

BTO 2019.026 | Mei 2019

BTO rapport

Verwijdering MS2 bacteriofagen, *E. coli* en *Cryptosporidium* door langzame zandfiltratie, kolomexperimenten De Punt 2018

BTO

Verwijdering MS2 bacteriofagen, E. coli en Cryptosporidium door langzame zandfiltratie, kolomexperimenten De Punt 2018

BTO 2019.026 | Mei 2019

Opdrachtnummer

402045-044

Projectmanager

Michiel Hootsmans

Opdrachtgever

BTO - Bedrijfsonderzoek

Kwaliteitsborger(s)

Gertjan Medema

Auteur(s)

Patrick Smeets, Edwin Kardinaal, Anke Brouwer-Hanzens, Anita van der Veen

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Jaar van publicatie
2019

Meer informatie
Dr. Ir. Patrick Smeets
T 030 60 69 584
E patrick.smeets@kwrwater.nl

Langzame zandfiltratie,
microbiologische veiligheid,
hygiëne, drinkwaterzuivering,
Cryptosporidium, E. coli, MS2

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

Watercycle
Research
Institute

BTO 2019.026 | Mei 2019 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

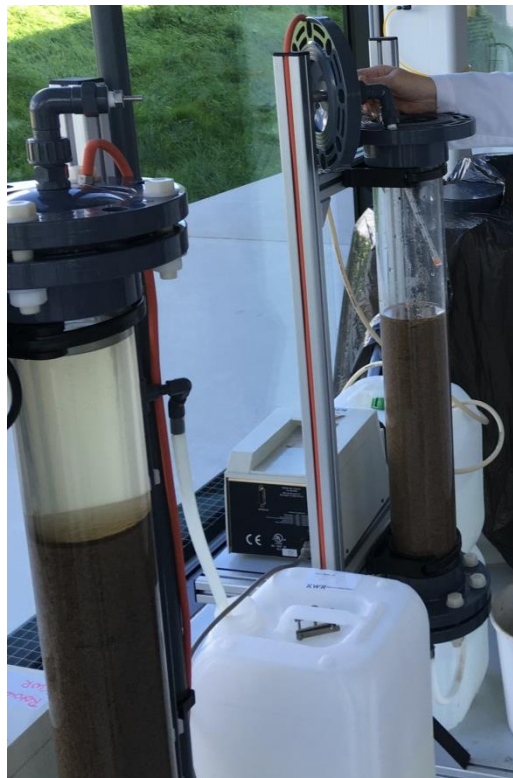
Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

BTO Managementsamenvatting

Kolomopstellingen geven inzicht in verwijdering van micro-organismen tijdens langzame zandfiltratie

Auteur(s) Dr. Patrick Smeets, Dr. Edwin Kardinaal, Anke Brouwer-Hanzens, Anita van der Veen

Langzame zandfiltratie is een goede optie om ziekteverwekkende micro-organismen als virussen, bacteriën en protozoa afdoende te verwijderen bij de drinkwaterproductie. Om in de praktijk de specifieke effectiviteit van langzame zandfiltratie voor verschillende productielocaties en procescondities te bepalen, zijn kolomexperimenten uitgevoerd zoals eerder in 2016. Daarbij is naast *Cryptosporidium* (een protozo) ook de verwijdering van *E. coli* bacteriën en MS2 bacteriofagen (virussen) is onderzocht. Dit bevestigde de vergaande verwijdering van *Cryptosporidium* met 3,9 tot 4,9 logeenheden. *E. coli* en MS2 bacteriofagen worden minder goed verwijderd met respectievelijk 2,4 en 1,7 log gemiddelde verwijdering. Met uitvoering in duplo is aangetoond dat de experimenten reproduceerbaar zijn. Waterbedrijf Groningen kan het hiermee gevalideerde procesmodel gebruiken bij het bepalen van de verwijdering voor het opstellen van de wettelijk verplichte Analyse Microbiologische Veiligheid Drinkwater (AMVD).



Een kolomopstelling voor langzame zandfiltratie wordt voorbereid in de proefhal van KWR.

Belang: geborgd veilig drinkwater

Oppervlaktewater is verontreinigd met ziekteverwekkende micro-organismen die bij de productie van drinkwater moeten worden verwijderd. Drinkwaterbedrijven moeten via een Analyse Microbiologische Veiligheid Drinkwater (AMVD) aantonen dat hun drinkwater voldoende veilig is. Daarvoor moeten zij weten hoe goed hun productiemethoden diverse soorten ziekteverwekkers zoals bacteriën, virussen en protozoa verwijderen.

