



*Hoe maken we de cirkel weer rond?*

# Afvalwater

BIOWETENSCHAPPEN EN MAATSCHAPPIJ  
KWARTAAL 2 2018

# Afvalwater

Dit cahier is een uitgave van Stichting Biowetenschappen en Maatschappij (BWM) en verschijnt vier maal per jaar. Elk nummer is geheel gewijd aan een thema uit de levenswetenschappen, speciaal met het oog op de maatschappelijke gevolgen ervan.

Stichting BWM is ondergebracht bij ZonMw.

## BESTUUR

Dr. J.J.E. van Everdingen  
(voorzitter)  
Prof. dr. W.P.M. Hoekstra  
(penningmeester)  
Dr. L.H.K. Defize  
Prof. dr. E. van Donk  
Prof. dr. W.A. van Gool  
Prof. dr. ir. F.P.M. Govers  
Prof. dr. B.C.J. Hamel  
Prof. dr. C.L. Mummery

## RAAD VAN ADVIES

Prof. dr. J. van den Broek  
Prof. dr. J.T. van Dissel  
Prof. dr. J.P.M. Geraedts  
Prof. dr. J.A. Knottnerus  
Prof. dr. J. Osse  
Prof. dr. E. Schroten

## REDACTIE

Prof. dr. ir. Mark van Loosdrecht  
Prof. dr. ir. Alfons Stams  
Prof. dr. Wiel Hoekstra  
Dr. ir. Astrid van de Graaf

## BUREAU

Drs. Rianne Blok  
Monique Verheij

## BEELDREDACTIE

B en U international picture service, Amsterdam

## VORMGEVING

Studio Bassa, Culemborg

## DRUK

Drukkerij Tesink, Zutphen

## INFORMATIE,

## ABONNEMENTEN EN

## BESTELLEN LOSSE NUMMERS

Informatie, abonnementen en bestellen losse nummers  
Stichting  
Biowetenschappen en  
Maatschappij  
Laan van Nieuw  
Oost-Indië 334  
2593 CE Den Haag  
telefoon: 070-34 95 402  
e-mail: info@  
biomaatschappij.nl  
www.biomaatschappij.nl

© Stichting BWM

ISBN/EAN 978-90-73196-90-2

Stichting BWM heeft zich ingespannen om alle rechthebbenden van de illustraties in deze uitgave te achterhalen. Mocht u desondanks menen rechten te kunnen laten gelden, dan verzoeken wij u vriendelijk om contact met ons op te nemen.



# Inhoud

## 1 Net als de natuur 5

- Ondraaglijke stank en ander ongerief 5
- Kringlopen in de natuur 11
- De opkomst van de zuiveringen 13
- De oxidatiesloot, de eerste eenvoudige zuivering 15
- Verantwoord lozen, normen en wetten 20

## 2 Afvalwater en de stad 23

- Ons dagelijks (afval)water 23
- Zuiveren met zuurstof 28
- (Na)zuiveren met planten 31
- Verspreiding van antibioticaresistentie 35
- Opkomende organische microverontreinigingen 37
- De Waterharmonica 40
- Afvalwaterzuivering in ontwikkelingslanden 42

## 3 Afvalwater en de industrie 45

- De industrie en haar watergebruik 45
- Afbraak zonder zuurstof, win-win-win 49
- Innoveren onder hoge druk 52
- De compacte oplossing: biofilmen en biokorrels 55
- De (zware) metalen, last en lust 57
- Het probleem van de vele handen 60

## 4 Afvalwater als grondstof 63

- De kringlooeconomie 63
- Zeefgoed en cellulose uit afvalwater 65
- De energiefabriek 67
- Biopolymeren uit zuiveringslib 70
- De eiwittenfabriek 72
- Fosfaat, van verwijdering naar terugwinning 75
- Zwavel- en metaalterugwinning 78
- Aquafarm: zuiveren en oogsten 81
- Nieuwe sanitatie 84

Epiloog: Luxe poepemmers of raffinagetechnologie 87

Meer informatie 90

Auteurs 92

Illustratieverantwoording 94

## Wordt ons afvalwater de basis van een circulaire economie?

**D**AGELIJKS SPOELEN we de wc meerdere keren door. Wat er daarna precies met al die poep en pies gebeurt, is voor velen onbekend. Niet alleen wij als burgers maar ook bedrijven lozen afvalstoffen op het riool. Hoe deze afvalstroom verantwoord wordt verwerkt, weten velen niet. Na het lezen van dit cahier zal duidelijk zijn, wat we met dit afvalwater kunnen doen en hoe we watervervuiling voorkomen.

We kunnen lezen dat in stedelijke gebieden de lozing van onze ontlasting tot midden 19<sup>e</sup> eeuw ernstige ziekten en stank veroorzaakte. Pas toen er riolering was aangelegd, losten die problemen zich op. Ook bedrijven hebben door de eeuwen heen allerlei afvalstoffen geloosd en dus het water vervuild. Daarin kwam pas verandering toen in 1970 de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren van kracht werd. Bedrijven die niet voldeden aan de vastgestelde minimum kwaliteitseisen, moesten daarvoor flink betalen. Met als gevolg dat bedrijven naarstig gingen zoeken naar manieren om de vervuilingsgraad van hun afvalwater te verminderen. En niet zonder resultaten: de waterkwaliteit verbeterde aanzienlijk.

### **De kringlooeconomie**

Ondanks deze positieve ontwikkelingen hebben we de optimale situatie nog niet bereikt. Idealiter zouden we moeten streven naar gesloten kringlopen waarin alle grondstoffen worden hergebruikt en geen milieuvreemde stoffen geloosd worden. We noemen dit een circulaire economie, waarin de herbruikbaarheid van producten en grondstoffen en het herstellend vermogen van natuurlijke hulp-

bronnen en systemen centraal staat. Het belang hiervan is groot, en wel om verschillende redenen.

Allereerst is het noodzakelijk om de toenemende schaarste aan grondstoffen wereldwijd tegen te gaan. In de periode van 1970 tot nu is het gebruik van grondstoffen verdrievoudigd. Als we in dit tempo doorgaan, putten we de aarde uit, ontwrichten we ons economisch systeem en nemen de conflicten over grondstoffen, water en energie wereldwijd toe.

Een tweede reden is het garanderen van onze voorzieningszekerheid. Europa is momenteel sterk afhankelijk van import van grondstoffen (90% van de import komt uit niet-EU landen). Dit maakt Europa kwetsbaar als in de toekomst landen weigeren te exporteren naar Europa of hun grondstofprijzen flink verhogen.

Ten derde kan de transitie naar een circulaire economie de leefbaarheid en duurzaamheid op aarde verbeteren. De milieuvervuiling neemt af en verspilling van grondstoffen wordt voorkomen. Tenslotte draagt de transitie naar een circulaire economie bij aan nieuwe bedrijvigheid en de ontwikkeling van kennis en innovatie. Samengevat: het toegroeien naar een circulaire economie kan ons op allerlei gebieden voordelen bieden: economisch, sociaal en ecologisch.

### **Energie en grondstoffen terugwinnen**

De principes van een kringlooeconomie kunnen ook toegepast worden op de afvalwaterketen. De huidige afvalwaterzuiveringsinstallatie waar het afvalwater uit rioleringen wordt verwerkt, kan omgebouwd worden tot energie- en grondstof-



fenfabriek. We kunnen alle waardevolle grondstoffen uit het afvalwater halen en die weer inzetten voor nieuwe producten. Denk aan fosfaat, dat een cruciale grondstof is in onze voedselproductie. Naar verwachting zullen de voorraden hiervan binnen 50-70 jaar uitgeput zijn. Door dit fosfaat uit het afvalwater te halen, kunnen we deze schaarse grondstof opnieuw gebruiken.

Ditzelfde geldt voor de enorme hoeveelheden toiletpapier, nitraten en vele andere grondstoffen in het afvalwater. Het delven hiervan wordt ook wel de grondstoffenfabriek genoemd. Nadat de waardevolle grondstoffen eruit zijn, kunnen we de nog resterende energie terugwinnen. Dit heet de energiefabriek. Helaas zijn we economisch en soms technisch nog niet in staat om alle grondstoffen uit het afvalwater te halen.

Daarnaast kampen zuiveringsinstallaties met milieuvreemde stoffen zoals medicijnresten, drugs en microplastics, die het opwerken van afvalwater tot hoge kwaliteit water bemoeilijken. Daarom wordt gepleit voor preventie aan de bron: het voorkomen van deze vervuilingbronnen. En daarnaast voor het opvangen van onze poep en pies op zo'n manier dat deze niet verdund raken in het riool. Het winnen van grondstoffen wordt dan gemakkelijker. Kortom, er valt nog veel te verbeteren om ons eigen afvalwater circulair te krijgen.

### **Bioraffinagefabriek**

Ditzelfde geldt voor het bedrijfsafvalwater. Het is technisch mogelijk om veel meer afvalstromen die bedrijven lozen, terug te brengen in de kringloop. Maar het gebeurt slechts mondjesmaat. Dit komt

omdat bedrijven hoogwaardige recycling van zulke afvalstromen niet beschouwen als hun kernactiviteit. Zij verkopen het aan verwerkers die met zo min mogelijk kosten de afvalstroom verwerken. Milieutechnisch leidt dit meestal niet tot de beste oplossingen. In de Metropoolregio Amsterdam wordt dit probleem ondervangen door een gezamenlijke aanpak. Diverse voedingsmiddelenbedrijven onderzoeken hoe ze hun afvalwaterstromen kunnen bundelen en in coöperatief verband een bio-raffinagefabriek kunnen opzetten die de grondstoffen terugwint.

De wereld van het afvalwater is dus volop in beweging. Er zijn allerlei mogelijkheden om dit afvalwater circulair te maken: kleinschalig op wijk- of bedrijfsniveau en grootschaliger op gemeentelijk en regionaal niveau. Er is dus werk aan de winkel om onze kennis te blijven ontwikkelen en die ook elders in de wereld toe te passen.

Ik wens u veel leesplezier!

*Jacqueline Cramer*

Hoogleraar duurzaam innoveren Universiteit Utrecht en regisseur circulaire economie in de Metropoolregio Amsterdam

**Het zelfreinigende vermogen van de natuur kan best wat vervuiling aan. Het heeft alleen wel wat tijd nodig om een grote berg of milieuvreemde afvalstoffen af te breken.**



*Tot het midden van de 19<sup>e</sup> eeuw veroorzaakte lozing van onze ontlasting in de alsmaar uitdijende steden ernstige ziekten en stank. Het zelfreinigende vermogen van de natuur kon deze hoeveelheden eenvoudig weg niet aan. De ontstaansgeschiedenis van onze huidige sanitatie is dan ook vooral een verhaal over poep en pies. Eerst nog opgevangen in emmers en tonnen voor nuttig gebruik in de landbouw, daarna met drinkwater doorgespoeld door de wc. Na de invoering van een centrale riolering met een lozingspunt ver buiten de stad heeft het nog een eeuw geduurd voordat de zuivering van afvalwater op grote schaal begon. In deze rioolwaterzuiveringen konden de natuurlijke afbraakprocessen onder optimale condities en dus versneld verlopen.*

## Ondraaglijke stank en ander ongerief

■ IR. KEES DE KORTE

**D**E ROMEINEN waren hun tijd ver vooruit. De Romeinse stad Colonia Agrippina gelegen aan de Rijn, het latere Keulen, werd al vanaf ongeveer 80 na Christus van water voorzien met het 95 km lange Eifelkanal dat bronwater uit de Eifel inzamelde en naar de stad voerde. Het water, ongeveer 500 liter per inwoner per dag, werd eerst over de vele fonteinen van de stad verdeeld. Deze waren voortdurend in bedrijf en zo verdeeld dat geen inwoner meer

dan 50 meter hoefde te lopen. Verder voorzag een leiding de badhuizen en de openbare toiletten van water, en waren er huisaansluitingen voor de rijke inwoners van de stad. Het afvalwater verdween via het Römerkanal, een onderaards riool van 2,10 m hoog en 1,22 m breed, naar de Rijn. Het Eifelkanal is 200 jaar in bedrijf geweest. Later is deze praktijk verloren gegaan.

### **Erbarmelijke omstandigheden**

In de vroege middeleeuwen (500-950) nam de bevolking sterk in aantal af. De oorzaken waren divers. Naast oorlogsgeweld en hongersnood waren hier ook epidemische ziekten debet aan. Deze kwamen mee met invallende steppevolke-

ren tijdens volksverhuizingen. Daarna neemt de bevolking weer toe en de steden groeiden snel. In die steden waren de woon- en leefomstandigheden echter erbarmelijk. De huizen waren klein, veel huizen hadden maar één vertrek waarin het leven zich afspeelde. De sanitaire voorzieningen waren eenvoudig; men deed de behoefte binnen op een pispot of emmer, of op het erf boven een beerput, maar soms ook gewoon op straat. De emmers werden gelegd in een beerput, op straat, in een goot of in een sloot of gracht. Voor emmers waren er ook inzamelpunten en beerputten werden gelegd. De verzamelde fecaliën verkocht men als meststof aan boeren in de omgeving. Soms zorgde een huis-eigenaar voor een riool dat loosde op de gracht.

Goed drinkwater was er niet. Het water dat

gebruikt werd, kwam van opgevangen regenwater dat in een waterput was opgeslagen. De kwaliteit van dit water liet veel te wensen over, zeker als er besmetting door een dichtbijgelegen beerput optrad, iets wat vrijwel onvermijdelijk was.

Vast vuil was er niet veel. Het weinige waar men van af wilde, kwam vaak in de gracht terecht. Dit had tot gevolg dat er, zeker in de volksbuurten, een ondraaglijke stank hing. De grachten van de middeleeuwse steden moeten honderden jaren hebben gestonken, zoals blijkt uit het citaat van Pleyte uit het boek 'Leiden vóór 300 jaren en thans' uit 1874: *De Pieterskerkgracht ..., gedempt na het goedgunstig besluit der regeering in 1604, gevolgd op het verzoek in 1601 gedaan door de daar wonende burgers (die den grooten stank niet langer konden verdragen) om haar op eigen kosten te mogen laten dempen.*

**Middeleeuwse straatscene in Rotterdam rond het riool bij de Grote of Sint-Laurenskerk.**



### **Keuren mochten niet baten**

De stadsbesturen waren zich daar wel van bewust en probeerden met keuren (wetgeving) de toestand te verbeteren. Keuren bevatten bepalingen dat aarde, vuilnis, mest, pens, bloed, as, veegsel, hooi, stro, scherven, vis- en slachtafval, ontlasting enz. niet in het water mochten worden gegooid. Deze keuren werden, door gebrek aan een alternatief en slechte handhaving, niet nageleefd en zo dreven de kadavers van koeien, paarden, varkens, honden en katten nog jaren rond in de grachten.

Alles stonk verschrikkelijk; de huizen, de mensen, de dieren, het water, één en al miasma. Miasma is de slecht riekende lucht die afkomstig is van rottend afval, onbegraven lijken, moerassen, vervuilde grachten en sloten en de stinkende adem van zieken. In zo'n situatie konden gemakkelijk ziekten uitbreken, en dat gebeurde dan ook. Tussen 1346 en 1688 hield de pest huis en van 1832 tot 1866 nam de cholera epidemische vormen aan. De miasma werd voor het ontstaan van beide ziekten verantwoordelijk gesteld. Deze miasmatheorie hield stand tot ver in de 19<sup>e</sup> eeuw.



## De Zwarte Dood

■ IR. KEES DE KORTE

Bij de pest treden door bloedingen in organen en de huid paarse plekken op. Hierdoor lijkt de huid van het slachtoffer zwart en kreeg de ziekte de bijnaam Zwarte Dood. De pest maakte van de 14<sup>e</sup> tot de 19<sup>e</sup> eeuw in Europa enorme aantallen slachtoffers. Tijdens de pestepidemie van 1347-1351 stierf een derde deel van alle Europeanen, destijds enkele tientallen miljoenen. De pest werd, zoals alle ziekten toen, toegeschreven aan miasma's, slecht riekende winden die de ziekte zouden verspreiden. In de straten brandde men tonnen met pek en soms ook kruiden. De rook moest de besmette lucht verdrijven. Vanaf de 16e eeuw verschijnen er pesthuizen, waar pestlijders werden behandeld met zweetkuren, aderlatingen, klisteren en het uitsnijden van pestbuilen. De pest kwam voor in veel steden, zoals Amsterdam, Leiden, Rotterdam, Alkmaar, Utrecht en Middelburg, vooral in de dichtbevolkte en vervuilde wijken van de armen. De gevolgen waren groot. Bedrijfjes gingen

failliet omdat de werknemers niet meer kwamen opdagen. Jaarlijkse kermissen werden door burgemeesters verboden en het eten van sla en spinazie werd afgeraden. Het stadsbestuur legde veel maatregelen over isolatie van de zieke en preventie door hygiëne in ordonnanties vast. Zo moest iedereen één of twee keer per week de stoep en de goot schoonvegen, dode beesten naar de vuilnisschuit brengen, geen vuiligheid op straat gooien en bloed van aderlaten niet meer op straat of in de gracht deponeren. In 1688 was de pest uitgewoed, maar pas in 1894 ontdekt de Frans-Zwitserse arts Alexandre Yersin dat de ziekte wordt veroorzaakt door de bacterie *Yersinia pestis* en zich verspreidt via vlooiën van ratten.

**Een reconstructie van een pestdokter. Het masker dat op een pinguïnsnavel leek, was gevuld met kruiden – onder andere jeneverbessen en boerenwormkruid – om de kwade dampen tegen te gaan. De stok werd gebruikt om de kleding van zieke mensen op te tillen en hun lichaam te controleren op aanwezigheid van zweren.**



### Amsterdamse hygiënist

In Amsterdam vormde zich rond 1840 een groep hervormingsgezinde artsen, ingenieurs, bestuurders en politici die later als de Amsterdamse hygiënist bekend werden. Zij streefden vijftig jaar lang naar verbetering van de openbare gezondheid door voor betere huisvesting, arbeidsomstandigheden, drinkwatervoorziening en riolering te ijveren en waren bezorgd over het gebrek aan aandacht die het stadsbestuur daaraan besteedde. Af en toe deed het stadsbestuur wel iets, zoals het dempen van een

stinkende gracht of het uitvaardigen van weer een keur met verboden of geboden, maar een echte verbetering van de toestand kwam er niet. De beroerde waterkwaliteit in de grachten leek onoplosbaar.

### Stroomversnelling

Na ongeveer 1850 komt alles rond de openbare hygiëne in een stroomversnelling. Daarvoor is een combinatie van factoren van belang. Door de Grondwetsherziening van Thorbecke in 1848 worden de hygiënist, door het toekennen van het



Het leven van de Amsterdamse arts Samuel Sarphat stond in het teken van de verbetering van de welvaart en de volksgezondheid. Hij stimuleerde onder andere de stedelijke vuilverwerking, nadat hij in 1847 een vergunning had gekregen voor het ophalen van haardas, vuilnis en menselijke mest.

Een stronttonnetjesloper leegt een emmer met uitwerpselen in zijn boldoetkar in Amsterdam (circa 1910-1930).

en gedistribueerd. Andere steden volgden nadat bleek dat Amsterdam na de aanleg van de duinwaterleiding bijna gevrijwaard bleef van choleraepidemieën. Gemeentelijke waterleidingbedrijven werden opgericht. In 1949 telde Nederland 212 waterleidingbedrijven, waardoor 75% van de Nederlandse bevolking over leidingwater beschikte.

### Fecaliënafvoer

Voor de afvoer van fecaliën kwamen aan het eind van de 19<sup>e</sup> eeuw drie systemen in aanmerking, het tonnenstelsel, het Liernurstelsel en riolering met een lozing ver buiten de stad. Hoofddoelstelling was het verbeteren van de stedelijke waterkwaliteit en zoveel mogelijk profiteren van de financiële waarde van de afvalstoffen voor de landbouw. Daarnaast kon ook de doorspoeling van de stadswateren verbeterd worden.

De keuze was niet eenvoudig. De politieke keuze voor financiering en de organisatie speelde een sturende rol bij de technische ontwikkeling; keuze

actief en passief kiesrecht en door de openbaarheid van bestuur, bij de lokale en landelijke politiek betrokken. Door de Gemeentewet van 1851 worden de openbare gezondheid en het toezicht daarop een onderdeel van het gemeentelijk bestuur en door de instelling van het Geneeskundig Staatstoezicht in 1865 worden bijna alle hygiënisten medewerker van dit Staatstoezicht.

Verder dringt het langzaam tot de stadsbestuurders door dat systemen voor de openbare hygiëne een beslag leggen op de openbare middelen en dat wel of niet uitvoeren niet afhankelijk kan zijn van een positief financieel resultaat. Ook de werkelijke oorzaken van pest en cholera worden ontdekt. In 1894 van de pest en in 1884 van de cholera. De miasmatische theorie hoorde nu voorgoed tot het verleden.

Op particulier initiatief werd in 1853 het eerste drinkwater uit de duinen in Amsterdam aangevoerd



voor rentabiliteit van de voorzieningen gaf andere technieken dan de keuze voor collectieve financiering. Landbouwkundigen waren met hygiënisten van mening dat het verzamelen en gebruiken van menselijke mest economisch het meest gewenst was. Technici waren voor de aanleg van rioolstelsels, bestuurders voor doorspoelen. Het heeft tot na 1870 geduurd voordat de eerste tonnenstelsels en Liernurstelsels gerealiseerd werden.

### Tonnenstelsel

Bij het tonnenstelsel worden de fecaliën huis aan huis opgehaald en daarna aan de landbouw verkocht. Het tonnenstelsel werd in vierendertig steden tussen 1871 tot 1899 ingevoerd. De tonnen, die 1 of 2 keer per week werden geleegd, bevonden zich in een privaathuisje op het erf of bij gebrek aan een erf ook wel in de keuken.

Bij het overgieten van de tonnen in een transportwagen ging wel eens iets mis en dat gaf veel geuroverlast. In de Jordaan sprak men over de Boldootkar. Boldoot was destijds een bekend Eau de Colognemerik. Sommige steden hadden een tonnenwisselstelsel waarbij de volle ton voor een schoongemaakte lege werd ingeruild. De voordelen van het tonnenstelsel waren dat de fecaliën niet langer in het oppervlaktewater terecht kwamen, nuttig gebruikt werden en geld opleverden. Nadelen waren echter de logistiek en de stank.

Het tonnensysteem is lang in bedrijf geweest, de strontkar reed nog tot 1934 in de Jordaan. In Zutphen waren in 1963 nog 122 tonnen in gebruik. De laatste tonnen stonden in Leeuwarden (1970), IJlst (1972) en Goes (1978).

### Liernurstelsel

Leiden, Dordrecht en Amsterdam kozen destijds voor het Liernurstelsel dat gebaseerd is op gescheiden inzameling van verschillende stromen. De uitvinder van het stelsel, de kleurrijke, in Haarlem geboren Charles Liernur, was een gedreven techni-

## De Blauwe Dood

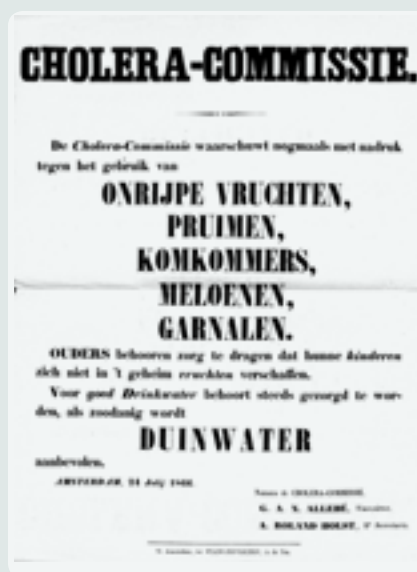
■ IR. KEES DE KORTE

Cholera gaat gepaard met hevig braken, heftige diarree, uitdroging, uitpuilende ogen en een vreemde blauwe huidskleur. Dat laatste gaf de ziekte de bijnaam Blauwe Dood. Cholera kon binnen enkele uren fataal zijn; het gebeurde dat iemand gezond opstond en voor de avond overleed. De ziekte werd toegeschreven aan miasma's, slecht riekende winden die de ziekte zouden verspreiden.

In totaal deden zich in Nederland vrij snel achter elkaar vier cholera-epidemieën voor: in 1832-1833, 1848-1849, 1853-1855 en 1866-1867. Vooral de tweede epidemie was hevig: in het gehele land vielen ongeveer 23.000 slachtoffers, van wie meer dan de helft overleed. In Amsterdam werden circa 2.300 doden geteld. Daarna heeft de Blauwe Dood nooit meer in die omvang huisgehouden.

Grondig epidemiologisch onderzoek tussen 1849 en 1854 door de Engelse arts John Snow toonde aan dat cholera verspreid werd door besmet drinkwater.

In 1854 ontdekte de weinig bekende Italiaanse arts Filippo Pacini – en in 1884 herontdekte de beroemde Duitse arts Robert Koch – dat cholera veroorzaakt wordt door de bacterie *Vibrio cholerae*.



In 1866 waarschuwt de Amsterdamse Choleracommissie met een pamflet tegen besmetting met cholera. Dit toont aan dat ook de deskundigen nog geen goed zicht hadden op de werkelijke oorzaak.

De ziekte wordt overgebracht via besmet water, dat kan door het drinken van besmet water maar ook door het eten van rauwe vis die in vervuild water heeft gezwommen of door het eten van groente die in besmet water is gewassen. Ook door contact met ontlasting of braaksel van een patiënt kan men besmet worden.

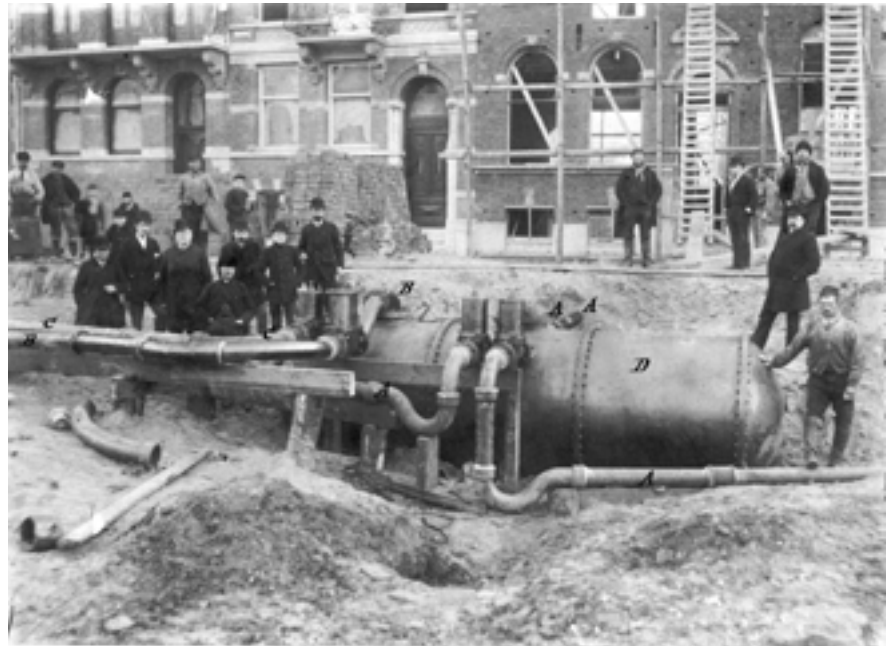
cus en zakenman die nuttig gebruik wilde maken van waardevolle stoffen. De kern van zijn stadsreinigingsstelsel was de pneumatische inzameling van fecaliën met een 'locomobile-luchtpomp' (mobiele stoommachine) en het gebruik van de fecaliën in de landbouw, voor het maken van 'poudrette' (gedroogde fecaliën) of voor het maken van zwavelzure ammoniak, een meststof. De fecaliën kwamen dus niet meer in het oppervlaktewater terecht, dat direct schoner werd, en de verkoop aan de landbouw leverde geld op.

In Amsterdam waren aan het eind van de 19<sup>e</sup> eeuw 190.000 inwoners (40 procent van de bevolking) erop aangesloten. De opkomst van de waterleiding en het watercloset, waardoor de fecaliën te veel verdund werden om ze nog te kunnen verkopen betekende het einde van het Liernurstelsel. In 1912 is het afgeschaft.

### Centrale riolering en afvalwaterzuivering

Naarmate de drinkwatervoorziening verder ingevoerd werd en beter aansloot bij de behoeften van de bevolking begon er duidelijkheid te komen over de richting van de sanitatie. Niet het onverdund inzamelen en landbouwkundig gebruik van fecaliën met het tonnenstelsel of het Liernurstelsel zou grootschalig toegepast gaan worden, maar de combinatie drinkwater – wc – riolering. Daarmee verdween feitelijk voorgoed de mogelijkheid om eenvoudig de waardevolle afvalstoffen als meststof te gebruiken.

Toepassing van een centrale riolering, dus met één lozingspunt voor alle aangesloten inwoners en bedrijven, voor de afvoer van fecaliën gaf ook mogelijkheden om het regenwater en afvalwater van bedrijven (al dan niet na deelzuivering) aan te sluiten en tot buiten de stad af te voeren. Waar het afvalwater dan precies heen ging kon per stad verschillen. Lag een stad aan een grote rivier of aan zee (o.a. Rotterdam, Den Haag, Amsterdam) dan ging het afvalwater daar naar toe.



De aanleg van een rioolstelsel in de Roemer Visscherstraat volgens de ideeën van ingenieur Charles Liernur.

Eenvoudige rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's) bestaan vanaf 1900 voor hoofdzakelijk slachterijen, zuivelfabrieken, krankzinnigengestichten en kazernes. De eerste rwzi voor biologische behandeling van huishoudelijk afvalwater dateert van 1906 en stond in Voorburg; tussen 1920 en 1950 volgden er nog 15. De vaart kwam er in na 1970 toen de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren van kracht werd en het zuiveren van afvalwater verplicht.

# Kringlopen in de natuur

■ PROF. DR. IR. ALFONS STAMS

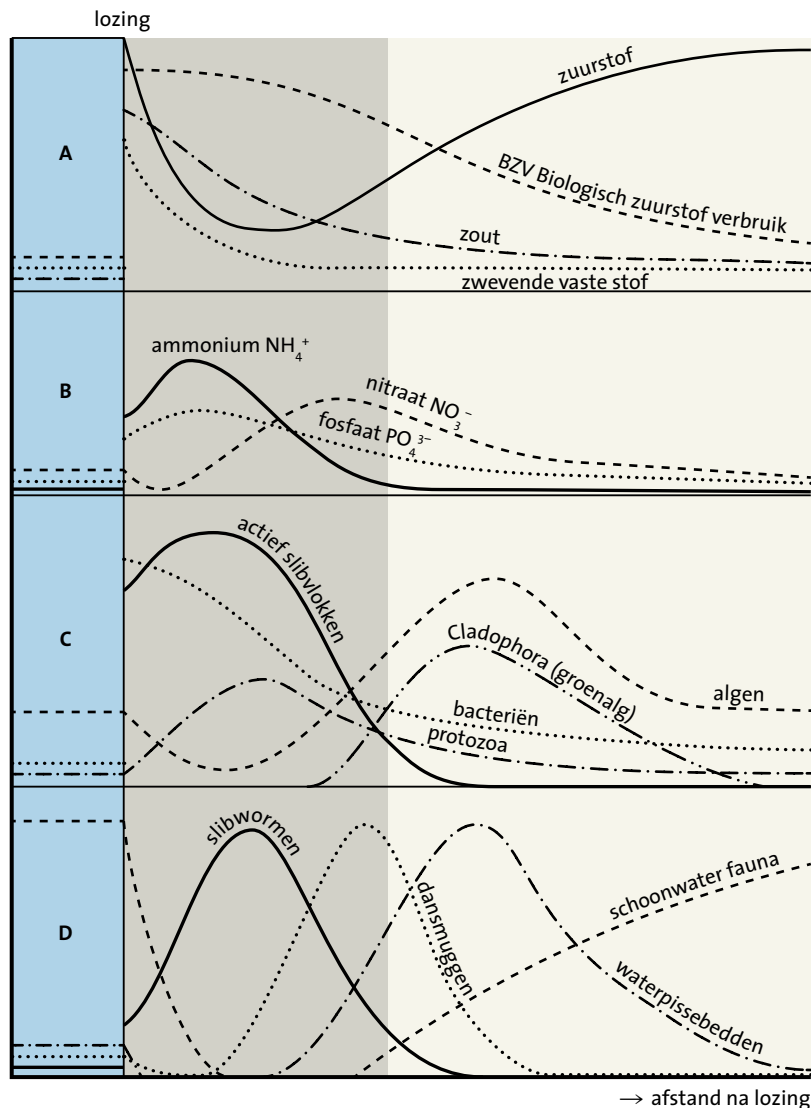
In grachten, kanalen en rivieren leeft een grote verscheidenheid aan organismen, variërend van waterplanten en watervlooiën tot micro-organismen als bacteriën. Zij geven het water het zelfreinigende vermogen. Ze breken de afvalstoffen die in het water terecht komen af en houden zo het water schoon en helder. De natuur heeft daar wel tijd en ruimte voor nodig.

De biologische processen die zich in de natuur afspelen, zijn onderdeel van de grote kringlopen der elementen, in wezen een continu spel van opbouwen en afbreken van verbindingen. Van deze kringlopen is al het leven op aarde afhankelijk. De belangrijkste elementen zijn koolstof (C), stikstof (N), fosfor (P) en zwavel (S).

Deze elementen staan ook centraal bij het zuiveren van afvalwater. De hoofdcomponenten van huishoudelijk afvalwater, namelijk organisch materiaal en nutriënten als stikstof, fosfor en zwavel, zijn meestal afkomstig van deels verteerd voedsel, toilet papier, wasmiddelen, etcetera. In afvalwaterzuiveringsinstallaties worden deze organische verbindingen afgebroken en deels teruggewonnen. Hierbij spelen bacteriën en zuurstof een hoofdrol.

## Koolstof

De afbraak van organische afvalstoffen kan met en zonder zuurstof. Bij afbraak met zuurstof, ofwel aerobe stofwisseling, worden organische verbindingen geheel omgezet naar  $\text{CO}_2$ . Micro-organismen kunnen ook zonder zuurstof afvalstoffen afbreken. In plaats van zuurstof gebruiken ze dan stoffen die zuurstof bevatten zoals sulfaat of nitraat. Deze stoffen zitten ook in afvalwater. Bij de omzetting van sulfaat en nitraat ontstaan respectievelijk sulfide en ammonium of stikstofgas. Afbraak van organische afvalstoffen zonder zuurstof, sulfaat of nitraat (ook wel fermentatie



Klassieke weergave van de gevolgen van een lozing van organische stoffen op een stromend oppervlaktewater (Hynes, 1962). A: fysische en biochemische parameters, zoals het zuurstofverbruik (BZV) en -gehalte, zwevende stof; B: chemische parameters, als ammonium, nitraat en fosfaat; C: micro-organismen, zoals schimmels, bacteriën, algen en watervlooiën en D: 'grotere' dieren, zoals wormpjes en muggenlarven. Het blauwe blok geeft de hoeveelheid van een stof of organisme aan in schoon stromend water. Dit is de natuurlijke, stabiele kwaliteit die we na een lozing benedenstrooms weer terug willen hebben. Het grijze blok geeft aan hoe in een rioolwaterzuivering de natuurlijke processen worden nagebootst en geoptimaliseerd door bijvoorbeeld slim te beluchten en actief slib te mengen die het afval omzetten. Het gezuiverde afvalwater voldoet ondanks alle inspanningen niet aan de kwaliteit van goed oppervlaktewaterwater, zoals in het blauwe vlak is weergegeven.



**Onderzoekopstelling van de Radboud Universiteit Nijmegen (groep Mike Jetten) voor het zuiveren van afvalwater. Het reactorvat in het midden bevat de rode anammoxbacteriën die het (synthetische) afvalwater met ammonium zuiveren.**

genoemd) leidt tot de vorming van biogas een mengsel van methaan ( $\text{CH}_4$ ) en kooldioxide. Deze vorm van afbraak is een microbiologisch proces waarbij anaerobe bacteriën samenwerken met methanogene archaea, ook wel methanogenen genoemd. Vroeger werden archaea als archaeobacteriën geïdentificeerd maar tegenwoordig worden ze onderscheiden van bacteriën. De anaerobe bacteriën breken organische verbindingen eerst af naar acetaat,  $\text{CO}_2$  en  $\text{H}_2$ . Acetaat wordt vervolgens door methanogenen omgezet naar  $\text{CH}_4$  en  $\text{CO}_2$ , en  $\text{CO}_2$  wordt met waterstof omgezet naar  $\text{CH}_4$ .

Bacteriën en archaea zijn in een vroeg stadium van de evolutie van elkaar afgescheiden, maar fysiologisch zijn ze van elkaar afhankelijk. Dat archaea methaan kunnen vormen staat sterk in de belangstelling. In de eerste plaats doordat methaan een heel sterk broeikasgas is, 20 keer sterker dan  $\text{CO}_2$ . Daarnaast is methaanvorming ook een manier om organisch materiaal om te zetten naar biogas, zoals bijvoorbeeld bij mestvergisting en de vergisting van zuiverings-slib van waterzuiveringsinstallaties gebeurt.

