

Modellering van de filtratie van grondwater

IR. J.D. VERDEL, TU-DELFT, THANS IWACO BV

IR. R.M. SCHOTSMAN, IWACO BV

IR. L.C. RIETVELD, TU-DELFT

PROF. IR. J.C. VAN DIJK, TU-DELFT

Ongeveer tweederde van het Nederlandse drinkwater wordt bereid uit grondwater. Daarnaast wordt bij sommige waterbedrijven oppervlaktewater na bodempassage gebruikt als bron voor de bereiding van drinkwater.

Grondwater en oevergrondwater is in vele gevallen anaëroob en bevat opgelost ijzer, mangaan, ammonium en/of methaan. De zuivering bestaat minimaal uit een beluchting en een filtratiestap ter verwijdering van deze componenten (afb. 1). In sommige gevallen, vooral als het ammoniumgehalte hoog is, is een dubbele filtratiestap aanwezig. Om zuurstofloosheid te voorkomen wordt de eerste stap dan vaak als droogfilter uitgevoerd.

Ondanks de discussies over verdroging zal grondwater en oevergrondwater ook in de toekomst een belangrijke rol blijven spelen bij de drinkwaterproductie. Vele van de huidige zuiveringsstations zullen gerenoveerd of herbouwd moeten worden. Daarbij is het van belang de ervaringen die opgedaan zijn te inventariseren en te analyseren om zodoende tot een optimaal ontwerp te kunnen komen.

Ontwerpopimalisatie kan ondersteund worden met een computermodel, waarin deze ervaringen zijn opgeslagen.

In het navolgende zal ingegaan worden op de modellering van de filtratie van grondwater, waarbij gebruik is gemaakt van literatuuronderzoek en bedrijfsgegevens van enkele

waterleidingbedrijven in Nederland. Het werk is gebaseerd op een afstudeerproject uitgevoerd bij de NV Watermaatschappij Zuid-Holland Oost (WZHO) [1].

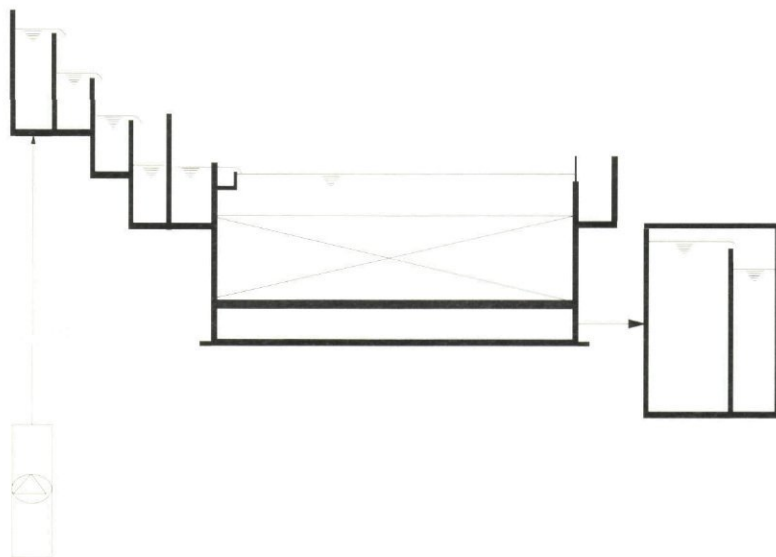
Verwijderingsmechanismen bij filtratie

Bij de verwijdering van ijzer, mangaan, ammonium en methaan uit het grondwater, spelen verschillende mechanismen een rol. Deze mechanismen zijn onder te verdelen in:

- fysisch-chemische verwijdering
- biologische verwijdering

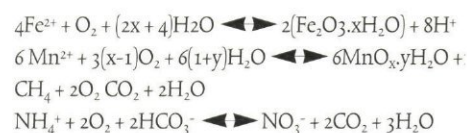
Ijzer wordt hoofdzakelijk op een fysisch-chemische manier verwijderd.

Tweewaardig ijzer wordt (na de beluchtingsfase) geoxideerd tot driewaardig ijzer, waarna hydrolyse en vlokvorming optreedt. Deze vlokken worden vervolgens afgevangen tijdens de filtratie. De snelheid van omzetting



Afb. 1 Schema van een grondwaterzuivering

van twee- naar driewaardig ijzer hangt onder meer af van de temperatuur, de pH, de concentratie tweewaardig ijzer en de ionsterkte [2].