Aanpak: kolomproeven in duplo

Een proefopstelling met twee filterkolommen werd gevuld met zand van de productielocatie De Punt. De filters werden bedreven onder identieke omstandigheden met het voedingswater van De Punt, om de werkelijke praktijksituatie zo goed mogelijk na te bootsen. De filterkolom werd op precies dezelfde manier te bedreven als een eerdere proef met alleen *Cryptosporidium*. Zo konden de resultaten van alle kolommen worden vergeleken en vertaald naar de praktijk. Voor de proef werden hoge concentraties micro-organismen aan het voedingswater toegevoegd. Vervolgens is over een periode van 48 uur al het gefilterde water opgevangen en in het laboratorium onderzocht om de concentraties micro-organismen vast te stellen. Zo kon de verwijdering van virussen, bacteriën en protozoa in de kolomopstelling worden vastgesteld.

Resultaat: verwijdering in langzame zandfiltratie De Punt bepaald en rekenmodel gevalideerd

Cryptosporidium werd met 3,9 tot 4,9 logeenheden verwijderd, *E. coli* met gemiddeld 2,4 logeenheden en MS2 fagen met 1,7 logeenheden. De resultaten zijn gebruikt om een rekenmodel voor langzame zandfiltratie te valideren.

Implementatie: betere borging van veiligheid drinkwater De Punt

Waterbedrijf Groningen kan de resultaten van dit onderzoek gebruiken voor de AMVD om aan te tonen dat de veiligheid van het drinkwater onder de huidige omstandigheden voldoet aan de wettelijke eisen. De validatie van het model betekent dat het ook kan worden gebruikt om de veiligheid onder andere condities te borgen, zoals bij lage temperaturen of een hogere belasting.

Zo is met een relatief bescheiden proefopstelling een stevige basis gelegd voor de borging van de drinkwaterkwaliteit. De proefopzet biedt de mogelijkheid om het model nog beter te valideren, bijvoorbeeld voor andere condities.

Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Verwijdering MS2 bacteriofagen, E. coli en Cryptosporidium door langzame zandfiltratie, kolomexperimenten De Punt 2018* (BTO 2019.026).

Jaar van publicatie
2019

Meer informatie
Dr. Ir. Patrick Smeets
T 030 60 69 584
E patrick.smeets@kwrwater.nl

Langzame zandfiltratie,
microbiologische veiligheid,
hygiëne, drinkwaterzuivering,
Cryptosporidium, E. coli, MS2

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR Watercycle
Research
Institute

BTO 2019.026 | Mei 2019 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, 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.

Inhoud

Inhoud	1
1 Inleiding	2
1.1 Aanleiding	2
1.2 Doel	2
1.3 Motivering	2
2 Proefopzet	3
2.1 Methoden	3
2.2 Proefcondities	6
2.3 Modellerings langzame zandfiltratie	6
3 Resultaten	7
3.1 Testen doorstroming	7
3.2 Verwijdering <i>Cryptosporidium</i>	7
3.3 Verwijdering <i>E. coli</i>	8
3.4 Verwijdering <i>MS2</i>	9
4 Vertaling naar praktijk met procesmodel langzame zandfiltratie	10
4.1 Vertaling van kolomproef De Punt naar praktijk	10
5 Conclusies en aanbevelingen	11
5.1 Conclusies	11
6 Referenties	12
Bijlage I Schema kolomopstelling	13
Bijlage II Voorbeeld berekening LZF model RIVM	14

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In het kader van de Analyse Microbiologische Veiligheid Drinkwater (AMVD) moet Waterbedrijf Groningen (WBG) aantonen dat het geproduceerde water voldoet aan de grenswaarde voor het infectierisico van 1 infectie per 10.000 personen per jaar. Verwijdering van ziekteverwekkende micro-organismen (pathogenen) door langzame zandfiltratie (LZF) kan op locatie De Punt hieraan een belangrijke bijdrage leveren. Direct meten van de verwijdering in de praktijk is onmogelijk gebleken omdat het water vóór LZF al weinig micro-organismen bevat. In voorgaand BTO onderzoek in 2016 is in een kolomopstelling de langzame zandfiltratie op De Punt vergeleken met die op Weesperkarspel. Daarmee is de vertaling van kolomexperimenten naar de praktijk geborgd. Daarbij bleek het langzame zandfilter van De Punt effectiever dan tot dan toe gedacht. Dit was aanleiding om ook de verwijdering van virussen en bacteriën te onderzoeken.

1.2 Doel

Doel is om middels kolomexperimenten te komen tot een goed onderbouwde hechtingsefficiëntie voor virussen (MS2 bacteriofagen), bacteriën (*E. coli*) en protozoa (*Cryptosporidium*) voor locatie de Punt waarmee de effectiviteit van de langzame zandfiltratiefilters in de praktijk kan worden berekend.

1.3 Motivering

Met de huidige aannames voor de *Cryptosporidium* verwijdering door LZF De Punt wordt de effectiviteit waarschijnlijk onderschat. Daardoor zou het in de AMVD berekende theoretische infectierisico onder specifieke condities mogelijk niet voldoen aan de grenswaarde. Het voorkómen van deze condities leidt tot ongewenste beperkingen in de bedrijfsvoering van De Punt. Op basis van literatuur zou juist worden verwacht dat de LZF tot een veiligheidsmarge voor het infectierisico leidt. Resultaten van het onderzoek zijn daarom van belang voor de bedrijfsvoering en de mate van zekerheid over de veiligheid van het drinkwater.