## Stikstof en sulfaat

Plantaardig materiaal bevat niet enkel koolstof-waterstofverbindingen, maar ook eiwitten waar relatief veel stikstof en zwavel in voorkomt. Bij de afbraak van plantaardige biomassa komen deze elementen vrij als ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) en sulfide ( $\text{S}^{2-}$ ). Om anorganische stikstofverbindingen uit water te verwijderen kan gebruik worden gemaakt van nitrificatie en denitrificatie. Bij nitrificatie oxideren aerobe bacteriën het opgeloste ammonium naar nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ) en nitriet ( $\text{NO}_2^-$ ), en bij de denitrificatie zetten anaerobe bacteriën nitraat en nitriet om naar stikstofgas  $\text{N}_2$ . Voor het eerste proces is dus zuurstof nodig, het tweede proces verloopt zonder zuurstof maar heeft wel een hulpstof nodig, bijvoorbeeld de organische stof methanol (elektronendonor).

In Delft is bij Gist-brocades in de jaren '90 van de vorige eeuw een heel bijzonder microbiologisch proces ontdekt: Anammox, waarbij ammonium geoxideerd wordt met nitriet en waarbij  $\text{N}_2$  wordt gevormd. Dit proces is verder onderzocht aan de TU Delft en de Radboud Universiteit Nijmegen. De ontdekking van Anammox was heel belangrijk voor de afvalwaterzuivering omdat hierdoor minder zuurstof en geen extra organische stof nodig zijn om stikstof uit water te verwijderen.

Om sulfaat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) uit water te verwijderen kan men eerst sulfaatreducerende bacteriën aan het werk zetten, waarbij sulfide gevormd wordt. Sulfide kan dan gedeeltelijk geoxideerd worden naar elementair zwavel ( $\text{S}^0$ ). Dat gebeurt wanneer sulfide-oxiderende bacteriën onvoldoende zuurstof krijgen om sulfide helemaal naar sulfaat te oxideren.

## De opkomst van de zuiveringen

■ PROF. DR. IR. ALFONS STAMS

**D**E NATUUR kan een bepaalde belasting van verontreinigingen aan, maar de omstandigheden voor de groei en activiteit van bacteriën in een sloot, meer of rivier zijn meestal niet optimaal. In het verleden leidde lozing van afvalwater op het oppervlaktewater tot gezondheids- en milieuproblemen, zeker toen de bevolking sterk ging toenemen.

Wanneer oppervlaktewater overbelast wordt met organische verbindingen ontstaat er door de bacteriële activiteit al snel een tekort aan zuurstof. Bij zuurstofloze afbraak van organische verbindingen ontstaan echter organische zuren en waterstofsulfide, die stank en overlast veroorzaken en tot vissterfte leiden. Het is daarom zaak om de condi-

ties voor de micro-organismen van de gewenste afbraakprocessen te verbeteren. Dat is waar de afvalwaterzuivering voor zorgt. De toepassing van technologie zorgt ervoor dat belemmeringen voor afbraak en microbiële groei worden opgeheven, zoals het toevoeren van zuurstof. Omdat de hoeveelheid bacteriën die het werk moeten doen sterk is verhoogd, gaat het ook nog een stuk sneller.

### Natuur in versnelling

De basis van versnelde afbraak is gelegd door ingenieur Aale Pasveer die beluchtingsproeven deed om een goedkope en effectieve methode te ontwikkelen om afvalwater te zuiveren. Het eerste type oxidatiesloot is naar hem vernoemd: de Pasveersloot (zie ook paragraaf: De oxidatiesloot op pag. 18). Door toevoer van zuurstof kunnen bacteriën snel de organische verbindingen in afvalwater

Door het warme weer en hevige buien zijn in de wateren van Amersfoort duizenden vissen gestorven wegens gebrek aan zuurstof.



---

## Bacteriën vormen een korrelslib dat makkelijk bezinkt

afbreken en ook goed groeien. Ongeveer 50% van de koolstof in verontreinigingen wordt omgezet in microbiële biomassa.

Veel bacteriën per volume-eenheid zorgen voor een hoge omzettingssnelheid. Dat is gunstig, maar ook een probleem. Na zuivering van het afvalwater moet de microbiële biomassa (het zuiverings-slib) weer verwijderd worden om helder water te lozen. Een mooie bijkomstigheid is dat de micro-organismen spontaan in vlokken groeien, die iets zwaarder zijn dan water en bezinken wanneer de beluchting gestopt wordt. Dit bezinkingsproces vindt plaats in een bezinkingsbekken. Een deel van dat slib wordt teruggevoerd naar de oxidatiesloot om de hoge omzettingssnelheid in stand te houden. Het teveel aan slib wordt ontwaterd en daarna vergist voor biogas of verbrand.

### Groefactoren

Voor de optimale groei van micro-organismen zijn veel factoren belangrijk, zoals zuurstof, zuurgraad, temperatuur en voedingsstoffen: de koolstof-, stikstof-, zwavel- en fosforbronnen. Daarnaast zijn micronutriënten nodig zoals ijzer, zink, nikkel en seleen om specifieke enzymen te laten werken.

In huishoudelijk afvalwater zijn voldoende nutriënten aanwezig. Dit vormt geen beperking voor de activiteit en groei van micro-organismen. Zuurstof is vaak wel beperkend en een lage temperatuur is ook niet gunstig voor een hoge activiteit.

Bij specifieke industriële afvalwaterstromen kunnen sommige nutriënten wel een beperkende factor zijn. Nauwkeurige analyse van de samenstelling van het afvalwater is daarom nodig om eventueel beperkende nutriënten aan te vullen.

### Anaeroob korrelslib

Bij aerobe zuivering wordt veel slib geproduceerd dat verwerkt moet worden. Anaerobe zuivering lijkt daarom een betere optie. Een groot deel van de organische afvalstoffen wordt omgezet in biogas,

waardoor er minder energie over is voor biomas-agroei. Toch is anaerobe zuivering lange tijd niet aantrekkelijk geweest. In afwezigheid van zuurstof verliepen de omzettingen traag en de afbraak was onvolledig. Voor huishoudelijk afvalwater dat te weinig organische stof bevat, is het winnen van biogas sowieso niet rendabel. Dat geldt niet voor afvalwaterstromen uit de agro-industrie, zoals aardappelzetmeelfabrieken, suikerfabrieken, bierbrouwerijen en slachthuizen.

De anaerobe zuivering van afvalwater heeft in de jaren zeventig een grote doorbraak gekend door het onderzoek van de Wageningse hoogleraar milieutechnologie Gatze Lettinga. Hij en zijn medewerkers ontdekten dat bij anaerobe zuivering van afvalwater de micro-organismen in compacte korrels gingen groeien. De activiteit van dit zogenaamde korrelslib is hoog omdat het compacte microbiële aggregaten zijn van bacteriën en methanogenen die gezamenlijk organische verbindingen efficiënt afbreken. De methanogenen zetten de afbraakproducten - acetaat, waterstof, formiaat - geproduceerd door de andere bacteriën in de korrel snel om tot methaan (biogas). Een bijkomend voordeel van korrelslib is de goede bezinkbaarheid, waardoor scheiding van water en slib makkelijker en sneller mogelijk is en de actieve methanogene biomassa in de reactor kon blijven. Het korrelslib van een goedwerkende anaerobe reactor kan dienst doen als entmateriaal van andere reactoren.

Anaerobe zuivering is een voorzuivering. Ammonium en sulfide komen bij de anaerobe afbraak van organische materiaal vrij en deze moeten daarna nog verwijderd worden. Dat kan in een combinatie van aerobe of anaerobe processen.

### Natuur in vertraging

Behalve een versnelling van natuurlijke processen is het soms ook wenselijk om microbiële processen te vertragen door groeistimulerende verbindingen toe te voegen.



## Basis rioolwaterzuivering

Een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi) zuivert al het afvalwater dat via het riool wordt aangevoerd. Dat kan afkomstig zijn van huishoudens, bedrijven en vaak ook van wegen. Het zuiveringsproces wordt opgedeeld in enkele processtappen:

### Voorzuivering (primair)

De eerste zuivering verwijdert het grove vuil, de bezinkbare delen en de zwevende delen uit het afvalwater, zoals blikjes, plastic, tampons, maandverband, vet en zand. Grote delen worden met een roosters er uitgefilterd en bezinkbare fijnere delen en vet worden met een flotatiebak uit het water verwijderd. De opgeloste stoffen gaan naar de volgende stap.

### Biologische zuivering (secundair)

In deze zuiveringsstap wordt het zelfreinigend vermogen van de natuur nagebootst. Door een hoge concentratie aan bacteriën in het water (actief slib) en aanvoer van voldoende zuurstof (aerobe zuivering) wordt dit

natuurlijke proces versneld en opgeloste organische verbindingen, stikstof en fosforverbindingen verwijderd. Hierbij komt slib vrij. Het actiefslibproces is de meest toegepaste methode voor biologische waterzuivering. Het actief slib bestaat uit verschillende organismen, van eencellige tot meercellige organismen. Deze organismen leven van de afvalstoffen in het afvalwater of van de organismen in het slib.

### Nazuivering (tertiair)

Deze stap verwijdert de zwevende en colloïdale stoffen die zijn achtergebleven na de primaire of secundaire zuivering door deze neer te slaan, te oxideren, of te adsorberen aan actief kool.

**Verschillende stadia van afvalwaterzuivering: van links naar rechts: primair gezuiverd afvalwater, afvalwater gemengd met actiefslib in de biologische zuivering, water na de standaard rioolwaterzuivering voor huishoudelijk en gemengd afvalwater, drinkwater ter vergelijking.**



dingen te verminderen. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van fosfaten als waterontharder in wasmiddelen. In het verleden heeft gebruik van deze wasmiddelen geleid tot een toename van het fosfaat in het afval- en oppervlaktewater, een stof die voorheen beperkend was voor de groei van algen. De toename van fosfaat veroorzaakte een enorme algenbloei, waardoor grachten en sloten groen kleurden. De problemen kwamen doordat de algen massaal weer afstierven en de afbraak al het zuurstof uit het water onttrok. Dit probleem van eutrofiëring leidde tot onderzoek naar innovatieve methoden om fosfaat met micro-organismen te verwijderen, eerst in Wageningen en daarna in Delft. Door fosfaat in wasmiddelen te vervangen door andere verbindingen is het probleem van eutrofiëring door fosfaat inmiddels sterk vermindert.

## Waterwetten

**Na de Tweede Wereldoorlog was Nederland vooral bezig met de wederopbouw en niet met de kwaliteit van het milieu en het oppervlaktewater. Tussen 1960 en 1970 bereikte de waterkwaliteit een dieptepunt; de rivier de Rijn stond bekend als 'het riool van Europa'. Pas na de invoering van de WVO kwam hier verandering in.**

### 1970 Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren (WVO)

De wet heeft als doel de kwaliteit van oppervlaktewateren te beschermen door lozingen aan regels te binden. Het lozen zonder vergunning van afval- en schadelijke stoffen in oppervlaktewater in het gehele Nederlandse grondgebied is verboden.

### 1971 Oprichting Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA)

Het kenniscentrum van regionale waterbeheerders in Nederland voor afvalwaterzuivering, klimaatbestendig waterbeheer, ecologische waterkwaliteit, veilige regionale waterkeringen.

### 1991 Richtlijn stedelijk afvalwater

De richtlijn legt normen op voor concentraties van BZV (biochemische zuurstofverbruik: de hoeveelheid zuurstof die nodig is voor de afbraak van biologisch afbreekbare organische stoffen in water door micro-organismen), ammonium, nitraat, fosfaat en zwevende stoffen.

### 1993 Het BOOM-besluit

Het besluit kwaliteit en gebruik overige

organische meststoffen verbiedt het gebruik van zuiveringsslib van rwzi-installaties in de landbouw vanwege het gehalte aan zware metalen. Ook storten is verboden waardoor het slib op grotere schaal wordt verbrand.

### 1993 Wet milieubeheer

Elke Nederlandse gemeente moet het binnen haar grenzen vrijkomende afvalwater via de riolering inzamelen en aanbieden aan de rioolwaterzuivering.

### 2000 Europese Kaderrichtlijn Water (KRW)

De richtlijn heeft als doel de kwaliteit van oppervlakte- en grondwater in Europa te waarborgen. Voor Nederland gaat het om het stroomgebied van respectievelijk Schelde, Maas, Rijn en Eems. In 2015 moet de kwaliteit op orde zijn, zowel de chemische als ecologische toestand. Dit houdt onder andere in dat men een goede rioolwaterzuiveringsinfrastructuur heeft.

**Waterbeheerders moeten aan nog vele andere Europese richtlijnen voldoen: de Drinkwaterrichtlijn, de Grondwaterrichtlijn, de Hoogwaterrichtlijn, de Kaderrichtlijn mariene strategie, de Nitraatrichtlijn, de Richtlijn prioritair stoffen, de Richtlijn stedelijk afvalwater, de Richtlijn aquatisch milieu, de Viswater- en Schelpdierwaterrichtlijn en de Zwemwaterrichtlijn.**

### 2005 Besluit lozing huishoudelijk afvalwater

Huishoudens die geen riolering hebben, moeten het afvalwater eerst met een eigen zuiveringssysteem reinigen voordat het in de

bodem of op het oppervlaktewater kunnen lozen. In 2008 waren er in Nederland nog 65.000 personen niet aangesloten op een riool dat naar een rioolwaterzuiveringsinstallatie leidt.

### 2009 De Waterwet

De Waterwet vervangt de WVO en nog zeven wetten om de handhaving te vereenvoudigen. De Waterwet is van toepassing op lozingen die direct in het oppervlaktewater plaatsvinden en lozingen rechtstreeks op de rwzi. Alle overige lozingen vallen onder de Wet milieubeheer. Verder geeft de Waterwet, invulling aan de Europese kaderrichtlijn water. Zo zijn de waterbeheerders verplicht te voldoen aan de chemische en ecologische kwaliteitsnormen voor oppervlaktewater en grondwater.

### 2018 Zuiveringsplicht glastuinbouw

Een glastuinder moet aantonen dat er zuiveringstechnologie is geïnstalleerd, die meer dan 95% van de gebruikte bestrijdingsmiddelen verwijdert voordat het afvalwater wordt geloosd.

### 2018 Drinkwaterrichtlijn (herziening 1998)

De Europese Commissie stelt normen voor nieuwe en opkomende stoffen om de drinkwaterkwaliteit te beschermen. Het gaat om stoffen zoals per-fluoralkyl, bisfenol A en nonylphenol.

## De oxidatiesloot, de eerste eenvoudige zuivering

■ ING. RUUD KAMPF

**N**A DE Tweede Wereldoorlog was Nederland verarmd: er was weinig geld en er waren veel problemen, net als in veel ontwikkelingslanden nu. Niet alleen in de grote steden waren de problemen met vervuild oppervlaktewater groot, ook in het toen nog dun bevolkte platteland. Geld voor mooie technische oplossingen was er niet, wel voor goede eenvoudige ideeën. Dr. ir. Aale Pasveer (1901-2001) kwam in 1947 bij TNO in dienst. Hij kwam op het idee dat aerobe waterzuivering veel eenvoudiger en veel goedkoper kon wanneer de zuiveringstap én de slibstabilisatie in één ruimte plaatsvond. Een aparte voorbezinktank, slibvergisting en nabezinktank werden daardoor overbodig. Hij onderzocht dit op laboratoriumschaal in eenvoudige apparatuur gemaakt van Meccano en melkflessen zonder bodem.

### Stank in Voorschoten

Enige tijd later werd de afdeling Water, Bodem en Lucht van het Instituut voor Gezondheidstechniek TNO om advies gevraagd vanwege een zwarte stinkende sloot aan de Dobbeweg in Voorschoten, veroorzaakt door de lozing van rioolvocht afkomstig van huishoudelijk afvalwater van vierhonderd zielen, zoals dat destijds nog werd omschreven. Voor Pasveer een goede gelegenheid om zijn op het laboratorium verkregen kennis toe te passen.

Een kunstmatig beluchte sloot kan worden gezien als een riviertje, was de redenering van Pasveer. De natuurlijke zuurstoftoevoer via het wateroppervlak is dan vervangen door kunstmatige beluchting en het afvalwater wordt met reeds gezuiverd afvalwater vermengd in plaats van rivierwater. Voor de aanleg van dit zuiveringssys-



Aale Pasveer druk aan het experimenteren (bron: TNO).

teem was een sloot, een pomp en een overlaat voor de afvoer van water voldoende. Door het beluchten van de sloot werd al een redelijk bevredigende situatie bereikt. De zuurstofbehoefte daalde met 90%, wel bevatte het water nog tot 50 mg/l zwevend stof, dat later in de vaart bezonk. Het water stonk niet meer en de overlast van de lozing van vierhonderd 'zielen' was sterk teruggebracht. Met een eerste eenvoudige ingreep was al veel bereikt.

### Ijsbaanvorm

Tijdens het praktijkonderzoek aan de sloot in Voorschoten concludeerde men uit nog lopend laboratoriumonderzoek dat de zuiverende werking werd

## Brandend afvalwater

■ PROF. DR. WIEL HOEKSTRA

In de Limburgse kolenmijnindustrie werden tot omstreeks 1930 de stenen die samen met de kolen naar boven kwamen handmatig verwijderd. Later ging men kolen en stenen scheiden in speciale waterbassins. Daar zakten de zware stenen naar beneden en bleven de kolen op basis van hun lager soortelijk gewicht bovendrijven. Het afvalwater van deze procedure was rijk aan kolengruis. Dat werd eertijds geloosd op sloten en beken die daardoor snel vervuilden. Op basis van klachten en claims zagen de mijnen zich gedwongen dat afvalprobleem op te lossen. Men ging daarom bij de kolenmijnen over tot het bouwen van grote openlucht-bassins. Ruimte daarvoor was ruim voorradig. Het afvalwater werd in die bassins verzameld en na toevoeging van onder andere kalk en een aantal ander chemicaliën, vormden de zwevende kleine koolstofdeeltjes een samenhangende geleachtige

massa die uitzakte. Het procedé was sterk empirisch van aard. Het gevormde bezinksel (kolenslik) werd door de Limburgers 'sjlam' genoemd. Dit was afgeleid van het Duitse woord Schlamm voor kolenslik. Het water dat in het bassin bovendreef kon vervolgens zonder problemen geloosd worden op het oppervlaktewater. De mijnindustrie gebruikte de sjlam als bedrijfsbrandstof en verkocht het ook als een tamelijk goedkope huisbrandstof. Het was afgezien van de prijs geen gewilde huisbrandstof. Je kon de volumineuze sjlam thuis moeilijk opslaan en door het grote vochtgehalte was het bovendien geen brandstof die je direct kon gebruiken. Een kachel moest al goed branden aler je er sjlam aan toevoegde. Ik denk dat het verdwijnen van de sjlam na de sluiting van de mijnen in 1965 door weinigen zal zijn betreurd.

verbeterd door meer bacteriën in het systeem te houden. Hiervoor werd in 1954 evenwijdig aan de bestaande sloot een nieuwe sloot gegraven die op de uiteinden met de bestaande sloot werd verbonden, zodat een ovaalvormig circuit in de vorm van een ijsbaan ontstond. Voor beluchting én voortstuwing werd een beluchtingsrotor aangebracht, oorspronkelijk als een borstel uitgevoerd, later als een metalen rotor met hoekijzers.

Het afvalwater, aangevoerd vanuit Voorschoten, kwam eerst terecht in een pompkelder, die ook

als opslag dienst deed. Enige tijd voordat de pomp aansloeg, werd de beluchtingsrotor uitgezet, zodat het slib in de sloot kon bezinken en het 'geklaarde' water werd afgelaten. Dit onderzoek op praktisch-schaal leidde tot het basisontwerp van de oxidatiesloot.

Dit basisontwerp werd uiteindelijk op veel manieren uitgevoerd. Hierbij was er altijd een lichte onmin van Pasveer met de civiele technici die 'zijn sloten' het liefst technisch uitvoerden. Maar met een mooie betonnen installatie was voor een ingenieursbureau nu eenmaal meer te verdienen. Door het beleid om de riolering en waterzuivering te concentreren in grote, regionale eenheden zijn in Nederland de meeste oxidatiesloten verdwenen.

### Rijksmonument

Het belang van de oxidatiesloot voor de ontwikkeling van Nederland na de eerste wereldoorlog blijkt ook uit de erkenning van de Pasveersloot in Dreischor als Rijksmonument. Hier staat de enige oxidatiesloot in Nederland die volledig en ongeschonden bewaard is gebleven, ondanks dat het 40 jaar lang het afvalwater van Dreischor heeft gezuiverd. In 2001 is de zuivering buiten bedrijf gesteld, sindsdien wordt het afvalwater vanuit Dreischor verpompt naar een regionale zuivering.

De Nederlandse uitvinding van de oxidatiesloot vond wereldwijd navolging, en nog steeds wordt het systeem internationaal toegepast. Het is zelfs zo dat de ontwerpgrondslag voor huishoudelijke afvalwaterzuivering 'slibbelasting van 0,05 kg BZV (biochemisch zuurstofverbruik, zie verder in het kader Waterwetten) per inwoner per dag' nog steeds de basis vormt voor elke moderne biologische afvalwaterzuivering met vergaande nutriëntenverwijdering.

### De moderne oxidatiesloot

De ontwikkeling van de oxidatiesloot heeft de



Rijksmonument oxidatiesloot in Dreischor.

basis gelegd voor nieuwe typen en grote zuiveringsinstallaties die later zijn ontwikkeld, zoals slib-op-dragersystemen en korrelslib of vergaande nabehandeling met zandfiltratie, vaak door een multidisciplinaire teams van technici en biologen. Voor kleine afvalwaterzuiveringen, met een capaciteit van 250 tot 5000 inwoners is de aloude oxidatiesloot nog altijd een uitstekend alternatief, vooral omdat door toepassing van wind of zonne-energie de energiebehoefte een minder grote rol speelt. De energiebehoefte voor beluchting is immers het hoogst gedurende de dag. Vergeleken met de energie behoefte van een Nederlands gezin, zo'n 3000-4000 kWh per jaar, is het verbruik voor het zuiveren van het 'gezinsafvalwater', slechts 30-40 kWh per jaar. Mogelijk ligt de toekomst van de moderne oxidatiesloot in ontwikkelingslanden,

waar voldoende zonneschijn en wind is en een hoge noodzaak van water(-en nutriënten)hergebruik.

# Verantwoord lozen, normen en wett

■ PROF. DR. ANNEMARIE VAN WEZEL

**W**E LOZEN in Nederland, maar ook in de ons omringende landen, heel wat afvalwater naar beken en rivieren. Ons eigen huishoudelijk afvalwater, met daarin alle resten van synthetische chemicaliën die we dagelijks gebruiken, komt na behandeling in de rioolwaterzuiveringsinstallaties in het oppervlaktewater. Omdat de installaties nog niet zijn ontworpen om deze chemicaliën te verwijderen, spoelen er op deze manier grote vrachten van bijvoorbeeld geneesmiddelen, schoonmaakmiddelen en cosmetica naar onze rivieren. Er zijn wel technische oplossingen voorhanden om de synthetische chemicaliën bij de rioolwaterzuiveringsinstallatie te verwijderen. In Nederland worden deze nu op verschillende plaatsen uitgetest, in verschillende landen om ons heen worden deze technieken al op grotere schaal toegepast.

## Directe en indirecte industriële lozingen

Verder zijn er veel industrieën waarvan het afvalwater via het riool bij deze installaties terecht komt. Wat er uit de rioolwaterzuiveringsinstallatie stroomt is dus meestal een mengsel van behandeld huishoudelijk en industrieel afvalwater. De provincies zijn verantwoordelijk voor de vergunning van deze indirecte lozingen vanuit industrie. Het gaat om ongeveer een derde van alle industriële lozingen. Op de samenstelling van deze indirecte industriële lozingen is beperkt zicht, vanwege het ontbreken van een centrale registratie. We weten dus niet goed om welke stoffen het gaat die geloosd worden, en ook niet goed welke industriële sector daarmee gemoeid is.

Daarnaast zijn er industriële complexen met een eigen industriële afvalwaterzuiveringsinstallatie. De waterbeheerder, dus Rijkswaterstaat of het waterschap, vergunnen deze directe industriële lozingen en houden zich hierbij aan de vrij algemene bepalingen die gegeven zijn in de Europese industriële emissierichtlijn. Deze is in Nederland omgezet via de Wet algemene bepalingen omgevingsrecht (Wabo), het Besluit omgevingsrecht en het Activiteitenbesluit.

Voor de industriële afvalwaterzuiveringsinstallatie is, via de emissieregistratie, goed in beeld welke type industrie het betreft. Echter, slechts een fractie van alle stoffen die in Nederland industrieel geproduceerd en verwerkt worden, wordt in deze emissieregistratie gerapporteerd. In de vergunningen staan de geproduceerde stoffen doorgaans niet in detail vermeld, maar worden meer algemene parameters gebruikt.

## Punt- en diffuse bronnen, land- en tuinbouw

Naast de rioolwaterzuiveringsinstallaties en industriële afvalwaterzuiveringsinstallaties zijn er nog andere zogenaamde puntbronnen, zoals de glastuinbouw. Hiervoor geldt sinds 1 januari 2018 in Nederland het Activiteitenbesluit. De glastuinder moet aantonen dat er zuiveringstechnologie is geïnstalleerd, die meer dan 95% van de vracht van de gebruikte bestrijdingsmiddelen verwijdert voordat het afvalwater in de rivieren terechtkomt.

Een belangrijke bron van watervervuiling vormen de diffuse bronnen. Voorbeelden hiervan zijn de bestrijdingsmiddelen die in de land- en tuinbouw worden gebruikt. Tijdens het spuiten

kan hiervan al een deel in het water komen, reden waarom vaak speciale spuitapparatuur wordt voorgeschreven om dit zoveel als mogelijk te beperken. Na gebruik kunnen de bestrijdingsmiddelen naar grondwater en oppervlaktewater spoelen. Bij de toelating van de bestrijdingsmiddelen wordt deze af- en uitspoeling meegewogen in de risicobeoordeling, deze wordt uitgevoerd per bestrijdingsmiddel per teelt. De combinatie van alle gebruikte middelen in een gebied kan toch in de praktijk problemen opleveren. Een ander voorbeeld van een diffuse bron zijn de diergeneesmiddelen, die via uitwerpselen van dieren op de bodem terecht komt.

Het oppervlaktewater wordt dus via veel verschillende bronnen belast met synthetische chemicaliën. Dit geldt ook voor grondwater, zeker als de grondwaterpakketten zijn gelegen in goed doorlatende bodems zonder beschermende slecht doorlatende bodemlaag erboven. Uiteindelijk zijn de waterbeheerders verantwoordelijk voor de waterkwaliteit. Dit is Rijkswaterstaat voor de grote wateren, de waterschappen voor de regionale wateren en de provincies voor het grondwater.

### Waterkwaliteit nog niet optimaal


Veel partijen zijn afhankelijk van een goede waterkwaliteit. Waterkwaliteit is bijvoorbeeld cruciaal bij de bereiding van goed drinkwater, voor bottelarijen, landbouw, veel industriële processen, recreatie en natuurlijk een goede natuurkwaliteit.

De Europese Kaderrichtlijn Water stimuleert dat de vele partijen die water belasten, beheren en gebruiken zo goed mogelijk grensoverschrijdend samenwerken. Hiervoor worden periodiek



stroomgebied-beheersplannen opgesteld. De Kaderrichtlijn Water vereist voor 33 stoffen een specifiek gedefinieerde waterkwaliteit, daarnaast vereist de richtlijn voor enkele stoffen dat ze gemonitord worden. In Nederland lopen we achter om deze waterkwaliteitsdoelen te bereiken. Minder dan 40% van de waterlichamen heeft de gewenste chemische kwaliteit, reden waarom hiervoor nu ook politiek veel aandacht is. Daarnaast is er in Nederland een signaleringswaarde gedefinieerd die geldt voor alle synthetische chemicaliën van 0,1 microgram per liter voor drinkwaterbronnen. Bij overschrijding van deze signaleringsparameter volgt onderzoek naar milieu- en gezondheidsrisico's, herkomst en verwijderingsmogelijkheden van de betreffende stof. Deze signaleringswaarde zorgt ervoor dat er bij waterbeheerders en -gebruikers aandacht is voor een breed aantal aan synthetische chemicaliën, we produceren en gebruiken als maatschappij immers tienduizenden chemicaliën.

**Met de juiste spuitapparatuur kan verspreiding van bestrijdingsmiddelen naar het water worden beperkt.**



**Dagelijks spoelen we van alles met  
schoon drinkwater door het afvoerputje  
of de wc. Wat gebeurt er met onze  
ontlasting tot zeepresten?**



# Afvalwater en de stad

*Meer dan 99% van al het huishoudelijk afvalwater komt in de rioolwaterzuivering terecht. Dit mengsel van duizenden verschillende stoffen wordt in waterzuiveringen afgebroken zodat het voldoet aan de eisen voor lozing op het oppervlaktewater. Natuurlijke systemen zoals helofytenfilters of hele waterharmonica's kunnen het water nazuiveren en de biologische waarde verder verhogen. Tegenwoordig staan de zogenaamde opkomende microverontreinigingen in de belangstelling. Deze hele lage concentratie aan medicijnresten, drugs en verzorgingsproducten worden nog nauwelijks verwijderd in de rioolwaterzuivering, maar kunnen negatieve gevolgen hebben voor het milieu en voor de drinkwaterproductie. Nieuwe combinaties van zuiveringstechnologie en natuurlijke systemen bieden perspectief.*

## Ons dagelijks (afval)water

■ DR. IR. HARDY TEMMINK

**I**N GROTE delen van de wereld, zoals in Afrika, Azië en het Midden-Oosten, is sprake van een enorm gebrek aan schoon water. Dit probleem is inmiddels zo urgent geworden dat het de komende decennia wel eens aanleiding zou kunnen zijn voor grootschalige migratie van waterarme naar waterrijke gebieden.

In Nederland mogen we ons gelukkig prijzen dat we altijd en overal de beschikking hebben over voldoende drinkwater. Althans, dat lijkt zo. Sommige industriële grootverbruikers nemen nu al drasti-

sche maatregelen voor waterbesparing en hergebruik zodat ze ook in de nabije toekomst verzekerd zijn van voldoende water. Een bekend voorbeeld is het chemische bedrijf Dow dat het afvalwater van de inwoners van Terneuzen zuivert tot een kwaliteit die geschikt is als koelwater. In feite wordt het drinkwater in Terneuzen dus tweemaal gebruikt: eerst door huishoudens en vervolgens door Dow.

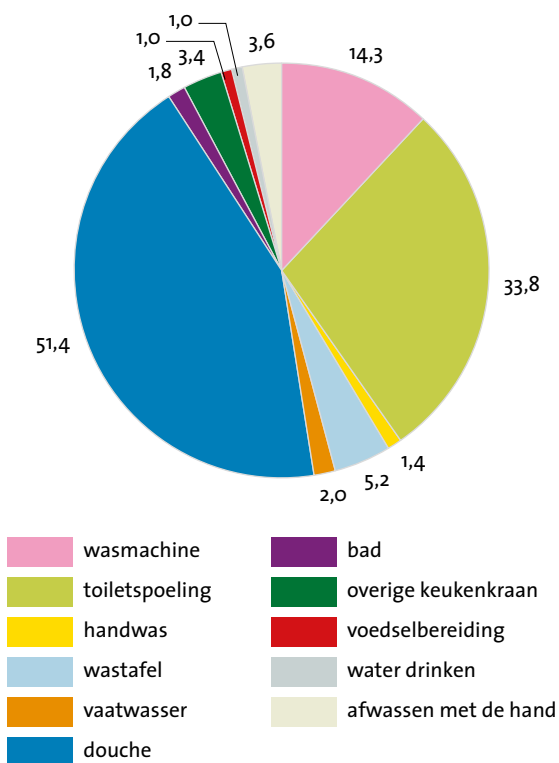
### Minder drinkwaterverbruik

Nederlands drinkwater is van zeer hoge kwaliteit. Het kost, afhankelijk van woonplaats, € 0,8-1,5 per kubieke meter (inclusief belasting). Het drinkwater wordt gemaakt uit oppervlakte- of grondwater.

**Gemiddeld drinkwaterverbruik door Nederlandse huishoudens, in de jaren '95 tot en met 2013, in liter per persoon per dag.**

Toepassing	1995	1998	2001	2004	2007	2010	2013
Bad	9.0	6.7	3.7	2.8	2.5	2.8	1.8
Douche	38.3	39.7	42.0	43.7	49.8	48.6	51.4
Wastafel	4.2	5.1	5.2	5.1	5.3	5.0	5.2
Toiletspoeling	42.0	40.2	39.3	35.8	37.1	33.7	33.8
Kleding wassen, hand	2.1	2.1	1.8	1.5	1.7	1.1	1.4
Kleding wassen, machine	25.5	23.2	22.8	18.0	15.5	14.3	14.3
Afwassen, hand	4.9	3.8	3.6	3.9	3.8	3.1	3.6
Afwassen, machine	0.9	1.9	2.4	3.0	3.0	3.0	2.0
Voedselbereiding	2.0	1.7	1.6	1.8	1.7	1.4	1.0
Koffie, thee en water drinken	1.5	1.5	1.5	1.6	1.8	1.8	1.0
Overig	6.7	6.1	6.7	6.4	5.3	5.3	3.4
<b>Totaal</b>	<b>137.1</b>	<b>132.0</b>	<b>130.6</b>	<b>123.6</b>	<b>127.5</b>	<b>120.1</b>	<b>118.9</b>

**Gemiddeld drinkwaterverbruik door Nederlandse huishoudens in liter per persoon per dag.**



Hiervoor gebruiken de drinkwaterbedrijven naast diverse chemicaliën behoorlijk wat primaire energie, wat overeenkomt met 2-3% van wat de gemiddelde Nederlander per jaar thuis aan elektriciteit verbruikt (circa 1.000 kWh). Dus door minder water te verbruiken, besparen we ook energie.

Het is dan ook goed om te constateren dat het gemiddelde waterverbruik door huishoudens een dalende trend laat zien met een afname van 13% tussen 1995 en 2013 van 137 naar 119 liter per persoon per dag. Dit komt vooral door de invoering van waterzuinige toiletten en wasmachines. Helaas is in dezelfde tijdperiode het douchewaterverbruik met maar liefst 34% gestegen doordat we steeds 'comfortabeler' en langer douchen. Dit is een ongewenste ontwikkeling omdat bij de opwarming van al dat water veel energie wordt verbruikt en het warme water vervolgens via het afvoerputje verloren gaat. Overigens zijn er warmtewisselaars op de markt die een deel van deze warmte kunnen terugwinnen, maar die zijn voor de meeste mensen (nog) onbetaalbaar. In Raalte heeft men een leuke oplossing bedacht. Ze gebruiken de restwarmte van rioolwater om het plaatselijke zwembad mee te verwarmen.

**Zwart, grijs en hemelwater**

Drinkwater verandert in afvalwater omdat we bij onze dagelijkse activiteiten allerlei verontreinigingen aan het water toevoegen. Bij het spoelen van het toilet ontstaat veruit de meeste vervuiling, reden om toiletwater ook wel zwart water te noemen. Ook het douchewater en het water van de wasmachine zijn vervuild met de verschillende chemicaliën die in tandpasta, shampoos, crèmes en wasmiddelen verwerkt zijn. Alle vormen van afvalwater anders dan het toiletwater worden samen ook wel grijs water genoemd. Alhoewel er meer grijs dan zwart water wordt geproduceerd, ongeveer 70% van het totale waterverbruik, is de vervuilingsgraad van het grijze water veel lager.

Zwart en grijs water komen samen in het riool terecht en mengen daar met hemelwater. Overigens leggen steeds meer gemeenten gescheiden rioolstelsels aan waarin het vieze afvalwater en schone hemelwater apart worden opgevangen. Het afvalwater gaat dan naar een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi), terwijl het schone hemelwater rechtstreeks naar de plaatselijke gracht of sloot stroomt.

In Nederland wordt gelukkig sinds de jaren 70 van de vorige eeuw meer dan 99% van al het huishoudelijk afvalwater ingezameld met riolen en drastisch gezuiverd. Hierdoor zijn afvalwater gerelateerde ziekten uitgebannen en is de kwaliteit van het oppervlaktewater met grote sprongen vooruit gegaan. Mede doordat de Europese wetgeving ook de landen stroomopwaarts verplicht hun afvalwater te zuiveren, zwemmen er tegenwoordig zelfs weer zalmen in de Rijn.

### Samenstelling afvalwater

Huishoudelijk afvalwater bestaat uit een mengsel van duizenden stoffen. Deze verschillen niet alleen in de concentratie waarin ze aanwezig zijn, maar ook in hun (biologische) afbreekbaarheid en hun effect op het (aquatische) milieu. Het is onmogelijk om van elke individuele stof de concentratie in afvalwater te meten. Om toch een indicatie te krijgen van de mate van verontreiniging worden een aantal wettelijk verplichte, relatief eenvoudige laboratoriummetingen gebruikt. De belangrijkste metingen hebben betrekking op (biologische afbreekbare) organische stoffen (C), stikstof (N) en fosfor (P).

Het totaal aan biologisch afbreekbare organische verbindingen wordt uitgedrukt als het zogenaamde biochemische zuurstofverbruik (BZV, de hoeveelheid zuurstof die nodig is voor de afbraak van biologisch afbreekbare organische stoffen in water door micro-organismen). Tijdens de meting wordt nagebootst wat er zonder zuivering in het aquatische milieu met deze stoffen gebeurt. Hier-

## Waterkleuren

**Zwart water** is gemengd toiletpoelwater met voornamelijk uitwerpselen: urine, poep en toiletpapier. Daarin zit veel organische stof, meststoffen, medicijnresten, hormonen en ziekteverwekkende bacteriën. Doordat het vervuilde water gaat rotten zal het na enige tijd een zwarte kleur krijgen. Per persoon produceren we per dag 1,5 liter urine en poep die met gemiddeld 35 liter water wordt weggespoeld.