Afb. 2 Omzettingsvergelijkingen

Tweewaardig mangaan kan ook op fysisch-chemische wijze op het filteroppervlak worden geoxideerd. Hierbij wordt hausmanniet (Mn_3O_4) gevormd, dat ook als katalysator dient voor de oxidatiereactie. Als hausmanniet verder oxideert tot bruinsteen (MnO_2), wordt deze katalytische werking weer tenietgedaan. De snelheid van omzetting van mangaan hangt onder meer af van de temperatuur, de filtratiesnelheid, de korreldiameter, de pH, de concentratie tweewaardig mangaan en de concentratie bicarbonaat [3].

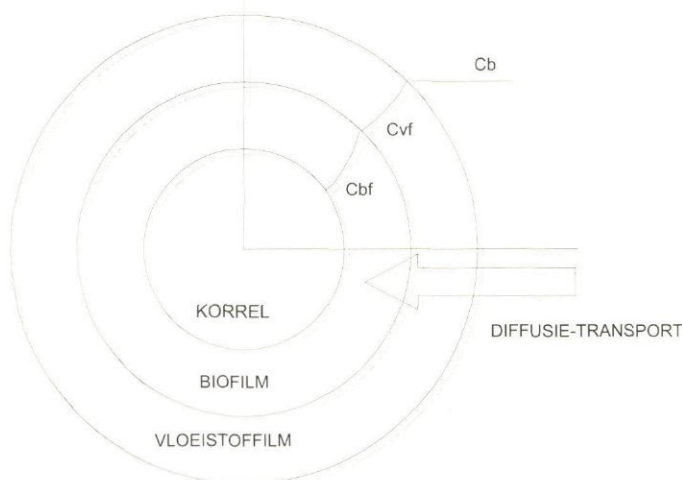
De retentie van ijzer en mangaan kan beschreven worden volgens de formules van Lerk-Maroudas, waarbij ervan uitgegaan wordt dat bij een toenemende accumulatie

Samenvatting

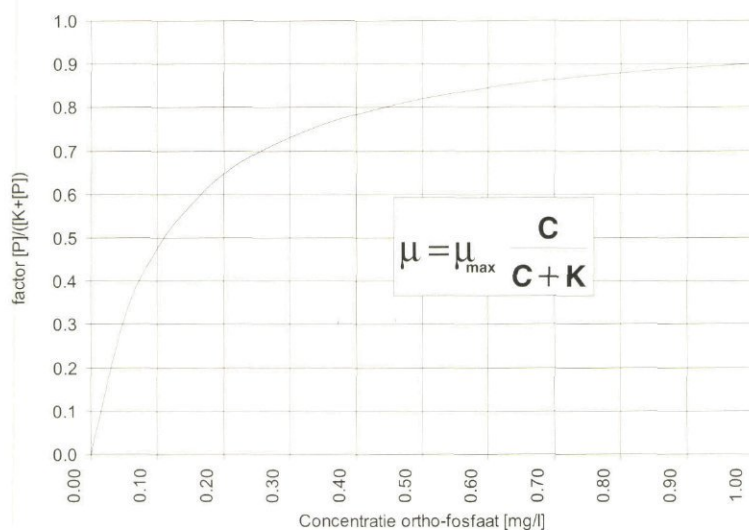
Zuivering van grondwater en oevergrondwater wordt in Nederland veelvuldig toegepast en is voornamelijk gebaseerd op beluchting en filtratie. Vele van de huidige pompstations zullen gerenoveerd of herbouwd moeten worden. Optimalisatie van ontwerp en procesvoering kan dan ondersteund worden met een computermodel, waarin de huidige kennis en ervaringen zijn opgeslagen.

Op basis van literatuurstudie zijn wiskundige modellen geformuleerd die de verwijdering van ijzer, mangaan, ammonium en methaan beschrijven in nat- en droogfilters. Met dit model zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om een indruk te krijgen van de invloed van de verschillende ontwerp-, proces-, model- en waterkwaliteitsparameters.

