Modellering van de verwijdering van pathogene micro-organismen bij bodempassage

Samenvatting
Bodempassage (kunstmatige infiltratie en oeverfiltratie) vormt een belangrijke barrière tegen pathogene micro-organismen, die zich in het oppervlaktewater bevinden.
De verwijdering van virussen en parasitaire protozoa wordt hierbij als maatgevend beschouwd daar deze organismen lang kunnen overleven en in kleine doses infectieus zijn.
Pathogene micro-organismen worden bij de bodempassage verwijderd door hechting aan gronddeeltjes en door afsterving. Op basis van een literatuurstudie is een wiskundig model geformuleerd dat de verwijdering van pathogene micro-organismen tijdens bodempassage beschrijft. Met dit model is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om een indruk te krijgen van de invloed van verschillende parameters op het verwijderingsproces.
In Nederland wordt bij bodempassage momenteel een verblijftijd van 60 dagen aangehouden om de hygiënische betrouwbaarheid van drinkwater te waarborgen. Uitgaande van conservatieve schattingen van de modelparameters kan uit de berekeningsresultaten echter geconcludeerd worden, dat een voldoende verwijdering van pathogene micro-organismen ook bij kortere verblijftijden is te bewerkstelligen.

Inleiding
Ongeveer 33% van het Nederlandse drinkwater wordt geproduceerd uit oppervlaktewater. Door de groei van de consumptie van drinkwater en de terugdringing van het gebruik van grondwater, zal in de toekomst in toenemende mate gebruik gemaakt moeten worden van oppervlaktewater als bron van drinkwater.
Door directe afvalwaterlozingen, overstorten van riolen en uitspoeling van mest wordt het oppervlaktewater belast met pathogene micro-organismen, welke verwijderd zullen moeten worden. Bodempassage is hierbij zeer effectief gebleken, waardoor chemische desinfectie achterwege kan blijven.

P. W. M. H. SMEETS
TU-Delft
thans werkzaam bij DHV Water BV

J. F. SCHIJVEN
RIVM

L. C. RIETVELD
TU-Delft

- Infiltratie:
  - 7 infiltratiegebieden
  - 13,6% van totale jaarlijkse produktie: $179*10^6$ m^3/jaar
- Oeverinfiltratie
  - 26 pompstations
  - 5,6% van totale jaarlijkse produktie: $73*10^6$ m^3/jaar
  - afstand tot oppervlaktewater: 30-1500 m

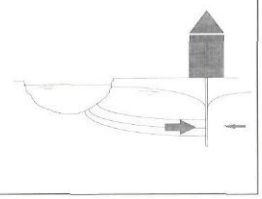
Afb. 1 - Overzicht bodempassage in Nederland.

In Nederland wordt uitgegaan van een minimale verblijftijd van 60 dagen om na bodempassage hygiënisch betrouwbaar water te verkrijgen [2].
Deze verblijftijd is echter niet altijd haalbaar en onderzocht moet worden of met kortere verblijftijden een voldoende verwijdering van pathogene micro-organismen verkregen kan worden. Daarbij moet rekening gehouden worden met de toekomstige norm voor de hygiënische betrouwbaarheid, die geënt is op risicoschatting [3].