2 Proefopzet

2.1 Methoden

2.1.1 Kolommen

De experimenten zijn uitgevoerd in kolommen opgesteld in de proefhal van KWR in Nieuwegein. Daarbij is gestreefd naar een situatie die overeen komt met de eerdere proef (2018) voor de langzame zandfilters op De Punt. Dit heeft geleid tot het volgende ontwerp van de kolomopstelling:

- Kolommen bestaan uit doorzichtig perspex buis
- Kolommen zijn 80 cm hoog
- Binnen diameter van de kolommen is 10 cm
- Uitstroomopening van kolom is 10 cm boven het zandbed om voldoende bovenwaterstand te creëren
- Watertoevoer vindt plaats met slangenpompen via silicone slangen
- Kolommen zijn afgedekt met zwarte kunststof hoezen om invloed van daglicht te voorkomen

2.1.2 Zand en water

Er is gewerkt met zand en water van productielocatie De Punt om de praktijkcondities zo goed mogelijk te benaderen. Hiervoor is de volgende aanpak gevolgd:

- Hoogte van het zandbed: 40 cm
- Hoogte bovenwaterstand: circa 10 cm om verstoring zandbed door inkomend water te voorkomen
- Zand afkomstig van De Punt
- Zand is voor het aanbrengen gezeefd (verwijdering grove delen)
- Zand is in kleine hoeveelheden in de kolom gebracht terwijl er water in de kolom stond
- De kolom is gespoeld om schmutzdecke, organisch materiaal en ander fijn materiaal te verwijderen
- Vervolgens is de kolom gerold en gekanteld om het zandbed te mengen (na spoeling treedt stratificatie van de korrelgrootte op)
- Bezonken materiaal vormt een bovenlaag op het filter, dit is verwijderd door 'afzuigen'
- Korrelgrootteverdeling is gebaseerd op eerdere metingen door WLN bij de proef in 2016
- De porositeit is gebaseerd op eerdere metingen bij de proef in 2016
- Het water is afkomstig van locatie De Punt
- Water is vervoerd in kunststof tanks en opgeslagen in zwarte kunststof tanks bij juiste temperatuur en zonder direct daglicht



FIGUUR 2-1 BEZINKSEL OP HET FILTER, DIT IS VOOR DE PROEF VERWIJDERD DOOR AFZUIGEN

Het experiment was in december 2018 gepland. Vanwege werkzaamheden op De Punt is het filterzand echter al op 8 augustus uit het langzame zandfilter op De Punt gehaald. Op 10 augustus is het zand in een emmer met tap opgeslagen in de koeling bij 6°C. Om de ingewerkte conditie van het zand te behouden is het onder een laag water opgeslagen. Het water werd wekelijks vervangen door het water af te tappen en vers kraanwater toe te voegen. Het zuurstofgehalte van het afgetapte water werd daarbij gemeten en bedroeg circa 5 mg/l. Op 3 september is het zand gezeefd en op 8 september in de kolommen gebracht. Vanaf dat moment is de kolom doorstroomd met influent langzame zandfiltratie van De Punt op een lage stroomsnelheid. Op 22 november zijn de zoutdoorbraakcurves bepaald. Van 10 tot 12 december zijn de doseerexperimenten met micro-organismen uitgevoerd. Voor de korrelgrootteverdeling en porositeit van het filtermateriaal is uit gegaan van de bepalingen in 2016 (zie BTO 2016.091).

2.1.3 In bedrijf stelling en testen doorstroming

De kolommen worden voorzichtig in bedrijf genomen om ongewenste effecten zoals dichtslaan van het filterbed te voorkomen. Vervolgens is de doorstroming gecontroleerd om kortsluitstroming uit te sluiten. Hiervoor zijn de volgende stappen gevolgd:

- Zodra kolommen gevuld waren is gestart met het inlopen van de filters met 1,5 cm/h

- Een deel van het water is na filtratie teruggeleid in het voorraadvat om waterverlies tegen te gaan
- Voorafgaand aan de proef is de flow langzaam opgevoerd tot de gewenste instelling van de test is bereikt.
- De drukval over de kolom is daarbij geregistreerd als het verschil tussen bovenwaterstand en hoogte uitstroomopening
- Voorafgaand aan toevoeging van MS2 fagen, *E. coli* en *Cryptosporidium* wordt de verblijftijdspreiding met een zoutexperiment bepaald
- De zoutoplossing bestaat uit 0,5 gr NaCl/L opgelost in water afkomstig van de Punt en is gedurende 1 uur gedoseerd
- Het zoutgehalte van het effluent is continu gemeten met een EGV-meter vanaf de start van de dosering
- Na toediening van het zout is de kolom weer gevoed met het normale water om het zoute water af te voeren
- De EGV-meting liep door totdat de geleidbaarheid terug is op het niveau zonder zoutdosering
- De EGV van de zoutoplossing is met dezelfde EGV meter bepaald