Het droogfiltermodel is tenslotte toegepast op het zuiveringsstation De Put van NV Watermaatschappij Zuid-Holland Oost, waar zich nitrificatieproblemen voordoen. Een aantal hypothesen is getoetst, waaruit geconcludeerd kan worden dat vooral filtervervuiling door onvoldoende spoelen en fosfaatlimitatie oorzaken kunnen zijn van de filterproblemen.



Afb. 3 Diffusie naar biofilm



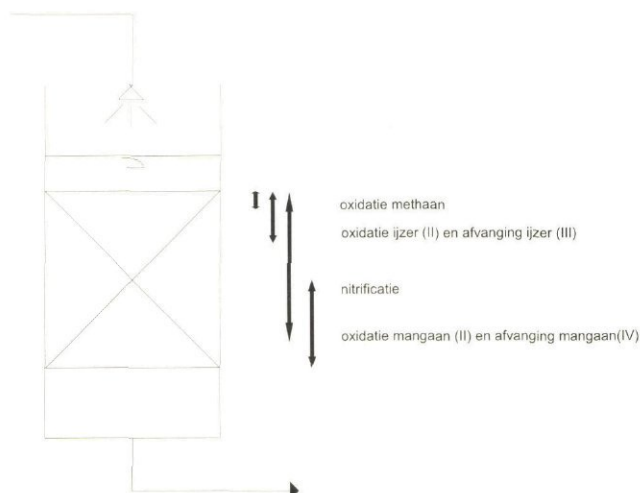
Afb. 4 Monoddiagram

van slib de retentie afneemt.

Ammonium, methaan en in sommige gevallen ook mangaan worden op biologische wijze verwijderd. Het substraat diffundeert naar een biofilm, die zich op het korrelmateriaal vormt, en wordt vervolgens omgezet in biomassa.

De snelheid van omzetting van het substraat hangt voornamelijk af van de groeisnelheid van de biomassa. Limiterende factoren hierbij kunnen zijn: aanwezigheid van substraat, zuurstof en fosfaat, temperatuur, pH, turbulentie van het langs de korrels stromende water en de dikte van de biofilm op het korrelmateriaal [4]. Methaanbacteriën groeien sneller dan nitrificerende bacteriën en methaanomzetting is daarom sneller en volledig en speelt zich boven in het filter af.

Afb. 5 Stratificatie in filterbed



De omzetting van substraat in biomassa wordt beschreven via de Monodkinetiek, waarbij uitgegaan wordt van een maximum groeisnelheid die gelimiteerd wordt tot een specifieke groeisnelheid [5] (afb. 4).

De verschillende verwijderingsprocessen komen simultaan voor in het filter, toch gaat men er van uit dat een zekere stratificatie in het filter optreedt [6] (afb. 5). Dit komt enerzijds omdat de omzettingssnelheid van de verschillende processen verschillend is: tweewaardig ijzer wordt sneller geoxideerd dan tweewaardig mangaan en methaanbacteriën groeien sneller dan nitrificerende bacteriën.

Anderzijds kunnen de verschillende processen elkaar beïnvloeden, waardoor inhibitie of katalysatie optreedt. IJzerafzettingen kunnen de nitrificerende biofilm vervuilen, waardoor de nitrificatie negatief wordt beïnvloed, maar kunnen katalytisch werken voor de omzetting van mangaan. Daarnaast zal eerst het meeste ijzer omgezet moeten zijn voordat de oxidatie van mangaan op gang kan komen, omdat mangaan een hogere redoxpotential heeft dan ijzer. Door oxidatie van ijzer zal de pH verlagen, waardoor zowel de nitrificatie als de ontmangling langzamer zal verlopen.

Methaanbacteriën kunnen concurrerend werken voor nitrificerende bacteriën, waardoor nitrificatie niet boven in het filterbed zal kunnen plaatshebben.

Modelstudies

Voor zowel een enkellaags natfilter als een droogfilter zijn modellen ontwikkeld. De processen die in beide filters afspelen zijn praktisch identiek, alleen in een droogfilter bestaat een ander stromingspatroon en kan geen limitatie door een te lage concentratie zuurstof optreden.

