



Verwijdering van MS2 fagen, *E. coli*, *Clostridium* sporen en (oö)cysten van *Cryptosporidium* en *Giardia* door actief koolfiltratie

BTO 2009.011
Augustus 2009

Verwijdering van MS2 fagen, *E. coli*, *Clostridium* sporen en (oö)cysten van *Cryptosporidium* en *Giardia* door actief koolfiltratie

BTO 2009.011
Augustus 2009

© 2009 KWR

Alle rechten voorbehouden.

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

Colofon

Titel

Verwijdering van MS2 fagen, *E. coli*, *Clostridium* sporen en (oö)cysten van *Cryptosporidium* en *Giardia* door actief koolfiltratie

Projectnummer

B111550/B111633

Projectmanager

Patrick Smeets

Opdrachtgever

BTO

Kwaliteitsborgers

Gertjan Medema

Auteurs

W.A.M. Hijnen¹, G.M.H. Suylen², J.A. Bahlman², A. Brouwer-Hanzens¹, F. Bichai³, W. Siegers¹

¹ KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein

² Evides, Waterbedrijf, Rotterdam

³ École Polytechnique de Montreal

Verzonden aan

PBC Microbiologie, Evides

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Voorwoord

In het kader van het aandachtsveld “microbiologisch veilig drinkwater” is een BTO project uitgevoerd met als doel de efficiëntie te bepalen van waterzuiveringsprocessen om ziekteverwekkende micro-organismen te verwijderen. In het kader van dit project is in 2008 een onderzoek gedaan naar de bijdrage van actieve koolfiltratie aan de verwijdering van ziekteverwekkende micro-organismen in de zuivering. Het plan is tot stand gekomen in overleg met de KWR groep Microbiologische veiligheid onder leiding van Gertjan Medema. Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Evides Waterbedrijf. In overleg met Trudy Suylen, Bram van der Veer, Jan Bahlman en Sander Nugteren van dit bedrijf is een proefinstallatieonderzoek gerealiseerd op productielocatie Berenplaat. Hierbij is gebruik gemaakt van een KWR proefinstallatie die is geplaatst door Sidney Meijering en Harry van Wegen (KWR) en tijdens de proeven is bedreven door Jan Bahlman en Wolter Siegers. Danny Harmsen van KWR heeft zorg gedragen voor de monsterneming van het filterbed. Kees Hoogendorp en andere medewerkers van Aqualab hebben bijgedragen door monsternemingen en analyses te organiseren en uit te voeren. Anke Brouwer heeft de analyses bij KWR begeleid en uitgevoerd samen met andere KWR collega's. Het onderzoek met de zoöplankton monsters is uitgevoerd door Françoise Bichai in het kader van haar PhD thesis voor de École Polytechnique de Montreal.

Bij de afronding van het rapport is het inhoudelijk commentaar van Dr. Jack Schijven van het RIVM meegenomen.

Samenvatting

Sinds 2001 moeten de Waterleidingbedrijven die oppervlaktewater gebruiken als de bron voor hun drinkwaterproductie een kwantitatieve microbiologische risicoanalyse uitvoeren om aan te kunnen tonen dat het drinkwater voldoet aan een infectierisico niveau van 10^{-4} per persoon per jaar. Hiervoor moet de concentraties indexpathogenen in het ruwe water worden bepaald en de mate waarin deze door de lokale zuivering worden verwijderd. Bij de eerste voorlopige risicoanalyse van de productielocaties van het Waterbedrijf EVIDES en ook van andere bedrijven (Schijven en De Roda Husman, 2009) kwam naar voren dat er onvoldoende kennis is over actieve koolfiltratie als barrière voor virussen, bacteriën en protozoa (oö)cysten in de zuivering. Doel van het onderzoek beschreven in dit rapport is om het vermogen van actieve koolfiltratie te bepalen om pathogene virussen, bacteriën en protozoa te verwijderen. Tevens zijn metingen verricht om inzicht te krijgen in de verwijderingmechanismen en het lot van de verwijderde micro-organismen.

Voor het onderzoek werd gebruik gemaakt van een pilot plant opstelling met twee filterkolommen die werden gevoed met het snelfiltraat van productielocatie Berenplaat. De kolommen werden gevuld met Chemviron F400 actieve kool. Doseerproeven zijn uitgevoerd met MS2 fagen en *E. coli* als procesindicatoren voor enterovirussen en *Campylobacter*, sporen van *Clostridium bifermentans* en (oö)cysten van *Cryptosporidium parvum* en *Giardia lamblia* in de opstelling gevuld met verse actieve kool en gevuld met voorbeladen actieve kool (40.000 Bedvolumes, BV). Naast de doorbraakcurven van de gedoseerde micro-organismen werd vóór de doseerproeven ook de verwijdering van natuurlijke indicatorbacteriën (*E. coli* en SSRC) bepaald en na de doseerproeven de concentratie van micro-organismen in de actieve kool.

Uit de experimenten blijkt dat actieve koolfilters voor virussen niet en voor bacteriën in beperkte mate een bijdrage leveren aan de verwijdering in de zuivering. De actieve koolfilters vormen een significante barrière voor *Cryptosporidium* en *Giardia* in de zuivering. De gegevens van de gedoseerde micro-organismen zijn zeer waarschijnlijk conservatief, omdat gebleken is dat natuurlijke indicatorbacteriën (*E. coli* en SSRC) beter werden verwijderd dan de gedoseerde indicatorbacteriën. De vermoedelijke oorzaak hiervan is toepassing van coagulatie vóór de koolfilters die van invloed is op de verwijderbaarheid van natuurlijke micro-organismen door filtratie (deeltjes associatie, oppervlakte eigenschappen). De verwijdering van bacteriën en sporen in voorbeladen kool was hoger dan in de verse kool. Voor *Giardia*-cysten werd geen verschil gevonden in verwijdering door verse of voorbeladen kool. Voor *Cryptosporidium*-oöcysten was de verwijdering in de verse kool duidelijk hoger dan in de voorbeladen kool. Uit de vergelijking van de verwijdering van de anaerobe sporen en (oö)cysten blijkt dat de sporen (SSRC) geen goede procesindicator zijn voor de verwijdering van protozoa door deze filters. Het verschil in verwijdering van de gedoseerde sporen en (oö)cysten was 0.5 log tot meer dan 1 log.

Op grond van de verschillen in deeltjesgrootte en metingen aan koolmonsters, wordt de verwijdering van de bacteriën, sporen en oöcysten voornamelijk toegeschreven aan hechting, terwijl voor de cysten van *Giardia* ook zeefwerking een bijdragen kan hebben geleverd. Gemeten is dat de aantallen *E. coli* bacteriën die zijn verwijderd in het filterbed sterk afnemen; afsterving en waarschijnlijk ook predatie zijn hiervoor verantwoordelijk. Het aantal persistente micro-organismen (sporen en (oö)cysten) nam ook af, maar in beperkte mate. Voor de (oö)cysten zijn aanwijzingen gevonden voor opname door zoöplankton en remobilisatie naar het effluent, maar het is de vraag of dit de verwijdering van deze pathogenen significant vermindert.

Het onderzoek laat zien dat actieve koolfiltratie een bijdrage levert aan de verwijdering van bacteriën en protozoa en dat deze laatste groep van pathogenen aanzienlijk kunnen worden verwijderd. De kolommen van dit onderzoek verwijderden *E. coli* met 0.5 - 1,0 log, *Cryptosporidium*-oöcysten met 1,1 - 2,7 log en *Giardia*-cysten met 2.0 log. Op basis van een extrapolatie van deze gegevens naar de praktijk wordt voor de virussen geen verwijdering voorgesteld en voor *Campylobacter* wordt een DEC van 1,0 log aangenomen. Voor de verwijdering van *Cryptosporidium* door de praktijkfilters van de Berenplaat wordt een DEC van 2,0 log voorgesteld en voor *Giardia* een DEC van 3,0 log.

Nader onderzoek is echter nodig om deze gegevens te vertalen naar de praktijkfilters. Het gaat om de invloed van de voorbehandeling van de micro-organismen, het type actieve kool, beddiepte, toepassing van filter bed spoeling en de filtratiesnelheid hebben op de verwijdering.

Inhoud

Voorwoord	1
Samenvatting	3
Inhoud	5
1 Inleiding	7
2 Materialen en methoden	9
2.1 De koelfiltratieopstelling	9
2.2 De micro-organismen: suspensies en analyses	10
2.3 Fysisch/chemische waterkwaliteit	11
2.4 De doseerproef	11
2.5 Bepaling van de verwijdering van micro-organismen	11
2.6 Steekmonsters van de kool	12
2.7 Analyse van micro-organismen in de kool	12
3 Resultaten en discussie	13
3.1 Fysisch/chemische waterkwaliteit	13
3.2 Weerstand in de kolommen	13
3.3 DEC waarden voor de verschillende micro-organismen	13
3.3.1 Verwijdering van natuurlijke indicatorbacteriën	13
3.3.2 Verwijdering van de gedoseerde micro-organismen	15
3.4 Micro-organismen in het filterbed	18
3.5 Massabalans van gedoseerde organismen	20
3.6 De verwijderingsmechanismen in de koelfilters	21
4 Nadere evaluatie van de resultaten	29
4.1 De Decimale Eliminatie Capaciteit van actieve koelfiltratie	29
4.2 Vertaling van de gegevens naar de praktijk	32
5 Conclusies en aanbevelingen	35
6 Referenties	37
Bijlage 1 Monsterschema	39
Bijlage 2 Meetgegevens KWR	41
Bijlage 3 Aqualab gegevens	49
Bijlage 4 Gegevens filtersteken	51

1 Inleiding

In de afgelopen jaren zijn er voorlopige kwantitatieve microbiologische risicoanalyses uitgevoerd bij de Nederlandse drinkwaterbedrijven die oppervlaktewater gebruiken als de bron. Deze analyses zijn wettelijk verplicht sinds 2001 om aan te tonen dat het drinkwater voldoet aan een infectierisiconiveau van 10^{-4} per persoon per jaar. Belangrijk onderdeel van deze risicoanalyse is het locatiespecifiek bepalen van de Decimale Eliminatie Capaciteit (DEC of logverwijdering) van de zuivering voor pathogene micro-organismen. Daarvoor worden de indicatorbacteriën gebruikt als procesindicator: *E. coli* voor de verwijdering van *Campylobacter* en sporen van sulfiet-reducerende clostridia (SSRC) als procesindicator voor de verwijdering van (oö)cysten van *Cryptosporidium* en *Giardia*. Over de verwijdering van bacteriofagen als procesindicator voor de verwijdering van virussen door de zuivering is nog relatief weinig bekend.

Met aparte doseerproeven op pilot plant of laboratoriumschaal zijn de afgelopen jaren vergelijkende studies gedaan naar de vertaalbaarheid van de gegevens over de verwijdering van indicatorbacteriën naar verwijdering van de pathogenen. Vanwege het ontbreken van voldoende en/of betrouwbare informatie was de focus in dit onderzoek gericht op de processen met de hoogste potentiële verwijderingscapaciteit: desinfectie en langzame zandfiltratie. Voor actieve koolfiltratie is dit nog niet gedaan omdat er weinig of geen bijdrage van dit proces aan de totale verwijdering werd verwacht, hoogstens vergelijkbaar met een snelfilter. Het is echter de vraag of dit een juiste benadering is. Actief kool heeft als filtermateriaal een aantal wezenlijk andere eigenschappen dan zand (groot specifiek inwendig oppervlak, licht, andere oppervlakte eigenschappen, hogere biofilmdichtheden). Een koolfilter is primair bedoeld voor adsorptie en biologische afbraak van stoffen en niet als filtratieproces om deeltjes te verwijderen. Daarom is een actief koolfilter een filtratiestap met een hoog adsorptievermogen en een hoge biologische activiteit (sterk ontwikkelde biofilm), langere contacttijden en minder frequente en intensieve terugspoel mogelijkheden dan snelle zandfilters. Dit kan zowel een over- als onderschatting van de DEC voor de diverse pathogenen betekenen. Virussen worden mogelijk effectiever verwijderd dan in zand filters door de adsorptiecapaciteit en hetzelfde kan gelden voor (oö)cysten van protozoa. Ophoping van pathogenen in de biofilm in deze gespoelde filters kan aan de andere kant aanleiding geven tot hetzelfde verschijnsel als waargenomen voor de sporen: accumulatie en vertraagd transport.

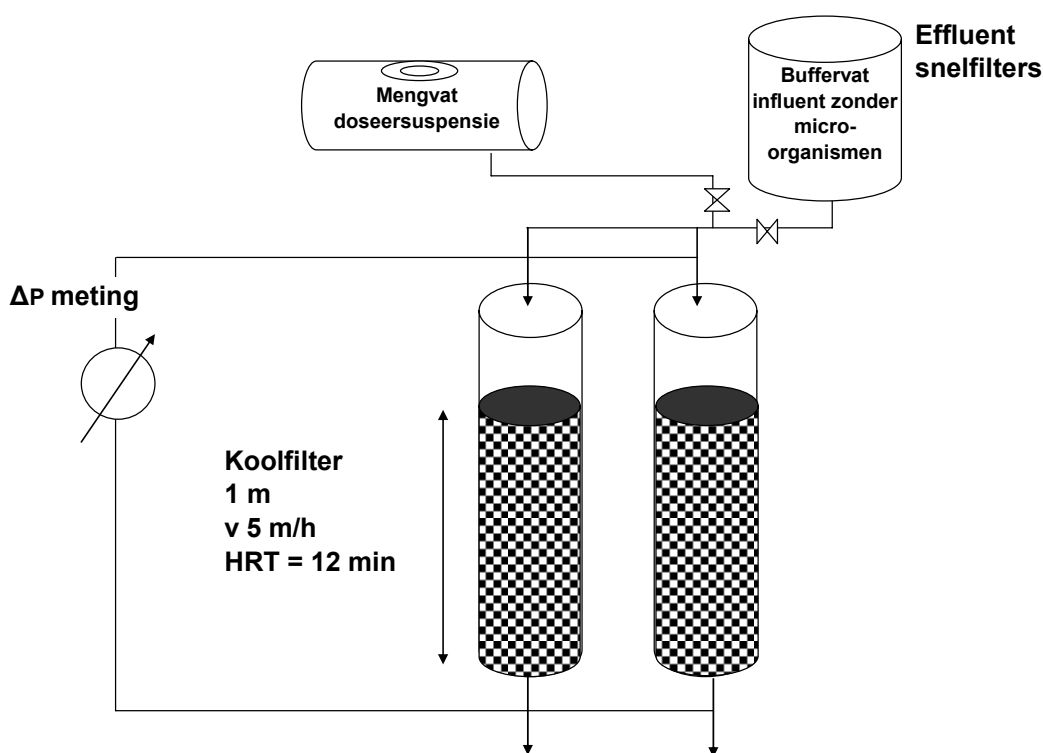
Er zijn geen gegevens beschikbaar over de verwijdering van *E. coli* door actieve koolfilters; wel van bacteriën van de coligroep maar deze gegevens zijn door nagroei in de zomer niet geschikt. Verwachting is dat de *E. coli* concentraties in de aanvoer van de praktijkfilters te laag zijn om onder praktijkcondities gegevens te verzamelen. SSRC verwijdering door actief koolfilters in de praktijk is variabel en kan laag tot negatief zijn door ophoping, overleving en doorslag.

Het doel van dit onderzoek is om te bepalen wat het vermogen is van actieve koolfiltratie om de indexpathogene micro-organismen (enterovirussen, *Campylobacter*, *Cryptosporidium* en *Giardia*) te verwijderen. Hiertoe worden doseerproeven met MS2 bacteriofagen, *E. coli* bacteriën en *Clostridium* sporen als procesindicatoren voor de indexpathogenen uitgevoerd in een kolomopstelling met verse en beladen actieve kool. Tevens zijn beide protozoa *Cryptosporidium* en *Giardia* gedoseerd om het gebruik van de sporen als procesindicator voor deze indexpathogenen te evalueren. Aanvullende metingen zijn gedaan om meer inzicht te krijgen in de verwijderingsmechanismen en het lot van de in het filter bed verwijderde micro-organismen. Op grond van de resultaten van dit eerste onderzoek wordt vastgesteld of verder onderzoek naar het vermogen van actief koolfiltratie om micro-organismen te verwijderen in een duurproef met terugspoeling zinvol is.

2 Materialen en methoden

2.1 De koolfiltratieopstelling

De doseerproeven zijn uitgevoerd in een beschikbare kolomopstelling weergegeven in figuur 1. In twee identieke kolommen met een diameter van 0,15 m is een filterbed van actief kool met een lengte van 1 meter aangebracht. Er zijn twee afzonderlijke proeven uitgevoerd, één met verse kool en één met voorbeladen kool waarvan de afmetingen zijn vermeld in Tabel 1. Voorbeladen kool is actieve kool dat een periode in gebruik is en door adsorptie beladen is met organische stof. De kool is in de kolom gebracht en vervolgens in 7 stappen gespoeld met een toenemende watersnelheid tot een maximum van 35 m/h (5 m/h toename per stap) wat overeenkomt met 30% expansie van het bed. Vervolgens is de snelheid in 5 minuten tijd gelijkmatig gereduceerd van 35 naar 0 m/h.



Figuur 1. De opstelling met twee actieve koolfilters

Tabel 1. Kenmerken van de afmetingen van de actieve kool in de kolommen

Kenmerk ^a	Eenheid	Verse F400		F400 40.000 BV	
		K1	K2	K1	K2
D10	mm	0,6	0,5	0,6	0,7
D50	mm	1,1	0,8	1,0	1,1
D90	mm	1,4	1,3	1,4	1,4
U _c (D60/D10)		1,88	2,04	1,75	1,68
EK	mm	0,61	0,46	0,69	0,64
Ondermaat <0.425 mm	%	3,4	7,4	1,6	1,5
Bovenmaat >1.68 mm	%	0,4	0,1	1,0	0,5

^a D10, D50, D90 percentielen van de korrelafmetingen; U_c = uniformiteitscoëfficiënt D60/D10; EK = effectieve korreldiameter;

De koolfilters met verse kool zijn 10 dagen vooraf opgestart en als gevolg van een weerstandstijging eenmaal gespoeld 6 dagen vóór de doseerproef. De voorfiltratie van de voorbeladen kool duurde 12

dagen en in die periode zijn deze filters niet meer gespoeld. De gekozen filtratiecondities met deze beschikbare opstelling zijn zo goed als mogelijk afgestemd op de praktijkcondities met betrekking tot filtratiesnelheid en contacttijd. De filtratiesnelheid waarop de filters werden bedreven was 5 m/h waardoor bij een bedlengte van 1 m een schijnbare contacttijd van 12 minuten werd bereikt. In vergelijking tot de praktijkfilters is de filtratiesnelheid in deze proefkolommen lager, de bedhoogte korter en de contacttijd lager (Tabel 2).

Tabel 2. De Procescondities in de praktijkfilters te Berenplaat en Kralingen

	Brenplaat	Kralingen
Koolsoort diameter mm; gem. (eff.)	F400 1.0 (0,6-0,7)	TL830 1,4 (0,9-1,1)
Bedhoogte (m)	4	3
Snelheid (m/h)	10	13
Contacttijd (min.)	24	13
Spoeling (n/dagen)	20	20
Regeneratie (gem./max.; BV)	22.000/40.000	45.000/90.000

2.2 De micro-organismen: suspensies en analyses

Er zijn F-specifieke RNA-fagen (MS2), bacteriën (*E. coli*, WR1), bacteriesporen (*C. bifermentans*; CP1) en (oö)cysten van protozoa (*Cryptosporidium* en *Giardia*) gedoseerd.

Een suspensie van MS2 (ATCC#15597-B1) fagen van 1 ml met 10^{12} PFU (GAP EnviroMicrobial Services) is gebruikt en werd gedoseerd aan het vat met 360 liter influent geschikt om de kolommen 2 uur mee te belasten onder de hierboven beschreven condities. Het influent van beide afzonderlijke kolommen werd na 10, 30, 60 en 120 minuten bemonsterd. De gemeten MS2 concentratie in het influent was $1,2 \times 10^9 \pm 1,9 \times 10^8$ en $7,2 \times 10^6 \pm 1,0 \times 10^6$ PFU.l⁻¹ van respectievelijk de kolommen met verse en de kolommen met beladen actieve kool. De gebruikte *E. coli* suspensie van 1.1×10^7 .ml⁻¹ was gemaakt in 1 liter Mineraal medium met 1 mg Glucose.C.l⁻¹ bij een incubatietemperatuur van 22°C en werd bewaard bij 5±3°C. Bij de testen werd 0,5 liter gedoseerd aan het vat met influent. De concentratie *E. coli* bacteriën in het influent van de verse en beladen actieve kool was respectievelijk $1,1 \times 10^6 \pm 3,1 \times 10^5$ en $6,0 \times 10^5 \pm 2,6 \times 10^4$ CFU.l⁻¹. Voor de sporen van sulfiet-reducerende clostridia (SSRC) is een reïncultuur van *C. bifermentans* (CP1) geproduceerd zoals eerder beschreven (Hijnen et al. 2002). De suspensie had een concentratie van 1×10^7 sporen per ml en 50 ml werd gedoseerd aan het vat met influent voor een gemeten concentratie van $1,7 \times 10^6 \pm 3,9 \times 10^5$ (verse actieve kool) and $2,0 \times 10^6 \pm 5,1 \times 10^5$ (beladen actieve kool) CFU.l⁻¹. Voor de (oö)cysten van *Cryptosporidium parvum* (uit een kalf) en *Giardia lamblia* (uit een woestijnrat) suspensies werden besteld van Waterborne Inc. (10^8 . 8 ml⁻¹). Deze suspensies werden UV bestraald om ze te inactiveren (10 mJ/cm²) voor de dosering in concentraties van $1,1 \times 10^5 \pm 3,1 \times 10^4$ en $1,6 \times 10^5 \pm 4,5 \times 10^4$ *C. parvum* en $9,8 \times 10^4 \pm 4,2 \times 10^4$ en $4,8 \times 10^4 \pm 2,4 \times 10^4$ *G. lamblia* per liter in het influent van respectievelijk de verse en beladen actieve kool kolommen.