2.1.4 Dosereren MS2 fagen, *E. coli* en *Cryptosporidium* en meten filtraat

Na deze voorbereidingen is de eigenlijke proef uitgevoerd om de verwijdering van MS2 fagen, *E. coli* en *Cryptosporidium* te bepalen:

- Enkele dagen na de zouttoediening wordt aangevangen met de dosering van micro-organismen
- De doseersuspensie omvat een mengsel van de volgende micro-organismen
- Er wordt gebruik gemaakt van *Cryptosporidium parvum* van Bovine (kalveren) herkomst (leverancier Waterborne), de levende cellen worden voorafgaand aan de dosering afgedood d.m.v. UV.
- Er wordt gebruik gemaakt van MS2 bacteriofagen met als gastheer *Salmonella typhimurium* (WG49)
- Er wordt gebruik gemaakt van *E. coli* stam WR1 opgekweekt op een rijk medium (LLB 8,0) gedurende 3 dagen tot de stationaire fase. Vervolgens zijn de bacteriën gewassen en opgelost in drinkwater en dezelfde dag gebruikt voor dosering aan de kolommen.
- Deze micro-organismen worden minimaal in een concentratie van 10^6 organismen/l gedoseerd om ruim 6 log verwijdering te kunnen aantonen. De concentratie in de doseersuspensie is in drievoud bepaald, voor, tijdens en na het doseren.
- Er is gedurende twee uur gedoseerd
- Voor en na de dosering zijn de doseervaten bemonsterd om de influentconcentratie te controleren
- Het filtraat is vanaf de start van de dosering continu opgevangen, zodat het doorbraakmoment niet kon worden gemist. Er is gestart met kleine volumes, daarna is het volume vergroot, met 1 verzamelmonster gedurende de nacht. Vervolgens zijn overdag weer kleinere monstervolumes genomen.
- Een selectie van de eerste monsters is al tijdens de proef geanalyseerd om te bepalen of doorslag heeft plaatsvonden

- Afhankelijk van tussenresultaat (doorbraak voldoende gekwantificeerd?) is de monstername voortgezet in grotere volumes.
- Vervolgens is bepaald welke overige monsters worden geanalyseerd en welk volume
- Monsters zijn geanalyseerd conform KWR analysevoorschriften (LMB031). Bij lage concentraties worden grotere monstervolumes eerst geconcentreerd door filtratie of met de hemoflowmethode.

2.2 Proefcondities

In Tabel 2-1 staat een overzicht van de relevante parameters tijdens de proef.

TABEL 2-1 PROCESKENTALLEN KOLOMPROEF

	De Punt Kolom 1	De Punt Kolom 2	
Binnendiameter	0.10	0.10	m
Oppervlak zandbed	0.0079	0.0079	m ²
Filtratiesnelheid	0.219	0.226	m/h
Debiet	1.72	1.78	l/h
Hoogte zandbed	0.400	0.405	m
Bruto volume zandbed	3.14	3.18	l
Porositeit	35.0%	35.0%	-
Bovenwaterstand	0.11	0.1	m
Volume bovenwater	0.86	0.79	l
Netto porievolume zandbed	1.10	1.11	l
Netto watervolume kolom	1.96	1.90	l
Verblijftijd kolom	1.14	1.07	h
Verblijftijd kolom	68.4	64.0	min

