk van blootstellingstijd; Gebaseerd op vorming vrije radicalen (hydroxyl-radicaal, atomisch zuurstof, waterstofperoxide en ozon); ook vorming chloor uit chloride-ionen; meest effectief wanneer chloride aanwezig is in het water (2-log verschil, Kerwick et al., 2005) | Martinez-Huitle & Brillas 2008; Kerwick et al., 2005; Matsunaga et al., 1992 |
|                        | Sono-electrodesinfectie                      | Afhankelijk van blootstellingstijd; Gebaseerd op vorming vrije radicalen (hydroxyl-radicaal, atomisch zuurstof, waterstofperoxide en ozon); ook vorming chloor uit chloride-ionen   | Martinez-Huitle & Brillas 2008   |
|                        | Ultrasound + UV                              | Afhankelijk van dosis, getest voor afvalwater   | Collivignarelli et al., 2017   |
|                        | Microgolven                                  | Lastig op te schalen, energievragend  |  |
|                        | Magnetically-enhanced disinfection           |   |  |
|                        | Gammastraling                                |   |  |
| Biologische stimulatie | Sterilisatie (temperatuur)                   | Zeer energievragend   | KWR 2011.050   |
|                        | Bacteriofagen ('faagtherapie')               | Uitdaging rondom zeer hoge verdunning doelorganismen  |  |
|                        | Protozoa (grazers)                           |   |  |



|           | Methodes/stof/matrix  | <i>Cryptosporidium</i>   | <i>Giardia</i>  | <i>Campylobacter</i>   | Enterovirussen                | Adenovirus                    | Overige organismen  |
|-----------|---|--|-----------------|--|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Metalen   | Zilverionisatie (nanopartikels)   | 1,5-2,1 (Abebe et al., 2015), 97,2% reductie viabiliteit bij 1 ppm (Hassan et al., 2019) | N/A             | MBC: 3,1-6,3 µg/mL (getest op specifieke stammen) (Duffy et al., 2018) | N/A                           | N/A                           | MS-2: ~3,5 na 40 min (Kim et al., 2008)   |
|           | Zilver-hydroxyapatiet   | N/A  | N/A             | N/A  | N/A                           | N/A                           | N/A   |
|           | Koper-zilverionisatie   | N/A  | N/A             | N/A  | N/A                           | N/A                           | Effectief tegen <i>Legionella</i> , voor <i>S. maltophilia</i> in biofilm: 3-log en in water: >6-log            |
|           | Ferraat (FeO4 <sup>2-</sup> )   |  |                 |  | "goede virucide"              | "goede virucide"              |   |
|           | Permanganaat (MnO4 <sup>-</sup> )   |  |                 |  |                               |                               |   |
| Halogenen | Jodium (iodine)   |  |                 |  |                               |                               |   |
|           | Bromine   |  |                 |  |                               |                               |   |
|           | Chloor (Cl <sub>2</sub> )   | 0,0-0,5  | 0,5-1,5         | 2,0-6,0  | 1,0-3,0                       | 1,0-3,0                       | N/A   |
|           | Chloordioxide (ClO <sub>2</sub> )   | N/A  | N/A             | >5 (0,07 mg/L in winter)   | 2,3-4,5 (0,07 mg/L in winter) | 2,3-4,5 (0,07 mg/L in winter) | N/A   |
|           | Chlooramines  |  |                 | slechte virucide   |                               |                               | <i>Legionella</i> : 3-log verwijdering binnen 0,5 uur bij 2 mg/L, totale verwijdering bij 4 mg/L (BTO 2002.106) |
|           | Hypochloriet/chloorbleekloog (ClO <sup>-</sup> )  |  |                 |  |                               |                               |   |
|           | Minerale oxychlorides   |  |                 |  |                               |                               |   |
| Radicalen | Ozon (O <sub>3</sub> )  | 2 voor 2 en 4 mg/L   | 2 voor 0,3 mg/L | 2,0-6,0  | 3,0-6,0                       | 3,0-6,0                       | MS-2: 1-5 voor contacttijd van 5-45 min   |
|           | perazijnzuur (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> ), vorming H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + azijnzuur | N/A  | N/A             |  |                               |                               | Fecale Streptococcus: 2,74-5,39; <i>P. aeruginosa</i> : 2,13-   |