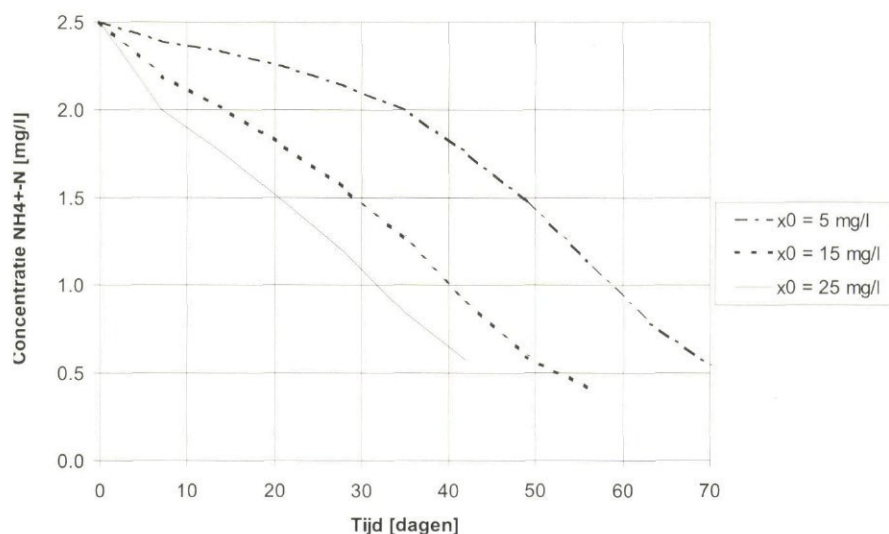
$$\frac{\delta c}{\delta t} = -v_p \frac{\delta c}{\delta y} - v_p \lambda_c k_c$$

$$\frac{\delta \sigma}{\delta t} = -v_p \frac{\delta c}{\delta y} + \mu \sigma$$

Afb. 6 Strooming, retentie en omzetting in een filterbed

Zowel de fysische als de biologische processen in een filter kunnen beschreven worden met ééndimensionale partiële differentiaalvergelijkingen, een bewegingsvergelijking (transport en retentie) en een continuïteitsvergelijking (accumulatie) (afb. 6).

De partiële differentiaalvergelijkingen geven de veranderingen van de concentratie en



Afb. 8 Opstarten van nitrificatie in filter

	Parameter	Waarde	Eenheid
Methaan	Maximale groeisnelheid bij 15 °C	2,3 · 10 ⁻⁵	s ⁻¹
	Yieldfactor	0,57	s ⁻¹
IJzer	Oxidatiesnelheidsconstante	1,67 · 10 ⁻¹⁰	(mol/l) ^{0,5} · s ⁻¹
	Massadichtheid (FeOH) ₃	5.000 (nat)	g/m ³
		10.000 (droog)	
Ammonium	Maximale groeisnelheid bij 15 °C	5,4 · 10 ⁻⁶	s ⁻¹
- Nitrosomonas/ Nitrobacter			
	Yieldfactor	9,0 · 10 ⁻⁶	s ⁻¹
		0,15	s ⁻¹
		0,06	s ⁻¹
Mangaan (fysisch)	Oxidatiesnelheidsconstante	3,6 · 10 ⁻¹⁵	(mol/l) ^{0,5} · s ⁻¹
	Massadichtheid MnO ₂	8.000	g/m ³
Mangaan (biologisch)	Maximale groeisnelheid bij 15 °C	9,3 · 10 ⁻⁶	s ⁻¹
	Yieldfactor	0,06	s ⁻¹

Afb. 7 Parameterwaarden voor modelberekeningen

slibaccumulatie (en groei van biofilm) in plaats en tijd weer. Als de interesse uitgaat naar het dynamische karakter van een filter zullen de partiële differentiaalvergelijkingen numeriek geïntegreerd moeten worden. Hier is dit gedaan met behulp van het simulatiepakket Matlab/Simulink, waarin verschillende integratiemethodes beschikbaar zijn.

Uit literatuuronderzoek en door kalibratie aan enkele zuiveringsstations zijn waarden voor de verschillende modelparameters voor de verwijderingsprocessen geschat (afb.7).