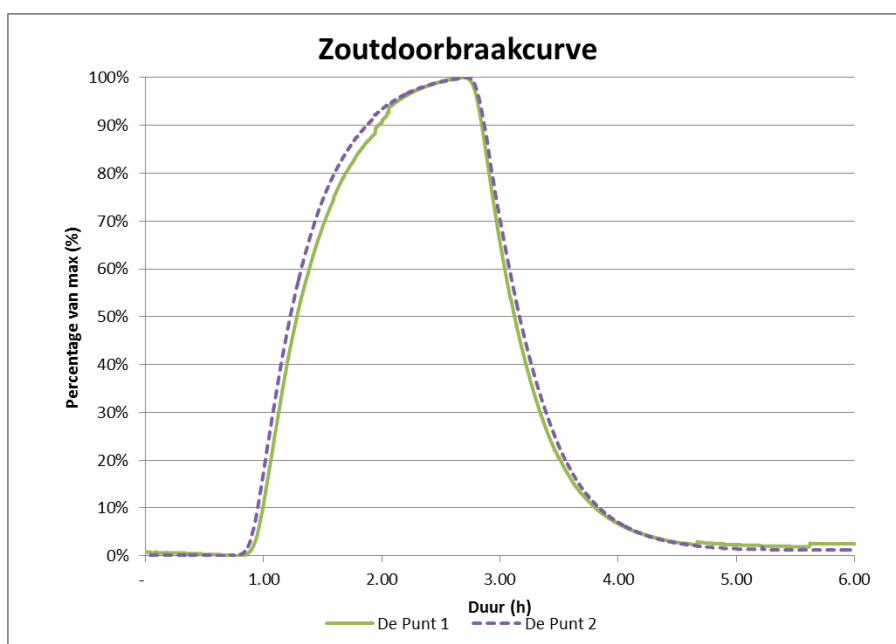
2.3 Modelleren langzame zandfiltratie

Voor het modelleren van langzame zandfiltratie is de RIVM tool in Mathematica gebruikt (SSFmod13042017.nb). Voor het bepalen van de hechtingsefficiëntie is deze handmatig aangepast totdat de gemodelleerde log verwijdering overeenkwam met de gemeten log verwijdering.

3 Resultaten

3.1 Testen doorstroming

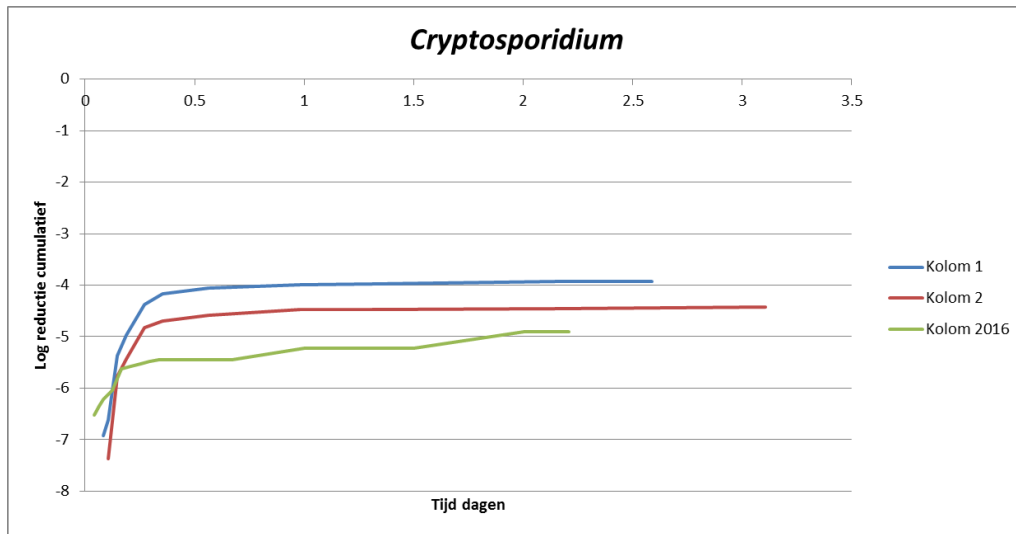
De zoutdoorbraakcurves voor beide kolommen laten een zeer vergelijkbaar patroon zien (Figuur 3-1). In het bovenwater vindt menging plaats, waardoor de concentratie in het bovenwater op het filterbed geleidelijk toeneemt terwijl de concentratie in het toegevoerde water in één stap toeneemt. De doorbraakcurves laten zien dat er geen meetbare kortsluitstroming optreedt en dat beide kolommen zich vrijwel identiek gedragen.



FIGUUR 3-1 ZOUDOORBRAAKCURVES FILTERKOLOMMEN

3.2 Verwijdering *Cryptosporidium*

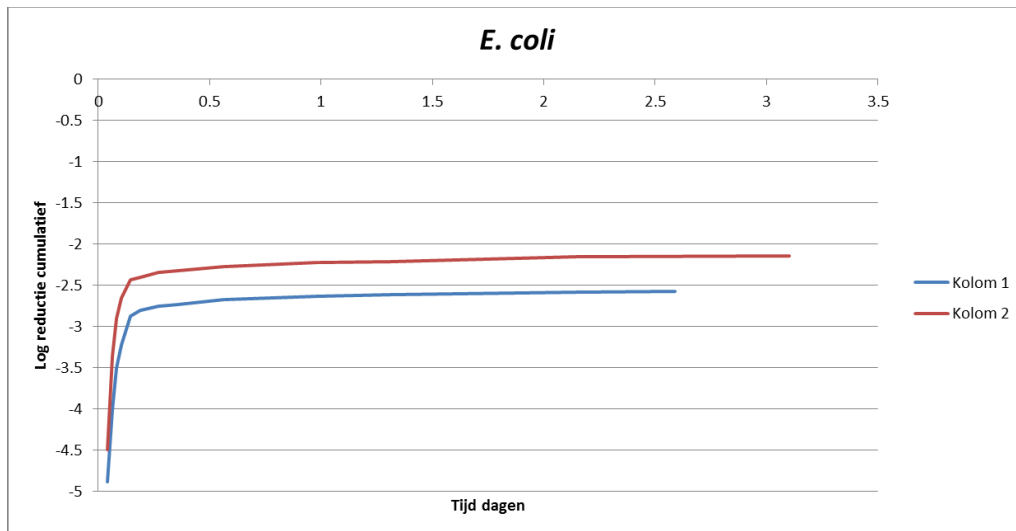
De doseerconcentratie van *Cryptosporidium* bedroeg $2,3 \cdot 10^7$ tot $2,9 \cdot 10^7$ oöcysten/l met een gemiddelde van $2,5 \cdot 10^7$ oöcysten/l. De effectiviteit van het filter wordt bepaald door het totale aantal organismen in het filtraat te delen door het totale aantal gedoseerde organismen. In Figuur 3-2 is de 'cumulatieve' log-verwijdering in de tijd weergegeven. Deze wordt grotendeels bepaald door de piekconcentratie in het filtraat, en in mindere mate door de 'staart' van de doorslag. Deze duurt weliswaar lang, maar de concentratie is zo laag dat deze weinig invloed heeft op het totale aantal *Cryptosporidium* in het filtraat. Kolom De Punt 1 bereikt zo 3,9 log en De Punt 2 4,4 log verwijdering. Dit is wat lager dan in de proef van 2016 toen de totale verwijdering 4,9 log bedroeg. *Cryptosporidium* werd aangetroffen na 1,5 resp. 2 uur, wat later is dan bij de eerdere proef en ook later dan voor *E. coli* en MS2 is waargenomen in deze proef.



