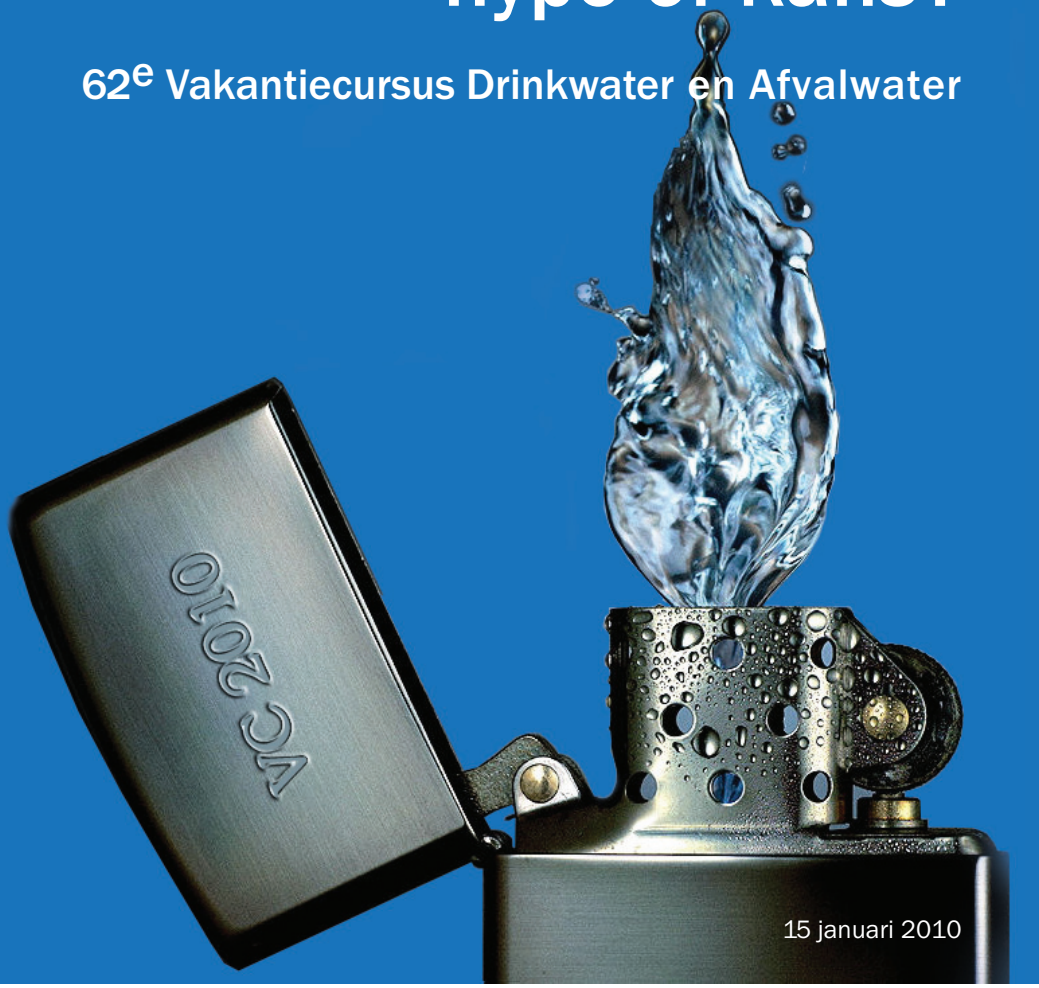
Energie uit water: hype of kans?

62e Vakantiecursus Drinkwater en Afvalwater



15 januari 2010

samenstelling en eindredactie
prof.ir. J.C. van Dijk
dr.ir. A.R.D. Verliefde
ir. H. van der Laan

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Afdeling Watermanagement
Sectie Gezondheidstechniek
Stevinweg 1, 2628 CN Delft
www.watermanagement.tudelft.nl

“Energie uit water: hype of kans?”

62e Vakantiecursus Drinkwater en Afvalwater

vrijdag 15 januari 2010
te Delft

samenstelling en eindredactie
prof.ir. J.C. van Dijk
dr.ir. A.R.D. Verliefde
ir. H. van der Laan

Vakantiecursus 2010

Colofon
De voordrachtenbundel 'Energie uit water: hype of kans?' van de 62e Vakantiecursus Drinkwater en Afvalwater is een uitgave van de Sectie Gezondheidstechniek van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de TU Delft.

Meer informatie over deze en andere uitgaven kunt u verkrijgen bij:
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Gezondheidstechniek
Postbus 5048
2600 GA Delft
Tel: 015-2783347
e-mail: m.a.j.hubert@tudelft.nl

Printed Gildeprint Drukkerijen BV
ISBN/EAN: 978-90-8957-012-3
NUR-code: 956

Published by
Water Management Academic Press
PO Box 5048
2600 GA Delft
The Netherlands
Tel: +31 15 2783347
Fax: +31 15 2784918

Legal notice
The publisher is not responsible for the use which might be made of the following information.

Printed in The Netherlands

Inhoudsopgave congresbundel 62e Vakantiecursus

Drinkwater

Energie en drinkwater 7
Prof.ir. J.C. van Dijk (TU Delft), Dr.ir. L.C. Rietveld (TU Delft), Dr.ir. J.A.M.H. Hofman (KWR)

Een wereld te winnen 13
Ir. H. Hoogeveen (Waterbedrijf Groningen)

Blauwe energie: van goed idee naar veelbelovende technologie 19
Prof.dr.ir. C.J.N. Buisman (TTI Wetsus), Dr.ir. J.W.Post (KWR)

Wat kost energie uit water? 31
Prof.dr.ir. J.K. Vrijling (TU Delft)

Energie in de watercyclus 37
Dr.ir. J.P. van der Hoek (Waternet)

Is er een dokter in de zaal? 47
Prof.dr. G.J. Medema (KWR/TU Delft)

Afvalwater

Druk op afvalwater 57
Prof.dr.ir. J.B. van Lier (TU Delft/UNESCO-IHE), Ing. J.F.M. Raap (Royal Cosun)

Exit conventioneel actief slib? 65
Prof.dr.ir. W. Verstraete (Universiteit Gent)

RWZI als energiefabriek 69
Ir. F. Kiestra (Waterschap Aa en Maas)

Industriewater: tak of vak? 79
Drs. M.G. Flick (Evides)

Zuiveringsslib: kostenpost, energiedrager of grondstof? 81
Ir. L.D. Korving (SNB)

Water als energieke bondgenoot 91
Ir. M. Bruggers (Deltares)

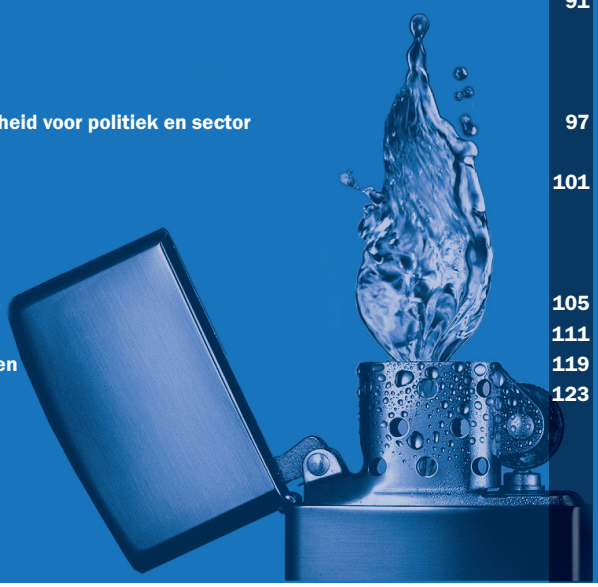
Gezamenlijke slotsessie

Water en energie: verantwoordelijkheid voor politiek en sector 97
Drs. Th.T.J. Schmitz (Vewin)

Water and energy in Singapore 101
T.C. Khoo (PUB)

Appendices

Nominaties Jaap van der Graaf prijs 105
Nominaties Gijs Oskam prijs 111
Samenvattingen van de voordrachten 119
Eerdere uitgaven 123



62e Vakantiecursus - 15 januari 2010

“Energie uit water: hype of kans?”

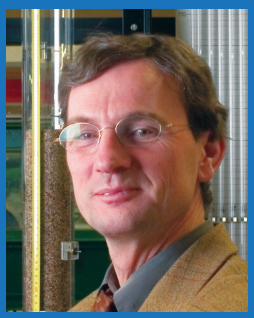
Drinkwater

Dr.ir. L.C. Rietveld, dr. J.A.M.H. Hofman, prof.ir. J.C. van Dijk

Energie en drinkwater

Luuk Rietveld
Technische Universiteit Delft

Jan Hofman
KWR Watercycle Research Institute



Hans van Dijk
Technische Universiteit Delft

1. Inleiding

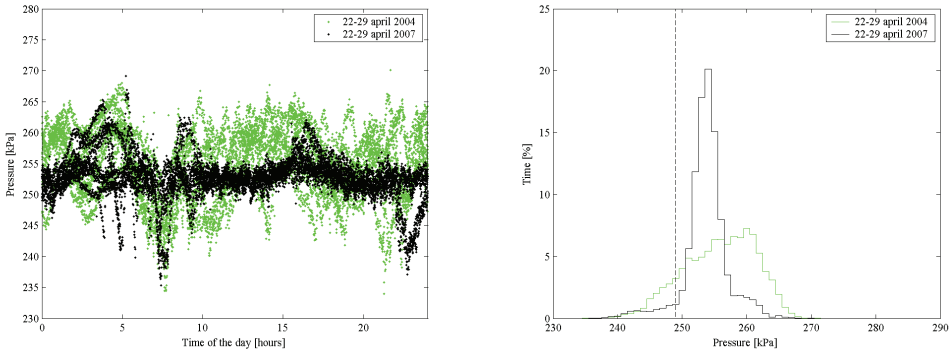
Bij de winning en zuivering van drinkwater en bij het transport van het product naar de klanten wordt energie verbruikt. Het grootste deel van dit energieverbruik wordt gebruikt door pompen die het water uit de grond pompen, het water door de zuivering heen pompen, en het water van de zuivering naar de klanten pompen. Bij de productie en het transport naar de klant wordt in totaal 450.000 MWh per jaar aan energie gebruikt, ofwel circa 70 kWh per huishouden. Toch is deze hoeveelheid relatief weinig. Tijdens de 26ste vakantiecursus in 1974 merkte Prof Huisman al op: “In deze tijd van energieschaarste en dreigende energietekorten is wellicht nog belangrijker dat het energieverbruik (voor het transport van water) bijzonder gering is, slechts 30-100 kJ per tonkilometer vergeleken met 50-150 kJ/tonkilometer voor tankschepen, 400-600 kJ/tonkilometer voor railtransport en 500-1000 kJ/tonkilometer voor vrachtvervoer langs de weg [1].

Wat is de energie “footprint” van de drinkwatervoorziening en op welk gebied zijn verbeteringen zinvol? Doordat het om grote hoeveelheden drinkwater gaat zijn kleine maatregelen reeds voldoende om veel energie te sparen. Hierbij valt onder andere te denken aan het afvlakken van verbruiksvariaties bij watertransport en -zuivering. Ook zijn er ontwikkelingen om duurzame energie rechtstreeks in te zetten voor de drinkwaterzuivering. In ontwikkelingslanden kan de beschikbaarheid van energie een groot knelpunt zijn, waardoor de inzet van wind en zon nog grotere voordelen biedt.

Energiebesparing levert een belangrijke bijdrage aan de reductie van broeikasgassen. Meer dan de helft van de emissie vanuit de watersector is gekoppeld aan het energieverbruik. De overige emissies van de watersector zijn grotendeels directe emissies (methaan, lachgas) en bijvoorbeeld indirecte emissies (kantoren, vervoermiddelen). Het besparen van energie levert dus een aanzienlijke emissiereductie op.

2. Energieverbruik tijdens transport en distributie

Het drinkwater wordt vaak over grote afstanden getransporteerd van de bron naar het voorzieningsgebied. Denk hierbij aan het transport van water van de Rijn naar de duinen en vervolgens van de duinen naar de stad. Vervolgens wordt het water gedistribueerd naar de klant. Hiertoe wordt het water door transport- en distributiepompen



Figuur 1 - Druk in distributienet van Amsterdam voor (2004) en na (2007) invoering van model gebaseerde sturing

enkele tientallen meters opgevoerd. Uiteindelijk heeft de consument minimaal een druk van 20mWk.

Het vermogen P (W) dat door pompen moet worden geleverd kan worden berekend met de volgende formule:

$$P = \rho g Q H$$

Waarin ρ dichtheid (kg/m^3) is, g de gravitatieconstante (m/s^2) is, Q het debiet (m^3/s) is en H het drukverschil (mWk) is.

Wanneer we uitgaan van een middelgrote stad van 100.000 inwoners met een watergebruik van 120 lpcd en een pomprendement van 70%, dan is een typisch pompvermogen voor watertransport en -distributie (50m opvoerhoogte) 200 kW. Dit betekent dus een vermogen van 2 W per persoon; behandeling van het afvalwater dat hieruit ontstaat kost circa 8W. Doordat de opvoerhoogte afhankelijk is van de wrijving in de leiding, wordt de opvoerhoogte sterk bepaald door het te verpompen debiet (met een kwadratische relatie). Daardoor wordt het pompvermogen beïnvloed door debietvariaties. Vermindering van debietvariatie kan leiden tot 14% reductie in het vermogen. Hetzelfde geldt voor de opvoerhoogte tijdens de distributie. Wanneer de opvoerhoogte kan worden beperkt, betekent dit een vermindering van het vermogen.

Door vraagvoorspelling in te passen in het besturingssysteem van de pompen, kan een aanzienlijke besparing in energieverbruik worden behaald. In het geval van een stad van 100.000 inwoners kan dit leiden tot een besparing van 120 MWh per jaar (opgeschaald naar een bevolking van 8 miljoen is dat 10000 MWh per jaar). Het inpassen van zo'n besturingsysteem heeft een terugverdientijd van 7-8 jaar.

3. Energieverbruik tijdens de zuivering

Het energieverbruik tijdens de zuivering wordt enerzijds bepaald door de opvoerhoogte die nodig is om het water de verschillende processen te laten doorstromen. Hiertoe is zijn één of meerdere pompstappen noodzakelijk. Processen die veel opvoerhoogte vergen zijn membraanfiltratie (RO, NF) en, in mindere mate, pelletontharding.
Bij een conventionele zuivering is een typische opvoerhoogte tussen de 5 en 10m. Dit betekent dan dat voor een stad van 100.000 inwoners het pompvermogen 20 kW moet zijn. Voor een membraanfiltratie plant kan dit oplopen tot 1400 kW (opvoerhoogte 700m).

Anderzijds wordt het energieverbruik bepaald door procesgerelateerde zaken, zoals het toevoegen van chemicaliën (vooral de productie van ozon, natronloog), het regenereren van actieve kool, het produceren van ozon of UV licht, het transporteren van zand, pellets, actieve kool, etc. Voor een zuivering voor de genoemde stad met ontharding, ozonisatie en actieve koolfiltratie kan dit oplopen tot 200-250 kW. Ook de aanwezigheid van vervuiling kan het energieverbruik van processen negatief beïnvloeden. Vervuiling op membranen

leidt tot lagere fluxen of hogere drukken, waardoor het energieverbruik toeneemt. Bij UV kan vervuiling van de kwartsbuizen waarin de UV lampen geplaatst zijn, leiden tot een verhoogd energieverbruik.

Energieverbruik kan dus (indirect) worden verminderd als de procesvoering wordt verbeterd. Voorbeelden hiervan zijn de optimalisatie van de pelletontharding en de ozonisatie. Kim van Schagen heeft in zijn onderzoek aangetoond dat wanneer de by-pass wordt gemaximaliseerd en de fluïdisatie van het pelletbed ten alle tijden wordt gegarandeerd, de dosering van natronloog (en zoutzuur) met 10% kan worden verminderd [2]. Tevens zal er minder (granaat) zand nodig zijn en zullen de geproduceerde pellets zuiverder en uniformer zijn. Alex van der Helm toonde aan dat een dynamische sturing van de ozonisatie leidt tot een verminderde ozondosering en een verminderde bromaatvorming, terwijl de desinfectie gewaarborgd blijft [3].

4. Energieverbruik van water in huis

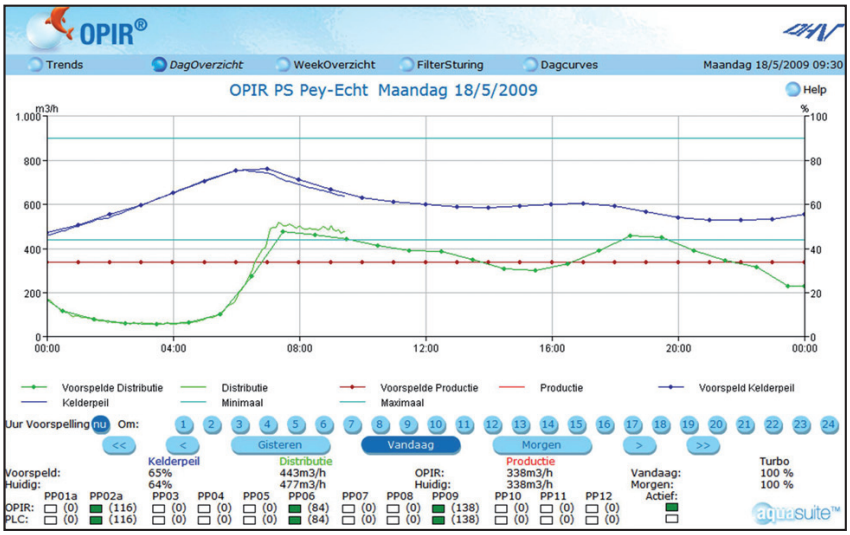
De grootste hoeveelheid energie wordt gebruikt bij het verwarmen van huishoudelijk water. Het verwarmen van 1 L water met 1°C kost 1 kCal (oftewel 4,18 kJ). Een persoon zal per dag ongeveer 60 liter verwarmen van ongeveer 12 naar 40 °C (met een rendement van 80%). Dit betekent dat per dag per persoon 9,4 MJ aan energie aan het water wordt toegevoegd, oftewel 9,4/3,6= 2,6kWh. Dit komt overeen met het permanent branden van een 100W lamp (of 20 spaarlampen).

Uit bovenstaande is dus duidelijk dat het verwarmen van water ten opzichte van het produceren, zuiveren, transporteren en distribueren het meeste energie kost. Het verminderen van het watergebruik, het verlagen van de temperatuur en het terugwinnen van de warmte zijn daarom interessante opties als het gaat om energiebesparing. Als een warmtewisselaar wordt toegepast in het doucheputje kan zo'n 0,8 kWh per persoon per dag worden teruggewonnen (met een terugverdientijd tussen de 3 en 4 jaar).

5. Gebruik van alternatieve energiebronnen in de watervoorziening

5.1 Gebruik van methaangas uit grondwater

Veel diep grondwater bevat methaangas. Dit wordt meestal verwijderd tijdens de ontgassingfase en verdwijnt dan in de atmosfeer. Methaan is niet alleen een broeikasgas (21 maal zo sterk als kooldioxide), maar ook het hoofdbestanddeel van aardgas. Het ligt dan ook voor de hand dit methaan te gebruiken voor het opwekken van energie, zoals vroeger ook op kleine schaal werd gedaan met zogenaamde "brongasinstallaties". De totale geschatte



Figuur 2 - User interface OPIR: groen=verbruik, rood=productie; blauw = niveau buffer

methaanvoorraad in het Nederlandse grondwater komt op 24.000 kiloton. Qua verbrandingswaarde is dit gelijk aan 42 miljard kubieke meter aardgas, bijna evenveel als de totale jaarlijkse binnenlandse afzet van aardgas in Nederland (tussen 45 en 50 miljard kubieke meter in de periode 1992-2003, cijfers CBS) [4].

Figuur 3 - Oude brongasinstallatie

Het grondwater bij pompstation Spannenburg bevat bijvoorbeeld 45 mg/l methaan. Als dit methaan kan worden gewonnen, betekent dit een opbrengst van 5,4 g methaan per persoon per dag. In Gronings gas zit ongeveer 0,7 gewichtsprocent methaan en de dichtheid van dat gas is 0,833 kg/m^3. De gemiddelde verbrandingsenergie is 7 KWh per m^3 (bij een omzettingsrendement van 80%). Dit betekent dat het gewonnen methaan 1,7 W per persoon op zou kunnen leveren. Dit zou voldoende moeten zijn om de halve watervoorziening in dit gebied van energie te voorzien.