|               | Methode/stof/matrix  | <i>Cryptosporidium</i>  | <i>Giardia</i> | <i>Campylobacter</i> | Enterovirussen | Adenovirus | Overige organismen  |
|---------------|--|---|----------------|----------------------|----------------|------------|---|
| Overigen      | Peroxone (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>3</sub> ) |   |                |                      |                |            | 3,28; 1-logreductie MS-2 voor >1.5 mg/L   |
|               | Waterstofperoxide (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )         |   |                |                      |                |            | MS-2: >5,0 behalve bij ratio H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> van 0.8                                    |
|               | Chitosan   |   |                |                      |                |            | Minimaal bactericidale dosis voor <i>Salmonella typhimurium</i> : 64 µg/L, voor <i>Staphylococcus aureus</i> : 8 µg/L |
|               | Ionenwisselaar (ion exchange)                              |   |                |                      |                |            |   |
| Metalen + UV  | Titaniumdioxide + UV                                       |   |                |                      |                |            |   |
|               | Zinkoxide + UV   | Effectiviteit niet bewezen                                      |                |                      |                |            |   |
|               | Zilver-Koper-Titaniumdioxide + UV                          |   |                |                      |                |            | bacteriofaag MS2: 4,02  |
|               | Zilverionisatie + UV                                       |   |                |                      |                |            | MS-2: ~4,0 (licht); ~5,0 (UV-A) na 30 min   |
| Chemisch + UV | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV                         |   |                |                      |                |            |   |
|               | Perazijnzuur + UV  |   |                |                      |                |            |   |
| Licht/UV      | Fotodesinfectie (zonlicht, oxidatieve stress)              | 1 minuut blootstelling 1-log afname; 5 minuten blootstelling 3- |                |                      |                |            |   |

|                   | Methodes/stof/matrix                 | <i>Cryptosporidium</i>   | <i>Giardia</i>   | <i>Campylobacter</i>   | Enterovirussen   | Adenovirus  | Overige organismen  |
|-------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|---|---|
|                   |                                      | log afname (Collivignarelli et al., 2017)  |  |  |  |   |   |
|                   | UV-behandeling                       | 1,5 voor 1 mJ/cm <sup>2</sup> ; >3,2 voor 3 mJ/cm <sup>2</sup> ; 3,9 voor 50 mJ/cm <sup>2</sup> ; 3,0 voor 40 mJ/m <sup>2</sup> ; >3,0 voor 70 mJ/m <sup>2</sup> | >3,0; 2 voor 5 mJ/cm <sup>2</sup> ; 3,0 voor 40 mJ/m <sup>2</sup> ; >3,0 voor 70 mJ/m <sup>2</sup> | 2,0->4,0; 4,3 voor 40 mJ/m <sup>2</sup> ; >7,8 voor 70 mJ/m <sup>2</sup> | >3,0; 4,3 voor 40 mJ/m <sup>2</sup> ; 5,4 voor 70 mJ/m <sup>2</sup>  | >1,0 (<1,0 voor LED-UV); 3,0 voor 40 mJ/m <sup>2</sup> ; >4 voor 70 mJ/m <sup>2</sup> |   |
| Membraanfiltratie | Microfiltratie                       | >4,4->4,9 (Jacangelo et al)  | >4,0-6,0   |  |  |   | MS2 colifagen: 0,3-2,0  |
|                   | Ultrafiltratie                       | >6,0   | >6,0   | 3,5->6,0   | 2,5->6,0   | 2,5->6,0  | MS2 colifagen: 0,4-2,0  |
|                   | Nanofiltratie                        | >6,0   | >6,0   | 3,5->6,0   | 2,5->6,0   | 2,5->6,0  | MS2 colifagen: 2,0-3,0  |
|                   | Omgekeerde osmose (RO)               | >6,0   | >6,0   | >6,0   | >6,0   | >6,0  | MS2 colifagen: 3,5-4,5 tot >7; en natuurlijke virussen NV2314: >7 en NV2247: >8 (Hornstra et al., 2019) |
|                   | Keramische (membraan)filtratie 0,2µm | >3,0 (0.2 µm) C. parvum: 1.5-2.1 (Abebe et al., 2015)  | >6,5 (0.2 µm)  |  |  |   | Shigella dysenteriae (>6,9); Vibrio cholerae (>4,0); Entamoeba histolytica (>5,9)                       |
| Media-filtratie   | Langzame zandfiltratie               | >4,5->6.5 (Hijnen et al., 2004); 4-5,5 na 0,5 dagen (BTO 2019.026)   | Tot 96% verwijdering (Bellamy et al., 1985); 4-6 log (Hijnen et al., 2004)                         | 3,9 (voor Weesperkarspel 2006, Hijnen et al., 2006)                      | Somatische fagen: 2,7 op 90 cm diepte en K13-fagen 3.58 op 90 cm diepte (Bauer et al., 2010); MS2 1,7-2,2 (Hijnen et al., 2004); MS-2: |   |   |