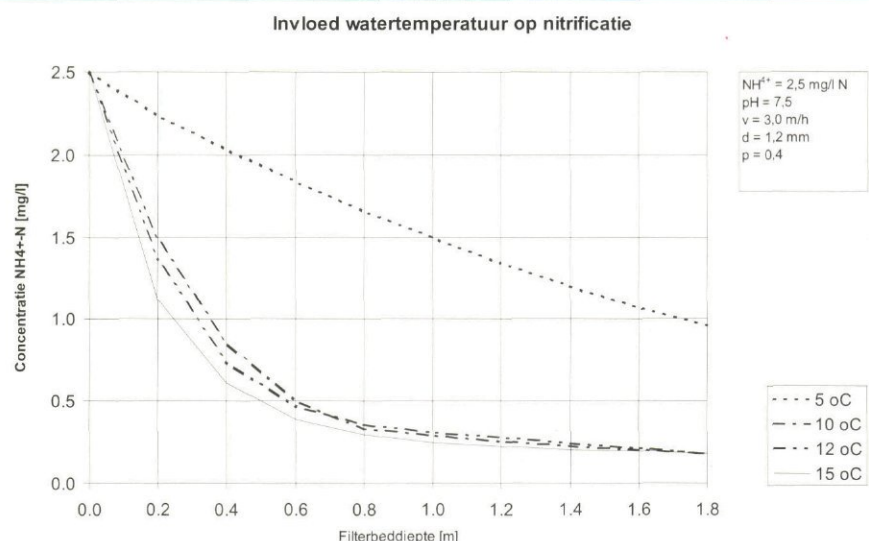
Uitgaande van deze waarden kan vervolgens de invloed van de variatie van zowel model- als ontwerpparameters worden bestudeerd. Ook kan worden geverifieerd wat een verandering in de influentkwaliteit of in de procesvoering teweegbrengt in het filter en hoe een filter zich gedraagt in de opstartfase wanneer de biologische processen nog op gang

moeten komen. Hierna zijn twee voorbeelden gegeven.

Het opstarten van een filter voor de nitrificatie behoeft speciale aandacht, omdat de nitrificerende bacteriën tijd nodig hebben om voldoende ammonium om te kunnen zetten (de groeisnelheid is evenredig met de aanwezige concentratie bacteriën). In afbeelding 8 is het verloop van de effluentkwaliteit om de opstartfase geïllustreerd, uitgaande van verschillende beginsituaties (initiële bacterieconcentratie x₀). Het blijkt dat deze beschrijving nog niet geheel aan de verwachtingen voldoet, omdat in de praktijk vaak kortere inlooptijden worden geregistreerd.

In afbeelding 9 wordt de invloed van de temperatuur op de ammoniumverwijdering getoond. Het is duidelijk dat bij lage temperaturen de biologische processen langzamer

Afb. 9 Invloed temperatuur op ammonium omzetting



verlopen en de ammoniumverwijdering dus slechter is. De meeste pompstations hebben echter een vrij constante grondwater-temperatuur van 10-12 °C.

Toepassing van model op zuiveringsstation De Put

De Put te Nieuw-Lekkerland is een zuiveringsstation van NV Watermaatschappij Zuid-Holland Oost (WZHO) en zuivert oevergrondwater afkomstig uit de Lek en Noord (75%) gemengd met polderwater (25%). Het oevergrondwater wordt gezuiverd via versproeiing, droogfiltratie, natfiltratie, actieve-koolfiltratie en UV-desinfectie.

Voor de nitrifierende werking van de droogfilters neemt na enkele maanden van gebruik af, waardoor doorslag van ammonium ontstaat en het filtermateriaal extern gereinigd moet worden. Dit extern reinigen vormt een grote kostenpost voor het bedrijf [7].

Als oorzaak voor de tegenvallende nitrifierende werking zijn enkele hypothesen opgesteld, die met behulp van het ontwikkelde model zijn getoetst.

De hypothesen zijn de volgende:

- ophoping van (dode) methaanbacteriën in het filter
- inefficiënt spoelprogramma
- te grote variatie in de volumebelasting op de filters
- fosfaatlimitatie

Ophoping van (dode) methaanbacteriën

Nitrifierende bacteriën kunnen door methaanbacteriën overwoekerd worden, waardoor de nitrificatie lager in het bed zal plaatsvinden (waar de methaanconcentratie is geminimaliseerd).