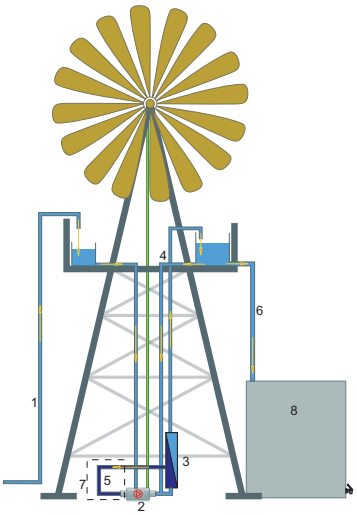
5.2 Energie uit (stromend) water

Stromend water kan ook gezien worden als een energiedrager. Drinkwater warmt op tijdens de opslag, het transport en de distributie. Zo kan het oppervlaktewater in de zomer wel 25°C worden en neemt het grondwater (van 12°C) de temperatuur van de ondergrond aan. Doordat het water wordt verwarmd, neemt de kwaliteit af. Het is minder prettig in de directe consumptie en nagroei in het leidingnet kan worden bevorderd. Een logische oplossing zou zijn om het water af te koelen en de vrijgekomen energie te gebruiken voor het opwekken van energie. Dit zou kunnen met behulp van een warmtepomp. Indien, in de zomer, het water met 5°C wordt afgekoeld levert dit een 0,4 kWh per persoon per dag op, of te wel een vermogen van 17 W. De warmte die hiermee gewonnen wordt kan dan ingezet worden in het verwarmen van huishoudens. Echter, omdat gedurende de zomer de warmtebehoefte niet groot is, zou deze warmte tijdelijk opgeslagen moeten worden (WKO systeem). Hierbij treedt uiteraard een verlies op.

5.3 Gebruik van duurzame energie

Natuurlijk is het gebruik van duurzame energie (uit bijvoorbeeld wind- en zonne-energie) een goede manier om energiebewust met water om te gaan. Daarbij gaat het natuurlijk ook om de verhoging van het rendement. Traditioneel wordt gas, wind en zonne-energie eerst in elektriciteit omgezet. Hiermee wordt een pomp aangedreven om bijvoorbeeld water te ontzouten. Hierbij is twee keer een rendementsverlies aanwezig (van bijv. 20%). Als directe aandrijving mogelijk is wordt dit rendementsverlies beperkt.

Het gebruik van windenergie voor het ontzouten van drinkwater is in het verleden al vaker onderzocht en wordt inmiddels op verschillende plaatsen in



Figuur 4 - Schematische weergave van concept "Drinking with the wind"

de wereld toegepast. Hierbij wordt de wind echter omgezet in elektrische energie en opgeslagen in inefficiënte batterijen. In het project “drinking with the wind” is gebruik gemaakt van een directe aandrijving van een reverse osmosis installatie door een windmolen. Een proefinstallatie is in het afgelopen jaar gebouwd en uitvoerig getest bij het waterbedrijf Aqualectra op Curaçao. Bij een windsnelheid van 5 m/s werd de beoogde capaciteit van 5 m^3/d eenvoudig gehaald.

5.4 Gebruik van energie uit afvalwater

Ons rioolwater bevat ook energie in de vorm van organische stof. In de huidige RWZI-praktijk wordt deze organische stof “verbrand” door het te oxideren in een aeroob actief slibsysteem. Dit proces kost veel zuurstof, en kost daardoor juist veel energie. Door de organische stof te verzamelen, kan de energie-inhoud in afvalwater juist worden benut. Dat kan door de organische stof via een anaerobe vergisting om te zetten in methaan. Een andere mogelijkheid is het omzetten van de organische stof in slib, dit slib te drogen (bijvoorbeeld met restwarmte) en te verbranden. Het Nederlandse aanbod aan organische stof in rioolwater (uitgedrukt in Chemisch Zuurstof Verbruik (CZV)) bedraagt circa 942.000 ton per jaar. In potentie levert dit bijna 14.000 TJ per jaar aan energie op (18 W/IE). Deze energie zou dus ingezet kunnen worden voor de drinkwatervoorziening.

6. Conclusie

Energieverbruik in de drinkwatervoorziening is zeer laag, zolang er gebruik gemaakt wordt van conventionele zuiveringstechnieken. Het ontzouten van zeewater bijvoorbeeld is een energievreter. Vooral het opwarmen van drinkwater voor het huishoudelijk gebruik vergt redelijk wat energie. Om energie te besparen zal voornamelijk gekeken moeten worden naar het zoveel mogelijk vermijden van het opwarmen en het terugwinnen van de warmte.

Toch zijn er nog wel wat mogelijkheden om ook in de drinkwatervoorziening energie terug te winnen. Een mooi voorbeeld hiervan is het gebruik van methaan uit grondwater. Het voordeel hiervan is ook dat het aandeel broeikasgas fors naar beneden kan. De grote vraag blijft natuurlijk hoeveel we er voor over hebben. De investeringen in dergelijke projecten zijn groot en de terugverdientijd relatief lang (als het project al rendabel is). Met de toenemende olieprijzen worden dergelijke alternatieven echter steeds aantrekkelijker.

Energiewinst kan vaak ook gekoppeld worden aan kwaliteitsverbetering. Wanneer er minder debietfluctuaties in de zuivering zijn betekent dit energiewinst, maar zal de zuivering ook beter functioneren. Het zelfde geldt voor het doseren van chemicaliën voor bijvoorbeeld de ontharding.

Het regelmatig analyseren van het drinkwatersysteem op energiegebruik en verbetermogelijkheden is daarom een vorm van “good housekeeping”.

7. Dankwoord

Wij willen een ieder bedanken die een bijdrage heeft geleverd aan dit artikel. Met name zijn dit Martijn Bakker, Kim van Schagen, Alex van der Helm, Jacques van Paassen, Robert van der Kleij en Bas Heijman.

8. Referenties

1. Huisman, L. (1974). Inleiding op de 26e vakantiecursus in drinkwatervoorziening. In: Watertransport door leidingen, 26e vakantiecursus in drinkwatervoorziening, Technische Hogeschool Delft.
2. van Schagen, K.M., Rietveld, L.C., Babuska R. (2008), Dynamic modelling for optimisation of softening. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, 57 (1), 45-56.
3. van der Helm, A.W.C., van der Aa, L.T.J., van Schagen, K.M., Rietveld, L.C. (2009). Modeling of Full-scale Drinking Water Treatment Plants with Embedded Plant Control. Water Science and Technology: Water Supply 9 (3) 253-261.
4. Drijver, B. , Kappelhof, J., Polman, E., van Breukelen, B. (2007) Methaanwinning uit grondwater duurzaam alternatief met economisch perspectief, H2O 40 (19) 52-55.

ir. H. Hoogeveen MBA

Een wereld te winnen!

Harmen Hoogeveen
Waterbedrijf Groningen

1. Introductie

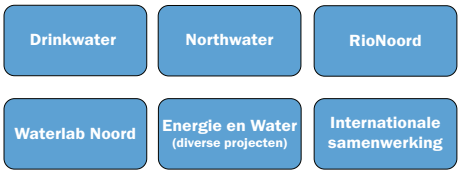
De Nederlandse watersector draagt 0,8%* bij aan de landelijke emissies. Tijdens een workshop voorafgaand aan de IWA 2009 Conference werd de vraag gesteld of deze minimale bijdrage van de watersector überhaupt wel van belang is. Sommige deelnemers gaven aan dat het van belang is, omdat de gevolgen van klimaatverandering het eerst merkbaar zijn in de watersector. Die sector moet dus een 'first-mover' zijn richting klimaatneutraliteit [1,2]. Het standpunt van Waterbedrijf Groningen (WBGR) hierin is dat deze 0,8% bijdrage aan landelijke emissies juist aangeeft dat we meer moeten doen dan alleen naar onze eigen sector kijken. In de overige 99,2% ligt een wereld te winnen! Wij vinden dat we door samenwerking over sectorgrenzen heen een bijdrage kunnen en moeten leveren aan het verlagen van emissies en het besparen op energie en grondstoffen.

2. Water, de verbindende factor

De klimaatverandering brengt verschillende wateruitdagingen met zich mee. Nederland is in hoge mate ontwikkeld op het gebied van water. Technisch lopen we mee voorop, maar echte duurzame oplossingen vragen om een integrale aanpak. Technische oplossingen voor wateruitdagingen zijn slechts een onderdeel van een groter geheel. Steeds vaker zien experts in dat samenwerking op het gebied van verschillende thema's cruciaal is bij het bedenken en implementeren van duurzame oplossingen [1,3].

Langzamerhand behoort het sectorale denken tot het verleden en beginnen grenzen tussen sectoren te vervagen. Dit is geen vanzelfsprekendheid en het is zeker niet eenvoudig. In de samenwerking op het gebied van verschillende thema's is een verbindende factor nodig. In dit verband wordt de overheid vaak genoemd als regisseur en bemiddelaar [1,4]. Maar er is ook een heel andere verbindende factor: water. Water speelt een belangrijke rol in industrie, landbouw, energie, wonen, natuur en recreatie. Voor de verschillende thema's speelt water een rol als grondstof, transport-, opslag-, was- en/of voedingsmiddel. Voor ons als professionals in de watersector ligt er dus een bijzondere verantwoordelijkheid en uitdaging.

* 26% emissies door de levering van water, 7% door het afvoeren van afvalwater en 67% door het behandelen van afvalwater [1]



Figuur 1 - Activiteiten Waterbedrijf Groningen

3. Waterbedrijf Groningen

WBGR wil als maatschappelijke onderneming bijdragen aan de duurzame ontwikkeling van de regio. Daarom leveren we meer dan alleen 24/7 goed en betrouwbaar drinkwater. Wij faciliteren innovatie door het samenbrengen van verschillende spelers in de regio. Wij werken mee aan een goed vestigingsklimaat voor grote en kleine industriële bedrijven door het aanbieden van industriewater en afvalwaterbehandeling op maat. En wij initiëren en ondersteunen projecten op het gebied van energie (her)gebruik en biomassa.

Figuur 1 geeft weer hoe WBGR haar activiteiten heeft gestructureerd. Het geheel heeft veel synergie en levert een leuk en boeiend bedrijf op om voor te werken. WBGR zoekt daarbij volop de samenwerking met anderen. Naast de traditionele verbanden als Vewin, KWR, Reststoffen Unie en A4All wordt structureel samengewerkt met Evides, WMD, Hunze & Aa's, Noorderzijlvest, Wetsus, DZH, PWW, WML, bedrijven als Akzo, Avebe, RWE, Groningen Seaports, de natuur en milieu -organisaties en provincies en gemeenten.

4. De Eems Dollard regio

WBGR is één van de tien Nederlandse Waterleidingbedrijven. Ons voorzieningengebied betreft de provincie Groningen en we voorzien een kleine 600.000 mensen van drinkwater. Er wordt gesteld dat ca. 15% van de Nederlandse Chemie in het noorden gevestigd is. Het gros van het aardgas zit in Groningse bodem en momenteel vindt ca. 20% van de Nederlandse elektriciteitsproductie plaats in Groningen. De provincie heeft een groot areaal aan landbouw en 50% van de suikerbieten en ca. 60% van de zetmeel-productie uit aardappelen wordt in Groningen verwerkt. Er is een diepzee-haven, een universiteit en een belangrijke medische kennis-cluster. En de provincie ligt tussen omvangrijke natuurgebieden: Waddenzee, Drenthe, Eems Dollard, Lauwersmeer.

Groningen heeft van oudsher een internationale oriëntatie. Eertijds onderdeel van het Hanze-verbond en van de West-Indische compagnie. Opgericht in 1879 met behulp van Duits kapitaal en Duitse technologie. Tegenwoordig nog steeds internationaal knooppunt voor gas-, zout- en mogelijk ook CO_2-handel. WBGR is initiatiefnemer geweest met betrekking tot de samenwerking van een tiental bedrijven in de Eems Dollard regio (Figuur 2): de "Ems-partners". De lijnen zijn kort binnen de provincie. Bedrijven en instellingen kennen elkaar, we weten elkaar te vinden. Het motto is: "nait soezen moar doun". Kortom, alle voorwaarden zijn in potentie aanwezig om gezamenlijk te komen tot integrale duurzame oplossingen voor de regio.

Figuur 2 - De Eems Dollard regio

5. Relevante ontwikkelingen

5.1 Klimaatverandering

Als gevolg van klimaatverandering zullen we voor een aantal uitdagingen komen te staan op het gebied van water. Er zijn diverse scenario's beschreven [5,6]. De belangrijkste gevolgen van de toekomstige klimaatverandering met betrekking tot water lijken te zijn: stijging van de zeespiegel, extremere neerslag- en droogte periodes, en temperatuurstijging.

Volgens Kabat [7] zullen de gevolgen van het stijgen van de zeespiegel voor Nederland aanzienlijk zijn. Ten eerste komt een groter deel van Nederland onder de zeespiegel te liggen. Daarnaast zal het zeewater via de rivieren dieper doordringen op het

land. Rivieren krijgen dan het karakter van getijde rivieren en er is minder zoet water beschikbaar. Verder zal de kweldruk wordt verhoogd waardoor het zoutgehalte in het grondwater stijgt. Tenslotte zal het oppervlak dat niet meer onder vrij verval kan lozen op zee groter worden en verhoogt dus de benodigde gemaalcapaciteit [7].

De neerslag in Nederland verandert op verschillende fronten. De Nederlandse winters worden natter, er valt meer regen. In de zomer wordt het juist warmer en droger. De buien die in de zomer toch vallen worden heviger en korter. Dit heeft als gevolg dat er vaker wateroverlast zal voorkomen, omdat in korte tijd grotere hoeveelheden regenwater moeten worden afgevoerd. De regen die valt in de zomer is ongelijkmatig verdeeld en het grootste gedeelte wordt afgevoerd naar zee met als gevolg dat er een tekort ontstaat [7, 8].

Nederland stelt zich ten doel een akkoord te bereiken dat ervoor zorgt dat de opwarming van de aarde beperkt blijft tot maximaal 2°C [9]. Voor West-Europa zou dat een reductie van 80-95% CO_2 in 2050 betekenen. Over de Nederlandse doelstellingen zegt Minister Cramer: “Nationaal hebben we ons verplicht om uiterlijk in 2020 de uitstoot van broeikasgassen met 30% terug te dringen, het aandeel duurzame energie te vergroten naar 20% en energiebesparing te verbeteren met 2% per jaar” [9].

5.2 Elektriciteitcentrales

In Groningen zullen minstens twee nieuwe elektriciteitcentrales gebouwd worden. RWE vestigt een kolencentrale van (2x800MW) en NUON een gascentrale van (1200 MW) die in ook op biomassa gestookt kan worden. Samen zullen ze tussen de 12.900 en 18.200 kton CO_2 en miljoenen m^3 aan warm water lozen. Samen met al gerealiseerde plants van Electrabel, Delesto en E-On zal ca. 35% van de Nederlandse Energieopwekking in de Eemshaven/Delfzijl plaatsvinden.

5.3 Bevolkingskrimp

Met name het Oosten van Groningen heeft te maken met een krimpende bevolking. Verwacht wordt dat in 2025 er 10-45% minder mensen zullen wonen [10].

5.4 Biomassa

De landbouwsector beraadt zich op duurzame methodes en probeert zich staande te houden in de nieuwe Europese marktverhoudingen. Het platform Groene Grondstoffen ziet een grote toekomst weggelegd voor biomassa [11]. De onderzoekers van WUR en ECN schatten dat binnenlandse groene grondstoffen 10% van de energievoorziening in Nederland voor hun rekening kunnen nemen, alleen al op basis van reststoffen. Het platform geeft aan dat er drie pijlers zijn voor zo’n ‘Biobased Economy’: Havens, Agro en Chemie.

5.5 Technologie

Er zijn voldoende technieken beschikbaar om de overheidsdoelstellingen te realiseren [5,12,13]. Bijvoorbeeld bij het gebruik van heet water, energiewinning uit afvalwater, slibvergisting en slib als brandstof [2]. De vraag is hoe de technieken geïntegreerd kunnen worden op een boven-lokale schaal.

6. Groningen - 2033

De in het vorige hoofdstuk geformuleerde opgaven zijn niet gering. Om ons heen borrelt en bruist het van initiatieven. Vrijwel ieder artikel in ons vakgebied spreekt over duurzaamheid. Je telt gewoon niet meer mee als je niet duurzaam bezig bent.

Ook WBGR koopt 100% groene stroom, levert haar reststoffen in bij de Reststoffen Unie voor hergebruik, doet aan energiebesparing, heeft enkele bedrijfswagens geschikt voor aardgas of voor bio-ethanol, koopt duurzaam in, en heeft haar bronnen voor drinkwater duurzaam ingepast in de omgeving. Verder levert Northwater ca. 16 miljoen m3/jaar proceswater voor de industrie in Groningen en werken we via RioNoord aan het optimaliseren van de samenwerking in de waterketen.

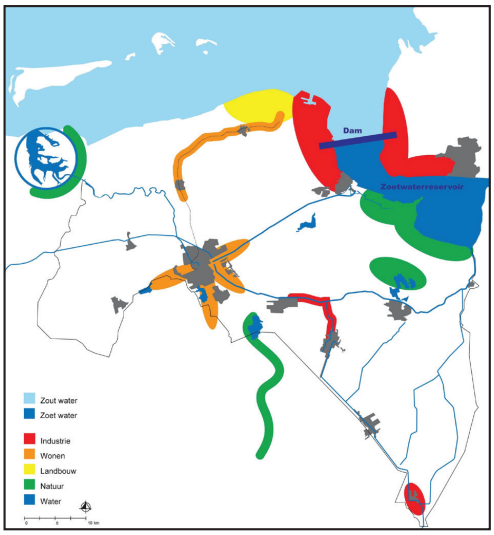
Om ons heen zijn de nodige projecten op het gebied van koude-warmte opslag, waterhergebruik, benutting van restwarmte en (decentrale) verwerking van afvalwater, en het winnen van energie uit afvalwater. Naar vermogen dragen

wij bij aan deze projecten: We zijn bijvoorbeeld betrokken bij een consortium dat een proefveld van tien hectare opzet voor algenkweek met behulp van restwarmte en CO_2 uit rookgassen. Maar ook bij de benutting van warmte uit het riool ten behoeve van woningverwarming, bij koude/warmte opslag bij een nieuwbouwwijk en bij hergebruik van restwarmte in de industrie.

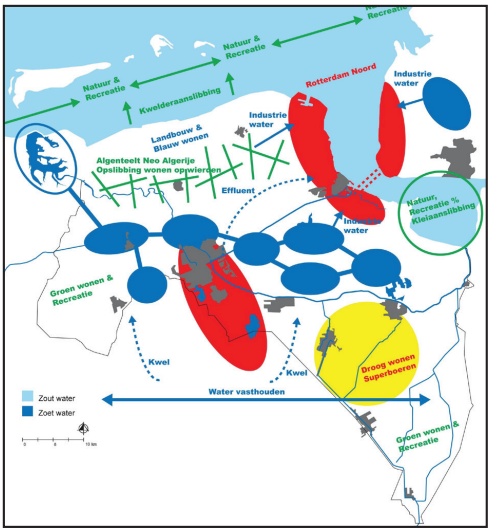
De vraag dringt zich op of we met zijn allen wel efficiënt en effectief bezig zijn. Is er, ondanks alle goede bedoelingen, geen sprake van suboptimalisaties? Zou er met wat meer regie, en een wat meer regionale, integrale en langere termijn visie niet veel méér te bereiken zijn? Vanuit de behoefte aan zo'n soort visie zijn wij als WBGR gestart met een brainstormproces onder de titel 'Groningen 2033'. Het doel van dit brainstormproces is het gezamenlijk zoeken naar integrale oplossingen voor de regio. Er is daarbij vrijuit gedacht, zonder al te veel rekening te houden met de praktische of politieke haalbaarheid.

6.1 Gezocht: "Dwarsdenkers met humor".

We hebben begin 2008 ongeveer 25 praktijkmensen met een goed netwerk, met kennis van zaken, en met de vaardigheid en de wil om "out of the box" te denken persoonlijk benaderd. Mensen uit bedrijfsleven, politiek en



Figuur 3 - Illustratie uit de brainstorm 'Groningen 2033'



Figuur 4 - Illustratie uit de brainstorm 'Groningen 2033'

wetenschap, en adviseurs werd gevraagd om mee te denken over de volgende vraag: 'Hoe zou een duurzaam Groningen er over 25 jaar uit kunnen zien?'. In enkele sessies en met behulp van vier werkgroepen ('Biomassa als grondstof', 'Kustontwikkeling', 'Industriële ontwikkeling' en 'Waterbeschikbaarheid') werden heel interessante toekomstbeelden ontwikkeld. Enkele illustraties uit de brainstorm vindt u in Figuren 3 en 4.