FIGUUR 3-2 CUMULATIEVE LOG-VERWIJDERING VAN CRYPTOSPORIDIUM DOOR DE FILTERKOLOMMEN

3.3 Verwijdering *E. coli*

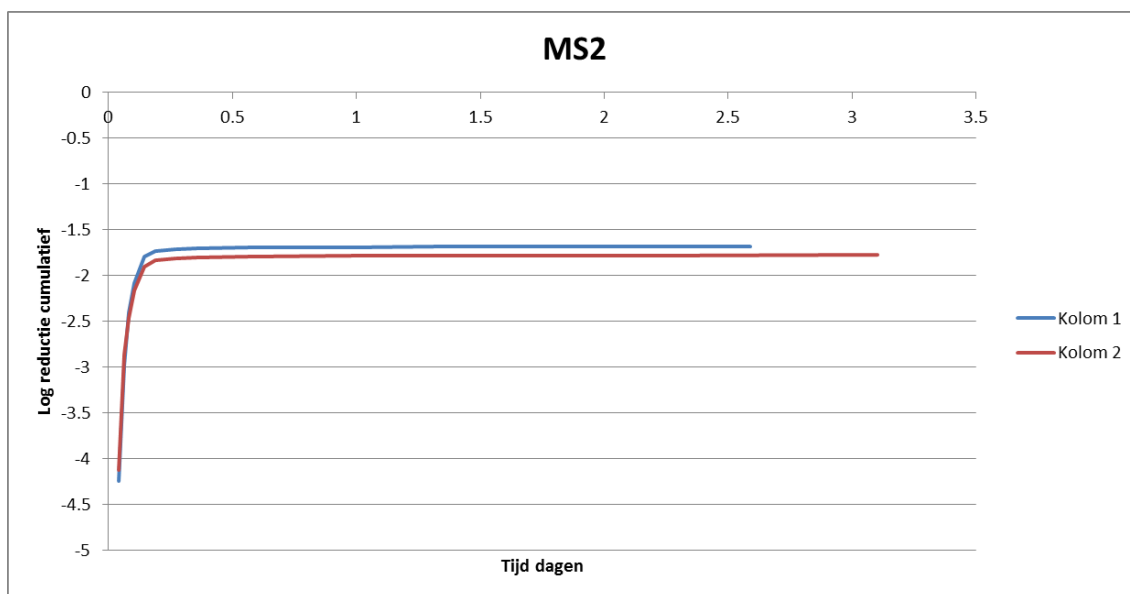
De doseerconcentratie van *E. coli* bedroeg $1,3 \cdot 10^8$ tot $2,4 \cdot 10^8$ kve/l met een gemiddelde van $1,7 \cdot 10^8$ kve/l. In Figuur 3-3 is de 'cumulatieve' log-verwijdering van *E. coli* in de tijd weergegeven. Kolom De Punt 1 bereikt zo 2,6 log en De Punt 2 2,1 log verwijdering. *E. coli* wordt zoals verwacht minder goed verwijderd dan *Cryptosporidium*. Nu verwijderd echter kolom 1 beter dan kolom 2, andersom dan bij *Cryptosporidium*. *E. coli* werd bij beide kolommen na 1 uur aangetroffen.