MS2 fagen werden bepaald met de methode NEN-ISO 10705-1 die gebruik maakt van de gastheerstam WG49 en de dubbellaags agar methode. Voor *E. coli* telling monsters werden direct of na membraan filtratie geïncubeerd op Natrium Lauryl-sulfaat Agar (LSA, Oxoid MM0615) voor 5±1 uur bij 25±1°C en voor 14±2 uur bij 44±2°C. Voor de natuurlijke *E. coli* werden gele kolonies bevestigd met indol vorming bij 44±2°C. Sporen van sulfiet-reducerende clostridia (SSRC; inclusief *Cl. bifermentans*) werden bepaald in gepasteuriseerde monsters (15 min. 70-75°C) na isolatie op 0.2 µm steriele membraan filters welke werden geïncubeerd gedurende 48 uur bij 37±2°C onder anaerobe condities in SA agar (SFP-agar base; BD-Difco 281110). De concentratie (oö)cysten inclusief de bepaling van de recovery met Colorseed (BTF Decisive Microbiology, North Ryde NSM, Australia), is voor ieder individueel monster bepaald zoals eerder beschreven (Hijnen et al. 2007a). Groot volume metingen voor de natuurlijke indicator bacteriën in het water werd uitgevoerd de concentrering met cross flow ultra-filtratie (Hijnen et al. 2007a; Veenendaal and Brouwer-Hanzens, 2007).

2.3 Fysisch/chemische waterkwaliteit

Het water dat voor de doseerproef is gebruikt is het snelfiltraat van pompstation Berenplaat. Dit is afgeleverd Biesboschwater (dus Maaswater na passage van een 3-tal spaarbekkens waarin de gemiddelde verblijftijd ca. 5 maanden bedraagt) voorbehandeld met microzeving, coagulatie en snelfiltratie (dubbellaagsfiltratie).

De fysisch/chemische kwaliteit van het influent en effluent van beide kolommen is tijdens het onderzoek een aantal maal bepaald om de filtratiecondities bij beide proeven die van invloed kunnen zijn op de verwijdering van micro-organismen vast te leggen. Het gaat hierbij om de temperatuur, pH en geleidbaarheid, zuurstofverbruik, verlaging van troebelheid en DOC.

2.4 De doseerproef

Vlak voor de doseerproef is het afzonderlijke mengvat gevuld met ca. 350 liter influent voor een filtratietijd van 2 uur (88 liter/h per kolom). Halverwege het vullen zijn de suspensies met micro-organismen aan het vat gedoseerd en vervolgens is het rest volume toegevoegd. Het vat is gemengd voor de aanvang van de dosering. De doseerproef is gestart door gelijktijdig de afsluiter naar de aanvoer te openen en de afsluiter na het buffervat met influent te sluiten. Na twee uur is de dosering gestopt door de eerstgenoemde afsluiter te sluiten en de laatstgenoemde afsluiter te openen.

Tijdens deze twee uur van blokdosering is het influent en effluent van beide kolommen intensief bemonsterd. Het monsterschema van de eerste proef is vermeld in Bijlage 1. Bij de tweede proef is het aantal monsters verminderd. Om de mate van uitspoeling van de verwijderde micro-organismen te bepalen is de bemonstering van het filtraat in totaal 5 dagen doorgezet.

2.5 Bepaling van de verwijdering van micro-organismen

Natuurlijke indicatorbacteriën. In de inloophase van de koolfilters ca. 5-6 dagen voor de doseerproef is de verwijdering van de natuurlijke indicatorbacteriën *E. coli* en SSRC bepaald in beide kolommen. Vanwege de lage concentraties in het aangevoerde water zijn groot volumemetingen uitgevoerd in zowel influent als effluent. Hiervoor is gebruik gemaakt van de hemoflow opstelling.

Gedoseerde micro-organismen. Bij de eerste proef zijn verzamelmonsters in 20 liter vaten genomen tijdens de volledige doseerperiode met als doel het volledige volume influent dat was besmet met micro-organismen op te vangen. Van deze mengmonsters zijn deelmonsters van 1 liter genomen voor de diverse microbiologische analyses. Bij de tweede proef is er voor gekozen om direct kleinere deelmonsters van 0,5 en 1 liter te nemen en het filtraat tijdens de hoge dosering af te voeren via een 1 µm kaarsfilter naar het riool. 7 uur na start van de dosering zijn de effluënten bemonsterd m.b.v. een hemoflow opstelling om een groot volume te onderzoeken op de aanwezigheid van de gedoseerde micro-organismen. Alle analyses van de daarop volgende dagen zijn uitgevoerd in het concentraat van een hemoflow bemonstering.

De verwijdering is berekend m.b.v de in de tijd gepaarde concentraties en de gemiddelde concentratie voor de natuurlijke indicatorbacteriën met de volgende formules:

$$DEC = \log_{10} \frac{C_{in}}{C_{uit}}$$

of

$$DEC = \log_{10} \frac{\bar{C}_{in}}{\bar{C}_{uit}}$$

De verwijdering van de gedoseerde micro-organismen is berekend op basis van de massabalans, waarbij de massa is berekend op grond van de gemiddelde concentratie (n/l) in het water voor en na de kolom tijdens het tijdsinterval tussen twee monsternemingen en de volumestroom in liter per uur. Bij een hemoflow bemonstering is het tijdsinterval bepaald op basis van het tijdstip halverwege de bemonstering.

$$DEC = \log_{10} \frac{M_{in}}{M_{uit}}$$

Waarbij M_{in} en M_{uit} het aantal micro-organismen is in respectievelijk influent en het effluent.

2.6 Steekmonsters van de kool

Na 7 dagen zijn er steekmonsters van de kolommen van beide experimenten genomen. Bij de proef met voorbeladen kool zijn de kolommen na monsterneming opnieuw in gebruik genomen en gedurende 22 dagen op de halve filtratiesnelheid bedreven als voor de steek. Vervolgens zijn er opnieuw steekmonsters van de kolommen genomen.

De monsternamen van de koolkolommen is als volgt uitgevoerd:

- kolommen leeg laten lopen tot oppervlak;
- oppervlak bemonsteren;
- handmatig het steekapparaat erin schuiven zo diep als mogelijk;
- vervolgens met behulp van een rubber hamer het steekapparaat tot aan de bodem van het bed schuiven;
- kolommen horizontaal leggen;
- steek eruit trekken.

2.7 Analyse van micro-organismen in de kool

De biomassa concentratie in de actieve kool werd bepaald door het meten van de concentratie Adenosine tri-fosfaat (ATP; ng.ml^{-1} ; volumetrisch kool gewicht van $0,66 \text{ g.ml}^{-1}$) met een geoptimaliseerde methode (Magic-Knezev and Van der Kooij 2004) waarbij gebruik werd gemaakt van hoge energetische sonicatie (HES; 2 minuten bij een amplitude van 45%) om de ATP te extraheren van 5 gram actieve kool in 100 ml steriel drinkwater. Dezelfde extractie methode is gebruikt om de concentratie gehechte micro-organismen in de verse actieve kool (KVE of (oö)cysten. ml^{-1}) te bepalen. Om de mate van hechting aan de verse actieve kool te bepalen, werden geselecteerde monsters behandeld met achtereenvolgens 2 minuten hand schudden, 2 minuten vortex mengen, 2 minuten laag energetische sonicatie (LES) en 2 minuten HES in afzonderlijke 20 ml suspensies. Dit verhoogde de recovery van de (oö)cysten aanzienlijk en daardoor werd deze geoptimaliseerde extractie methode (afzonderlijke suspensies gecombineerd tot een totaal suspensie) gebruikt om de concentratie van gehechte micro-organismen in de beladen actieve kool te bepalen. Vanwege de hoge concentratie in de extractie suspensies is een recovery bepaling in deze suspensies met Colorseed niet uitvoerbaar in deze monsters; om te corrigeren voor de recovery van de analytische methode, werd de gemiddelde recovery van de Colorseed analyse van de watermonsters gebruikt.

3 Resultaten en discussie

3.1 Fysisch/chemische waterkwaliteit

De temperatuur tijdens de proef met verse kool was gemiddeld 14,5°C en tijdens de proef met voorbeladen kool 10,0°C (Tabel 3 en 4). Tijdens beide proeven was er een geringe zuurstofconsumptie van 0,4 en 1,0 mg/l. Er werden geen verschillen in de pH en geleidbaarheid van het influent tijdens beide proeven gevonden en de filtratie had geen effect op deze parameters. De lage troebelheid van het influent van 0,096 en 0,085 Ftu werd in geringe mate verlaagd. Zoals verwacht was de DOC verwijdering in de verse kool sterker dan in de voorbeladen kool. De verse kool verlaagde de DOC met ca. 78% tot 0,5 mg/l. In de voorbeladen kool nam het DOC gehalte slechts met 12,5% af.

Tabel 3. Overzicht van de fysisch/chemische kwaliteit van het water voor en na de koolkolommen van het experiment met verse kool

	Eenheid	Influent (\pm SD) (n=4-6)	Effluent (\pm SD) (n=4-6)
Temperatuur	°C	14,5 (0,8)	14,7 (1,0)
Zuurstof	mg/l	9,6 (0,1)	9,1 (0,2)
pH		8,1 (0,03)	8,0 (0,06)
Geleidbaarheid	mS/m	44,4 (0,15)	44,3 (0,2)
Troebelheid	Ftu	0,096 (0,035)	0,054 (0,007)
DOC	mg/l	2,3 (0,03)	0,5 (0,10)

Tabel 4. Overzicht van de fysisch/chemische kwaliteit van het water voor en na de koolkolommen van het experiment met voorbeladen kool

	Eenheid	Influent (\pm SD) (n=4-6)	Effluent (\pm SD) (n=4-6)
Temperatuur	°C	10,0 (0,8)	9,8 (0,9)
Zuurstof	mg/l	11,0 (0,3)	10,0 (0,5)
pH		8,1 (0,0)	8,0 (0,1)
Geleidbaarheid	mS/m	45,2 (0,4)	45,2 (0,4)
Troebelheid	Ftu	0,085 (0,024)	0,064 (0,025)
DOC	mg/l	2,4 (0,08)	2,1 (0,04)

3.2 Weerstand in de kolommen

Omdat weerstand in de kolommen een indicatie vormt voor een verlaagde permeabiliteit kan weerstand mogelijk ook van invloed zijn op de verwijdering. Tijdens de proeven is het weerstandsverschil over de kolommen bepaald. Tijdens de eerste dagen van de voorfiltratie van de verse kool nam de weerstand over beide kolommen toe (Figuur 2a). Na 4 dagen werden de kolommen gespoeld waarna de weerstand opnieuw met ca. 30 mbar toenam van 10 naar 40 mbar op de dag van de doseerproef. Na deze proef daalde de weerstand tot een stabiel niveau van ca. 30 mbar in beide kolommen. De weerstand in de kolommen met voorbeladen kool was iets lager, nl. 20-25 mbar en bleef constant tijdens de voorfiltratie (Figuur 2b).

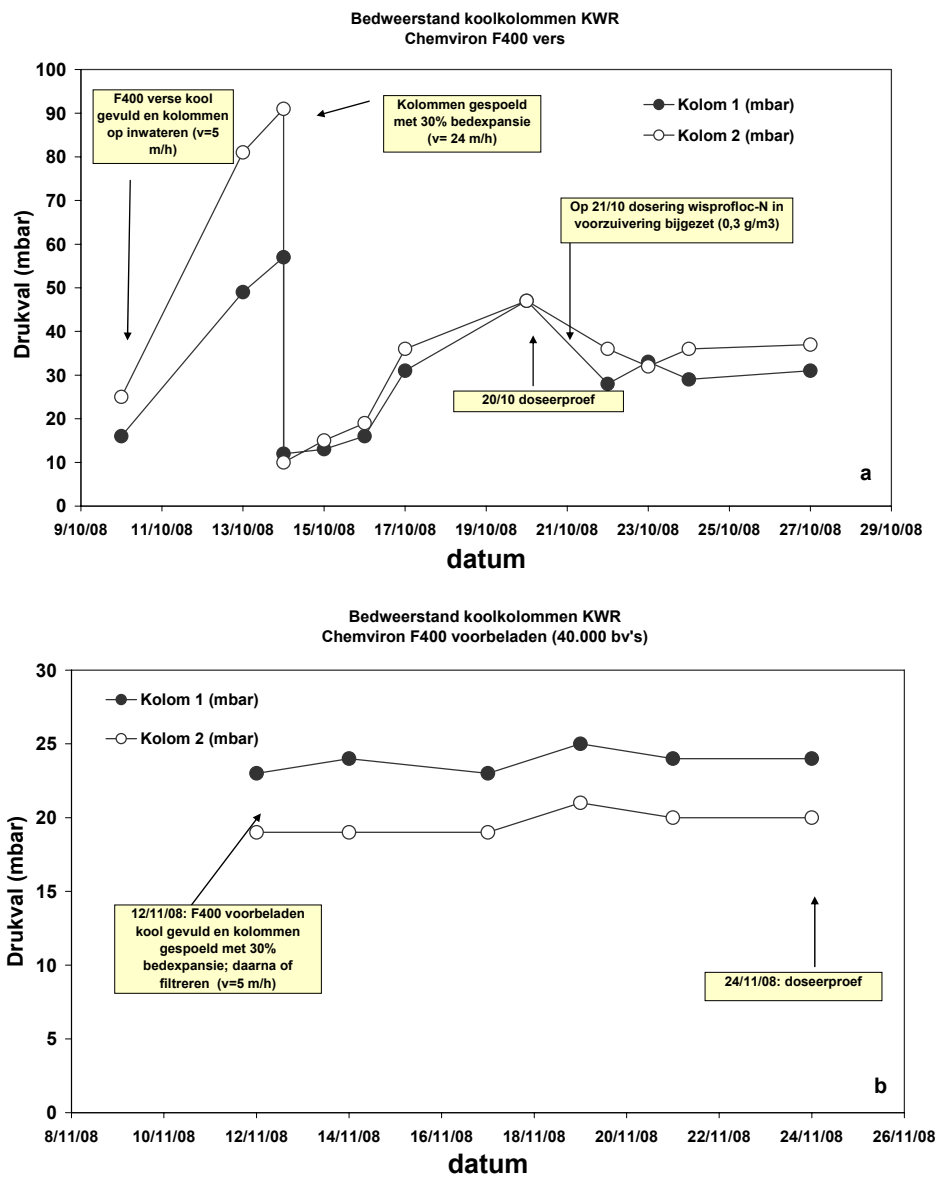
3.3 DEC waarden voor de verschillende micro-organismen

De ruwe data van de microbiologische analyses staan vermeld in Bijlage 2 en 3.

3.3.1 Verwijdering van natuurlijke indicatorbacteriën

De concentratie *E. coli* bacteriën in het influent van de kolommen tijdens beide proefperioden was gelijk en varieerde tussen 1,35 en 2,18 kve/l (Tabel 5). In de eerste periode met verse kool werd deze concentratie met 0,3 - 0,6 log (Tabel 6) verlaagd tot een concentratie van 0,46 - 1,01 kve/l. In de

kolommen met voorbeladen kool werd een grotere verwijdering van *E. coli* waargenomen dan in de verse kool. De *E. coli* concentraties waren 0,13 – 0,21 kve/l en de Decimale Eliminatie Capaciteit (DEC) was 1,0 – 1,2 log (Tabel 5). De verwijdering in de duplo kolommen was in beide perioden nagenoeg gelijk voor de natuurlijke *E. coli* en bedroeg gemiddeld $0,8 \pm 0,3$ log.



Figuur 2. Het weerstandsverloop in de actief koolfilters

Tabel 5. De concentratie *E. coli* en SSRC in het influent en effluent van de kolommen met verse en beladen kool

Type kool, datum	<i>E. coli</i> (n/l)			SSRC (n/l)		
	C_{in} K1	C_{uit} K1	C_{uit} K2	C_{in} K1	C_{uit} K1	C_{uit} K2
Verse kool, 15-10-08	2,18	1,01	0,84	1,87	0,11	0,10
Verse kool, 16-10-08	1,68	0,46	0,57	0,23	0,06	0,10
Beladen kool, 19-11-08	2,13	0,21	0,13	23,98	2,25	2,24
Beladen kool, 20-11-08	1,35	0,13	0,14	6,52	1,91	1,66

In vergelijking met de concentratie natuurlijke *E. coli* vertoonde de concentratie natuurlijke SSRC in het influent een grotere variatie (Tabel 5). De SSRC concentratie was in de eerste periode zowel in het influent als ook in het effluent duidelijk lager dan in de tweede periode. De beide kolommen (duplo's) verlaagden de SSRC concentratie in gelijke mate en ook tussen de verse en beladen kool was het verschil in verwijdering gering; de gemiddelde verwijdering bedroeg $0,8 \pm 0,3$ log (Tabel 6).

Tabel 6. De DE-waarden van de kolommen bepaald voor de verwijdering van de natuurlijke indicatorbacteriën

Type kool, datum	<i>E. coli</i> (n/l)		SSRC (n/l)	
	K1	K2	K1	K2
Verse kool, 15-10-08	0,3	0,4	1,2	1,3
Verse kool, 16-10-08	0,6	0,5	0,6	0,4
Beladen kool, 19-11-08	1,0	1,2	1,0	1,0
Beladen kool, 20-11-08	1,0	1,0	0,5	0,6

3.3.2 Verwijdering van de gedoseerde micro-organismen

De gemiddelde concentratie van de diverse micro-organismen in het influent en effluent van de met verse en beladen actieve kool gevulde kolommen tijdens de beide doseerproeven is weergegeven in de figuren 3 t/m 5. De concentraties van de duplo kolommen waren goed vergelijkbaar; met de foutenbalken is de range van concentraties tussen beide kolommen aangegeven. Op grond van de massabalans van de volledige doorbraakcurve is de decimale eliminatie capaciteit DEC_m bepaald voor de verschillende micro-organismen (Tabel 7).

Bacteriofagen

Uit de gegevens van de MS2 fagen bleek dat deze micro-organismen door zowel de verse kool als de beladen actieve kool niet werden verwijderd (Figuur 3a). De DEC_m waarden waren voor alle kolommen 0,0 (Tabel 6).

Tabel 7. De DEC_m -waarden bepaald voor de twee kool kolommen voor de verwijdering van de gedoseerde micro-organismen (berekend uit massabalans)

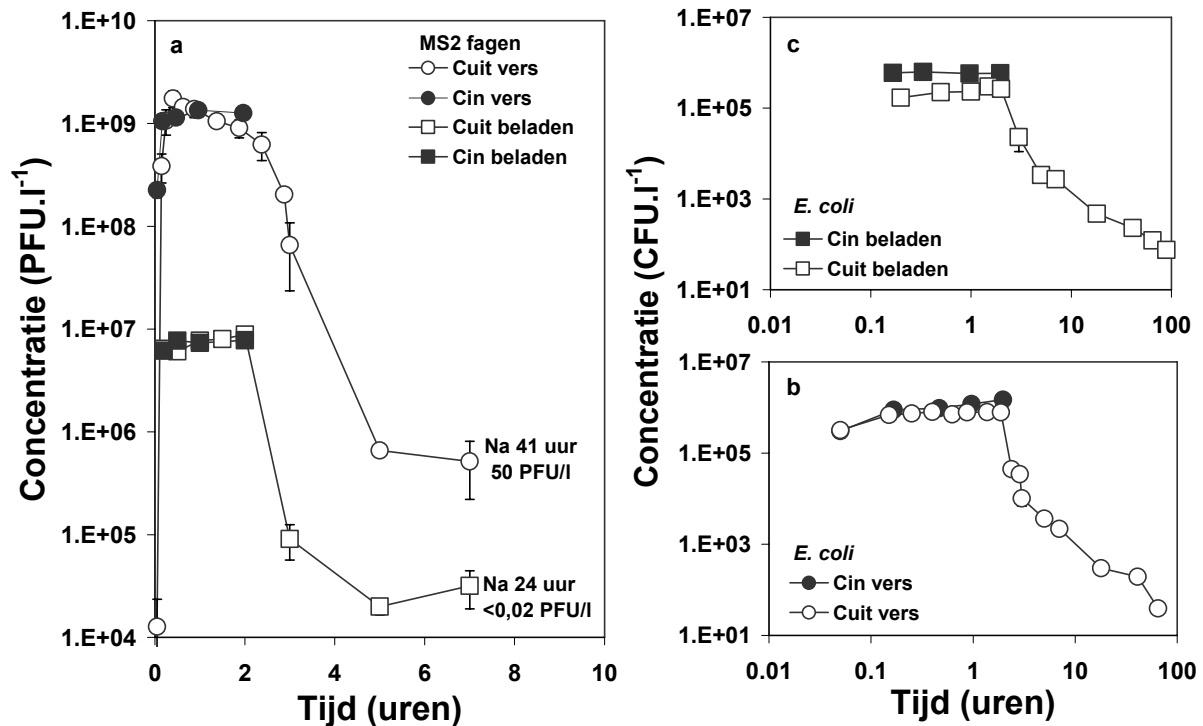
	Verse kool		Voorbeladen kool	
	K1	K2	K1	K2
MS2 fagen	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>E. coli</i>	0,0	0,1	0,3	0,3
SSRC	0,2	0,6	0,4	0,4
<i>Cryptosporidium</i>	2,7	2,7	1,3	1,1
<i>Giardia</i>	2,1	2,0	2,1	2,1

E. coli

Uit de doorbraakcurven van *E. coli* blijkt dat deze bacteriën in geringe mate door de verse kool worden verwijderd en dat de verwijdering in de beladen actieve kool iets hoger is (Figuur 3b,c). Wanneer ook de doorbraakgegevens worden meegewogen tijdens de fase zonder dosering (staart van de doorbraakcurve) dan blijkt het uiteindelijke effect van verse kool nihil te zijn ($DEC_m = 0$; Tabel 7) en blijken de bacteriën in de voorbeladen kool beperkt te worden verwijderd ($DEC_m = 0,3$ log). Deze resultaten komen in orde van grootte overeen met de verwijdering van de natuurlijke *E. coli* bacteriën en bevestigen de algemeen aangenomen verwijdering van ziekteverwekkende bacteriën als *Campylobacter* door actieve koolfiltratie: een beperkt verwijdering van ca. 0,5 log die, afhankelijk van de verblijftijd, te vergelijken is met de verwijdering door snelfiltratie (Hijnen en Medema 2007). Opmerkelijk is het resultaat dat de natuurlijke *E. coli* bacteriën beter worden verwijderd dan de gedoseerde stam (vergelijk Tabel 6 en 7).