In Figuur 3 is bijvoorbeeld geschetst hoe verschillende behoeftes gekoppeld zouden kunnen worden: het bufferen van zoet water, beveiliging tegen zeespiegelstijging en de koppeling van industriële gebieden en gebieden voor biomassa. In dit voorbeeld is gedacht aan een (gedeeltelijke) afdamming van het Eems Dollard gebied. Uiteraard zou dit idee grote bezwaren oproepen bij organisaties die zich bekommeren om het behoud van de Waddenzee (werelderfgoed). Daarnaast zouden bedrijven als de Meyer-werf in zo'n geval verplaatst moeten worden. Daar staat tegenover dat de waterkwaliteit in de Eems Dollard zou verbeteren en er langs de oever recreatie ontwikkeld kan worden. Maar in Figuur 3 zijn ook ideeën geschetst met betrekking tot de koppeling van behoeften aangaande: arbeidskrachten in de industrie, 'hoog' wonen, korte reisafstanden en de herinrichting in Oost-Groningen ten gevolge van

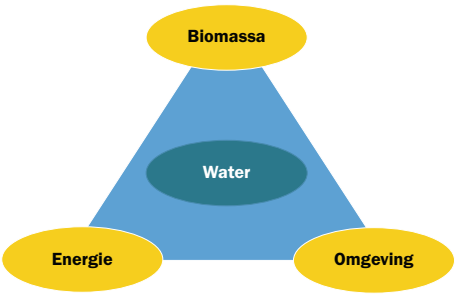
krimp. Dit resultaat uit de brainstorm is een goed voorbeeld van integraal nadenken over duurzame oplossingen. Het geeft ook de noodzaak aan om hier zo vroeg mogelijk mee te beginnen. Dit wordt bevestigd door de uitspraak van commissie Veerman dat de dreiging niet acuut is, maar de opgave wel urgent [14].

Figuur 4 toont een ander idee voor het bufferen van zoet water. Opslag van zoet water, en natuur- en recreatie ontwikkeling worden hier gekoppeld aan bestaande waterlopen en aan lage gebieden (die soms ook te maken hebben met bodemdaling ten gevolge van gaswinning). Verder is hier expliciet ruimte gezocht voor het verbouwen van biomassa (algen) met behulp van restwarmte en CO_2 uit de elektriciteitscentrales in de Eemshaven. De benodigde ruimte wordt in deze schets deels buitendijks gevonden. Er worden zachte land-zee overgangen ontwikkeld ('building with nature') teneinde door natuurlijke aanslibbing de wadden mee te laten groeien met de zeespiegelstijging. Verder is schematisch aangegeven dat het gebied Eemshaven/Delfzijl een zelfvoorzienende energieterp zal kunnen zijn. Door hergebruik van afvalwater, restwarmte en terugwinnen van nutriënten, het sluiten van kringlopen, en cascadering van water en energie, is dit bij zorgvuldige planning goed denkbaar. Verder gaat deze figuur ook uit van een grote mate van bioraffinage en zoveel mogelijk decentrale behandeling van biomassa. Over 25 jaar kunnen de technieken daar zeker voor beschikbaar zijn.

Misschien lijken deze beelden onrealistisch, luchtfietserij. De deelnemers aan de brainstormsessie hadden van tevoren ook niet voorzien dat ze deze scenario's zouden bedenken. Al doende bleek echter dat er veel meer mogelijk zou kunnen zijn dan zij aanvankelijk dachten. Uiteraard moet er nog veel nagedacht en uitgewerkt worden. Duidelijk is wel dat het streven naar duurzaamheid vraagt om een integrale lange termijnvisie en dat de initiatieven en projecten van vandaag daardoor richting kunnen krijgen.

7. Water, de 'Missing link'

De beelden ontwikkeld in het brainstormproces 'Groningen 2033' illustreren dat water een verbindende factor is tussen de thema's biomassa, energie en omgeving. Zonder water zijn de thema's op zichzelf staande eilanden. Door water worden ze verbonden en worden de krachten gebundeld. In de praktijk wordt dit nog niet altijd ingezien, water is op dit moment zelfs vaak de 'missing link'. Niet alleen bedrijven en instellingen die zich niet primair met water bezighouden zien de functie en mogelijkheden van water over het hoofd.



Figuur 5 - Water, de 'Missing link'

Ook binnen de watersector zelf wordt nog te weinig over de grenzen van de sector heen gekeken. We laten als waterprofessionals nog veel kansen liggen. Er is nog een wereld te winnen!

8. Referenties

1. Pittock, J.(2009), "Energy and water: dynamic links and challenges" in: Water 21 Magazine of the international Water Association, oktober 2009, pp. 60-62.
2. Jacobs, E. (2009), "Boodschap aan deelnemers klimaattop Kopenhagen" in: H2O, Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer, november 2009, pp. 4-5.
3. Cetaqua (2008), Report 2008, Cetaqua Water Technology Center.
4. Vijselaar, J. (2009), "Zonder convenant had ik niets voor elkaar gekregen" in: Forum, Opinieblad VNO-NCW Ondernemers, politiek en maatschappij, november 2009, pp. 10-13.
5. Lynas, M. (2008), "Six Degrees Our Future On A Hotter Planet", New York: HarperCollins Publishers.
6. Roggema et al (2008), "Probeer het eens wel

zo gek te bedenken"; Rapportage workshop klimaatbestendigheid van de watervoorziening, Allersmaborg 26 november 2008.

7. Kabat, P.(2008), Watervoorziening en verzilting, resultaten Deltacommissie Lezing tijdens de workshop watervoorziening, Allersmaborg, 26 november 2008.
8. Palsma, A.J. (2009), "Nieuwe sanitatie in Nederland?" in: Nieuwe Uitdagingen, 61e Vakantiecursus in Drinkwatervoorziening, 28e Vakantiecursus in Riolering en Afvalwaterbehandeling, januari 2009, pp. 91-100.
9. "Nederland heeft internationaal rijke ervaring met drinkwater" in: Waterspiegel, Opinieblad van de vereniging van waterbedrijven in Nederland, november 2009, pp.4-7.
10. Ministerie van VROM WWI / R&M et al (2009, juni). Bevolkingsdaling in cijfers. Bezocht op 26 november 2009, op de website van het de Vereniging van Nederlands Gemeenten: http://www.vng.nl/Documenten/Extranet/RuWo/Brochure_Bevolkingsdaling_in_cijfers.pdf.
11. Hoeven, D. van der (2007), "Groenboek energietransitie", Sittard: Platform Groene Grondstoffen.
12. Gast, M. (2009), "Grens in besparing op water bereikt" in: H2O, Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer, december 2009, pp.14-15.
13. "Afvalwater wordt belangrijke energie- en grondstoffenbron" in H2O, Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer, december 2009, pp. 16-17.
14. Deltacommissie (2008), Samen werken met water, Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. Bezocht op 26 november 2009, op de website van de Deltacommissie: http://www.deltacommissie.com/.

Prof.dr.ir. C.J.N. Buisman, dr. ir. J.W. Post

Blue Energy: from smart concept to promising technology

1. Introduction

1.1 From scientific research to technical development

Salinity-gradient energy is the energy that can be gained by mixing two flows of water with different salinity. The idea was formulated for the first time in 1954 by R. Pattle in Nature [1]. The potential of salinity power has been estimated in the 1970s on the basis of average ocean salinity and annual global river discharges to be between 1.4 and 2.6 TW [2, 3]. In The Netherlands, river water discharge and sea water are abundantly available. On average the river Rhine discharges 2,200 m^3/s. Assuming an energy potential of 1.5 MJ per m^3 of river water [4, 5], this means an electricity potential of over 6 million households (>80% of all households). Even when this river discharge can be used only to some extent, it is an enormous source of renewable energy. Furthermore, it is inherently clean and sustainable. There is no emission of CO_2 and no thermal pollution. Moreover, in principle, energy can be generated continuously 24 hrs per day and 365 days a year, unlike wind or solar energy. In theory, there are different techniques to obtain this energy. The most promising are reverse electro dialysis (RED) and partially retarded osmosis (PRO). Post et. al. [4] have pointed out that in the case of sea water and river water, the reverse electro dialysis technique would be the best choice (see process scheme in Figure 1, for explanation see [4]).

Wetsus - centre for sustainable water technology in the Netherlands - started in 2005 with the project 'Blue Energy' with a focus on reverse electro dialysis. At that time only a few scientific papers were published over a period of 50 years [1, 3, 6, 7] concerning experimental reverse electro dialysis systems. In the past few years, the performance of reverse electro dialysis on laboratory scale has improved considerably (Table 1).

The specific power or power density is probably the most important measure for performance. Although it was recognized for a long time that the power density was mainly determined by the inter-membrane distance [8], no real attempts were made to minimize the spacer thickness. The first recent attempt by Turek and Bandura [9] was not quite successful as only a power density of 0.4 W/m^2 was obtained. However, this low power density could be caused by ionic short-circuits in the system [10] due to the small current-passing area of their setup as can be seen from the low obtained open-circuit voltages. Veerman et. al. were the first to report a much

Cees Buisman
TTI Wetsus

Jan Post
KWR Watercycle Research Institute

This paper is published in
J.W. Post, Blue Energy: electricity production from salinity gradients by reverse electro dialysis, Ph.D. thesis, Wageningen University, Wageningen (2009)
and submitted in revised form to Desalination & Water Treatment: J.W. Post, C.H. Goeting, J. Valk, S. Goinga, J. Veerman, H.V.M. Hamelers, P.J.F.M. Hack, Towards implementation of reverse electro dialysis for power generation from salinity gradients.

Author	Year	Power density (W/m^2)	Spacer thickness (mm)
Pattle	1954	0.05	0.7
Weinstein and Leitz	1976	0.17	1.0
Jagur-Grodzinski and Kramer	1986	0.41	0.55
Turek	2007	0.46	0.19
Suda	2007	0.26	1.0
Veerman et al.	2008	0.95	0.2
Veerman et al.	2009	1.18	0.2

Table 1 - Obtained power density (W/m^2) and spacer thickness (mm); experiments with sodium chloride solutions, typical concentrations 0-1 g/L and 30-35 g/L NaCl [12]

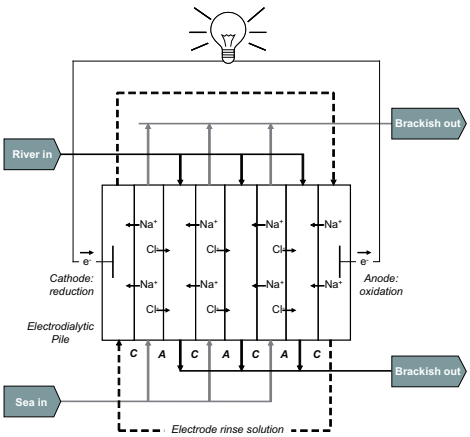
higher power density of 0.95 W/m^2 [11] and more recently [12] an even higher power density of >1.2 W/m^2. Furthermore, Post et. al. [5] showed that from mixing sea water and river water using reverse electro dialysis, in principle, a high energy recovery of more than 80 % can be obtained, which means an energy yield of >1.2 MJ per m^3 of river water.

Thus far, reverse electro dialysis experiments have typically been performed on a laboratory scale, varying from current-passing areas of just a few square centimeters [9] to hundreds of square centimeters [11] and from four cell-pairs [5] to fifty cell-pairs [12]. State-of-the-art is a stack with an active membrane area of 25x75 cm^2 and 50 cell-pairs with a power output of about 16 Watt (Figure 1; manufactured by REDstack B.V., The Netherlands). To achieve practical implementation, reverse electro dialysis still needs to be scaled-up by several orders of magnitude. These scaling-up and practical implementations are beyond the academic expertise and need to be done by specialized companies. For this reason REDstack B.V. was founded by Magneto and Harlingen Holding Industries (owner of Landustrie/Hubert), two companies participating in the Blue Energy research project of Wetsus.

1.2 Development challenges

Before starting the scale-up, the following hurdles should be overcome by the companies: (i) there are no specially developed low-cost membranes available for reverse electro dialysis, (ii) there is no vision on the requirements for stack design in relation to pre-treatment and friction losses, and (iii) there is no project to be evaluated to get the economic figures.

Ion-exchange membranes are the key components in a reverse electro dialysis system. In the 70s, Weinstein and Leitz [3] concluded that large-scale energy conversion by reverse electro dialysis may become feasible, but only with major advances in the manufacturing of ion-exchange membranes and with careful optimization of the operating conditions. Given a proper stack design, the membrane characteristics directly influence the power output [13] and energetic efficiency [5]. Moreover, the membrane price is a key issue for successful market introduction of the reverse electro dialysis technology [9].



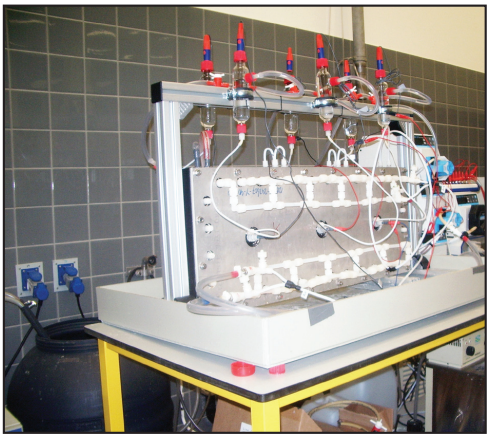


Figure 1 - Process scheme and picture of a reverse electro dialysis stack (membrane area of 25x75 cm^2 and 50 cell-pairs as manufactured for research purposes by REDstack B.V., The Netherlands).

Although mentioned in scientific papers, challenges such as the pre-treatment of river water and sea water [5], and the hydrodynamic aspects of reverse electro dialysis [14] are often ignored or underestimated. Regarding the pre-treatment, Lacey [8] assumed activated carbon filtration as pre-treatment, just to perform economic calculations. However, until now there is neither experimental basis nor a clear vision on the feed water quality requirements. This lack is probably mainly due to the fact that the pre-treatment requirements can not be seen separately from the hydrodynamic design of the reverse electro dialysis stacks. Regarding the hydrodynamics, Lacey [8] modeled the friction losses. Jagur-Grodzindski and Kramer [6] and Turek and Bandura [9] measured these friction losses and reported both the gross power output and net power output. These studies showed considerable energy losses for pumping, even under laboratory conditions without membrane fouling.

At this moment, electricity of salinity-gradient energy is still costly compared to electricity of other renewable energy sources due to high membrane prices of commercially available membranes. Reverse electro dialysis has never been applied before at commercial scale. An economic evaluation can, therefore, only be done on realistic assumptions and expectations.

1.3 Objective

In this paper, we discuss the economic and technological challenges we are facing in the scale-up of reverse electro dialysis. We take the achievements of the academic research as presented in this introduction as starting point. We focus on the following issues: (i) the development of low-cost membranes (section 2), (ii) the pre-treatment in relation to stack design and operation (section 3), (iii) an economic evaluation (section 4). Further steps towards application in practice are presented in section 5.

2. Development of low-cost membranes

2.1 Membrane requirements

Audinos [7] already mentioned explicitly the importance of membranes specially developed for reverse electro dialysis. Nevertheless, most research was done with standard electro-dialysis membranes (e.g., [3, 6, 11]). As a result, nowadays available homogeneous ion-specific membranes may be used (e.g. from Asahi Glass, Tokuyama or Fumatech [13]) as a benchmark for the development of tailor-made membranes. The requirements for the ion-exchange membranes for reverse electro dialysis are summarized in Table 2.

During the development process, it may be sufficient to use a straightforward model to evaluate the performance of the membranes with respect to the maximum power density [13]. However, we are aware that this evaluation is just a guideline to give direction to the development of membranes for reverse electro dialysis. Absolute values as calculated by a simple model are likely to overestimate the specific power since numerous assumptions (e.g. total effective membrane area available for ion transport, ideality of solutions, no depletion of feed streams) and simplifications are made. The most important uncertainty is the translation of membrane characteristics

Table 2 - Membrane requirements for reverse electro dialysis

Criterion	Requirement	Comments
Perm-selectivity	> 95% (this can be measured as in [13])	The perm-selectivity determines the membrane potential which is available as a driving force for the process, and the transport of co-ions which is in fact energy dissipation [5]
Electrical resistance	<3 Ωcm^2 (this can be measured as in [13])	The internal resistance of the stack should be as low as possible, and the lower the electrical resistance of the membranes, the lower the electrolytic short-circuits are through the manifolds [11])
Mechanical stability	Enables construction of a stack	The membranes should have enough strength to be used for stack construction. This measure is hard to be quantified, but should be part of the evaluation.
Chemical stability	Lifetime > 5 years	Mild membrane environment, no special requirements (neutral pH's, no free chlorine), although certain resistivity for cleaning agents is preferred, etc.
Cost price	< 2 €/m^2	Explained in section 4

as measured by the standard characterization methods to apparent characteristics of the same membranes when applied in a reverse electro dialysis stack.
As can be seen from the desired characteristics in Table 2, our focus is on the development of membranes with high perm-selectivity and low electrical resistance. It is difficult to optimize these characteristics of ion-exchange membranes for reverse electro dialysis since the different properties (thickness, swelling degree, ion-exchange capacity) often have a counteracting effect on these characteristics. For instance, thin membranes have a relatively low area resistance (desired) but also a low perm-selectivity (not desired).

2.2 Challenges are cost-price and production scale
Although the technical requirements are already met by currently available membranes, the cost-prices are out-of-range to make reverse electro dialysis affordable. According to Turek and Bandura [9], it is hard to believe that the price of low-resistance ion-exchange membranes may be reduced a hundred times, which seems to be the desired cost level [9].

Nevertheless, after a look at related markets, we are more optimistic that membrane prices for (reverse) electro dialysis can be reduced tremendously [4]. One should be aware of the fact that electro dialysis membranes have never had a considerable market share. Even then, on the global market, heterogeneous ion-exchange membranes can be found with very low cost-prices (< 5 US$/m^2). Of course, low-resistance ion-exchange membranes have higher prices of 100 US$/m^2 or more [9], but even these prices can be expected to fall, as manufacturing techniques improve, and the range of applications expands. Market research for related membrane applications show unit prices of installed membranes falling by an order of magnitude in 10 years, and this made Sutherland [15] to predict that the 1 US$/m^2 of installed membrane is not far off.

It should be noted that, even when the total current membrane manufacturing capacity is considered (neglecting the differences in technical specifications of membranes), this global production capacity would never be able to match the demand of membranes for power production. The global turnover in 2003 for sales and after-sales of desalination membrane modules was 1814 million US$ [15]. Assuming a cost price of <10 US$/m^2 installed membrane, this means a market of >180 km^2 of membrane per year, i.e., equivalent to the demand of one medium-sized salinity-gradient power plant. For the development of low-cost manufacturing of ion-exchange membranes and stacks, this means that besides the expertise in manufacturing of membranes also the expertise of mass production is needed.

Therefore, a comparison with the market of ionites – or more specifically of synthetic ion exchange resins - would be more appropriate than a comparison with the membrane market. The chemistry of ion exchange polymers in bead-shaped materials is comparable of that of ion-exchange membranes. Besides, ion-exchange resins can be directly used for preparation of heterogeneous membranes when they are mixed in a basically uncharged polymer membrane matrix [16, 17]. Regarding the market, ion exchangers for deionization and water softening applications can be considered commodity chemicals (excess of production capacity, limited market growth, and intense competition) with a global market volume that exceeds 0.15 million m^3 per year [18]. To get an idea, this would be comparable to a market volume of >1.500 km^2 of ion-exchange membrane per year (i.e., equivalent to several medium-sized salinity-gradient power plants), if we assume 100 μm thick membranes. Current prices for commodity ion-exchange resins are in the order of 3,000-6,000 US$/m^3 [18], indicating that a membrane price in the order of 1 US$/m^2 is indeed within reach [15].

While at the start of the membrane development for reverse electro dialysis, we paid much attention to the technical requirements and cost prices of base materials, nowadays we are focusing on high-volume manufacturing. Given the enormous amount of membrane area needed for large-scale energy conversion by reverse electro dialysis, the

scale-up of the production processes becomes more and more important. In our vision, the membranes should be manufactured on labour-extensive reel-to-reel production lines operating at high speeds. The post-processing such as alternating piling of the cation-exchange membranes and anion-exchange membranes in the required stack configuration should be automated as well.