FIGUUR 3-3 CUMULATIEVE LOG-VERWIJDERING VAN E. COLI DOOR DE FILTERKOLOMMEN

3.4 Verwijdering MS2

De doseerconcentratie van MS2 bacteriofagen bedroeg $1,6 \cdot 10^8$ tot $1,8 \cdot 10^8$ pve/l met een gemiddelde van $1,7 \cdot 10^8$ pve/l. In Figuur 3-4 is de 'cumulatieve' log-verwijdering van MS2 bacteriofagen in de tijd weergegeven. Kolom De Punt 1 bereikt zo 1,7 log en De Punt 2 1,8 log verwijdering. MS2 bacteriofagen worden zoals verwacht minder goed verwijderd dan *E. coli* en *Cryptosporidium*. Beide filters vertonen een vrijwel identiek verloop van de log verwijdering. MS2 bacteriofagen werden bij beide kolommen na 1 uur aangetroffen.



FIGUUR 3-4 CUMULATIEVE LOG-VERWIJDERING VAN MS2 BACTERIOFAGEN DOOR DE FILTERKOLOMMEN

4 Vertaling naar praktijk met procesmodel langzame zandfiltratie

4.1 Vertaling van kolomproef De Punt naar praktijk

De resultaten van de kolomexperimenten voor De Punt zijn weergegeven in Tabel 4-1. Met behulp van SSFmod (RIVM) zijn uit de proefcondities en de log verwijdering de hechtingsefficiënties voor de verschillende organismen berekend. Uit de resultaten volgt uit de nieuwe experimenten een wat lagere hechtingsefficiëntie voor *Cryptosporidium* dan in 2016, omdat de waargenomen verwijdering ook lager was. Op dezelfde wijze zijn hechtingsefficiënties afgeleid voor *E. coli* en MS2. In 2016 is voor *Cryptosporidium* een correctiefactor van 0,688 afgeleid voor vertaling van de proef naar de praktijk, op basis van vergelijking met Weesperkarspel. Deze correctiefactor is hier ook toegepast voor *E. coli* en MS2 bacteriofagen. In de laatste kolom is de verwachte verwijdering in de praktijk berekend op basis van deze gecorrigeerde hechtingsefficiëntie.

TABEL 4-1 RESULTATEN DE PUNT KOLOMPROEVEN EN BEREKENDE VERWIJDERING PRAKTIJKFILTERS

Experiment	Filterkolom De Punt 1	Filterkolom De Punt 2	Filterkolom De Punt november 2016	Praktijkfilters De Punt Berekend 2016/2018
Datum	10 december 2018	10 december 2018	november 2016	Berekend 2016/2018
Korrelgrootte zand d50 (mm)	0,55	0,55	0,55	0,55
Diepte filterbed (m)	0,400	0,405	0,405	1,0
Filtratiesnelheid (m/uur)	0,22	0,23	0,36	0,17
Temperatuur (°C)	19,5	19,5	19,5	19,5
Leeftijd schmutzdecke (d)	18	18	17	17
Porositeit	0,35	0,35	0,35	0,35
Verwijdering (°log)				
<i>Cryptosporidium</i>	3,9	4,4	4,9	8,7
<i>E. coli</i>	2,6	2,1	-	2,9
MS2	1,7	1,8	-	3,4
Hechtingsefficiëntie				
α	0,65	0,76	0,95	0,65
<i>Cryptosporidium</i>	0,60	0,45	-	0,36
<i>E. coli</i>	0,055	0,058	-	0,039
MS2				

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

De kolomexperimenten hebben bevestigd dat een langzame zandfilter met een jonge schmutzdecke zeer effectief *Cryptosporidium* kan verwijderen. De eerdere kolomproef voor De Punt in 2016 en de huidige duplo experimenten zijn onder vergelijkbare omstandigheden uitgevoerd. De waargenomen log verwijdering bedroeg 3,9, 4,4 en 4,9, wat enerzijds de effectiviteit bevestigd. Anderzijds geeft het verschil in resultaten aan dat resultaten niet exact reproduceerbaar zijn. Blijkbaar leiden kleine verschillen in condities, zoals de pakking van het zandbed tot waarneembare verschillen. De verwijdering van *E. coli* en MS2 bacteriofagen kwam vrijwel overeen bij de twee uitgevoerde experimenten. Doordat minder verwijdering optreedt, is deze mogelijk minder gevoelig voor kleine afwijkingen tussen filterkolommen. De resultaten geven een basis voor het schatten van de log verwijdering in de praktijk.

6 Referenties

Hijnen, W. Proefplan Langzame zandfiltratie Cryptosporidium De Punt, Stuknummer TGHV 14-04-12. 2014

Hijnen, W., J. Schijven, H. van den Berg, A. H. Brouwer-Hanzens, M. H. A. Wind, Y. Dullemont, G. Wubbels and W. Oorthuizen (2013). Procesmodel voor de eliminatiecapaciteit van langzame zandfiltratie voor virussen en bacteriën en de rol van predatie in de verwijdering van micro-organismen Nieuwegein, KWR: 69.

Medema, G., F. Schets, P. Teunis and A. Havelaar (1998). "Sedimentation of Free and Attached Cryptosporidium Oocysts and Giardia Cysts in Water." Applied and Environmental Microbiology 64(11): 4460-4466.