**Grijs water** is al het huishoudelijk afvalwater dat niet afkomstig is van het toilet zoals bijvoorbeeld het water van bad, douche, keuken en (afwas)wasmachine. Door de zeepresten krijgt het uiteindelijk een grijskleur.

**Blauw water** is hemel- ofwel regenwater. Dit wordt gezien als schoon water omdat het zonder al te veel maatregelen (afhankelijk van de herkomst) geloosd kan worden op het oppervlaktewater. Het kan ook direct naar sloten, kanalen en

rivieren stromen of gebruikt worden voor het doorspoelen van de wc of besproeien van de tuin.

**Bruin water** is het toiletpoelwater met alleen fecaliën in scheidingstoiletten. Per jaar produceert een mens ongeveer 40 kg poep. Poep bevat voornamelijk organische stof en aanzienlijke hoeveelheden bacteriën; verder nog een beetje fosfaat, zink, koper, stikstof en restanten en afbraakproducten van medicijnen.

**Geel water** is het toiletpoelwater met alleen urine. Urine bevat de nutriënten stikstof en fosfaat in een relatief geconcentreerde vorm. Daarnaast zitten er hormonen en medicijnresten in. Een mens produceert ongeveer 4 kg stikstof en 300 g fosfaat per jaar. Alle Nederlanders samen plassen per jaar dus 64.000 ton stikstof en 4.700 ton fosfaat uit. Dat is ongeveer een tiende van de totale stikstof- en fosfaatbehoefte van de Nederlandse landbouw.

toe wordt afvalwater onder zuurstofrijke omstandigheden in contact gebracht met bacteriën die de organische stoffen naar kooldioxide en water omzetten. Hoe meer zuurstof de bacteriën hierbij verbruiken, hoe sterker de vervuilingsgraad.

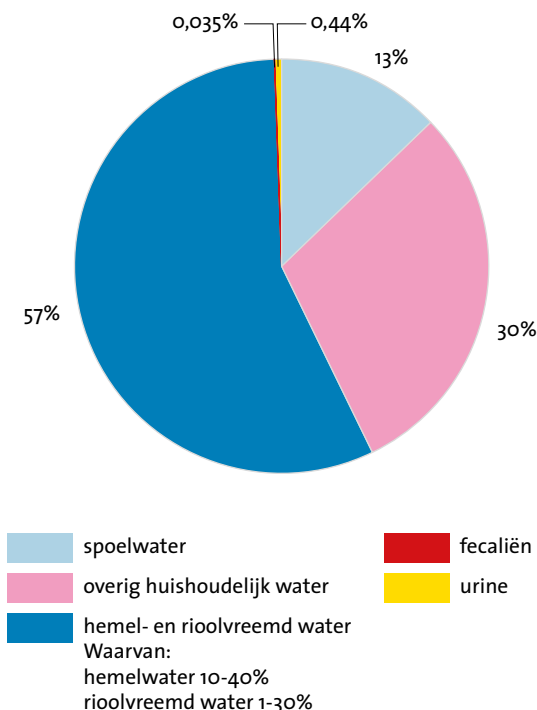
Stikstof en fosfor worden beschouwd als verontreinigende meststoffen die overmatige groei van algen en cyanobacteriën kunnen veroorzaken, ook wel eutrofiëring genoemd. In de zomermaanden is dit goed zichtbaar als groene drab die op

kanalen en grachten drijft. Overigens draagt ook overbemesting door de landbouwsector bij aan eutrofiëring omdat de overtollige meststoffen naar het oppervlaktewater uitspoelen. Algen en cyanobacteriën gebruiken zonlicht als hun energiebron en nemen kooldioxide op om nieuwe cellen van te maken. Wanneer al die algen afsterven komen grote hoeveelheden organische stof vrij die weer de ongewenste zuurstofloze condities in het oppervlaktewater veroorzaken. Een bijkomend probleem is dat bepaalde cyanobacteriën (blauwalgen), die

**Typische concentraties in mg per liter van de somparameters BZV, stikstof en fosfor in huishoudelijk afvalwater en de lozingseis waaraan ze moeten voldoen.**

Meting	Afvalwater	Lozingseis
BZV	300	20
Stikstof	50	10
Fosfor	10	2

Rioolwater bestaat voor meer dan de helft uit hemelwater en rioolvreemd water, dat is voornamelijk grondwater dat de riolering binnendringt. Een derde is overig huishoudelijk water van bad, douche en keuken. Onze uitwerpselen zijn maar een heel kleine fractie van het toiletspoelwater.



zich in de zomermaanden sterk profileren, voor de mens zeer giftige stoffen (toxines) produceren. Het komt regelmatig voor dat er dan een tijdelijk zwemverbod wordt ingesteld.

### Lozingseisen

Huishoudelijk afvalwater mag pas op oppervlaktewater geloosd worden als de concentraties BZV, stikstof en fosfor aan (wettelijke) lozingseisen voldoen. Hiermee is het voor de waterschappen, die verantwoordelijk zijn voor de zuivering van het afvalwater, eenduidig hoe grondig ze het afvalwater moeten zuiveren.

Overigens zijn deze lozingseisen niet overal hetzelfde. Volgens de Europese wetgeving, vastgelegd in de zogenaamde Kaderrichtlijn Water (KRW), moet oppervlaktewater voldoen aan bepaalde minimale ecologische en chemische eisen. Dit kan aanleiding zijn om de lozingseisen verder aan te scherpen. Bovendien kan de nationale en lokale overheid het aantal eisen waaraan moet worden voldaan, uitbreiden. Als een rwzi zijn gezuiverde afvalwater rechtstreeks op recreatief water loost, de Randmeren bijvoorbeeld, dan mag het geloosde water niet meer dan 900 en 300 zogenaamde kolonievormende eenheden per 100 milliliter bevatten van de fecale bacteriën *Escherichia coli* en *Enterococci*. Dit betekent soms dat een extra zuiveringsstap nodig is waarin het water wordt gedesinfecteerd met technieken als oxidatie door ozon, chloorbehandeling of ultraviolette straling.

De concentraties organische stof, stikstof en fosfor in rioolwater zijn eigenlijk niet zo hoog, het gaat slechts om milligrammen per liter. Toch is de potentiële vervuiling enorm, eenvoudigweg omdat we zoveel afvalwater produceren.

### Microverontreinigingen

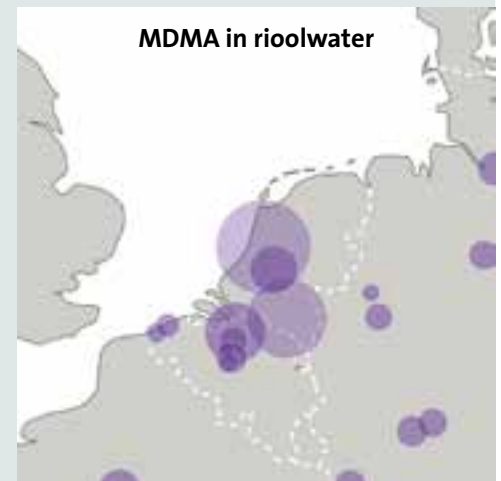
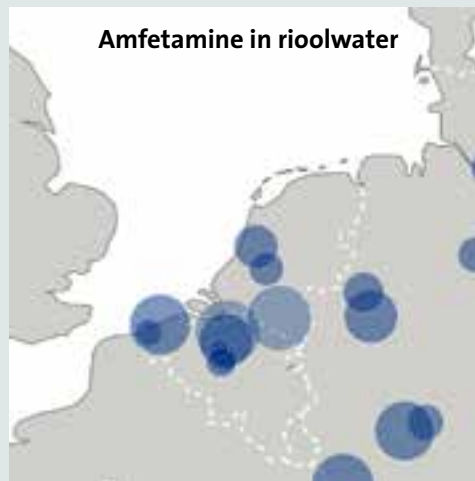
Naast deze 'bulk'-verontreinigingen bevat afvalwater ook stoffen die aanwezig zijn in nog lagere

## Rioolwater spreekt boekdelen

■ PROF. DR. PIM DE VOOGT

Huishoudelijk afvalwater bevat een mengsel van chemische stoffen waaronder allerlei stoffen die door het menselijk lichaam zijn uitgescheiden als gevolg van consumptie of blootstelling eraan. Daar zitten drugs en afbraakproducten bij, maar ook bijvoorbeeld stoffen die in het lichaam als gevolg van ziekte kunnen ontstaan. Meting van de concentraties van deze stoffen in het rioolwater voordat deze een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi) binnenkomen, levert waardevolle informatie over de hoeveelheid en het soort stoffen waaraan de bevolking is blootgesteld. Dat kan ook heel lokaal. Zo zijn rioolwatermetingen recentelijk gebruikt om de consumptie van alcohol, nicotine, (illegale) geneesmiddelen en doping door amateur-athleten te schatten.

Sinds een jaar of zeven zijn rioolwatermetingen gebruikt om het drugsgebruik in grote en kleine steden in Nederland en Europa in kaart te brengen. Dat gebeurt door gemiddelde concentraties gedurende 24 uur te meten en te vermenigvuldigen met de hoeveelheid rioolwater die gedurende die tijd naar de rwzi wordt aangevoerd. Deze gegevens worden inmiddels jaarlijks door het Europees waarnemingscentrum voor drugs en drugsverslaving (EMCDDA) op het internet geplaatst om de verspreiding in Europa en regionale verschillen in kaart te brengen. Soms worden restanten van drugs ook rechtstreeks in het riool geloosd, bijvoor-



**Hoeveelheden amfetamine (links) en ecstasy (MDMA) (rechts) gemeten in het rioolwater van Europese steden in 2017. In Nederland wordt gemeten in Amsterdam, Utrecht en Eindhoven om zo het drugsgebruik in kaart te brengen. Bron: Europees waarnemingscentrum voor drugs en drugsverslaving (EMCDDA).**

beeld wanneer illegale productielaboratoria van drugs hun afval opruimen (daar zitten altijd restanten van het product zelf bij), of wanneer drugsproducenten vermoeden dat een politie-inval op handen is. In Nederland zijn directe lozingen in rioolwater van ecstasy en amfetamine regelmatig aangetoond. Het is met speciale meettechnieken mogelijk om rechtstreeks geloosde drugs te onderscheiden van drugs die door het lichaam zijn uitgescheiden.

De aanwezigheid van (grote hoeveelheden) drugsafval in het rioolwater kan de zuiveringsefficiëntie van een rwzi beïnvloeden. Bovendien kunnen drugs die slecht verwij-

derd worden in rwzi's in het ontvangende oppervlaktewater terecht komen. Het is nog niet bekend wat voor invloed dat op het waterleven kan hebben.

concentraties, vaak microgrammen, nanogrammen of picogrammen per liter. Het gaat om stoffen zoals medicijnen (antibiotica, de pil, bloeddrukverlagers), afbraakproducten van deze medicijnen, hormonen die via urine in afvalwater terechtkomen, wasmiddelen en stoffen die in persoonlijke verzorgingsproducten voorkomen zoals antibacteriële stoffen, chemische UV-filters en microplastics. Deze laatste groep stoffen komt vooral in grijs water voor.

Alhoewel deze zogenaamde microverontreinigingen (nog) niet specifiek in de wetgeving zijn opgenomen, staan ze momenteel wel in het middelpunt van de belangstelling. In rwzi's worden ze niet of nauwelijks verwijderd en in het aquatische milieu kunnen ze, soms in combinatie met soortgelijke stoffen, allerlei negatieve effecten veroorzaken. Zo is een relatie aangetoond tussen vrouwelijke hormonen (oestrogenen) die in 'de pil' zitten en geslachtsveranderingen bij vissen. Een ander voorbeeld is het antidepressivum Prozac waarvan is aangetoond dat het de voortplanting van zoetwatermosselen remt.

Het is de verwachting dat op langere termijn wel regelgeving voor de lozing van microverontreinigingen zal komen, alhoewel het erg lastig is om een oorzakelijk verband aan te tonen tussen hun aanwezigheid en een negatief effect op het aquatische ecosysteem. In Zwitserland heeft men inmiddels besloten hier niet langer op te wachten en rwzi's alvast uit te breiden met extra zuiveringsstappen waarmee microverontreinigingen worden verwijderd, zoals oxidatie met ozon en adsorptie aan actieve koolfilters.

## Zuiveren met zuurstof

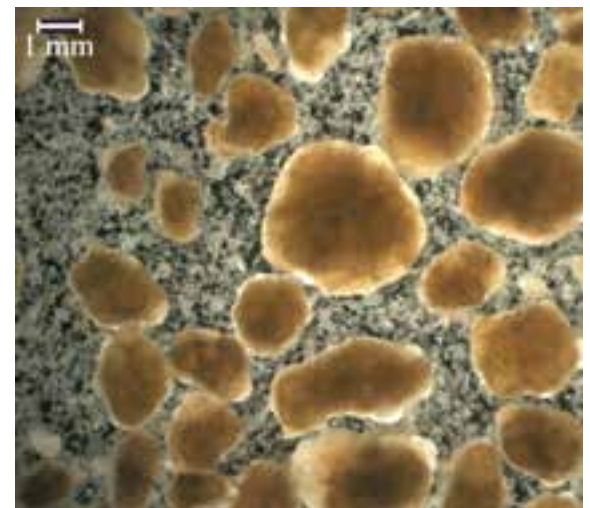
■ DR. IR. HARDY TEMMINK

**R**WZI'S MAKEN gebruik van microbiële processen die ook in de natuur voorkomen. Het grote verschil is dat we de omstandigheden in een rwzi kunnen aanpassen en veel hogere concentraties micro-organismen gebruiken. Hierdoor verlopen de processen in een rwzi veel sneller en efficiënter dan in de natuur. Dit is mogelijk doordat de micro-organismen die het zuiveringsproces uitvoeren de neiging hebben om samen te klonteren tot grote vlokken of, door een slimme manipulatie van de procesomstandigheden, tot compacte korrels.

### Spuislib

Een deel van de organische stof in het afvalwater (uitgedrukt in BZV) wordt door zogenaamde heterotrofe bacteriën met zuurstof geoxideerd tot kooldioxide en water. De energie die hierbij vrijkomt gebruiken de bacteriën om van het andere deel nieuwe biomassa te vormen. Bij de afbraak van elke kilogram BZV ontstaat ongeveer een halve kilogram biomassa, het uiteindelijke 'spuislib'.

**Aerobe slibkorrels uit de afvalwaterbehandelingsinstallatie uit Ede (Bron: Royal HaskoningDHV).**





**Rioolwaterzuivering Nieuwveer van het Waterschap Brabantse Delta zuivert het water van ongeveer 250.000 mensen. Het beluchten van het afvalwater in de zuiveringsinstallatie om voldoende zuurstof aan te voeren voor oxidatie-reacties is essentieel, maar kost ook veel energie.**

Het spuislib wordt meestal naar een vergister getransporteerd. Hier zetten anaerobe micro-organismen, die geen zuurstof gebruiken, een deel van het spuislib om in biogas bij een temperatuur van 35°C. Dit biogas bevat 60-70% methaan ( $\text{CH}_4$ ) en die energie die erin zit opgeslagen, gebruikt de rwzi voor het verwarmen van de vergister, de verlichting en het aandrijven van de pompen. Op deze manier wordt zo'n 15 tot 20% van de chemische energie die in de organische afvalstoffen in afvalwater zit nuttig hergebruikt.

De anaerobe bacteriën kunnen niet alle spuislib omzetten in biogas. Omdat het restant allerlei nuttige meststoffen bevat, werd het vroeger uitgedreden op het land. Tegenwoordig is dit niet meer toegestaan omdat de concentraties giftige zware metalen (lood, zink, cadmium, etc.) te hoog zijn.

Overigens is dit inmiddels discutabel omdat de gehalten aan zware metalen in afvalwater, en daarmee ook in het spuislib, de laatste jaren sterk zijn gedaald en de nog resterende zware metalen direct afkomstig zijn van het voedsel dat wij consumeren. Nu wordt het resterende spuislib na vergisting ontwaterd en afgevoerd naar slibverbrandingsovens of gecomposteerd.

### **Ammonium en fosfaat**

De meeste stikstof in afvalwaterwater is aanwezig in de vorm van ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Zogenaamde nitrificerende bacteriën zetten dit ammonium om in een andere stikstofvorm, nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ). Net als voor de omzetting van BZV is hier zuurstof voor nodig. Het nitraat wordt vervolgens door denitrificerende bacteriën omgezet in stikstofgas ( $\text{N}_2$ ).

## Speuren naar poliovirus in afvalwater

■ DR. IR. ERWIN DUIZER

In Nederland komt het poliovirus niet meer voor. De meeste kinderen krijgen vanaf de leeftijd van twee maanden een inenting tegen polio. Daarmee is het grootste deel van de bevolking beschermd tegen deze ziekte. Het is toch belangrijk om te blijven controleren op de aanwezigheid van het poliovirus, omdat een uitbraak nog steeds tot de mogelijkheden behoort.

De Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) heeft zich in 1988 ten doel gesteld om polio uit te roeien en dat is inmiddels bijna gelukt. Wereldwijd analyseert het Global Polio Laboratory Network van de WHO hiervoor nog jaarlijks meer dan 10.000 rioolwatermonsters op de aanwezigheid van het poliovirus. Het wildtype poliovirus wordt alleen nog maar in Afghanistan en Pakistan gevonden.

Polio staat in Nederland ook bekend als kinderverlamming omdat het gepaard gaat met acute slappe verlamming van de ledematen en soms ook van de ademhalingsspieren. Dit klassieke beeld komt slechts bij 1 op de 100 tot 200 infecties voor. De meeste infecties met poliovirus veroorzaken geen of slechts milde griepachtige symptomen. Dat is gunstig omdat daarmee het aantal ernstige ziektegevallen vaak meevalt. Het nadeel hiervan is echter dat het poliovirus daardoor minder snel

wordt opgemerkt. Omdat iedere geïnfecteerde, met of zonder symptomen, het poliovirus wel uitpoept, hebben veel landen, waaronder Nederland, besloten om rioolwatermonsters te analyseren op de aanwezigheid van poliovirus.

Voor de surveillance analyseert het RIVM jaarlijks ongeveer 100 monsters rioolwater op aanwezigheid van het poliovirus. Deze rioolwatermonsters worden genomen in gemeenten of bij scholen met een lager dan gemiddelde vaccinatiegraad (de *bible belt*). Dit in de hoop een eerste geïnfecteerde zo snel mogelijk te vinden en via een vaccinatiecampagne verdere ziektegevallen te voorkomen. Met de huidige methodiek kan poliovirus gevonden worden als gevolg van uitscheiding van één geïnfecteerde op een populatie van 1.000 tot 7.000 mensen. In Nederland hebben we op deze manier vanaf 2006 driemaal een poliovirus gevonden. Omdat het steeds een vaccinstam betrof, waren geen maatregelen ter bestrijding nodig.

Stikstof is zeer slecht oplosbaar in water, ontsnapt daarom vanzelf aan het water en komt in de atmosfeer terecht.

Voor de denitrificatiestap is BZV nodig en bij voorkeur wordt hier de organische stof uit het afvalwater voor benut. Soms is dit onvoldoende aanwezig om het gewenst verwijderingsrendement voor stikstof te halen, en is het nodig om wat extra organische stof (methanol, ethanol, molasse) te doseren.

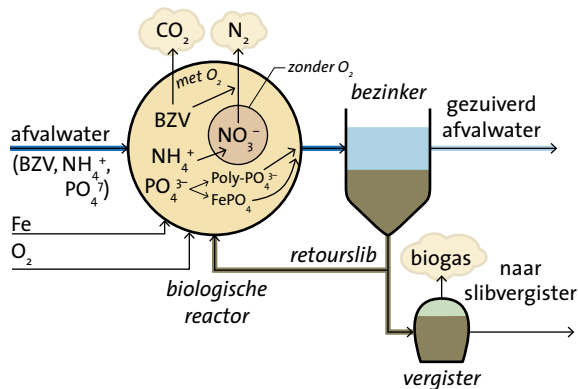
Fosfor is in afvalwater vooral aanwezig in de vorm van fosfaat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Dit kan op twee verschillende manieren worden verwijderd. In Nederland wordt meestal de biologische methode gebruikt waarbij zogenaamde fosfaatophopende bacteriën het fosfaat uit het water opnemen en als polyfosfaat in hun cellen opslaan. Volgens de chemische methode wordt een metaalzout, ijzerchloride ( $\text{FeCl}_3$ ) bijvoorbeeld, aan het water gedoseerd waarna het fosfaat als ijzerfosfaat neerslaat. Bij beide methoden komt de fosfor in het spuislib terecht en zal het samen met dit spuislib naar de vergister of slibverbranding worden afgevoerd.

### Circulaire economie

Bovenstaande principes worden al een paar decennia met veel succes toegepast. Desondanks begint langzaam maar zeker het besef door te dringen dat het misschien wel heel anders moet. Dit heeft alles te maken met de potentiële waarde van het gezuiverde water en van de bulkverontreinigingen die erin zitten: de organische stof, stikstof en fosfor.

Dat het gezuiverde water heel waardevol is in gebieden met waterschaarste is evident. Slim hergebruik van het gezuiverde water als irrigatiewater, industrieel proceswater en in de toekomst misschien zelfs als bron voor de productie van drinkwater is hier een must. Dit betekent wel dat er grote behoefte is aan (goedkope en energiearme) technologie waarmee ook het laatste beetje verontreiniging, inclusief de microverontreinigingen en pathogenen, uit het water gehaald kunnen worden.





Organische stof en de nutriënten stikstof en fosfor werden tot voor kort primair beschouwd als milieuverontreinigende stoffen. Dat zijn ze natuurlijk nog steeds maar tegelijkertijd wordt erkend dat een meer duurzame, circulaire economie alleen maar mogelijk is door er iets nuttigs mee te doen. Organische stof wordt nu door de bacteriën geoxideerd tot kooldioxide waarbij heel veel energie wordt verbruikt, vooral voor het beluchten van het afvalwater om deze bacteriën van zuurstof te kunnen voorzien. Echter, dezelfde organische stof kan ook gebruikt worden om biogas of elektriciteit van te maken of, misschien nog beter, als grondstof voor de productie van organische chemicaliën als vetzuren, alcoholen en bio-plastics. Diverse onderzoeksprojecten hebben aangetoond dat het een en ander technisch heel goed mogelijk is.

Er is nog een lange weg te gaan maar de waterschappen en onderzoekers in Nederland zijn goed op weg om rioolwaterzuiveringsinstallaties geleidelijk om te bouwen tot dit soort 'grondstoffabrieken', iets waar we in de toekomst allemaal van zullen profiteren.

**Biologische zuiveringsprocessen voor verwijdering van organische stoffen (BZV), stikstof en fosfor uit rioolwater.**

## (Na)zuiveren met planten

■ DR. HANS VAN BRUGGEN EN DR. HENK LUBBERDING

**H**ELOFYTENFILTERS, NATUURLIJKE zuiveringssystemen, zijn volop in ontwikkeling zowel in Nederland als in ontwikkelingslanden. Door hun korte waterketen en gering energiegebruik kunnen ze een belangrijke bijdrage leveren aan de vermindering van de uitstoot van CO<sub>2</sub>.

De term helofytenfilter is een verzamelnaam voor allerlei natuurlijke zuiveringssystemen waarbij afvalwater gezuiverd wordt met hulp van planten. De planten zorgen voor een goed leefklimaat voor de bacteriën rondom de wortels en voorzien ze van zuurstof. De bacteriën nemen op hun beurt de zuivering voor hun rekening. De planten kunnen moerasplanten (helofyten) zijn, maar ook ondergedoken of drijvende waterplanten (hydrofyten) of zelfs bomen en decoratieve of eetbare planten.

### Moerassen en graslanden

Een bestaand moeras kan prima dienst doen als helofytenfilter. Het te zuiveren water wordt er dan doorheen geleid. Een helofytenfilter kan ook een ontworpen systeem zijn. Het voordeel daarvan is dat men de locatie zelf kan bepalen en de zuivering optimaliseren. Zo'n systeem kan bestaan uit gemetselde of betonnen bakken, al dan niet bekleed met folie om het waterdicht te maken. In sommige gevallen, zoals op kleigronden, is een waterdicht gemaakte bodem niet eens noodzakelijk, want klei laat nauwelijks water door.

Het meest eenvoudige en oudste ontwerp van een helofytenfilter is een grasland waar het water overheen geleid wordt. In de jaren zeventig van de vorige eeuw werden in Nederland helofytenfilters aangelegd bij op zichzelf staande bebouwingen zoals campings. Het afvalwater van de campinggasten vloeyde dan over het nabij gelegen weiland.

Meer recente ontwikkelingen zijn te vinden in de wijken EVA-Lanxmeer in Culemborg en Drielanden in Groningen voor duurzaam wonen. Helofytenfilters zuiveren daar het huishoudelijk grijze afvalwater (afkomstig uit de keuken, douche en wasmachine) en het zwarte afvalwater (afkomstig van het toilet).

### **Meer ruimte, minder energie**

Helofytenfilters hebben naar verhouding meer ruimte nodig dan conventionele rioolwaterzuiveringsinstallaties. Daar staat tegenover dat ze weinig energie gebruiken, makkelijk te bedienen zijn en daardoor uitermate geschikt zijn voor toepassing in ontwikkelingslanden. Ook is de aanleg

relatief simpel en kan de zuivering met handkracht uitgevoerd worden.

Bovendien kunnen helofytenfilters voor de zuivering van diverse soorten afvalwater ingezet worden. Naast het zwarte en grijze huishoudelijke water kunnen ze gebruikt worden voor afvalwater van melkfabrieken, kippen- of varkensstallen of van de industrie, zoals mijnbouw en olieraffinaderijen of van de voedingsmiddelen-, kunstmest- en papierindustrie. Verder kunnen helofytenfilters worden gebruikt om drainagewater van autosnelwegen, percolaat van stortplaatsen en ontdooiingsvloeistof van vliegtuigen – hetgeen nu al op Heathrow wordt toegepast – te behandelen.

Helofytenfilters zijn met name geschikt voor

**Helofytenfilters van rietplanten in een tulpenkas in Ethiopië zuiveren het afvalwater uit de kassen dat pesticiden bevat.**



---

## Ook bij oliewinning wordt water- zuivering met helofyten toegepast

gebieden buiten de bebouwde kom of platteland. Ook passen deze filters uitstekend bij de trend om de waterketen kort te houden. Ze zijn eenvoudig en voor een enkel huis of cluster van huizen makkelijk aan te leggen. Er zijn ook aanwijzingen dat helofytenfilters beter in staat zijn om medicijnresten te verwijderen dan rwzi's.

### **Afrika en Midden-Oosten**

Er zijn talloze ontwikkelingen in Afrika, bijvoorbeeld in Oeganda waar veel afvalwater van steden nagezuiverd wordt via papyrusvelden. In Kenia zijn helofytenfilters aangelegd die worden gebruikt door hotels in het natuurreservaat de Masai Mara. Recent heeft een Nederlandse rozenkweker in Ethiopië een helofytenfilter van rietplanten laten aanleggen voor de zuivering van pesticiden bevattend afvalwater uit de kassen. Een ander voorbeeld is het Nimr olieveld in Oman, waar het water dat vrijkomt bij het oppompen van olie door een helofytenfilter wordt gezuiverd en in de woestijn wordt hergebruikt.

### **Nederland**

Helofytenfilters worden in Nederland niet alleen voor complete zuivering van huishoudelijk afvalwater gebruikt, maar ook voor nazuivering van effluent van rioolwaterzuiveringen. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij de rwzi in Hapert met een rietveld en een moerasbos. De filters in Hapert zijn onderdeel van de zogenaamde Waterharmonica (zie paragraaf: De Waterharmonica, pag. 40), een biologisch systeem dat de kwaliteit van gezuiverd afvalwater uit de rwzi opwaardeert naar oppervlaktewater.

Op verschillende locaties in Nederland wordt afvalwater ook gezuiverd op daken, zoals bijvoorbeeld bij Van Helvoirt in Berkel-Enschot, waar afvalwater gezuiverd wordt op een grasdak en hergebruikt wordt voor het doorspoelen van de toiletten. Een vergelijkbaar systeem is geïnstal-

leerd bij een kantoor in de watertoren in Bussum. Een zuivering op het dak heeft veel voordelen, zo neemt het bijvoorbeeld geen extra ruimte op de grond in. Ook draagt het groene dak bij aan vergroening van de stad en heeft het een positief effect op het microklimaat. Hiermee wordt de waterketen ultrakort.

### **Nieuwbouw zonder riool**

In Almere is in 2018 een nieuwe stadswijk Oosterwold aangelegd met 15.000 huizen zonder riole-ring. Voor de zuivering van hun afvalwater hadden de bewoners de keuze uit een septic tank, een IBA of een helofytenfilter. Een IBA ( individuele behandeling van afvalwater) staat voor elke zelfstandige, meestal kleine, afvalwaterzuivering die niet op het riool aangesloten is. De bewonerscommissie heeft een sterke voorkeur uitgesproken voor een helofytenfilter. Ook de handel springt er op in. Een bedrijf biedt inmiddels een helofytenfilter als bouwpakket aan.

## Noodsanitatie

■ DR. TINEKE HOOIJMANS

Mensen die getroffen zijn door een ramp zijn extra kwetsbaar voor ziekten die grotendeels te maken hebben met ontoereikende drinkwater- en sanitatievoorzieningen. De belangrijkste ziekten zijn diarree en infectieziekten die voornamelijk via de ontlasting en huid worden overgedragen. Het belang van sanitaire voorzieningen in noodsituaties wordt onderstreept in het Sphere Project, een humanitair handvest met minimumnormen voor rampenbestrijding. Hierbij worden water en sanitaire voorzieningen aangewezen als cruciale factoren om te overleven in de vroege stadia van een noodsituatie.

Sanitaire noodhulp moet ook zorg dragen voor de controle van insecten en knaagdieren die ziekten kunnen overbrengen, het verzamelen van vast afval en het zorgen voor drainage in en rondom de kampen. Een noodsituatie ontstaat als veel mensen op de vlucht zijn voor natuurgeweld of conflicten, en de overheden over te weinig capaciteit beschikken om de vereiste voorzieningen te treffen. Er kan dan een beroep worden gedaan op de internationale gemeenschap. Water, sanitatie en hygiëne zijn samengevoegd met UNICEF als verantwoordelijke organisatie. Dit is belangrijk omdat er tijdens een noodhulp coördinatie nodig is tussen alle organisaties die hulp willen bieden, zoals het Rode Kruis, Artsen zonder Grenzen, Oxfam, etc.



Een toilet boven een gat in de grond.

### Een gat in de grond

Voor sanitatie maakt men, zeker in de eerste fase van een noodsituatie, gebruik van *on-site sanitatie*. Er worden gaten in de grond gegraven waarover toiletten worden neergezet die geen of weinig water gebruiken. Als zo'n gat vol is, wordt er een nieuw gat gegraven. Wanneer de grond stenig is of het grondwater niveau te hoog, is deze oplossing niet geschikt. Er wordt dan gebruik gemaakt van toiletten boven een voorraadvat dat regelmatig moet worden geleegd. Dit brengt veel problemen met zich mee. Veilige oplossingen voor het behandelen van de inhoud zijn er meestal niet. Wanneer een noodsituatie langer duurt, zoals bijvoorbeeld in de vluchtelingenkampen in Jordanië, worden de toiletten voorzien van riolering en verschij-

nen er afvalwaterzuiveringen. Dit is niet altijd mogelijk, aangezien de landeigenaar toestemming moet geven en vaak geen permanente voorzieningen wil. Dit om te voorkomen dat vluchtelingen niet meer weggaan.

Er gebeurt momenteel onderzoek naar welke on-site sanitatiesystemen geschikt zijn tijdens noodhulp, zoals een verbeterd toilet met een internet gebaseerde hulpmiddel dat onder andere aangeeft wanneer het voorraadvat vol is en een mobiel zuiveringssysteem dat gebruik maakt van magnetronstraling om de schadelijke ziektemakers in de ontlasting te doden en eventueel verder te behandelen tot droge meststof en schoon water.

## Verspreiding van antibioticaresistentie

■ PROF. DR. ANA MARIA DE RODA HUSMAN  
EN DR. HEIKE SCHMITT

**I**N DE strijd tegen antibioticaresistentie kan afvalwaterzuivering een belangrijke rol spelen. Zowel als een manier om de verspreiding van antibioticaresistentie tegen te gaan en als een plek om te monitoren welke resistente bacteriën onder de bevolking voorkomen. Vooralsnog verspreidt afvalwater, zowel gezuiverd als ongezuiverd in de vorm van overstorten, antibioticaresistentie naar onze leefomgeving.

### Afbraak van resistentie

De sanitaire revolutie is door meer dan 11.000 lezers van het vooraanstaande medisch weten-

schappelijk tijdschrift *British Medical Journal* uitgeroepen tot de belangrijkste medische mijlpaal in de geschiedenis, op de voet gevolgd door de ontdekking van antibiotica door Flemming. Echter, door het ruimhartige gebruik van antibiotica om infecties te bestrijden, neemt ook de resistentie onder bacteriën toe. De ontwikkeling van antibioticaresistentie is moeilijk een volledig halt toe te roepen aangezien we antibiotica willen blijven gebruiken, bijvoorbeeld bij chirurgische ingrepen.

Mensen en dieren scheiden, of ze nu wel of niet worden behandeld met antibiotica, resistente bacteriën uit via de ontlasting en die bereiken via het riool de afvalwaterzuivering. Dat geldt ook voor antibiotica en afbraakproducten daarvan. Onderzoek van het RIVM heeft laten zien dat conventionele biologische zuiveringsprocessen, deels met fosfaatverwijdering en denitrificatie, het aantal resistente bacteriën met een factor 100 tot 1.000

Door zwemmen in Nederlands oppervlaktewater waarop gezuiverd afvalwater wordt geloosd, kunnen mensen blootgesteld worden aan resistente bacteriën.

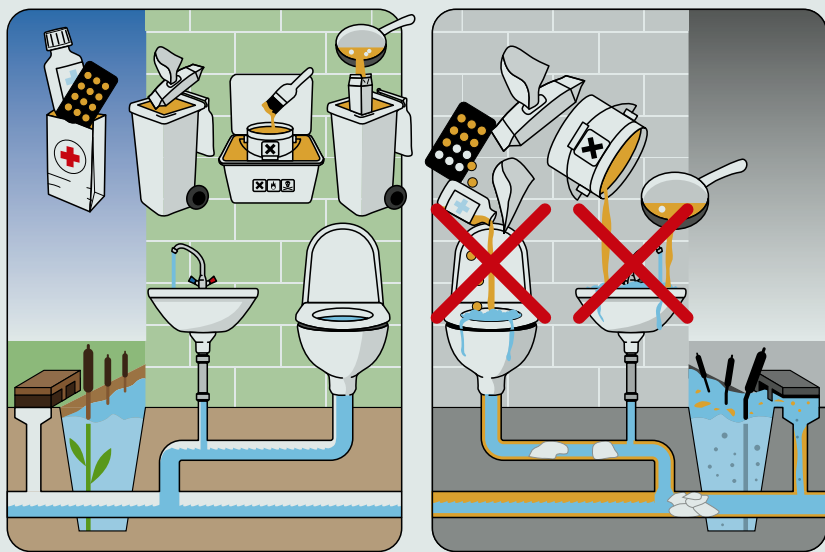


## Medicijnen over (datum)?

Nog steeds verdwijnen overgebleven medicijnen regelmatig in het toilet. De afvalwaterzuivering kan medicijnresten uit het rioolwater filteren, maar een deel komt alsnog in het oppervlaktewater terecht. Dat is slecht voor het milieu en het waterleven. Zo veroorzaken pijnstillers weefselschade bij vissen, kunnen antidepressiva het gedrag van kleine

waterkreeftjes en vissen veranderen, en zorgen anticonceptiemiddelen (oestrogenen) voor geslachtsverandering bij vissen.

Ook vochtige doekjes, maandverband, luiers en tampons horen niet in het riool thuis en geven vaak verstoppingen, net als olie, vet en frituurvet. Verfresten en chemicaliën verstoren daarbij ook nog het zuiveringsproces.



kunnen verminderen. De hoeveelheid genetisch materiaal dat voor deze resistentie codeerde, de zogenaamde resistentiegenen, nam in de waterzuivering ook met een factor 100 af. De afname van antibiotica varieerde tussen 34 en 87% afhankelijk van het soort antibioticum.

De verspreiding van resistente bacteriën, resistentiegenen en antibioticaresiduen vermindert niet volledig door het zuiveren van afvalwater.

Het is daarom van belang de afvalwaterzuivering verder te optimaliseren vooral daar waar mensen in contact kunnen komen met afvalwater, bijvoorbeeld tijdens het zwemmen in oppervlaktewater waar een waterzuivering op loost. Veelbelovende technieken zijn geavanceerde ozonisatie, oxidatie of actief kool. Deze kunnen zorgen voor een verdere 100- tot 1.000-voudige afname van antibioticaresistentie bovenop die door de conventionele biologische zuiveringsprocessen.