3. Stack design related to friction loss and pre-treatment

3.1 Process design

The required water quality parameters are still unknown. Like in previous section about the membrane prices, it is tempting to look at experiences with desalination membranes. However, the usually applied pre-treatment steps [19] are probably excessive and certainly too capital-intensive to be viable for reverse electro dialysis. Besides the quality and cost aspects, also the footprint, energy consumption, and use of chemicals, would be important factors regarding the feasibility of reverse electro dialysis. We defined these requirements in Table 3.

On forehand, it should be mentioned that these requirements, are based on the assumption that the reverse electro dialysis stacks are redesigned toward a system without spacers between the membranes. If spacers were used, the question remained whether these requirements would be sufficient. Reverse electro dialysis stacks with spacers would require an even more extensive pre-treatment than conventional flat-sheet membrane systems as the distance between the membranes is less than 0.5 mm. The design of experimental reverse electro dialysis stacks were still based on the common stack design of electro dialysis with the use of screen spacers. These screen spacers, however, were identified not only as undesired insulators [5] and cause of relatively high friction losses [12], but moreover as a place for biofilm accumulation causing pressure drop increases [20] and a decline of the electrical performances. Therefore, the reverse electro dialysis stack was redesigned towards a more robust spacer-less system, using the developed computational fluid dynamics model for flat sheet membrane configurations [14]. Instead of spacers, now flow paths are formed in the membranes providing a more open design with fewer crevices for physical entrapment of solids. With a cross flow velocity of 3 cm/s it was confirmed using model calculations and experiments with an non-fouled system, that the friction loss is less than 2-3 m water column (~6-7 Wh/m^3). Assuming that each 1 m^3 water (i.e., 0.5 m^3 seawater and 0.5 m^3 river water) yields 130 Wh [5], the related pumping energy loss accounts only for 5%.

For the selection of a suitable pre-treatment technology, our aim was to find commercially available operational units that meet the self-defined criteria in Table 3. We assumed that floating coarse debris such as weed, reed, and plastics were removed from the surface water at the intake by using weirs and bar-screens. For further pre-treatment all kind of separation processes were reviewed: settling, decanting, centrifugation, filtration, hydro-cyclone, flotation, elutration, flocculation, biological treatment. Based on the criteria as given in Table 3 it was concluded that two types of filtration technologies would be suitable as pre-treatment: (i) river/sea-bank filtration or

Table 3 - Pre-treatment requirements for reverse electro dialysis

Criterion	Requirement	Comments
Separation cut-off	<50 μm	Sufficient to prevent fouling with Common or Blue Mussel (Mytilus edulis). Fertilized eggs are 60-90 μm in diameter [26].
Costs	< 1 €ct/m^3	Each 1 m^3 pre-treated water (i.e., 0.5 m^3 seawater and 0.5 m^3 river water) could yield 130 Wh ~ 1 €ct [5].
Energy consumption	< 6-7 Wh/m^3 (<2-3 m water column)	Our arbitrary aim to limit parasitic losses to < 10% of yielded energy, with a maximum of 50% for pre-treatment.
Footprint	> 15 m^3/h of capacity per m^3 reactor	Our arbitrary aim to limit the footprint. Obtained flux (m^3/m^2.h) times packing density of the reactor (m^2/m^3) could be used for indication.
Chemical use	No dosage	May be incidentally used for cleaning

(ii) mechanical filtration. Most technologies were expelled as they are too expensive and have too low fluxes or too high residence times, leading to a huge footprint and building volume.

River/sea-bank filtration also has low fluxes (0.1-1 $m^3/m^2.h$), but this open-field extraction process requires no big building volumes and could well be combined with other functions (e.g. recreation, landscape development). Sea-bank filtration is used for desalination systems with reverse osmosis membranes. The use of (vertical) beach-wells has the benefit that bank-filtrated seawater needs minimal additional pre-treatment prior to the reverse osmosis. We did not further design this pre-treatment as the applicability of beach wells is very site-specific, e.g. depending on the soil morphology. For desalination plants with a high capacity an open seawater intake is in many cases the only feasible option [21, 22]. Nowadays, new techniques are available to increase the capacity of beach wells by using drainage pipes installed in horizontally drilled holes [23].

Mechanical filtration is a more generic pre-treatment step than bank filtration. Filter media are used to remove or separate particles by steric rejection. The configuration of the micro-screen filter may have different configurations and screen fabrics. Hubert Stavoren B.V., one of the companies in our consortium, has an extensive track record on micro-screen rotating drum filters for pre-treatment of cooling water. In their configuration, the micro-screen consists of a drum, fitted along the circumference with screen panels. The drum is placed in a concrete pit or tank and rotates on a stationary hollow shaft which is provided with one or more funnel-shaped debris collectors. The feed water enters the drum axially and flows radially through the panels by gravitation (typically a level difference in the order of 10-20 cm), the dirt particles being trapped in the mesh. In order to prevent clogging of the fabric by particles, the drum rotates and the rows of screen panels subsequently pass a set of high-pressure water nozzles at the top of the drum. The dirt particles are washed from the screen and discharged through the funnel-shaped debris collector(s) and the hollow shaft.

Looking at the criteria in Table 3, the most critical factors for these drum filters are energy consumption and footprint. The high-pressure pump needed to supply the water to the high pressure nozzles (e.g., 8 bar overpressure) is the most energy consuming part of this system although the amount of pressurized backwash water is only a few percent of the filtrated water. Assuming 2% of pressurized backwash water, the net head loss is 1.6 m water column (and thus the criterion is met). In order to minimize energy consumption, the high-pressure pump is controlled by a level differential meter over the filter. Regarding the footprint, obtainable net fluxes are reasonable high even with a fabric with 50 μm pores, e.g. in the order of 20-40 $m^3/m^2.h$. The packing density of the reactor, however, is quite low (~0.5-1 m^2/m^3). The cylindrical drums with a filter area $A = \pi DL$ (diameter $D < 5$ m, length $L < 6$ m) are placed in a rectangular tank with a volume $V > D2L$, resulting in a packing density $< \pi/D$. Consequently, the treated flow rate is 10-40 m^3/h per m^3 reactor. Depending on obtainable flux and design of drum and tank, the footprint criterion can be met.

3.2 Experimental validation

In the harbour of Stavoren (Lake IJssel, The Netherlands), we tested the effectiveness of the pre-treatment. The experimental setup consisted of a rotating drum with a filter area of 1.1 m^2. The filtrate is fed to a flow-cell that represents the hydrodynamic design of a single membrane in a full-scale reverse electro dialysis stack with membrane-integrated flow patterns (Figure 2). During successive experimental runs, the screen panels were covered with different types of fabrics to test the flux and energy consumption of the pre-treatment. Also the pressure-drop over a flow cell was measured to test the effectiveness of the pre-treatment.

The capacity of the filter was depending strongly on the chosen fabric and the pore size. We took comparable synthetic fiber materials with pore sizes of 20 μm and 50 μm and tested the maximum flux to be 22 $m^3/m^2.h$ and 50 $m^3/m^2.h$, respectively. These filter fabrics, however, were not reliable enough as pre-treatment in cases of failures with

Table 4 - Pre-treatment experimental results

Season		**Filter drum**		**Head losses (meter water column)**					
24-31	Water temp	Pores	Flux	Filter drum		Membrane		Total	
Days	°C	µm	m/h	avg	max	avg	max	avg	max
Summer	17-19	50	21	1.87±0.17	2.92	1.23±0.05	1.30	3.10±0.70	4.12
Winter	5-7	50	18	0.36±0.34	1.18	2.06±0.27	2.70	2.41±0.45	3.30
Spring	12-14	40	27	0.96±0.46	1.69	1.80±0.19	2.09	2.75±0.58	3.55

the backwash. When a support layer is added to the 50 µm fabric to gain mechanical strength and robustness, the maximum flux decreased to 21 $m^3/m^2.h$. This is worse when compared to a stainless steel fabric with 40 µm pores with a maximum flux of 43 $m^3/m^2.h$.

With the latter two fabrics (i.e., the reinforced synthetic fabric with 50 µm pores and the stainless steel fabric with 40 µm pores), we were able to measure the energy consumption and the effectiveness of the filter over longer periods without interruptions (Table 4). The energy consumption of the filter drum was very much dependent on the seasonal water quality. During summer season with elevated water temperature (17-19 °C) the high-pressure pump was switched on more frequently than during the winter season wit low water temperatures (5-7 °C), causing a monthly average net head loss of 1.87±0.17 and 0.36±0.34 meter of water column, respectively. Even in summer period, the criterion for the energy consumption is met (Table 3), not only with the monthly average, but even with a once measured maximum of a net head loss of 2.92 meter water column.

During the test periods, the pressure drop over the flow cell (membrane) did not increase, indicating that the filter drum was effective as pre-treatment.

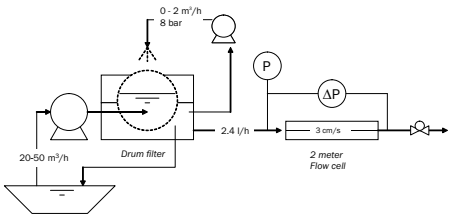


Figure 2 - Experimental setup to test the capacity and energy consumption of a drum filter and the effectiveness of this pre-filtration on a flow cell which represents the hydrodynamic design of a single membrane in a full-scale reverse electro dialysis stack.

The pressure drop appeared to be dependent on seasonal temperature fluctuations, the lower the water temperature, the higher the head loss across the flow paths in the membrane. The total energy consumption in all cases met the objectives for pumping power losses.

4. Economic feasibility

4.1 Designing a 200 kW module

To get a view on construction costs, we designed a module of 200 kW (net) in 40ft sea container frames. A full-scale plant can contain multiple of these modules. A modular design has the advantage that a localized breakdown can be fixed very soon, and only a small part (200 kW) of the total plant capacity has to be stopped in case of maintenance. One frame contains six reverse electro dialysis stacks (Figure 3) with a total effective membrane area of 100,000 m^2.

The calculated power density is 2 W/m^2, according to the model presented by Post et al. [4, 5], with an energy recovery of 70%. The gross power output is 220 kW, but about 10% of this is subtracted for pumping power losses and DC/AC conversion. Most piping and fittings are located outside the frame. These are sufficiently dimensioned for the supply and distribution of 0.2 m^3/s fresh water and 0.2 m^3/s salt water, and for the discharge of 0.4 m^3/s brackish water. The interconnecting pipes between the feed headers and included valves enable a reversal of feed flows (salt water side becomes fresh water side, and vice versa) and a reversal of feed direction (supply header becomes collection header, and vice versa). This provides the possibility to clean the systems by applying osmotic shocks and to wash out the remnants of detached biofilms, respectively. Furthermore, each unit has its own electrical connection.

Another frame contains two rotating drum filters

Table 5 - Cost break-down for a 200 kW reverse electro dialysis unit on surface waters (in case of very clean industrial feed waters the costs for pre-treatment might be lower, resulting in a lower kWh-price)

Part	Construction costs (€)	Annual costs (€/y) Capex[3]	Opex[4]	Total	Cost price (€/kWh)[5]
Frame with RED stacks[1]	200,000	37,000	6,000	43,000	0.027
Piping, fittings & pumps[2]	320,000	28,000	10,000	38,000	0.024
Frame with filter drums[2]	370,000	32,000	11,000	43,000	0.027
Total	890,000	97,000	27,000	124,000	0.079

[1] Membrane lifetime 7 years; [2] Depreciation in 20 year; [3] Annuity depreciation: discount rate 6%; [4] Operation and maintenance: 3% of construction costs; [5] Production of 8,000 hours per year (base load)

for the pre-treatment of both feed flows. Assuming a diameter D = 1.7 m and a length of L = 4.5 m per filter, the area per filter is 31 m^2. Assuming a flux of 30 $m^3/m^2.h$, the filter can easily supply the required 0.2 m^3/s. Since the filtrate comes out at atmospheric pressure, it is logical to locate the filter drums on a little higher level than the stacks (e.g., filter drums on the first floor and stacks on the ground floor), enabling a gravitational flow from drum filter through the stacks to the outlet. With this hydraulic line, the feed pumps raise the level of the water from the inlet water surface to the water level within the filter drums, i.e., to a level of 5 m above the water level of the brackish water outlet. The actual head which has to be delivered by the pumps depends on the water level differences between intake and outlet.

A cost break-down was made (Table 5) by using detailed cost calculations from the supplying companies. Hubert made a cost calculation for drum filters with a concrete pit, according to Hubert's standardized specifications. Landustrie made a cost calculation for piping, fittings and pumps, based on a bill of quantities and standardized overhead for construction. For the reverse electro dialysis stacks, the assumption was made of an installed membrane price of 2 €/m^2 (i.e., including end plates and electrodes). The mechanical and electrical construction for components of a 200 kW unit is less than 900,000 €. The cost price is less than 0.08 €/kWh.

It appears that each component has about an equal contribution to the cost-price. However, is should be noted that the cost price is most sensitive to changes in the assumed membrane price and lifetime expectancy (all other components contain proven technologies with less uncertainties and a typical deviation of less than 20%). A sensitivity analysis is worthwhile to perform, not only for assessing the feasibility but also for getting a view on the development path (see section 5). For a first generation, a higher membrane price would be acceptable. For instance, if on short term a membrane price can be achieved of 10 €/m^2 (5 times the aimed cost price), the contribution of

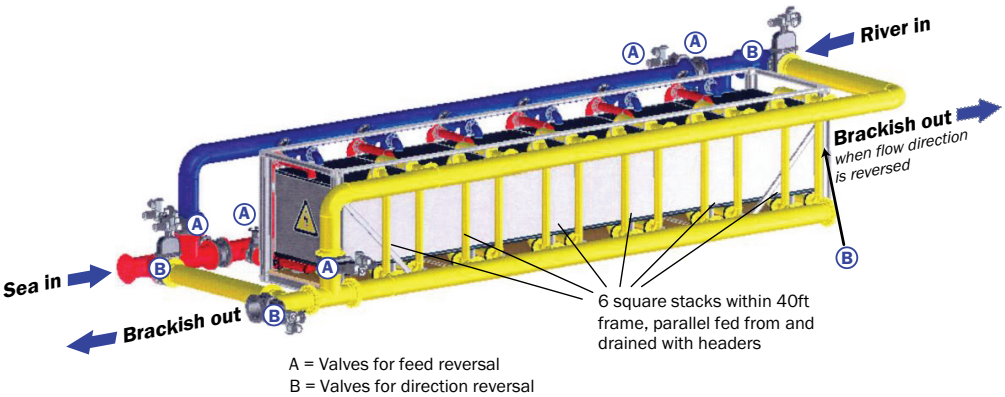


Figure 3 - A 200 kW (net) unit with six reverse electro dialysis stacks in a 40 ft sea container frame.

the membranes to the kWh price would be 0.14 €/kWh, thus already resulting in a quite acceptable total cost price of 0.20 €/kWh.

4.2 Cost estimation for a 200 MW plant

With the 200 kW unit as a repetitive unit, a cost estimation could be made for a 200 MW plant consisting of 1,000 units. For the mechanical and electrical part, the investment costs of such a plant would benefit to a certain extent from the economy of scale. Instead of two small feed pumps per module, two pumping stations can be built for the total plant, for instance, each with 16 screw pumps of 12.5 m^3/s with an average lift of 5 m. The mechanical and electrical investments for a 200 MW plant would, therefore, not exceed 900 million € (i.e., 1,000 times the construction costs of a 200 kW module).

However, on the other hand, a site should be purchased and an industrial building needs to be built. The total volume of buildings is in the order of 200,000 m^3. Taking into account a heavy construction and foundation due to the large amounts of water, the construction costs could be as high as 100 million € (i.e., a cost price of 500 €/m^3). Moreover, site-specific additional infrastructure could be a large investment. However, these costs for buildings and infrastructural works do not influence the overall cost price too much. This can be explained by the long lifetime expectancy of 40 years and relatively expenditures for operation and maintenance. For a 200 MW power plant, each 100 million € of investment in civil engineering would add 0.005 € to the cost price of a kWh.

4.3 Comparison with wind energy

In order to evaluate the impact of a 200 MW salinity-gradient power plant, a comparison is made with wind energy. With a load factor of ~90% (8,000 hours per year base load), such a reverse electro dialysis plant delivers on annual basis 1.6 billion kWh to the public network, which is enough for over 0.5 million households. In 2007, all 1,800 existing wind turbines in The Netherlands produced on annual basis 3.7 billion kWh [24]. A salinity-gradient power plant of this size would have a significant contribution to the green electricity production of the country.

Meanwhile, also in wind energy a lot of technical progress has been made. In the near future, new wind turbines will be able to produce 3-5 MW at peak power [24, 25]. These modern wind turbines have a diameter of approximately 100 meters, and the height of the axis is found 80 meters above ground level. When calculating the number of new wind turbines that are necessary to produce the same amount of electricity as the salinity-gradient power plant of 200 MW, the differences in load factors should be taken into account (25-30% for wind turbines; 90% for salinity-gradient power). One can find that 140-240 wind turbines are needed. With a mutual distance of approximately 200 m this would imply a line of 30-50 kilometers. The impact on the landscape is obviously bigger than that of a salinity-gradient power plant. Assuming the investment costs for wind turbines to be 1-2 €/W [25], the investment costs are 700-1.400 million €. Investment costs and cost prices of both technologies are thus comparable.

5. Further steps

5.1 Aimed location for first power plant

In the Netherlands, five locations have been identified for salinity-gradient energy. Two of these locations provide the opportunity for a large scale application, being the Afsluitdijk and the Dutch Delta. The Dutch Delta is interesting because of the enormous fresh water discharge, but requires more complicated infrastructural works. Despite of initial skepticism about applicability in the Dutch Delta [25], a recent model study showed that several alternative locations for salinity-gradient power plants of over 500 MW each are available [24]. On the shorter term, however, the ideal spot to realize reverse electro dialysis is the 30-km long Afsluitdijk in the North of The Netherlands (Figure 4).

This dyke separates the 1100-km^2 fresh Lake IJssel from the saline Waddenzee. In 1932 the lake was formed by closing of the Zuiderzee, the estuary of a couple of rivers with an average flow of 450 m^3/s. The dike provides a strict separation of salt and fresh water. Large outlet sluices discharge water from the lake onto the Waddenzee. Discharging

the fresh water is not a continuous process but depends on tide levels on the Waddenzee.

The flow that can be used for salinity-gradient energy at this location is quite large, i.e. on average 450 m^3/s. Statistic model calculations should verify that this flow can be made available for power generation during the main part of the year (in summer time less fresh water is available than in winter time). This should, however, not be a big issue given the fact that upstream the discharge distribution can be regulated to guarantee this discharge. Moreover, given the fact that Lake IJssel already serves as a fresh water storage, the lake can be used to absorb differences in the availability of fresh water.

The salinity of Lake IJssel is very low, around 0.2-0.5 g/L. The salinity of the Waddenzee is difficult to determine due the discontinuous discharging process of the outlet sluices. Every time the sluices open their gates, a large fresh water bubble builds up. This bubble influences salt concentrations in the sea. Hydraulic models should be used to verify that in case all water from the Lake IJssel is continuously mixed with water from the Waddenzee in a salinity-gradient-power plant, the salinity would be almost as high as that of the North Sea of around 28 g/L. This salinity could be reached due to a better mixed Waddenzee (continuous discharge of brackish water instead of fresh water bubbles) and due to the use of dominant flows at the Waddenzee along the dike that provides the possibility of an upstream sea water intake and downstream brackish water release. Eventually, an additional embankment perpendicular to the Afsluitdijk is needed to enhance the separation of salt water and brackish water (Figure 4).

5.2 Scale-up: from pilot to full-scale

Before implementing reverse electro dialysis on a commercial scale, the feasibility of the technology should be proven in practice. The promising research and development of the technology raised interest of different industrial and energy companies and water authorities to invest in pilot facilities at the Afsluitdijk. Thus far, we are happy to find suppliers that are really prepared to take the opportunity to develop a prototype of a production line without an actual order for square km's of membranes. At this stage of the project, we focus on consortium building, with customers entering into technical development agreements with suppliers, joint design and test programs. The involved parties agreed on the following development path for scale-up of the system Table 6.

5.3 Other issues for study

Reverse electro dialysis is a clean and sustainable technology. The sustainability should be further analyzed and proven in the near future based on the experiences from these pilots and demonstration plants. Currently, expectations are based on the construction and production of a power plant and its components; however, attention should also be drawn to the processing of the used materials (especially the membranes) at the end of their lifetime.