In afbeelding 10 is dit geïllustreerd. Hier-

bij is de totale ophoping van methaanbacteriën uitgedrukt in percentages van de hoeveelheid aanwezig levend materiaal. Het lijkt er op dat de invloed van deze ophoping niet extreem groot is.

Het uitdrijven van methaan is echter relatief simpel (ontgassing), waardoor onnodige groei van methaanbacteriën in het filter wordt voorkomen. Ook heeft deze ontgassing als neveneffect de verwijdering van kooldioxide, waardoor een pH verhoging optreedt, wat de nitrificatie eveneens bevordert.

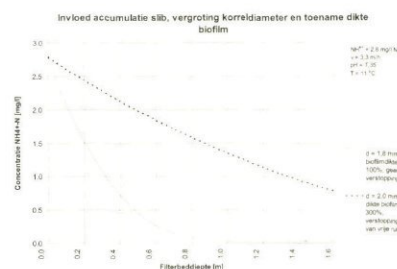
Inefficiënt spoelprogramma

Het terugspoelen van filters moet eens in de enkele dagen geschieden.

Als het spoelen niet intensief genoeg gebeurt, zal accumulatie van slib en biomassa optreden, waardoor de korrel diameter van het filtermateriaal groter wordt, de dikte van de biofilm toeneemt (waardoor diffusielimitatie optreedt) en filterverstopping kan voorkomen (waardoor voorkeurstroming zal plaatsvinden). Een combinatie van deze drie factoren is weergegeven in afbeelding 11.

Als het spoelen te intensief gebeurt, zal levende biomassa uitspoelen. Aangezien deze biomassa langzaam aangroeit (in orde van weken/maanden) en het spoelen frequent gebeurt (in orde van dagen), zal uiteindelijk minder levende biomassa in het filter aanwezig zijn dan bij een optimaal spoelprogramma. In afbeelding 12 is het uitspoelen van bacteriën getoond met als uitgangspunt een optimale biofilm. Het uitspoelen van de biomassa heeft als gevolg dat de ammoniumconcentratie in het effluent geleidelijk zal verslechteren (afb. 13).

Het tijdseffect van uitspoelen van levend



Afb. 11 Invloed slibaccumulatie op nitrificatie

materiaal lijkt alleen van invloed te zijn als zich eerst meer biologisch materiaal heeft kunnen vormen en nadien een verandering in het spoelregime is opgetreden.

Variatie volumebelasting

Tijdens het spoelen van filters en het extern reinigen van het filterzand van een van de filters, zullen de andere filters hoger belast worden (bij gelijk blijvende productie). Aangezien bij zuiveringsstation De Put slechts 4 droogfilters parallel geschakeld zijn, is deze verhoging 33% tot 100% (indien een filter uit bedrijf is en/of een ander wordt gespoeld).

In afbeelding 14 is geïllustreerd hoe de effluentkwaliteit door deze belastingverhoging verslechtert, ondanks het feit dat na verloop van tijd een zeker herstel optreedt.

Aangezien variatie van volumebelasting geen verslechtering op de lange termijn met zich meebrengt, kan dit niet als hoofdoorzaak van de slechte nitrificatie op zuiveringsstation De Put worden aangemerkt. De instantane toename kan echter vermeden worden door het pompregime aan te passen aan de beschikbare filters en optimaal gebruik te maken van het bergend vermogen in het zuiveringsstation en distributieggebied.