### Verspreiding monitoren

In Nederlands afvalwater zijn verschillende zogenaamde 'Bijzonder Resistente Micro-Organismen' (BRMOs) aangetroffen die relevant zijn voor de volksgezondheid. Zowel de ESBL-producerende *Escherichia coli* als de carbapenem-resistente Enterobacteriaceae (CRE) en de vancomycine-resistente enterokokken (VRE) worden bijna altijd in afvalwater aangetroffen, respectievelijk voor 100%, 90% en 60% van alle 100 onderzochte rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's). In Nederland staan in totaal 341 rwzi's. De gemeten aantallen variëren van 0 tot  $100 \times 10^6$  bacteriën per liter afvalwater.

Opvallend was de aanwezigheid van CRE-bacteriën met de carbapenemase-genen OXA-48, NDM en KPC. Deze typen resistente bacteriën zijn slechts een enkele keer aangetroffen bij bewoners van zorginstellingen tijdens een uitbraak, en worden zelden bij patiënten in Nederlandse ziekenhuizen gezien. Toch zijn deze specifieke bacterietypen aangetroffen in afvalwater van rwzi's die geen afvalwater van ziekenhuizen en verpleeghuizen behandelen. Derhalve zijn deze bacteriën afkomstig van de algemene bevolking. Onderzoek naar afvalwater is een gevoelige niet-invasieve manier om de hoeveelheid BRMO te bepalen en het verloop ervan te monitoren.

## Gezondheidsrisico's

Ongeacht de afvalwaterzuivering zal een deel van de resistente bacteriën, antibiotica en resistentiegeneën met het gezuiverde rioolwater in het milieu terecht komen. Mensen die zwemmen in Nederlands oppervlaktewater waarop gezuiverd afvalwater wordt geloosd, kunnen daardoor blootgesteld worden aan resistente bacteriën en deze waarschijnlijk binnenkrijgen. Of dit ook gevolgen heeft voor de gezondheid moet nog worden onderzocht. Het is ook nog niet duidelijk hoe groot deze bijdrage is ten opzichte van andere blootstellingsroutes, zoals contact met mensen die drager zijn van resistente bacteriën.

Ook ongezuiverd afvalwater kan het oppervlaktewater bereiken. Bij hevige regenval komt het voor dat er onvoldoende capaciteit is om al het rioolwater te zuiveren en dan zal een deel via overstorten direct in het milieu komen. Dergelijke riooloverstorten dragen eveneens bij aan resistente bacteriën in het oppervlaktewater. Om verspreiding van antibioticaresistentie tegen te gaan is het opsporen en aanpassen van riooloverstorten wenselijk.

Nu duidelijk is dat afvalwater en afvalwaterzuivering een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan het monitoren en verminderen van antibioticaresistentie, zijn de bestuurders aan zet om dit in hun waterkwaliteitsbeleid op te nemen. Een eerste stap is in ieder geval gezet met de nieuwe ketenaanpak Medicijnresten uit Water - een samenwerking tussen de Rijksoverheid, de Unie van Waterschappen, en andere, lokale overheden en brancheorganisaties - om medicijnresten zoals antibiotica in oppervlakte- en grondwater terug te dringen. Hiermee is een begin gemaakt met het besef dat naast de zorgprofessionals, veehouderij, overheid en burger ook de waterprofessionals hun bijdrage kunnen leveren aan het vertragen van de verdere verspreiding van antibioticaresistentie.

---

Momenteel  
houdt  
afvalwater-  
zuivering  
de versprei-  
ding van  
antibiotica-  
resistentie  
niet volledig  
tegen

## Opkomende organische microverontreinigingen

■ DR. ALETTE LANGENHOFF EN PROF. DR. HUUB RIJNAARTS

**V**IA RIOOLWATERZUIVERINGSINSTALLATIES (rwzi's) dringen nieuwe chemicaliën ons aquatisch milieu binnen. Deze zogenoemde 'opkomende stoffen' die in afvalwater voorkomen in concentraties van nanogrammen tot milligrammen per liter, worden ook wel organische microverontreinigingen genoemd. Het gaat om resten van medicijnen, synthetische of natuurlijke hormonen, persoonlijke verzorgingsproducten en industriële chemicaliën. De laatste decennia staat de chemische kwaliteit van oppervlakte- en grondwater onder steeds grotere druk, waardoor waterschappen en drinkwaterbedrijven steeds vaker en dringender de alarmbel luiden.

De laatste 50 jaar zijn in Nederland vele technologieën ontwikkeld en toegepast in rwzi's voor de verwijdering en terugwinning van bulkstoffen uit afvalwater. Deze bulkstoffen zijn de gangbare organische afvalstoffen in huishoudelijk en industrieel afvalwater en de nutriënten fosfaat en stikstof. Deze technologieën blijken veel organische microverontreinigingen niet of slechts gedeeltelijk te verwijderen.

### Bedreiging volksgezondheid

Deze microverontreinigingen en hun afbraakproducten zijn mogelijk al vele jaren in zeer lage concentraties in het water aanwezig, maar kunnen door de recente ontwikkeling van analysetechnieken in zeer lage concentraties worden gedetecteerd. Verschillende studies over de kwaliteit en het ecologisch functioneren van watersystemen tonen steeds vaker aan dat deze microverontreinigingen een nieuw probleem vormen in oppervlaktewater en gevolgen hebben voor het milieu, bijvoorbeeld de 'feminisering' van vissen door

Een gecombineerd zuiveringssysteem: de rioolwaterzuivering bij Grou is uitgebreid met een wetland. Het grootste deel van medicijnresten (95%) komt via de urine en ontlasting in het riool terecht. De rioolwaterzuivering is gericht op het verwijderen van zuurstofbindende stoffen, en fosfaat en stikstof en kan niet alle stoffen uit het water halen. Of medicijnresten maar ook andere microverontreinigingen verwijderd worden en in welke mate, verschilt per stof. Een deel van die stoffen komt daardoor in het oppervlaktewater terecht. De toevoeging van een wetland na de zuivering zorgt voor verwijdering van deze reststoffen.



stoffen die op vrouwelijke hormonen lijken.

Het gebruik van chemicaliën in huishoudens en industrie neemt steeds verder toe, met een steeds groter scala aan stoffen. Daarbij komt dat we, vanwege ambities richting een circulaire economie en aanpassing aan klimaatverandering, (afval) water steeds meer gaan hergebruiken. Dit leidt tot een toenemende kans dat deze stoffen ophopen in water- en voedselkringlopen en daarmee ook een bedreiging gaan vormen voor de volksgezondheid. Vandaar dat verwijdering van deze stoffen uit water steeds noodzakelijker wordt.

Bestaande rwzi's zorgen slechts voor een beperkte verwijdering van deze microverontreinigingen. Hoe die waterzuiveringen verder geoptimaliseerd kunnen worden met extra technologische maatregelen is daarom op dit moment een

belangrijk onderwerp van onderzoek. Hierbij is een onderscheid te maken in chemische, fysische, biologische en gecombineerde processen, waarvan een aantal al op pilot-scale of full-scale is getest.

### **Oxidatieprocessen**

Gebruikte chemische technologieën zijn ozonering en geavanceerde oxidatieprocessen. Oxidatie met ozon is een effectief proces voor de afbraak van organische microverontreinigingen. Ozonering zorgt normaal gesproken alleen voor een gedeeltelijke oxidatie van de aanwezige organische microverontreinigingen, en niet tot volledige mineralisatie. Daarnaast zijn er andere geavanceerde oxidatieprocessen die gebruik maken van UV of  $H_2O_2$ , eventueel in combinatie met ozon, die met radicalen (meestal  $OH\cdot$ ) een directe of



---

## Zuiverings- installaties in Nederland worden uitgebreid met wetlands

indirecte oxidatie van een verbinding geven. Zo is gebleken dat bij hormoonverstorende verbindingen of antibiotica, de specifieke activiteit (of toxiciteit) van organische microverontreinigingen significant afneemt na ozonbehandeling. Bovendien zijn de gevormde stoffen vaak biologisch afbreekbaar. Ook is aangetoond dat bij ozonering en andere geavanceerde oxidatieprocessen toxische metaboliëten kunnen ontstaan. Vandaar dat een zandfilter, actief kool of een biologisch proces als extra nabehandeling wordt toegevoegd.

### Fysische en biologische processen

Een veel gebruikte fysische methode is de adsorptie van organische microverontreinigingen aan actief kool (granulair of poeder), waarbij met name hydrofiele stoffen adsorberen. Het actief kool raakt na verloop van tijd verzadigd en moet regelmatig geregenereerd of vervangen worden, een proces dat veel energie en chemicaliën verbruikt en duur is.

De lage kosten van biologische processen, maken dit tot een interessante optie. Een groot aantal verbindingen is (gedeeltelijk) biologisch afbreekbaar, mits de juiste procescondities worden aangelegd. Veel organische microverontreinigingen worden het beste afgebroken onder aerobe omstandigheden, terwijl de afbraak van sommige verontreinigingen juist anoxische of anaerobe condities vereisen. De biologische afbreekbaarheid is met name afhankelijk van de chemische structuur en de fysisch-chemische eigenschappen van een organische microverontreiniging.

### Gecombineerde processen

Vooralsnog lijken combinaties van verschillende processen de meeste slaagkans te hebben voor de verwijdering van organische microverontreinigingen. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van natuurlijke systemen of reactoren, waarin processen worden gecombineerd.

In natuurlijke systemen zoals *constructed wetlands* spelen fotodegradatie, opname en omzetting door planten, adsorptie en biodegradatie een rol bij de afbraak van organische microverontreinigingen. Constructed wetlands zijn op een aantal rwzi's in Nederland aanwezig en zorgen voor verwijdering van organische microverontreinigingen. Daarnaast vindt onderzoek plaats naar de optimale configuratie voor een maximale verwijdering van deze organische microverontreinigingen.

Ook in reactoren kunnen verwijderingsprocessen worden gecombineerd, zoals bijvoorbeeld de Pharmafilter-installatie of het 1-STEP®-filter. Lopende onderzoeken naar combinaties van ozonering en biodegradatie tonen aan dat dit een effectief en duurzaam proces is voor de verwijdering van organische microverontreinigingen. Hetzelfde geldt voor de combinatie van sorptie aan actief kool en biodegradatie.

Momenteel ontbreekt het aan duidelijke wetgeving in Nederland. Op Europees en nationaal gebied vinden er echter ontwikkelingen plaats die ervoor kunnen gaan zorgen dat er in de (nabije) toekomst wet- en regelgeving voor microverontreinigingen in de waterketen komt. Ook op wetenschappelijk gebied vinden er ontwikkelingen plaats die gaan helpen om het probleem van microverontreinigingen in water aan te pakken.

## De Waterharmonica

■ ING. RUUD KAMPF

**D** OOR CENTRALISATIE van de zuivering van afvalwater zijn er steeds minder en grotere rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's) in bedrijf. De lozing van grote hoeveelheden gezuiverd afvalwater heeft lokaal echter een grote invloed op het ecosysteem. Niet dat de rwzi's niet goed werken. Het gezuiverde water is zeer helder en voldoet dankzij alle inspanningen aan de chemische kwaliteit van het oppervlaktewater, maar biologisch gezien is het nog 'dood' water. Het bevat al wel bacteriën en slibvlokken en wat reststoffen uit het afvalwater, maar dat zijn lage vormen van leven en energie. In wezen voegt de afvalwaterbehandeling leven toe, want goed beschouwd was dit water ooit zeer schoon regen- of drinkwater waar alle vormen van natuurlijk leven uit verdwenen waren, maar het is daarmee nog geen 'levend' water. Iets waar de Europese Kaderrichtlijn Water om vraagt: zorg voor ecologisch gezond water.

### Schakel tussen rwzi en oppervlaktewater

Om de brug tussen de rwzi en het oppervlaktewater te slaan is de zogenaamde Waterharmonica ontwikkeld, een natuurlijke nazuivering van effluent via een zuiveringsmoeras. Hierdoor wordt de abrupte overgang tussen schoon gezuiverd rwzi-water en het ontvangend aquatisch ecosysteem verzacht. Er wordt als het ware 'nieuw leven' in het water geblazen.

De Waterharmonica bestaat vaak uit meerdere achtereen geplaatste compartimenten: watervlooienvijvers zonder vis, moerassen, natte weiden, rietvelden, nat bos, viskuitschietgebieden en vijvers met ondergedoken waterplanten voor zuurstofproductie. Naast het opwaarderen van de waterkwaliteit en natuurwaarden kan een

Waterharmonica ook dienst doen als waterberging en als recreatiegebied.

Vanaf midden jaren 90 van de vorige eeuw zijn er 15 Waterharmonica's aangelegd; gebieden voor ecologische opwaardering die 1.000-40.000 m<sup>3</sup> behandeld afvalwater per dag verwerken. Er zijn nog enkele in het verschiet. De eerste versies waren gericht op stoffenverwijdering, het bufferen van water en watervoorziening van de landbouw. Recent uitgevoerde Waterharmonica's richten zich op het creëren van natuurlijke waarden voor vissen, paaien en migratie en voor waterhergebruik als recreatie. Het waterschap De Dommel heeft vijf van haar acht zuiveringen van een Waterharmonica voorzien. De werking van de Waterharmonica in Soerendonk van circa 8 hectare kan vergeleken worden met de natuurlijke zuivering in een beek van 10 kilometer lang. De beek en de paaivijver trekken zelfs veel vissen aan.

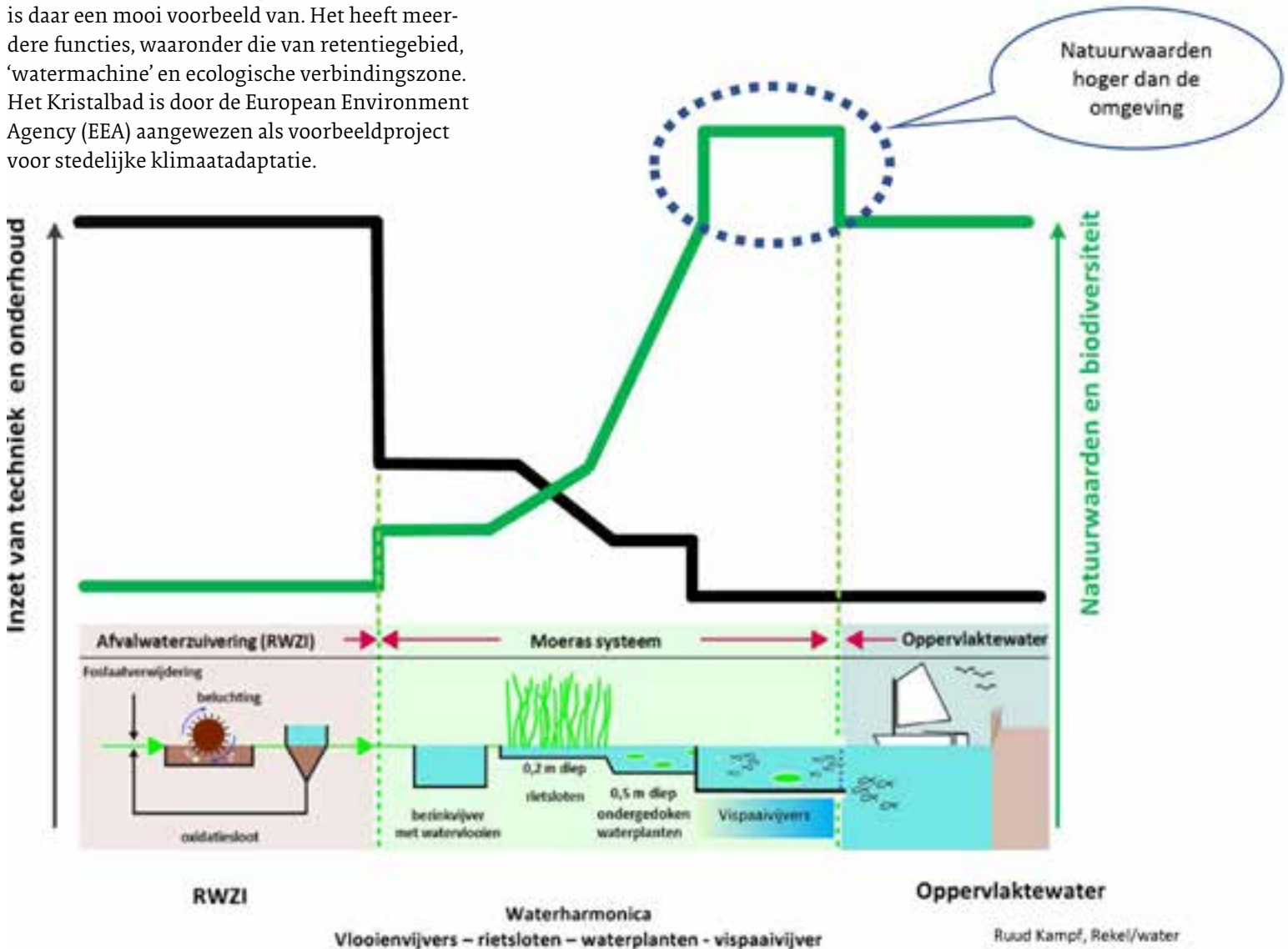
### Maatwerk

Elke Waterharmonica is maatwerk, aangepast aan de lokale omstandigheden. De hoeveelheid water die een Waterharmonica per dag kan verwerken ligt tussen 50 en 300 liter per vierkante meter. De lage belasting is te vergelijken met 50 mm regen neerslag per dag. Dat is een zeer natte dag in Nederland, ofwel ongeveer 20 maal de gemiddelde neerslag.

De kosten voor Waterharmonica's variëren, afhankelijk van de grootte, de eenvoud of recreatieve diensten of biologisch waarden. Als een vuistregel wordt voor de totale kosten van het maken van een 'levend water' ongeveer 5 eurocent per 1000 liter behandeld water aangehouden (bandbreedte 2-12 eurocent). Deze kosten zijn vergelijkbaar met de kosten van een zandfiltratie.

Verder is er ruimte nodig. Het benodigde oppervlakte is ongeveer 0,5 tot 2,5 m<sup>2</sup> per inwoner. Dat is voor een stad als Alkmaar al gauw 10 tot 25 hectare. Het voordeel is dat het een aantrekkelijke

ruimte-invulling is: stadsranden voor recreatie, waterberging, vispaaiplaatsen en nog veel meer. Het Kristalbad tussen Hengelo en Enschede (40 ha) is daar een mooi voorbeeld van. Het heeft meerdere functies, waaronder die van retentiegebied, 'watermachine' en ecologische verbindingzone. Het Kristalbad is door de European Environment Agency (EEA) aangewezen als voorbeeldproject voor stedelijke klimaatadaptatie.



De Waterharmonica is een natuurlijke schakel tussen rwzi en de omgeving. Met relatief lage inzet van techniek (zwarte lijn) kunnen de natuurwaarden en biodiversiteit worden verhoogd (groene lijn) of zelfs uitstijgen boven de waarden van de omgeving.

# Afvalwaterzuivering in ontwikkeling

■ DR. HENK LUBBERDING

**A**CTUELE CIJFERS over zuivering van huishoudelijk afvalwater in ontwikkelingslanden zijn nauwelijks te vinden. Maar volgens schattingen uit de praktijk ondergaat ongeveer 20% van het afvalwater dat via een rioolsysteem wordt afgevoerd, enige vorm van zuivering. Daarbij is er veel variatie tussen verschillende regio's. Onderaan de ladder staan India, Pakistan en delen van Afrika ten zuiden van de Sahara, met uitzondering van Zuid Afrika. Daarnaast werken veel van de zuiveringen niet goed en loopt het afvalwater er vaak om- of doorheen zonder dat er sprake is van zuivering.

Het lot van het huishoudelijk afvalwater zonder riool hangt af van de systemen die worden toegepast, zoals septic tanks en gierputten. Ook hier verdwijnt veel water onbehandeld in het milieu. In veel ontwikkelingslanden leidt dat tot verontrustende situaties, zowel voor de menselijke gezondheid als voor de natuur. De Pasig-rivier, een volledig zwarte en anaerobe stroom dwars door stad Manila in de Filippijnen, is een van de talrijke voorbeelden van ongecontroleerd en ongezuiverd lozen van afvalwater.

## Geldgebrek

De voornaamste reden voor de afwezigheid van afvalwaterzuiveringen is gebrek aan geld, maar ook een lage prioriteit en gebrek aan infrastructuur spelen een rol. In ontwikkelingslanden worden regelmatig oxidatievijvers gebruikt, omdat daar meer landoppervlakte voorradig is, het minder kost en het daar warmer is. Ook maakt men gebruik van al aanwezige, natuurlijke systemen

om afvalwater tenminste enigszins te zuiveren. Zo ondergaat het afvalwater van Kampala, de hoofdstad van Oeganda, een primaire zuivering in het Nakivubo-moeras, een natuurlijk wetland, voordat het in het Victoriameer stroomt.

In gebieden waar water schaars is, maakt men vaak informeel gebruik van afvalwater voor irrigatie. Hierdoor eet meer dan 10% van de wereldbevolking voedsel gekweekt met ongezuiverd of deels gezuiverd afvalwater. Het positieve is dat men wel optimaal gebruik maakt van de in afvalwater aanwezige nutriënten stikstof en fosfor, die de productiviteit flink kunnen verhogen. Een groot nadeel is echter het gezondheidsrisico dat de producenten en consumenten in deze sector lopen.

## Industrialisatie

Ontwikkelingslanden industrialiseren snel en 10-20% van al het water gaat naar de industrie, die zodoende een aanzienlijke stroom afvalwater produceert. Veel industrieel afvalwater wordt nog niet gezuiverd, maar de eerste stappen zijn gezet. Veel organisch rijk afvalwater, met name uit de voedselindustrie (suikerproductie, visverwerking) kan simpel anaeroob gezuiverd worden.

Een extra probleem levert de mijnbouw op. Bijna al het afvalwater uit mijnen wordt in ontwikkelingslanden ongezuiverd geloosd op waterwegen of penetreert in het grondwater. In beide gevallen is het een groot risico voor het drinkwater, omdat het veel zware metalen en carcinogene stoffen bevat. Voorkomen dat mijnbouwwater het drinkwater kan besmetten, is vaak al een simpele, kostenefficiënte methode. Verbetering van het waterbeheer in een



De zwarte zuurstofloze zijstroom van de Pasig River in Manila.

stroomgebied is daarom van cruciaal belang. Ook het verminderen van de hoeveelheid benodigd proceswater en het hergebruik van afvalwater zijn essentieel in de toekomst.

### Waterhyacint

Vooralsnog zijn gezondheidsrisico's de voornaamste reden om afvalwater te zuiveren. Een primaire zuivering waarbij grove, bezinkbare en zwevende delen uit water worden gehaald, is vaak niet genoeg. Wanneer het afvalwater dat nog stikstof en fosfor bevat, alsnog in het milieu komt, leidt dat tot een nieuw probleem: eutrofiëring. Het Victoriameer in Afrika is in de laatste 40 jaar ernstig geëutrofiëerd en is daarom dichtgegroeid met waterhyacint. In het dichtbevolkte oosten van China heeft het niet of onvolledig zuiveren van afvalwater geleid tot een


sterke opbloei van algen en cyanobacteriën in het oppervlaktewater, waardoor het produceren van drinkwater aanzienlijk moeilijker is.

### Centraal en decentraal

Grote stedelijke gebieden met een hoge concentratie aan mensen, lenen zich nog het best voor een centrale aanpak van afvalwaterzuivering om zo de kosten te drukken. In gebieden met minder inwoners vervalt dit schaalvoordeel en zijn gedecentraliseerde systemen financieel aantrekkelijker. Bijkomende voordelen zijn de betrokkenheid van de belanghebbenden en de mogelijkheid om afvalwater aan de bron te behandelen, afhankelijk van waar(voor) het gebruikt gaat worden.

Om zuivering voor ontwikkelingslanden zo betaalbaar mogelijk te houden en de nutriëntenrijkdom van afvalwater zoveel mogelijk te benutten, moeten zuivering en hergebruik waar mogelijk gecombineerd worden. Een simpele voorzuivering (UASB, oxidatievijver, wetland) is vaak al voldoende om de gezondheidsrisico's fors te verminderen. Veel Nederlandse hulporganisaties richten zich dan ook op die opties.

De wereldgezondheidsorganisatie WHO en het kinderfonds van de Verenigde Naties UNICEF hebben de 'sanitatieladder' ontwikkeld om de vooruitgang in het bereiken van de millenniumdoelstelling 'Water en Sanitatie' in kaart te kunnen brengen. Dit is een zinvol instrument om de lokale sanitatiestatus van een gemeenschap of regio aan te duiden. Het laat een stapsgewijze vooruitgang zien, ook als de volledige millenniumdoelstelling (nog) niet gehaald wordt.



**Industrieel afvalwater is een probleem apart. Elke industrie loost een eigen specifieke cocktail aan stoffen. Dit vraagt om specifieke, innovatieve oplossingen.**

# Afvalwater en de industrie

*Net als huishoudens hebben bedrijven door de eeuwen heen allerlei afvalstoffen geloosd en het water vervuild. De industrie gebruikt veel water van een heel scala aan kwaliteiten, van ultrapuur tot licht verontreinigd, brak of zelfs zout. Tegenwoordig wordt een groot gedeelte van het gebruikte water gezuiverd en hergebruikt. Maar dit is niet altijd het geval. Soms is bij de huidige stand van techniek of investeringen zuiveren geen optie en moet het gebruikte water worden geloosd. Dit industrieel afvalwater is een mix van diverse stromen, vaak met hoge concentratie aan specifieke stoffen en zouten. De invoering van de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren heeft voor veel innovaties op zuiveringsgebied gezorgd, om ook uit dit afvalwater nog bruikbaar water en stoffen te halen.*

## De industrie en haar watergebruik

■ DR. IR. HENRI SPANJERS  
EN PROF. DR. IR. JULES VAN LIER

**V**ANAF BEGIN jaren 70 van de vorige eeuw kreeg iedereen die afvalwater produceert, dus ook elke industrie, te maken met de Wet verontreiniging oppervlaktewateren (WVO). Die hield in dat het lozen van afvalwater op oppervlaktewateren verboden was. Tot die tijd werd er nauwelijks gekeken naar het waterverbruik en de hoeveelheid en samenstelling van het afvalwater dat werd geloosd. Maar de ene

industrie is de andere niet en de diversiteit van het geloosde afvalwater is enorm groot.

Afvalwaters van de zogenaamde agro-industrie en levensmiddelenproductie hebben hoge concentraties aan organische vervuiling en hebben vóór de invoering van de WVO geleid tot enorme verontreinigingen van onze oppervlaktewateren. In vergelijking met stedelijk afvalwater variëren de samenstelling en concentratie van de vervuilende stoffen in industrieel afvalwater enorm. Bovendien wordt er veel afvalwater geproduceerd. De lozing van bijvoorbeeld een gemiddelde papierfabriek uit de jaren 60 komt qua vuillast overeen met de ongezuiverde lozing van een stad van zo'n 200.000-300.000 inwoners.

Uit een  
fabriek kwam  
vroeger  
evenveel  
afvalwater  
als uit een  
gemiddelde  
stad

### De vervuiler betaalt

Nederland is een geïndustrialiseerd land en de industriële lozingen hebben vóór de WVO naast de stedelijke lozingen flink bijgedragen aan de vervuiling van de oppervlaktewateren. Bij de invoering van de WVO werd tevens het vervuiler-betaalt-principe ingevoerd. Dat wil zeggen, iedereen die afvalwater loost, moet betalen voor de vuillast in het afvalwater die vervolgens wordt gezuiverd in een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi). Momenteel betaalt elke Nederlander zo'n 50-60 euro per jaar (afhankelijk van het waterschap), dat betekent dat de genoemde papierfabriek vandaag de dag zo'n 35.000 euro per dag zou moeten betalen voor het ongezuiverd lozen van afvalwater op het riool. De papierfabriek zou in dat geval al na een paar dagen de poorten moeten sluiten.

De WVO en het vervuiler-betaalt-principe heeft ertoe geleid dat de Nederlandse industrieën kritisch hun eigen productieproces en daarmee samenhangend waterverbruik zijn gaan bestuderen, en vervolgens hun water zijn gaan hergebruiken en het resterende afvalwater zijn gaan zuiveren alvorens het af te voeren naar het riool of, na vergaande zuivering, te lozen op de oppervlaktewateren. Het herinrichten van industriële productieprocessen, waarbij naast de waterkringlopen ook het chemicaliëngebruik kritisch werd bekeken, hebben tot een drastische afname van vervuilende lozingen geleid.

Als voorbeeld weer de papierindustrie. Op wereldniveau gebruikt een gemiddelde papierfabriek zo'n 80 m<sup>3</sup> water per ton geproduceerd papier; het gemiddelde van alle papierfabrieken in Nederland is zo'n 10-15 m<sup>3</sup> water per ton papier. Bepaalde type papierfabrieken, namelijk de karton- en inpakpapierfabrieken, verbruiken gemiddeld zelfs minder dan 5 m<sup>3</sup> water per ton papier. Sommige van deze fabrieken lozen helemaal geen afvalwater meer. Zij zuiveren al hun afvalwater en werken het verder op naar proceswater voor

het pulpen zodat het waterverbruik gelijk is aan de hoeveelheid water dat verdampft in de papierdroogsectie. Dit verminderde watergebruik heeft ook een energetisch voordeel. Indien het warme proceswater wordt hergebruikt, hoeft geen koud grondwater te worden opgewarmd naar productietemperatuur. Dat heeft geleid tot een enorme reductie in het verbruik van (fossiele) energie. In feite heeft elke bedrijfstak zijn eigen optimalisatieproces doorgemaakt ten aanzien van water- en ook energiegebruik.

### Industriële waterkringlopen

Fabrieken kunnen meerdere tot zelfs tientallen productieprocessen hebben waarvoor water nodig is en waarbij meestal het water na gebruik wordt 'afgevoerd': het zogeheten proceseffluent of restwater. Dit restwater is vaak licht verontreinigd en kan, eventueel na een eenvoudige tussenzuivering, opnieuw worden gebruikt in hetzelfde productieproces. Omdat een dergelijke waterrecycling met daarin een tussenzuivering lijkt op de functie en werking van een nier spreken we ook van 'kidney technology'.

Ook is het mogelijk dat het restwater van een productieproces te verontreinigd is voor hergebruik in hetzelfde proces maar wel bruikbaar is voor een ander proces. Dit noemen we cascadering. Een voorbeeld van cascadering vinden we in de chipsfabriek: voordat de vers gesneden aardappelschijfjes in de frituurolie gaan, worden ze geblancheerd in heet water. Na het blancheren is het water nog redelijk schoon en kan het prima worden gebruikt in een eerder proces: het wassen van de aardappels na het schillen. Dit waswater is daarna nog goed bruikbaar om het zand van de aangevoerde aardappels te wassen en de aardappels gelijk de fabriek in te transporteren.

Overigens is niet alleen het water, maar zijn ook de stoffen daarin geschikt voor hergebruik, tenminste als het lukt om ze uit het water te halen.





De aardappelindustrie gebruikt veel water voor het wassen en verwerken van aardappels.

Een voorbeeld is het verven van textiel voor jeans. Dit textiel gaat in verfbaden met indigoblauw. Behalve de verfstof wordt ook veel zout aan het water toegevoegd om de werking van de verfstof te verbeteren. Omdat deze zouten niet alleen vervuילend zijn maar ook kostbaar, is het een goed idee om ze uit het water te halen en opnieuw in een volgend verfbad te gebruiken. De technieken voor zouterugwinning, vaak gebaseerd op membranen met ultra-kleine poriën, zijn overigens nog volop in ontwikkeling.

### **Speelveld voor wateringenieurs**

Net zoals bij de hiervóór genoemde kringlopen is het gebruikte water en de stoffen daarin, van de ene fabriek soms nog goed te gebruiken in een andere fabriek. Fabrieken liggen immers vaak bij elkaar op een industrieterrein. De kringlopen breiden zich dan uit over het industrieterrein. Omdat

dit lijkt op hoe water en stoffen in de natuur rondgaan en worden uitgewisseld spreken we ook wel van industriële symbiose.

Omdat de fabrieken toch al bij elkaar liggen is het ook logisch dat ze hun proceswater betrekken van één en dezelfde leverancier, die daarvoor een speciale industriewaterfabriek op het bedrijventerrein kan bouwen. Zo'n waterfabriek kan dan zelfs verschillende kwaliteiten water leveren, bijvoorbeeld bluswater, productiewater, koelwater of voedingswater voor stoomketels. Een ander voordeel van zo'n industrieterrein is dat de fabrieken, als ze echt niets nuttigs meer uit hun gebruikte water kunnen halen, samen een centrale zuiveringsinstallatie kunnen bouwen die gespecialiseerd is in het zuiveren van het verzamelde afvalwater.

Het blijft vaak niet bij het water en de stoffen daarin: restwater en afvalwater zijn vaak warm, of



zelfs heet. Dus het gebruikte water bevat behalve afvalstoffen ook 'afvalwarmte' die opnieuw te gebruiken is in de fabriek of in een buurfabriek, bijvoorbeeld om een verdampert te laten werken. Warmte is uit water te halen met warmtewisselaars. Voor al deze water-, stof- en warmtestromen tussen de bedrijven onderling zijn leidingen nodig. Het spreekt vanzelf dat het op een industrieterrein makkelijker is deze leidingen te aan te leggen dan in een stad. Hierdoor ontstaan interessante mogelijkheden om nieuwe hergebruiksschema's te testen en te implementeren: een droomland voor wateringenieurs.

### Is al dat water nodig?

Ongeveer 20% van de wereldwaterbehoefte komt voor rekening van de industrie. De huishoudens vragen minder water, maar toch nog een niet te verwaarlozen 10%. De grootste waterbehoefte wereldwijd komt van de landbouw. Het zal echter geen verrassing zijn dat in een geïndustrialiseerd continent als (West)-Europa de industrie bijna 60% van het waterverbruik voor haar rekening neemt. Waarvoor heeft de industrie eigenlijk al dat water

**Medewerker van het waterschap neemt monsters van het binnengekomen afvalwater bij de rioolwaterzuivering. Dit afvalwater wordt onderzocht op de hoeveelheid fosfaat, nitraat, ammonium en droge stof.**

nodig? Of het nu gaat om de productie van chemicaliën, voedingsmiddelen en dranken, papier, textiel, staal en niet te vergeten energie: het gaat om een beperkt aantal water-intensieve processen. Een heel belangrijke is koeling, bijvoorbeeld in de energie- of staalproductie.

Hoewel we sinds het begin van de industriële revolutie al lang geen stoommachines meer gebruiken, is stoomproductie nog altijd een van de grootste waterslurpers in veel fabrieken. Het ketelvoedingswater voor de stoomproductie moet overigens van een hoge kwaliteit zijn, zuiverder dan ons drinkwater, zodat er zich geen kalkaanslag (ketelsteen) in de stoomketels, de leidingen en op de warmtewisselaars vormt. Dit leidt tot verstoppingen en laag rendement van warmteoverdracht. Echter het condensaat dat ontstaat na het gebruik van de stoom is toch niet zo zuiver als het oorspronkelijke voedingswater. Om de apparatuur te beschermen tegen corrosie worden daar bepaalde stoffen aan toegevoegd.

Andere water-intensieve processen zijn het transport en wassen van aardappels, maar ook bijvoorbeeld van bieten in de suikerfabriek, en het pulpen van oud papier voor de productie van nieuw papier. De chemische industrie (inclusief petrochemie, biotechnologie en farmacie) heeft, behalve voor de koeling en stoomproductie, ook nog water nodig als reactiemedium. En dan zijn er nog industrieën die water nodig hebben als (hoofd) ingrediënt voor hun product: denk aan de drankenindustrie en de brouwerijen. Verder gebruikt de levensmiddelen- en drankenindustrie veel water voor het reinigen van ketels, apparatuur, vloeren en flessen. Een hoog verbruik van zeer schoon water dat na gebruik veel verontreinigingen bevat, waaronder reinigings- en ontsmettingsmiddelen. Zelfs de sectoren die het water gratis bij hun grondstoffen aangeleverd krijgen, zoals de zuivelindustrie en de wijnproductie, ontkomen niet aan het verwijderen van deze verontreinigingen.

## Zwitsers riool vol edelmetalen

■ DR. BAS VRIENS

Goud, zilver en vele andere kostbare elementen zoals palladium, iridium en platinum, worden tegenwoordig steeds intensiever gebruikt. Niet alleen in sieraden en horloges, maar ook in high-tech elektronica, halfgeleiders en in de chemische industrie. Zo bevat een moderne smartphone ongeveer 16 gram koper, 350 milligram zilver en 30 milligram goud.

Zwitserland is een van de belangrijkste edelmetaal-verwerkende landen ter wereld: ongeveer 70% van het goud in de wereld wordt in Zwitserland verwerkt. Een klein deel daarvan wordt verwerkt door horlogemakers en de chemische en farmaceutische industrie, het grootste deel door goud- en zilverraffinaderijen in het zuiden van het land.

Tijdens een screening van rioolwaterzuiveringsinstallaties werd recent ontdekt dat minuscule hoeveelheden goud en zilver in het Zwitserse afvalwater terecht komen. Hoewel de hoeveelheden edelmetaal over het

algemeen zeer klein zijn (minder dan 10 microgram goud per persoon per dag), gaan er over het gehele land genomen toch behoorlijke bedragen door het riool: tot wel 3 miljoen euro aan goud en zilver per jaar. Dit goud en zilver bevindt zich in opgeloste en fijn verdeelde vorm in het afvalwater. Doorgespoelde trouwringen zijn niet gevonden.