When applying salinity-gradient energy at a large scale it might be necessary to change the hydraulic system and water management rules, because a lot of fresh and salt water is needed. These measures should fit within legislation and

Table 6 - Development path of reverse electro dialysis scale-up

Project	Scale	Aim
2008-2010 Pilot on industrial water flows	kW-scale	First step out of the laboratory. Pilot on saline flows in a salt factory of Frisia in Harlingen (Financial supported by SenterNovem, Innowator project).
2008 Engineering of pilot on surface waters	-	Feasibilty study and definition of requirements for a pilot on the Afsluitdijk (Private funding, 2008).
2010-2012 Pilot on surface waters	20-50 kW	Pilot on sea water and river water at the Afsluitdijk. Focus on 'design to work'.
2013-2015 Demonstration plant on surface waters	1 MW	Demonstration on sea water and river water at the Afsluitdijk. Focus on 'design to cost'.

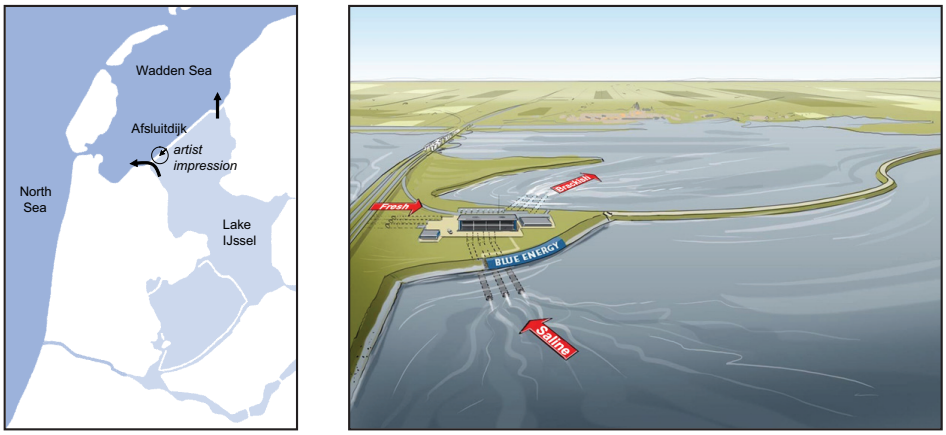


Figure 4 - Map and artist impression of a salinity-gradient power plant at the Afsluitdijk (source: Rijkswaterstaat).

regulations. The impact on the environment and ecological system (e.g., flora and fauna, water quality, bank morphology) of changing nutrient flows, sediment transport, changing local salinities and gradients, building a power plant etc., should be entirely studied on short notice. Also other interests of the water system (shipping, recreation) and infrastructural works (protection, water management) should be taken into account. These aspects will be crucial for the decision making process. Therefore, we take care of partnering with knowledge institutes of different disciplines, like hydraulic engineering and water resources management.

6. Acknowledgements

We thank Sjoerd Stelwagen (Landustrie) for preparing Figure 3. We thank Mr. Bernard B. Bligh, thermodynamics expert and inventor of several patents on reverse electro dialysis (GB 2197116, GB 2195818 and GB 2194855), for his valuable comments. The Senter Novem organization is gratefully acknowledged for their grants within the New Energy Research programme. We thank the European Membrane Institute and Kema for their work for REDstack B.V. on membrane development. We thank Wetsus and especially the other participating companies Nuon, Frisia Zout, Eneco, Dow Chemical, and Fujifilm, for their partnership.

7. References

1. Pattle, R.E., Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile, Nature 174(4431) (1954), p. 660-660.
2. Wick, G.L. and W.R. Schmitt, Prospects for renewable energy from sea, Marine Technology Society Journal 11(5-6) (1977), p. 16-21.
3. Weinstein, J.N. and F.B. Leitz, Electric-power from difference in salinity - dialytic battery, Science 191(4227) (1976), p. 557-559.
4. Post, J.W., J. Veerman, H.V.M. Hamelers, G.J.W. Euverink, S.J. Metz, D.C. Nymeijer and C.J.N. Buisman, Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electro dialysis, Journal of Membrane Science 288 (2007), p. 218-230.
5. Post, J.W., H.V.M. Hamelers and C.J.N. Buisman, Energy recovery from controlled mixing salt and fresh water with a reverse electro dialysis system, Environ Science Technology 42 (2008), p. 5785-5790.
6. Jagur-Grodzinski, J. and R. Kramer, Novel process for direct conversion of free-energy of mixing into electric-power, Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development 25(2) (1986), p. 443-449.
7. Audinos, R., Electro dialyse inverse. Etude de l'énergie électrique obtenue à partir de deux solutions de salinités differentes, Journal of Power Sources 10 (1983), p. 203-217.
8. Lacey, R.E., Energy by reverse electro dialysis, Ocean Engineering 7(1) (1980), p. 1-47.

9. Turek, M. and B. Bandura, Renewable energy by reverse electro dialysis, Desalination 205 (2007), p. 67-74.
10. Bligh, B.R., Several British patents (GB 2197116, GB 2195818 and GB 2194855). 1988.
11. Veerman, J., J.W. Post, S.J. Metz, M. Saakes and G.J. Harmsen, Reducing power losses caused by ionic shortcut currents in reverse electro dialysis stacks by a validated model, Journal of Membrane Science 310 (2008), p. 418-430.
12. Veerman, J., M. Saakes, S.J. Metz and G.J. Harmsen, Reverse electro dialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. Journal Of Membrane Science 327 (2009), p. 136-144.
13. Długołęcki, P., D.C. Nymeijer, S.J. Metz and M. Wessling, Current status of ion exchange membranes for power generation from salinity gradients, Journal Of Membrane Science 319(1-2) (2008), p. 214-222.
14. Dirkse, M.H., W.P.K. van Loon, J.D. Stigter, J.W. Post, J. Veerman and G.P.A. Bot, Extending potential flow modeling of flat-sheet geometries as applied in membrane-based systems, Journal of Membrane Science 325 (2008), p. 537-545.
15. Sutherland, K., Profile of the international membrane industry: Market prospects to 2008. 2003, Amsterdam: Elsevier. 184.
16. Schauer, J., L. Brozova, Z. Pientka and K. Bouzek, Heterogeneous ion-exchange polyethylene-based membranes with sulfonated poly (1,4-phenylene sulfide) particles, Desalination 200 (2006), p. 632-633.
17. Molau, G.E., Heterogeneous ion-exchange membranes, Journal of Membrane Science 8 (1981), p. 309-330.
18. Volesky, B., Markets for ion exchange resins and biosorbents, in “Biosorption technology” Company Brochure - Business Plan Summary. access date 2009-04-16, BV Sorbex, Inc.: St. Lambert (Montreal), available from http://www.bvsorbex.net/sxMarkets.pdf.
19. Van der Hoek, J.P., D.O. Rijnbende, C.J.O. Lokin, P.A.C. Bonné, M.T. Loonen and M.H. Hofman, Electro dialysis as an alternative for reverse osmosis in an integrated membrane system, Desalination 117 (1998), p. 159-172.
20. Vrouwenvelder, J.S., S.A. Manolarakis, J.P. van der Hoek, J.A.M. van Paassen, W.G.J. van der Meer, J.M.C. van Agmaal, H.D.M. Prummel, J.C. Kruithof, and M.C.M. van Loosdrecht, Quantitative biofouling diagnosis in full scale nanofiltration and reverse osmosis installations, Water Research (42) (2008), p. 4856-4868.
21. Malfeito, J.J., J. Diaz-Caneja and A. Jimenez, Innovative sea water intake for reverse osmosis desalination plants, International journal of nuclear desalination (2008), p. 3-10.
22. Anderson, D.J., W.A. Timms and W.C. Glamore, Optimizing subsurface well design for coastal desalination water harvesting, Australian journal of earth sciences (2009), p. 53-60.
23. Peeters, T. and D. Pintó, Seawater intake and pre-treatment/brine discharge – environmental issues, Desalination 221 (2008), p. 576-584.
24. Quak, R.W., Blue energy in Dutch delta: Feasibility of a power plant, in Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Department of Hydraulic Engineering. 2009, Delft University of Technology: Delft. p. 119.
25. Duurzaamheid duurt het langst. 2007, Amsterdam: Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen.
26. Tyler-Walters, H., Mytilus edulis. Common mussel., in Marine Life Information Network: Biology and Sensitivity Key Information Sub-programme. 2008 (access date 2009-01-14), Marine Biological Association of the United Kingdom: Plymouth, available from http://www.marlin.ac.uk/species/Mytilusedulis.htm.

Prof.dr.ir. J.K. Vrijling

Wat kost energie uit water?

Han Vrijling
Technische Universiteit Delft

1. Inleiding

Bijna iedereen heeft ideeën over duurzaamheid, energiebesparing, duurzame energiebronnen als zonne-, wind- of getijenergie, elektrische auto's; alles met het doel het gebruik van fossiele energie en de daarmee samenhangende uitstoot van CO_2 te beperken.
Dit zijn typisch vraagstukken voor de technische wetenschappen, maar men vindt het belang te groot om het aan 'techneuten' over te laten. Iedereen heeft nieuwe oplossingen en lanceert die, nauwelijks gehinderd door historisch besef of technisch inzicht.
De technische wetenschappen combineren wiskunde, natuurkunde (scheikunde en eventueel biologie) en economie om machines of kunstwerken te creëren die de welvaart en het welzijn van de mensheid vergroten. Dat is, getuige het huidige niveau van welvaart en welzijn, uitstekend gelukt, hoewel er ook wel minder gunstige bijwerkingen zijn geweest. Soms zijn die ongunstige bijwerkingen ook het gevolg van een veranderende smaak van de mensheid en kunnen we dat de ontwerpers niet kwalijk nemen. Zo werd er in de zestiger jaren 'zoet water voor de landbouw' gemaakt in de zuidwestelijke delta, maar tegenwoordig lijkt men zonder meer de voorkeur te geven aan zoute getijdenwateren en tracht men de 'milieuschade van de afsluitingen' te herstellen.

Omdat ook voor de grootste hoeders van het milieu de natuurwetten blijven gelden, gaan we in deze bijdrage na in hoeverre de oplossingen die in de media gelanceerd worden reëel zijn in het licht van de natuurwetten.

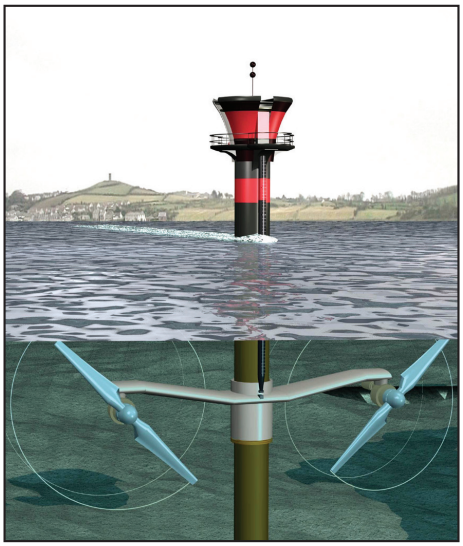
2. Molens of turbines?

In tal van publicaties ziet men tegenwoordig tekeningen van onder watermolens, windmolens die onder water staan en die worden aangedreven door de getijstroom. Merkwaardig dat onze voorouders nooit op dat idee gekomen zijn en steeds schepraderen of turbines in dammen hebben gebouwd als zij energie uit het getij wilden winnen. Dit is toch veel eenvoudiger.

Het vermogen van een windmolen en ook van een dergelijke watermolen wordt bepaald door de volgende formule:

$$P = \tfrac{1}{2}\, \eta\, \rho\, A\, v^3$$

waarin η = rendement (beperkt door het theorema van Betz $\eta < 16/27$)



Figuur 1 - Een voorbeeld van een watermolen

ρ = soortelijke massa
A = door wieken bestreken oppervlak πR^2
v = stroomsnelheid

Voor een turbine in een dam met daarover een verval H geldt dat het vermogen gelijk is aan:

$$P = \eta \rho g H Q$$

waarin g = zwaartekrachtsversnelling
Q = debiet = A v

Met het inzicht dat $H = v^2/2g$ kunnen beide formules geschreven worden als:

$$P = \eta \rho g A H v$$

Doordat het rendement van de molen theoretisch beperkt is tot 59 %, maar praktisch tot 35%, terwijl dat van een turbine gemakkelijk de 90% overtreft vinden we

$$\frac{P_{turbine}}{P_{molen}} = \frac{\eta_{turbine}}{\eta_{molen}} = \frac{0.90}{0.35} = 2.6$$

dat een turbine bijna driemaal efficiënter is dan een molen. Vandaar de voorkeur van onze ouders. En misschien is het een idee windmolens in een muur te bouwen. In zekere zin gebeurt dat door ze op de kam van heuvelruggen te plaatsen.

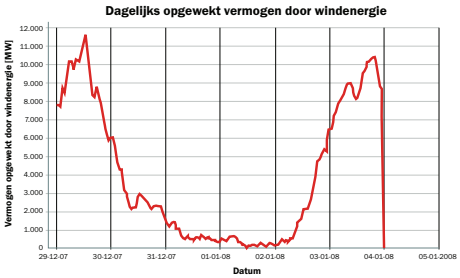
3. Het energie-eiland

Er zijn ook plannen een energie eiland te bouwen. Het blijkt daarbij te gaan om een eiland met een diep gelegen reservoir om energie op te slaan. Het diepe reservoir wordt leeggepompt en als er energie nodig is laat men het omringende zeewater via turbines in het reservoir stromen. Vroeger, zo rond 1986, was er het Plan Lievense. Daarbij werd volgens het zelfde beginsel energie opgeslagen in een hoog gelegen reservoir. In beide gevallen is de energie afkomstig van windmolens.
In het huidige plan is sprake van 1000 windmolens van 1MW, zodat het totale vermogen 1000 MW bedraagt. Dergelijke windmolens hebben een wiekdiameter van circa 60m en moeten 2 à 3 maal de diameter uit elkaar staan, zodat de totale rij 120 tot 180 km lang is.

De ervaring leert dat een windmolen gemiddeld slechts 25% van de tijd zijn volle vermogen levert. Daardoor zal het park per dag gemiddeld 6 GWu leveren. Als we die energie omzetten met een pomprendement van 90% en later terugwinnen met een turbinerendement van 90% is het totale rendement 0.9x0.9 = 0.8 en levert het energie eiland dus gemiddeld 4.8 GWu per dag. Dat is een vermogen van 200 MW gemiddeld of een piekvermogen van 1000MW gedurende 4,8 uur.
Ter vergelijking een normale thermische centrale heeft een continu vermogen van 700 MW.
Als we voor een dag energie willen opslaan moet de energie-inhoud van het reservoir 0.9x6 GWu = 5,4 GWu zijn.
De energie-inhoud van een reservoir met gemiddelde hoogte H = 35m en een actieve laagdikte ΔH = 10m en een diameter van 2,7 km voldoet daaraan.
Het grondverzet nodig voor een 35+5=40m hoge cirkelvormige dam of een rond reservoir met een bodem 40m beneden zeeniveau met een dam ter hoogte van de zeediepte ter plaatse kan nu worden berekend.

Diep reservoir:
Bassin 117 Mm^3 + Dijk 12 Mm^3 = 129 Mm^3
Hoog reservoir:
Dijk 32 Mm^3 = 32 Mm^3

Opvallend is dat een diep reservoir met taludhelling 1:2 bijna 4x het grondverzet van een hoog reservoir vraagt. De vraag of het aldus gewonnen zand kan worden verkocht wordt hier gepasseerd evenals het vraagstuk van de stabiliteit van de taluds van het diepe reservoir. Een beschouwing van het windklimaat toont dat 1



Figuur 2 - De karakteristieken voor wind energie input in Duitsland

dag opslag onvoldoende is.
Voor een opslag van vier dagen is een capaciteit van 22 GWu nodig en een reservoir met een diameter van 5,4 km. Het bijbehorende grondverzet bedraagt

Diep reservoir
Bassin 471 Mm^3 + Dijk 24 Mm^3 = 495 Mm^3
Hoog reservoir
Dijk 65 Mm^3 = 65 Mm^3

Een globale raming van de bouw- en exploitatiekosten, die grote kans maakt met een factor π te worden overschreden geeft:

Kosten	**1 dag**	**4 dagen**
Windturbines 1000 x 1M€	1000	1000 M€
Waterturbines 200 x 3M€	600	600 M€
Bassin 129 of 495 x 3€/m^3	387	1500 M€
Totaal	1987	3100 M€

Jaarlasten 10% 199 of 310 M€ per jaar
Kostprijs elektriciteit 0.12 of 0.18 €/kWu

Bij een marktprijs van elektriciteit van circa 0,05 € /kWu vergt een energie-eiland dus meer dan 60 % subsidie om concurrerend te zijn.

4. IJsselmeer en getijcentrale

De recente Deltacommissie stelt voor het peil van het IJsselmeer met meer dan 1m te verhogen. Dit geeft in de eerste plaats de mogelijkheid zoet water op te slaan en in de tweede plaats vermijdt men hiermee de bouw van een gemaal op de Afsluitdijk om het water van de IJssel uit te slaan naar zee. Dit is nodig in verband met de verwachte zeespiegelrijzing van meer dan 1m. Het voortdurend pompen zou allereerst in strijd zijn met de beginselen van duurzaamheid, maar het lijkt ook onbegonnen werk om een hele rivier naar buiten te pompen. Hoe de verhoging van het IJsselmeerpeil politiek gestalte moet krijgen gezien de enorme schade die dit langs de oevers zal veroorzaken, laten we hier onbesproken.

Interessant zijn de plannen om een getijcentrale in de Afsluitdijk te bouwen. Er wordt een vermogen van 60 MW genoemd, een capaciteit gelijk aan circa 1/10 thermische centrale.
Om zoutoverlast op het zoete meer te voorkomen voorzien de plannen in een fraai eivormig bekken met brak water, de Waterlely (figuur 3).
Aangezien het verval over de Afsluitdijk beperkt is tot ongeveer 0,75m is het interessant uit te rekenen met de boven gegeven formule welk debiet vereist is om de 60 MW op te wekken. Dat blijkt Q = 9000m^3/s te zijn of bijna 4 maal de gemiddelde afvoer van de Rijn.
De centrale zou 85 turbines met een diameter van 6m moeten bevatten om dat aan te kunnen. Door het lage verval wordt de kostprijs van de elektriciteit 0,20 – 0,40 €/kWu
Nu de debieten voor de getijcentrale bekend zijn, is het aardig om nog even te kijken of het uitpompen van het IJssel-debiet inderdaad zo'n onzalig idee is. De gemiddelde afvoer van de IJssel bedraagt 265 m^3/s . Bij een opvoerhoogte van 0,75m (zeespiegelrijzing) bedraagt het benodigde gemiddelde vermogen 2 MW, slechts 1/30 van de getijcentrale.

De vraag of een dergelijk gigantisch gemaal realistisch is valt gemakkelijk te beantwoorden. Het recent uitgebreide gemaal van IJmuiden heeft een capaciteit van 260 m^3/s en een vermogen

Figuur 3 - Schetsplan Waterlely

van 2200 PK. Het gemaal op de Afsluitdijk valt dus volledig binnen de huidige technische mogelijkheden terwijl het pas rond 2200 nodig zal zijn.

5. Elektrische auto

De kranten staan vol met verhalen over het vervoermiddel van de toekomst: de elektrische auto. President Obama heeft hem zelfs tot een hoeksteen van zijn beleid gemaakt. General Motors heeft zijn 50 miljard dollar steun ontvangen ondermeer in ruil voor de verplichting een elektrische auto op de markt te brengen. Op elke auto zou een subsidie van $8000 van toepassing zijn.

Opmerkelijk is dat de autofabrikanten tot nu toe gedraald hebben om deze schijnbaar eenvoudige oplossing voor het milieu op de markt te brengen. Weliswaar is de Toyota Prius, een hybride al bijna 10 jaar op de markt, maar het is bij Toyota en ook bij de andere producenten bij dat ene model gebleven.

Laten we eens rekenen aan de elektrische auto. Allereerst het gegeven dat 1 liter dieselolie circa 10 kWu aan energie bevat. Een moderne kleine dieselauto rijdt daarop 20km, zodat het bruto energieverbruik 0,5 kWu/km bedraagt. Het rendement van een dieselmotor is echter beperkt tot 30%. Dat betekent dat het netto energieverbruik van een lichte auto 0,17 kWu/km is.

Behalve GM zal ook Renault een elektrische auto op de markt brengen. Deze Leaf heeft een motorvermogen van 80kW en een accucapaciteit van 24 kWu. Dat is dus bruto gelijk aan 2,4 liter diesel, maar door het hoge rendement van de elektromotor in vergelijking met de diesel is het netto 8 liter. De Lithium-ion accu weegt 220 kg terwijl 8 liter diesel nog geen 8kg weegt.
De actieradius van de Leaf is beperkt tot zeg 8l x 20 km/l = 160 km (of 24/kWu/0.17kWu/km). Dat is een verrassende beperking voor de moderne automobilist, die een actieradius van 800km gewend is.