De benodigde verwijdering van pathogene micro-organismen wordt bepaald aan de hand van de ruwwaterkwaliteit van het oppervlaktewater en de acceptabele concentratie in drinkwater (op grond van risicoschatting).
Deze benodigde verwijdering ligt maximaal rond de 7-8 logaritmische eenheden [4].
De toelaatbare concentraties in het geproduceerde drinkwater op basis van een infectierisico zijn voor pathogene micro-organismen, zoals virussen en parasitaire protozoa, niet direct meetbaar. Kwaliteitscontrole door eindproductcontrole is dus in de praktijk moeilijk of niet uitvoerbaar. De eindproductcontrole voor pathogene micro-organismen bij drinkwater moet dan ook worden vervangen door grondstofcontrole gekoppeld aan een verzekerde, gewaarborgde en controleerbare werking van de zuivering [5].
Modellering van de zuivering kan een hulpmiddel zijn om meer inzicht te krijgen in de parameters die van belang zijn voor de optimale werking van het zuiveringsproces. Als een model voldoende is gekalibreerd kan ook een voorspelling van de kwaliteit van het geproduceerde water worden bepaald.
Het in dit artikel gepresenteerde onderzoek is gericht op het theoretisch bepalen van de verwijdering van pathogene micro-organismen die optreedt bij bodempassage [6].
Op basis van literatuuronderzoek is een model geformuleerd en is een schatting gemaakt van de parameters die voor de Nederlandse situatie zouden kunnen gelden. Vervolgens is gekeken of een voldoende verwijdering bewerkstelligd zou kunnen worden, uitgaande van een decimale eliminatie van 8 eenheden. Hierbij wordt bij de rekenvoorbeelden alleen ingegaan op de verwijdering van virussen bij bodempassage.

Bodempassage van pathogene micro-organismen
Bij bodempassage van ruw of voorbehandeld oppervlaktewater zal een transport en een verwijdering van pathogene micro-organismen plaatsvinden.
Het water zal vanuit het oppervlaktewater (rivier, infiltratiepand) via een sliblaag in de ondergrond infiltreren.
Pathogene micro-organismen worden met het infiltratiewater getransporteerd door de bodem. Het transport van het infiltratiewater wordt gekarakteriseerd door een gemiddelde snelheid (advectie) en een spreiding rond het gemiddelde (dispersie). Bacteriën kunnen zich eventueel nog op eigen kracht voortbewegen, maar dit is voor virussen, oöcysten van *Cryptosporidium* en cysten van *Giardia* niet het geval.
Vertraging (retardatie) van het transport van pathogene micro-organismen treedt op als reversibele hechting aan de gronddeeltjes plaatsvindt, waardoor ze tijdelijk gehecht zijn om vervolgens weer aan de vloeistof afgegeven te worden.
Verwijdering van pathogene micro-organismen heeft in de ondergrond plaats door filtratie en afsterving.

- Advectie
- Dispersie
- Eigen beweging
- Vertraging
- Filtratie
- Afsterving



Afb. 2 - Mechanismen voor transport en verwijdering van pathogene micro-organismen bij bodempassage.

Modellering van transport door bodem
In veel (lokale) gevallen kan de werkelijke stromingssituatie geschematiseerd worden als een één-dimensionale stroming in de ondergrond.

Bij oeverfiltratie is dit bijvoorbeeld acceptabel als de puttenrij voldoende lang is en evenwijdig aan de oever loopt en als het oppervlaktewater voldoende diep is ten opzichte van het aquifer.
De algemene vergelijking voor één-dimensionale stroming is:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{u}{R}\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{D}{R}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k\frac{u}{R}C - \lambda C \quad [7]$$

Als aangenomen wordt dat zich een stationaire situatie heeft ingesteld, geen retardatie optreedt en de longitudinale dispersie verwaarloosd kan worden kan deze vergelijking gereduceerd worden tot:

$$\frac{\partial C}{\partial x} - kC - \frac{\lambda}{u}C$$

Deze vergelijking heeft een analytische oplossing:

$$C = C_0 e^{-(\frac{\lambda}{u} - k)x}$$

ofwel

$$DE = -\log\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2{,}3}\left(\frac{\lambda}{u} - k\right)x$$

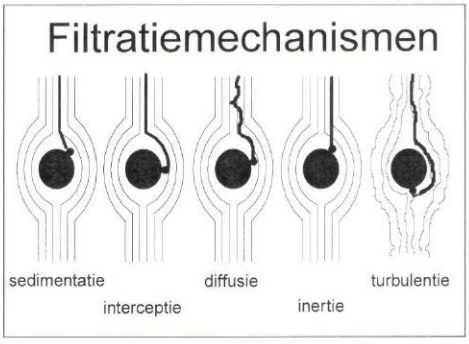
C:	concentratie micro-organismen (PVE/l)
C_0:	concentratie in ruwwater (PVE/l)
d:	grootte gronddeeltje (m)
d_p:	grootte colloïde (m)
D:	dispersiecoëfficiënt (m^2/s)
D_{BM}	Brownse diffusiecoëfficiënt (m^2/s)
H:	Hamaker constante: 10^{-20} J
k:	filtratiecoëfficiënt (1/m)
p:	porositeit grond (-)
R:	retardatiefactor (-)
u:	poriesnelheid water (m/s)
α:	hechtingsefficiëntie (-)
λ:	afstervingsconstante (1/s)
μ:	dynamische viscositeit (Ns/m^2)
η:	single collector efficiency (-)
ρ:	dichtheid water (kg/m^3)
ρ_p:	dichtheid colloïde (kg/m^3)