|                     | Methode/stof/matrix            | <i>Cryptosporidium</i>   | <i>Giardia</i>   | <i>Campylobacter</i> | Enterovirussen         | Adenovirus | Overige organismen  |
|---------------------|--------------------------------|--|--|----------------------|------------------------|------------|---|
|                     |                                |  |  |                      | 1,7-1,8 (BTO 2019.026) |            |   |
|                     | Snelle zandfiltratie           | 1,1  | 1,2  | 0,6                  | 0,8                    |            | spores 0,7  |
|                     | Actiefkoolfiltratie            | 0,9  | 0,8  | 0,8                  | 0,5                    |            | spores 0,7  |
|                     | Roughing filtration            | 84–100% removal for chlorophyll 'a' green algae, blue-green algae, diatoms, total algal count, bacterial count (at 22 and 37 °C), total coliforms, faecal coliform, faecal streptococci, yeast and <i>Candida albicans</i> |  |                      |                        |            |   |
|                     | Diatomeeënaarde                | 6,3 (2,5 tot 5 m/h) (Ongerth & Hutton, 2001)   | Nagenoeg 100%  |                      |                        |            |   |
|                     | Wetlands (surface flow)        | 0,5-1,0  | 0,5-1,5  | 1                    |                        | NA         |   |
|                     | Wetlands (subsurface flow)     | 0,5-1,0  | 1,5-2,0  | 1,0-3,0              |                        | NA         |   |
|                     | Bekkenpassage (lagoon storage) | 1,0-3,5 (Collivignarelli et al., 2017); 1,7-3,1 (van Breemen et al., 1998)   | 3,0-4,0 (Collivignarelli et al., 2017); 1,7-3,1 (van Breemen et al., 1998) | 1,0-5,0              |                        | NA         |   |
| Coagulatie/sediment | Coagulatie/flocculatie         | 5,8; 2,5-3,5 voor lime softening en 2 op labschaal   | 2 (labschaal)  |                      |                        |            | voor ijzerchloride MS-2 (5,1 log), fr (4,9 log), PRD-1 (3,5 |

|                        | Methodes/stof/matrix                         | <i>Cryptosporidium</i> | <i>Giardia</i>        | <i>Campylobacter</i> | Enterovirussen  | Adenovirus | Overige organismen                                     |
|------------------------|--|------------------------|-----------------------|----------------------|---|------------|--|
|                        |  | met lime softening     |                       |                      |   |            | log), en Φ X-174 (1,3 log) (Abbaszadegan et al., 2007) |
|                        | Sedimentatie                                 |                        |                       |                      |   |            |  |
|                        | Flotatie (Dissolved Air Flotation, DAF)      | 1,1-1,4                | 1,3-1,8               |                      |   |            |  |
| Fysische stimulatie(s) | Ultrasonicatie / sonodesinfectie             |                        |                       |                      |   |            |  |
|                        | Pulsed electric fields of electrodesinfectie |                        |                       |                      | MS-2: 4,0 met aanwezigheid van sulfaat/fosfaat electrolyten |            |  |
|                        | Sono-electrodesinfectie                      |                        |                       |                      |   |            |  |
|                        | Ultrasound + UV                              |                        |                       |                      |   |            |  |
|                        | Microgolven                                  |                        |                       |                      |   |            |  |
|                        | Magnetically-enhanced disinfection           |                        |                       |                      |   |            |  |
|                        | Gammastraling                                | 500-50.000 (>2 log)    | 500 (> 2log in spike) |                      |   |            |  |
|                        | Sterilisatie (temperatuur)                   | >10                    | >10                   | >10                  | >10   | >10        | Sporen >10 bij 1 min                                   |
| Biologische stimulatie | Bacteriofagen ('faagtherapie')               |                        |                       |                      |   |            |  |
|                        | Protozoa (grazers)                           |                        |                       |                      |   |            |  |