Het laden van de Leaf neemt een hele nacht of 12 uren in beslag. Dat lijkt erg lang. Waarom kan dat niet korter? Allereerst zijn er de beperkingen van de chemie van de accu, maar als we die even vergeten blijken ook de vereiste laadvermogens een probleem te zijn voor de elektrische installatie van ons huis. Om de accu van 24 kWu in 12 uur te laden is een laadvermogen van 2kW nodig. Dat is een flinke elektrische kachel! Een stroom van 9A. Bij twee kachels branden de stoppen van 16A door. Uit onderstaande tabel blijkt het sneller laden van de elektrische auto dus een groot probleem te zijn voor de installatie van een doorsnee Nederlandse woning.

Tabel 1 - Laadtijden, laadvermogen en laadstroom

Laadtijd in u	Laadvermogen	Laadstroom
12	2 kW	9A
1,2	20 kW	90A
0,12	200 kW	900A

Er zal dus nog veel ontwikkeling nodig zijn op het gebied van de accu en het elektriciteitsnet voordat de elektrische auto algemeen gebruikelijk is.
Verder heeft u zich waarschijnlijk nooit gerealiseerd hoeveel energie u in 5 minuten in uw auto giet bij het tanken aan de pomp.

6. Conclusies

Er worden tegenwoordig in de media talloze ideeën gelanceerd om de wereld duurzamer te maken, energie te besparen en de CO_2 uitstoot te beperken. Windenergie, getijenenergie, elektriciteit worden als kansrijke alternatieven gepresenteerd, maar het doordenken van de voorstellen volgens de beginselen der technische wetenschappen raakt

te ver op de achtergrond.
Bij een andere analyse van de voorstellen, die van water en wind gebruik maken en die voor een waterbouwkundige enigszins zijn na te rekenen, blijkt dat de plannen theoretisch misschien wel mogelijk zijn, maar praktisch een zodanige omvang met zich brengen dat ze economisch niet haalbaar zijn.

Ook blijkt het door wind en getij geleverde vermogen een orde kleiner te zijn dan wat gebruikelijk is bij de huidige thermische elektriciteitscentrales.
Daardoor zullen het waarschijnlijk nog lang zowel technisch als economisch randverschijnselen blijven.
Tot slot is een kleine analyse gemaakt van de tegenwoordig veel geroemde elektrische auto. Het lijkt niet eenvoudig, die een actieradius te geven, die vergelijkbaar is met de huidige auto met verbrandingsmotor. Ook blijkt het vermogen van de elektriciteitsinstallatie van het doorsnee-woonhuis snel een beperkende factor te zijn voor het gebruik van de e-auto.

Uit de voorbeelden blijkt steeds weer dat ook de meest milieuminnende oplossingen ten minste moeten gehoorzamen aan de natuurwetten om te kunnen slagen.

Dr.ir. J.P. van der Hoek MBA

Energie in de watercyclus

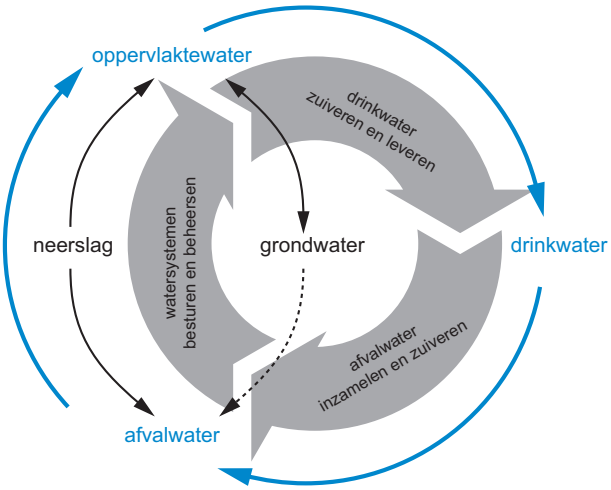
Jan Peter van der Hoek
Waternet

1. Inleiding

De relatie tussen energie en water wordt steeds belangrijker. Water is een energiedrager, maar water kan zelf ook energie bevatten, hetzij thermische energie (koude of warmte), hetzij chemische energie (o.a. in de vorm van organische stof). De relatie tussen energie en water kan door waterbedrijven om verschillende redenen worden benut: om klantprocessen te verbeteren, om nieuwe diensten te ontwikkelen, maar vooral ook om klimaatneutraal te opereren. Voor een watercyclusbedrijf liggen er veel mogelijkheden doordat een dergelijk bedrijf zich bezighoudt met oppervlaktewater, drinkwater, afvalwater en grondwater. Welke opties bieden de beste kansen? Wat is er nodig om die kansen te verzilveren?

2. De watercyclus

Als we het hebben over energie in de watercyclus, zullen we eerst duidelijkheid moeten scheppen over wat we nu verstaan onder de watercyclus. De watercyclus is schematisch weergegeven in figuur 1: het is de integrale benadering van drinkwater zuiveren en distribueren, afvalwater inzamelen en zuiveren, en watersystemen besturen en beheersen.



Figuur 1 - De watercyclus.

Dit is het concept dat Waternet hanteert, het eerste watercyclusbedrijf van Nederland. De watercyclus is opgebouwd uit de verschillende “watertypen” waarmee we te maken hebben

in watermanagement in de breedste betekenis van het woord: oppervlaktewater, grondwater, drinkwater en afvalwater. Deze watertypen zijn in de watercyclus op de één of andere manier met elkaar verbonden door infrastructuur. Dit betekent dat de watercyclus beïnvloed kan worden door de mens: door infrastructurele werken, door de organisatorische aanpak, door politieke besluitvorming, etc. Dit betekent ook dat de watercyclus meerderde dimensies kent: uiteraard de technisch/technologische dimensie, maar ook een economische en maatschappelijke dimensie.

3. Energie in de watercyclus

Als we het hebben over energie in de watercyclus, dan gaat het over water als energiedrager, maar ook over de energie-inhoud van water zelf. Water als energiedrager is bekend: voorbeelden zijn, op 'micro-schaal', de CV-installatie in woningen en op 'macro-schaal' de stadsverwarming voor een wijk of gehele stad. De energie-inhoud van water is bekend voor wat betreft afvalwater: bij de slibgisting en de anaerobe zuivering van afvalwater wordt de chemische energie in het water teruggewonnen. Maar ook de andere "watertypen" uit de watercyclus kunnen energie bevatten, en dan vooral thermische energie. Juist daarom is het watercyclusconcept zo interessant, ook met betrekking tot energie: in één concept ligt een scala aan mogelijkheden binnen handbereik.

Een terechte vraag is dan wel: waarom zouden we die combinatie water – energie maken, wat worden we daar beter van, wat zijn de drijfveren om dit te doen?

4. Waarom koppelen van energie en water?

Er kunnen verschillende motieven zijn om de relatie tussen water en energie te benutten. Voor een watercyclusbedrijf des te meer, omdat alle "watertypen" hier samenkomen en er dus vele kansen zijn.

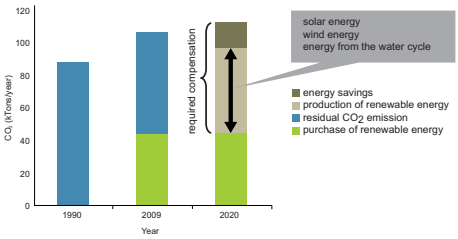
- Water als energiedrager biedt mogelijkheden uit klantperspectief en uit efficiency perspectief. Het exploiteren van een warmwaternet en het leveren van warm water aan de klant naast (koud) drinkwater ligt dicht bij de huidige activiteiten van (drink)waterbedrijven, kan tot kostenvoordelen leiden èn tot duidelijkheid voor de klant.
- Meerdere waterbedrijven richten zich op het ontwikkelen van nieuwe diensten. Een nieuwe dienst die dicht tegen het huidige pakket van producten en diensten aan ligt biedt interessante mogelijkheden.
- Benutten van thermische en chemische energie uit water sluit in feite aan bij het cradle-to-cradle principe. Via huishoudelijk afvalwater verlaat circa 21,7 MJ/huishouden.dag de woning aan thermische energie. Aan chemische energie bevat afvalwater circa 14 MJ/m^3 .
- Het benutten van de thermische en chemische energie uit water kan een bijdrage leveren aan de ambitie om te komen tot een klimaatneutrale watercyclus. "Klimaatneutraal" betekent dat er netto geen CO_2-uitstoot is als gevolg van bedrijfsactiviteiten. Dat betreft dan zowel directe emissies (gebruik van gas in eigen installaties, vervoer en transport, procesemissies), elektriciteit (ingekochte stroom, totaal en groen) en indirecte emissies (woon-werkverkeer, ingekocht vervoer en transport, materialen en grondstoffen). Door energie-efficiency maatregelen en optimalisatie van gebruik van grond- en hulpstoffen kan al een grote reductie in de emissie van broeikasgassen worden bereikt. Een nulemissie is daar echter niet mee te bereiken. Om echt klimaatneutraal te opereren zijn compenserende maatregelen nodig. Benutten van energie uit de watercyclus is een interessante optie om gebruik van fossiele brandstof te voorkomen en daarmee niet te vermijden broeikasgas emissie te compenseren. Bovendien is dit een duurzamere aanpak dan compensatie via handel in CO_2-emissierechten.

Voor Waternet, het watercyclusbedrijf van de gemeente Amsterdam en het waterschap Amstel, Gooien Vecht, ligt de focus vooral op het verduurzamen van de bedrijfsvoering en het ontwikkelen van nieuwe waterdiensten uit klantperspectief. Verduurzamen van de bedrijfsvoering richt zich sterk op mitigatiemaatregelen: het reduceren van de uitstoot van broeikasgassen. De ambitie van Waternet is om in 2010 een reductie van 50% in de uitstoot van broeikasgassen gerealiseerd

te hebben (referentiejaar 1990). Dit is vrijwel bereikt (2009: 48% reductie). Op termijn wordt een klimaatneutrale bedrijfsvoering nagestreefd.
In de volgende paragrafen zal vooral ingegaan worden op de mogelijkheden de Amsterdamse waterketen klimaatneutraal te maken door het benutten van energie uit de watercyclus.

5. Naar een klimaatneutrale Amsterdamse waterketen

De Amsterdamse waterketen bestaat uit drinkwaterbereiding en distributie, inzameling en transport van afvalwater en zuivering van afvalwater. Die Amsterdamse waterketen veroorzaakt uitstoot van broeikasgassen. De uitstoot in 1990 bedroeg 89.000 ton CO_2-eq. In 2009 is de uitstoot gereduceerd tot 62.800 ton CO_2-eq. Die reductie (die lager ligt dan de 48% reductie van geheel Waternet: de Amsterdamse waterketen beslaat slechts een deel van de activiteiten van Waternet) is bereikt door energie efficiency maatregelen, door inkoop van groene stroom (45.000 ton CO_2-eq) en door procesoptimalisaties (type grondstoffen en hoeveelheid grondstoffen). Op termijn wordt gestreefd naar een klimaatneutrale waterketen. In figuur 2 is de uitstoot van broeikasgassen weergeven voor 1990 (referentiejaar), 2009 en 2020 (doeljaar). Als de Amsterdamse waterketen in 2020 klimaatneutraal moet zijn, dan is er een totale compensatie nodig van 69.000 ton CO_2-eq, uitgaande van een gelijkblijvende inkoop van duurzame energie van 45.000 ton CO_2-eq. Die compensatie kan deels gerealiseerd worden door verdere energiebesparende maatregelen (15.900 ton CO_2-eq, te bereiken door 2% energiebesparing per jaar). Door productie van duurzame energie kan de resterende compensatie van 53.100 ton CO_2-eq gerealiseerd worden.

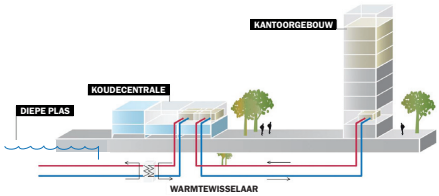


Figuur 2 - Broeikasgasemissie uit de Amsterdamse waterketen.

Onder duurzame energie wordt dan al gauw windenergie of zonne-energie verstaan. Voor een watercyclusbedrijf lijken er echter vele kansen te liggen in de watercyclus voor productie van duurzame energie: energie uit oppervlaktewater, uit afvalwater, uit grondwater en uit drinkwater.

6. Energie uit oppervlaktewater

Energie uit oppervlaktewater betreft thermische energie. Dat kan warmte zijn door oppervlaktewater te gebruiken als zonnecollector, maar ook koude door oppervlaktewater te gebruiken als “koelunit”. Benutting van koude uit diepere plassen is daar een mooi voorbeeld van.



Figuur 3 - Principe van benutting van koude uit oppervlaktewater.

Er is een koudenet met koelwater en er is een koudewinning in de plas. Het koude water wordt van grote diepte omhoog gepompt en draagt de koude in een warmtewisselaar over aan het water in het koudenet. Het koude water uit de plas wordt zo opgewarmd tot een temperatuur die gelijk is aan het water boven in de plas, waarna het hier op wordt geloosd. Gevolg is dat de warmte-koudgrens in de plas naar beneden zakt, maar dat is (ecologisch gezien) geen probleem.

Door Nuon wordt dit toegepast in de Ouderkerkerplas, een plas die beheerd wordt door Waternet/AGV. Koudewinning uit de Ouderkerkerplas wordt gebruikt om kantoorcomplexen in Amsterdam Zuid-Oost van koude te voorzien.

Tabel 1 - Reductie elektriciteitsverbruik en CO2-uitstoot door gebruik koude uit de Ouderkerkerplas

	Elektriciteits-verbruik (MWh/jaar)	CO2-uitstoot (ton/jaar)
Eigen koelers	29.200	23.900
Centrale koelmachine	12.200	10.000
Centrale koelmachine met koelwater Ouderkerkerplas	4.900	4.000

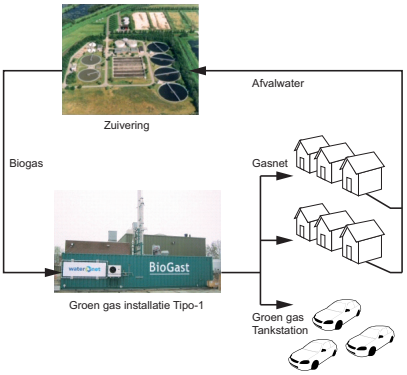
De energiebesparing is groot en daarmee de reductie in CO_2-emissie: van 23.900 ton CO_2-eq naar 4.000 ton CO_2-eq per jaar, ofwel een vermeden CO_2-uitstoot van bijna 20.000 ton/jaar (Tabel 1). Dit is ca. 38% van de benodigde compensatie om de waterketen van Amsterdam klimaatneutraal te maken.

7. Energie uit afvalwater

7.1 Chemische energie

De winning van biogas bij het zuiveren van afvalwater is niet nieuw. Ook op de rwzi's van Waternet, in totaal 12 stuks, gebeurt dit al jaren. In totaal produceert Waternet op de gezamenlijke locaties 13 miljoen m^3 biogas per jaar. Het gewonnen biogas wordt veelal gebruikt voor het gecombineerd opwekken van elektriciteit en warmte. Dit gebeurt met behulp van een zogenaamde WKK-installatie (warmte kracht koppeling). Deze vorm van benutting van biogas kent echter bezwaren. De elektriciteit kan worden benut, maar dat geldt veelal niet voor de warmte, vooral in de zomer. Daarnaast is de bedrijfszekerheid lager dan gewenst.

Een alternatief is het opwerken van biogas naar Groen Gas. Biogas bevat ca. 60-65% CH_4 en 35-40% CO_2. Bij het opwerken wordt het CH_4 gehalte verhoogd naar 88% en wordt zwavel en vocht uit het biogas verwijderd, waardoor Groen Gas ontstaat vergelijkbaar met het bekende aardgas. Groen Gas biedt grote mogelijkheden als duurzaam alternatief voor aardgas. Groen Gas is een "groene" aardgasvervanger. Het bestaande aardgasnet kan dit distribueren en leveren bij huishoudens voor gebruik. Verder kunnen ook auto's dit gas gebruiken als brandstof.



Figuur 4 - Van afvalwater via biogas naar Groen Gas voor de auto en het aardgasnet.

Tot voor kort was opwerken van biogas naar Groen Gas alleen mogelijk op grote schaal en niet rendabel voor de kleine hoeveelheid biogas die op verspreide locaties gewonnen wordt, maar daar is recent verandering in gekomen.
Waternet heeft in 2009 de eerste Groen Gas installatie in gebruik genomen op de rwzi De Ronde Venen in Mijdrecht.

Het Groen Gas dat geproduceerd wordt op de rwzi De Ronde Venen wordt voor drie doeleinden gebruikt. Ongeveer 20% van het Groen Gas wordt gebruikt voor de verwarming van eigen kantoren en voor het vergistingsproces. De resterende 80% wordt deels gebruikt als brandstof voor auto's. De Ronde Venen beschikt over een tankpunt waar auto's Groen gas kunnen tanken, er zijn zes voertuigen besteld die op gas kunnen rijden. Deels wordt het Groen Gas ingevoed in het bestaande aardgasnet. De verwachte jaarproductie is voldoende voor het verbruik van 120 personenauto's of dekt de gasvraag van 90 huishoudens. In figuur 4 is het proces aangegeven van biogas tot en met het gebruik van Groen Gas in de auto of ingevoed in

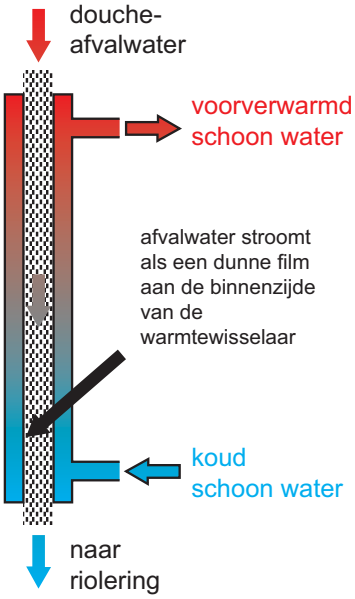
Tabel 2 - Groen Gas op de rwzi's van Waternet en de daarmee vermeden broeikasgas emissie

	rwzi De Ronde Venen	Totaal Waternet
zuiveringscapaciteit	1370 m^3/u 70.000 i.e.	61.000 m^3/u 2,3 miljoen i.e.
biogasproductie	700 Nm^3/d	35.500 Nm^3/d
Groen Gas vrij beschikbaar	140.000 Nm^3/jaar	7,3 miljoen Nm^3/jaar
inzet Groen Gas	90 huishoudens of 120 personenauto's	4.650 huishoudens of 6.000 personenauto's
vermeden broeikasgas emissie	250 ton CO_2-eq/jaar	13.000 ton CO_2-eq/jaar

het aardgasnetwerk.
In Tabel 2 is de potentie van Groen gas weergegeven als compensatie voor de broeikasgasemissie uit de Amsterdamse waterketen. Waternet kan op jaarbasis in totaal maximaal 7,3 miljoen Nm^3 Groen Gas produceren wat overeenkomt met een vermeden broeikasgasemissie van 13.000 ton CO_2-eq.

7.2 Thermische energie

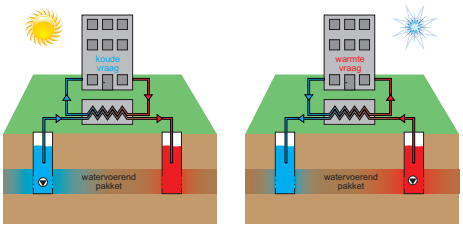
Drinkwater komt koel de huishoudens binnen, maar verlaat de woning veelal met een verhoogde temperatuur: bad- en douchewater ca. 38-40°C, kraanwater 10-55°C, vaatwasser en wasmachine ca. 40°C. Ongeveer 54% van het drinkwater wordt verwarmd en verlaat de woning met een gemiddelde temperatuur van 27°C. Het huishoudelijk afvalwater draagt ca. voor 40% bij aan het totale warmteverlies van een moderne woning. Dat betekent dat met het huishoudelijk afvalwater ca. 21,7 MJ/huishouden.dag de woning verlaat. Op jaarbasis is dat ca. 8 GJ/woning, wat overeenkomt met 450 kg CO_2/woning.jaar.
Terugwinnen van deze energie, al is het maar deels, kan een grote bijdrage leveren aan de compensatie voor de Amsterdamse waterketen: uitgaande van 320.000 huishoudens is het potentieel 144.000 ton CO_2-eq/jaar. Daarvan hoeft dan maar 37% benut te worden om de vereiste compensatie van 53.100 ton CO_2-eq te bereiken!
De vraag is natuurlijk wel waar en hoe die thermische energie teruggewonnen kan worden.
Figuur 5 toont een mogelijkheid op woningniveau: via een warmtewisselaar wordt warmte teruggewonnen uit warm douchewater waarmee koud schoon water wordt opgewarmd.
In Hamburg wordt sinds kort warmtewinning uit afvalwater in de praktijk toegepast. In de riolering zijn warmtewisselaars geplaatst waarmee 215 woningen (deels) worden verwarmd. Het principe werkt met de warmtewisselaar in de rioleringsbuis en het gebruik van de warmte in het verwarmingssysteem van de woningen. Met dit systeem wordt een reductie in CO_2-emissie bereikt van 334 ton/jaar.