Afb. 3 - Symbolen gebruikt in formules.

De filtratie-afstand x en de filtratiesnelheid u zijn ontwerpparameters van een bodempassageproject.
De decimale eliminatie (DE) wordt dan bepaald door de afstervingscoëfficiënt λ, (die experimenteel wordt bepaald) en de filtratiecoëfficiënt k.
De filtratiecoëfficiënt (k) kan geschreven worden als:

$$k = \frac{3}{2}\left(\frac{1-p}{d}\right)\alpha\,\eta$$

Hierin geeft de 'single collector efficiency' η de kans van botsen tussen een colloïde (micro-organisme) en een gronddeeltje weer. Deze kan theoretisch worden bepaald



Afb. 4 - Mechanismen van filtratie van colloïden.

aan de hand van de filtratiemechanismen (zie afb. 4). Voor de bepaling van η spelen de volgende fysische eigenschappen een rol: de grootte van het gronddeeltje (d), de grootte van de colloïde (d_p), de dichtheid van de colloïde (ρ_p), de poriesnelheid (u), de watertemperatuur (T), de dichtheid van het water (ρ) en de viscositeit van het water (μ).
Verschillende auteurs hebben een relatie voor η afgeleid, waaronder Yao [8] en Martin [9]. In deze studie is het model van Martin gebruikt (zie afb. 5).

$$N_{Lo} = \frac{4H}{9\pi\mu d_p^2 u} \qquad N_G = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho)g}{18\mu u}$$

$$N_R = \frac{d_p}{d} \qquad N_{Pe} = \frac{ud}{D_{BM}}$$

$$A_s = 2(1-\varepsilon^5)/w \qquad w = 2 - 3\varepsilon + 3\varepsilon^5 - 2\varepsilon^6 \qquad \varepsilon = (1-p)^{1/3}$$

$$\eta = 1.0 A_s N_{Lo}^{1/8} N_R^{15/8} + 0.00338 A_s N_G^{1.2} N_R^{-0.4} + 4 A_s^{1/3} N_{Pe}^{-2/3}$$

Afb. 5 - Berekening van 'single collector efficiency' η volgens Martin.

De hechtingsefficiëntie α representeert de kans dat een botsing in permanente hechting resulteert en moet op grond van veldexperimenten worden bepaald.

Toepassing van model op virusverwijdering bij bodempassage
De vrijheidsgraden voor het ontwerp van een puttenveld zijn de afstand van de putten tot het oppervlaktewater en het onttrekkingsdebiet met daaraan gekoppeld de snelheid waarmee het water door het aquifer stroomt. Deze twee parameters bepalen de verblijftijd van het water in de ondergrond.
Als alle parameters, die in het vorige hoofdstuk zijn genoemd bekend zijn, kan een berekening van de DE als functie van de afstand en de verblijftijd gemaakt worden. De meeste parameters zijn echter nog niet exact bekend en daarom worden er aannamen gedaan op basis van conservatieve schattingen uit de literatuur (zie afb. 6).