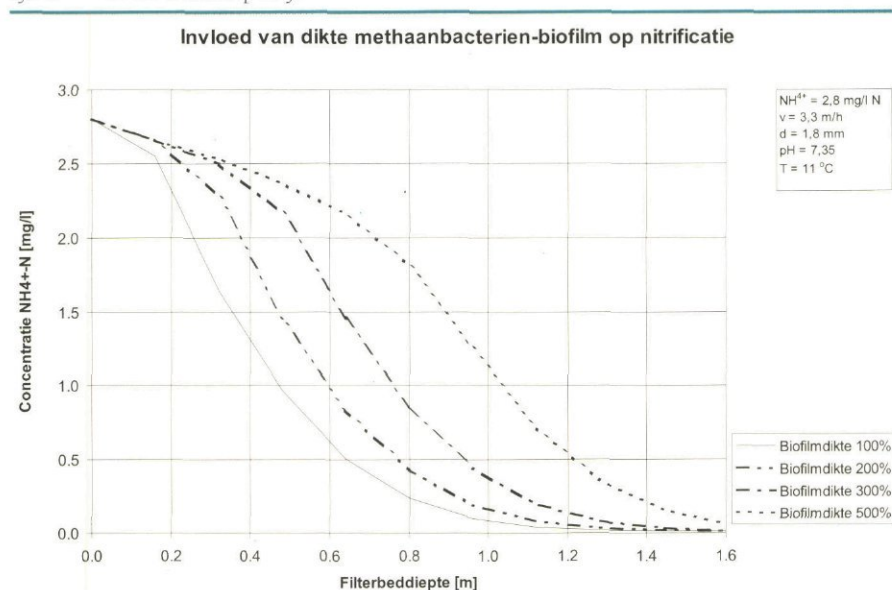
Fosfaatlimitatie

In principe is in het influent van zuiveringsstation De Put voldoende fosfaat aanwezig om de groei van de nitrifierende bacteriën niet te limiteren. Echter, fosfaat kan met ijzer tot ijzerfosfaat reageren en slaat vervolgens neer. De geringe concentratie fosfaat die vervolgens zou overblijven is dan onvoldoende om een totale nitrificatie tot stand te brengen.

Berekeningen zijn uitgevoerd voor verschillende concentraties beschikbaar fosfaat (afb. 15). Beneden de 0,1 mg/l fosfaat treedt er een minder volledige nitrificatie op.

Fosfaatlimitatie zou een belangrijke oorzaak voor de slechte nitrifierende werking van de droogfilters van zuiveringsstation De Put kunnen zijn.

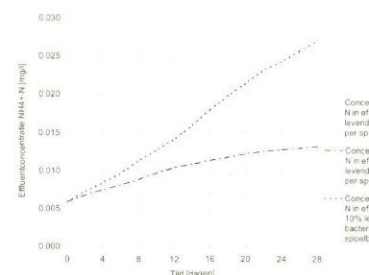
Afb. 10 Invloed methaan op nitrificatie



Conclusies en aanbevelingen

Tot nu toe waren er geen modellen beschikbaar die alle belangrijke verwijderingsprocessen bij de filtratie van grondwater beschrijven. Een eerste aanzet voor de ontwikkeling van een dergelijk model is hier gemaakt, waarbij gebruik is gemaakt van de huidige inzichten en moderne instrumenten voor het numeriek integreren van differentiaal vergelijkingen.

Met het model is een aantal hypothesen getoetst voor de verslechterende nitrificerende werking van de voorfilters van zuiveringsstation De Put van NV Watermaatschappij Zuid-Holland Oost. Geconcludeerd kan worden dat inefficiënt spoelen en fosfaatlimitatie als de belangrijkste oorzaken kunnen worden aange-merkt.



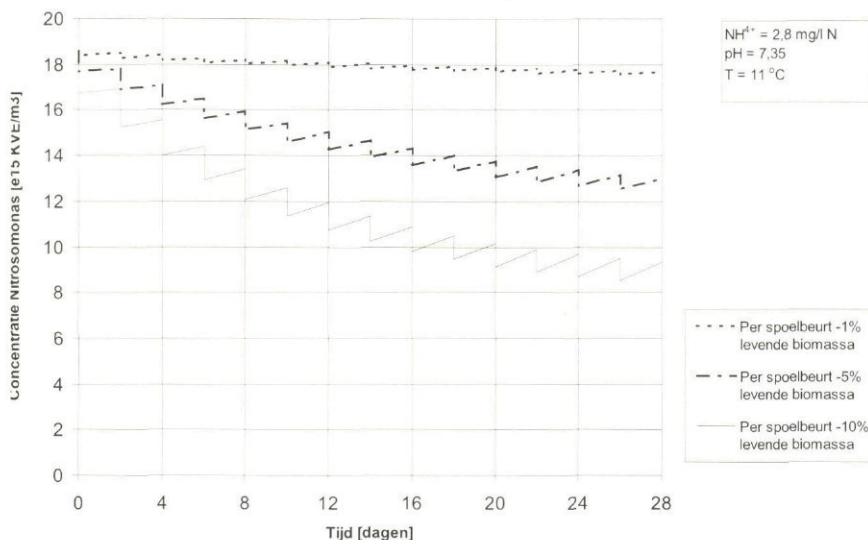
Afb. 13 Verslechtering effluentkwaliteit door uitspoelen bacteriën