Sporen van sulfiet-reducerende clostridia

De sporen van *C. bifermentans* werden door de filters enigszins beter verwijderd dan *E. coli* (Figuur 4). Het verloop van de doorbraakcurven in de verse kool vertoonde een overeenkomst met het verloop van de doorbraakcurven in de kolommen met beladen actieve kool. Op grond van de berekende DEC_m waarden (Tabel 7) kon geen duidelijk verschil in effectiviteit worden vastgesteld tussen verse en beladen kool; voor de verse kool waren deze waarden 0,2 - 0,6 log en voor de beladen kool 0,4 log. Evenals voor *E. coli* werd gevonden dat de verwijdering van de natuurlijke SSRC hoger was dan de verwijdering van de gedoseerde sporen van *C. bifermentans* (vergelijk tabel 6 en 7).



Figuur 3. Het verloop van de concentratie bacteriofagen en *E. coli* in influent en effluent van beide kolommen gevuld met verse (boven) en beladen (onder) actieve kool (foutenbalk = range concentraties in kolom 1 en 2)

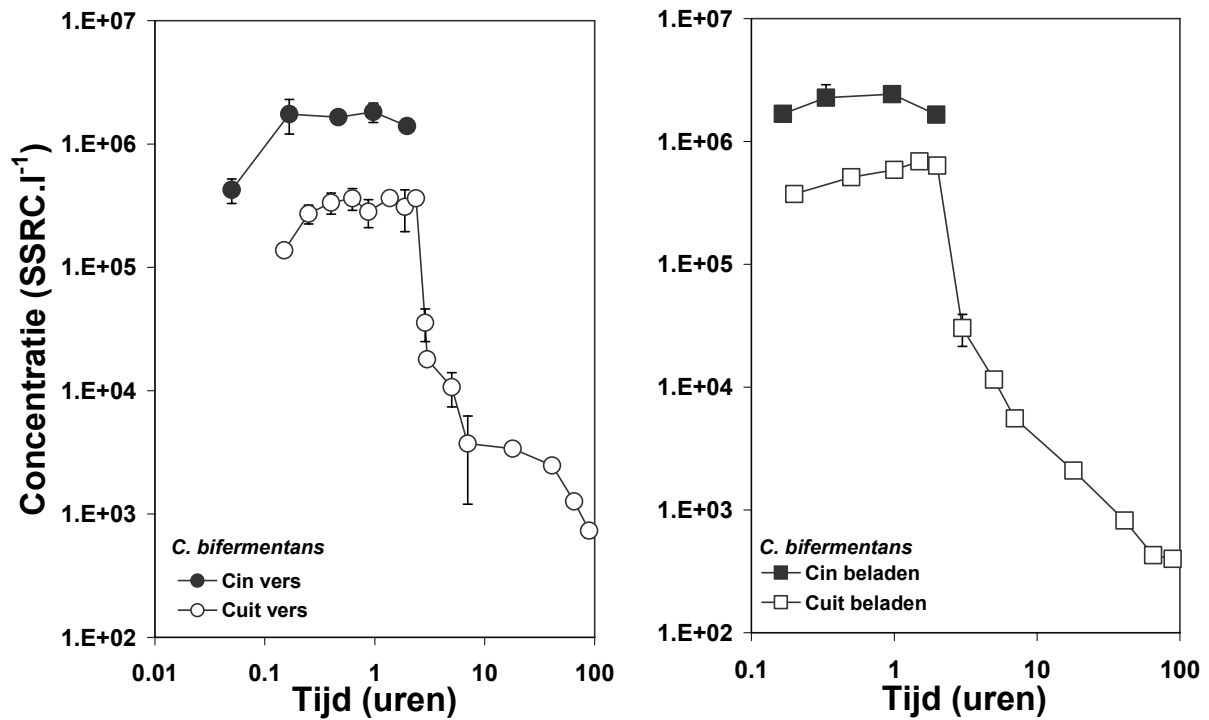
Cryptosporidium en *Giardia*

Bij de bepaling van de aantallen (oö)cysten in het water is bij iedere afzonderlijke meting een interne standaard (colorseed) gedoseerd om de recovery van de analyse te bepalen. Bij de monsters zonder voorconcentrering, zijn de coloseeds gedoseerd aan de deelmonsters voor de verdere opwerking en bij de hemoflowmonsters zijn de colorseeds gedoseerd aan het filtratiesysteem bij aanvang van de hemoflowconcentrering om de recovery van de concentratiestap mee te nemen. Uit de gegevens bleek dat de recovery van de (oö)cysten relatief laag was en een grote variatie vertoonde (Tabel 8). Met de specifieke recovery gegevens (dus gekoppeld aan de individuele metingen) zijn de werkelijk waargenomen (oö)cyst aantallen in het water gecorrigeerd en weergegeven in figuur 5.

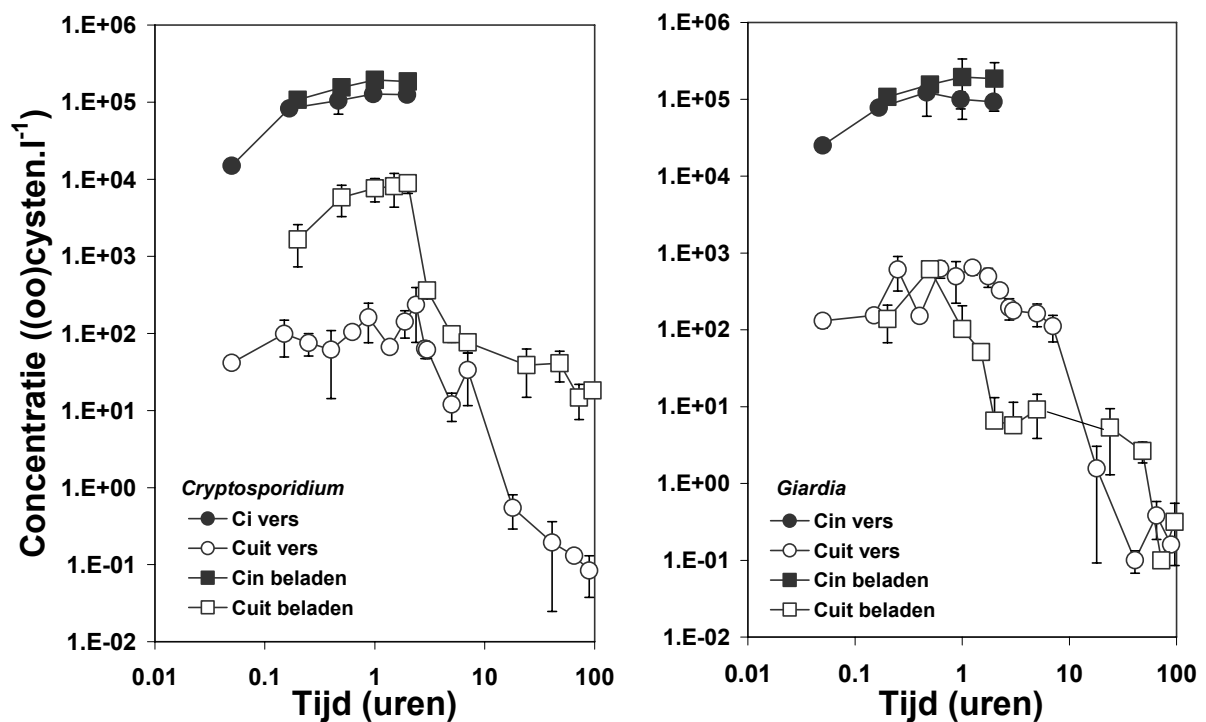
Tabel 8. De recovery percentages van de (oö)cysten bepaling direct bepaald in deelmonsters of bepaald in de hemoflow concentraten (HV)

	<i>Cryptosporidium</i>		<i>Giardia</i>	
	Direct	HV	Direct	HV
Verse kool	13,9±6,0 (5-28)	13,0±13,7 (1-43)	6,6±7,9 (1-12)	7,9±7,1 (2-20)
Beladen kool	13,1±9,2 (3-35)	12,3±5,8 (5-22)	7,4±7,8 (<1-27)	4,1±2,3 (1-8)

Van de gedoseerde micro-organismen werden de beide protozoa *Cryptosporidium* en *Giardia* het sterkst verwijderd door de koolfilters; de duplo kolommen toonden een goed reproduceerbaar beeld. Er werden verschillen waargenomen in de verwijdering tussen beide protozoa onderling en ook tussen de verwijdering van deze organismen door verse en beladen actieve kool. In de verse koolkolommen werden de oöcysten sterker verwijderd dan de cysten (Figuur 5); een DEC_m van 2,7 log voor de oöcysten en een DEC_m van 2,0-2,1 log voor de cysten (Tabel 7).



Figuur 4. Het verloop van de concentratie sporen van *C. bifementans* in influent en effluent van beide kolommen gevuld met verse en beladen akieve kool (foutenbalk = range kolom 1 en 2)



Figuur 5. Het verloop van de concentratie *Cryptosporidium* en *Giardia* (oö)cysten in influent en effluent van beide kolommen gevuld met verse (boven) en beladen (onder) actieve kool (foutenbalk = range kolom 1 en 2)

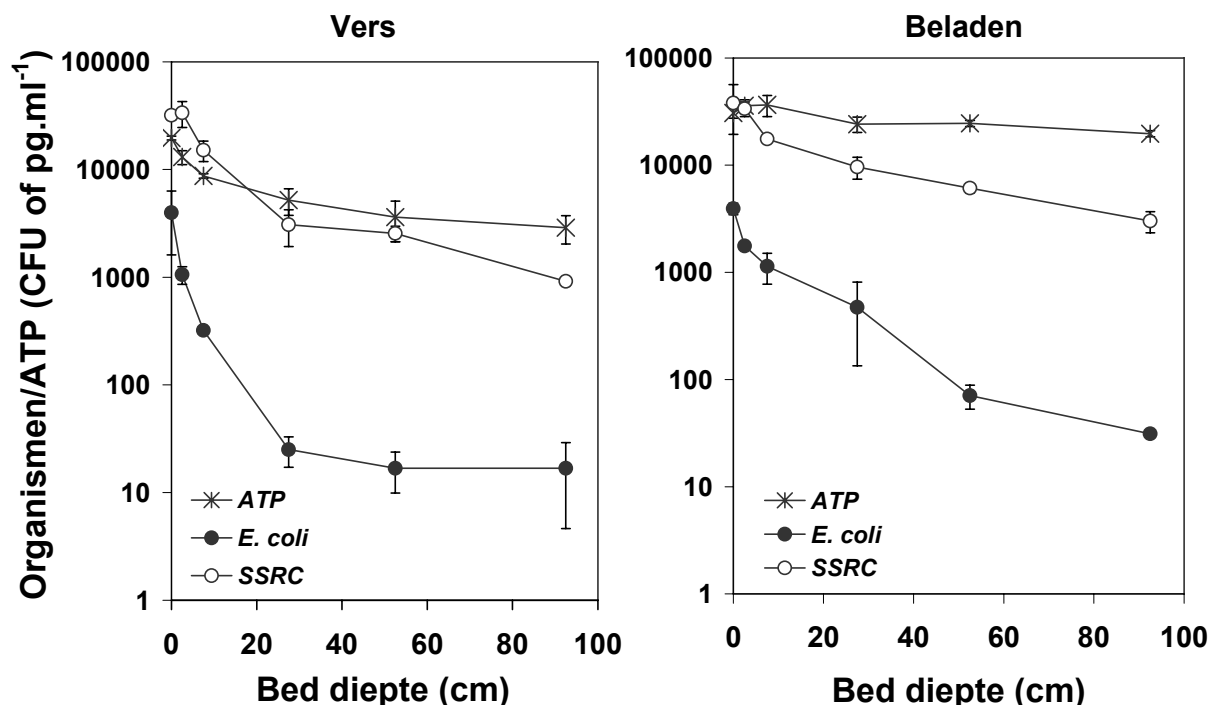
In de beladen kool was het verschil in verwijdering omgekeerd: minder oöcysten verwijdering ($DEC_m = 1,1-1,3 \log$) dan cysten verwijdering ($DEC_m = 2,1 \log$). Een ander opmerkelijk verschijnsel was het verschil in de oöcysten concentratie in de staart van de doorbraakcurven bij de verse en beladen kool (Figuur 5). Bij de beladen kool nam de concentratie duidelijk minder sterk af dan bij de verse kool. Voor de *Giardia* cysten werd een dergelijk verschil niet gevonden en nam de concentratie cysten even sterk af in beide koolsoorten, vergelijkbaar met de afname van oöcysten in de verse kool.

3.4 Micro-organismen in het filterbed

Zeven dagen na de doseerproef zijn uit beide kolommen koolmonsters genomen om de concentratie levende micro-organismen (ATP) in de kool te bepalen en de verdeling vast te stellen van de gedoseerde micro-organismen die in het filterbed zijn verwijderd.

ATP gehalte in de kool

Het gehalte aan actieve biomassa in de verse kool was duidelijk lager dan in de beladen kool (Figuur 6). In het verse koolfilter was het ATP gehalte 1,5 - 2 maal lager dan in het filter met beladen kool en werd een sterkere afname als functie van de bed diepte waargenomen.



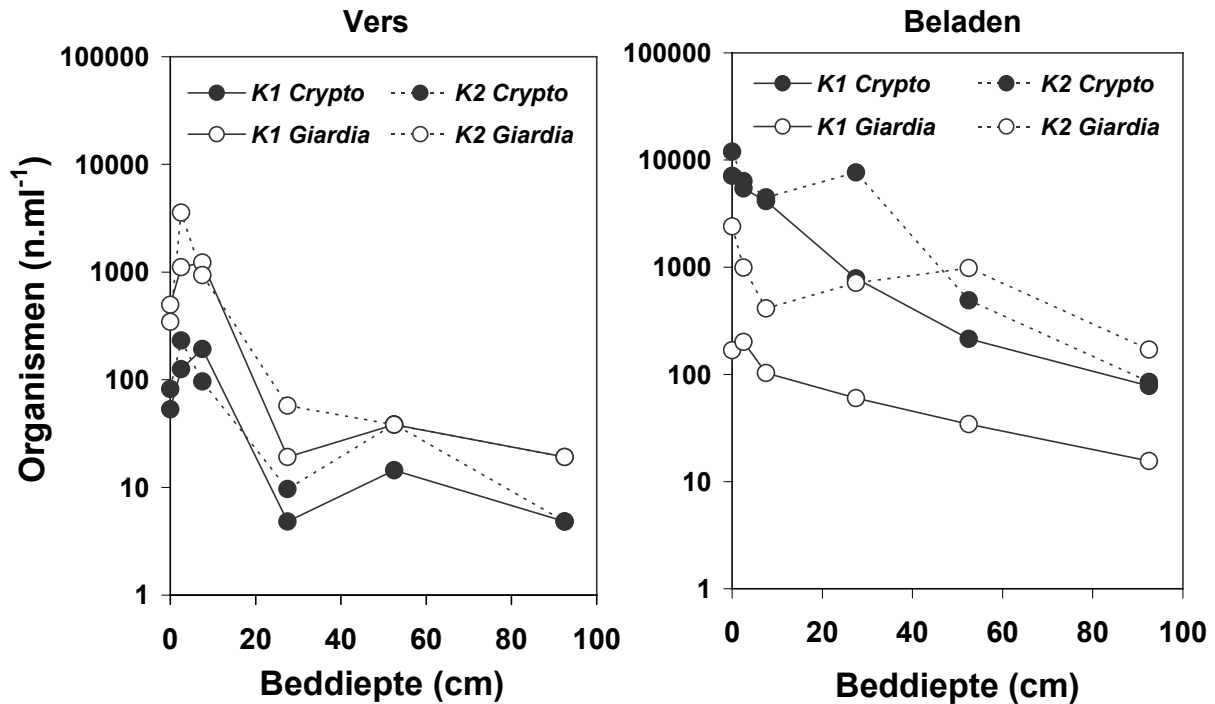
Figuur 6. Het ATP gehalte en concentratie *E. coli* en sporen van *C. bifermentans* in de verse en beladen kool op verschillende diepten (foutenbalk = range van de waarden gemeten in kolom 1 en kolom 2)

Accumulatie van de gedoseerde micro-organismen en verwijderingsmechanismen

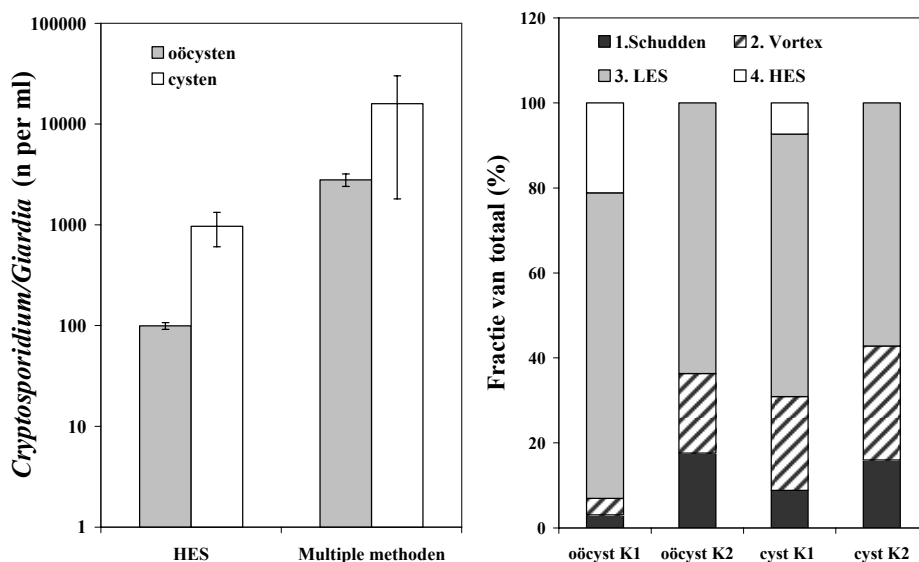
Het aantal *E. coli* bacteriën in de kool was duidelijk lager dan het aantal sporen van *C. bifermentans* bij beide proeven (Figuur 6). Dit komt overeen met de verwachting; de sporen werden op grond van de doorbraakcurven beter verwijderd (Tabel 7) bij eenzelfde beginniveau. Voor beide organismen geldt dat de aantallen in de voorbeladen kool hoger zijn dan in de verse kool.

De gemeten concentraties oöcysten in de verse kool waren lager dan de concentraties oöcysten in de beladen kool (Figuur 7), terwijl de verwijdering in de verse kool groter was (Tabel 7). Met de monsters van de verse kool is een aanvullend onderzoek gedaan naar de invloed van de toegepaste extractiemethode met hoge energetische sonicering (HES), een methode die is geoptimaliseerd voor biomassa metingen aan actieve kool (Magic en Van der Kooij 2004). Koolmonsters van beide kolommen zijn behandeld met diverse extractie methoden met toenemende intensiteit. In de suspensie van de afzonderlijke extracties is het aantal (oö)cysten bepaald. De monsters werden achtereenvolgens

behandeld door hand schudden, een vortex menging, lage energetisch sonicatie (LES) en als laatste de HES sonicatie (alleen bij het monster van kolom 1). Uit de resultaten bleek dat het totaal aantal (oö)cysten bepaald met deze technieken groter was dan bepaald met een intensieve maar enkelvoudige HES behandeling (Figuur 8). Met de LES behandeling werd het grootste aantal (oö)cysten van de kool losgemaakt (63.6±6.1%). De fracties losgemaakt met schudden, vortex en HES (alleen monster van kolom 1) waren duidelijk lager en varieerden van 7 tot 22%.