In de rioolwaterzuiveringsinstallaties worden goud en zilver relatief efficiënt (>90%) uit het afvalwater gezuiverd en in het slib geconcentreerd. Recycling van deze edelmetalen uit slib loont financieel waarschijnlijk niet, met uitzondering van een paar steden waar veel goud- en zilververwerkende industrie zit en de concentraties in het slib hoog genoeg zijn. Momenteel wordt geprobeerd het goud en zilver uit het slib, dat in Zwitserland uiteindelijk verbrand wordt, tijdens het verbrandingsproces terug te winnen.

## Afbraak zonder zuurstof, win-win-win

■ PROF. DR. IR. JULES VAN LIER

**W**ANNEER EEN afvalwaterstroom veel organische stof bevat, zal er veel zuurstof in de beluchtingstanks geblazen moeten worden om al het aanwezige koolstof door bacteriën te kunnen laten oxideren naar CO<sub>2</sub>. De hiervoor noodzakelijke forse omvang van de benodigde waterzuiveringsinstallaties is ook nodig om al de bacteriën die de oxidatie uitvoeren te kunnen herbergen. Aangezien deze aerobe bacteriën iets meer dan de helft van de koolstof die ze afbreken, omzetten in nieuwe biomassa, ofwel nieuw slib, komen er grote stromen spui-slib vrij. De prijs van zo'n zuivering wordt onbetaalbaar omdat de aanvoer van de enorme hoeveelheden lucht (zuurstof) door compressoren veel energie kost. Daarbij zal de ontstane grote hoeveelheid slib, in feite een afvalproduct, moeten worden verwerkt. Dit is in Nederland erg duur aangezien al dat slib moet worden verbrand. Het zal dan ook geen verrassing zijn dat begin jaren 70, toen de Wet verontreiniging oppervlaktewateren (WVO) van kracht werd, vele agro-industriële bedrijven enorme problemen hadden om de zuiveringsheffingen te kunnen voldoen.

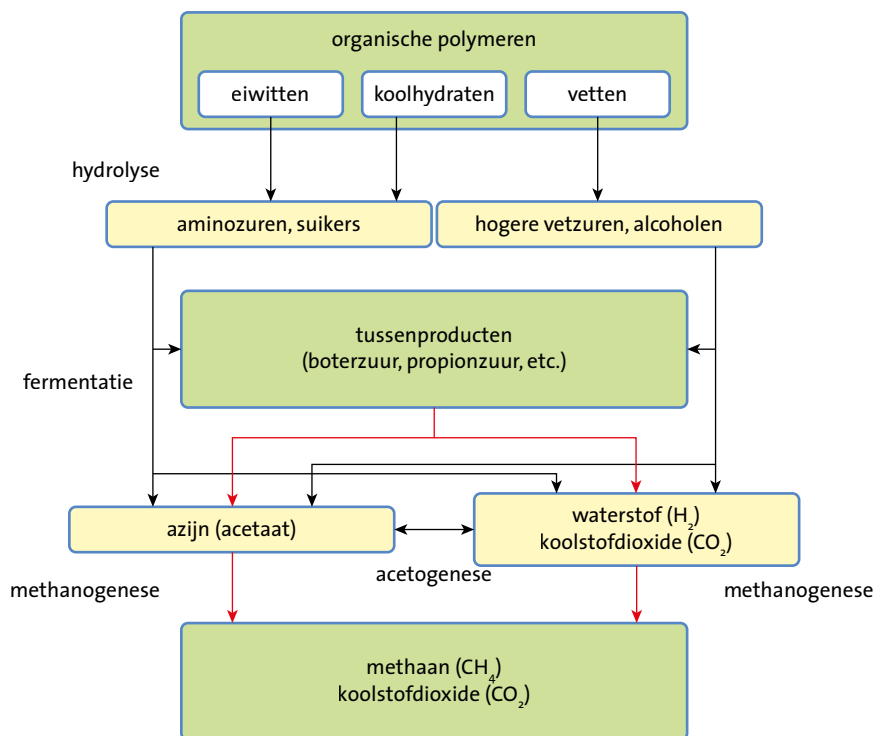
### Behoud van energie

Gelukkig had moeder natuur nog een ander microbieel proces in petto waarmee organische stof kan worden gemineraliseerd tot zijn bouwstenen. Dit zogenaamde anaerobe proces speelt zich af op die plaatsen waar organische stof aanwezig is maar geen zuurstof, bijvoorbeeld in moerassen en de natte ondergrond. In plaats van zuurstof wordt een deel van de koolstof zelf gereduceerd. Het andere deel van de koolstof wordt geoxideerd. Het eindproduct is een gasvormig mengsel van volledig

geoxideerd koolstof,  $\text{CO}_2$  en volledig gereduceerd koolstof,  $\text{CH}_4$ , ofwel methaan. Dit gasmengsel wordt ook wel biogas genoemd en kan dienen als brandstof. Het gevormde methaan is vergelijkbaar met het methaan dat we decennia lang bij Slochteren in Groningen uit de grond hebben gehaald.

Het aerobe zuiveringsproces is in feite een verbrandingsproces waarbij de koolstof met de aanwezig zuurstof wordt omgezet tot  $\text{CO}_2$ . In het anaerobe zuiveringsproces gaat vrijwel niets van de chemisch gebonden energie verloren en komt de energiewaarde van de oorspronkelijke organische stof in het eindproduct biogas terecht. Er is dus sprake van een tweevoudige energiewinst: 1) er wordt geen (fossiele) energie verbruikt om de benodigde zuurstof in de zuiveringstank te blazen, en 2) alle chemisch gebonden energie uit de oorspronkelijke organische vuillast wordt terugge-

**Schematische weergave van de anaerobe afbraak van koolhydraten, eiwitten en vetten in afvalwater door bacteriën tot methaangas.**



wonnen als een bruikbare energiedrager (biogas). Het biogas kan weer als energiebron dienen voor het industriële productieproces. Een bierbrouwer die zo'n 10.000 hectoliter bier per dag produceert, om maar één voorbeeld te noemen, verdient zo al snel een miljoen euro per jaar aan niet verbruikte energie door anaeroob in plaats van aerob te zuiveren. De anaerobe zuiveringstechnologie is voornamelijk in Nederland na invoering van de WVO verder ontwikkeld en Nederlandse bedrijven zijn momenteel wereldmarktleiders van deze technologie.

### Dierentuin aan bacteriën

In het anaerobe zuiveringsproces moeten vele micro-organismen met elkaar samen werken om organische stoffen volledig om te zetten naar biogas. Eerst moeten complexe stoffen in stukken worden gehakt. Dit proces noemen we 'hydrolyse'. Dit gebeurt ook in de groenbak thuis in de zomer als het lekker warm is. Daarna begint het mengsel van organisch afval te stinken naar organische zuren. Dit is de tweede afbraakstap van de anaerobe zuivering: zuurstofloze fermentatie of 'verzuuring' waarbij bacteriën neutrale organische stoffen zoals suikers, eiwitten en vetten omzetten in vetzuren en alcoholen. Vervolgens zetten weer andere bacteriën deze stoffen om in azijnzuur dat de derde stap in de anaerobe zuivering is, de 'azijnzuurvorming'. Tenslotte is het de beurt aan methaanvormende micro-organismen die in de vierde stap het azijnzuur en ook het gevormde kooldioxide met waterstof omzetten in methaan.

Er is duidelijk dus een hele dierentuin aan micro-organismen nodig die nauw met elkaar moeten samenwerken om het geconcentreerde industriële afvalwater te zuiveren. Daarnaast moeten de micro-organismen het kleine beetje energie dat wordt gewonnen uit de reactie met elkaar delen. Aangezien dit heel weinig is, leidt dit ertoe dat er nauwelijks nieuwe biomassa ofwel spuislib

**Hoogbelaste anaerobe zuiveringsreactor geplaatst direct naast de fabriek van de Suikerunie (bron, Paques BV).**



gevormd wordt. Hierdoor heeft het bedrijf geen additionele kosten voor het verwerken van het slib.

### **Korrelslib**

In de afgelopen decennia is ook gebleken dat de anaerobe micro-organismen vaak in korrelvormige structuren groeien. Deze anaerobe slibkorrels hebben een hoge dichtheid en dus ook een hoge bezinkbaarheid en zitten vol met anaerobe (methanogene) micro-organismen. De hoge bezinkbaarheid maakt hen uitermate geschikt om ze toe te passen in zuiveringsreactoren van bijvoorbeeld 20-25 meter hoog met een relatief gering grondoppervlak. Ook dit is een enorm voordeel aangezien bij fabrieken vaak nauwelijks plaats is om een zuiveringsinstallatie te bouwen.

Doordat de anaerobe slibkorrels zo goed bezinken, kan een anaerobe reactor dus ook veel zuiverings-slib herbergen. Dit type zuivering kan wel 10

keer zoveel slib vasthouden dan de aerobe zuiveringen die we in Nederland voor de rioolwaterzuivering gebruiken. Hierdoor kunnen de anaerobe afvalwaterzuiveringen dus ook zo'n 10 keer zoveel vuillast per tijdseenheid verwerken vergeleken met de aerobe zuiveringen.

Het anaerobe korrelslib dat geproduceerd wordt, is waardevol en zelfs essentieel voor de werking van bepaalde type anaerobe zuiveringen. Eigenlijk is het helemaal geen afvalproduct en heeft het een interessante marktwaarde. Bedrijven die voldoende anaeroob slib produceren, verkopen dit slib aan andere bedrijven die anaerobe reactoren willen opstarten.

Kortom: er zijn alleen maar voordelen om deze manier van zuiveren toe te passen voor geconcentreerd industrieel afvalwater. Dit is dan ook precies de reden dat in Nederland vrijwel al het geconcentreerde, biologisch afbreekbare afvalwater wordt gezuiverd met anaerobe reactoren. Een mooie Nederlandse vinding die momenteel in de hele wereld wordt toegepast om de vuillast naar oppervlaktewater te verminderen. Omdat tevens de chemisch gebonden energie als biogas wordt teruggewonnen die de fossiele brandstof in het productieproces deels kan vervangen is dit een typisch voorbeeld van een win-win-wintechnologie!

## Innoveren onder hoge druk

■ PROF. DR. SEF HEIJNEN EN DR. IR. RONALD WATERMAN

**H**ET WAS omstreeks 1979 dat het biotech bedrijf Gist-brocades in Delft te horen kreeg dat de lozing van haar afvalwater op de Noordzee zou worden belast. Dit was een gevolg van de Wet Verontreiniging Opper-vlaktewateren, waardoor jaarlijks een heffing van 30 gulden per inwonersequivalent betaald moest worden. Aangezien de lozing overeenkwam met 800.000 inwonersequivalenten, betekende dit een bedrag van 24 miljoen gulden per jaar. Het bedrijf was al wel begonnen met onderzoek en investeringen om de afvalwaterproductie van de fabriek te verminderen, maar al snel werd duidelijk dat de jaarwinst zou verdampen vanwege de kosten van de geschatte restlozing. Hiermee stond het voortbestaan van de firma, en dus de werkgelegenheid, op het spel.

### Netwerk met daadkracht

Voor het crisisoverleg op het hoofdkantoor in Delft op 12 maart 1980 riep voorzitter Eppie ter Horst van de Raad van Bestuur van Gist-brocades enkele cruciale personen voor het voortbestaan bijeen: de ministers Van Aardenne van Economische Zaken en Ginjaar van Volksgezondheid en Milieuhygiene, Tweede Kamerlid Reinier Braams en Ronald Waterman lid Provinciale Staten Zuid-Holland en verantwoordelijk voor milieu, infrastructuur, economie, ruimtelijke ordening. Naast de bestuurlijke functies werd dit vierkoppige gezelschap gekenmerkt door hun wetenschappelijk achtergrond in de scheikunde en fysica, iets wat mogelijk bijdroeg aan de daadkrachtige aanpak van het probleem. Tijdens dit voor Delft legendarisch overleg werd op voorstel van Waterman een plan geformuleerd om in vijf jaar niet alleen een nieuwe biologische zuiveringstechnologie te ontwikkelen, maar deze ook op grote schaal operationeel te hebben. De

beide ministeries zorgden voor een substantiële financiële bijdrage voor de onderzoekskosten en een 5-jarige ontheffing van de lozingsheffing.

Omdat op de productielocatie in Delft geen ruimte was voor de bestaande open, beluchte actiefslibinstallaties ging Gist-brocades aan de slag om een innovatieve zuiveringstechnologie te ontwikkelen. Wetenschappelijk adviezen werden geleverd door de universiteiten Delft (hoogleraar microbiologie Gijs Kuenen en hoogleraar biotechnologie Nico Kossen) en Wageningen (hoogleraar milieutechnologie Gatzke Lettinga). Het basisidee was een hoge reactor met een klein grondoppervlak en biofilms op een zandkorrelbed voor een hoge concentratie actieve biomassa. Gist-brocades moest deze technologie binnen 5 jaar op grote schaal toepassen voor het afvalwater van haar fabrieken. De technologie zou daarna vercommercialiseerd kunnen worden, om (een deel van) de investering weer terug te verdienen.

### De gouden driehoek

Alhoewel vijf jaar om van idee naar industriële implementatie van twee nieuwe processen te komen extreem kort was, werd dit plan een groot succes. Daarvoor zijn drie redenen aan te wijzen. Ten eerste was mislukken, waardoor de productielocatie in Delft zou moeten sluiten, geen optie. Dit genereerde veel druk, maar ook draadkracht bij de onderzoekers en managers. Ten tweede was de samenwerking tussen het bedrijf Gist-brocades, de universiteiten en de overheid – de gouden driehoek – voorbeeldig te noemen. Tot slot kreeg een zeer betrokken projectteam met besluitvaardige leiders en vele innovatieve onderzoekers de ruimte hun ideeën vorm te geven.

Door de productieprocessen efficiënter te maken kon Gist-brocades al een vermindering van 500.000 inwonersequivalenten realiseren. Het in bedrijf nemen van de nieuwe zuiveringsinstallatie leidde tot een verdere reductie tot 50.000 inwo-



Het gezichtsbepalende beeld van de afvalwaterzuiveringstorens van DSM (voorheen Gist-brocades) in Delft.

nersequivalenten. De resterende heffing van 1,5 miljoen gulden, was haalbaar voor het bedrijf.

Voor de hoofdrolspelers was het een groot avontuur. In de periode 1984-1985 zijn vier 21 meter hoge fluïde bedreactoren van 300 m<sup>3</sup> met biofilms op drager geïnstalleerd die onder zuurstofloze condities methaangas produceerden. Twee jaar later kwamen daar twee aerobe airliftreactoren van eveneens 21 meter hoog (300 m<sup>3</sup>) voor verwijdering van de restvervuiling bij. Sef Heijnen, een van de hoofdonderzoekers destijds, promoveerde in 1984 op de ontwikkeling en opschaling van deze nieuwe biologische zuiveringsprocessen. Rond diezelfde tijd werd bij Gist-brocades het Anamoxproces ontdekt door Arnold Mulder. Later zijn zowel door het bedrijf Biothane dat uit Gist-brocades ontstond, als het in Balk gelegen Paques, de

biofilmreactoren succesvol vercommercialiseerd en wereldwijd geïnstalleerd.

Ook aan de TU Delft bracht dit veranderingen te weeg. Zo werd in 1988 bij de afdeling Biotechnologie, bij het aantreden van Sef Heijnen als hoogleraar, milieubiotechnologie als speerpunt gekozen, waar onder leiding van hem en Gijs Kuenen – gevolgd door Mark van Loosdrecht – verder is gewerkt aan mathematische modelvorming van biofilms. Andere vele nieuwe waterzuiveringssystemen zijn ontwikkeld, vaak met fraaie namen als Anamox, Sharon, Nereda, Canon en Babe.

## Biofilms: biologische principes en opschaalstrategie

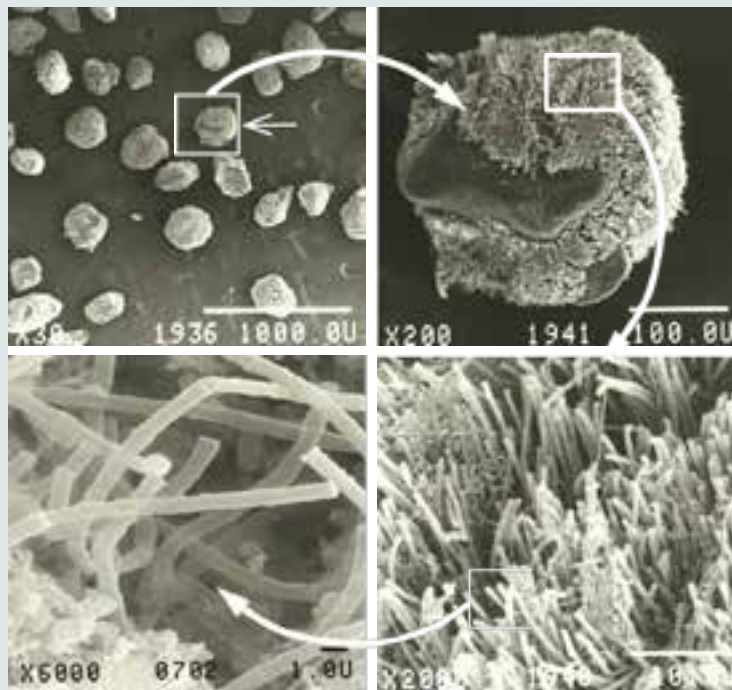
■ PROF. DR. SEF HEIJNEN

Biofilms worden gevormd door micro-organismen die als slijm laagjes op een vaste ondergrond leven, vaak met een hoge biomassaconcentratie. In de natuur zijn biofilms overal aanwezig. Ten tijde van de crisis bij Gist-brocades, omstreeks 1980, waren biologische zuiveringsinstallaties op basis van biofilms al een eeuw in gebruik. Bekende technologieën daarbij waren de *trickling filters* met aerobe biofilms op gestapelde keien (diameter 2 centimeter) en de befaamde anaerobe slibkorrels in UASB-reactoren die methaan produceerden. Helaas gingen deze slibkorrels in het afvalwater van Gist-brocades kapot. Waarom was onbekend. Kennis over de vorming van deze korrels had men nog niet. Het onderzoek bij Gist-Brocades richtte zich daarom op het vinden van een principe dat tot stabiele biofilms leidt en op een strategie om dit op grote industriële schaal toe te passen.

Een biofilmlaag voor waterzuivering moet niet te dik zijn omdat anders de onderste micro-organismen geen afvalstoffen meer krijgen en kunnen

omzetten. Een laagdikte tussen de 0,1-0,2 millimeter is voor een biofilm optimaal. Om voldoende actieve biomassa te hebben voor de behandeling van afvalwater is 1.000-2.000 m<sup>2</sup> oppervlak per kubieke meter (m<sup>3</sup>) reactor nodig. Dit is te vergelijken met vijf à tien tennisvelden opgerold in een kubus van een meter bij een meter bij een meter. Door gebruik te maken van kleine deeltjes (0,3 – 0,5 millimeter) die rondzweven in de reactor, kon zo'n groot oppervlak worden bereikt. Een andere randvoorwaarde was dat de biokorrels niet mochten uitspoelen bij de snelheid waarmee het afvalwater doorstroomt, zo'n 10-20 meter per uur. De keuze viel op de zwaardere zanddeeltjes als drager.

Om er voor te zorgen dat bacteriën ook daadwerkelijk biofilms gingen vormen op die deeltjes is er een slim doch eenvoudig selectieprincipe ontwikkeld. Door de verblijftijd van de vloeistof in de reactor kort te houden, spoelen alle bacteriën die niet hechten eenvoudig weg uit. Dit principe bleek uitstekend te werken voor allerlei soorten van bacteriepopulaties, van aerob tot anaerob.



Anaerobe biofilms op een drager van zand.

Technologisch was de uitdaging om een zodanig opwaartse stroom te creëren dat de zanddeeltjes niet op de reactorbodem bleven liggen. In een reactor van 300 m<sup>3</sup> gaat ongeveer 30 ton zand. Aan de ander kant mochten de begroeide deeltjes met biomassa, die een stuk lichter zijn, niet uitspoelen, wat eisen stelde aan het reactorontwerp aan de bovenkant. Door direct vanaf het begin de procescon-

dities op grote schaal mee te nemen via een scale-up/scale-downstrategie kon ook deze opgave binnen de gestelde vijf jaar gerealiseerd worden.



## De compacte oplossing: biofilmen en biokorrels

■ PROF. DR. IR. MARK VAN LOOSDRECHT

**H**ET ZUIVEREN van het afvalwater begint eigenlijk al in de gootsteen. In het afvoerputje en pijp heeft zich in de loop der tijd een laagje slijm ontwikkeld. Dit is een biofilm die bacteriën maken om niet weg te spoelen met het langstromende water. De biofilm bestaat uit een gellaag die bacteriën van nature zelf produceren en waarin ze kunnen groeien. Op de meeste plaatsen in de natuur zouden bacteriën wegspoelen als ze zich niet vasthechten aan een oppervlak. Denk aan glibberige keien in beekjes en sloten of stromend grondwater, maar bijvoorbeeld ook aan tanden en kiezen in onze mond waar bacteriën zich graag aan vastzetten.

### Van film naar vlok

De waarneming dat bacteriën in de slijmlaagjes op keien op de bodem van een beek of rivier het water schoonmaken heeft tot de eerste afvalwaterzuivering geleid. De keien van de bodem in een beek werden opgestapeld in een reactor en het afvalwater werd eroverheen gesproeid. Dit zogenaamde oxidatiebed heeft relatief veel ruimte nodig omdat voor de omzetting van de vervuiling

zuurstof nodig is dat vanuit het water de biofilm moet binnenkomen via een (traag) diffusieproces. De omzettingssnelheid is dus direct gekoppeld aan het oppervlak van de biofilm en niet zozeer de dikte en de hoeveelheid bacteriën.

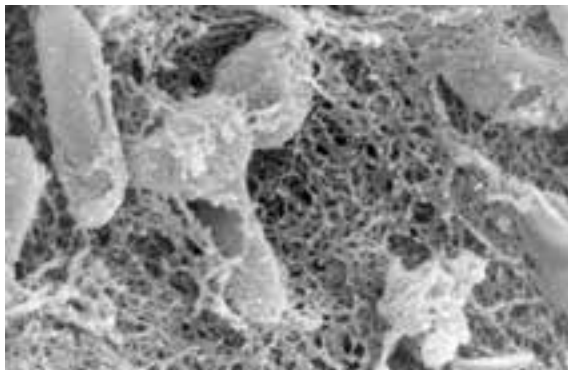
Met de uitvinding van de bezinktank werd het mogelijk om vlokvormige bacterieaggregaten in de waterzuivering vast te houden zonder dat biofilmvorming nodig is. In de relatief losse bacterievlok is er veel meer contactoppervlak tussen water en bacteriën en geen probleem meer met zuurstoftoevoer naar de bacteriën. De bacteriële slibvlokken bezinken echter langzaam, omdat ze maar net iets zwaarder zijn dan water. De afscheiding van vlokken vraagt daarom tijd en grote bezinkruimte als buffer. Dit alles maakt dat een afvalwaterzuivering een zeer grote installatie is. Bij de afvalwaterzuivering Garmerwolde in Groningen staan bijvoorbeeld negen grote bezinktanks. Er kan veel ruimte worden bespaard als het slib óf beter bezinkt óf beter kan worden afgescheiden. In bezinktanks doet de zwaartekracht het 'werk'. Het kan met een centrifuge of een filter, maar dat kost ook meer energie en is daarom geen gewenste richting. Het is slimmer om de bezinking te verbeteren door bacteriën in plaats van vlokken korrels te laten vormen. Vergelijk het met neerdwarrelen van sneeuw en het vallen van hagel.

### Van vlok naar korrel

De vraag is dus hoe krijg je bacteriën zover dat ze in een compacte laag in plaats van een rafelige vlok gaan groeien, ofwel hoe groeit een biofilm? Aangezien biofilms, vlokken en korrels door bacteriën worden gevormd, ligt het voor de hand daar een biologische verklaring voor te vinden.

Na de ontdekking van anaeroob korrelslib is er hard gezocht om ook bacteriën die aeroob groeien korrels te laten vormen. Dat bleek niet eenvoudig. De verklaring was dat onder anaerobe condities een aantal bacteriën nauw moeten samenwerken

Een scanningelektronen-microscopie-opname van korrelslib: de bacteriën zitten ingebed in vezels van biopolymeren die de structuur van de korrel vormen.



om een suikerverbinding om te zetten in methaan, terwijl aerob een suikerverbinding door één organisme kan worden omgezet en eindigt als koolstofdioxide. De anaerobe bacteriën hebben als het ware 'geleerd' om dicht op elkaar te groeien zodat ze goed kunnen samenwerken, waardoor ze dus korrels maken en aerobe bacteriën niet.

Uit verder onderzoek kwam dat de structuur waarin bacteriën groeien, wordt bepaald door dezelfde processen die de groei van kristallen beïnvloeden. Dat is een balans tussen diffusie (de aanvoersnelheid van de kristalmoleculen) en aangroeisnelheid van het kristal. Langzame groei van een kristal leidt tot een compacte structuur (de hagel), snelle groei leidt tot een poreuze structuur (een sneeuwvlok). Sommige processen maken alleen langzame groei mogelijk, of omdat er weinig energie voor de bacteriën overblijft of omdat de

bacteriën zelf relatief veel energie nodig hebben. Bij anaerobe omzetting van suiker in methaangas gaat de meeste energie in het methaan zitten. Bacteriën die op koolstofdioxide (autotroof) groeien, hebben relatief veel energie nodig. Dit soort bacteriën groeit dus makkelijk in compacte biofilms of korrels. Voorbeelden zijn de methaanvormende archaea en ammonium-oxiderende bacteriën. Aerobe bacteriën halen veel energie uit suiker, hebben zelf weinig nodig en groeien daardoor snel en in open vlokachtige structuren.

### Vetreserves

Om aerobe bacteriën toch korrels te laten vormen, moeten op een of andere manier aerobe bacteriën geselecteerd worden die traag groeien. Sommige trage groeiers hebben 'trucs' ontwikkeld om de competitie om voedsel van snelle bacteriën te win-

**De waterzuivering Garmerwolde in Groningen. Bovenin het traditionele vlokvormig slibproces (negen bezinkingstanks), onderin de twee tanks met het nieuwe korrelslibproces. Beide delen van de waterzuivering behandelen ieder ongeveer de helft van het afvalwater van Groningen.**





Twee glazen met slib (linker glas) en Nereda-korrels (rechter glas) laten het verschil in bezinkingssnelheid zien.

nen. Een daarvan is slim gebruik maken van een dynamisch voedselaanbod. Snelgroeiende bacteriën zullen als er voedsel is zeer snel gaan groeien, maar als het voedsel op is, leiden ze honger. De trage bacteriën nemen het voedsel als het beschikbaar is alleen op en leggen een soort vetvoorraad aan in de cel. Omdat ze niet groeien, kunnen ze het voedsel sneller opnemen. Het omzetten van voedsel in vet gaat namelijk sneller dan het maken van nieuw celmateriaal. Wanneer het voedsel buiten de cel op is, gaan ze vervolgens langzaam groeien op hun vetreserves. Door een zuiveringsproces te ontwerpen waarin alleen traag groeiende bacteriën een voordeel hebben, ontstaan vanzelf goed bezinkbare korrels. Op basis van deze inzichten is het zogenaamde Nereda zuiveringsproces ontwikkeld door de TU Delft, RoyalHaskoningDHV en de Nederlandse waterschappen.

## De (zware) metalen, last en lust

■ DR. IR. JAN WEIJMA

**M**ETALLEN MAKEN onderdeel uit van de natuur. Zonder zink, koper en molybdeen kunnen planten, dieren en ook mensen niet gezond blijven.

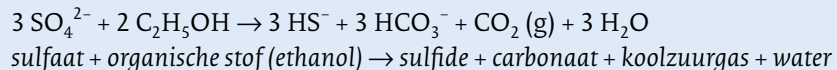
Zink bijvoorbeeld is onderdeel van een groot aantal enzymen in het lichaam die onder meer betrokken zijn bij groei en ontwikkeling van weefsel. Metalen als zink zijn niet alleen essentieel voor het leven, maar ook voor allerlei industriële en huishoudelijke toepassingen, zoals verzinkt staal en zinken dakgoten.

Een teveel aan deze metalen leidt echter tot toxiciteit en bij industriële afvalwaterlozingen is daar al vrij snel sprake van. Er zijn allerlei chemische en fysische methoden om deze metalen weer uit het afvalwater te verwijderen, maar het kan ook microbiologisch. Vaak kunnen de metalen dan in een herbruikbare vorm worden teruggewonnen. Dat aspect wordt steeds belangrijker omdat ertsvoorraden eindig zijn en allerlei metalen, waaronder zink en koper, schaars worden.

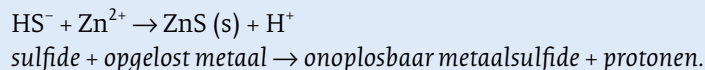
### Zink uit afvalwater

Een voorbeeld van een microbiologische proces voor metaalverwijdering is sulfaatreductie door bacteriën. De bacteriën zetten sulfaat, dat ook ruim aanwezig is in afvalwater, om in sulfide  $\text{HS}^-$ . Hierbij hebben ze een organische stof zoals ethanol

#### SULFAATREDUCTIE



#### METAALPRECIPITATIE



nodig als energiebron. Het gevormde sulfide kan vervolgens benut worden voor het neerslaan van opgeloste metalen tot onoplosbare metaalsulfideverbindingen.

Een industrieel proces op basis van biologische sulfaatreductie wordt inmiddels al jaren in de praktijk met succes toegepast. In Budel in Noord-Brabant staat een commerciële sulfaatreductie-installatie met een volume van 500 m<sup>3</sup> bij de Nyrstar Zinc Refinery. Het afvalwater met zink en sulfaat wordt hier biologisch behandeld. Het eindproduct zink-sulfide kan verder worden verwerkt in de smelter voor productie van metallisch zink en weer gebruikt worden in de fabriek.

Op soortgelijke wijze kan ook koper teruggevoerd worden, zoals onder andere gebeurt in de Dominicaanse Republiek bij een mijn. Hier wordt zwavel in plaats van sulfaat als bron voor sulfide gebruikt.

### Seleen

Door microbiologen is aangetoond dat bacteriën specifieke zware metalen, maar ook metalloïden (semi-metalen) en radionucliden zoals uranium, kunnen omzetten naar een vaste vorm. Een voorbeeld hiervan is de biologische reductie van opgelost selenaat ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ) naar goed af te scheiden en elementair selenium (Se, een metalloïde). Seleen is een belangrijke micronutriënt (meststof) voor planten, teruggewonnen seleen kan op termijn voor deze toepassing worden gebruikt. Dit proces van biologische seleenverwijdering uit afvalwater wordt ook toegepast in de praktijk, vooral in de mijnindustrie en metallurgische industrie.

### Arseen verpakken in kristallen

Micro-organismen kunnen ook gebruikt worden om schadelijke metalen als arseen neer te slaan. Bij metallurgische processen voor winning van vooral koper, lood zink, kobalt, goud en zilver komt arseen-

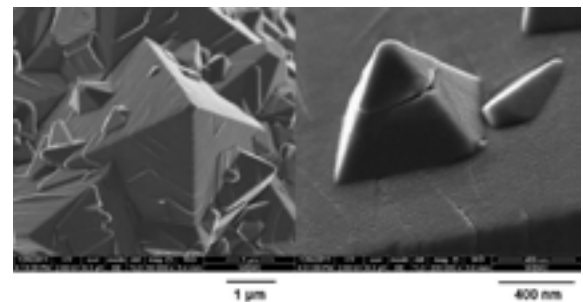
**Bacteriën kunnen sommige opgeloste metalen omzetten naar een vaste vorm, waardoor het makkelijker terug te winnen is.**

Element	Opgeloste vorm	Vaste vorm
Seleen	$\text{SeO}_4^{2-}$ , $\text{SeO}_3^{2-}$	$\text{Se}^0$
Telluur	$\text{TeO}_4^{2-}$ , $\text{TeO}_3^{2-}$	$\text{Te}^0$
Uranium	$\text{UO}_2^{2+}$	$\text{UO}_2$
Palladium	$\text{Pd}^{2+}$	$\text{Pd}^0$
Technetium	$\text{TcO}_4^-$	$\text{TcO}(\text{OH})_2$
Kwik	$\text{Hg}^+$	$\text{Hg}^0$
Chroom	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ , $\text{CrO}_4^{2-}$	$\text{Cr}(\text{OH})_3$
Molybdeen	$\text{MoO}_4^{2-}$	$\text{MoO}_2$ , $\text{MoS}_2$
Goud	$\text{Au}^{3+}$	$\text{Au}^0$

**Biologische reductie van selenaat. Links: een oplossing van selenaat waaraan een selenaat-reducerende bacteriecultuur is toegevoegd. In het midden is de bacteriecultuur gegroeid en komt selenaat-reductie op gang. Rechts: Selenaat is omgezet naar elementair, vast seleen, dat in een bepaalde kristalvorm een oranje-rode kleur heeft.**



**Een scanningelektronen-microscopie-opname van bioscorodiet, een kristallijn ijzerarsenaat ( $\text{FeAsO}_4$ ).**



houdend afvalwater vrij. Arseenverbindingen zijn milieuvriendelijk en er zijn maar weinig toegestane toepassingen van arseen. Daarom verwerkt de metallurgische industrie arseen tot een vaste afvalstof, meestal *amorf* ijzer- en calciumarsenaat, dat

vervolgens voor altijd opgeslagen wordt in bekken. Daar zijn veel chemicaliën voor nodig. Bovendien komt er na verloop van tijd vaak toch arseen vrij, dat in het grondwater terecht kan komen.

Een elegantere oplossing is om arseen in de vorm van arsenaat ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) met ijzer  $\text{Fe}^{3+}$  neer te slaan als *kristallijn* ijzerarsenaat ( $\text{FeAsO}_4$ ), het stabiele mineraal scorodiet. Dat is chemisch gezien een lastig proces. De vorming van scorodiet is echter alleen mogelijk in metastabiele oplossingen, waarbij de kristallisatie op al aanwezige kristallen plaatsvindt en de vorming van kristallisatiekeren niet of nauwelijks optreedt. Het is daarom van belang om de mate van oververzadiging voor scorodiet te controleren. In de eerste plaats is daarvoor een lage zuurgraad ( $\text{pH} < 2$ ) nodig, zodat een beperkt deel van arsenaat vrij voorkomt als  $\text{AsO}_4^{3-}$ . In de tweede plaats is menging op microschaal van belang. Het simpelweg mengen van ijzer- en arsenaatoplossingen resulteert lokaal in een te hoge mate van oververzadiging en snelle vorming van amorf scorodiet.

Bij het bioscorodiet-proces wordt arsenaat gekristalliseerd met ijzer( $\text{Fe}^{2+}$ )-oxiderende bacteriën, die  $\text{Fe}^{3+}$  vormen. Op die manier kan de mate van oververzadiging van het mineraal op microschaal gecontroleerd worden door de snelheid van biologische oxidatie. Dit resulteert in een hoog-kristallijn product. In dit bioscorodiet-proces dat nog steeds in een zuurmilieu en bij hogere temperatuur ( $70^\circ$ ) plaatsvindt, worden daarom zuur- en hitte-minnende micro-organismen ingezet voor de ijzeroxidatie. Deze micro-organismen leven van nature in vulkanische milieus.

De mogelijkheden om met micro-organismen een wezenlijke bijdrage te leveren aan metaalverwijdering en terugwinning van metalen zijn zo veelzijdig als de micro-organismen zelf en nog lang niet uitgeput. Door onderzoek en ontwikkeling kunnen deze concepten doorgroeien naar praktijktoepassingen op grote schaal.

## Bloedrode rivieren

■ DR. IRENE SANCHEZ ANDREA

Wanneer sulfide-ijzermineralen ( $\text{FeS}$ ) uit de bodem aan lucht blootgesteld worden, vindt oxidatie plaats waarbij oplosbaar ijzer ( $\text{Fe}^{3+}$ ) en sulfaat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ontstaan. Dit is een natuurlijk chemisch en biologisch proces dat sterk gestimuleerd wordt bij mijnbouw. De Rio Tinto in Zuidwest-Spanje is een bekend voorbeeld van een rivier die bloedrood kleurt ten gevolge van mijnbouwactiviteiten. Een hoog ijzergehalte en de lage pH van het water zijn hier debet aan.