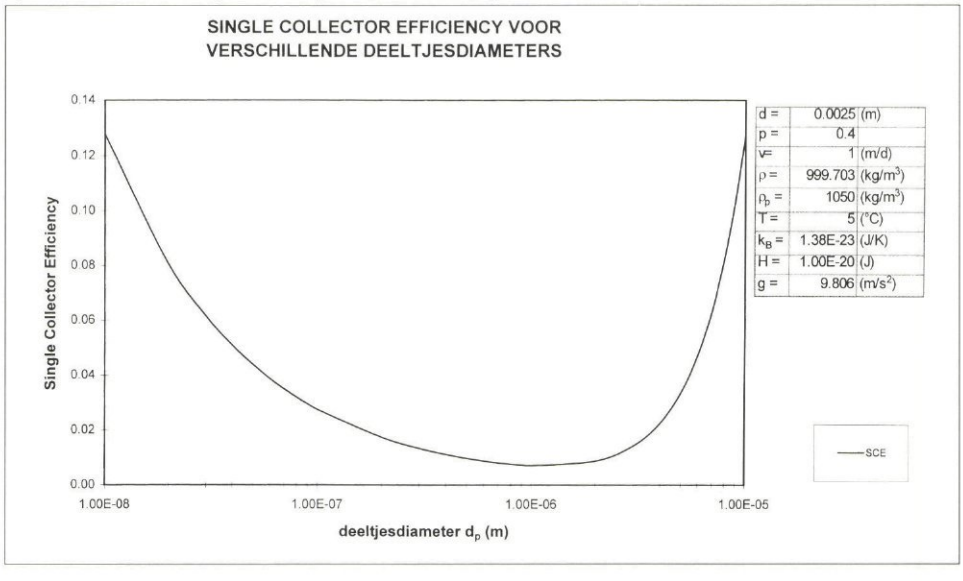
Modelaannamen

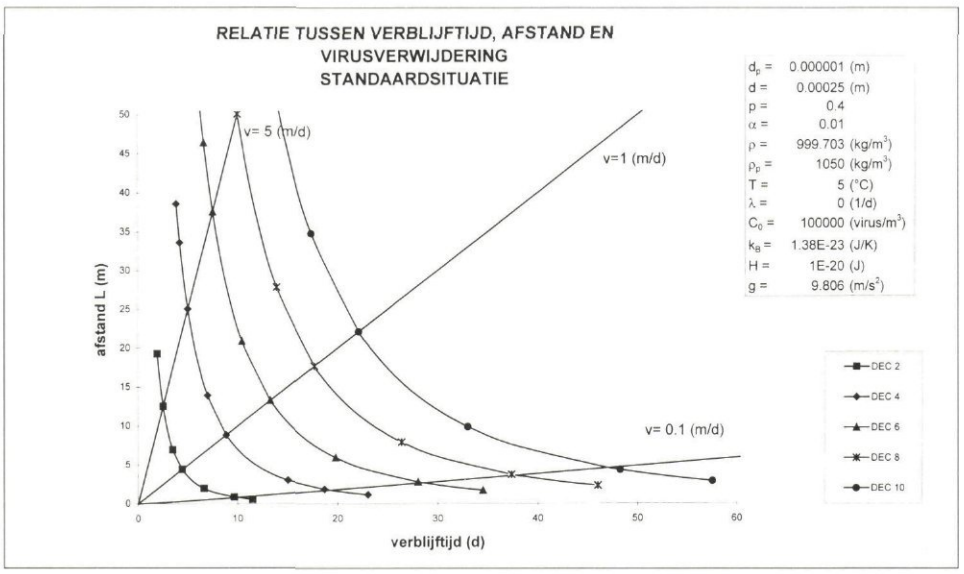
- Korrelgrootte: 0,25 mm (0,1-0,25 mm)
- Porositeit: 0,4
- Temperatuur: 5°C (5-20°C)
- Afsterving: 0 (0,006-0,25 1/d)
- Grootte deeltje: 10^{-6}m
- Hechtingsefficiëntie (voor virussen): 0,01
  - polio1: 0,002-0,07
  - fMS2: 0,005-0,05
  - fPRD1: 0,1-1

Afb. 6 - Aannamen voor berekening virusverwijdering bij bodempassage.