Figuur 7. De aantallen (oö)cysten van *Cryptosporidium* en *Giardia* in de verse en beladen kool als functie van de beddiepte; verse kool is alleen behandeld met HES en de beladen kool is behandeld met achtereenvolgens handmenging, vortex, LES en HES en de suspensies zijn samengevoegd tot een monster



Figuur 8. Effect van diverse extractie methoden op de concentratie (oö)cysten in twee monsters verse kool; links totaal aantal losgemaakt met HES of de meervoudige extractie (handschudden, vortex, LES en HES) en rechts de fracties (%) van het totaal aantal losgemaakte (oö)cysten

De gegevens gepresenteerd in Figuur 8 vormen een indicatie dat hechting van de (oö)cysten aan de kool een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan de verwijdering. Een mogelijke verklaring voor de relatief lage opbrengst bij een enkelvoudige HES behandeling is een toename van het aantal fijne kooldeeltjes in het monster waardoor de recovery van de opwerkingsmethode met IMS is verlaagd. Op grond hiervan werd voor de monsters van de beladen kool de multiële extractiemethode toegepast om de opbrengst te maximaliseren.

3.5 Massabalans van gedoseerde organismen

Op grond van de totale hoeveelheid micro-organismen die is gedoseerd en de concentraties micro-organismen die in het filtraat en in de kolommen na 1 week zijn waargenomen, zijn berekeningen uitgevoerd om de volgende

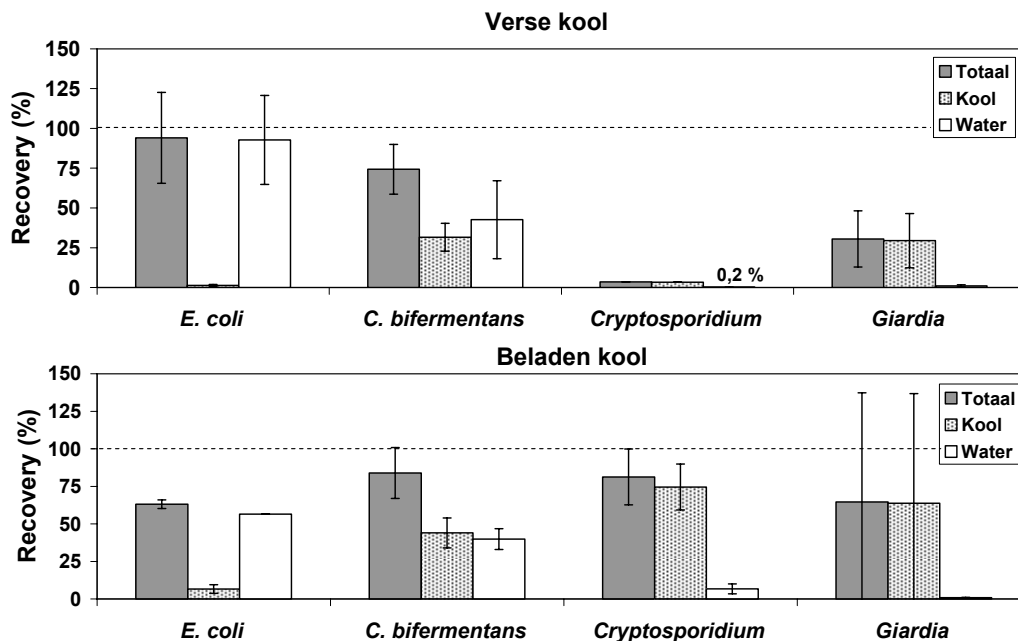
$$M_i = M_f + M_k \quad \text{massabalans te verifiëren:}$$

waarin M_i , M_f en M_k de aantallen micro-organismen zijn die in respectievelijk influent (dosering), filtraat tijdens de doorbraakcurve en actief kool na 1 week zijn berekend met:

$$M_i = t_d \bar{C}_i Q \quad \text{en} \quad M_f = \sum_{i=1}^n t_i Q \frac{C_{f,i} + C_{f,i+1}}{2} \quad \text{en} \quad M_k = \sum M_{l,n} = \sum d_{l,n} A \frac{(C_{l,n} + C_{l,n+1}) \times 10^6}{2}$$

waarin: t_d = doseertijd (uren), Q = volumestroom (l/h), C_i = gemiddelde gemeten concentratie (n/l) in het influent, $C_{f,i}$ = gemeten concentratie (n/l) in het filtraat van het i^e interval van n intervallen in een tijd t_i (uren), $d_{l,n}$ = dikte (m) van de n^e laag van de kolom met lengte l , A = oppervlak van de kolom (m²) en $C_{l,n}$ = concentratie micro-organismen (n/ml) in de n^e laag.

Op basis van de berekende massa's is het percentage gedoseerde micro-organismen berekend dat is teruggevonden in het filtraat tijdens de doorbraakcurve en in de kool 1 week na de dosering (recovery, Figuur 9). De totale recovery (water + kool) bij het experiment met de verse kool was het hoogst voor *E. coli* gevolgd door *C. bifermentans* (respectievelijk 94,1(±28,3) en 74,3(±15,7)%). Het merendeel van de *E. coli* werd teruggevonden in het filtraat, terwijl de teruggevonden fracties sporen in kool en water in dezelfde orde van grootte waren. Omdat MS2 fagen niet werden verwijderd zijn deze niet bepaald in de actieve kool.



Figuur 9. De percentages van de gedoseerde micro-organismen die zijn teruggevonden in het filtraat en de verse en beladen kool van de twee kolommen (foutenbalken, SD)

De recovery van de sporen bij de proef met beladen kool was vergelijkbaar met die van de proef met verse kool. Voor *E. coli* echter was de opbrengst bij de beladen kool lager.

Het recovery percentage van de (oö)cysten was bij het experiment met verse kool beduidend lager dan van de beide indicatorbacteriën; voor *Cryptosporidium* 3,6% en voor *Giardia* 30,5%. Zoals eerder aangegeven is dit het resultaat van een te lage opbrengst bij de concentratiebepaling in de kool veroorzaakt door de extractiemethode (Figuur 8). Bij de beladen kool was de recovery voor de (oö)cysten duidelijk hoger door een hogere concentratie in de kool. De gegevens voor *Giardia* in de kool van kolom 1 waren om onverklaarbare redenen een factor 10 lager dan in kolom 2 (Figuur 7); hierdoor was de spreiding in recovery voor dit micro-organisme erg hoog (Figuur 9).

3.6 De verwijderingsmechanismen in de koolfilters

De mechanismen die verantwoordelijk kunnen zijn voor de verwijdering van de micro-organismen in de filters met actieve kool zijn zeefwerking, hechting/onthechting, afsterving en predatie door hogere organismen. De mate waarin deze bijdragen aan de verwijdering kan verschillen en is afhankelijk van de filtratiecondities. Er is een omvangrijke hoeveelheid literatuur die het transport en de verwijdering van colloïdale deeltjes in korrelige materialen beschrijft op grond van de verschillende mechanismen. In deze studies waarbij meestal gebruik wordt gemaakt van doseringen van deeltjes, zijn de doorbraakcurven en de concentratie profielen in het filtermateriaal de belangrijkste bron van informatie voor het ontrafelen van de verschillende bijdragen. Opheldering van de werkzame verwijderingsmechanismen geeft inzicht in de totale verwijdering in de tijd. Verwijdering door zeefwerking kan als permanent verwijderd worden beschouwd; bij een terugspoeling worden de organismen afgevoerd met het spoelwater. Bij hechting/overleving als mechanisme kan onthechting optreden en reizen de micro-organismen verder door het filterbed. Tot slot kan predatie ook leiden tot een definitieve eliminatie, maar een vertraagde doorbraak is ook mogelijk als de gebonden en niet afgestorven micro-organismen met de hogere organismen in het filtraat van filters worden afgevoerd.

Zeefwerking

Het onderscheiden van de bijdragen van zieving, afvangen in de kleinere poriën van het filter bed, en van hechting is niet eenvoudig en er is nog volop discussie over in de literatuur. In eerste instantie is door Sakthivadivel (1966, 1969) geopperd dat bij een verhouding van deeltjesgrootte van het deeltje (d_p ; micro-organisme) tot de grootte van het filtermateriaal (d_c ; collector) vanaf 0.05 zeefwerking een rol gaat spelen. Door Bradford et al. (2004) werd op grond van kolomproeven een drempelwaarde van deze ratio van 0.005 voorgesteld. Op grond van de ratio's berekend voor de condities in de koolfilters (Tabel 9) kan zeefwerking van de filters als een onbelangrijk verwijderingsmechanisme worden beschouwd voor *Cryptosporidium* en de kleinere micro-organismen. Voor *Giardia* kan zeefwerking wel een rol hebben gespeeld.

Tabel 9a. De parameters behorende bij de zeefwerking en hechting als verwijderingsmechanismen gebaseerd op de waargenomen verwijdering en de gemiddelde korreldiameter van 1,0 mm

	<i>Zeefwerking</i>	<i>Botsingskans</i>	<i>Hechtingskans</i>	
	Grootte; ratio met koolkorrel (μm)	Collector eff. η	Collision efficiency α	
	$d_p; d_p/d_c$	Verse kool	Verse kool	Beladen kool
MS2	0,03; 0,00003	0,0055	nb	nb
<i>E. coli</i>	1,5; 0,0015	0,0005	0,227	1,679
<i>C. bifermentans</i>	1,5; 0,0015	0,0006	2,011	2,042
<i>Cryptosporidium</i>	4,9; 0,0048	0,0014	4,212	2,077
<i>Giardia</i>	10,8; 0,0108	0,0042	1,076	1,245

Tabel 9b. De parameters behorende bij de zeefwerking en hechting als verwijderingsmechanismen gebaseerd op de waargenomen verwijdering en de korreldiameter van 0.55 en 0.65 mm (vers/beladen)

	Botsingskans		Hechtingskans	
	Collector eff. η		Collision efficiency α	
	Verse kool	Beladen kool	Verse kool	Beladen kool
MS2	0,0108	0,0112	nb	nb
<i>E. coli</i>	0,0010	0,0008	0,062	0,570
<i>C. bifermentans</i>	0,0011	0,0008	0,674	0,714
<i>Cryptosporidium</i>	0,0036	0,0027	0,935	0,653
<i>Giardia</i>	0,0108	0,0081	0,242	0,381

Hechting

Om de verwijdering van micro-organismen in filters door hechting modelmatig te beschrijven wordt veelvuldig het colloid filtratie theorie (CFT) model gebruikt dat voor het eerst is beschreven door Yao et al. (1971). De verwijdering gemeten door het bepalen van de doorbraakcurve wordt beschreven met de volgende formule

$$LN \frac{C}{C_0} = -\frac{3(1-\theta)}{2d_c} \alpha \eta L$$

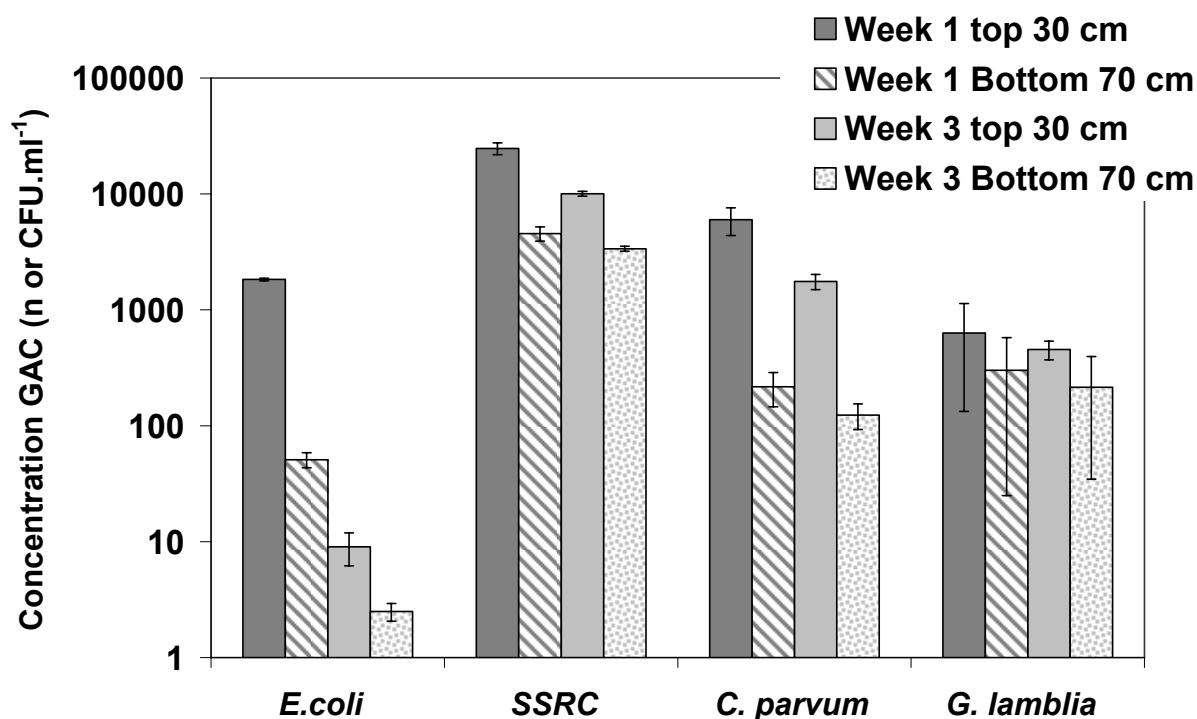
waarin C en C_0 respectievelijk de concentratie (n/l) micro-organismen in het filtraat en het influent zijn, θ de porositeit van het filterbed, d_c de diameter van de collector (kool), α de collision of hechting efficiëntie en η de single-collector contact efficiency (kans om te botsen met de korrel) en L de lengte van de kolom. De η is een factor die bepaald wordt door fysische condities in het filter bed en de fysische eigenschappen van de deeltjes (koolkorrel en de micro-organismen; grootte en dichtheid). De η voor de verschillende micro-organismen is berekend met de geoptimaliseerde vergelijking (Tabel 9) beschreven door Tufenkji en Elimelech (2004); de waarden van de beladen kool weken in zeer geringe mate af door een verschil in watertemperatuur van ca. 4°C. De η waarden waren door de relatief grote korreldiameter d_c van 1.0 mm en de relatief hoge filtratiesnelheid vrij laag, duidelijk lager dan berekend voor de verwijdering van *Cryptosporidium* en *Clostridium* sporen in langzame zandfiltratie (Hijnen et al., 2007a) en bij bodempassage (Hijnen et al. 2005). Door deze lage kans op botsing met de actieve kool is de verwachte verwijdering in de kolommen laag. De kans op hechting is theoretisch niet groter dan 100% ($\alpha = 1.0$). De α -waarden voor de sporen en (oö)cysten waren allen >1.0 in de verse en beladen koolfilters en voor *E. coli* was dat ook het geval voor de beladen kool. Aannemende dat de gebruikte waarden de gemiddelde condities van het hechtingsproces goed beschrijven betekent dit dat de CFT geen goede beschrijving van het verwijderingsproces in de koolfilters is en/of dat naast hechting een ander mechanisme bijdraagt aan de verwijdering. Voor *Giardia* kan dat een aanvullende bijdrage van zeefwerking zijn, maar voor de andere micro-organismen is dat minder waarschijnlijk, zoals hierboven beschreven. Bij de CFT wordt uitgegaan van een uniform bolvormig materiaal. Saiers en Ryan (2005) hebben aangetoond dat de vormfactor van de collector een belangrijke factor kan zijn die de η waarde verandert. Er zijn geen gegevens van de vormfactor. Daarom is gekozen om i.p.v. de gemiddelde koolkorrel grootte de D10 waarde (= effectieve korreldiameter) te gebruiken (Tabel 9b). Wanneer deze waarden worden gehanteerd blijkt de α waarde <1.0 te worden en daardoor meer realistisch.

De concentratieprofielen in de kolommen (Figuur 6 en 7) leveren een onderbouwing voor de bewering dat het CFT model geen goede beschrijving geeft van de verwijdering in de koolfilters. Onder goed geconditioneerde en optimale omstandigheden voor hechting is de hechtingsnelheid van uniforme deeltjes in een kolom met uniforme korrels volgens de CFT theorie constant (Tufenkji en Elimelech, 2004; Tufenkji 2007). Op grond hiervan wordt een exponentiële afname van de gehechte fractie in het filterbed verwacht (rechte lijn in een log-lineaire schaal als gebruikt in figuren 6 en 7). De profielen laten echter allemaal een afwijkend gedrag zien, iets waarvoor diverse auteurs in de literatuur verklaringen hebben gesuggereerd. Belangrijkste verklaring voor de afwijking is de heterogeniteit van natuurlijke systemen en natuurlijk colloïdale deeltjes (Tufenkji en Elimelech 2004, 2005; Tong en Johnson 2007). De condities

van de deeltjes en het filterbed zijn niet constant, waarbij de condities voor hechting (verwijdering) bovenin het filterbed gunstiger zijn dan onderin. Hiervoor zijn twee verklaringen te vinden ten aanzien van het filter. Allereerst is er bovenin een grotere kans op co-aggregatie en zeefwerking doordat daar de grootste concentratie deeltjes in zowel het transporterende medium als ook in het korrelige materiaal aanwezig is. Omdat in dit deel van het filterbed de concentratie assimileerbare organische koolstof ook hoger is, is in dit deel van het filterbed de grootste biologische activiteit te verwachten; deze hypothese wordt bevestigd met het profiel van het ATP gehalte met name in de verse kool en in mindere mate in de beladen kool (Figuur 6); ATP is een maat voor de aanwezigheid van actieve biomassa. Aanwijzingen voor de invloed van biofilms in poreuze media op het transport van colloïdale deeltjes waaronder micro-organismen is gepresenteerd door Morales et al. (2007), echter onder de condities die zij beschrijven valt niet af te leiden of dit werd veroorzaakt door een toename van de hechting of van de zeefwerking. Aannemende dat het alleen om hechting ging, toonden ze een toenemende α -waarde als functie van de looptijd voor de verwijdering van Laponite RD (kunstmatige kleideeltjes) in een filter gevoed met een afbreekbare verbinding (gluconaat) in vergelijking met een steriele filterkolom zonder biofilm. Omdat gelijktijdig ook de weerstand in de kolom toenam (afname hydraulische conductiviteit) valt niet uit te sluiten dat zeefwerking heeft bijgedragen aan de toename in verwijdering. Aanvullend onderzoek is nodig om de invloed van biofilms onder gelijkblijvende weerstand (Figuur 2) op hechting van micro-organismen in filters te bepalen.

Lot van de verwijderde micro-organismen in het filterbed

Op grond van een onderzoek met een zandfilter waaraan gedurende 100 dagen sporen van *C. parfringens* en *Cryptosporidium* oöcysten waren gedoseerd, werd predatie van oöcysten genoemd als oorzaak van een lage en afnemende recovery van deze organismen in het filterbed (Hijnen et al. 2007a). De sporen lijken hier minder gevoelig voor. Om het lot van de gedoseerde micro-organismen in de actieve kool in de tijd te bepalen, zijn de kolommen 2 weken na de eerste bemonstering opnieuw bemonsterd; de filters zijn op 50% van de oorspronkelijke volumestroom bedreven. De aantallen micro-organismen zijn bepaald in een gemengd monster van kool afkomstig van de eerste 30 cm en de laatste ca. 50 cm van het bed. De resultaten van deze metingen zijn vergeleken met de resultaten van de metingen na 1 week filtratie (Figuur 10).

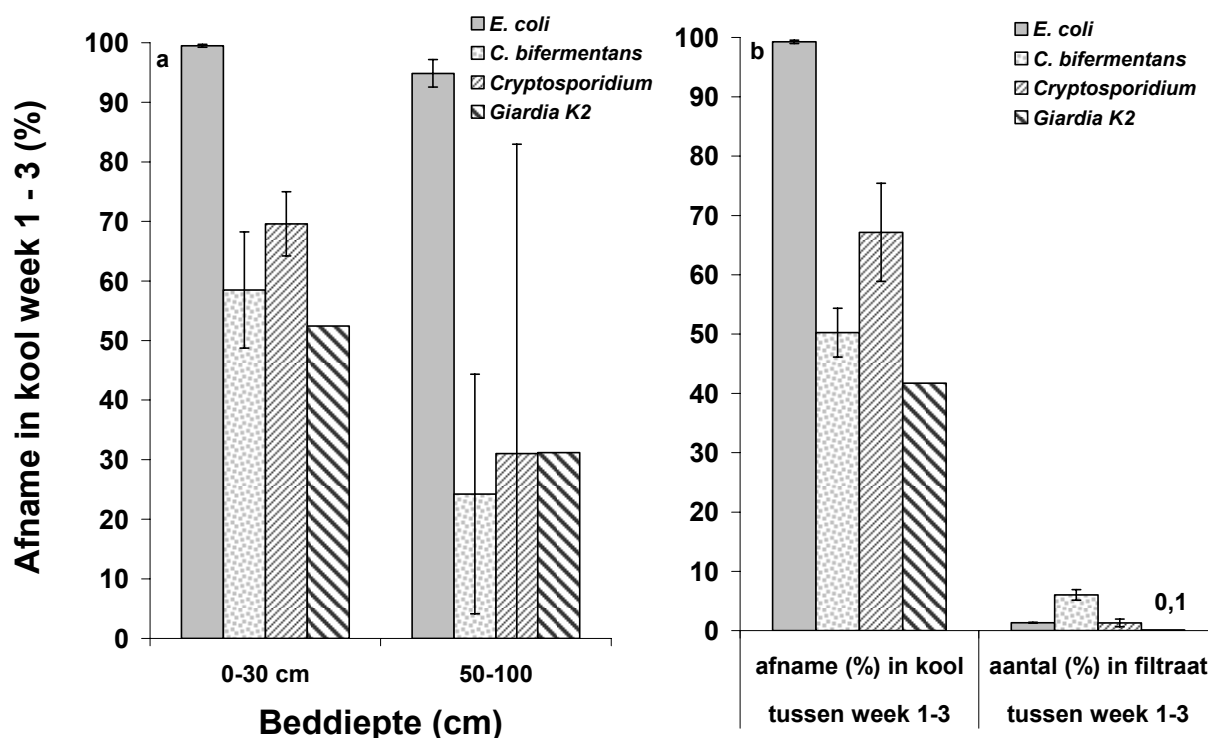


Figuur 10. De concentraties *E. coli*, *C. bifermentans* (SSRC), *Cryptosporidium* en *Giardia* in gemengde koolmonsters van de boven (0-30) en onder laag (50-95) gemeten 1 en 3 weken na de doseerproef

Hieruit blijkt dat voor alle gedoseerde organismen een afname van het aantal in de kool heeft plaatsgevonden. Deze afname is procentueel weergegeven in Figuur 11 en was groot voor *E. coli* (95-99%; Figuur 11a). Het aantal sporen en (oö)cysten in de kool nam af met 20-70%. De sterkste afname is waargenomen in de bovenlaag waar ook de hoogste aantallen zijn gehecht. In Figuur 11b is de afname in het totale filterbed weergegeven en de fractie hiervan die met het filtraat is uitgespoeld tijdens de looptijd van 2 weken tussen beide monsternemingen. Deze fractie organismen die is uitgespoeld is gering (<6%) dus de waargenomen afname heeft een andere oorzaak, bijvoorbeeld afsterving of predatie.