Het winnen van metalen is belangrijk vanwege de ontelbare toepassingen: ijzer in staal, koper in draden, platina in autokatalysatoren, aluminium voor pannen, enz. De meeste metaalhoudende ertsen van hoge kwaliteit zijn echter al uitgeput. Daarom gaan men steeds meer over op het winnen van ertsen van lagere kwaliteit, dus met een laag metaalgehalte en hoog gehalte aan andere, giftige metalen. Dit betekent ook dat er grotere hoeveelheden erts verwerkt worden om aan voldoende metaal te komen, waarbij een grotere hoeveelheid afval ontstaat. De opslag van dit mijnafval vormt een milieuprobleem. Onzorgvuldig beheer ervan leidt tot de vorming van zuur mijnwater met giftige metalen en vormt een bedreiging van de gezondheid van mens en dier door verontreiniging van drinkwaterbronnen. De laatste eeuw zijn er veel



Langs de rivier Rio Tinto in Zuidwest-Spanje wordt al eeuwen goud, zilver, ijzer, koper en andere metalen gedolven. Hierdoor is de rivier sterk vervuild met opgeloste metalen en sterk verzuurd ( $\text{pH}=2$ ). Dat geeft de rivier een dieprode kleur.

ongelukken gebeurd, onder andere de recente damdoorbraken van opslagbassins in de deelstaat Minas Gerais in Brazilië (2015) en in de staat Colorado in de Verenigde Staten (2015). Een manier om de vervuiling van mijnafval te verminderen is de verschillende metalen terug te winnen met sulfaatreducerende bacteriën. Deze bacteriën zetten sulfaat om in sulfide, waardoor opgeloste metalen neerslaan als metaalsulfiden. Deze neerslag is redelijk makkelijk te scheiden van het water. Niet alleen kunnen de metalen worden hergebruikt, ook vermindert hierdoor de zuurgraad van het mijnwater en kan het ecosysteem zich herstellen.

# Het probleem van de vele handen

■ PROF. DR. IR. IBO VAN DE POEL EN DR. SJOERD ZWART

## Wie houdt de risico's in de gaten?

**T**ECHNOLOGISCHE INNOVATIES in de afvalwaterzuivering hebben het doel om zuiveringsprocessen te verbeteren om zo menselijk welzijn te vergroten of bij te dragen aan maatschappelijke waarden zoals veiligheid, gezondheid en duurzaamheid. Toch kunnen daar ook risico's bij optreden.

Een van de grootste risico's is dat een zuiveringsinstallatie niet goed werkt, waardoor schade aan ecosystemen of gezondheidsrisico's voor mensen optreden. Dit kan onbedoeld gebeuren, bijvoorbeeld wanneer iemand per ongeluk een stof op het riool loost die de bacteriën doodt en zo de werking van de zuiveringsinstallatie verstoort. Maar het kan ook doelbewust gebeuren, bijvoorbeeld door sabotage.

Van bestaande zuiveringstechnieken, zoals het actiefslibproces, zijn de risico's ondertussen vrij goed bekend. Maar bij nieuwe technologische innovaties zijn, ondanks veelbelovende lab- en praktijkproeven, onverwachte of onbekende risico's niet uit te sluiten. Zo kunnen innovatieve zuiveringstechnieken wel effectiever of goedkoper zijn, maar tegelijk minder robuust en daardoor gevoeliger voor schommelingen in de samenstelling van het afvalwater. Of een nieuwe techniek is wel beter in het verwijderen van gewone afvalstoffen, maar minder goed in staat bijzondere afvalstoffen zoals zware metalen op te ruimen.

### Wie is verantwoordelijk als het mis gaat?

Dit roept de vraag op wie er verantwoordelijk is voor het op tijd in kaart brengen en verminderen van mogelijke risico's van innovaties in afvalwa-

terzuivering. Zijn het de onderzoekers, de ingenieursbureaus, de bedrijven, de waterschappen of de overheid? Er zijn drie redenen die het vaak lastig maken die vraag te beantwoorden. Ten eerste gaat het vaak, zoals gezegd, om onbekende of onverwachte risico's. Zeker als risico's moeilijk te voorzien zijn, is het lastig om daar iemand verantwoordelijk voor te houden. Toch is het wenselijk om alle denkbare risico's tijdig te onderzoeken en te monitoren om te zien of er geen gevaarlijke situaties kunnen ontstaan. De vraag is alleen wie dat zou moeten doen.

Ten tweede zijn er veel partijen betrokken bij de ontwikkeling en ingebruikname van een nieuwe afvalwaterzuiveringstechnologie. Geen van hen heeft als taak om nog niet-bekende risico's van innovaties te onderzoeken. De onderzoekers zijn vaak primair gericht op het werkend krijgen van een nieuwe techniek. De partijen die de innovatie op de markt brengen, zoals ingenieursbureaus, zijn vaak vooral druk met het opschalen en financieel aantrekkelijk maken van de innovaties. En de gebruikers van de nieuwe technologie zoals waterschappen of bedrijven, nemen vaak aan dat die belangrijkste risico's al geadresseerd zijn tijdens de ontwikkeling. Tenslotte weet de overheid vaak niet, hoewel zij verantwoordelijk is voor de regulering, welke risico's van nieuwe innovaties moeten worden afgedekt.

Het onderzoek naar de risico's van technische innovaties vergt daarom dat de betrokkenen verder kijken dan hun primaire taak. Zij moeten ook nadenken over hun gezamenlijke morele verantwoordelijkheid om goed met mogelijke risico's



om te gaan. Toch blijft het vaak lastig te bepalen wie daadwerkelijk die verantwoordelijkheid moet oppakken. Dit heeft te maken met een derde punt. Juist omdat er zoveel partijen betrokken zijn, denkt men snel dat iemand anders die verantwoordelijkheid wel op zich zal nemen. Dit noemt men ook wel: het probleem van de vele handen.


### Ethisch parallelonderzoek

Dit probleem kwam ook aan het licht bij de ontwikkeling van de korrelslibtechnologie Nereda. Dit is een innovatieve waterzuiveringstechnologie met belangrijke voordelen zoals grote energiebesparing en een veel kleiner benodigd grondoppervlak. In het kader van het programma Ethiek, Onderzoek en Bestuur hebben onderzoekers van de sectie filosofie van de TU Delft al tijdens de ontwikkeling van Nereda ethisch parallelonderzoek uitgevoerd in samenwerking met alle betrokken partijen. Daarbij kwam naar voren dat waar het ging om het risico van de zogenaamde secundaire emissies dat de betrokkenen naar elkaar keken. Voorbeelden van secundaire emissies zijn: hormoon verstorende stoffen, reststoffen van medi-

cijnproductie, pesticiden maar ook zware metalen, pathogene bacteriën en het broeikasgas  $N_2O$ .

De emissiegrens van secundaire emissies was op dat moment nog niet bij wet geregeld omdat aangenomen werd dat een traditionele afvalwaterzuivering deze stoffen voldoende verwijderde. Voor Nereda was dat nog niet zeker omdat het afvalwater veel korter in het zuiveringssysteem verbleef waardoor er wel mogelijk een extra gevaar voor de volksgezondheid of het milieu was. Echter, de onderzoekers vonden dat dit eventuele risico in de gebruiksfase aangepakt moest worden, terwijl de gebruikers juist van mening waren dat dit risico in de ontwikkelfase geadresseerd moest worden. Toen dit tijdens het parallelonderzoek duidelijk werd, hebben de onderzoekers besloten de secundaire emissies mee te nemen in het vervolgonderzoek. Gelukkig bleek het risico van de extra secundaire emissies mee te vallen.

De les van dit alles is dat er bij innovaties tijdig onderlinge afspraken gemaakt moeten worden over wie verantwoordelijk is voor het onderzoek naar, en de monitoring van mogelijke risico's.



**De wereld van afvalwaterzuivering is volop in beweging en zoekt naar mogelijkheden om grondstoffen en energie uit huishoudelijk en industrieel afvalwater te halen.**



# 4

# Afvalwater als grondstof

*Er is een grote verandering gaande in het denken over afval- en afvalwaterstromen. In de transitie naar een circulaire economie, wordt afvalwater steeds meer als grondstof behandeld. Dat dit legio mogelijkheden biedt, laten de waterschappen en bedrijven in samenwerking met milieutechnologen zien. Waterzuiveraars leveren niet alleen gezuiverd water, maar zijn ook producent geworden van energie en grondstoffen zoals cellulosevezels, bioplastic, zwavel en fosfor en mogelijk ook eiwit. Is de toekomstige afvalwaterzuivering een bioraffinagefabriek?*

## De kringlooeconomie

■ PROF. DR. IR. MARK VAN LOOSDRECHT

**H**ET NATUURLIJKE systeem van onze planeet is gebaseerd op kringlopen van essentiële chemische elementen benodigd voor het leven, zoals koolstof, stikstof en fosfor, en van water. Planten en algen gebruiken de energie uit zonlicht om op te groeien. Daarbij gebruiken ze koolstofdioxide en stikstofgas uit de lucht en fosfaat en ammonium uit de bodem als bouwstenen. De gevormde planten en algen worden gegeten door dieren. Die gebruiken het als energievoorziening en halen er bouwstenen uit om zelf te groeien. Nadat planten en dieren zijn gestorven, zorgen micro-organismen ervoor dat al dit biologisch materiaal weer wordt omgezet in de oorspronkelijke bouwstenen. Voor deze micro-

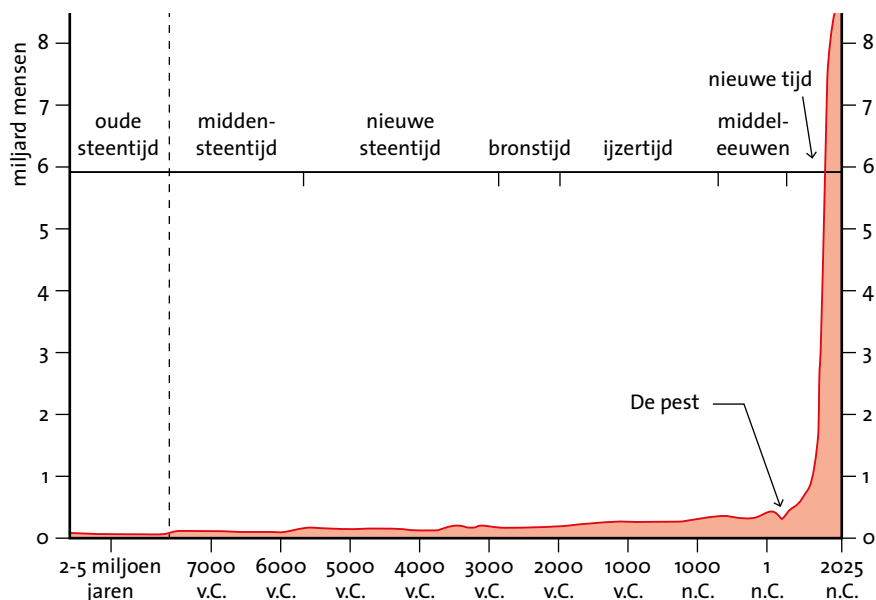
organismen is het afval in feite voedsel. Dit is de voedselkringloop op aarde.

### Waterkringloop

Water vormt op aarde ook een kringloop. In onze oceanen verdampt een heleboel water, dat zich ophoopt in wolken. Op deze manier wordt in feite met zonne-energie zeer schoon water geproduceerd en zouten blijven achter in de oceaan. Als regen komt het water op het land terecht waardoor planten kunnen groeien en als voedsel dienen voor de dieren. Zouten en andere componenten die langzaam in het water oplossen worden uiteindelijk via de rivieren weer naar de zee getransporteerd. Dit is de waterkringloop op aarde.

Mensen vormen een onderdeel van het natuurlijk ecosysteem op aarde, en maken daarmee onderdeel uit van bovenstaande kringlopen.

## Groei wereldbevolking door de eeuwen heen



Zolang mensen verspreid in kleine gemeenschappen leven is er geen probleem, maar wanneer grote groepen mensen samen gaan wonen, is het vermogen van het natuurlijke ecosysteem om de kringlopen op voldoende snelheid te laten draaien te beperkt. Dat is als eerste waar te nemen aan vervuild oppervlaktewater waar we onze afvalstoffen met (spool)water lozen.

### Drinkwater- en natuurbescherming

Afvalwaterzuivering is in feite niets anders dan het natuurlijke omzettingsproces van afvalstoffen, maar dan sterk versneld. In een zuiveringsreactor kan een hoog gehalte aan bacteriën worden bereikt en voldoende zuurstof worden toegevoerd. De bacteriën groeien op de afvalstoffen in het water en nadat de gevormde bacteriemassa (actief slib) van het gereinigde water is gescheiden, kan het schone water terug de natuur in. Hiermee is afvalwaterzuivering altijd al een technologie geweest die bijdraagt aan hergebruik en de kringlooeconomie.

Ooit begon men met afvalwaterzuivering om drinkwaterbronnen te beschermen. Een stad stroomafwaarts aan een rivier wil ook graag uit schoon water drinkwater maken. Sinds de jaren 70 van de vorige eeuw is daar de doelstelling van natuurbescherming bijgekomen. De zeer grote groei van de bevolking maakt het nodig om de kringloop van water en stoffen zoveel mogelijk binnen de menselijke samenleving plaats te laten vinden. Dat betekent dat water direct hergebruikt kan worden om drinkwater te produceren of landbouw te bedrijven. Maar ook dat alle stoffen in het water zoals stikstof en fosfaat, maar bijvoorbeeld ook het cellulose van toiletpapier, terug te winnen zijn.

### Nieuw afval

Daarnaast wordt in de afvalwaterzuivering weer nieuw afval geproduceerd. De bacteriën die op het afval groeien blijven uiteindelijk over als slib. Dit zou goed bruikbaar zijn in de landbouw als bemesting of bodemverbeteraar maar vanwege mogelijk besmettingsgevaar (ziekten) en vervuiling met zware metalen gebeurt dat niet meer. Nu wordt het slib nog vaak verbrand, hoewel er componenten in zitten die we kunnen hergebruiken. Dit hergebruik is wat we circulaire economie noemen of de grondstoffencyclus. De mogelijkheden voor hergebruik zijn momenteel onderwerp van onderzoek en ontwikkeling bij universiteiten, bedrijven en de waterschappen. De waterschappen hebben hun krachten gebundeld op dit vlak in de zogenaamde energie en grondstoffenfabriek.

Het organische materiaal in het afvalwater is op twee manieren te hergebruiken: als grondstof voor nieuwe producten of als energiebron. Momenteel wordt meestal energie geproduceerd. Dat gebeurt in de anaerobe afvalwaterzuivering waar het organische koolstof wordt omgezet in biogas (methaan). Op de lange duur is dit echter onwenselijk. Productie van organisch materiaal (in feite de

landbouw) kost veel energie en ook grondstoffen, en met de geproduceerde materialen moeten we zo lang mogelijk omgaan. Daarnaast zijn er vele duurzame energiebronnen, terwijl voor chemicaliën alleen olie als (ongewenst) alternatief voorhanden is. Probleem tot op heden is dat afvalwater honderden verschillende verbindingen bevat.

### Bacteriën aan zet

Nieuwe inzichten in de microbiële ecologie maken duidelijk hoe bacteriën bepaalde verbindingen gebruiken om te overleven of de strijd om het voedsel van andere bacteriën te winnen. Zo maken bacteriën gebruik van een soort van vetopslag om periodes met weinig voedsel te overleven. Dit bacteriële vet is eigenlijk een soort plastic. Door een systeem te ontwikkelen waar regelmatig hongerperiodes voor de bacteriën voorkomen, kunnen we bacteriën veel van dit bioplastic laten maken. Bacteriën moeten zich beschermen en maken daarvoor vaak een kapsel waarbinnen ze groeien. Dat kapsel is een biopolymeer met gelerende eigenschappen zoals gelatine. Ook deze verbindingen kunnen we produceren op basis van afvalwater. Bacteriën kunnen water ook eerst verzuren waardoor alle koolstofverbindingen worden omgezet in azijnzuur of melkzuur. Daarop kunnen weer andere bacteriën groeien en deze stoffen omzetten in vetzuren. Zo zijn er nog veel mogelijkheden die momenteel worden onderzocht.



---

Gebruikt  
wc-papier  
wordt  
onderdeel  
van asfalt

## Zeefgoed en cellulose uit afvalwater

■ YEDE VAN DER KOOIJ BSC MBA

**T**OT VOOR kort waren de waterschappen gericht op het zuiveren van huishoudelijk afvalwater als een *end-of-waste*-techniek. De laatste jaren groeit het besef dat afvalwater een bron is van grondstoffen zoals mineralen, fosfaten, metalen, cellulose, bioplastic en ook energie. Hiertoe wordt veel onderzoek gedaan door de waterschappen en de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). Een van deze innovaties is het terugwinnen van wc-papier uit afvalwater met fijnzeven en het toepassen als grondstof.

### Zeefgoed

Voordat huishoudelijk afvalwater zuiveringsinstallaties van een rwzi in gaat, vangt een grofvuilrooster de grove delen tot 6 mm af. Een zeefdoek (maaswijdte 350 µm) zeeft daarna ruim de helft van de zwevende stof uit het water. Dit afgescheiden materiaal, het zeefgoed, bestaat voor 50 tot 70% uit cellulosevezels en is hoofdzakelijk afkomstig van toiletpapier (papiervezels).

Elke Nederlander gebruikt circa 8 kg wc-papier per jaar. Het is niet de verwachting dat dit gebruik op de middellange termijn zal afnemen. Hiermee zit in potentie in het Nederlandse gemeentelijke afvalwater meer dan 140.000 ton droge stof cellulose. Deze cellulosevezels zijn in de meeste gevallen na een of meerdere opschoonstappen opnieuw te gebruiken. Zo is cellulose één van de belangrijkste grondstoffen voor een biobased economie en wordt het op grote schaal toegepast in de papier- en kartonindustrie. Andere mogelijke toepassingen van cellulose uit zeefgoed zijn: afdruipremmer in asfalt, vezels voor isolatiemateriaal, enzymatische omzetting naar suikers en grondstoffen als butanol en bioplastics.

Toepassing van zeefgoed als afdruiptremmer in asfalt voor een fietspad. Om een homogene kwaliteit in een asfaltlaag te krijgen, wordt bij het verwerken van asfalt cellulose toegevoegd. Cellulose zorgt voor een verhoging van de viscositeit van het bitumen-asfaltmengsel en voorkomt het 'afdruipten' van de bitumen van de steenen zanddeeltjes tijdens productie en transport. De zeefgoedcellulosevezel functioneert zowel in de productiefase, als in de verwerkingsfase goed als afdruiptremmer. Dit is het resultaat van het project 'Vazena' binnen de Energie en Grondstoffenfabriek, en van de Green Deal die in 2014 tussen de Unie van Waterschappen en de Rijksoverheid werd gesloten om zoveel mogelijk waardevolle grondstoffen uit afvalwater terug te winnen. Aan het project werkten mee: STOWA, Wetterskip Fryslân, Provinsje Fryslân, KNN Cellulose, Esha Infra Solutions, Jansma BV en Roelofs.



### Eerst zeefinstallaties actief

In Nederland staan nu twee grote fijnzeefinstallaties, een op de rwzi Aarle Rixtel en een op de rwzi Beemster. Het gaat om de behandeling van circa 200.000 inwonerssequivalenten waarbij ongeveer 5.000 ton zeefgoed vrijkomt. Daarnaast staan er kleinere installaties op de rwzi's van Blaricum en Uithuizermeeden en Ulrum. Met de bestaande en de nieuwe initiatieven bij de waterschappen is de verwachting dat eind 2018 ongeveer 7.000 ton droge stof zeefgoed geproduceerd wordt met een groei naar 15.000 ton in 2020 en een perspectief van 45.000 ton over 10 jaar.

Bij onder andere de waterschappen Vechtstromen, Wetterskip Fryslân en waterbedrijf Evides worden nieuwe zeeftechnieken en toepassingen onderzocht. Zo kijkt het onderzoeksproject

Cellu2PLA naar het omzetten van zeefgoedcellulose naar suikers en het bioplastic PLA, en het project CADoS naar de winning en directe toepassing van zeefgoed als ontwateringshulpmiddel.

### Markt voor afdruiptremmers

Een andere vraag is of toepassingen zoals een afdruiptremmer ook economisch haalbaar zijn, en niet alleen een leuke gadget van de waterschappen. Analyse van de markt laat zien dat de waterschappen de markt voor afdruiptremmers volledig kunnen bedienen. In Nederland, Duitsland en België wordt jaarlijks zo'n 7.750.000 ton asfalt verwerkt. Met een gemiddeld vezelgebruik van zo'n 3 kilo per ton asfalt, komt de totale markt voor afdruiptremmers op 23.250 ton per jaar. Die hoeveelheid kunnen de waterschappen ruimschoots halen. Per

## Verdienmodel

De kosten van een rwzi worden voor een groot deel bepaald door de benodigde beluchtings-energie om organische stof af te breken. De grote hoeveelheid biomassa (bacteriën en andere micro-organismen) die overblijft, circa 1 miljoen ton, wordt afgevoerd en verbrand. Hiermee gaan niet alleen waardevolle grondstoffen verloren, maar het is ook kostbaar. Het gaat hier om bedragen van 50 tot 100 miljoen euro per jaar. Wanneer cellulose via het zeefgoed verdwijnt, vermindert de hoeveelheid zuiveringsslib en daarmee ook de kosten. Op deze wijze kan een verdienmodel worden gerealiseerd.

jaar kan er maximaal 140.000 ton droge stof aan cellulose (uit wc-papier) teruggewonnen worden uit zuiveringsslib.

Een bijkomend voordeel is dat het vooral overheden zijn die als wegbeheerder en dijkbewakers asfalt gebruiken, zoals de waterschappen, provincies, Rijkswaterstaat of gemeenten. Zo was voor het Vazena-project de Provincie Fryslân de *launching customer* en heeft Wetterskip Fryslân in 2017 een stuk asfalt op een zeedijk op Ameland aangelegd. Ook voor vervolprojecten kunnen de waterschappen de eigen opdrachtgever worden en het teruggewonnen cellulose in eigen dijken, wegen en terreinen verwerken.

Voor de grond/weg/waterbouw-sector zal dat de vraag naar verduurzaming van producten en processen in de komende jaren toenemen, zowel door eigen initiatieven als door aangepaste wetgeving.

## Afvalwater- zuivering kan volledig circulair worden

## De energiefabriek

■ IR. JAN-EVERT VAN VELDHOVEN

**D**E WATERSCHAPPEN in Nederland beschouwen afvalwater niet langer alleen als een afvalproduct dat gezuiverd moet worden, maar ook als een bron van duurzame energie, grondstoffen en (schoon) water. Dit past geheel bij de op handen zijnde transitie naar een circulaire economie. Alle Nederlandse waterschappen, in totaal eenentwintig, werken hieraan binnen de netwerkorganisatie 'Energie- en Grondstoffen-fabriek'. Voor de ontwikkeling van de benodigde technologieën werken de waterschappen samen met vele universiteiten en kennisinstellingen.

### Hoe het begon

In 2008 daagde de overkoepelende Unie van Waterschappen de Nederlandse Waterschappen uit om 'fris en wild' mee te denken over vernieuwende initiatieven binnen het project WaterWegen. De Waterschappen hadden de ambitie om zich in tien jaar tijd te ontwikkelen tot een sterke netwerkorganisatie die in staat is om innovatief te anticiperen op de uitdagingen van morgen. De grote vraag was hoe de sector dit moest doen. Als winnend idee kwam het concept 'de Energiefabriek' naar voren. Met de Energiefabriek zouden de waterschappen in hun eigen energiebehoefte kunnen voorzien en wellicht ook energie gaan leveren.

Met de Energiefabriek wordt een rioolwaterzuiveringsinstallatie (rwzi) bedoeld die op basis van het binnenkomend rioolwater en eigen slibproductie evenveel energie opwekt als dat het zelf verbruikt om de installatie te laten draaien. Doordat de slibverwerking inmiddels gecentraliseerd is, gaat deze definitie niet meer op en komen vaak ook slibstromen van andere rwzi's uit het gebied naar een centrale rwzi. Deze produceert dan meer energie dan nodig is op de desbetreffende rwzi om energieneutraal te zijn.

De energiefabriek van Waterschap De Dommel in Tilburg. Deze bevat een Cambi-installatie voor voorbehandeling (5-10 bar, 100-200°C) van zuiverings-slib zodat het beter vergist, een reactor voor ammoniumverwijdering (Anammox) en een reactor voor terugwinning van fosfaat (struviet).



### Groene stroom

Rioolwaterzuiveringen ontvangen grote hoeveelheden energie in de vorm van organische stof in het afvalwater. Het grootste gedeelte van deze organische stof wordt afgebroken tot CO<sub>2</sub> door oxidatie met zuurstof. Het resterende deel gaat naar de aanwas van micro-organismen die het zuiveringsproces katalyseren. Door deze organische stof nu meteen aan het begin van het zuiveringsproces af te scheiden, kunnen micro-organismen dit direct omzetten in biogas. Het biogas kan vervolgens gebruikt worden voor de eigen elektriciteit- en warmtebehoefte op de rwzi, of het kan aan het elektriciteitsnet worden geleverd om auto's op te laden of huishoudens van stroom te voorzien: groene stroom van het eigen waterschap.

Technisch is een energieneutrale rwzi realiseerbaar. De grootste uitdaging was echter om de Ener-

giefabriek ook financieel aantrekkelijk te maken. Hiervoor is samenwerking met andere partijen in de omgeving gezocht. Dit waren vaak andere overheden, maar ook GFT-verwerkers en stortplaatsen die biogas opwekten, om samen het biogas op te waarderen tot aardgaskwaliteit.

In de Energiefabriek zitten vele bestaande en ook innovatieve technieken verborgen. Zo wordt om het slib goed te ontsluiten, ofwel de bacteriecellen open te breken, thermische drukhydrolyse toegepast. Hierdoor is er meer biomassa beschikbaar voor de gisting. Andere inzetbare technieken zijn preprecipitatie, hoogrendements-gisting en -opwekking van biogas met bijvoorbeeld brandstofcellen, indampen van slibstromen met restwarmte en superkritische slibvergassing.

Afhankelijk van de gekozen aaneenschakeling van deze verwerkingsprocessen zijn verschillende uitvoeringen van de Energiefabriek mogelijk. De

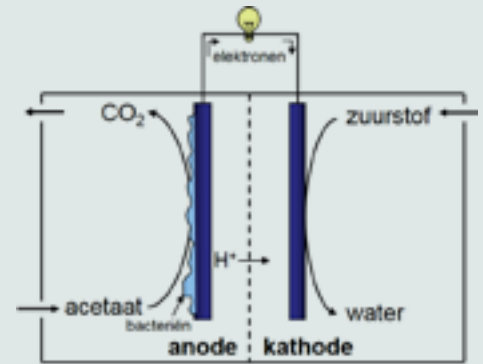
## Stroom uit afvalwater

■ DR. IR. ANNEMIEK TER HEIJNE

Bij de vergisting van organische stof en verontreinigingen in afvalwater wordt methaangas (biogas) geproduceerd. Dit methaangas kan gebruikt worden voor verschillende energie-toepassingen, zoals verwarming of transport. Meestal wordt biogas net als aardgas gewoon in een energiecentrale verbrand om elektriciteit op te wekken. Hierbij gaat veel energie verloren in de vorm van warmte. Dit kan een stuk efficiënter, dachten Wageningse milieuonderzoekers, door direct elektriciteit uit afvalwater te winnen met een microbiële brandstofcel. Een traditionele brandstofcel zet chemische energie direct om in elektrische energie, net zoals in een batterij gebeurt. Bij een microbiële brandstofcel hebben micro-organismen een cruciale rol en dienen als een soort katalysator voor het proces dat zich aan een van de elektroden afspeelt.

De bacteriën gebruiken het organisch materiaal in afvalwater als energiebron. Terwijl ze dit materiaal afbreken, komen er elektronen (e) en protonen (H<sup>+</sup>) vrij. Normaal zou de bacterie de elektronen aan zuurstof afgeven (aerobe ademhaling) om zo energie te produceren voor groei. Nu worden de elektronen voortijdig afgeapt door de elektrode waar de bacteriën tegen aan kleven. Om de elektronen af te geven aan de elektrode moeten de micro-organismen in direct contact staan met het oppervlak. Zij vormen een biofilm op het elektrode-oppervlak. Als deze elektronen via een draad van de ene elektrode (anode)

naar de andere elektrode (kathode) bewegen, ontstaat een elektrische stroom. Zo kun je dus direct een lamp laten branden op afvalwater zonder dat hiervoor chemicaliën en dure elektrodematerialen nodig zijn. Dit principe is een jaar of 15 geleden herontdekt, de eerste publicatie hierover is al meer dan 100 jaar oud, en het proces is nog volop in ontwikkeling. Onderzoekers van onder andere de Wageningen Universiteit en onderzoeksinstituut Wetsus zijn bezig het ontwerp van de microbiële brandstofcel te verbeteren om zoveel mogelijk elektriciteit uit afvalwater te winnen. Vooral de stap van kleine schaal (100 milliliter) naar grotere schaal zonder al te grote verliezen in efficiëntie, is een behoorlijke uitdaging. Het zal nog wel even duren voor we deze microbiële brandstofcellen in de praktijk zullen aantreffen. Het zal nooit een grootschalige energiefabriek worden, maar dit systeem zou wel een waterzuivering energieneutraal kunnen maken. Op dit moment is voor het zuiveren van afvalwater veel elektriciteit nodig voor de beluchting.



Schema van een microbiële brandstofcel. In de linkerhelft zetten bacteriën op de anode afvalstoffen uit het water, bijvoorbeeld acetaat, om in koolstofdioxide. Daarbij ontstaan elektronen die via een draad naar het andere compartiment stromen. Aan de kathode worden elektronen gebruikt om van zuurstof en de positieve waterstofatomen water te maken. De positieve waterstofatomen bewegen naar de rechterhelft om de negatieve lading van de elektronen te compenseren (ladingsneutraliteit).

Foto van de proefopstelling in het lab.



## Afgesproken

Om projecten als de Energiefabriek uit te kunnen voeren is bestuurlijk commitment nodig. Dit is gecreëerd door diverse bestuurlijke akkoorden en afspraken:

- Klimaatakkoord (april 2010)
- Lokale klimaat agenda (oktober 2011)
- Green Deal fosfaat (oktober 2011)
- Fosfaat ketenakkoord (oktober 2011)
- Energie akkoord MJA3 (juli 2008)
- Routekaart afvalwaterketen 2030 (2012)
- Samenwerking in de waterketen (Bestuursakkoord Water)
- Green deal – grondstoffen (november 2014)

combinatie van de gekozen technische mogelijkheden en de lokale situatie en bepalen uiteindelijk of het financieel haalbaar is. De waterschappen hebben ieder binnen hun eigen beheersgebied een rwzi-variant geselecteerd en doorgerekend. Hieruit bleek dat zowel technisch als financieel energieneutrale en ook energieleverende rwzi's haalbaar zijn.

### Naar energie- en grondstoffenfabriek

De tijd dat waterschappen alleen afvalwater zuiverden met oog op volksgezondheid is definitief voorbij. De focus ligt nu ook op het beschermen van het milieu, terugwinnen van energie en inmiddels het terugwinnen van grondstoffen. Hiermee zijn de waterschappen een belangrijke speler geworden in de transitie binnen de afvalwaterwereld. Zij kunnen een spil en aanjager zijn om veranderingen in gang te zetten. De Nederlandse waterschappen hebben met het Energie- en grondstoffenconcept een koplopperspositie, en dragen deze oplossing en technologieën internationaal uit. Het is niet de vraag of we circulair moeten gaan denken. Maar hoe we volledig circulair kunnen worden.

## Biopolymeren uit zuiveringslib

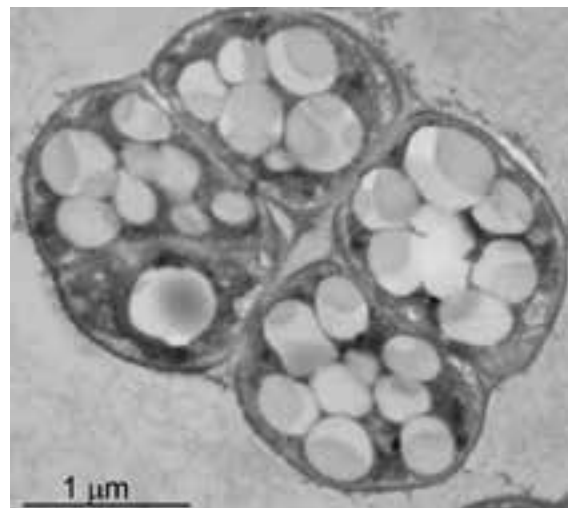
■ PROF. DR. IR. MARK VAN LOOSDRECHT

**A**FVALWATER BEVAT een grote hoeveelheid verschillende organische verbindingen. Die verbindingen zijn er individueel niet eenvoudig uit te halen. Bacteriën kunnen dat wel en zetten die gelijk om in andere nuttige verbindingen. Omdat afvalwater erg verdund is, is het belangrijk dat deze nieuwe verbindingen niet in water oplossen, zodat ze eenvoudig af te scheiden zijn als gas of als vaste stof. In het eerste geval kan methaan (biogas) gevormd worden. Vanuit duurzaamheidsoogpunt is terugwinning als materiaal echter beter. Het maken van biopolymeren is dan een interessante optie omdat polymeren vaak niet goed in water oplossen en makkelijk met een filter of centrifuge uit het water kunnen worden gehaald.

### Polymeren in de bacteriecel

Bacteriën maken twee varianten: de intracellulaire polymeren en de extracellulaire polymeren. Intracellulaire polymeren dienen voor bacteriën doorgaans als voedselopslag. Op elektronenmicro-

Een elektronenmicroscopie-opname van bacteriële cellen met een zeer grote hoeveelheid biopolymeer PHA (de witte bollen) opgeslagen in de cellen.





scopische foto's zijn ze zichtbaar als grote vetbol- len in de cellen. Voorbeelden van biopolymeren zijn glycogeen (soort zetmeel), olie (vergelijkbaar met palmolie) en polyhydroxyalkanoaat (PHA). De laatste is een interessante verbinding omdat het na opzuivering sterk lijkt op bekende plastics zoals polyetheen (PE) en polypropreen (PP). Het verschil is dat het niet uit aardolie is gemaakt en dat het plastic biologisch afbreekbaar is.

Wanneer bacteriën niet continu maar alleen af en toe voedsel (afvalwater) krijgen, ontwikkelen ze een handig overlevingsmechanisme. In voedsel-rijke tijden slaan ze de voedingsstoffen eerst snel in de cel op in de vorm van het biopolymeer PHA, zodat ze daarna de periodes zonder voedsel kun- nen overleven. Door voor industrieel afvalwater een proces te ontwerpen die deze situatie nabootst, worden de bacteriën die het beste PHA maken sterk bevoorreed. Tijdens onderzoek werd zo een nieuwe bacterie ontdekt die gespecialiseerd is in het opslaan van PHA. Deze bacterie kan sneller dan elke andere bacterie voedsel opnemen en in grote hoeveelheden in de cel opslaan. In een proces ontworpen op deze strategie kan het bacterieslib wel tot 90% PHA bevatten. Deze technologie wordt momenteel door de TU Delft en het Friese bedrijf Paques verder ontwikkeld en is reeds bij diverse bedrijven uitgetest.

Voor huishoudelijk afvalwater kan bovenstaande proceswijze niet gebruikt worden. Het bevat ten opzichte van industrieel afvalwater te weinig afval- stoffen. Echter, ook de bacteriën in een stedelijke afvalwaterzuivering worden periodiek gevoed, omdat we vooral overdag actief zijn (toiletgebruik, douchen, wassen etc.), waardoor er 's nachts niet veel afvalwater bij de waterzuivering aankomt. Hierdoor hebben nog steeds bacteriën die veel reservestoffen opslaan een voordeel. Alleen is de selectie minder sterk, omdat de afwisseling van voedselrijke en honger periodes minder drastisch is. In dit geval zal het bacterieslib dat wordt gepro-



duceerd, 40-60 % bioplastic kunnen bevatten. In de huishoudelijke afvalwaterzuivering wordt het afvalwater zeer vergaand gezuiverd zodat het op een rivier of sloot kan worden geloosd. De Neder- landse waterschappen hebben deze technologie om biopolymeren te produceren, het zogenaamde Phario-project, uitgetest bij de afvalwaterzuivering in Bath in Noord-Brabant.

### Polymeren aan de buitenkant

Bacteriën beschermen zich tegen een vijandige omgeving door zich te omhullen met een slijm- kapsel dat uit extracellulaire polymeren bestaat. Dit is een verzameling van veel verschillende en uiteenlopende verbindingen. Deze gelvormende polymeren kunnen alleen biologisch geproduceerd worden en zijn maar beperkt beschikbaar. Een voorbeeld van een gelvormende polymeer uit een geheel ander branche is gelatine, dat afkomstig is uit de botten van geslachte dieren.

Het slib uit een afvalwaterzuivering kan wel tot 30% van dit soort polymeer bevatten. Recent is gebleken dat het korreelslib van de nieuw ontwik- kelde Nereda-technologie een polymeer bevat dat qua eigenschappen sterk lijkt op alginaat, alhoewel

**Links een oesterschelp, rechts een materiaal met vergelijkbare eigenschappen, gemaakt uit toilet papier en biopolymeren.**

de chemische samenstelling niet gelijk is. Alginaat wordt nu nog geproduceerd uit zeewier dat in de natuur geoogst wordt. Met dit polymeer kunnen nieuwe en ook zeer sterke materialen worden gemaakt vooral als het gecombineerd wordt met bijvoorbeeld kleideeltjes of vezels, de zogenaamde composietmaterialen. Deze materialen kunnen in de toekomst chemische producten zoals vezelversterkte polyester gebaseerde materialen vervangen. Momenteel wordt de eerste proeffabriek voor de extractie van biopolymeren gebouwd in Zutphen. Daar werken de waterschappen, TU-Delft en de bedrijven RoyalHaskoningDHV en Chaincraft samen om te komen tot een waardeketen waarin afvalwater uiteindelijk wordt omgezet in een hoogwaardig product.