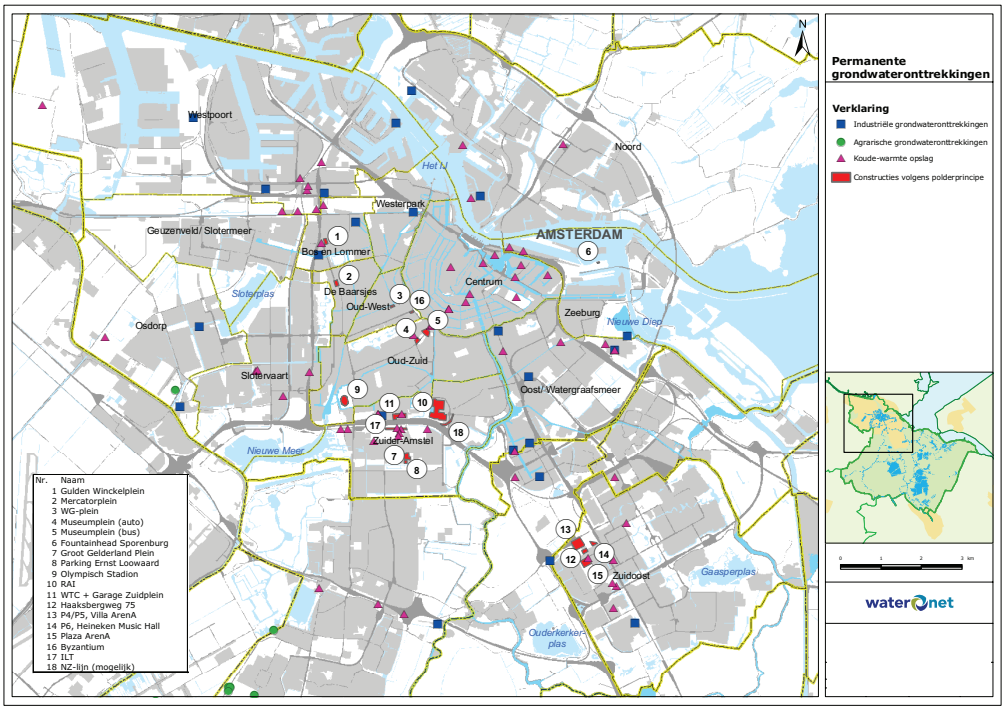
Figuur 5 - Benutting warmte uit afvalwater op huisniveau.

8. Energie uit grondwater

Ook grondwater kan gebruikt worden voor energiewinning en energieopslag. Vooral koude-warmteopslag (KWO) is een breed toepasbare duurzame techniek met grote kansen. Het principe is weergegeven in figuur 6. Dit betreft een open systeem met een gemeenschappelijke warmtepomp met aquifersysteem. In de winter wordt grondwater opgepompt uit de warme bron met een temperatuur van 15 à 17°C. Het staat zijn warmte via een warmtewisselaar af aan een centraal opgestelde warmtepomp. Het afgekoelde grondwater wordt met een temperatuur van 6 à 7°C via de koude bron weer in de bodem geïnfiltreerd.
De warmtepomp transformeert de laagwaardige warmte naar een bruikbare temperatuur van 40 à 55 °C. Een piekketel zorgt voor aanvullend



Figuur 6 - Principe van koude-warmte opslag (open systeem met gemeenschappelijke warmtepomp met aquifersysteem).



Figuur 7 - KWO-systemen in Amsterdam.

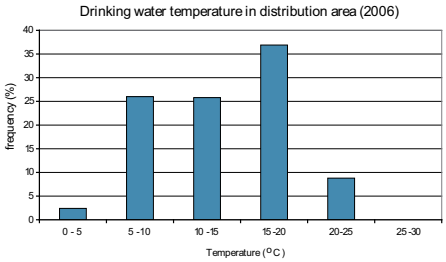
vermogen en temperatuurverhoging t.b.v. warm tapwater. Door middel van een distributienet wordt de warmte getransporteerd naar de woningen.
In de zomer is de stromingsrichting in het grondwatercircuit tegengesteld ten opzichte van de wintersituatie, waardoor het koude water uit de koude bron gebruikt kan worden voor koeling. Daarbij wordt de koude uit het opgepompte water via een centraal opgestelde warmtewisselaar overgedragen aan het distributienet waarmee de koude wordt getransporteerd naar de woningen.

Het (open) systeem kan ook uitgevoerd worden met individuele warmtepompen met een gemeenschappelijk aquifersysteem. Daarnaast bestaan er gesloten systemen: deze werken in grote lijnen hetzelfde als open systemen, maar het verschil is dat het systeem met bodemlussen werkt waar water doorheen gepompt wordt om warmte of koude aan de bodem te onttrekken.

KWO kan zowel zelfstandig als in combinatie met andere technieken, zoals stadswarmte met restwarmtebenutting, worden ingezet. Daarnaast heeft het als belangrijk voordeel dat het kan fungeren als opslagmedium voor energie uit zonnecollectoren, oppervlaktewater of riolering. Met KWO is een CO_2-besparing mogelijk van tussen de 50 en 70% ten opzichte van een traditioneel verwarmd en gekoeld gebouw.

In figuur 7 staat aangegeven waar de huidige KWO-systemen zich in Amsterdam bevinden. De potentie van KWO als compensatiemaatregel voor de reductie van uitstoot van broeikasgassen is groot. Momenteel zijn in totaal 80 projecten gegund in Amsterdam, een globale inschatting van de CO_2-emissiereductie daarvan is 23.240 ton/jaar. Een van die projecten betreft het KWO-systeem op het Oosterdokeiland. Met dit project wordt een CO_2-emissiereductie bereikt van 3.360 ton/jaar. Op de Zuidas van Amsterdam worden ook KWO-systemen ontwikkeld, naar verwachting resulteren deze uiteindelijk in een CO_2-emissiereductie van 8.000 ton/jaar.

Ook voor KWO is weer een fictieve vertaling te maken naar maximaal CO_2-reductiepotentieel. Met



Figuur 8 - Temperatuur van het drinkwater in het distributienet van Waternet.

een warmtepomp is per huishouden een reductie in broeikasgas emissie van 500 kg CO_2 per woning per jaar te bereiken. Met 320.000 woningen is het maximale potentieel 160.000 ton CO_2/jaar. Als we hiervan 33% benutten, dan is de benodigde compensatie van 53.000 ton bereikt.

9. Energie uit drinkwater

Door klimaatverandering treedt een stijging van de temperatuur van het oppervlaktewater op. Waternet gebruikt oppervlaktewater (de Rijn en water uit de Bethunepolder) als bron voor drinkwater. Met het stijgen van de temperatuur van het oppervlaktewater stijgt ook de temperatuur van het drinkwater in het distributienet. Figuur 8 toont de frequentieverdeling van de temperatuur in het distributienet in 2006, een jaar met een warme zomer. Temperaturen tussen 20°C en 25°C zijn geen uitzondering. Waternet ontwikkelt momenteel ideeën om deze hoge temperatuur te benutten als energiebron. In een nieuwbouwwijk in het leveringsgebied van Waternet (Diemen de Sniep) worden de mogelijkheden verkend om een KWO-systeem te laden met warmte uit drinkwater, met als

Figuur 9 - De rwzi-West van Waternet en de afval-energiecentrale van AEB in het westelijk havengebied van Amsterdam.

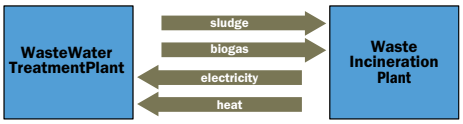
voordeel dat hierdoor in de zomer koeler drinkwater geleverd kan worden, wat weer een positief effect kan hebben op de hygiënische kwaliteit van het drinkwater: een drinkwatertemperatuur boven 25°C betekent immers een verhoogde kans op nagroei.

10. Er gebeurt al het één en ander

Bovenstaande ontwikkelingen zijn relatief nieuw en staan voor een groot deel in de kinderschoenen. Er is nog veel onderzoek nodig om de verwachtingen waar te maken en veel investeringen om de benodigde installaties te realiseren. Ook de rentabiliteit van de verschillende opties moet nog grotendeels worden doorgerekend.

10.1 Koppeling rwzi-West Waternet met afvalverbrandingsinstallatie AEB

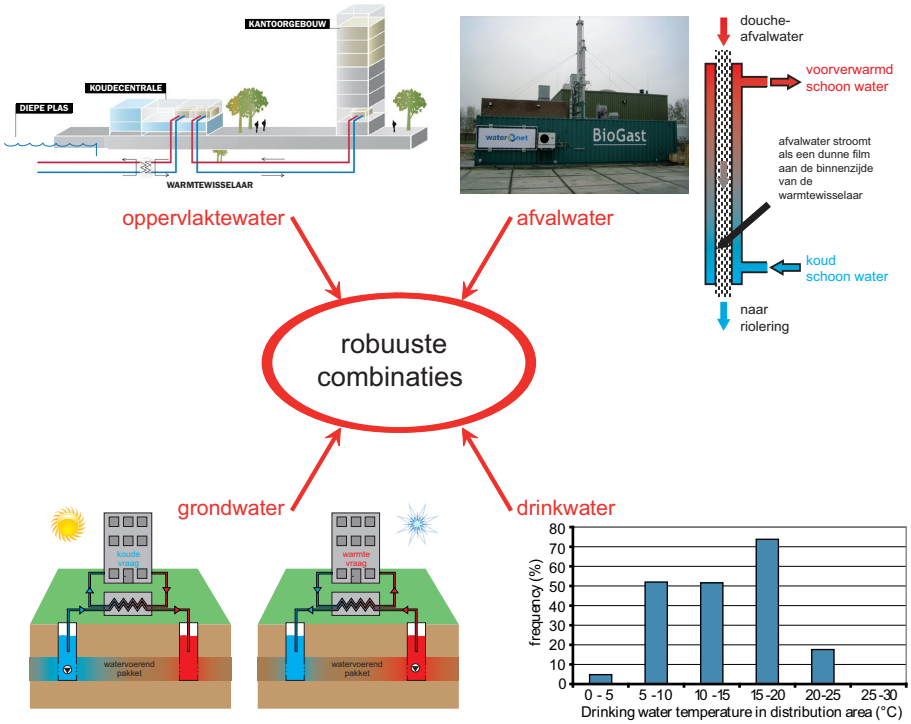
Op grote schaal heeft Waternet al een flinke slag geslagen, buiten de watercyclus om, door koppeling van de rwzi-West en de afvalverbrandingsinstallatie van het AEB (Afval Energie Bedrijf Amsterdam). Deze installaties liggen vlak naast elkaar in het havengebied van Amsterdam (figuur 9). Zoals weergegeven in figuur 10 wordt het slib en het biogas van de rwzi-West (aangevuld met slib uit andere rwzi's van Waternet) verbrand in de afvalenergiecentrale van AEB. De elektriciteit en warmte die daarbij vrijkomt wordt benut op de rwzi-West. Met deze koppeling wordt een gebruik van ongeveer 1 miljoen m^3 aardgas per jaar vermeden op de rwzi-West en daarmee een uitstoot van 1.800 ton CO_2-eq voorkomen.



Figuur 10 - Koppeling van de rwzi-West van Waternet met de afval-energiecentrale van AEB.

10.2 Stadswarmtenet van de gemeente Amsterdam

Het stadswarmtenet in Amsterdam verwarmt nu ongeveer 45.000 woningen (peiljaar 2009) en per jaar worden ongeveer 4.000 woningen aangesloten. Door de elektriciteitscentrales in Amsterdam wordt genoeg restwarmte geproduceerd om de gehele stad van warmte te voorzien. De "Schaalsprong stadswarmtenet" geeft een stadsbrede visie op de



Figuur 11 - Energie uit de watercyclus: zoektocht naar robuuste combinaties.

verdere aanleg van stadswarmte. De doelstelling is om in 2025 100.000 aansluitingen te hebben. In de Structuurvisie 2040 wordt gesproken over 200.000 aansluitingen in 2040.

De momenteel aangesloten warmtebronnen zijn de Diemercentrale van Nuon (wordt overgedragen aan Vattenfall) en de afval-energiecentrale van het Afval Energie Bedrijf (gemeente Amsterdam). In de toekomst wordt de Hemwegcentrale aangesloten.

Er zijn twee warmtenetwerken (Westpoort Warmte WPW en Nuon Warmte) die de stadsgebieden West, Noord en Zuid-Oost van warmte voorzien. Westpoort Warmte is een joint venture (50-50) van Nuon Warmte en de gemeente Amsterdam.

In de “Schaalsprong” is voorzien de huidige 2-3 warmtenetten (‘eilanden’) te verbinden met een ring en op termijn het gehele netwerk in publieke handen te brengen omdat in een publiek model de duurzaamheid van stadswarmte het best geborgd is. Waternet is dé kandidaat voor de gemeente Amsterdam om dit warmtenet te beheren en te exploiteren. Daarmee wordt de watercyclus uitgebreid met warmwater en wordt verder invulling gegeven aan een duurzame ontwikkeling van Amsterdam in de vorm van een reductie van CO_2-uitstoot.

11. En nu de juiste keuze!

De opgave waar Waternet voor staat om de Amsterdamse waterketen klimaatneutraal te maken is duidelijk: een reductie in uitstoot van broeikasgassen van 53.100 ton CO_2-eq/jaar. Die reductie moet gerealiseerd worden door compensatiemaatregelen. De winning van energie uit de watercyclus biedt daar alle kansen toe, gezien de vele mogelijkheden die de watercyclus hiervoor in huis heeft (figuur 12). Een schatting maken welke reductie in broeikasgas emissie hiermee uiteindelijk is te bereiken is moeilijk: over kosten, haalbaarheid, toerekening van emissiereductie, etc. hebben we het immers nog niet gehad. Toch is er in tabel 3 een eerste berekening gemaakt, met de nodige aannames en veronderstellingen. Daaruit blijkt dat de energie uit de watercyclus zeker kansen biedt om de vereiste reductie van 53.100 ton CO_2-eq te realiseren. De uitdaging is om

Tabel 3 - Reductiepotentieel broeikasgas emissie door energiewinning uit watercyclus in en rond Amsterdam

Watercyclus compartiment	Reductie broeikasgas emissie (ton CO_2-eq/jaar)
oppervlaktewater[1]	40.000
afvalwater chemisch[2]	11.200
afvalwater thermisch[3]	72.000
grondwater[4]	33.600
drinkwater	?
Totaal	**156.800**

[1] - twee koude projecten zoals Ouderkerkerplas
[2] - gecorrigeerd voor huidige inzet biogas rwzi-West in afvalenergiecentrale AEB
[3] - 50% benutting van de thermische energie uit afvalwater
[4] - tien KWO-projecten zoals Oosterdokeiland

robuuste combinaties te vinden die ten alle tijden de gevraagde energie kunnen leveren waarmee een onafhankelijkheid van fossiele brandstof wordt gecreëerd en broeikasgas emissie wordt voorkomen. Uitbreiding naar andere vormen van duurzame energie (wind, zon, biomassa) kan die robuustheid en flexibiliteit vergroten.

12. Tot besluit

Er is nog een lange weg te gaan voordat het hiervoor geschetste toekomstbeeld werkelijkheid is. Wat zijn de kosten van dergelijke systemen? Wie financiert dit, is het maatschappelijk rendabel te maken? Laten we dit over aan de private sector of is het publieke model beter? En wie voert de regie over dit soort systemen? Die vragen kwamen nog niet aan de orde in dit verhaal, maar de potentie die de watercyclus biedt is des te meer reden om ook aan deze vragen de komende jaren veel aandacht te geven. Om Peter Senge te citeren uit zijn boek “The Necessary Revolution” met zijn nieuwe interpretatie van de 80-20 regel: “The 80-20 Challenge is to reduce emissions with 80 percent in twenty years to stabilize CO_2 in the atmosphere at levels that minimize the threat of catastrophic consequences”. Energie in de watercyclus biedt hiervoor kansen!

Prof.dr. G.J. Medema

Is er een dokter in de zaal?

Gertjan Medema
KWR
Watercycle Research Institute
Technische Universiteit Delft

Een dokter in de zaal? Het thema is water en energie, waar is die dokter dan voor nodig? In het slechtste geval om de mensen te behandelen die ziek zijn geworden van water en energiesystemen en in het beste geval om vooraf mogelijke gezondheidsconsequenties van water en energiesystemen te helpen voorzien en in te dammen. Indammen, daar kom ik zo nog op terug.
Ik ben afgelopen oktober benoemd op de leerstoel Water & Gezondheid bij de vakgroep Gezondheidstechniek van de TU Delft. Ik zie het als mijn opdracht om de nieuwe generatie civiele wateringenieurs te doordringen van het besef dat ze bezig zijn met gezondheidstechniek, nu minstens even hard als vroeger. Maar: ziek worden van water en energie systemen, is dat niet wat vergezocht? Nee, dat zal ik illustreren met een aantal voorbeelden, onder het motto: “Diegene die faalt te leren van zijn geschiedenis, is gedoemd ze te herhalen.” De voorbeelden zijn geen eigen onderzoek, maar ontleend aan de ervaringen van onderzoekers in binnen- en buitenland.

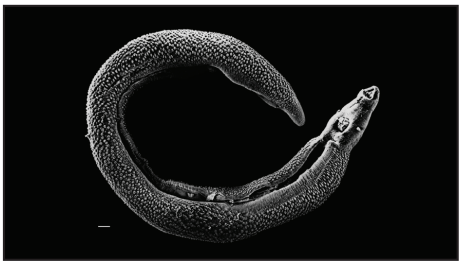
1. De dam, de slak en de worm

Bij waterkracht wordt energie opgewekt uit water door gebruik te maken van hoogteverschil of stroming. De watermolen is een oude vorm die mechanische energie opwekt. De laatste decennia is de meeste waterkracht elektrisch en wordt gewonnen in waterkrachtcentrales in afgedamde rivieren. Sommige landen,

Figuur 1 - De Akasombo dam in de Volta-rivier zorgde voor energie en voor Schistosoma

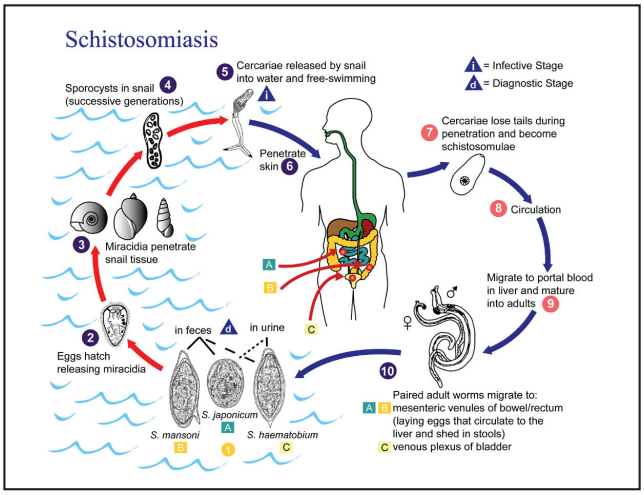
zoals Noorwegen, gebruiken vrijwel uitsluitend waterkracht voor de opwekking van energie. In Zuid-Amerika komt 75% van de elektriciteit uit waterkracht.