Afsterving

Uit de concentraties van deze profielmetingen is een schatting gedaan van de afstervingsnelheid ($\log.d^{-1}$) in het filterbed. De gemiddelde afsterving van *E. coli* in het filterbed was $0,15 \pm 0,1 d^{-1}$, een waarde die hoger is dan de afsterving in de waterfase tijdens 7 dagen van incubatie bij $15^\circ C$ ($0,113 d^{-1}$; $n=4$). Deze waarde in de waterfase komt overeen met de afstervingsindex waarde van $0,101$ (95% BI; $0,124-0,079$) bepaald in 10 verschillende oppervlaktewatersoorten bij dezelfde temperatuur (Hijnen et al. 2007b). De geschatte afname snelheid van het aantal (oö)cysten en sporen in het filterbed was op grond van de gegevens $0,017 - 0,035 d^{-1}$, hoger dan waargenomen in een langzaam zandfilter ($0,014 d^{-1}$; Hijnen et al., 2007a). Voor *E. coli* is afsterving de voornaamste factor voor de afname van het aantal in het filter bed tussen week 1 en week 3. Omdat de uitspoeling maar voor een klein deel heeft bijgedragen aan de afname van het aantal sporen en (oö)cysten zal voor deze persistente micro-organismen predatie een belangrijke bijdrage hebben gehad in de afname.



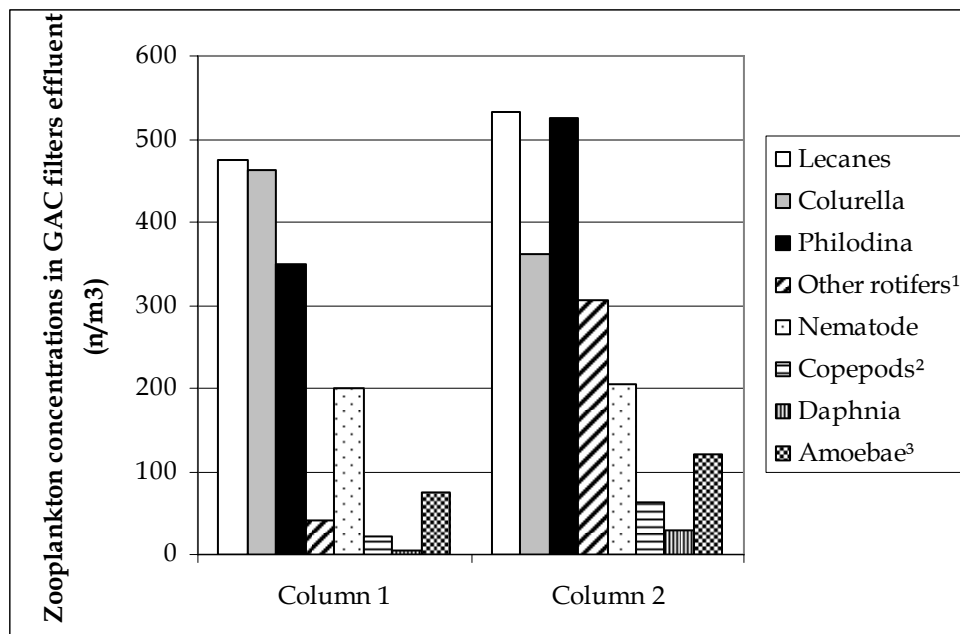
Figuur 11. De procentuele afname van het aantal micro-organismen in de kool bemonsterd na 1 en na 3 weken van filtratie voor de verschillende micro-organismen in de boven- en onderlaag van de kolommen (a) en (b) de geschatte procentuele afname in het totale bed en de fractie (%) hiervan die in hetzelfde tijdsinterval met het filtraat is uitgespoeld (berekend op basis van de laatst gemeten concentraties van de doorbraakcurven, Figuren 3-5)

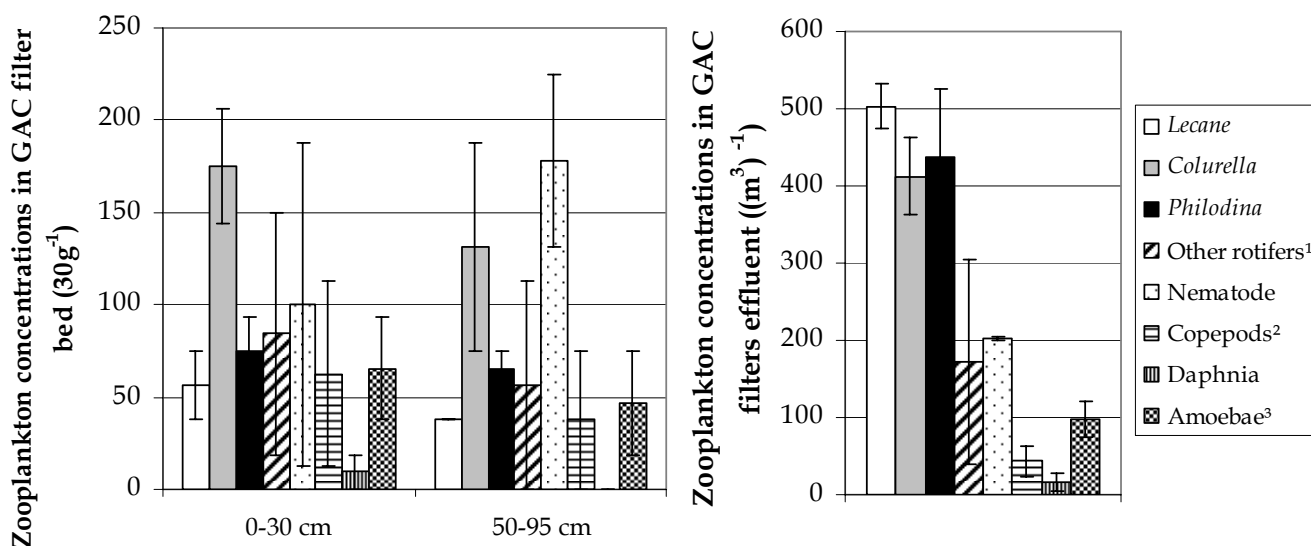
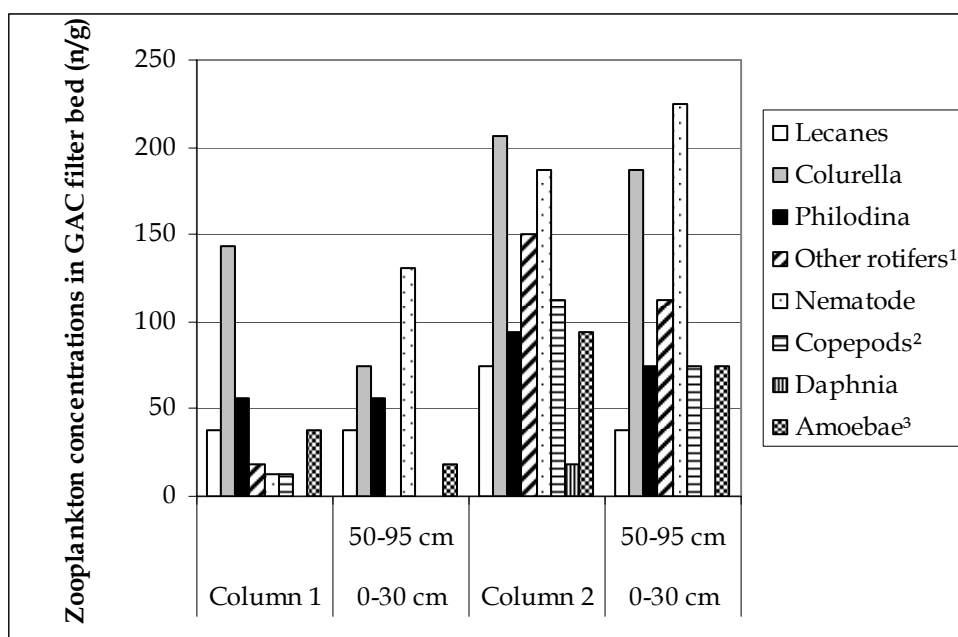
Predatie

Om aan te kunnen tonen dat predatie een rol kan hebben gespeeld in de afname van het aantal (oö)cysten in het filterbed zoals gesuggereerd door Hijnen et al. (2007a), zijn zooplankton monsters genomen van het filtraat van de kolommen voor en na de dosering (week 1 en week 3) en van de koolmonsters van de profielmetingen na 3 weken. Het zooplankton is geanalyseerd op soort en aantal

(Figuur 12). Van de soort *Rotifera* (*Lecane*, *Philodina* en *Colurella* spp.) werden de hoogste aantallen waargenomen in filtraat en filterbed.

De aanwezigheid van “gebonden” (oö)cysten in het zooplankton in het filtraat van beide kolommen is bepaald in organismen die zijn verzameld met een planktonnet van 30 µm uit grote watervolumes van 2,1 – 6,6 m³ 1 en 3 weken na de doseerproef. Met een geoptimaliseerde sonificatie techniek zijn de organismen gedestruëerd en in de vrijgekomen inhoud zijn op de standaardwijze de (oö)cysten bepaald (Bichai et al. 2009). De destructie van de organismen uit het filtraat van kolom 1 was waarschijnlijk minder effectief door een minder effectieve sonificatie dan bepaald in het vooronderzoek (lagere energiewaarde van de sonificatie van <20 – 25 W in plaats van 30 W). In de pellet van deze monsters werden bij de microscopische telling intacte hogere organismen waargenomen en slechts 1 oocyst van *Cryptosporidium*. De destructie van het zooplankton uit de monsters van kolom 2 werd uitgevoerd met de gewenste energiewaarde van 30 W. 1 week na de dosering werden in dit zooplankton van kolom 2 geïsoleerd uit 6,6 m³ filtraat, 9 oöcysten en 2 cysten geteld (respectievelijk 1,4 en 0,3 gebonden (oö)cysten per m³). In het zooplankton bemonsterd na 3 weken werd een hogere concentratie gebonden protozoa geteld van 64,5 oöcysten en 32 cysten per m³. Dit duidt op een toegenomen aantal (oö)cysten in het filtraat die opgenomen zijn door zooplankton in het filterbed. Hierbij moet worden aangetekend dat deze waarnemingen zijn gedaan bij een relatief lage watertemperatuur van ca. 10°C en dus vermoedelijk bij een lage predatie activiteit.

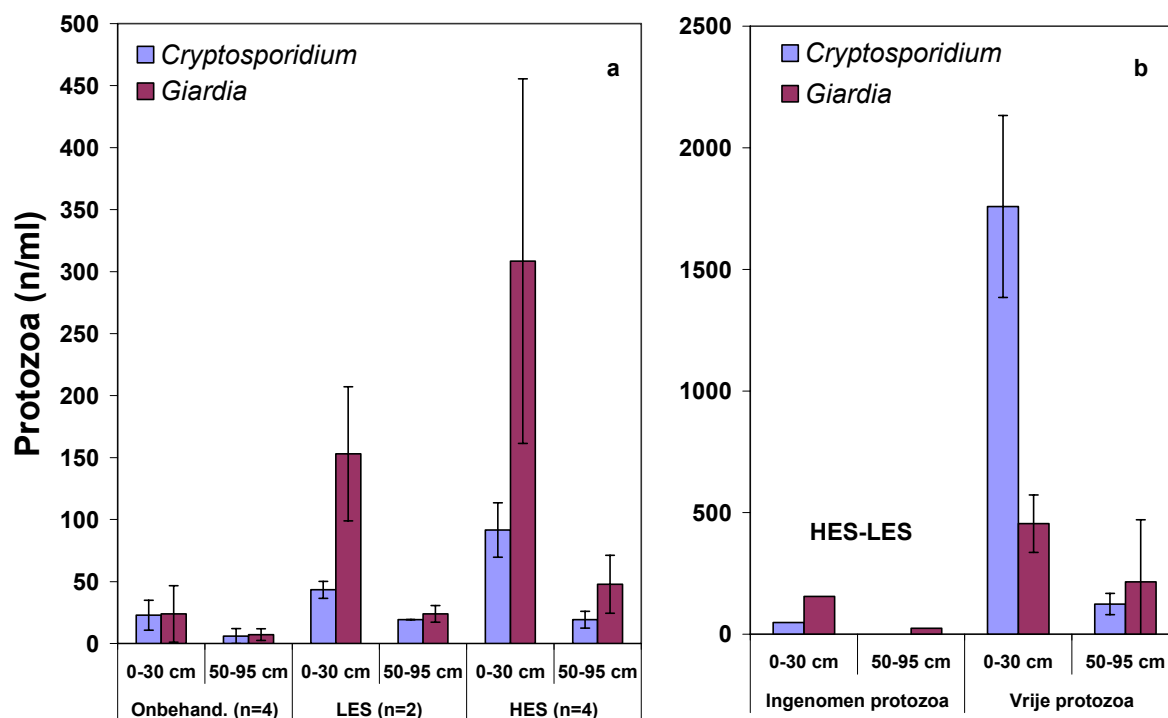




Figuur 12. Zooplankton (soorten en concentraties) in het filter en het effluent (gemiddelde aantallen; error bars spreiding tussen de twee filters; ¹*Brachionus, Trichocerca, Bosmina, Polyarthra, Asplancha, Testudinella*; ²*Harpaticoida, nauplii, others*; ³*Testacea, Euglypha*)

Met het zooplankton geïsoleerd uit de koolmonsters (40 gram) van de profielbepaling van de beladen kool na 3 weken werden destructieproeven uitgevoerd om de aanwezigheid van opgenomen (oö)cysten aan te kunnen tonen (alle gegevens gecorrigeerd voor de recovery van de IMS methode vermeld in Tabel 8). De kool bevatte een relatief hoog aantal vrije (oö)cysten (Figuur 10). Om de ingenomen (oö)cysten te kunnen onderscheiden van de vrije (oö)cysten is de suspensie bepaald met en zonder destructie van zooplankton met HES. Omdat het aantal vrije (oö)cysten in de verzamelde monsters hoog was en er ook kooldeeltjes in werden waargenomen is de analyse een tweede maal uitgevoerd waarbij de monsters met LES zijn behandeld om het maximale aantal vrije protozoa te kunnen bepalen. Uit de resultaten bleek dat er een duidelijk hoger aantal (oö)cysten werd gevonden na destructie met HES (Figuur 13a); dit betekent dat er (oö)cysten “gebonden” cq. opgenomen zijn in het zooplankton aanwezig in het filterbed. Het verschil tussen het aantal (oö)cysten na LES (maximaal aantal vrije (oö)cysten) en dat het aantal na HES wordt beschouwd als het aantal gebonden (oö)cysten. Dit aantal per ml kool is relatief laag in

vergelijking tot het totaal aantal vrije (oö)cysten dat direct is bepaald (Figuur 13b). *Giardia* cysten lijken in hogere aantallen gebonden aan het zooplankton voor te komen dan de oöcysten van *Cryptosporidium*. Uit de resultaten van de zooplankton analyse uit de koolfilters en het filtraat zou de conclusie kunnen worden getrokken dat predatie weliswaar optreedt in het filterbed en kan resulteren in verder transport naar de effluentzijde van het filter, maar dat de waargenomen afname van de aantallen in het filterbed tussen week 1 en 3 niet door predatie alleen kan worden verklaard. Deze conclusie is gebaseerd op de veronderstelling dat de opbrengst van de voor predatie relevante zooplankton monsters hoog is geweest en dat de in de zooplankton aanwezige (oö)cysten homogeen verdeeld zijn in het zooplankton. Dit is echter moeilijk vast te stellen en vereist verder onderzoek. De gegevens moeten dan ook worden gezien als een sterke indicatie voor het optreden van het fenomeen van predatie en verder transport en niet als een kwantitatief bewijs voor de afname van het aantal (oö)cysten in de koolfilters tussen de monsterneming na 1 en 3 weken. Aangezien de (oö)cysten niet door de predatoren worden verteerd (ze zijn als goed te tellen deeltjes teruggevonden) blijft het proces van predatie in het filter van deze persistente organismen alleen te verklaren op basis van een niet selectieve activiteit. Uit de gegevens is een schatting gemaakt van het percentage (oö)cysten dat door zooplankton opname in het filterbed aanwezig is (Bichai et al. 2009). Dit percentage van het totaal aanwezige oöcysten is laag nl. ca. 1% en voor de cysten hoger nl. 5-17%. Een dergelijke schatting is ook gedaan voor gegevens verzameld over het aantal in zooplankton aanwezige (oö)cysten in het effluent en deze gegevens lijken aardig overeen te komen met de schattingen in het filterbed: $\leq 1\%$ voor *Cryptosporidium* en maximaal 30% voor *Giardia*. Het fenomeen lijkt dan ook voor *Cryptosporidium* van minder belang dan voor *Giardia* (Bichai et al., 2009).



Figuur 13. Aantal vrije (onbehandeld en na LES) en totale aantal (na HES) (oö)cysten in de zooplankton suspensies geïsoleerd van de actieve kool na 3 weken (a) en (b) het aantal gebonden (oö)cysten in vergelijking tot het aantal direct gemeten (oö)cysten op de kool

4 Nadere evaluatie van de resultaten

4.1 De Decimale Eliminatie Capaciteit van actieve koolfiltratie

De in dit onderzoek gevonden resultaten voor de verschillende micro-organismen zijn vergeleken met de gegevens die eerder zijn verzameld in een literatuuronderzoek (Hijnen en Medema, 2007).

Virusverwijdering

Op grond van de doseerproef met MS2 fagen in de kolommen met actieve kool is er geen substantiële verwijdering te verwachten van virussen in actieve koolfilters onder de praktijkcondities van Evides (Tabel 10). Het belangrijkste verwijderingsmechanisme voor virussen en fagen is hechting en de condities voor dit proces zijn ongunstig in actieve kool. De hoge pH van het water van 8 kan hierbij een rol spelen als de lage verwijdering wordt veroorzaakt door een negatieve lading van de actieve kool (electrostatistische repulsie door een sterke negatieve lading van MS2). MS2 fagen kunnen hechten aan de F400 kool volgens een eerder onderzoek (Powell et al. 2000) waarin gekeken is naar de adsorptie in batchproeven met intensief contact. Bij dit onderzoek werd ook een kolomproef uitgevoerd met MS2 fagen gesuspenseerd in een fosfaat gebufferde zoutoplossing met een pH van 7,4. Er werd een verwijdering van 0,5-1,0 log gemeten bij een snelheid van 0,9 m/h en een contacttijd van 6 minuten. Het ging bij dit onderzoek om een beperkte laboratorium kolomproef waar de verwijderingsgegevens afkomstig waren van een onvolledige doorbraakcurve.

Dat fagen en virussen in beperkte mate verwijderd worden in actieve koolfilters blijkt uit een beperkt aantal aanvullende studies samengevat in Tabel 11; erin wordt de kwantitatieve verwijdering die werd waargenomen onder verschillende condities samengevat. Scott et al. (2002) vond een verwijdering van MS2 fagen van 0,3 log bij een relatief korte contacttijd. In deze studie werd de zeta-potentiaal van de koolsoort bepaald op -2,6 mV. Wanneer de kool wordt gecoat met ijzerchloride neemt de zeta-potentiaal toe tot +24,8 mV en ook de verwijdering (1-2 log; waarden niet realistisch voor actieve kool zonder coating). De verwijdering van een *Salmonella* faag 28B in een koolfilter met een relatief lange contacttijd van 30 minuten was eveneens laag (Persson et al. 2005). In een wat oudere studie van Guy et al. (1977) werd ook een beperkte verwijdering ($\leq 0,7$ log) van faag T4 en poliovirussen in koolfilters waargenomen. In deze studie werd een lagere verwijdering gevonden in de metingen korter (2-3 dagen) na een spoeling dan in de metingen uitgevoerd meer dan 7 dagen na een spoeling. Dit wijst op een invloed van de biologie. De gegevens van de huidige studie onderbouwen deze waarneming niet. Kwantitatieve gegevens over de verwijdering van natuurlijke fagen door koolfilters ontbreken in dit overzicht (niet gevonden in de literatuur).