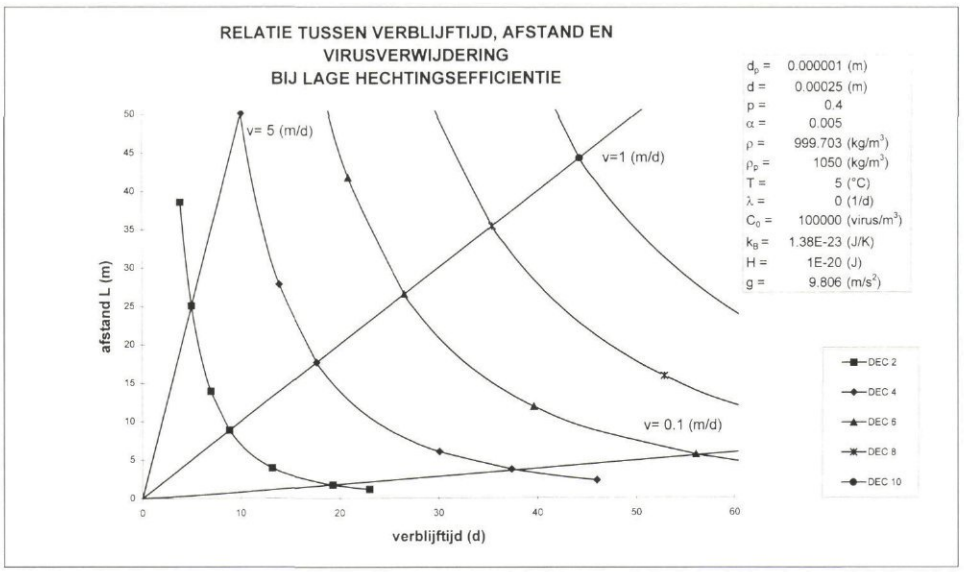
Er is uitgegaan van grof bodem materiaal, een verwaarloosbare afsterving, lage temperaturen en een onvoordelige grootte van het deeltje waaraan een virus is gehecht. Virussen kunnen zich namelijk hechten aan andere, grotere colloïden en daarom is voor de gekozen omstandigheden uitgerekend welke deeltjesgrootte de

Afb. 7 - Relatie tussen 'single collector efficiency' en de deeltjesgrootte van een colloïde.



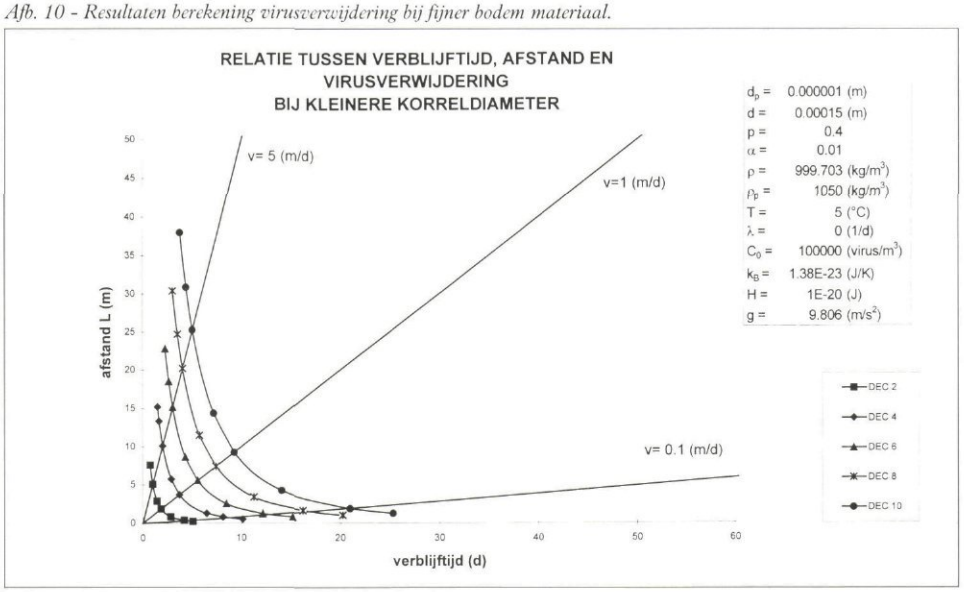


Afb. 8 - Resultaten berekening virusverwijdering onder aangenomen omstandigheden.