---

## Bacteriën zetten organisch materiaal om in bio- polymeren

## De eiwittenfabriek

■ IR. FRANK OESTERHOLT

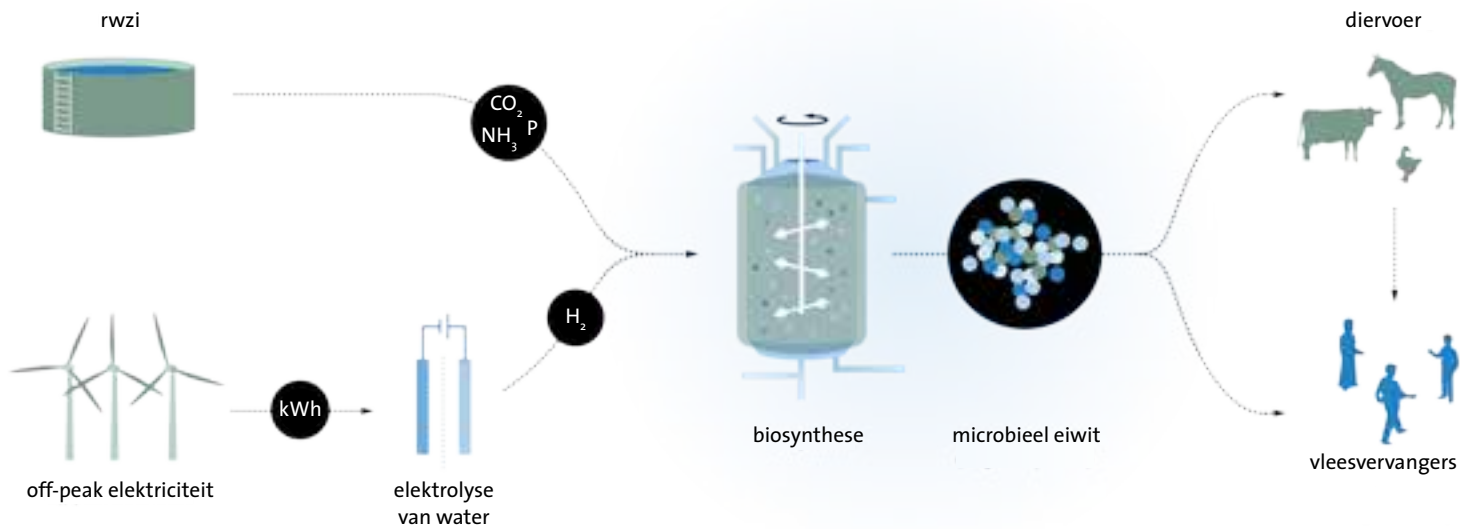
**I**N ONZE huidige tijd vormt de verwachte groei van de wereldbevolking een enorme uitdaging. Als we in 2050 alle negen tot tien miljard aardbewoners willen voeden met eiwitten voornamelijk uit vlees en vis, zoals wij in het Westen gewend zijn, dan moeten we op zoek naar nieuwe, meer efficiënte methoden voor het produceren van eiwitten.

Eiwit is een essentiële component voor al wat leeft. Ze bestaan uit een keten van aminozuren die zijn opgebouwd uit een aminogroep ( $-NH_2$ ) en een carbonzuurgroep ( $-COOH$ ). De stikstofbron voor de synthese van een eiwit is meestal ammonium. Deze verbinding staat steeds meer in de belangstelling als het gaat om terugwinnen van grondstoffen uit afvalwater met name in relatie tot eiwitproductie.

### Energieverspiller

Op dit moment halen we ammonium uit het afvalwater met allerlei biologische processen. Aerobe nitrificerende bacteriën zetten ammonium met zuurstof om in nitriet en nitraat en anaerobe denitrificerende bacteriën zetten dit weer om naar stikstofgas. Dat is op zich zonde als men beseft dat veel ammonium eerst op industriële wijze via het Haber-Boschproces wordt geproduceerd. In dat kapitaal slurpend proces wordt onder hoge druk en temperatuur met hulp van een katalysator uit stikstofgas en waterstofgas ammoniak geproduceerd. Dit ammoniak vormt de basis voor de kunstmestproductie en is dus cruciaal voor de voedselvoorziening. Een deel van het stikstof komt in ons voedsel terecht en via onze uitwerpselen bereikt het ammoniak uiteindelijk de rioolwaterzuivering.

Het industriële proces voor ammoniakproductie vereist veel energie, ongeveer 40 MJ per kg geproduceerd stikstof. Ongeveer 2% van het totale



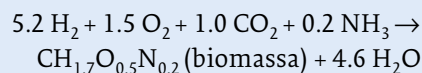
mondiale energieverbruik wordt voor deze omzetting gebruikt. Uiteindelijk komt slechts 16% van het geproduceerde ammonium in de eiwitten in ons voedsel terecht. De omzetting van ammonium naar stikstofgas op een rioolwaterzuivering kost per kg stikstof ongeveer evenveel energie als de industriële productie ervan. Dit was de aanleiding om te onderzoeken of het mogelijk is ammonium in afvalwater met specifieke bacteriën direct om te zetten naar eiwitten, de zogenaamde *single cell proteins*, afgekort SCP.

### Power-to-protein

Het idee om eiwit met bacteriën te produceren is niet nieuw. Gedwongen door economische blokkades werden in Duitsland zowel tijdens de Eerste als Tweede Wereldoorlog verwoede pogingen gedaan om lokaal eiwitten te produceren met gist (een schimmel) uit suikers en melasse. In de voormalige Sovjet-Unie werd tijdens de koude oorlog geprobeerd om restproducten van de olieraffinage te gebruiken als basis voor groei van bacteriën voor eiwitproductie. Het project moest eind jaren 80 van de vorige eeuw worden stopgezet om toxico-

logische redenen, er zaten alkenen in het eiwit en die zijn giftig. Beide voorbeelden geven aan hoe op zichzelf staande landen innovatieve wegen zochten om hun bevolking van voldoende eiwit te voorzien. Er zijn ook al voorbeelden van microbiële eiwitten op de markt, zoals het bekende Quorn.

Het concept *power-to-protein* gaat uit van het vastleggen van ammonium afkomstig uit de afvalwaterketen door specifieke bacteriën in de vorm van SCP. Hiermee wordt in feite de stikstofcyclus kortgesloten. Het concept is ontwikkeld aan de universiteit van Gent door emeritus hoogleraar microbiële ecologie en technologie Willy Verstraete. De specifieke bacteriën kunnen waterstofgas (H<sub>2</sub>), koolzuurgas (CO<sub>2</sub>), zuurstof en ammonium gebruiken om te groeien:



De gedachte hierachter is dat voor de productie van waterstof (en zuurstof) via elektrolyse, gebruik wordt gemaakt van groene elektriciteit die bij-

**Principe Power-to-Protein concept (Bron: KWR).**

voorbeeld door een waterschap zelf lokaal wordt opgewekt met wind of zon. Vandaar de naam 'power-to-protein'. Het concept past naadloos in een toekomstige waterstofeconomie waarin, na het uitbannen van fossiele brandstoffen, waterstof een belangrijke energiedrager wordt voor de opslag van wind- en zonne-energie.

### Ammoniumterugwinning

Ammonium terugwinnen uit afvalwater is een eerste belangrijke stap. Bestaande technologie gaat uit van conventioneel luchtstrippen bij hoge pH en temperatuur (tot 70 °C) of membraanstrippen onder vergelijkbare condities. In beide gevallen wordt het gestripte ammoniak vastgelegd als ammoniumsulfaat, dat bacteriën kunnen gebruiken om vast te leggen in eiwit. Deze technieken zijn alleen rendabel bij waterstromen met relatief hoge ammoniumconcentraties van ten minste 1.000 mg per liter. In de huidige afvalwaterzuiveringspraktijk is vooral de natte fractie van de slibvergisting (digestaat) een interessante bron om ammonium met deze technieken uit terug te winnen. Digestaat bevat significante hoeveelheden ammonium. De natte fractie van de slibvergisting in Hengelo bevat bijvoorbeeld 1.700 mg ammonium per liter; ter vergelijking huishoudelijk afvalwater bevat ongeveer 50 mg ammonium per liter. Berekeningen laten zien dat het digestaat van de slibvergisting van bijvoorbeeld een stad als Amsterdam via het power-to-proteinconcept de bewoners van Amsterdam voor 36% in de netto eiwitbehoefte kan voorzien.

### Pilotonderzoek

Aan de universiteit van Gent zijn in 2015 de eerste testen uitgevoerd op laboratoriumschaal in een reactor met een volume van 5 liter. De geoogste biomassa had een ruw eiwitgehalte van 71% wat hoog is ten opzichte van bijvoorbeeld vismeel (66%) en sojameel (45%). De kwaliteit van het eiwit,

die voornamelijk wordt bepaald door de aminozuursamenstelling, blijkt vergelijkbaar met die van viseiwit. Op laboratoriumschaal werd de waterstof benut met een efficiëntie van 81%.

Onderzoek aan het power-to-proteinconcept is in januari 2018 in het pilotstadium (TRL 4) aangekomen, een installatie met 400 liter inhoud is getest in Amsterdam en in Enschede. TRL staat voor *technology readiness level*, dat loopt van 0 (idee) tot 9 (volledig commerciële fabriek). Het pilotontwerp vormde een uitdaging omdat het systeem veilig moet zijn gezien het gelijktijdig gebruik van waterstof en zuurstof (explosiegevaar, knalgas). Waterstof mag niet ophopen in het systeem, waardoor de reactor aan de bovenkant open moet zijn. Aan de andere kant moet het waterstof als waardevolle energiedrager zo efficiënt mogelijk worden benut. Een goede overdracht van waterstof uit de gasfase naar de micro-organismen in de reactor is essentieel.

Er is nog veel onderzoek nodig gericht op optimalisatie en opschaling van het reactorontwerp en bijvoorbeeld de kwaliteit van het gevormde eiwit. Maar op basis van een eerste economische beschouwing lijkt het eiwit geproduceerd door micro-organismen een goed en duurzaam alternatief voor de biefstuk.

---

Power to  
proteïn:  
voor eiwit uit  
afvalwater

# Fosfaat, van verwijdering naar terugwinning

■ IR. LEON KORVING

**M**ENSEN, DIEREN en planten hebben allemaal het element fosfor nodig om te kunnen leven. Zo bestaat het skelet van mens en dier uit calciumfosfaat, bevat ons DNA fosfor en speelt adenosinetrifosfaat (ATP) een centrale rol in de energievoorziening van ons lichaam. In de natuur komt fosfor vooral in de geoxideerde vorm voor, dus als fosfaat. Fosfaat is daarom een essentieel onderdeel van kunstmest.

Helaas gaat onze samenleving inefficiënt om met fosfaat waardoor wereldwijd slechts 20% van alle gewonnen fosfaat in ons voedsel terecht komt. Via onze ontlasting komt het fosfaat uit ons voedsel weer in het riool terecht. De verliezen van fosfaat in de landbouw en de emissies via het rioolwater eindigen in het oppervlaktewater waar het leidt tot eutrofiering en algenbloei.

## Fosfaatverwijdering

De problemen met eutrofiering leidden in 1996 tot regelgeving die er voor zorgde dat de verwijdering van fosfaat en stikstof in rioolwaterzuiveringen toenam van 30-50% tot gemiddeld meer dan 80% in 2005. Om deze verbetering te bereiken investeerden de waterschappen in twee soorten maatregelen voor de verwijdering van fosfaat. Het meest eenvoudig is het toevoegen van ijzer- of aluminiumzouten die met het fosfaat reageren tot een onoplosbare neerslag. Fosfaat kan ook op een biologische manier worden verwijderd waarbij door afwisseling van anaerobe en aerobe omstandigheden de bacteriën worden gestimuleerd om fosfaat op te slaan. Veel zuiveringen combineren beide methoden.

Struvietaankoeking in een pijp bij een biogasreactor.



Struvietkristallen in verschillende vormen en maten. Links: struviet uit Amersfoort gemaakt met het Ostara-proces en rechts: struviet uit Amsterdam West gemaakt met het Airprex-proces.



In alle gevallen wordt het fosfaat met het zuiverings-slib afgevoerd. Omdat dit slib ook zware metalen bevat en er in de Nederland al een mestoverschot is, wordt dit slib niet meer gebruikt in de landbouw maar verbrand en komt het fosfaat in de as terecht. In Nederland verbranden twee slibverbranders samen iets meer dan de helft van alle zuiverings-slib. De as van deze verbranders wordt nu nog ingezet als vulstof voor de productie van asfalt of gebruikt voor het opvullen van oude zoutmijnen

## Biologische fosfaatopslag

■ PROF. DR. IR. MARK VAN LOOSDRECHT

Voor biologische fosfaatverwijdering uit afvalwater is een bacterie nodig die fosfaat kan opslaan als het polymeer polyfosfaat. Dit is een unieke eigenschap. Deze bacterie heeft net als vele andere organismen voedsel en zuurstof nodig om te groeien en zich te vermeerderen. De zuurstof is nodig voor de energievoorziening, net zoals de mens zuurstof nodig heeft voor omzetting van voedingsstoffen in energie.

Wanneer er echter geen zuurstof is, kan deze bacterie *Accumulibacter phosphatis* nog steeds voedingsstoffen uit het afvalwater opnemen en opslaan. Hiervoor heeft hij een andere, zelfaangelegde energiebron in de vorm van het polymeer polyfosfaat tot zijn beschikking, een soort accu in de cel. Door dit polymeer af te breken in fosfaatmoleculen, kan de bacterie energie genereren om voedingsstoffen in de cel op te slaan als vetbolletjes bestaande uit polyhydroxyalkanoaat (PHA). Wanneer het

organisme een tijd later weer zuurstof krijgt, gebruikt het de opgeslagen vetten om te groeien. Tijdens die groei rijgt hij fosfaatmoleculen weer aan een tot polyfosfaat voor zuurstofloze tijden. Doordat de bacterien ook groeien, wordt er meer fosfaat vastgelegd in de cellen dan in eerste instantie was verbruikt. Er vindt dus een netto fosfaatverwijdering plaats. Deze bacteriën kunnen we selectief in de afvalwaterzuivering ophopen door ze eerst zonder zuurstof met het afvalwater te mengen en daarna pas te beluchten. Wanneer het zuiverings-slib met daarin de fosfaatbacteriën uit de zuivering wordt gehaald, is daarmee gelijk het fosfaat verwijderd. In een aparte bak kunnen de bacteriën het fosfaat afgeven en is het fosfaat teruggewonnen voor hergebruik.

in Duitsland. Een ander deel van het slib wordt thermisch of biologisch gedroogd en dan meeverbrand in cementovens of kolencentrales. De slibas eindigt dan in cementproducten.

### Kritische grondstof

De beschikbaarheid van fosfaaterts was nooit een punt van zorg en de prijs lag stabiel op 40 dollar per ton fosfaaterts. Eind 2007 veranderde dit plots

en binnen enkele maanden vertienvoudigde de prijs van het erts. Door deze prijsexplosie ontstond het besef dat de ertsvoorraden niet oneindig zijn en onderzoekers suggereerden zelfs dat er al binnen 30 jaar onvoldoende voorraden zouden zijn. Inmiddels is duidelijk dat er voor meer dan honderd jaar erts beschikbaar is, maar blijven er voldoende redenen over om fosfaat terug te winnen. De fosfaatreserves zijn namelijk in handen van een beperkt aantal landen, waarvan alleen al 77% in Marokko. Europa heeft zelf beperkte ertsvoorraden en is voor haar voedselproductie afhankelijk van de import van fosfaat. Daarom heeft de Europese Unie fosfaaterts op een lijst van kritische grondstoffen geplaatst.

### Van verwijdering naar winning

De aandacht voor terugwinning van fosfaat uit rioolwater is hierdoor flink gegroeid. Er blijken dan ineens ook andere voordelen te zijn, zoals een lagere afvalproductie en minder onderhoud. Deze voordelen zijn een belangrijke drijfveer voor de winning van struviet uit rioolwaterzuiveringen waarop enkele waterschappen in Nederland zijn overgegaan.

Struviet (magnesiumammoniumfosfaat,  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) is een verbinding die vaak leidde tot verstoppingen van pijpen en pompen in een rioolwaterzuivering. Dit is te voorkomen door het struviet op een gecontroleerde manier te laten ontstaan, en de kristallen af te scheiden door bezinking. Bovendien bleek dit de ontwaterbaarheid van het slib te verbeteren waardoor minder slib hoeft te worden afgevoerd. Struvietwinning is echter alleen geschikt voor zuiveringen die het fosfaat biologisch verwijderen en het terugwinnendement is beperkt tot 10-40%.

### Fosfaat uit slibas

Een andere manier om fosfaat terug te winnen is via de as van de verbranding van het slib. Het



Het schilderij *Susanna in bad* (olieverf op paneel, 1636) van Rembrandt Harmensz. van Rijn is het vroegste 17de eeuwse schilderij waarop vivianiet is aangetroffen.

fosfaatgehalte in deze as is met 8-10% P vrij hoog, maar nog wel lager dan in fosfaaterts (13%). Bovendien bevat het ijzer- en aluminiumverbindingen die normaal niet in fosfaaterts zitten. Toch is het mogelijk om het fosfaat via een zuurbehandeling te winnen op een manier die lijkt op de winning uit fosfaaterts. In 2019 start het bedrijf Ecophos in Duinkerken met de winning van fosfaat uit de as van de twee Nederlandse slibverwerkers en dan

wordt bijna de helft van alle fosfaat uit het Nederlandse zuiverings-slib teruggewonnen.

Er is dus al veel mogelijk, maar nieuwe innovaties blijven gewenst. Onderzoek van Wetsus en TU Delft laat bijvoorbeeld zien dat als het slib genoeg ijzer bevat wel 80-90% van het fosfaat gebonden is in het mineraal vivianiet (ijzer(II)fosfaat,  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$ ). In vergelijking met struviet zijn dan hogere terugwinrendementen mogelijk. Hoewel vivianietdeeltjes veel kleiner zijn dan struviet, laat laboratorium onderzoek zien dat het vivianiet met magneten is af te scheiden. Vivianiet werd vroeger door schilders als Rembrandt, Vermeer en Hals gebruikt voor de productie van blauwe verf en dit biedt nieuwe inspiratie voor het benutten van fosfaat uit rioolwaterzuiveringen.

## Zwavel- en metaalterugwinning

■ PROF. DR. IR. ALBERT JANSSEN, IR. DRS. HENK DIJKMAN  
EN PROF. DR. IR. ALFONS STAMS

**Z**WAVEL EN zwavelverbindingen zijn talrijk op aarde en zelfs daarbuiten. Onze bodems bevatten grote hoeveelheden sulfide- en sulfaathoudende mineralen zoals pyriet ( $\text{FeS}_2$ ) en gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). In de atmosfeer komen zwavelhoudende gasen voor zoals zwaveldioxide ( $\text{SO}_2$ ) en zwavelwaterstof ( $\text{H}_2\text{S}$ ) die worden uitgestoten door vulkanen en oceanen of die vrijkomen bij verbranding van fossiele brandstoffen.

Vanaf het begin van de industriële revolutie veroorzaken zwavelverbindingen een aanzienlijk deel van de milieuproblematiek, met zure regen tot gevolg. Door toepassing van chemische ontzwavelingstechnologieën is sinds de jaren '80 de vorming van zure regen in Europa sterk vermindert. De laatste 15 jaar zien we een opmars van biologische methoden om gasvormig en opgelost  $\text{H}_2\text{S}$  en  $\text{SO}_2$  uit gas en waterstromen te verwijderen. In vergelijking tot conventionele chemische processen worden biologische processen bij lagere druk en temperatuur uitgevoerd, waardoor ze veiliger en goedkoper zijn.

### Zwavelcyclus als basis

De biologische zwavelcyclus vormt de basis voor een aantal industriële biotechnologische processen die zijn gericht op terugwinning en hergebruik van zware metalen en zwavel uit afvalwater en zure gasstromen. In de zwavelcyclus worden zwavelverbindingen voortdurend geoxideerd en gereduceerd door micro-organismen. Aan de oxidatieve kant zijn diverse soorten bacteriën werkzaam die waterstofsulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) oxideren tot elementair zwavel (S) of zwavelzuur ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en daar energie uithalen om te groeien. Van nature zijn deze bacte-

riën geneigd om  $\text{H}_2\text{S}$  volledig te oxideren tot  $\text{H}_2\text{SO}_4$  omdat dit de meeste energie oplevert. Echter, wanneer de omgeving te weinig zuurstof bevat, is het mogelijk om sulfide onvolledig te oxideren tot elementair zwavel. Van dit principe wordt gebruik gemaakt bij de biologische ontzwaveling van zure gasen zoals biogas en hoge druk aardgas. Dergelijke zuiveringssystemen werken bij zeer lage zuurstofspanningen. Hiervoor zijn speciale meet- en regelstrategieën ontwikkeld, gebaseerd op de redoxpotentiaal van de bioreactorsuspensie, om zo de sulfide-oxiderende bacteriën te dwingen om elementair zwavel te maken.

Aan de reductieve kant van de biologische zwavelcyclus gebeurt onder anaerobe omstandigheden het omgekeerde; sulfaat wordt omgezet tot sulfide door sulfaatreducerende bacteriën. Daarvoor hebben zij een verbinding nodig die elektronen levert voor hun metabole processen. Deze stof kan zowel anorganisch (waterstofgas,  $\text{H}_2$ ) als organisch zijn, zoals vetzuren, methanol, ethanol, lactaat en glucose.

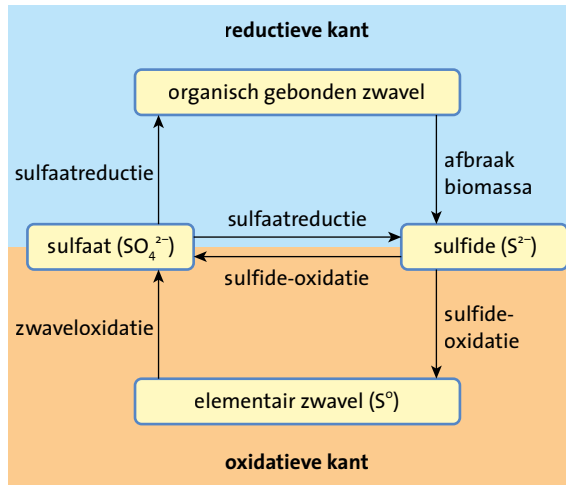
### Ontzwavelen

Tijdens de anaerobe behandeling van sulfaat-houdend afvalwater, bijvoorbeeld afkomstig uit de papierindustrie, wordt altijd waterstofsulfide gevormd. Dit stinkt niet alleen naar rotte eieren, het is ook nog eens giftig en corrosief.

Omdat sulfidevorming in anaerobe waterzuiveringen onvermijdelijk is, zijn onderzoekers aan Wageningen Universiteit op zoek gegaan naar nuttige toepassingen van dit fenomeen. Het is dankzij de visie en inspanningen van pionier en hoogleraar Gatze Lettinga in samenwerking met het bedrijf Paques in Balk, dat in de jaren '80 van de vorige eeuw een aantal ontwikkelingen in gang zijn gezet die hebben geleid tot commerciële toepassingen van de zwavelcyclus. Zo ontdekten zij dat tijdens de anaerobe zuivering van sulfaat-houdend afvalwater zich een witte drijfslag in



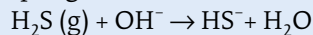
De biologische zwavelcyclus vormt de basis voor een aantal industriële biotechnologische processen die zijn gericht op terugwinning en hergebruik van zware metalen en zwavel uit afvalwater en zure gasstromen.



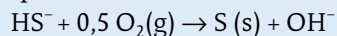
## Biologische processen halen zware metalen uit afvalwater

buffertanks vormde. Dit bleek elementair zwavel te zijn dat was gevormd tijdens de spontane microbiologische oxidatie van sulfide in aanwezigheid van zuurstof uit de lucht. Deze ontdekking heeft uiteindelijk geresulteerd in een innovatief biologisch proces om zwavel uit biogas of aardgas te halen en terug te winnen. Dit zogenoemde Thiopaq proces bestaat uit twee stappen. In de eerste stap wordt aardgas of biogas dat H<sub>2</sub>S bevat 'gewassen' met licht alkalische waswater (pH -8.5). Het aanwezige H<sub>2</sub>S lost hierin op als HS<sup>-</sup>. In de tweede stap zuiveren sulfide-oxiderende bacteriën het vuile waswater in de bioreactor.

Stap 1, gas wassen:



Stap 2, zwavel winnen:



Momenteel zijn wereldwijd meer dan 350 van dergelijke installaties gebouwd in Europa, Amerika, Afrika, China en Korea. Het gevormde biologische zwavel heeft bijzondere eigenschappen; het is namelijk hydrofiel van aard terwijl

chemisch gevormd zwavel een hydrofoob karakter heeft. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat het bio-zwavel bedekt is met een laagje organisch materiaal afkomstig van de bacteriën. Vanwege het hydrofiel karakter is deze zwavelvorm geschikt als fungicide in de fruitteelt of als meststof in de landbouw.

### Zware metalen verwijderen

Een tweede innovatieve toepassing van de biologische zwavelcyclus betreft de verwijdering van zware metalen zoals zink, cadmium, lood en nikkel uit verontreinigde waterstromen. De basis van deze technologie is de reductie van sulfaat of zwavel tot sulfide. Het gevormde sulfide reageert met opgeloste zware metalen tot slecht oplosbare metaalsulfides. Na afscheiding van de waterstroom kunnen de metaalsulfides worden opgewerkt tot grondstof. Dit biotechnologische proces biedt aanzienlijke voordelen in vergelijking tot de klassiek toegepaste fysische-chemische verwijdering van zware metalen als metaalhydroxiden. Omdat kopersulfide, zinksulfide en ijzersulfide niet allemaal in dezelfde mate oplossen, kunnen ze selectief van elkaar worden gescheiden.

Dit proces is in werking bij de zinkfabriek van Nyrstar in het Brabantse Budel-Dorplein. Het zinkproductieproces levert twee afvalstromen die behandeld moeten worden: een verdunde zwavelzuurstroom en een elektrolyse-spuistroom. Van oudsher behandelde de zinkproducent de zure stromen met kalk(calciumoxide) om het zuur te neutraliseren en de metalen te laten neerslaan. Dit leidde tot een grote hoeveelheid verontreinigd gips dat op de productielocatie werd opgeslagen. Vanaf begin deze eeuw is gezocht naar alternatieven om verdere opslag te voorkomen. Dit werd het zogenoemde SULFATEQ<sup>TM</sup> proces. Het zuur wordt nu met gegloeid erts (zinkoxide), één van de grondstoffen voor zinkproductie, geneutraliseerd en micro-organismen zetten het opgeloste zinksul-

Luchtfoto van het productieproces waarbij biologische  $H_2S$ -productie wordt gebruikt om koper terug te winnen bij de Pueblo Viejo goudmijn op de Dominicaanse Republiek.



faat om in zinksulfide en elementaire zwavel die vervolgens weer naar de fabriek toegaan. Nyrstar is daarmee de eerste zinkfabriek ter wereld zonder vast afval!

### Koperterugwinning

Een ander voorbeeld van volledige integratie in een productieproces is de toepassing van biologische  $H_2S$ -productie voor koperterugwinning bij de Pueblo Viejo goudmijn op de Dominicaanse Republiek. Vanaf 2012 is een volledig nieuwe goudproductieproces in bedrijf genomen, dat elk uur 1.000 ton gemalen erts behandelt. Hierin zitten slecht enkele grammen goud per ton erts. Om deze vrij te maken wordt het gemalen erts in een autoclaaf geoxideerd, waarbij zwavelzuur en grote hoeveelheden andere metalen zoals ijzer, koper en zink vrijkomen. Ook hier werd kalkbehandeling toegepast om sulfaat als gips en metalen als hydroxides neer te slaan. Dit gips sloeg men op in afvalvijvers, met alle milieurisico's van dien. Nu wint men het

koper (12.000 ton per jaar) eerst selectief terug door het neer te slaan met  $H_2S$ . Daarna doseert men kalk om de andere metalen te verwijderen. Het geproduceerde  $CuS$  (Covelliet) bevat 60% koper en kan als zeer geconcentreerde erts aan kopersmelters worden afgezet. Het  $H_2S$  is afkomstig van een bioreactor die gebruik maakt van de biologische reductie van elementair zwavel door zwavelreducerende bacteriën en archaea. Een groot voordeel van sulfidewinning uit zwavel ( $S^0$ ) in plaats van sulfaat ( $SO_4^{2-}$ ) is dat vier maal minder organische stof nodig is voor de omzetting naar sulfide ( $S^{2-}$ ) omdat deze reactie maar twee elektronen vraagt in plaats van acht.

Lopend onderzoek richt zich op de ontwikkeling van het zwavelreductieproces bij lagere pH (2-4) en bij hogere temperaturen (50-80°C), waardoor in de toekomst mogelijk zwavelreductie en metaalprecipitatie in dezelfde tank kan plaatsvinden en een aparte reactor en  $H_2S$ -gasrecirculatie niet meer nodig zal zijn.

## Aquafarm: zuiveren en oogsten

■ PROF. DR. IR. PIET VERDONSCHOT

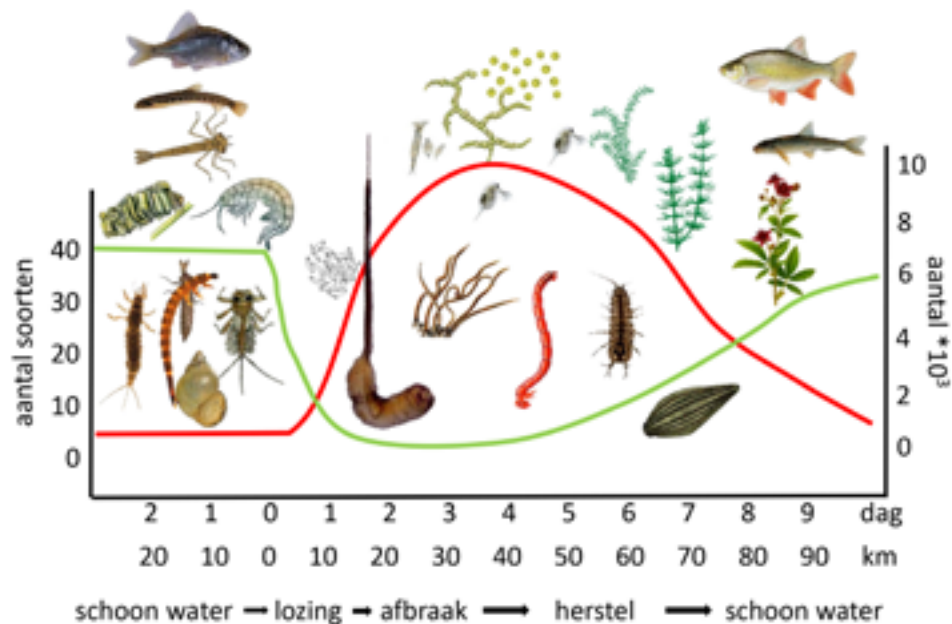
**I**N DE jaren 70 van de vorige eeuw werden steeds meer mensen zich bewust van het groeiend milieuprobleem. Met de groei van de bevolking en de toename van de welvaart nam de productie en consumptie per inwoner sterk toe. Dat gold ook voor de hoeveelheid afval. Een deel daarvan verdween via de riolering naar de afvalwaterzuivering en het oppervlaktewater.

De milieubeweging kwam toen met nieuwe ideeën voor ecologische en integrale oplossingen en gesloten kringlopen. Dit werd omarmd door het beleid en het beheer. Toch is het tot de dag van vandaag nog steeds niet gelukt om dit denken om te zetten in daden. Sinds kort wordt opnieuw gesproken over afval als grondstof, over gesloten kringlopen en over het terugwinnen van stoffen na gebruik in plaats van ze te lozen.

### Ieder zijn eigen plek

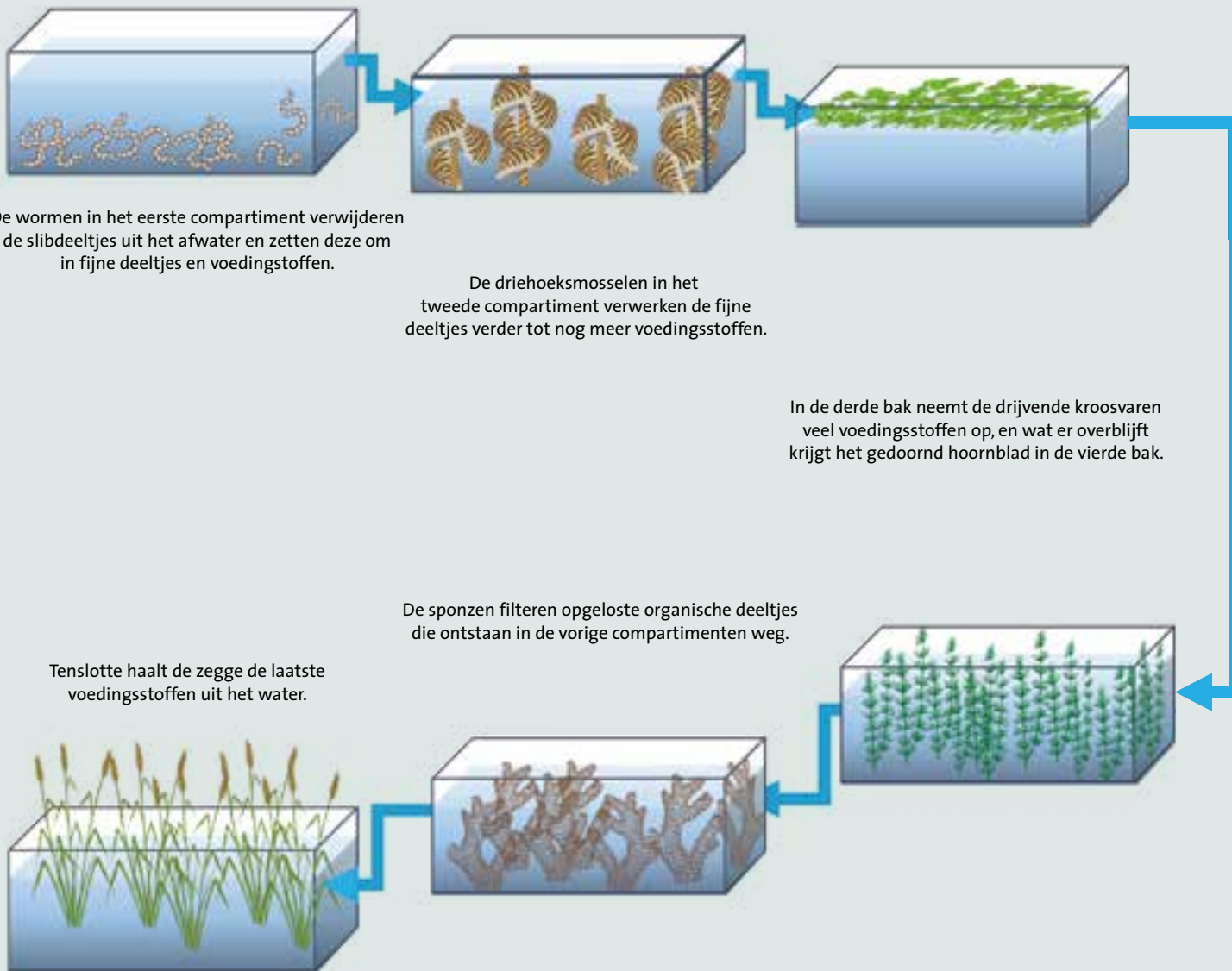
Aan het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw brachten twee Duitse onderzoekers, Richard Kolkwitz en Maximilian Marsson, een idee naar voren om op basis van de planten en dieren in het water een oordeel te geven over de kwaliteit. Zij hadden namelijk ontdekt dat wanneer een stad haar afvalwater ongezuiverd op een rivier loosde bijna al het leven in de rivier verdween. Ze ontdekten ook dat hoe verder je stroomafwaarts van het lozingspunt keek er steeds meer leven teruggekomen was. Ze zagen zelfs dat ver benedenstrooms de afvalwaterlozing het leven weer leek op dat van een schone rivier. Blijkbaar waren andere bacteriën, planten en dieren in een rivier in staat het afval af te breken en het water steeds schoner te maken; het zogenoemde zelfreinigend vermogen van een rivier. Die waarnemingen maakten ook duidelijk dat niet alle dieren en planten overal kunnen leven. Sommige planten en dieren gedijen goed in afvalwater terwijl andere pas in schoon water weer verschijnen.

Zelfreiniging van een rivier na lozing van afvalwater.  
Groene lijn: aantal soorten organismen in de rivier. Rode lijn: aantal individuen van één soort.



## De Aquafarm

Een cascade van aquaria met wormen, kroosvarens en andere organismen zuiveren het afvalwater en groeien daardoor hard. Alle verschillende soorten worden regelmatig geoogst om omgezet te worden in waardevolle bouwstoffen.



## In de circulaire stad van de toekomst is afvalwater een grondstof

Zo leeft iedere plant of dier in het milieu waar ze het beste past.

Dat planten en dieren zich kunnen aanpassen aan bepaalde milieuomstandigheden, daarvan maakt de mens slim gebruik. Zo cultiveren we landbouwgewassen net zolang totdat ze op onze akkers kunnen groeien en voedsel voor mens en dier produceren. We halen niet alleen voedsel uit veel gewassen maar ook bouwstoffen zoals eiwitten, vetten en vezels waar we weer allerlei andere producten van maken tot aan T-shirts toe. Zo haalt Chanel een geurstof uit de blauwe lissen voor een heel duur parfum.