|           | Methode/stof /matrix                             | Koloniegetal (KVE) | <i>Aeromonas</i> | <i>E. coli</i>   | Enterococcen   | Bacteriën van de coligroep / coliform              | SSRC / <i>C. perfringens</i>          |
|-----------|--|--------------------|------------------|--|--|--|---------------------------------------|
| Metalen   | Zilverionisatie (nanopartikels)                  |                    |                  | ~2,0 na 40 min; 2,9 bij 30 ppb voor 1 uur (Kim et al., 2008); 0 CFU na 24 uur met 30 ppm (Valcheva et al., 2020) | 0 CFU na 24 uur met 30 ppm (Valcheva et al., 2020)   | 0 CFU na 24 uur met 30 ppm (Valcheva et al., 2020) | MIC: 612,5 ng/mL (Ghosh et al., 2013) |
|           | Zilverhydroxyapatiet                             |                    |                  | 6,0 voor 60 min  |  |  |                                       |
|           | Koperzilverionisatie                             |                    |                  | Beter effect gerapporteerd dan voor zilverionisatie (Taner et al., 2011)   |  |  |                                       |
|           | Ferraat (FeO4 <sup>2-</sup> )                    | matige bactericide |                  |  |  |  |                                       |
|           | Permanganaat (MnO4 <sup>-</sup> )                |                    |                  |  |  |  |                                       |
| Halogenen | Jodium (jodine)                                  |                    |                  |  |  |  |                                       |
|           | Bromine  |                    |                  |  |  |  |                                       |
|           | Chloor (Cl <sub>2</sub> )                        | 2 (0,08 min*mg/l)  |                  | 2,0-6,0  | <2,0-6,0 (Tree et al., 2003)   | 1,0-2,0  |                                       |
|           | Chloordioxide (ClO <sub>2</sub> )                | 2 (0,13 min*mg/l)  |                  | 4,3 (0,5 min*mg/l)   |  |  |                                       |
|           | Chlooramines                                     |                    |                  |  |  |  |                                       |
|           | Hypochloriet/chloorbleekloog (ClO <sup>-</sup> ) |                    |                  |  |  |  |                                       |
| Radicalen | Minerale oxychlorides                            |                    |                  |  |  |  |                                       |
|           | Ozon (O <sub>3</sub> )                           |                    |                  | 2,0-6,0; 2,4-4,7 voor 5-10 mg/L voor 5-15 minuten in afvalwater-effluent (Silva et al., 2010)                    | ~2,0 bij 30-50 mg/L; 0-3 voor blootstelling 5-45 min; 2,0-4,1 voor 5-10 mg/L voor 5-15 min in afvalwater-effluent (Silva et al., 2010) |  | 0,0-0,5 (meest resistent voor ozon)   |

|               | Methode/stof /matrix  | Koloniegetal (KVE) | <i>Aeromonas</i> | <i>E. coli</i>   | Enterococcen | Bacteriën van de coligroep / coliform | SSRC / <i>C. perfringens</i> |
|---------------|---|--------------------|------------------|--|--------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Over<br>igen  | perazijnzuur (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> ), vorming H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + azijnzuur | 1,4-2,3            |                  | 2,5-4,4  |              | 1,5-4,0                               |                              |
|               | Peroxone (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>3</sub> )  |                    |                  | 2,8-6,2 (1,0 mg/L ozon en ratio H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> van 0,8 tot 0) |              |                                       |                              |
|               | Waterstofperoxide (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )  |                    |                  | 0,65 bij 30 ppm voor 1 uur   |              |                                       |                              |
|               | Chitosan  |                    |                  | Mimimaal bactericidale dosis: 8-16 µg/mL)  |              |                                       |                              |
|               | Ionenwisselaar (ion exchange)   |                    |                  |  |              |                                       |                              |
| Metalen + UV  | Titaniumdioxide + UV  |                    |                  |  |              |                                       |                              |
|               | Zinkoxide + UV  |                    |                  |  |              |                                       |                              |
|               | Zilver-Koper-Titaniumdioxide + UV   |                    |                  | 7,68   |              |                                       |                              |
|               | Zilverionisatie + UV  |                    |                  | ~3,0 (licht); >4,0 (UV-A) na 30-40 min   |              |                                       |                              |
| Chemisch + UV | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV  |                    |                  |  |              |                                       |                              |
|               | Perazijnzuur + UV   |                    |                  | volledige inactivatie (PAA 2-8 mg/L; UV 100-300 mJ/cm <sup>2</sup> )                         |              |                                       |                              |
| Licht/UV      | Fotodesinfectie (zonlicht, oxidatieve stress)   |                    |                  |  |              |                                       |                              |
|               | Fotodesinfectie met dopants (Sedoped TiO <sub>2</sub> , N-  |                    |                  | 6  |              |                                       |                              |