Tabel 11. Verwijdering van fagen en virussen door actieve koolfilters gemeten in dit onderzoek vergeleken met literatuurgegevens gerangschikt naar toenemende verwijdering (uit Hijnen en Medema, 2007)

Auteurs	Organismen ^a	Water		Filtratie ^b		DEC ^d	
		pH	Temp. (°C)	Rate-diepte-HRT-d50 (m/h-m-min.-mm)	Spoel ^c (wk)	Gem. (log)	n
Hijnen 2008	MS2	8	10-15	5,0-1,0-12-1,0	ns ^e	0,0±0,0	4
Persson 2005	Salm. ph. 28B	7,1	1,5-20	1,9-1,0-30-ni ^e	3	0,2	1
Scott 2002	MS2	ni	ni	3,6-0,5-8,3-(0,5-0,85) ^f	Ns	0,3	2
Guy 1977	T4	ni	ni	ni-ni-34-ni	Ni	0,5±0,2	7
Guy 1977	Polio	ni	ni	ni-ni-34-ni	Ni	0,7±0,3	2
Powell 2000	MS2	7,4	ni	0,9-0,09-6-1,0	Ns	(0,5-1,2) ^g	

^a verschillende fagen en poliovirus; ^b Rate = snelheid; HRT = hydraulische retentie tijd; d50 = korrelgrootte 50-percentiel; ^c terugspoel frequentie (weken); ^d decimale eliminatie capaciteit; gemiddelde (\pm SD) van n aantal waarnemingen; ^e ni = geen informatie en ns = geen spoeling; ^f zeefmaat; ^g range tijdens doorbraakcurve

Uit bovenstaande gegevens blijkt dat koolfilters, ondanks hun functie als adsorptie filter, geen substantiële bijdrage leveren aan de verwijdering van virussen in de zuivering in vergelijking met processen als coagulatie/snellfiltratie (conventionele zuivering), desinfectie en langzame zandfiltratie.

Hierbij dient te worden aangetekend dat de in Tabel 10 opgenomen gegevens afkomstig zijn van gedoseerde virussen of fagen. Uit de verwijderinggegevens van de indicatorbacteriën blijkt dat de natuurlijk voorkomende indicatorbacteriën beter werden verwijderd dan de gedoseerde vertegenwoordigers van deze groep. Een mogelijke verklaring hiervoor is een verschil in oppervlakte eigenschappen: de natuurlijke indicatorbacteriën zijn voorbehandeld met coagulatie (FeCl_3) en de gedoseerde organismen niet. Deze voorbehandeling kan ook voor de virussen en fagen een positief effect hebben op de verwijdering in koolfilters.

Bacteriën en bacterie sporen

De resultaten van de doseerproef geven aan dat bacteriën enigszins beter door koolfilters worden verwijderd dan virussen. Opmerkelijk was de hogere verwijdering van natuurlijke *E. coli* bacteriën in vergelijking tot de in het laboratorium opgekweekte stam (Tabel 11). Deze stam is opgekweekt onder substraat arme condities en is gedoseerd na een standtijd van enkele weken. Reeds eerder zijn aanwijzingen gevonden dat deze *E. coli* stam WR1 opgekweekt onder substraatarme condities minder goed wordt verwijderd in filters dan (i) natuurlijke *E. coli* bacteriën en (ii) dezelfde *E. coli* stam WR1 opgekweekt in peptonwater (rijk medium) en direct gebruikt voor dosering aan kolommen met zand uit langzame zandfilters (Hijnen et al. 2004). Mogelijke oorzaken voor dit verschil in verwijdering van de verschillende *E. coli* bacteriën zijn verschillen in grootte en oppervlakte eigenschappen, veroorzaakt door bijvoorbeeld coagulatie en/of hechting aan deeltjes onder natuurlijke condities of condities in de zuivering (coagulatie).

Op grond van aanvullende gegevens over de verwijdering van natuurlijke Coli44 bacteriën vermeld in tabel 11 valt er van actieve koolfiltratie een verwijdering van ca. 90% (= 1 log) te verwachten. Voor de risicoanalyse worden de gegevens van *E. coli* (procesindicator; PI) direct vertaald naar de verwijdering van *Campylobacter* (indexpathogeen; IP). Uit eerder onderzoek is gebleken dat dit voor de langzame zandfiltratie een veilige benadering is (IP/PI-ratio >1,0; Hijnen et al., 2004; Dullemeijer et al. 2006). Op grond van een uitgebreidere evaluatie (Hijnen, 2009) blijkt dat de IP/PI-ratio voor snelfiltratie echter $\leq 1,0$ is. Dit geldt waarschijnlijk ook voor actieve koolfilters die onder vergelijkbare hydraulische condities worden bedreven. Dit kan alleen door een aanvullende doseerproef worden aangetoond.

Tabel 11. Verwijdering van indicatorbacteriën (gedoseerde of natuurlijke) door actieve koolfilters gemeten in dit onderzoek vergeleken met literatuurgegevens gerangschikt naar toenemende verwijdering (uit Hijnen en Medema, 2007)

Auteurs	Organismen ^a	Water		Filtratie ^b		DEC ^d	
		pH	Temp. (°C)	Rate-depth-HRT-d50 (m/h-m-min.-mm)	Spoel ^c (wk)	Gem. (log)	n
Hijnen 2008	<i>E. coli</i> lab.	8	10-15	5,0-1,0-12-1,0	ns ^e	0,2±0,2	4
Gray 1997	Coli44 env.	ni	ni ^e	1,4-4,0-34-1,0	ni	0,5±0,2	7
Hijnen 2008	Coli44 env.	8	10-15	5,0-1,0-12-1,0	ns	0,8±0,3	8
Hijnen 1998b	Coli44 env.	ni	ni	3,5-2,2-40-1,6	<1	0,8±0,2	3
Hijnen 1998e	Coli44 env.	ni	ni	10,0-3,0-20-1,0	1	0,9±0,2	2

^a *E. coli* lab. = voorgekweekte bacteriën; Coli44 env. = natuurlijke thermotolerante bacteriën van de coligroep; ^b Rate = snelheid; HRT = hydraulische retentie tijd; d50 = korrelgrootte 50-percentiel; ^c terugspoel frequentie (weken); ^d decimale eliminatie capaciteit; gemiddelde (\pm SD) van n aantal waarnemingen; ^e ni = geen informatie en ns = geen spoeling

In tabel 12 zijn de DEC-waarden van actieve koolfilters voor bacteriesporen (voornamelijk anaerobe sporen, SSRC) vermeld. Deze waarden variëren van 0,1 tot 1,4 log en worden gebruikt om de verwijdering van de indexpathogenen *Cryptosporidium* en *Giardia* te bepalen. De laagste DEC van 0,1 log is afkomstig van een langlopend pilot plant onderzoek te Zevenbergen waar sprake was van een verlaging van de verwijdering door een lage spoelfrequentie en accumulatie (Hijnen et al. 1997). De beperkte gegevens over de verwijdering van aerobe sporen (ARS) laten zowel een lage als een hoge verwijdering zien. De opgekweekte sporen van *Clostridium bifermentans* in het onderhavige onderzoek werden in beperkte mate verwijderd, minder dan de natuurlijke sporen van sulfiet-reducerende

clostridia (SSRC) waartoe deze *C. bifermentans* behoort (tabel 12). Dit verschil komt overeen met de waarneming voor de *E. coli* bacteriën en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door dezelfde gesuggereerde verschillen tussen gedoseerde en natuurlijke organismen (grootte, oppervlakte eigenschappen).

Deze gegevens tonen aan dat de verwijdering van sporen door koolfiltratie met een variabele spoelfrequentie sterk kan variëren. Zonder actuele bedrijfsgegevens is het dan ook moeilijk om de DEC van actieve koolfilters voor deze micro-organismen te voorspellen. Op grond van de gegevens verzameld in dit onderzoek kan worden gesteld dat deze PI niet geschikt is om de verwijdering van pathogene protozoa door actieve koolfiltratie te bepalen. De in dit onderzoek gevonden IP/PI-ratio was duidelijk >1,0 namelijk 2,5 gebruikmakend van de DEC voor de natuurlijke SSRC, en 5 gebruikmakend van die voor de gedoseerde *C. bifermentans*. Geconcludeerd kan worden dat deze sporen geen goede PI zijn voor de pathogene protozoa.

Tabel 12. Verwijdering van bacterie sporen (gedoseerd of natuurlijke sporen) door actieve koolfilters gemeten in dit onderzoek vergeleken met literatuurgegevens gerangschikt naar toenemende verwijdering

Auteurs	Organismen	Water		Filtratie ^a		DEC ^c	
		pH	Temp. (°C)	Rate-depth-HRT-d50 (m/h-m-min.-mm)	Spoel ^b (wk)	Gem. (log)	n
Hijnen 1994	SSRC env.	ni ^d	Ni	7,1-2,4-20-1,4	2-3	0,1±0,4	23
Rice 1996	ARS env.	ni	Ni	ni-ni-ni-ni	ni	0,3±0,4	4
Gray 1997	ARS env.	ni	Ni	1,4-4,0-34-1,0	ni	0,3±0,3	4
Hijnen 2008	<i>C. biferm.</i> lab.	8	10-15	5,0-1,0-12-1,0	ns ^d	0,4±0,2	4
Hijnen 1998a	SSRC env.	ni	Ni	13,0-8,0-40-ni	<1-4	0,4±0,1	3
Hijnen 1998e	SSRC env.	ni	Ni	10,0-3,0-20-1,0	1	0,5	1
Hijnen 1998b	SSRC env.	ni	Ni	3,5-2,2-40-1,6	<1	0,6±0,3	9
Hijnen 2008	SSRC env.	8	10-15	5,0-1,0-12-1,0	ns ^d	0,8±0,3	8
Hijnen 1998b	SSRC env.	ni	Ni	7,0-2,5-43-Norit	<1	1,0±0,4	6
Hijnen 1998c	SSRC env.	ni	Ni	9,4-1,1-7-1,0	ni	1,1±0,4	2
Gray 1997	ARS env.	ni	Ni	1,4-4,0-34-1,0	ni	1,4±0,4	8

^a HRT = hydraulische retentie tijd; d50 = korrelgrootte 50-percentiel; ^b terugspoel frequentie (weken); ^c decimale eliminatie capaciteit; gemiddelde (±SD) van n aantal waarnemingen; ^d ni = geen informatie en ns = geen spoeling

Cryptosporidium en Giardia

De resultaten van het huidige onderzoek tonen een efficiënte verwijdering van (oö)cysten door actieve koolfilters (Tabel 13). De DEC-waarde van een koolfilter van 1 m met een contacttijd van 12 minuten voor beide organismen is ca. 2 log en hoger dan de DEC-waarden gerapporteerd door Patania et al. (1995). Alleen voor *Giardia* werd door Logsdon et al. (1985) een hogere DEC waarde bepaald. Opmerkelijk is dat de hoge verwijdering van de protozoa is waargenomen in de twee studies met de laagste filtratiesnelheid.

Tabel 13. Verwijdering van pathogene protozoa door actieve koolfilters gemeten in dit onderzoek vergeleken met literatuurgegevens gerangschikt naar toenemende verwijdering

Auteurs	Organismen	Water		Filtratie ^a		DEC ^c	
		pH	Temp. (°C)	Rate-diepte-HRT-d50 (m/h-m-min.-mm)	Spoel ^b (wk)	Gem. (log)	n
Patania 1995	<i>Giardia</i>	6	7	12,0-1,5-7,5-1,0	ni ^d	0,4±0,3	3
Patania 1995	<i>Crypto</i>	7-8	19-24	18,0-1,1-4,0-1,3	ni	1,1±0,8	7
Patania 1995	<i>Giardia</i>	7-8	19-24	18,0-1,1-4,0-1,3	ni	1,3±0,6	7
Hijnen 2008	<i>Crypto</i>	8	10-15	5,0-1,0-12-1,0	ns ^d	2,0±0,9	4
Hijnen 2008	<i>Giardia</i>	8	10-15	5,0-1,0-12-1,0	ns ^d	2,1±0,1	2
Lodgsdon 1985	<i>Giardia</i>	7-7,5	Ni	6,8-0,8-7,2-0,6	Ni	3,3±0,3	6

^a Rate = filtratiesnelheid, HRT = hydraulische retentie tijd; d50 = korrelgrootte 50-percentiel; ^b terugspoel frequentie (weken); ^c decimale eliminatie capaciteit; gemiddelde (±SD) van n waarnemingen; ^d ni = geen informatie en ns = geen spoeling

4.2 Vertaling van de gegevens naar de praktijk

De hierboven getoonde informatie over verwijdering van micro-organismen door actieve koolfilters is voornamelijk afkomstig van studies die qua condities afwijken van de praktijkcondities. Het gaat meestal om doseerproeven in laboratorium opstellingen of proefinstallaties. De voorspellende waarde van lab-opstellingen voor verwijdering onder praktijkcondities is beperkt en moet als indicatief worden gezien. De gegevens van proefinstallaties bedreven onder condities van de locatie (natuurlijke omstandigheden) zijn het meest voorspellend (Hijnen, 2009). In het onderhavige onderzoek is deze laatste optie zoveel als mogelijk benaderd door de opstelling te vullen met de koolsoort F400 die door het waterleidingbedrijf wordt gebruikt, deze te voeden met praktijkwater (na coagulatie/snelfiltratie), de hydraulische condities uit de praktijk zo goed als mogelijk na te bootsen door de vulling van de filters uit te voeren conform de praktijkfilters en de filtratiecondities te kiezen die de praktijk benaderen. Verder is een vergelijking gemaakt met de verwijdering van de natuurlijke indicatorbacteriën om de te vergelijken met de gedoseerde micro-organismen. Hieruit kwam naar voren dat met de gegevens van de gedoseerde organismen een veilige beschrijving kan worden gegeven van de verwijderingscapaciteit van actieve koolfilters; de verwijdering van de natuurlijke micro-organismen was hoger dan de verwijdering van de gedoseerde micro-organismen. De reden is waarschijnlijk de invloed van de voorbehandeling op de staat waarin de micro-organismen verkeren als ze de koolfiltratie binnenstromen. In het licht van deze conclusie valt er, ondanks de DEC waarden van 0,0 log voor gedoseerde MS2 fagen, toch nog enig effect van het proces te verwachten voor natuurlijke virussen of fagen die zijn voorbehandeld met coagulatie. Dit zou door verdere proeven moeten worden vastgesteld.

Koolsoort

In dit onderzoek is de Chemvicon kool onderzocht met de kleinste diameter (F400). Bij andere productielocaties worden andere koolsoorten gebruikt. Het is onduidelijk van hoeveel invloed de koolsoort is op de verwijderingscapaciteit.

Filtratiecondities

Uit het beperkte overzicht van de verwijdering van de protozoa komt een aanwijzing dat de verwijdering wordt beïnvloed door de filtratiesnelheid. De snelheid die in het huidige onderzoek is toegepast, is lager dan de snelheid bij de praktijkfilters (factor 2). Dit roept de vraag op of en in welke mate de verwijdering in praktijkfilters met hogere snelheid lager is.

Involed van de ouderdom van de kool

De ouderdom (uitgedrukt in aantal bedvoluminen filtratie) van actieve kool bepaalt de adsorptiecapaciteit. Door de intensieve biologische processen zullen de oppervlakte eigenschappen van de actieve kool veranderen. Met name de biologische condities zullen wijzigen en variëren. Daarom is in het onderzoek gebruik gemaakt van zowel verse (begin van de levensduur) en als beladen (na 40.000 bedvoluminen, ongeveer eind van de looptijd) kool. Hiervan is met ATP metingen het verschil in biofilm aangetoond. Uit de resultaten kwam naar voren dat de ouderdom een effect had op de verwijdering maar niet voor alle onderzochte organismen en niet in dezelfde mate. Alleen voor *E. coli* nam de verwijdering met 0,3 - 0,5 log toe. Voor *Cryptosporidium* werd een verlaging van de verwijdering geconstateerd van 2,7 log in de verse kool tot 1,2 log in de beladen kool. De verwijdering van de sporen van *C. bifermentans* en cysten van *Giardia* werden in de verse en beladen kool met ongeveer dezelfde capaciteit verwijderd. Voor dit verschil in gedrag tussen de oöcysten enerzijds en de cysten en sporen anderzijds moet nog een verklaring worden gevonden door uitvoering van verder onderzoek. Dit is van belang voor de vertaling naar de praktijk.

Lot van de verwijderde micro-organismen: involed van spoeling, afsterving en predatie

Het lot van de verwijderde micro-organismen in de koolfilters hangt af van de spoeling van het filterbed (afvoer) en van afsterving en predatie in het filterbed.

Spoeling. Een belangrijk aspect dat in het huidige onderzoek niet is meegenomen is de invloed van de spoeling van de kool. Er zijn relatief veel gegevens beschikbaar over de verwijdering van anaerobe sporen (SSRC) door praktijkfilters onder natuurlijke condities met spoeling en variabele looptijden. Deze gegevens laten een fluctuatie van de capaciteit zien waarvan eerder is vastgesteld dat ophoping en vertraagd transport de mogelijke oorzaak is (Hijnen et al., 1997). Dit aspect zal voor de

andere organismen ook spelen. De gegevens in dit onderzoek zijn verzameld met een statisch filterbed zonder spoeling. Het is dan ook aan te bevelen om met een duurproef in terugspoelbare koolfilters een aanvullend onderzoek uit te voeren om vast te stellen wat het effect hiervan is op de verwijderingscapaciteit zoals die in dit onderzoek is bepaald.

Afsterving en predatie. Het risico van vertraagde doorbraak van verwijderde micro-organismen wordt bepaald door het optreden van afsterving en predatie in het filterbed. Vanwege de hogere persistente is voor micro-organismen als de sporen en (oö)cysten van *Cryptosporidium* en *Giardia* is het aspect van predatie van belang, te meer omdat gegevens van hydrobiologisch onderzoek aantonen dat hogere organismen die in het filterbed worden gevonden ook in het filtraat voorkomen. Uit het huidige onderzoek komen aanwijzingen dat dit fenomeen een rol kan spelen bij verder transport van in de filters verwijderde micro-organismen. Deze resultaten wijzen op een betrekkelijk geringe bijdrage van dit fenomeen aan de concentratie van oöcysten in drinkwater terwijl dat voor de cysten wat groter was. Het aantal waarnemingen was echter te gering om harde uitspraken hierover te doen.

Vertaling naar de praktijkfilters.

Op basis van de gevonden resultaten is een schatting gemaakt van de te verwachten verwijdering van bacteriën en protozoa door de praktijkfilters. Een eerste schatting (i) volgt uit de toepassing van het CFT model waarbij van de volgende aannames zijn gedaan: alle verwijdering vindt plaats door irreversibele hechting; de berekende hechtingsefficiëntie α is onafhankelijk van de filtratiesnelheid binnen de variaties geldend voor de proef- en praktijkfilters; en de schatting geldt alleen voor dezelfde temperaturen als de proeven zijn uitgevoerd. Een andere schatting (ii) volgt uit een door Yao et al. (1972) voorgestelde invloed van de filtratiesnelheid op de verwijdering: DEC is proportioneel met $V^{-2/3}$. Bij deze schatting is tevens aangenomen dat de DEC evenredig toeneemt met de bedhoogte.