### Zoetwaterboerderij

Slimmer omgaan met afvalwater is een grote uitdaging. Door ecologische kennis, de integrale benadering van onze waterketen en ervaringen uit de landbouw te combineren, werd een grote stap gezet. Organismen kunnen afvalwater zuiveren en kunnen tegelijkertijd waardevolle stoffen produceren. Daarmee was het idee van de zoetwaterboerderij geboren. De eerste zoetwaterboerderij bestond alleen op papier en leek meer op een veredelde kas vol hydroculturen; het kweken van planten en dieren in water. Uit het vervolg ontstond Aquafarm.

Aquafarm is een cascade van zuiveringsstappen. Rioolwater gaat eerst door de rioolwaterzuivering waar allerlei micro-organismen het afval omzetten in kleinere deeltjes en opgeloste stoffen. Voor de laatste stap in de afvalwaterzuivering wordt afvalwater afgetapt en in de aquafarm gepompt. Aquafarm bestaat uit een aaneenschakeling van grote aquaria. In het eerste aquarium gaan wormen aan de slag om het fijne slib op te eten. Dit zijn ook de wormen die de Duitse onderzoekers destijds het eerste zagen terugkeren in hun vervuilde rivier.

De afbraakproducten van de wormen en de opgeloste stoffen stromen door naar het tweede aquarium. In dit aquarium drijven allemaal kleine plantjes van de kroosvaren. Planten nemen heel

gemakkelijk opgeloste stoffen op en groeien dan als kool. In de volgende aquaria gaan weer andere planten (bijvoorbeeld waterpest en lissen) en dieren (bijvoorbeeld mosselen en vissen) het afvalwater steeds verder bewerken tot aan het einde van de keten schoon water overblijft.

In een aquafarm groeit in elk aquarium één soort organisme onder ideale omstandigheden. Zijn de omstandigheden niet optimaal dan wordt bijvoorbeeld extra licht of warmte gegeven om de organismen te vertroetelen. Daarom kunnen ze na enkele weken worden geoogst, net zoals boeren hun gewassen oogsten. Alleen in aquafarm blijven er een paar organismen achter die weer opnieuw hard kunnen gaan groeien en vermenigvuldigen.

De oogst gaat naar speciale verwerkingsfabrieken om allerlei producten uit de geoogste dieren en planten te winnen. Deze stoffen vormen de basis voor bijvoorbeeld tandpasta, lijm, parfum en nog veel meer. De zuiverende organismen zijn tegelijkertijd bron van hoogwaardige producten, zoals eiwitten, cellulose en voedsel.

Hoe mooi is het als het afvalwater in de toekomst per straat of wijk wordt gezuiverd. De stad van de toekomst wordt zo een circulaire stad, rijk aan schoon, duurzaam gezuiverd water. Maar ook met minder afvalslib, minder energieverbruik en een kleinere CO<sub>2</sub>-voetafdruk. En de opbrengst van de planten en dieren gaat weer terug naar de bewoners.

# Nieuwe sanitatie

■ PROF. DR. IR. GRIETJE ZEEMAN

**I**N NEDERLAND zijn sinds 2010 vier praktisch 'nieuwe sanitatie'-concepten in gebruik genomen. Hierbij wordt zwart water (urine en fecaliën) gescheiden van grijs water (rest van huishoudelijk afvalwater) behandeld. Eén praktijkinstallatie staat in een nieuwbouwwijk van 250 huizen in Sneek en drie staan in een kantooromgeving, namelijk bij het NIOO in Wageningen, bij het Ministerie van infrastructuur en milieu in Den Haag en in de Villa Flora in Venlo. Op meerdere plaatsen zijn nieuwe, soortgelijke projecten in ont-

wikkeling voor locaties van 450-500 huizen, onder andere in Amsterdam, Helsingborg (Zweden), Gent (België) en Edmonton (Canada).

## Scheiden van stromen

Nieuwe sanitatie staat voor het terugwinnen en hergebruiken van grondstoffen uit huishoudelijk afval en afvalwater op basis van concentratie en karakteristieken van de betreffende stromen. De behandeling en terugwinning vindt plaats op wijk- of kantoorniveau.

**Nieuw sanitatieconcept van het Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO-KNAW): poep is goud.**

### Vacuümtoilet

Door het gebruik van een vacuümtoilet wordt er maar één liter water per spoelbeurt gebruikt. Dat bespaart water en geconcentreerder rioolwater maakt het zuiveren makkelijker.

### Grondwater

in plaats van drinkwater.

### Vacuümpomp

### Vergistingstank

Zuurstofloze afbraak door bacteriën, die tegen hoge temperaturen kunnen, levert biogas en doodt ziektekiemen.

Zwart water bestaat uit: urine, poep, spoelwater en toiletpapier

De temperatuur wordt op 35°C gehouden.



Eventuele extra energie wordt geleverd door zonnepanelen

energiewinning

### Biogas

wordt geproduceerd door bacteriën. Het wordt verbrand om de tank te verwarmen.



grondwater

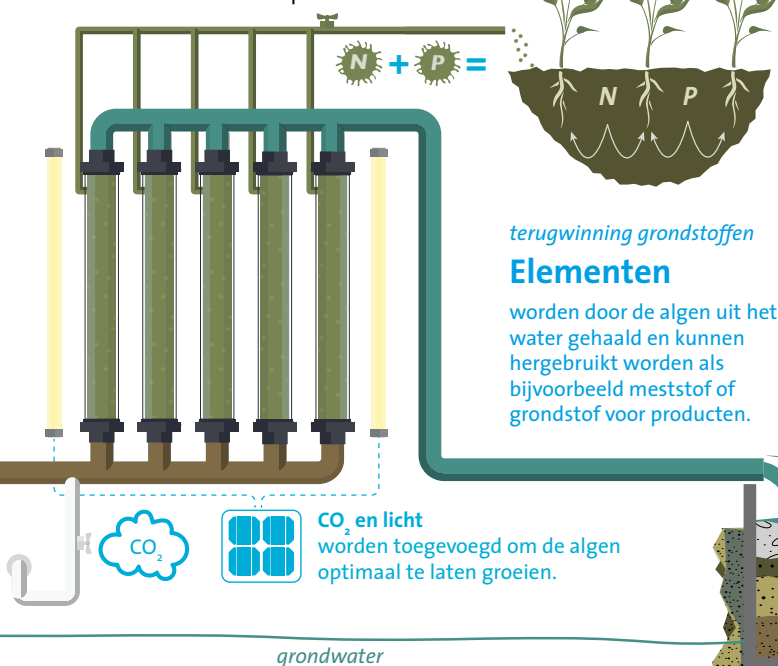
Om de voordelen van een dergelijke scheiding te kunnen begrijpen, moeten we terug naar de basis, naar de grondstoffenketen. Stikstof, fosfaat, kalium en sporenelementen worden gebruikt in de landbouw bij de productie van ons voedsel. Deze nutriënten worden na voedselconsumptie door de mens uitgescheiden via feces en urine. Feces en urine zijn geconcentreerde nutriëntenstromen, die van oudsher werden gebruikt als meststof in de landbouw. Door de opkomst van de kunstmest en toenemende verdunning door het gebruik van

spoeltoiletten en watergedragen riolering, in het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw, verdween het gebruik van feces en urine in de landbouw.

Met name in landen met lange winters en relatief lage temperaturen, zoals Nederland, is het gebruik van verdunde nutriënten stromen in de landbouw niet mogelijk omdat grote opslag volumes nodig zijn om de periode zonder gewasgroei te overbruggen. Bovendien is het terugwinnen van deze nutriënten uit verdunde stromen energetisch niet efficiënt. Onze huidige afvalwaterzuiverings-

#### Bioreactor met algen

Algen halen voedingsstoffen uit het verwerkte zwarte water en slaan deze op in hun cellen.

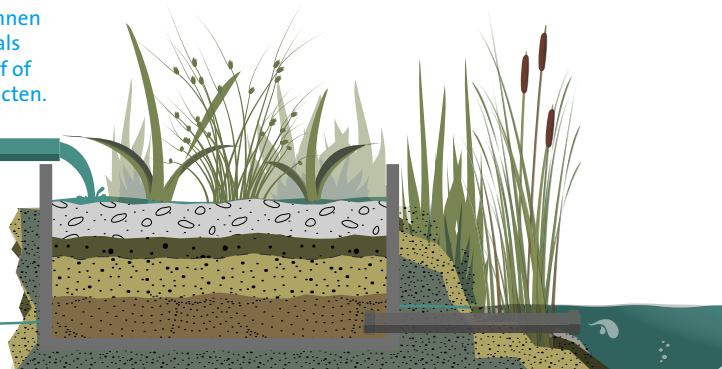


#### Helofytenfilter & vijver

Moeras met riet en zandlagen met verschillende korrelgroottes. Dit filter zorgt voor de laatste reiniging.

Het water gaat een vijver in waar het door de bodem langzaam het grondwater in kan zakken.

Het water is weer schoon.



installaties zijn ontworpen voor verwijdering en niet voor terugwinning van nutriënten.

### Herstel nutriëntenkringloop

Nieuwe sanitatie is gericht op het herstellen van de nutriëntenkringloop tussen landbouw en sanitatie. Daarnaast kan door toepassing van anaerobe zuivering, biogas worden geproduceerd uit zwart water en keukenafval, organische meststof worden geproduceerd uit het anaerobe slib en kan het grijze water worden opgewerkt tot een kwaliteit die het mogelijk maakt om bijvoorbeeld bodeminfiltratie toe te passen. Grijs water kan bovendien worden ingezet voor terugwinning van de warmte.

Binnen nieuwe sanitatie wordt de gehele keten in beschouwing genomen; de inzameling (toilet), het transport, de behandeling en terugwinning en het hergebruik in de landbouw. Het toilet en daaropvolgende transport bepalen de concentratie van de stoffen in het zwarte water en daarmee de mogelijkheid om nutriënten op een energie-efficiënte wijze terug te winnen. Binnen de hierboven genoemde vier nieuwe sanitatie-projecten is gekozen voor vacuümtoiletten als transport medium. Vacuümtoiletten gebruiken maximaal 1 liter water per spoelbeurt, terwijl conventionele spoeltoiletten 6-8 liter gebruiken.

De huidige nieuwe sanitatie-toepassingen bevatten een anaerobe zuiveringsinstallatie (UASB = Upflow Anaerobic Sludge Bed) voor behandeling van zwart water en eventueel keukenafval, gevolgd door een struviet-precipitatiereactor voor terugwinning van fosfaat. Stikstof wordt vooralsnog verwijderd in een Anammoxreactor, omdat de concentraties niet hoog genoeg zijn voor een energie-efficiënte terugwinning, met huidige technieken.

### Nieuwe ontwikkelingen

Binnen het op dit moment lopende EU project Run4life worden verbeterde vacuümtoiletten ontwikkeld met maximaal twee in plaats van zes

liter watergebruik per persoon per dag. De geproduceerde hoge concentratie zwart water maakt het mogelijk de anaerobe zuivering uit te voeren bij een hogere temperatuur.

Bij de sectie Milieutechnologie van de Wageningen Universiteit & Research wordt, in samenwerking met het bedrijf DESAH BV, onderzoek gedaan naar thermofiele anaerobe zuivering (70°C), teneinde desinfectie en anaerobe zuivering te combineren. Daarnaast wordt in een samenwerking van het onderzoeksinstituut Wetsus en de sectie Milieutechnologie gewerkt aan een technologie om calciumfosfaatkorrels in de UASB te produceren. Dit betekent één reactor minder en een product dat vergelijkbaar is met op dit moment gebruikt fosfaat.

Combinatie van beide technologieën zou het mogelijk maken in één reactor drie gedesinfecteerde producten te maken: een vloeibaar effluent met hoge concentraties stikstof en kalium, organische meststof en calciumfosfaatkorrels. Deze producten kunnen direct in de landbouw worden toegepast. Verwijdering van micro-verontreinigingen is tevens onderwerp van onderzoek.

### Volgende stap

Nieuwe sanitatie heeft zich technisch bewezen op kantoorniveau en een schaal van 250 huizen. Op basis van de monitoringresultaten van het 250-huizenproject in Sneek, is berekend dat nieuwe sanitatie op een schaal van 1000-1500 mensen gelijke kosten kent als conventionele sanitatie, uitgaande van een nieuwbouwwijksituatie. Het onderzoek heeft ook laten zien dat de bewoners tevreden zijn en dat de installatie, die midden in de wijk staat, geen overlast veroorzaakt. Nieuwe sanitatie is klaar voor een bredere toepassing. De tweedegeneratie-concepten zijn in ontwikkeling en zullen leiden tot een volledige sluiting van de nutriëntenkringloop tussen sanitatie en landbouw.



# Epiloog: Luxe poepemmers of raffinagetechnologie

■ PROF. DR. IR. CEES BUISMAN

**W**ANNEER WE aan de waterzuivering van de toekomst denken dan zou onze ultieme wens zijn dat een mooi klein en compact apparaat alle componenten die niet in water thuishoren, eruit haalt als herbruikbare energie en grondstoffen. We accepteren daarbij dat lastig te recyclen stoffen, zoals pesticiden en andere ongewenste chemicaliën die er in hele kleine hoeveelheden inzitten, vernietigd worden. Dan blijft uiteindelijk schoon water over dat veilig teruggegeven kan worden aan de natuur of hergebruikt kan worden als proceswater in de industrie of irrigatiewater in de landbouw.

Het uitgangspunt is dat alle eindige grondstoffen hierbij in een oneindige kringloop komen. Voor koperen buizen en accu's van lood werkt deze kringloop al behoorlijk goed. Maar juist met verdunde afvalwaterstromen gaan nog veel eindige grondstoffen zoals zink verloren. Zinkfabrieken zouden hun afvalwaterstromen eigenlijk zo moeten behandelen dat alle zink weer terug de fabriek in komt, zoals bij zinkfabriek Nyrstar in Budel in de praktijk gebracht is. Dat geldt dan voor alle industrieën die eindige stoffen als zink, koper, lood en fosfaat gebruiken en lozen.

## Voedsel-poepkringloop

Voor onze voedselkringloop ligt het ingewikkelder. De schaarse grondstoffen uit voedsel komen uiteindelijk via ons toilet, sterk verdund, in het rioolwater. Hierdoor is het rioolwater eigenlijk onderdeel van de landbouwketen en zou het in deze toekomstdroom voor de hand liggen dat

de grondstoffen uit het rioolwater weer naar de landbouw gaan, om zo een oneindige keten, die onze voedselproductie veilig moet stellen, in stand te houden.

Daarmee komen we uit bij een praktijk uit het verleden, toen menselijke uitwerpselen nog werden ingezet bij de landbouw. Deze uitwerpselen werden opgehaald in tonnetjes en rechtstreeks zonder riolen teruggebracht naar de landbouw. In verband met hygiëne en ook luxe hebben we nu toiletten met riolen waardoor vandaag de dag deze keten verbroken is. Onze uitwerpselen eindigen in het rioolslib, dat verbrand wordt en zo verloren gaat voor de landbouw.

## Essentiële componenten

Voor plantengroei zijn meer dan dertig componenten nodig. Verschillende elementen daarvan raken schaars in de nabije toekomst, zoals zink (dat opraakt over 20 jaar), fosfaat (op in 300 jaar), koper (op in 50 jaar) en selenium (schaars in de EU). Zonder deze componenten is er geen landbouw mogelijk. Op dit moment lekken de componenten in onze uitwerpselen via het rioolwater weg uit deze keten en ontstaat er een ernstige situatie voor de toekomstige landbouw.

Ook zwavel is een belangrijke grondstof voor de landbouw. Op dit moment komt bijna alle zwavel vrij bij de winning van fossiele brandstoffen. Als we daar volgens het klimaatakkoord van Parijs veel minder van gaan gebruiken, zal ook het zwavel in rioolwater terug moeten naar de landbouw. Het ziet er naar uit dat het verbranden van rioolslib en storten van het as een luxe is die we ons bin-

nenkort niet meer kunnen veroorloven. De keten van landbouw naar voedsel naar rioolwater naar landbouw moet weer hersteld worden om in de toekomst in staat te zijn voldoende voedsel te produceren.

Met onze huidige rioolwatertechnologie is de winning van deze grondstoffen nog niet goed mogelijk. Ten eerste is rioolwater zeer complex en zitten verbindingen zoals zink, koper en selenium in de organische deeltjes in het water en slib, verstoep. Ten tweede zijn er overal in rioolwater gevaarlijke bacteriën, pesticiden en medicijnresten aanwezig, die een gevaar vormen voor veilig hergebruik.

### **Raffinage of scheiding aan de bron**

De toekomst kan volgens mij twee kanten uitgaan om de kringloopketen te herstellen. Ten eerste kunnen we zeer geavanceerde raffinagetechnologieën ontwikkelen, die alle belangrijke componenten uit het afvalwater kunnen halen. We kunnen nu bijvoorbeeld al een deel van het fosfaat apart terugwinnen rechtstreeks uit het water. Dit moeten we dan ook voor de andere essentiële componenten gaan ontwikkelen. Dat zal enorm ingewikkeld worden gezien de complexe aard van het rioolwater. We kunnen ook denken aan het terugwinnen van nutriënten uit het as van de rioolslibverbranding.

Een andere aanpak is het scheiden van rioolwater in de woning. Hierbij houden we de menselijke uitwerpselen apart van de rest van het water. In Sneek zijn hier al testen mee gedaan. Wanneer de menselijke uitwerpselen apart opgevangen

worden in vacuümtoiletten, die maar heel weinig water gebruiken, krijgen we een geconcentreerde stroom die gemakkelijk te stabiliseren is en vrijwel alle essentiële componenten voor de landbouwketen blijkt te bevatten. Door deze stroom weer naar de landbouw te brengen, hebben we het tonnetjes-systeem in feite hersteld, maar nu in luxe vorm. Het complexe van deze aanpak is dat alle riolen aangepast moeten worden en aangevuld met een logistieke structuur voor bezorging van dit product in de landbouw.

Het lijkt erop dat we om de keten met de landbouw te herstellen in de toekomst moeten kiezen of we ons huidige rioolsysteem, met gemengd afvalwater en een zeer complexe raffinagetechnologie van dit gemengde rioolwater, willen behouden. Of gaan we kiezen voor een eenvoudige technologie voor het verwerken van afgescheiden toiletafvalwater, maar met een complexe logistiek van het afleveren van dit product en de scheiding op huisniveau van het gemengde riool?

# bio

Wetenschap+  
Maatschappij

[www.biomaatschappij.nl](http://www.biomaatschappij.nl)

50% korting op  
de normale  
verkoopprijs



4X BWM-cahiers  
voor maar € 27,50

*Cadeautje!*

Wilt u uw klanten informeren? Uw collega's verrassen? Denk eens aan een cahier! Neem contact op met BWM via 070-3495402 of [bestellingen@biomaatschappij.nl](mailto:bestellingen@biomaatschappij.nl). Bij afname van grote aantallen kan de prijs daarop worden afgestemd.



Ontdek met BWM de nieuwste ontwikkelingen op het gebied van biowetenschappen. Van diabetes tot biograndstoffen en van hersenen tot evolutie. De cahiers zijn geschreven door topwetenschappers: objectief, scherpzinnig en verrassend.

**Met BWM weet je meer!**

### Cahiers in 2018

- > De hielprik
- > Afvalwater
- > Ons immuun-systeem
- > Natuurbeheer

### Gratis lesmateriaal

BWM maakt ook lesmateriaal bij de cahiers. Voor havo en vwo bovenbouw.

U kunt dit gratis downloaden via

[www.biomaatschappij.nl/lesmateriaaloverzicht/](http://www.biomaatschappij.nl/lesmateriaaloverzicht/)

# Meer lezen en kijken

## Meer informatie

- Vakblad H2O, uitgave van Koninklijk Nederlands Waternetwerk: [www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen](http://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen)
- Collegehandleiding Afvalwaterbehandeling TU Delft, Prof JHJM van der Graaf, (2008) Civiele Gezondheidstechniek - CT3420, <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Afvalwaterbehandeling2008.pdf>
- Handboek Groene waterzuivering, Wageningen UR (2010): <https://edepot.wur.nl/164513>
- Handboek water, over wet- en regelgeving waterbeheer: [www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/handboek-water](http://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/handboek-water)
- KWR Watercycle Research Institute: [www.kwr-water.nl/tag/afvalwater/](http://www.kwr-water.nl/tag/afvalwater/)
- Onderzoeksinstituut Wetsus: [www.wetsus.nl/](http://www.wetsus.nl/)

## Geschiedenis sanitatie

- Kees van Lohuizen, Afvalwaterzuivering in Nederland. Van beerput tot oxidatiesloot. (2006) RWS RIZA rapport 2006.011, ISBN 90 36 95 72 73, <https://edepot.wur.nl/14751>
- De stad, het vuil en de beerput, RMR van Oosten (2014) proefschrift RU Groningen, [https://www.rug.nl/research/portal/nl/publications/de-stad-het-vuil-en-de-beerput\(0e2bb316-5439-4dob-b3c4-ab994b7fb2b1\).html](https://www.rug.nl/research/portal/nl/publications/de-stad-het-vuil-en-de-beerput(0e2bb316-5439-4dob-b3c4-ab994b7fb2b1).html)
- Geschiedenis van de techniek in Nederland, HW Lintsen, De wording van een moderne samenleving 1800-1890. Deel II. Gezondheid en openbare hygiëne. Waterstaat en infrastructuur. Papier, druk en communicatie. Walburg Pers, Zutphen (1993), [www.dbnl.org/tekst/linto11gesco2\\_01/linto11gesco2\\_01\\_0003.php](http://www.dbnl.org/tekst/linto11gesco2_01/linto11gesco2_01_0003.php)

- De grote uitleg van Amsterdam: stadsontwikkeling in de zeventiende eeuw, JE Abrahamse, proefschrift UvA (2010) Hoofdstuk 6, <https://dare.uva.nl/search?identificatie=2b6e3e43-c68e-4d79-95d3-b2375865c55f>
- De Pest in de zeventiende eeuw in Nederland, Cranendonk, [www.cranendonk.demon.nl](http://www.cranendonk.demon.nl)

## Afvalwaterzuivering

- Stichting RIONED over 100.000 km riolering in Nederland: [www.riool.info](http://www.riool.info)
- Van Leeuwenhoeklezing door Merle de Kreuk: Kun je rioolwater drinken? 11 juni 2017, <https://sg.tudelft.nl/event/van-leeuwenhoeklezing-kun-je-rioolwater-drinken/>
- Hoe wordt ons afvalwater gereinigd? [www.schooltv.nl/video/rioolwaterzuivering-hoe-wordt-ons-afvalwater-gereinigd/](http://www.schooltv.nl/video/rioolwaterzuivering-hoe-wordt-ons-afvalwater-gereinigd/)
- Van Plas tot Plas (hoe werkt een rioolwaterzuivering) [www.youtube.com/watch?v=fB2Y\\_3K1jEY](http://www.youtube.com/watch?v=fB2Y_3K1jEY)
- Hoe werkt een voorbezinktank? [www.youtube.com/watch?v=1Rab-2KOVBg](http://www.youtube.com/watch?v=1Rab-2KOVBg)
- Hoe werkt de biologisch proces? [www.youtube.com/watch?v=pJwXF\\_C9wMg](http://www.youtube.com/watch?v=pJwXF_C9wMg)
- De weg van het water (zuiveren van rioolwater) Waterschap Reest en Wieden (2011) <https://www.youtube.com/watch?v=8tkqsLhmTNo>
- Drugsmetingen: je plas liegt niet over je drugsgebruik | NOS op 3: [www.youtube.com/watch?v=FM61frCIIt4](http://www.youtube.com/watch?v=FM61frCIIt4)
- Bronnen van antibioticaresistentie in het milieu en mogelijke maatregelen. H Schmitt et al. 2017 RIVM Rapport 2017-0058, <https://www.rivm.nl/>

- [bibliotheek/rapporten/2017-0058.pdf](#)
- Geneesmiddelen en waterkwaliteit (2016), RIVM-rapport 2016-0111, [www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2016/10/13/rivm-rapport-geneesmiddelen-en-waterkwaliteit](http://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2016/10/13/rivm-rapport-geneesmiddelen-en-waterkwaliteit)
- Onderzoek on-site sanitatiesystemen voor noodhulp: [www.flex.nl/en/case/esos-smart-emergency-sanitation](http://www.flex.nl/en/case/esos-smart-emergency-sanitation), <http://microwave-based-faecal-sludge-treatment.un-ihe.org>
- Waterharmonica: [www.waterharmonica.nl](http://www.waterharmonica.nl)
- Nereda afvalwaterzuivering - Hoe werkt dat? [www.youtube.com/watch?time\\_continue=2&v=HN3WaGuCCI](http://www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=HN3WaGuCCI)
- Zuivering van stedelijk afvalwater: zware metalen, 1981-2015: [www.clo.nl/indicatoren/nl0153-zuivering-van-stedelijk-afvalwater-zware-metalen](http://www.clo.nl/indicatoren/nl0153-zuivering-van-stedelijk-afvalwater-zware-metalen)
- Zwavelverwijdering Thiopaq-proces <https://nl.paques.nl/products-nl/featured/thiopaq>
- Nieuwe sanitatie in de praktijk: [www.saniwijzer.nl](http://www.saniwijzer.nl)
- EU-project nieuwe sanitatie Run4life <http://run4life-project.eu>
- Cellulosehoudend zeefgoed (wcpapier) uit afvalwater als ontwateringsmiddel: [www.cados.nl](http://www.cados.nl)
- Animatie alginaat Waterschap Rijn en IJssel, [www.youtube.com/watch?v=2RrTmg6hJeE&feature=youtu.be#t=0m00s](http://www.youtube.com/watch?v=2RrTmg6hJeE&feature=youtu.be#t=0m00s)
- Op [www.nioo.knaw.nl/poepisgoud](http://www.nioo.knaw.nl/poepisgoud) staat meer info over het systeem van het NIOO

### Afvalwater als grondstof

- Onderzoeksrapporten STOWA [www.stowa.nl/publicaties/publicaties/](http://www.stowa.nl/publicaties/publicaties/) over bijvoorbeeld fosfaat, cellulose, zeefgoed, energie, zwavel, bioplastic, nieuwe sanitatie, grondstoffenfabriek, etc.
- STOWA – Waterzuivering (2013) als grondstoffen en energiefabriek [www.youtube.com/watch?v=6n4oluqpAoc](http://www.youtube.com/watch?v=6n4oluqpAoc)
- Energie en grondstoffenfabriek van de waterschappen: [www.efgf.nl](http://www.efgf.nl).
- Hoe werkt de Energiefabriek Tilburg, [www.youtube.com/watch?v=6dkGgBB9qhs](http://www.youtube.com/watch?v=6dkGgBB9qhs)
- Bacterial brandstofcel: [www.youtube.com/watch?v=TPs2-Pm82ZQ](http://www.youtube.com/watch?v=TPs2-Pm82ZQ)
- Eiwitfabriek: [www.powertoprotein.eu](http://www.powertoprotein.eu)

## Auteurs en redactie

Prof. dr. ir. Cees Buisman is hoogleraar Biologische Kringlooptechnologie aan de Wageningen University & Research en wetenschappelijk directeur van het onderzoeksinstituut voor duurzame watertechnologie Wetsus.

Dr. Hans van Bruggen is microbioloog en voorheen werkzaam bij het IHE Delft Institute for Water Education.

Ir. drs. Henk Dijkman is chemische procestechnoloog bij Paques in Balk.

Dr. ir. Erwin Duizer is hoofd van het Nationaal Polioloratorium van het RIVM.

Dr. ir. Astrid van de Graaf is freelance wetenschapsjournalist en science writer te Delft.

Dr. ir. Annemiek ter Heijne is universitair docent milieutechnologie aan Wageningen University & Research.

Prof. dr. ir. Sef Heijnen is emeritus hoogleraar bioprocestechnologie aan de Technische Universiteit Delft.

Prof. dr. Wiel Hoekstra is emeritus hoogleraar Algemene Microbiologie en bestuurslid van de stichting Biowetenschappen en Maatschappij.

Dr. Tineke Hooijmans is universitair hoofddocent Gezondheidstechnologie bij het IHE Delft Institute for Water Education.

Prof. dr. ir. Albert Janssen is hoogleraar biologische gas- en waterbehandeling aan de Wageningen University & Research.

Ing. Ruud Kampf is adviseur Nature based methods for water reuse bij Rekel/water en Rekel Kenya Ltd.

Yede van der Kooij BSc MBA is projectleider en innovator bij Wetterskip Fryslân op het vlak van

innovatie binnen de waterzuivering, slibverwerking, reststoffen en de biobased economy, tevens voorzitter van de werkgroep Cellulose binnen de Energie en Grondstoffenfabriek.

Ir. Kees de Korte was adviseur afvalwater bij Waternet en docent bij Wateropleidingen.

Ir. Leon Korving is coördinator van het onderzoeksthema 'Phosphate Recovery' bij het onderzoeksinstituut voor duurzame watertechnologie Wetsus.

Dr. ir. Alette Langenhoff is universitair hoofddocent waterbiotechnologie aan Wageningen University & Research.

Prof. dr. ir. Jules van Lier is hoogleraar afvalwaterzuivering en milieutechnologie aan de Technische Universiteit Delft.

Prof. dr. ir. Mark van Loosdrecht is hoogleraar milieubiotechnologie en waterzuivering aan de Technische Universiteit Delft.

Dr. Henk Lubberding is microbioloog en voorheen werkzaam bij het IHE Delft Institute for Water Education.

Ir. Frank Oesterholt is senior onderzoeker en projectmanager bij het team Industrie, Afvalwater en Hergebruik van KWR Watercycle Research Institute in Nieuwegein.

Prof. dr. ir. Ibo van de Poel is Antoni van Leeuwenhoek-hoogleraar ethiek en technologie en voorzitter van de afdeling Values, Technology & Innovation bij de TU Delft.

Prof. dr. ir. Huub Rijnaarts is hoogleraar milieu- en watertechnologie en hoofd van de sectie Milieutechnologie aan Wageningen University & Research.

- Prof. dr. Ana Maria de Roda Husman is hoofd van de afdeling Milieu bij het Centrum Zoönosen en Omgevingsmicrobiologie van het Centrum Infectieziektebestrijding, RIVM, Bilthoven en hoogleraar Mondiale veranderingen en milieu-overdraagbare infectieziekten bij het Institute voor Risk Assessment Sciences van de Universiteit Utrecht.
- Dr. Irene Sanchez Andrea is universitair docent microbiologie aan de Wageningen University & Research.
- Dr. Heike Schmitt is werkzaam bij het Centrum Zoönosen en Omgevingsmicrobiologie van het Centrum Infectieziektebestrijding, RIVM, Bilthoven als speerpunttrekker antibioticaresistentie in het milieu en daarnaast als universitair docent aan de Universiteit Utrecht.
- Dr. ir. Henri Spanjers is universitair hoofddocent industriewater aan de Technische Universiteit Delft.
- Prof. dr. ir. Alfons Stams is persoonlijk hoogleraar microbiologie aan de Wageningen University & Research.
- Dr. ir. Hardy Temmink is universitair hoofddocent milieutechnologie aan de Wageningen University & Research en werkzaam als themacoördinator bij het onderzoeksinstituut voor duurzame watertechnologie Wetsus.
- Ir. Jan-Evert van Veldhoven is senior afvalwater-technoloog bij het Waterschap de Dommel in Boxtel.
- Prof. dr. ir. Piet Verdonschot is bijzonder hoogleraar wetland hersteleecologie aan de Universiteit van Amsterdam en Leider Kennisgroep Zoetwaterecosystemen aan Wageningen Environmental Research.
- Prof. dr. Pim de Voigt is hoogleraar Chemisch-biologische interacties in aquatische ecosystemen aan de Universiteit van Amsterdam en werkzaam bij het KWR Watercycle Research Institute.
- Dr. Bas Vriens is postdoc bij de afdeling Aard- en Oceaanwetenschappen van de Universiteit van British Columbia in Canada.
- Dr. ir. Ronald Waterman is adviseur en voormalig lid Provinciale Staten (1978 – 2011) voor milieu, infrastructuur, economie en ruimtelijke ordening en mede-grondlegger van Bouwen met de Natuur.
- Dr. ir. Jan Weijma is onderzoeker/docent milieutechnologie aan de Wageningen University & Research en werkzaam bij onderzoeks- en adviesbureau LeAF.
- Prof. dr. Annemarie van Wezel is hoogleraar waterkwaliteit en gezondheid bij het KWR Watercycle Research Institute en de Universiteit Utrecht, Copernicus Institute of Sustainable Development.
- Prof. dr. ir. Grietje Zeeman is emeritus hoogleraar Nieuwe Publieke Sanitatie bij de vakgroep milieutechnologie van Wageningen University & Research, en werkzaam als senior consultant bij LeAF.
- Dr. Sjoerd Zwart is universitair docent ethiek en technologie aan de TU Delft.

# Illustratieverantwoording

Cover: iStockphoto

Universiteit Utrecht: p. 3

Canstockphoto: p. 4

Imageselect, Wassenaar: p. 6

Wikimedia Commons: p. 7, 8 b, 9, 15

Stadsarchief Amsterdam: p. 8 o, 10

Sittrop Grafisch Realisatie Bureau, Nijmegen:  
p. 11, 24, 26, 31, 36, 50, 64, 73, 79

Hollandse Hoogte, Den Haag: p. 12, 13

TNO: p. 17

Nationale Beeldbank, Rotterdam: p. 19, 48

123RF: p. 21, 22, 61

EMCDDA, 1995-2018: p. 27

Royal HaskoningDHV: p. 28, 57

ANP Photo, Rijswijk: p. 29, 53

Ecofyf, Oirschot: p. 32

UNICEF/NYHQ2014-0859/Khuzaie: p. 34

Dreamstime: p. 35, 65

Wetterskip Fryslân, Leeuwarden: p. 38, 66

Ing. Ruud Kampf, Rekel/water: p. 41

Dr. Henk Lubberding, IHE Delft: p. 43

iStockphoto: p. 44

Shutterstock: p. 47

Paques BV: p. 51, 80

Prof. dr. ir. Sef Heijnen, TU Delft: p. 54

Dr. Yuemei Lin, TU Delft: p. 55

Waterschap Noorderzijlvest, Groningen p. 56

Maurice Luijten PhD, RVO: p. 57 b

Dr. ir. Jan Weijma, WUR: p. 57 o

Dr. Irene Sanchez Andrea, WUR: p. 59

Beeldveld Fotografie, Wilfried Scholtes Tilburg:  
p. 62

Waterschap De Dommel, Boxtel: p. 68

Dr. ir. Annemiek ter Heijne, WUR: p. 69 b

Sam Molenaar: p. 69 o

Prof. dr. ir. Mark van Loosdrecht, TU Delft: p. 70, 71

Struvite Removal, Carson, California: p. 75 b

Ir. Leon Korving, Wetsus: p. 75 o

Mauritshuis, Den Haag: p. 77

Prof. dr. ir. Piet Verdonshot, UVA: p. 81, 82

Too Many Words: p. 84-85



Stichting Biowetenschappen en Maatschappij  
werkt samen met:

Dit cahier is mede tot stand gekomen door:

 KENNISLINK

 ZonMw

 NWO

## In dit nummer:

---

- › **Wat gebeurt er met onze ontlasting?**

---

- › **Hoe voorkomen we watervervuiling?**

---

- › **Waarom is rioolwaterzuivering zo belangrijk voor onze gezondheid?**

---

- › **Waarom heeft de natuur een beetje hulp nodig?**

---

- › **Wat doet de industrie met haar afvalwater?**

---

- › **Hoe kunnen we waardevolle grondstoffen uit afvalwater halen?**

---

### Redactie:

Mark van Loosdrecht

Alfons Stams

Wiel Hoekstra

Astrid van de Graaf

Met een voorwoord van Jacqueline Cramer

Honderden zuiveringsinstallaties draaien dag en nacht om ons rioolwater en industrieel afvalwater te zuiveren, waarna het richting zee verder stroomt en weer dient als bron voor drinkwaterproductie stroomafwaarts. Het invoeren van zuiveringsprocessen is een goede ontwikkeling voor het milieu en onze gezondheid geweest. Maar afvalwaterzuivering kost veel geld, en er gaan ook nog eens veel energie en waardevolle grondstoffen bij verloren. Tijd voor een herwaardering van ons afvalwater en het ontwikkelen van een integrale blik op water, energie en grondstofbeheer. De kringlooeconomie waar afval niet bestaat biedt zowel economisch, sociaal als ecologisch interessante en onverwachte kansen. De toekomst van de waterzuivering is er een van grondstoffen en energie terugwinnen.

In dit cahier beschrijven microbiologen, ecologen, biotechnologen, milieutechnologen, proces-technologen en filosofen vanuit hun vakgebied de laatste stand van zaken rond het zuiveren van afvalwater, en wat dit betekent voor onze gezondheid en economie. Om alle grondstoffen terug te kunnen winnen is de ontwikkeling van geavanceerdere microbiële technologie nog nodig. Is de toekomstige afvalwaterzuivering een bioraffinagefabriek of gaan we over op het verwerken van onverdunde ontlasting?

 **wetenschap+**  
**MAATSCHAPPIJ**