|                         | Methode/stof /matrix                 | Koloniegetal (KVE) | <i>Aeromonas</i> | <i>E. coli</i>   | Enterococcen                              | Bacteriën van de coligroep / coliform                       | SSRC / <i>C. perfringens</i> |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------|------------------|--|---|---|------------------------------|
|                         | doped TiO2 en Se-N-co-doped TiO2)    |                    |                  |  |   |   |                              |
|                         | UV-behandeling                       |                    |                  | 2,0->4,0   |   |   |                              |
| Membraanfiltratie       | Microfiltratie                       |                    |                  | 5,4-6,0  |   |   |                              |
|                         | Ultrafiltratie                       |                    |                  | 3,5->6,0   |   |   | >6,0                         |
|                         | Nanofiltratie                        |                    |                  |  |   |   |                              |
|                         | Omgekeerde osmose (RO)               |                    |                  | >4,0->6,0  |   |   | >6,0                         |
|                         | Keramische (membraan)filtratie 0,2µm | >7,9               |                  |  |   |   |                              |
| Media-filtratie         | Langzame zandfiltratie               |                    |                  | 4,1 op 90 cm diepte (Bauer et al., 2010); 2,1-4,2, afhankelijk van rijping schmutzdecke ; 2,1-2,6 (BTO 2019.026) | 3,65 op 90 cm diepte (Bauer et al., 2010) | min 0,2 tot +1,8 tot 2,3 op testkolom (Hijnen et al., 2014) |                              |
|                         | Snelle zandfiltratie                 |                    |                  |  |   |   |                              |
|                         | Actiefkoolfiltratie                  |                    |                  |  |   |   |                              |
|                         | Roughing filtration                  |                    |                  |  |   |   |                              |
|                         | Diatomeeënaarde                      |                    |                  |  |   |   |                              |
|                         | Wetlands (surface flow)              |                    |                  | 1,5-2,5  |   |   | 1,5                          |
|                         | Wetlands (subsurface flow)           |                    |                  | 0,5-3,0  |   |   | 1,0-3,0                      |
|                         | Bekkenpassage (lagoon storage)       |                    |                  | 1,0-5,0  |   |   | N/A                          |
| Coagulatie/sedimentatie | Coagulatie/flocculatie               |                    |                  |  |   | 2 (Wang et al., 2005)                                       |                              |
|                         | Sedimentatie                         |                    |                  |  |   |   |                              |



|                        | Methode/stof /matrix                         | Koloniegetal (KVE) | <i>Aeromonas</i> | <i>E. coli</i>   | Enterococcen   | Bacteriën van de coligroep / coliform | SSRC / <i>C. perfringens</i> |
|------------------------|--|--------------------|------------------|--|--|---------------------------------------|------------------------------|
| Fysische stimulatie(s) | Flotatie (Dissolved Air Flotation, DAF)      |                    |                  |  |  |                                       |                              |
|                        | Ultrasonificatie / sonodesinfectie           |                    |                  |  |  |                                       |                              |
|                        | Pulsed electric fields of electrodesinfectie |                    |                  |  |  |                                       |                              |
|                        | Sono-electrodesinfectie                      |                    |                  |  |  |                                       |                              |
|                        | Ultrasound + UV                              |                    |                  | 1,6 (US: 350W; UV 1656 mJ/cm <sup>2</sup> ; 15 min); >4,0 (US: 1400 W; UV: 1656 mJ/cm <sup>2</sup> ; 15 min) | 1,7 (US: 350W; UV 1656 mJ/cm <sup>2</sup> ; 15 min); >3,9 (US: 1400 W; UV: 1656 mJ/cm <sup>2</sup> ; 15 min) |                                       |                              |
|                        | Microgolven                                  |                    |                  |  |  |                                       |                              |
|                        | Magnetically-enhanced disinfection           |                    |                  |  |  |                                       |                              |
|                        | Gammastraling                                |                    |                  | 150 (>4log)  |  |                                       |                              |
|                        | Sterilisatie (temperatuur)                   |                    | >10              | >10  | >10  | >10                                   | 0,1                          |
| Biologische stimulatie | Bacteriofagen ('faagtherapie')               |                    |                  |  |  |                                       |                              |
|                        | Protozoa (grazers)                           |                    |                  |  |  |                                       |                              |