De geschatte DEC waarden voor de praktijkfilters met verse en beladen kool die volgt uit deze twee benaderingen zijn vermeld in Tabel 14. Hieruit komt naar voren dat de grootste verwijdering wordt verwacht voor *Cryptosporidium* in verse kool: 9,4 en 6,8 log. Deze waarden zijn hoger dan geschat voor *Giardia* (7,5 en 5,3 log voor beide koolsoorten). Deze waarden voor de verwijdering van (oö)cysten worden mede gezien de hiervoor genoemde onzekerheden beschouwd als een overschatting van de verwijdering. Daar staat tegenover dat een extra voorbehandeling met coagulatie de verwijdering van deze (oö)cysten ook gunstig kan beïnvloeden. **Op grond van deze overwegingen wordt een DEC waarde van 2,0 log als haalbaar beoordeeld voor de verwijdering van oöcysten van *Cryptosporidium* door actieve koolfiltratie en voor de cysten van *Giardia* een DEC waarde van 3,0 log. De schattingen die zijn gedaan voor de verwijdering van *E. coli* bacteriën door praktijkfilters wijzen op een mogelijke DEC waarde van 1,0 log voor *Campylobacter*.**

Tabel 14 Geschatte DEC waarden van de praktijk koolfilters te Berenplaat op grond van de twee hierboven beschreven benaderingen

Organismen		Verse kool		Beladen kool	
		Proef	Praktijk ^{a,b}	Proef	Praktijk
<i>Cryptosporidium</i>	Bed hoogte (m)	1	4	1	4
	Snelheid (m/h)	5	10	5	10
	α	0,935	0,935	0,653	0,653
	η	0,0036	0,0031	0,0027	0,0023
	DEC	2,7	9,4; 6,8^{a,b}	1,1	4,3; 2,8^{a,b}
<i>Giardia</i>	α	0,242	0,242	0,381	0,381
	η	0,0108	0,0095	0,0081	0,00722
	DEC	2,1	7,5; 5,3^{a,b}	2,1	7,5; 5,3^{a,b}
<i>Clostridium</i>	α	0,674	0,674	0,714	0,714
	η	0,0011	0,00079	0,0008	0,00063
	DEC	0,5	1,7; 1,3^{a,b}	0,4	1,2; 1,0^{a,b}
<i>E. coli</i>	α	0,062	0,062	0,570	0,570
	η	0,0010	0,00076	0,0008	0,00061
	DEC	0,1	0,2; 0,3^{a,b}	0,3	1,0; 0,8^{a,b}

^a berekend uit CFT model; ^b berekend uit de veronderstelling dat DEC proportioneel is met $V^{-2/3}$ (Yao et al., 1971) en evenredig met de bedhoogte

5 Conclusies en aanbevelingen

Uit de gegevens van dit onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Actieve koolfiltratie levert geen grote bijdrage aan de microbiologische veiligheid van het drinkwater als het gaat om virussen en bacteriën. Op grond van de gegevens in dit onderzoek en aanvullende literatuurgegevens is de verwijdering van virussen te verwaarlozen. Verwijdering van bacteriën in actieve kool filtratie treedt op en neemt toe naarmate de kool een hogere leeftijd heeft. Dit houdt mogelijk verband met de aanwezigheid van een actieve biofilm. In hoeverre dit wordt veroorzaakt door een verbeterde hechting en/of predatie door hogere organismen in de biofilm is op grond van de huidige gegevens niet vast te stellen.
- De effectiviteit van de koolfilters voor natuurlijke bacteriën en bacteriesporen was hoger dan voor de gedoseerde organismen. De voorbehandeling met coagulatie is hiervoor mogelijk een verklaring. Hierdoor moeten de gegevens verzameld met de gedoseerde micro-organismen in dit onderzoek als conservatief worden beschouwd.
- De effectiviteit van koolfilters om (oö)cysten van *Cryptosporidium* en *Giardia* te verwijderen is relatief hoog. De verwijdering van *Cryptosporidium* door een filterbed met verse kool met een contacttijd van 12 minuten was 2,7 log en daalde naar 1,2 log bij hetzelfde filter met beladen kool. *Giardia* cysten werden met dezelfde filters met 2,1 log verwijderd (geen effect van de ouderdom van de kool).
- Zeefwerking lijkt op grond van de deeltjesgrootte verhouding geen grote rol te spelen in de verwijdering. Hechting speelt de grootste rol, maar het proces wijkt af van de klassieke colloïd filtratie theorie. Dit blijkt uit de berekende hechtingefficiënties die groter zijn dan 1,0, maar ook uit het verloop van de concentraties in het filterbed. Deze zijn hyperexponentieel en vertonen een verhoogde hechting in het bovenste deel van het filterbed waar ook de hoogste biologische activiteit plaatsvindt. In hoeverre een causaal verband bestaat tussen biofilms en verwijdering van micro-organismen zal met nader onderzoek moeten worden vastgesteld.
- Er zijn aanwijzingen in de literatuur dat een hogere filtratiesnelheid dan toegepast in het huidige onderzoek de effectiviteit van de verwijdering in de koolfilters kan verlagen.
- Onduidelijk is wat het effect is van een regelmatig spoelproces op de effectiviteit van het proces is.
- Sporen van sulfiet reducerende clostridia zijn geen goede procesindicator voor de verwijdering van de (oö)cysten van de protozoa door actieve koolfilters. De verwijdering van de sporen was duidelijk lager dan die van de (oö)cysten. Op basis van de onderzoeksgegevens aangevuld met literatuurgegevens blijkt de effectiviteit van koolfilters voor sporen onder natuurlijke condities sterk te variëren. Dit komt vermoedelijk door accumulatie, een minder intensief en onregelmatig spoelproces en voor aerobe sporen valt nagroei ook niet uit te sluiten.
- "Predatie" en vertraagd transport van aan zooplankton gebonden persistente ziekteverwekkers als *Cryptosporidium* en *Giardia* is mogelijk en zou daarmee een rol kunnen spelen in de microbiologische veiligheid van drinkwater.

Dit oriënterende onderzoek laat zien dat adsorptie bij actieve koolfiltratie geen effectieve barrière is voor virussen, maar wel voor de pathogene protozoa en in mindere mate van pathogene bacteriën. Op grond van de resultaten en aanvullende overwegingen wordt voor de praktijkfilters van de locatie Berenplaat een voorlopige DEC waarde voor virussen, *Campylobacter*, *Cryptosporidium* en *Giardia* van respectievelijk 0,0, 1,0, 2,0 en 3,0 log voorgesteld.

Aanbevolen wordt om met verder onderzoek deze waarden nader te onderbouwen en daarbij aandacht te besteden aan de volgende aspecten van het proces:

- Effect van een voorbehandeling van gedoseerde micro-organismen op de effectiviteit van de koolfilters;
- Effect van de koolsoorten op de effectiviteit van de verwijdering van protozoa bepaald in een kolomonderzoek;
- Invloed van een filterspoeling, de contacttijd, de filtratiesnelheid en water temperatuur op de effectiviteit bepaald in een terugspoelbaar proeffilter;
- Kwantificering van de bijdrage van predatie aan de doorbraak van persistente micro-organismen bij koolfilters door metingen aan een proeffilter dat als een praktijkfilter kan worden gespeeld.

6 Referenties

- Bichai, F., Barbeau, B., Dullemont, Y.J. and Hijnen, W.A.M. (2009) Role of predation by zooplankton in transport and fate of protozoan (oo)cysts in granular activated carbon filtration. Accepted for publication in Water Research.
- Bradford, S.A., Bettahar, M., Simunek, J. and Van Genuchten, M.T. (2004) Straining and attachment of colloids in physically heterogeneous porous media. *Vadose Zone J.* 3, 384-394.
- Dullemont, Y.J., Schijven, J.F., Hijnen, W.A.M., Collin, M., Magic-Knezev, A. and Oorthuizen, W.A. (2006) Removal of micro-organisms by slow sand filtration. Gimbel, R., Graham, N.D.J. and Collin, M.R. (eds), IWA publishing, London, UK, Mullheim, Germany.
- Guy, M.D., McIver, J.D. and Lewis, M.J. (1977) Removal of virus by a pilot treatment plant. *Water Res.* 11, 421-428.
- Hijnen, W.A.M., van der Speld, W.M.H., Houtepen, F.A.P. and van der Kooij, D. (1997) Spores of sulphite-reducing clostridia: a surrogate parameter for assessing the effects of water treatment processes on protozoan (oo)cysts? Fricker, C.R., Clancy, J.L. and Rochelle, P.A. (eds), pp. 115-125, AWWA, Newport Beach, California US.
- Hijnen, W.A.M., Van der Veer, A.J., Van Beveren, J. and Medema, G.J. (2002) Spores of sulphite-reducing clostridia (SSRC) as surrogate for verification of the inactivation capacity of full-scale ozonation for *Cryptosporidium*. *Wat. Sci. Technol.: Wat. suppl.* 2(1), 163-170.
- Hijnen, W.A.M., Schijven, J.F., Bonn e, P., Visser, A. and Medema, G.J. (2004) Elimination of viruses, bacteria and protozoan oocysts by slow sand filtration. *Wat. Sci. Technol.* 50(1), 147-154.
- Hijnen, W.A.M., Brouwer-Hanzens, A.J., Charles, K. and Medema, G.J. (2005) Transport of MS2 phage, *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens*, *Cryptosporidium parvum* and *Giardia intestinalis* in a gravel and a sandy soil. *Environ. Sci. Technol.* 39, 7860-7868.
- Hijnen, W.A.M. and Medema, G.J. (2007) Elimination of micro-organisms by drinking water treatment processes: a review, Kiwa Water Research, Nieuwegein, the Netherlands.
- Hijnen, W.A.M., Dullemont, Y.J., Schijven, J.F., Brouwer-Hanzens, A.J., Rosielle, M. and Medema, G.J. (2007a) Removal and fate of *Cryptosporidium parvum*, *Clostridium perfringens* and small-sized centric diatoms (*Stephanodiscus hantzschii*) in slow sand filters. *Water Res.* 41, 2151-2162.
- Hijnen, W.A.M., Lugtenberg, A.T., Ruiters, H., Vink, R.R.J. and Medema, G.J. (2007b) Decay Rate Index of *E. coli* and Intestinal Enterococci in fresh and salt bathing waters, AWWA Water Quality and Technology Conference, November 2007, Charlotte, US.
- Hijnen, W.A.M. (2009) Elimination of micro-organisms in water treatment, University of Utrecht, Nieuwegein.
- Hijnen, W.A.M., Suylen, G.M.H., Bahlman, J.A., Brouwer-Hanzens, A. and Medema, G.J. (2009) ACTIEVE KOOL adsorption filters as barriers for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water treatment. *Water Res.* Submitted.
- Logsdon, G.S., Thurman, V.C., Frindt, E.S. and Stoecker, J.G. (1985) Evaluating sedimentation and various filter media for removal of *Giardia* cysts. *J. Am. Water Works Assoc.* 75(2), 61-66.
- Magic-Knezev, M. and Van der Kooij, D. (2004) Optimisation and significance of ATP analysis for measuring active biomass in granular activated carbon filters used in water treatment. *Water Res.* 38, 3971-3979.
- Morales, C.F.L., Strathmann, M. and Flemming, H.-C. (2007) Influence of biofilms on the movement of colloids in porous media. Implications for colloid facilitated transport in subsurface environments. *Water Res.* 41, 2059-2068.
- Patania, N.L., Jacangelo, J.G., Cummings, L., Wilczak, A., Riley, K. and Oppenheimer, J. (1995) Optimization of Filtration for Cyst Removal, American Water Works Assoc. Research Foundation, Denver CO US, Denver, US.
- Persson, F., Långmark, J., Heinicke, G., Hedberg, T., Tobiasson, J., Stenström, T. and Hermansson, M. (2005) Characterisation of barrier function of biofilters for pretreatment of drinking water with particle counts and challenge tests. *Water Res.* 16, 3791-3800.
- Powell, T., Brion, G.M., Jagtoyen, M. and Derbyshire, F. (2000) Investigating the Effect of Carbon Shape on Virus Adsorption. *Environ. Sci. Technol.* 34, 2779-2783.

- Sakthivadivel, R. (1966) Theory and Mechanism of Filtration of Non-colloidal Fines Through a Porous Medium, p. 110, University of California, Berkeley, US.
- Sakthivadivel, R. (1969) Clogging of a Granular Porous Medium by Sediment, p. 110, University of California, Berkeley, US.
- Saiers, J.E. and J.N. Ryan (2005). Colloid deposition on non-ideal porous media: the influence of the collector shape and roughness on the single-collector efficiency. *Geophysical Research Letters* 32, L21406, doi:21410.21029/22005GL024343.
- Schijven, J.F. and De Roda Husman, A.M. (2009) Analyse microbiologische veiligheid drinkwater, RIVM 703719038/2009, Bilthoven, NL.
- Scott, T.M., Sabo, R.C., Lukasik, J., Boice, C., Shaw, K., Barroso-Giachetti, L., El-Shall, H., Farah, S.R., Park, C., Moudgil, B. and Koopman, B. (2002) Performance and cost effectiveness of ferric and aluminium hydrous metal oxide coating on filter media to enhance virus removal. *KONA* 20, 159-164.
- Tong, M. and Johnson, W.P. (2007) Colloid Population Heterogeneity Drives Hyperexponential Deviation from Classic Filtration Theory. *Environ. Sci. Technol.* 41, 493-499.
- Tufenkji, N. and Elimelech, M. (2004) Correlation equation for predicting single-collector efficiency in physicochemical filtration in saturated porous media. *Environ. Sci. Technol.* 38, 529-536.
- Tufenkji, N. and Elimelech, M. (2005) Spatial distribution of *Cryptosporidium* oocysts in porous media: evidence for dual mode deposition. *Environ. Sci. Technol.* 39, 3620-3629.
- Tufenkji, N. (2007) Modeling microbial transport in porous media: Traditional approaches and recent developments. *Ad. Water Resources* 30, 1455-1469.
- Veenendaal, H.R. and Brouwer-Hanzens, A.J. (2007) A method for the concentration of microbes in large volumes of water, Kiwa Water Research, Nieuwegein NL.
- Yao, K.M., Habibia, M. and O'Melia, C.R. (1971) Water and wastewater filtration: concepts and applications. *Environ. Sci. Technol.* 5, 1105-1112.

Bijlage 1 Monsterschema

1 = totaal verzamemonster in kunststof containers
 2 = deel verzamemonster
 3 = steekmonster

Hemoflow monsternamen door Aqualab
 KWR levert 2x hemoflow opstelling

dag	tijdstip	Dosering	Conc.	Tijd	Influent	Effluent	volume totaal	KWR	AQUALAB	Concentratie n/ml	FRNA/MS2	Coli44/E. coli	SSRC	Crypto/Giardia	Fys/chemin/uit
uur			influent	na start	monsters	Monsters	eff. monsters	vol.	vol.	DEC verwacht 0-3 log	KWR	AQUA	AQUA	KWR	AQUA
			n/ml	min.	liter	type	liter	liter	liter	range conc. n/ml					
0					x 10 liter							x	x		x
0					x 10 liter	2	HV 1000		100%			x	x		
0					x 10 liter	2	HV 1000		100%			x	x		
1	08:50					2		1	2	0	x	x	x	x	
1	09:00:00	x	1000		2x0.5 liter										
1		x	1000	1						1-1000					
1		x	1000	2						1-1000					
1		x	1000	3						1-1000					
1		x	1000	4						1-1000					
1		x	1000	5						1-1000					
1		x	1000	6		1	10 (8.8)	8	1	1-1000	x	x	x	x	
1		x	1000	7						1-1000					
1		x	1000	8						1-1000					
1		x	1000	9						1-1000					
1		x	1000	10	2x0.5 liter					1-1000					
1		x	1000	11						1-1000					
1		x	1000	12		1	10 (8.8)	8	1	1-1000	x	x	x	x	
1		x	1000	13						1-1000					
1		x	1000	14						1-1000					
1		x	1000	15						1-1000					
1		x	1000	16						1-1000					
1		x	1000	17						1-1000					
1		x	1000	18		1	10 (8.8)	8	1	1-1000	x	x	x	x	
1	09:30	x	1000	30	2x0.5 liter	1	20 (17.6)	16	1	1-1000	x	x	x	x	
1		x	1000	45		1	20 (22)	21	1	1-1000	x	x	x	x	
1	10:00	x	1000	60	2x0.5 liter	1	20 (22)	21	1	1-1000	x	x	x	x	x
1		x	1000	90		1	40 (44)	43	1	1-1000	x	x	x	x	
1	11:00	x	1000	120	2x0.5 liter	1	40 (44)	43	1	1-1000	x	x	x	x	
1			0	150		2	10	9	1	<1-100	x	x	x	x	
1			0	180		2	10	9	1	<1	x	x	x	x	
1	14:00		0	300		2	10	9	1	<1	x	x	x	x	
1	16:00		0	420		2	10	9	1	<1	x	x	x	x	
2	14:00		0			2	HV 1000	50%	50%	<1	x	x	x	x	
3	14:00		0			2	HV 1000	50%	50%	<1	x	x	x	x	x
4	14:00		0			2	HV 1000	50%	50%	<1	x	x	x	x	
5	14:00		0			2	HV 1000	50%	50%	<1	x	x	x	x	x

Bijlage 2 Meetgegevens KWR

Monstergegevens KWR

	Proef 1	Proef 2
Influent K1	M-084282-M084286	M-084287-M084291
Effluent K1	M-084292-M084307	M-084308-M084232
Influent K2	M-084762-M084765	M-084266-M084276
Effluent K2	M-084777-M084780	M-084781-M084790

<i>Fagen</i>					<i>K1</i>				<i>K2</i>				<i>Mi</i>	<i>Me</i>		
Test 1	Verdun	Aantal	Aantal	pve/l	verdun	resultaten	resultaten	pve / l	verdun	resultaten	resultaten	pve / l		K1	K2	
0	10000	19	19		3	1	23	24	2.E+04	1	1	3	2000	2.12E+11	5.2E+04	4.4E+03
10	10000	116	124	1.E+09	9	1E+03	268	261	3.E+08	1E+04	52	49	5.05E+08		1.2E+09	2.2E+09
30	10000	143	118	1.E+09	15	1E+04	119	153	1.E+09	1E+04	80	74	7.7E+08		7.1E+09	5.6E+09
60	10000	123	141	1.E+09	24	1E+04	213	203	2.E+09	1E+04	164	120	1.42E+09		2.3E+10	1.4E+10
120	10000	95	126	1.E+09	37.5	1E+04	136	186	2.E+09	1E+04	128	128	1.28E+09		3.7E+10	2.7E+10
					52.5	1E+04	170	156	2.E+09	1E+04	121	107	1.14E+09		3.6E+10	2.7E+10
					75	1E+04	89	125	1.E+09	1E+04	99	109	1.04E+09		4.5E+10	3.6E+10
					105	1E+04	113	104	1.E+09	1E+04	66	79	7.25E+08		4.7E+10	3.9E+10
					135	1E+04	79	84	8.E+08	1E+04	33	54	4.35E+08		4.2E+10	2.6E+10
0	1E+04	28	24		165	1E+04	19	26	2.E+08	1E+03	168	198	1.83E+08		2.3E+10	1.4E+10
10	1E+04	97	84	9.E+08	180	1E+03	104	112	1.E+08	1E+03	22	25	23500000		3.7E+09	2.3E+09
30	1E+04	103	94	1.E+09	300	1E+03	79	60	7.E+07	1E+01	65	60	625000		1.6E+10	2.1E+09
60	1E+04	129	146	1.E+09	420	1E+03	67	95	8.E+07	1E+01	23	21	220000		1.3E+10	7.4E+07
120	1E+04	143	141	1.E+09	1080								0			
					2460				0.05				0.05		7.5E+01	7.5E+01
			AVG	1.E+09	3900				0.13				0.11		2.7E+02	2.3E+02
			SD	2.E+08	5340				0.05				0.05		1.9E+02	1.7E+02
														totaal	2.9E+11	1.9E+11
														DEC	-0.14	0.04
														Rec %	138.2091219	9.17E+01

<i>Fagen</i>					<i>tijd</i>			<i>K1</i>			<i>Mi</i>		<i>Me</i>			
Test 2	Verdun	Aantal	Aantal	pve/l	min.	verdun	resultaten	pve / l	verdun	resultaten	pve / l		K1	K2		
0					12	1E+02	69	61	6.50E+06	1E+02	64	63	6.4E+06	1.27E+09	5.7E+07	5.6E+07
10	1E+02	50	54	5.2E+06	30	1E+02	60	64	6.20E+06	1E+02	54	65	6.0E+06		1.7E+08	1.6E+08
20	1E+02	73	73	7.3E+06	60	1E+02	75	82	7.85E+06	1E+02	76	76	7.6E+06		3.1E+08	3.0E+08
58	1E+02	64	64	6.4E+06	90	1E+02	83	78	7.60E+06	1E+02	78	90	8.4E+06		3.4E+08	3.5E+08
118	1E+02	81	70	7.6E+06	120	1E+02	98	91	9.45E+06	1E+02	85	80	8.3E+06		3.8E+08	3.7E+08
					180	1E+00	121	129	1.25E+05	1E+00	65	48	5.7E+04		4.2E+08	3.7E+08
					300	1E+00	18	15	1.65E+04	1E+00	28	19	2.4E+04		1.2E+07	7.0E+06
					420	1E+00	19	19	1.90E+04	1E+00	41	48	4.5E+04		3.1E+06	6.0E+06
0					1080				<0.02				<0.025			
10	1E+02	65	77	7.1E+06	2460									totaal	1.7E+09	1.6E+09
20	1E+02	81	82	8.2E+06	3900									DEC	-0.12	-0.10
58	1E+02	81	84	8.3E+06	5340									Rec %	1.3E+02	1.3E+02
118	1E+02	88	72	8.0E+06												
			AVG	7.2E+06												
			SD	1.0E+06												

Crypto			tijd						K1				K2	Mi	Me	
Test 1	Verdun	Aantal	Aantal	oocyst/l	min	volume ml	resultaten	colorseeds	n / l	volume ml	resultaten	colorseeds	n / l		K1	K2
0	5000	3			3	959	7	16	46	953	5	14	37.5	1.94E+07	1.0E+02	8.2E+01
10	5000	16		8.0E+04	9	901	8	6	148	933	6	13	49.5		8.5E+02	3.8E+02
30	5000	28		1.4E+05	15	892	8	9	100	940	11	23	50.9		1.1E+03	4.4E+02
60	5000	21		1.1E+05	24	919	10	10	109	932	2	15	14.3		1.4E+03	4.3E+02
120	5000	22		1.1E+05	37.5	855	11	14	92	915	15	14	117.1		2.0E+03	1.3E+03
					52.5	899	20	9	247	909	11	16	75.6		3.7E+03	2.1E+03
					75	901	7	14	55	945	14	19	78.0		5.0E+03	2.5E+03
					105	921	20	11	197	922	12	15	86.8		5.6E+03	3.6E+03
					135	909	16	23	76.5	917	18	5	392.6		6.0E+03	1.1E+04
0	5000	3			165	899	5	7	79	963	5	11	47.2		3.4E+03	9.7E+03
10	5000	17		8.5E+04	180	930	7	10	75	876	5	12	47.6		1.7E+03	1.0E+03
30	5000	14		7.0E+04	300	915	4	26	17	926	1	15	7.2		8.1E+03	4.8E+03
60	5000	30		1.5E+05	420	925	3	28	12	901	3	6	55.5		2.5E+03	5.5E+03
120	5000	28		1.4E+05	1080	6.2E+05	5	1	0.8052	3.8E+05	12	11	0.3		1.7E+03	4.7E+02
					2460	1.4E+06	20	4	0.3623	1.5E+06	4	11	0.0		2.9E+02	2.6E+02
			AVG	1.1E+05	3900	4.6E+05	5	8	0.1368	4.7E+05	13	22	0.1		2.8E+02	1.7E+02
			SD	3.1E+04	5340	1.2E+06	66	43	0.1306	1.3E+06	2	4	0.0	totaal	4.4E+04	4.3E+04
														DEC	2.65	2.65