Afb. 9 - Resultaten berekening virusverwijdering bij lagere hechtingsefficiëntie.

Afb. 10 - Resultaten berekening virusverwijdering bij fijner bodem materiaal.



laagste botsingsfrequentie η heeft.
Uit afbeelding 7 is af te lezen dat kleine deeltjes een grotere botsingskans hebben, wat komt door de Brownse beweging. Grotere deeltjes worden makkelijker verwijderd door een grotere bezinksnelheid. Voor de gekozen omstandigheden ligt de kritieke deeltjesgrootte tussen de 1 en 2 μm.
De waarde voor de hechtingsefficiëntie van virussen is uit de literatuur gedestilleerd. Hierbij moet worden aangetekend dat het vaak experimenten met afvalwater betrof en dat bij de berekening van de α uitgegaan werd van vrij voorkomende virussen.
De berekeningen met de aangenomen waarden zijn weergegeven in afbeelding 8. Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij een filtratiesnelheid van 1 m/d een verblijftijd van 18 dagen voldoende is voor een decimale eliminatie van 8 eenheden. Wordt een hogere stroomsnelheid toegepast dan kan men met een kortere verblijftijd volstaan om hetzelfde resultaat te bereiken. Met een filtratiesnelheid van 5 m/d is 10 dagen verblijftijd voldoende.
In dit geval is de filtratie-afstand echter aanzienlijk langer (50 m t.o.v. 18 m).
De hechtingsefficiëntie α wordt experimenteel bepaald en geldt zo als ijkparameter van het model. Uit afbeelding 9 blijkt dat de invloed van α op de resultaten van de berekening zeer groot is. Bij α = 0,005 en een filtratiesnelheid van 1 m/d is de DE na 18 dagen slechts 4 eenheden. Om een DE van 8 eenheden te behalen zal in dit geval de verblijftijd circa 35 dagen moeten zijn. Deze resultaten geven het belang aan van goede experimenten voor de bepaling van de hechtingsefficiëntie onder verschillende omstandigheden
Niet alle infiltratiegebieden zijn gelijk. Vooral de homogeniteit en de korrelgrootte van de aquifer zijn van belang voor de verwijdering van pathogene micro-organismen. In afbeelding 10 is een voorbeeld gegeven van een aquifer met een effectieve korreldiameter van 0,15 mm. Het is te zien dat de korrelgrootte een aanzienlijke invloed heeft op de verwijdering. Bij een filtratiesnelheid van 1 m/d zou een verblijftijd van 8 dagen al voldoende kunnen zijn om 8 logeenheden verwijdering te bewerkstelligen.

Discussie en conclusies

Dat bodempassage een belangrijke barrière vormt voor de verwijdering van pathogene micro-organismen is bekend. Uit het onderzoek blijkt echter dat op theoretische gronden ook een aanmerkelijke verwijdering van virussen kan optreden bij korte