In het model zijn nog steeds open plekken, die verder ingevuld moeten worden. De belangrijkste zijn daarvan zijn: de interactie tussen de verschillende verwijderingsprocessen, de ontwikkeling van biofilms in plaats en tijd en de invloed van spoelen op het nitrificatieproces. Hiervoor zal detailonderzoek verricht moeten worden, waarbij over de hoogte van het filterbed de concentraties van de verschillende waterkwaliteitsparameters gemeten zullen moeten worden en bedmonsters genomen moeten worden.

Als gekalibreerd en gevalideerd kunnen modellen nuttig gebruikt worden voor het ontwerpen. Ontwerpv variabelen en systeemconfiguraties kunnen gevarieerd worden om tot een economisch optimaal ontwerp te komen. Hierbij blijft toetsing aan de praktijk natuurlijk van belang.

Daarnaast kunnen modellen gebruikt worden om het effect van een variërende waterkwaliteit of procesvoering op de effluentkwaliteit te bepalen. Vooral dynamische modellen kunnen inzicht geven in tijdsafhankelijke processen als bacteriegroei en doorslag door instantane verhogingen van de volumebelasting. Hierop kunnen strategieën ontwik-

Concentratie bacterie Nitrosomonas bij verschillende spoelregimes



Afb. 12 Uitspoelen bacteriën door intensief spoelen

keld worden voor een optimale bedrijfsvoering.

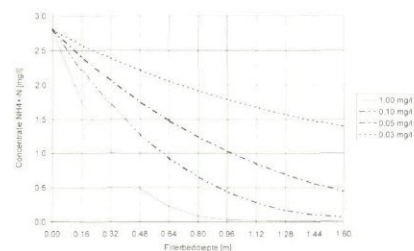
Tenslotte is het aan te bevelen om modellen aan te wenden om een beter inzicht in de verschillende zuiveringsprocessen alvorens een proefonderzoek op te zetten.

Zoals is gebleken, heeft een model veel informatie nodig die uit de praktijk (of literatuur) verkregen moet worden. Een model wordt dan een reflectie van kennis en inzicht en kan aangewend worden voor nieuwe situaties.

Wij zijn dan ook NV Waterbedrijf Zuid-Holland Oost erkentelijk voor de medewerking bij de ontwikkeling van het model voor de grondwaterfiltratie.

Bij de verdere ontwikkeling van modellen is het van belang in nauw contact te blijven staan met de praktijk en in te spelen op de behoefte van diezelfde praktijk.

Naar aanleiding hiervan is een Technische Commissie Modelling Drinkwater opgericht, die via een nieuwsbrief zorg draagt voor deze uitwisseling (secretariaat: ir. L.C. Rietveld,



Afb. 15 Fosfaatlimitatie bij nitrificatie

TU-Delft, Faculteit der Civiele Techniek, vakgroep Waterbeheer, Milieu- en Gezondheidstechniek, Postbus 5048, 2600 GA Delft, telefoon (015) 278 47 32, fax (015) 278 48 19, e-mail L.C.Rietveld@ct.tudelft.nl.

LITERATUUR

- Verdel, J.D. (1997). Modelling filtratie van grondwater, afstudeerverslag TU-Delft.
- Lerk, C.F. (1965). Enkele aspecten van de ontijzering van grondwater.
- Graveland, A. (1971). Verwijdering van mangaan uit grondwater.
- Willems, R.J.N. (1992). Modelling van het AOC-afbraak-proces in biologisch actieve filters, afstudeerverslag TU-Delft.
- Jorgensen, S.E., Gromiec, M.J. (1989). Mathematical sub-models in water quality systems - Developments in environmental modelling 14.
- KIWA-mededeling nummer 123 (1994). Behandeling van methaanhoudend grondwater.
- Valkering, G. (1995). Evaluatie zuiveringsstation De Put, WZHO afdeling Productie, Onderzoek en Ontwikkeling.

Afb. 14 Invloed variatie volumebelasting op effluentkwaliteit