<i>Crypto</i>					<i>tijd</i>				<i>K1</i>				<i>K2</i>	<i>Mi</i>	<i>Me</i>	
Test 2	Verdunning	Aantal	Aantal	oocyst/l	min	volume ml	meetresultaten	colorseeds	n / l	volume ml	meetresultaten	colorseeds	n / l		K1	K2
0					12	958	21	3	731	984	203	8	2579	2.83E+07	6.4E+03	2.3E+04
10	5000	21		1.1E+05	30	971	222	7	3266	993	663	8	8346		5.3E+04	1.4E+05
20	5000	26		1.3E+05	60	976	297	6	5072	991	404	4	10192		1.8E+05	4.1E+05
58	5000	46		2.3E+05	90	981	808	19	4335	972	809	7	11890		2.1E+05	4.9E+05
118	5000	42		2.1E+05	120	956	626	10	6548	958	642	6	11169		2.4E+05	5.1E+05
					180	966	27	10	280	974	69	16	443		3.0E+05	5.1E+05
					300	923	17	24	77	961	24	21	119		3.1E+04	4.9E+04
0					420	919	18	35	56	949	23	25	97		1.2E+04	1.9E+04
10	5000	22		1.1E+05	1080	1.5E+06	2296		14.8	1.4E+06	4288	5	62.87		3.4E+04	7.7E+04
20	5000	36		1.8E+05	2460	9.3E+05	4350	8	58.7	9.7E+05	3870	17	23.44		7.4E+04	8.7E+04
58	5000	32		1.6E+05	3900	3.4E+05	808	11	21.8	4.0E+05	425	14	7.63		8.5E+04	3.3E+04
118	5000	32		1.6E+05	5340	3.9E+05	675	9	19.3	3.6E+05	1362	22	17.01		4.3E+04	2.6E+04
														totaal	1.3E+06	2.4E+06
														DEC	1.34	1.07
				AVG		1.6E+05										
				SD		4.5E+04										

<i>Giardia</i>					<i>tijd</i>				<i>K1</i>				<i>K2</i>	<i>Mi</i>	<i>Me</i>	
Test 1	Verdun	Aantal	Aantal	cyst/l	min	volume ml	resultaten	colorseeds	n / l	volume ml	resultaten	colorseeds	n / l		K1	K2
0	5000	5			3	959	6	4	156	953	8	8	104.9	1.73E+07	344.1084463	230.849948
10	5000	17		8.50E+04	9	901	7	5	155	933	10	7	153.1		1.37E+03	1.14E+03
30	5000	37		1.85E+05	15	892	8	1	897	940	36	12	319.1		4.63E+03	2.08E+03
60	5000	25		1.25E+05	24	919	14	9	169	932	15	12	134.1		7.04E+03	2.99E+03
120	5000	23		1.15E+05	37.5	855	20	3	780	915	30	7	468.4		9.40E+03	5.96E+03
					52.5	899	2	1	222	909	35	5	770.1		1.10E+04	1.36E+04
					75	901	37	8	513	945	44	6	776.0		1.21E+04	2.55E+04
					105	921	23	7	357	922	35	6	632.7		1.91E+04	3.10E+04
					135	909	17	6	312	917	31	10	338.1		1.47E+04	2.14E+04
0	5000	5			165	899	16	7	254	963	9	7	133.5		1.25E+04	1.04E+04
10	5000	14		7.00E+04	180	930	17	10	183	876	6	4	171.2		4.81E+03	3.35E+03
30	5000	12		6.00E+04	300	915	8	8	109	926	8	4	216.0		2.57E+04	3.41E+04
60	5000	15		7.50E+04	420	925	10	7	154	901	5	8	69.4		2.32E+04	2.51E+04
120	5000	14		7.00E+04	1080	621000	4	7	0.0920	377000	23	2	3.1		3.36E+02	4.67E+03
					2460	1380000	11	6	0.1329	1471000	4	4	0.1		3.93E+02	1.23E+03
			AVG	9.81E+04	3900	457000	17	20	0.1860	474000	11	4	0.6		3.36E+02	8.12E+02
			SD	4.19E+04	5340	1175000	28	18	0.1324	1323000	5	2	0.2	totaal	1.5E+05	1.8E+05
													DEC		2.07	1.97

<i>Giardia</i>					<i>tijd</i>				<i>K1</i>				<i>K2</i>	<i>Mi</i>	<i>Me</i>	
Verdun	Aantal	Aantal	cyst/l	min	volume ml	resultaten	colorseeds	n / l	volume ml	resultaten	colorseeds	n / l			K1	K2
0				12	958	2	0	209	984	2	3	68	8.47E+06		1.8E+03	6.0E+02
10	5000	15	7.50E+04	30	971	7	1	721	993	5	1	504			1.2E+04	7.5E+03
20	5000	3	1.50E+04	60	976	2	0	205	991	0	2	50				
58	5000	2	1.00E+04	90	981	7	14	51	972	2	4	51			3.4E+04	2.4E+04
118	5000	13	6.50E+04	120	956	1	8	13	958	0	0	100				
				180	966	0	6	0	974	1	9	11			3.4E+03	4.1E+03
				300	923	2	15	14	961	1	27	4			1.3E+03	1.3E+03
				420	919	0	17	0	949	0	11	9				
10	5000	10	5.00E+04	1080	1549000	130		1.27	1364000	128	1	9.38			9.0E+03	7.6E+03
20	5000	9	4.50E+04	2460	927000	96	3	3.45	971000	144	8	1.85			4.8E+03	1.1E+04
58	5000	11	5.50E+04	3900	337000	2	6	0.10	398000	2	5	0.10			3.7E+03	2.1E+03
118	5000	14	7.00E+04	5340	389000	1	3	0.09	364000	6	3	0.55			1.9E+02	6.9E+02
			AVG													
			SD													
													totaal		7.0E+04	6.0E+04
													DEC		2.08	2.15

Bijlage 3 Aqualab gegevens

<i>E. coli</i>				K1	K2	K1				K2		Mi	Me				
Datum	tijd (min.)	Volume	CFU	E. coli	E. coli/l	tijd (min.)	Volume	CFU	E. coli	E. coli/l	Volume	CFU	E. coli	E. coli/l	K1	K2	
Natuur																	
10/15/2008		11.944	26	26	2.18	nb	410.892	413	413	1.01	438.018	368	368	0.84	2.0E+08		
10/16/2008		15.238	32	25.6	1.68	nb	463.757	214	214	0.46	481.206	274	274	0.57			
Doseer																	
10/20/2008	0				215000	395000				<100				<100			
10/20/2008	10				805000	975000				385000				255000	2.5E+06	1.7E+06	
10/20/2008	30				920000	1005000				730000				645000	4.9E+06	4.0E+06	
10/20/2008	60				1140000	1245000				795000				680000	1.0E+07	8.7E+06	
10/20/2008	120				1155000	1800000				900000				705000	1.7E+07	1.4E+07	
				Avg	1130625					775000				650000	1.8E+07	1.5E+07	
				sd	305245.07					855000				720000	3.6E+07	3.0E+07	
				K1		K2				112.5				885000	3.8E+07	3.1E+07	
SSRC		Volume	CFU	SSRC/l						142.5				895000	3.9E+07	3.0E+07	
10/15/2008		39.068	73	1.87	nb					172.5				49000	2.1E+07	1.6E+07	
10/16/2008		35.269	8	0.23	nb					180				42500	5.0E+05	3.6E+05	
										300				6900	4.3E+06	3.5E+06	
10/20/2008	0				330000	520000				420				4100	9.7E+05	1.5E+06	
10/20/2008	10				1205000	2300000		0.018	41	1080	0.011	23	23	2091	3.1E+06	2.6E+06	
10/20/2008	30				1550000	1750000		0.211	53	2460	0.219	75.5	75.5	345	2.6E+06	2.5E+06	
10/20/2008	60				2150000	1500000		0.072	14.5	3900	0.08	15	15	188	4.8E+05	5.6E+05	
10/20/2008	120				1500000	1300000		1.861	79	5340	1.923	69	69	36	2.6E+05	2.4E+05	
				Avg	1656875					900000				720000	Totaal	1.99E+08	1.61E+08
				sd	388706.07										DECm	0.00	0.09
															DECNmax	0.10	0.20

Datum	tijd (min.)	Volume	CFU	E. coli	E. coli/l	E. coli/l	Datum	tijd (min.)	Volume	CFU	E. coli	E. coli/l	Volume	CFU	E. coli	E. coli/l	K1	K2		
11/19		12.653	269	26.9	2.13	nb	11/19		223.48	60	48	0.21	235.403	30	30	0.13	1.0E+08			
11/20		12.024	18	16.2	1.35	nb	11/20		386.53	50	50	0.13	641.848	91	91	0.14				
11/24	10				600000	590000	11/24	12		180		180000		160		160000	1.6E+06	1.4E+06		
11/24	20				620000	630000	11/24	30		200		200000		250		250000	5.0E+06	5.4E+06		
11/24	58				560000	590000	11/24	60		220		220000		240		240000	9.2E+06	1.1E+07		
11/24	118				610000	560000	11/24	90		360		360000		240		240000	1.3E+07	1.1E+07		
							11/24	120		270		270000		260		260000	1.4E+07	1.1E+07		
					AVG	6.0E+05	11/24	180		11		11000		35		35000	1.2E+07	1.3E+07		
					SD	2.6E+04	11/24	300		2.9		2900		3.8		3800	1.2E+06	3.4E+06		
							11/24	420		2.8		2800		2.6		2600	5.0E+05	5.6E+05		
					K1	K2	11/25	1080	0.266	124	124	466	0.222	104.5	104.5	471	1.6E+06	1.5E+06		
		Volume	CFU		SSRC/l	SSRC/l	11/26	2460	0.156	37	37	237	0.135	29.5	29.5	219	7.1E+05	7.0E+05		
11/19		39.068	937		23.98	nb	11/27	3900	0.136	17.5	17.5	129	0.159	18.5	18.5	116	3.9E+05	3.5E+05		
11/20		35.269	230		6.52	nb	11/28	5340	1.599	82	82	51	0.147	14.5	14.5	99	1.9E+05	2.3E+05		
11/24	10				1850000	1500000	Nmax					360000				260000	Totaal	5.9E+07	5.9E+07	
11/24	20				2900000	1650000											DECm	0.25	0.25	
11/24	58				2300000	2550000											DECNmax	0.22	0.36	
11/24	118				1600000	1700000	Datum	tijd (min.)	Volume	SSRC	SSRC n/l	Volume	SSRC	SSRC n/l			Mi	Me	Me	
							11/19		339.795	763	2.25	377.506	847	2.2437						
					AVG	2.0E+06	11/20		305.809	584	1.91	309.999	515	1.6613			3.5E+08	3.2E+06	3.4E+06	
					SD	5.1E+05	11/24	12		360	360000		385	385000				1.1E+07	1.2E+07	
							11/24	30		485	485000		540	540000				2.3E+07	2.6E+07	
							11/24	60		540	540000		635	635000				2.8E+07	2.8E+07	
							11/24	90		715	715000		660	660000				2.9E+07	2.9E+07	
							11/24	120		590	590000		680	680000				2.7E+07	3.2E+07	
							11/24	180		21.5	21500		39	39000				3.0E+06	4.3E+06	
							11/24	300		13	13000		10	10000				1.6E+06	1.4E+06	
							11/24	420		5.3	5300		5.85	5850				3.5E+06	3.9E+06	
							11/25	1080	0.027	53.5	1981	0.022	48.5	2205				2.8E+06	3.1E+06	
							11/26	2460	0.156	129.5	830	0.135	109.5	811				1.3E+06	1.3E+06	
							11/27	3900	0.136	53.5	393	0.159	73.5	462				8.1E+05	9.4E+05	
							11/28	5340	0.16	60	375	0.147	62.5	425				totaal	1.3E+08	1.5E+08
							Nmax				715000			680000				DECm	0.42	0.38
																		DECNmax	0.448	0.470

Bijlage 4 Gegevens filtersteken

<i>E. coli</i>	Test 1		Kool	Volume	resultaat	resultaat	
Monstercodering		Monstercode	gr	ml	kve /ml	kve / gr kool	kve/ml
Kolom 1	oppervlakte	M-084444	5	100	480	9600	6336
	0 - 5 cm	M-084445	5	100	1.8	36	23.76
	5 - 10 cm	M-084446	5	100	23	460	303.6
	25 - 30 cm	M-084447	5	100	1.3	26	17.16
	50 - 55 cm	M-084448	5	100	95	1900	1254
	90 - 95 cm	M-084449	5	100	0.35	7	4.62
Kolom 2	oppervlakte	M-084450	5	100	122	2440	1610.4
	0 - 5 cm	M-084451	5	100	65	1300	858
	5 - 10 cm	M-084452	5	100	25.5	510	336.6
	30 - 35 cm	M-084453	5	100	2.5	50	33
	50 - 55 cm	M-084454	5	100	0.75	15	9.9
	90 - 95 cm	M-084455	5	100	2.2	44	29.04
Kolom 1							
Clostridia	Test 1		Kool	Volume	resultaat	resultaat	
Monstercodering		Monstercode	gr	ml	kve /ml	kve / gr kool	kve/ml
Kolom 1	oppervlakte	M-084444	5	100	2185	43700	28842
	0 - 5 cm	M-084445	5	100	162	3240	2138.4
	5 - 10 cm	M-084446	5	100	900	18000	11880
	25 - 30 cm	M-084447	5	100	146	2920	1927.2
	50 - 55 cm	M-084448	5	100	1860	37200	24552
	90 - 95 cm	M-084449	5	100	63	1260	831.6
Kolom 2	oppervlakte	M-084450	5	100	2660	53200	35112
	0 - 5 cm	M-084451	5	100	3240	64800	42768
	5 - 10 cm	M-084452	5	100	1395	27900	18414
	30 - 35 cm	M-084453	5	100	320	6400	4224
	50 - 55 cm	M-084454	5	100	225	4500	2970
	90 - 95 cm	M-084455	5	100	76	1520	1003.2

<i>Cryptosporidium</i>		<i>Test 1</i>	<i>Kool</i>	<i>Volume</i>	<i>resultaat</i>	<i>resultaat</i>	<i>correctie colorseed 13.7%</i>	
Monstercodering	Monstercode	gr	ml	n / ml	n / gr kool	n/ml		
Kolom 1	oppervlakte	M-084444	5	100	26	11	7.3	53.0
	0 - 5 cm	M-084445	5	100	2	3	2.0	14.5
	5 - 10 cm	M-084446	5	100	64	40	26.4	192.7
	25 - 30 cm	M-084447	5	100	1	1	0.7	4.8
	50 - 55 cm	M-084448	5	100	58	26	17.2	125.3
	90 - 95 cm	M-084449	5	100	1	1	0.7	4.8
Kolom 2	oppervlakte	M-084450	5	100	18	17	11.2	81.9
	0 - 5 cm	M-084451	5	100	186	48	31.7	231.2
	5 - 10 cm	M-084452	5	100	49	20	13.2	96.4
	30 - 35 cm	M-084453	5	100	3	2	1.3	9.6
	50 - 55 cm	M-084454	5	100	2	8	5.3	38.5
	90 - 95 cm	M-084455	5	100	1	1	0.7	4.8
<i>Giardia</i>		<i>Test 1</i>	<i>Kool</i>	<i>Volume</i>	<i>resultaat</i>	<i>resultaat</i>	<i>Colorseed 6.9%</i>	
Monstercodering	Monstercode	gr	ml	n / 10 ml	n / gr kool	n/ml	correctie	
Kolom 1	oppervlakte	M-084444	5	100	26	52	34.32	497.4
	0 - 5 cm	M-084445	5	100	2	4	2.64	38.3
	5 - 10 cm	M-084446	5	100	64	128	84.48	1224.3
	25 - 30 cm	M-084447	5	100	1	2	1.32	19.1
	50 - 55 cm	M-084448	5	100	58	116	76.56	1109.6
	90 - 95 cm	M-084449	5	100	1	2	1.32	19.1
						0		
Kolom 2	oppervlakte	M-084450	5	100	18	36	23.76	344.3
	0 - 5 cm	M-084451	5	100	186	372	245.52	3558.3
	5 - 10 cm	M-084452	5	100	49	98	64.68	937.4
	30 - 35 cm	M-084453	5	100	3	6	3.96	57.4
	50 - 55 cm	M-084454	5	100	2	4	2.64	38.3
	90 - 95 cm	M-084455	5	100	1	2	1.32	19.1

<i>E.coli</i>	Test 2		Kool	Volume	resultaat	resultaat	
Monstercodering		Monstercode	gr	ml	kve /ml	kve / gr kool	kve/ml
Kolom 1	oppervlak	M-084792	4.9	80	410	6694	4418
	0 tot 5 cm	M-084793	4.1	80	140	2732	1803
	5 tot 10 cm	M-084794	3.2	80	47	1175	776
	25 tot 30 cm	M-084795	5.5	80	14	204	134
	50 tot 55 cm	M-084796	4.8	80	4.8	80	53
	85 tot 90 cm	M-084796a	5.3	80	3.4	51	34
Kolom 2	oppervlak	M-084797	4.9	80	320	5224	3448
	0 tot 5 cm	M-084798	4.9	80	160	2612	1724
	5 tot 10 cm	M-084799	4.2	80	120	2286	1509
	25 tot 30 cm	M-084800	4.5	80	69	1227	810
	50 tot 55 cm	M-084801	5.3	80	8.9	134	89
	95 tot 100 cm	M-084801a	6.3	80	3.4	43	28
Kolom 1							
Clostridia	Test 2		Kool	Volume	resultaat	resultaat	
Monstercodering		Monstercode	gr	ml	kve /ml	kve / gr kool	kve/ml
Kolom 1	oppervlak	M-084792	4.9	80	5250	85714	56571
	0 tot 5 cm	M-084793	4.1	80	2200	42927	28332
	5 tot 10 cm	M-084794	3.2	80	1100	27500	18150
	25 tot 30 cm	M-084795	5.5	80	770	11200	7392
	50 tot 55 cm	M-084796	4.8	80	500	8333	5500
	85 tot 90 cm	M-084796a	5.3	80	235	3547	2341
Kolom 2	oppervlak	M-084797	4.9	80	1800	29388	19396
	0 tot 5 cm	M-084798	4.9	80	3600	58776	38792
	5 tot 10 cm	M-084799	4.2	80	1350	25714	16971
	25 tot 30 cm	M-084800	4.5	80	1010	17956	11851
	50 tot 55 cm	M-084801	5.3	80	675	10189	6725
	95 tot 100 cm	M-084801a	6.3	80	440	5587	3688

<i>Cryptosporidium</i>		Test 2	Kool	Volume	resultaat	resultaat	correctie colorseed 12.8%
Monstercodering	Monstercode	gr	ml	n / ml	n / gr kool		n/ml
Kolom 1	oppervlak	M-084792	4.9	80	84.7	1383	7130
	0 tot 5 cm	M-084793	4.1	80	53.9	1052	5423
	5 tot 10 cm	M-084794	3.2	80	32.1	803	4138
	25 tot 30 cm	M-084795	5.5	80	10.5	153	788
	50 tot 55 cm	M-084796	4.8	80	2.5	42	215
	85 tot 90 cm	M-084796a	5.3	80	1	15	78
Kolom 2	oppervlak	M-084797	4.9	80	141.9	2317	11946
	0 tot 5 cm	M-084798	4.9	80	75.4	1231	6347
	5 tot 10 cm	M-084799	4.2	80	45.7	870	4488
	25 tot 30 cm	M-084800	4.5	80	8.35	148	765
	50 tot 55 cm	M-084801	5.3	80	6.3	95	490
	95 tot 100 cm	M-084801a	6.3	80	1.3	17	85
<i>Giardia</i>		Test 2	Kool	Volume	resultaat	Resultaat	Colorseed 6.4% correctie
Monstercodering	Monstercode	gr	ml	n / 10 ml	n / gr kool		n/ml
Kolom 1	oppervlak	M-084792	4.9	80	1	16	168
	0 tot 5 cm	M-084793	4.1	80	1	20	201
	5 tot 10 cm	M-084794	3.2	80	0.4	10	103
	25 tot 30 cm	M-084795	5.5	80	0.4	6	60
	50 tot 55 cm	M-084796	4.8	80	0.2	3	34
	85 tot 90 cm	M-084796a	5.3	80	0.1	2	16
Kolom 2	oppervlak	M-084797	4.9	80	14.3	233	2408
	0 tot 5 cm	M-084798	4.9	80	5.9	96	993
	5 tot 10 cm	M-084799	4.2	80	2.1	40	413
	25 tot 30 cm	M-084800	4.5	80	3.9	69	715
	50 tot 55 cm	M-084801	5.3	80	6.3	95	981
	95 tot 100 cm	M-084801a	6.3	80	1.3	17	170