• *Vervolg op pagina 289.*

Literatuur
1. Dijk, J. C. van (1992). *Strategische keuzen van de waterleidingbedrijven: Kwaliteit en/of kosten.* H_2O (25) 1992, no. 21, p. 582-592.
2. Dijk, J. C. van en Schulting, F. L. (1994). *Welke technische ontwikkelingen bepalen de toekomstige infrastructuur?* H_2O (27) 1994, no. 16, p. 461-468.
3. Dijk, J. C. van (1994). *Een goed rapport voor de Nederlandse waterleidingingenieur?* H_2O (29) 1994, no. 7, p. 191-197.
4. Stoter, P. (1994). *Levert een waterleidingbedrijf alleen drinkwater of meer?* H_2O (27) 1994, no. 15, p. 427-430.
5. Kraa, H. J. L. de (1996). *Een grenzeloos waterleidingbedrijf.* H_2O (29) 1996, no. 9, p. 264-266.
6. Kraa, H. J. L. de (1996). *Watermanagement.* Lezing NSC-congres, oktober 1996.
7. Martinez Ortiz, G. (1993). *Industriewater-casestudies Waprog/TWM* Afstudeerproject TU Delft, juni 1993.
8. Vlies, J. L. van de (1995). *Biesboschwater als industriewater.* Afstudeerproject TU Delft, november 1995.
9. Winkelen, M. van (1995). *Industriewater Akzo Amsterdam.* Afstudeerproject TU Delft, december 1995.
10. Beumer, M. (1995). *Industriewater Parenco.* Afstudeerproject TU Delft, december 1995.
11. Nijsse, M. (1996). *Industriewater Cerestar.* Afstudeerproject TU Delft, september 1996.
12. Ekkerdonk, F. van (1996). *Industriewater Philips Nijmegen.* Afstudeerproject TU Delft, september 1996.
13. Berg, J. v. d. en Reyt, B. van de (1996). *De Watersector.* ABN/AMRO, mei 1996.
14. Claessen, F. A. M. en Kors, A. G. (1996). *Verdroging en grondwater in Nederland.* H_2O (29) 1996,0 no. 24, p. 723-726.
15. Martijn, Th. G. (1996). *Water in Europa.* H_2O (29) 1996, no. 15, p. 434-437.
16. Gast, M. K. H. (1996). *De overheid als regisseur.* Lezing CKC-congres, oktober 1996.
17. Westgeest, T. G. M. (1996). *Het waterleidingbedrijf als leverancier van 'water op maat' voor bedrijfsleven.* Lezing CKC-congres, oktober 1996.
18. Koelink, J. T. H. (1995). *Industriewaterproject Veendam.* H_2O (28) 1995, no. 9, p. 174.
19. Kap, A. en Burger, J. (1995). *Onderzoek naar de mogelijkheden en consequenties van de inzet van oppervlaktewater voor de drink- en industriewatervoorziening in Gelderland.* KIWA/Krachtwerktuigen, juni 1995.
20. Marsman, N. e.d. (1995). *Kansen voor membraanfiltratie bij de industriewatervoorziening.* Krachtwerktuigen, oktober 1995.
21. *Pompstation dicht of sloot dempen.* Brochure KIWA, 1994.

• • •

Pathogene micro-organismen

• *Slot van pagina 296.*

verblijftijden en onttrekking op korte afstand tot het oppervlaktewater. Hechting van virussen aan gronddeeltjes blijkt hierbij een belangrijk verwijderingsmechanisme te zijn.
De benodigde verblijftijd voor voldoende verwijdering is afhankelijk van de bodemsamenstelling (korrelgrootte en porositeit), het voorkomen van kortsluitstromen en de filtratiesnelheid. Bij fijn en homogeen bodemmateriaal en bij hogere filtratiesnelheden kan de verblijftijd relatief kort zijn. Vooral kortsluitstroming kan een hoge reductiepotentie drastisch verminderen. Als bijvoorbeeld 1% van het infiltratiewater ongezuiverd de putten bereikt, wordt de decimale eliminatie teruggebracht naar maximaal 2 eenheden. De meest kritische stroomlijn moet dus als maatstaf dienen voor het ontwerp van een puttenveld.
Voor het opstellen van het model zijn waarden uit de literatuur gebruikt, vooral de waarde van hechtingsefficiëntie van een pathogeen micro-organisme aan de bodem is kritiek. Praktijkgegevens zullen verzameld moeten worden om het model te kunnen ijken. Uit de resultaten van het model volgt echter dat meting bij bestaande winputten niet veel getalmateriaal zal opleveren, omdat deze op voldoende afstand van het oppervlaktewater staan ($>$ 30 m) en het gehalte aan pathogene micro-organismen onder de detectiegrens zal liggen. Om een betere schatting van de verwijderingscapaciteit te krijgen zal de monstername op korte afstand van het oppervlaktewater moeten plaatsvinden om zodoende nog pathogene micro-organismen te kunnen aantonen. Hierbij zal een (indicator)organisme gekozen moeten worden met een diameter rond de 1 μm (afhankelijk van situatie) en een lage hechtingseffiëntie. De proeven zullen langdurig moeten zijn om eventuele onthechting door veranderingen in de waterkwaliteit te kunnen detecteren.
In het model is geen rekening gehouden met het feit dat door de invloed van een (biologische) sliblaag in de eerste centimeters van het filtratietraject een grotere verwijdering kan worden verkregen dan in de daarop volgende meters.
Het is niet de intentie van het onderzoek om uitsluitende antwoorden te geven over de beoordeling van bodempassage voor de verwijdering van pathogene micro-organismen.
Wel kan aan de hand van het model een meetprogramma opgezet worden en kunnen meetresultaten geïnterpreteerd worden. Hierdoor kan het een instrument zijn voor onderzoekers en besluitvormers.
De modellering van de verwijdering van micro-organismen bij bodempassage is onderdeel van een grootschalig modelleringsonderzoek dat wordt uitgevoerd in een samenwerkingsverband tussen RIVM en TU-Delft. In dat onderzoek komen ook andere zuiveringsprocessen aan bod, waarbij de verwijdering van pathogene micro-organismen, bestrijdingsmiddelen en desinfectiebijproducten centraal staat.