Schijven, J. F., H. H. van den Berg, M. Colin, Y. Dullemont, W. A. Hijnen, A. Magic-Knezev, W. A. Oorthuizen and G. Wubbels (2013). "A mathematical model for removal of human pathogenic viruses and bacteria by slow sand filtration under variable operational conditions." Water research 47(7): 2592-2602.

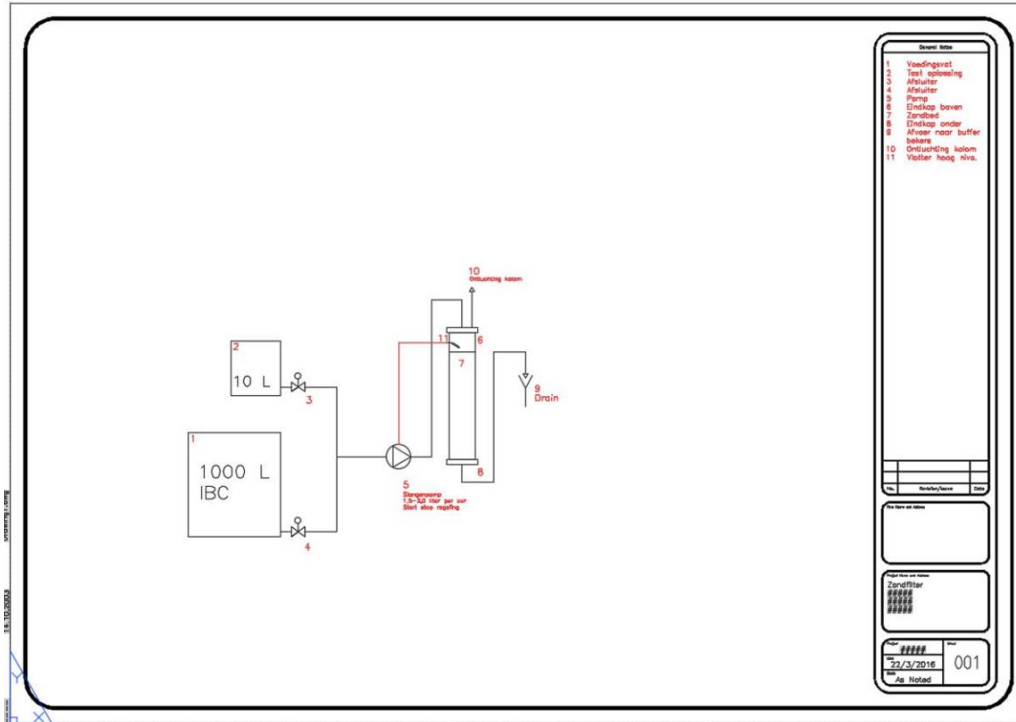
Smeets, P. W. M. H., W. A. M. Hijnen and A. J. Brouwer-Hanzens (2015). Bepaling van de hechtingsefficiëntie voor de verwijdering van Cryptosporidium oöcysten door de langzame zandfilters van de Punt (Groningen) en Weesperkarspel (Waternet). Nieuwegein, KWR: 33.

Smeets, P., Kardinaal, E. and Brouwer, A. (2016) Verwijdering Cryptosporidium door langzame zandfiltratie, kolomexperimenten De Punt en Weesperkarspel, KWR, Nieuwegein.

Tufenkji, N. and M. Elimelech (2004). "Correlation equation for predicting single-collector efficiency in physicochemical filtration in saturated porous media." Environmental science & technology 38(2): 529-536.

Vissink, E. (2016). Modelling the removal of microorganisms by slow sand filtration. MSc, Utrecht University.

Bijlage I Schema kolomopstelling



Bijlage II Voorbeeld berekening LZF model RIVM

Met trial en error de sticking efficiency aangepast zodat de log verwijdering wordt berekend die overeen komt met de resultaten van de kolomproef.

SSFmod13042017.cdf *

National Institute for Public Health and the Environment
Ministry of Health, Welfare and Sport

Home Conditions Removal Beta Point Help

Presets

Average grain size	d_c	0.55	mm
Filterbed depth	z	100	cm
Filtration rate	u	17	cm/h
Water temperature	T	19.5	°C
Schmutzdecke age	a	18	days
Porosity	n	0.35	
Sticking efficiency α	Bacteriophage MS2	0.039	
Sticking efficiency α	E. coli WR1	0.36	
Sticking efficiency α	Crypto (deer)	0.65	
Sticking efficiency α	Crypto (bovine)	0.65	
Schmutzdecke formation	f_0	0.00018	m/°C
Schmutzdecke formation	f_1	0.081	dag ⁻¹
Removal $-\log_{10} C/C_0$	Bacteriophage MS2	3.4	
Removal $-\log_{10} C/C_0$	E. coli	2.9	
Removal $-\log_{10} C/C_0$	Crypto (deer)	8.3	
Removal $-\log_{10} C/C_0$	Crypto (bovine)	8.3	

ln[1]=