Literatuur
1. Kooij, D. v. d., Drost, Y. C. and Hijnen, W. A. M. (1994). *Multi barriers against micro-organisms in water treatment and distribution in the Netherlands,* Disinfection of Potable water, International Specialised Conference, Kruger National Park South Africa.
2. Commissie Bescherming Waterwingebieden, (1980). *Richtlijnen en aanbevelingen voor de bescherming van waterwingebieden,* VEWIN/RID.
3. Medema, G. J. en Havelaar, A. H. (1994). *Microorganismen in water: een gezondheidsrisico,* Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, rapportnummer 289202002.
4. Schijven, J. F., Medema, G. J., Nijs, A. C. M. de en Elzinga, J. C. (1996). *Emissie en verspreiding van Cryptosporidium, Giardia en enterovirussen via huishoudelijk afvalwater.* Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, rapportnummer 289202014.
5. Teunis, P. F. M., Havelaar, A. H. en Medema, G. J. (1994). *A literature survey on the assessment of microbiological risk for drinking water.* Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, rapportnummer 734301006.
6. Smeets, P. W. M. H. (1995). *Modellering van virusverwijdering bij oeverfiltratie,* afstudeerverslag TU-Delft.
7. Park, N. S., Blandford, T. N., Wu, Y. S. and Huyakorn, P. S. (1994). *CANVAS version 2.0. A composite analytical-numerical model for viral and solute transport simulation.* Documentation and user's guide. Hydrogeologic, Inc. Herudon VA.
8. Yao, K. M., Habibian, M. T. and O'Melia, C. R. (1971). *Water and Wastewater filtration: Concepts and applications.* Environmental Science and Technology, vol. 5, pp. 1105-1112.
9. Martin, R. E., Bouwer, E. J. and Hanna, L. M. (1992). *Application of clean-bed filtration theory to bacterial deposition in porous media,* Environmental Science and Technology, vol. 26, pp. 1053-1058.

• • •

Symposium 'Tussen zout en zoet'

In het waterbeheer is er de laatste tijd toenemende aandacht voor het herstel van natuurlijke processen op het grensvlak van zoete en zoute milieus. Over dit onderwerp organiseert de opleiding Aquatische Ecotechnologie van de Hogeschool Zeeland op 13 juni 1997 een symposium 'Tussen zout en zoet'. Centraal tijdens dit symposium staan de technische en maatschappelijke mogelijkheden en onmogelijkheden voor het herstellen van zout-zoet gradiënten.
In een aantal lezingen zal door beheerders, onderzoekers en milieugroeperingen ingegaan worden op de situatie in een aantal gebieden van de Waddenzee tot en met de zoete en zoute delta's in zuidwest Nederland en Vlaanderen. De dag zal worden voorgezeten door de heer Van Gelder, commissaris van de koningin in de provincie Zeeland.
Nadere inlichtingen: Mary Knop, Hogeschool Zeeland, Edisonweg 4, 4382 NW Vlissingen, telefoon 0118-48 92 29.