In het naoorlogse Goudkust (nu Ghana) werd bauxiet in de bodem aangetroffen. De mijnbouwbedrijven besloten om niet alleen de erts te winnen, maar ook lokaal aluminium te winnen uit de erts. Daarvoor was heel veel energie nodig. De nabijgelegen Volta-rivier waterde een groot gebied af en werd gevoed door een serie snelstromende riviertjes vanuit het noorden, oosten en westen van Ghana en stroomde dan snel via een serie watervallen naar de laagvlakte om via een delta de Atlantische oceaan in te stromen. De Volta-rivier moest worden afgedamd. Het was het grootste project in tropisch Afrika ooit. In 1966 was de 70 m hoge dam klaar (Figuur 1). Daardoor ontstond ‘s werelds grootste kunstmatige meer, met een oppervlak van 14.000 km^2 en 6000 km kustlijn. De snelstromende rivier werd een stilstaand meer. Tot die tijd was Schistosomiase (vroeger heette de ziekte bilharzia) vrijwel afwezig in die streken. Schistosomiase is een ziekte die wordt veroorzaakt door de parasiet Schistosoma. Deze parasiet heeft waterslakjes als tussengastheer. Geïnfecteerde waterslakjes scheiden dagelijks circa 250000 cercaria uit in het water. Ze komen in golven tussen 8 en 12 uur ’s ochtends. Deze cercaria zijn



Figuur 2 - Schistosoma worm

een soort kleine kikkervisjes die door het water zwemmen op zoek naar een geschikte gastheer. Als een persoon in het water stapt of het water drinkt dringen de cercaria via de huid naar binnen. Ze rusten een dagje uit en vormen zich dan om tot wormen die uiteindelijk in de aderen terechtkomen (Figuur 2). Ze vermommen zich met onze eigen eiwitten om ons immuunsysteem te omzeilen. In die aderen ontmoeten mannetjes en vrouwtjes worm elkaar en ze gaan eitjes produceren, elke dag zo’n 3500. Die eitjes gaan via onze nieren en darmwand naar buiten. Maar circa de helft van de eitjes blijft hangen in het weefsel, bijvoorbeeld in de blaaswand, darmwand en lever. Omdat de eitjes niet vermomd zijn reageert ons immuunsysteem wel en er ontstaat ontstekingsweefsel dat de normale functie verhinderd. De eitjes die er wel doorheen komen, komen via faeces of urine weer in het water terecht waar ze uitkomen tot miracidia die, via chemotaxis, een geschikte waterslak



Figuur 3 - De levenscyclus van Schistosoma

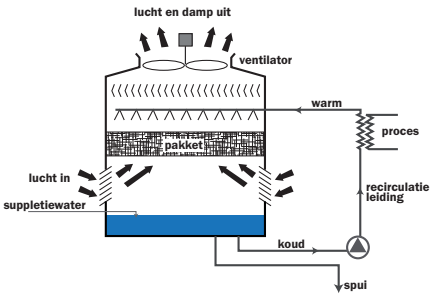
vinden om de cyclus weer verder te laten draaien (Figuur 3).

De waterslakjes gedijen niet goed in snelstromend water, maar in stilstaand water des te beter. Voordat de dam werd aangelegd kwam schistosomiase vrijwel alleen voor in het laagland aan de kust. Na de aanleg van de dam ontstonden in een paar jaar onderwaterwouden van hoornblad, zowel voedsel als schuilplaats voor de waterslakjes. In 1969 waren alle kinderen tussen de 5 en 9 van dorpen aan het meer besmet met Schistosoma [1]. Een vergelijkbaar verhaal is te vertellen over de Aswan dam in de Nijl in Egypte (1971), de Diama dam in de Senegal-rivier in Senegal (1985) en de Manantali dam in de Bafing rivier in Mali (1989) etc [2]. In Afrika leiden naar schatting meer dan 200 miljoen mensen aan deze parasiet, waarvan 20 miljoen een ernstig ziektebeeld hebben. De ziekte veroorzaakt naar schatting (in Egypte) 4-35% verlies aan productiviteit van de besmette bevolking. De dammen leveren energie aan de Afrikaanse landen, maar ten koste van de energie van de bevolking langs de rivier.

2. De koeltoren en de voorbijganger

Een koeltoren zorgt voor de afkoeling van een gebouw of industrieel proces. Koelwater wordt hier gebruikt als energiedrager en (bij open of natte koeltorens) de verdamping van koelwater als proces van energieoverdracht van koelwater naar de omgevingslucht.

Koeltorens bevinden zich meestal hoog, om een goede toe- en afvoer van lucht te bevorderen. Droge koeltorens gebruiken alleen luchtstroming langs een warmtewisselaar. Bij natte koeltorens staat het koelwater in open verbinding met de lucht (Figuur 4). De gedeeltelijke verdamping van het koelwater zorgt voor een sterk koeleffect. Natte koeltorens zijn daarom veel energie-efficiënter dan droge koeltorens. Bij onvoldoende beheer en onderhoud of onvoldoende werkende waterbehandeling kan groei van Legionella optreden in het koelwater en werken de koeltorens ook als generator van aërosolen met Legionella.



Figuur 4 - Recirculerende natte koeltoren [4]

Amsterdam, juli 2006 [3]. In Amsterdam worden jaarlijks 10 – 20 gevallen van legionellose (de infectieziekte veroorzaakt door Legionella) gerapporteerd. Toen op 6 juli 2006 3 gevallen op dezelfde dag werden gerapporteerd en de volgende dag nog eens vijf gevallen, was duidelijk dat er iets bijzonders aan de hand was. Ook de dagen er na werden nieuwe legionellose gevallen gemeld in Amsterdam. Bij het eerste spoedberaad van de GGD, Streeklab Kennemerland en RIVM op 10 juli waren 17 gevallen in Amsterdam gemeld, waarvan 1 was overleden. Ze woonden verspreid over Amsterdam, maar met een concentrering in het oostelijk deel van het centrum. Alle gevallen waren ziek door Legionella pneumophila serogroep 1. De eerste ziektedag lag voor de meeste gevallen op 1 juli. De windrichting was in de weken daarvoor voornamelijk noordwest – noordoost. Er is gezocht naar risicovolle waterinstallaties (zoals natte koeltorens en fonteinen) rond het Centraal Station die de verspreider zouden kunnen zijn. Er was geen lijst met natte koeltorens, dus heeft de GGD met behulp van Google Earth de gebouwen in de omgeving afgezocht naar koeltorens (Figuur 5).
Ook is bij gebouwen gevraagd naar de aanwezigheid van koeltorens. Al in de namiddag van 10 juli werd een koeltoren naast een gebouw geïdentificeerd

Figuur 5 - Google Earth beeld van het Post CS gebouw

die niet in goede staat van onderhoud was. Hij was 9 juni in gebruik genomen. Er zijn monsters genomen en voor de zekerheid is deze koeltoren op de ochtend van 11 juli gesloten.
Er is ook een verzoek gegaan naar de andere GGD's om recente legionellose gevallen te vragen naar eventueel verblijf in Amsterdam. Daar kwamen nog 7 gevallen uit naar voren die in de buurt van deze koeltoren hadden gewerkt.

13 juli bleek uit de labresultaten dat er 5 x 106 Legionella pneumophila serogroup 1 in het water van de koeltoren aanwezig waren. De stammen zijn met DNA-fingerprinting vergeleken en bleken zeer sterke gelijkenis te vertonen met de stam die in de patiënten is aangetroffen. Daarmee was de bron van deze Legionella outbreak gevonden. Met het uitzetten van de koeltoren zijn dus nieuwe ziektegevallen voorkomen. In totaal zijn er hier 31 mensen ernstig ziek geworden. Drie daarvan zijn overleden. Een deel van de patiënten kampt nog steeds met de lichamelijke gevolgen van de infectie. Oorzaak: een koeltoren waar Legionella zich heeft kunnen vermeerderen en via aërosolen de omgeving in zijn gebracht en daar mensen in de buurt hebben besmet.

Was dit nou onvoorzien? De snelle bronopsporing van de GGD laat zien dat natte koeltorens al gezien werden als risico. Al in 1986 heeft de Gezondheidsraad gewezen op de risico's van kleine koeltorens en verdampingsinstallaties. In 1988 heeft het RIVM al voor het eerst in Nederland Legionella in koeltorens aangetoond[4]. Onderzoek van RIZA in 1999 bleek Legionella vooral voor te komen in koeltorens voor klimaatbeheersing van gebouwen [5]. KWR Watercycle Research Institute (toen nog Kiwa Onderzoek en Advies) onderzocht de risico's van Legionella-vermeerdering en verspreiding van verschillende koeltorensystemen, waarin de natte/open koeltorens met recirculatie van koelwater als de systemen met de grootste risico's zijn geclassificeerd [6]. Ook werd slecht onderhoud en beheer aangewezen als voornaamste oorzaken voor de aanwezigheid van Legionella in het koelwater.

Niet echt onvoorzien dus. Afgelopen zomer hebben de eigenaar en de beheerder van de koeltorens in een strafzaak een voorwaardelijke celstraf van 3 maanden en een boete van respectievelijk 20.000 en 40.000 euro opgelegd gekregen. Volgens de rechter hadden de verdachten moeten weten dat de koeltoren werd opgestart zonder toevoeging van chemicaliën die Legionella-groei kunnen voorkomen. In een civiele zaak was eerder al 400.000 euro schadevergoeding uitgekeerd.
Na deze outbreak heeft het Landelijk Centrum Hygiëne en Veiligheid een richtlijn uitgevaardigd die gemeenten kunnen gebruiken voor inventarisatie en registratie van natte koeltorens. Gemeenten houden zich op grond van de Wet Milieubeheer bezig met toezicht op natte koeltorens. De minister heeft de gemeenten gevraagd natte koeltorens te registreren. De VROM-Inspectie ziet daar op toe. De registratie is zo goed als afgerond. Naar schatting bevinden zich 4000 – 6000 natte koeltorens in Nederland. En hoe vaak veroorzaken die nu legionellose? Dat is onbekend. Bij de bronopsporing van de legionellose-gevallen in het verleden kon men natte koeltorens niet systematisch meenemen. De registratieplicht maakt dat nu beter mogelijk.

Om te voorkomen dat Legionella zich kan vermeerderen en verspreiden zijn aanbevelingen voor ontwerp, onderhoud en beheer gedaan [4]. Inmiddels heeft KWR ook een snelle en specifieke methode voor de detectie van Legionella pneumophila in koelwater ontwikkeld. Met qPCR wordt snel bepaald of Legionella pneumophila aanwezig is [7]. Als dat het geval is kan met de kweekmethode die ook specifiek is voor Legionella pneumophila vastgesteld worden of ze ook levend en dus infectieus zijn [8].

Als we door klimaatverandering in de toekomst warmere zomers krijgen, kunnen we verwachten dat er ook meer koeltorens in ons land worden geïnstalleerd. Legionella verspreiding via koeltorens is een beheersbaar risico, maar dan moet de beschikbare kennis wel worden toegepast bij ontwerp, beheer en onderhoud van koeltorens. Koele gebouwen zijn plezierig, maar wel graag zonder dat ze Legionella over voorbijgangers uitsproeien.

3. Stadsverwarming: warm en lauw water

In stadsverwarmingsprojecten wordt restwarmte gebruikt voor de verwarming van woningen of kantoren. De warmte wordt via leidingen met warm water van de bron naar de woningen gebracht. In Nederland zijn ongeveer een kwart miljoen woningen op stadsverwarming aangesloten. In de Utrechtse Rivierenwijk werd stadsverwarming aangelegd. De bewoners klaagden dat hun koude water niet koud was, maar lauw tot warm. Behalve dat lauw water door de bewoners als onaangenaam wordt ervaren, voldoet het drinkwater daarmee niet aan het Waterleidingbesluit. Bovendien is er een risico op groei van Legionella. Bij onderzoek in 2006 werd inderdaad Legionella in het "koude" water in 78 van de 173 woningen aangetroffen. Nader onderzoek naar de oorzaak liet zien dat de kruipruimtes van de woningen onder water stonden met warm water. De leidingen van de stadsverwarming bleken verroest en lek. De drinkwaterleidingen werden opgewarmd door het warme water. De temperatuur van het drinkwater was lange tijd boven de 25 °C zodat Legionella kon gaan groeien. De woningcorporatie, het energiebedrijf en het waterbedrijf bakkeleiden over de schuldvraag [9]. De kruipruimtes werden leeggepompt, het drinkwaternet doorgespoeld en de stadsverwarmingsleidingen vervangen (Figuur 6). Er zijn geen gevallen van legionellose gemeld die aan dit lauwe water zijn gekoppeld. In het najaar van 2006 zijn wel drie gevallen van legionellose in deze wijk opgetreden, maar in de waterinstallaties is toen geen Legionella aangetroffen [10].

Figuur 6 - Maatregelen in de Rivierenwijk om opwarming van de drinkwaterleiding en groei van Legionella te voorkomen

Bij de aanleg van warmtapwater systemen of via warmteinstallaties in gebouwen kan het water in drinkwaterleidingen worden opgewarmd op plaatsen waar deze leidingen vlak bij elkaar geplaatst zijn. Dat kan de situatie zijn in de meterkast, in leidingschachten en doorvoeren door vloeren/muren. Uit onderzoek van TNO [11] naar de opwarming van drinkwater in bestaande stadsverwarmingssystemen werd in ongeveer tweederde van de woningen geconstateerd dat de temperatuur van het drinkwater boven de 25 °C kwam. Bij een kwart van de woningen was dat regelmatig het geval. Relatief eenvoudige aanpassingen (vooral isolatie van de warme leidingdelen en voldoende ventilatie in de meterkast) kunnen het opwarmen van het drinkwater terugdringen en problemen met Legionella voorkomen.

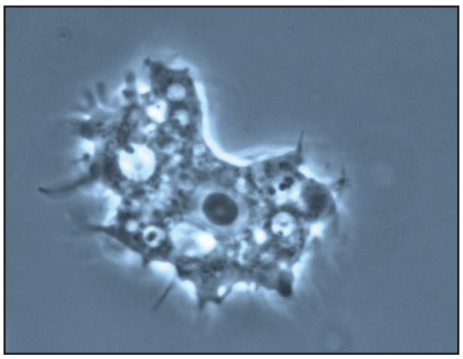
Ook hier geldt weer dat voldoende aandacht voor de mogelijke gezondheidsrisico's van deze installaties gezondheidsproblemen kan voorkomen. Deze risico's zijn mede basis voor de regelgeving (Waterleidingbesluit, Bouwbesluit) en codes (NEN 2768 en 1006, VEWIN werkbladen, ISSO publicaties) die hierover zijn opgesteld. De bevindingen van het TNO-onderzoek geven aan dat, ondanks de eenvoudige preventiemaatregelen, de praktijk weerbarstig is.

4. Gebruik je hersenen, anders doet Naegleria het

Koelwaterlozingen door elektriciteitscentrales warmen het ontvangende oppervlaktewater op. De VEWIN besteedt daar veel aandacht aan omdat, zeker gezien de verwachtingen over opwarming en lagere rivierafvoer in de zomer, de temperatuur van het oppervlaktewater waaruit drinkwater wordt bereid langere perioden boven de 25 °C kan komen, waardoor niet aan het Waterleidingbesluit kan worden voldaan en er mogelijk vaker problemen

door groei van micro-organismen in drinkwater en waterinstallaties op zou kunnen treden. In het BTO wordt aan dat aspect onderzoek gedaan.

Ook in het oppervlaktewater zelf leiden koelwaterlozingen tot een verandering van het ecosysteem. Het warme koelwater is ook geschikt voor de groei van Naegleria fowleri, een eencellige parasiet (Figuur 7). Deze parasiet wordt ook wel de “brain-eating amoebe” genoemd. Als een onfortuinlijke bader deze parasiet tegenkomt kan de parasiet via de neuswand het lichaam binnendringen en naar de hersenen gaan. Infectie met Naegleria fowleri kan leiden tot primaire amoeben-meningo-encephalitis (PAM), een infectie met meestal een dodelijke afloop. Na een incubatietijd van twee tot tien dagen krijgt de patiënt plotseling hoofdpijn en koorts. Dan verergert de ziekte snel en breiden de verschijnselen zich uit met tekenen van prikkeling en ontsteking van de hersenvliezen en de hersenen. De zieke raakt in coma en sterft drie tot zeven dagen na de eerste ziekteverschijnselen. Andere Naegleria-soorten veroorzaken geen PAM. De ziekte is gelukkig zeldzaam. PAM komt vooral voor bij kinderen en jong volwassenen die kort tevoren contact hadden met zoet water. Er zijn geen gevallen van PAM in Nederland bekend, maar onderzoek naar amoeben bij patiënten met meningo-encephalitis is ook zeldzaam. In België zijn vier gevallen uit overdekte gechloreerde zwembaden gemeld en één geval werd gerapporteerd na het zwemmen in thermisch verontreinigd oppervlaktewater, dat laatste is ook gerapporteerd in Polen [13].



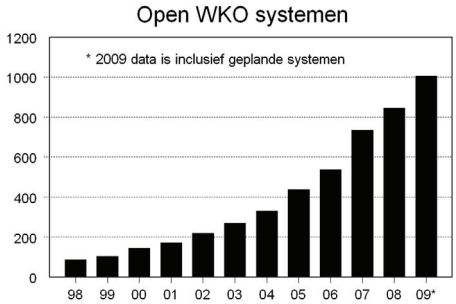
Figuur 7 - Naegleria fowleri trophozoiet

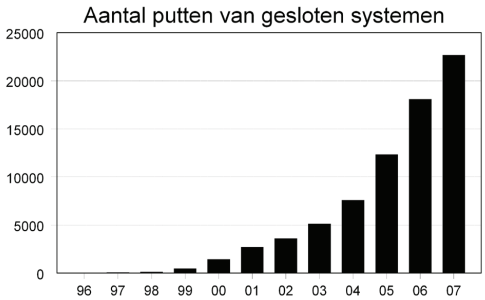
Figuur 8 - Verkoeling voor de warmere zomers

In de VS worden vooral gevallen gerapporteerd na het baden in de warme meren van Florida en Californië. In Nederland is N. fowleri gevonden in koelwater van elektriciteitscentrales [12]. Onze Zuiderburen vinden Naegleria fowleri in koelwater [13,14]. De Gezondheidsraad ziet een verbod om te zwemmen in thermisch verontreinigd water als afdoende bescherming tegen deze “brain-eater” en de infectie is gelukkig heel zeldzaam. Maar wat wordt de situatie in toekomstige zomers? De rivierafvoer neemt af, de vraag naar koelwater neemt toe, de temperatuur van het water neemt toe en we zoeken graag verkoeling door in het water te duiken (Figuur 8). Op zijn minst een “brain-teaser”!

5. Bodemenergie en grondwaterwinning

Bodemenergiesystemen kunnen helpen bij ons streven naar het gebruik van meer duurzame energie. Het gebruik van de bodem en grondwater voor de opslag van energie is de laatste jaren sterk in opkomst (Figuur 9). Er zijn nu meer dan 1000 open systemen en meer dan 20.000 putten van gesloten systemen. Open systemen maken gebruik van grondwater uit bodemlagen met een bepaalde temperatuur dat wordt onttrokken en via een warmtewisselaar en eventueel warmtepomp geleid en daarna weer in de bodem teruggebracht. Beide gebeurt op enkele tientallen tot ruim honderd meter diepte, afhankelijk van waar zich een geschikt watervoerend pakket bevindt. Gesloten- of warmtepompsystemen maken gebruik van koelvloeistof (water met antivries) dat wordt rondgepompt door een gesloten systeem in de bodem. Het systeem bestaat uit U-vormige kunststof buizen, die in een boorgat worden geplaatst op een diepte van tientallen tot meer dan honderd meter.





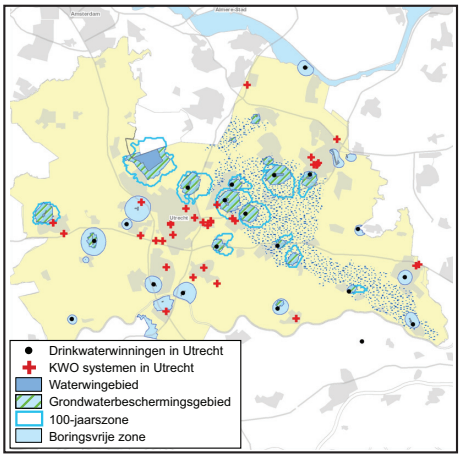
Figuur 9 - Aantal open (CBS) en gesloten warmte-koude opslagsystemen/putten in Nederland [15]

De buizen worden in de bovengrond langs een warmtewisselaar en eventueel een warmtepomp geleid.

De Technische Commissie Bodembescherming heeft in 2004 op verzoek de Minister geadviseerd over beleid ten aanzien van bodemenergie [16]. Onderdeel daarvan waren de mogelijke gevolgen voor bodem- en grondwater. Vanuit de drinkwatersector zijn inventarisaties gemaakt van mogelijke risico's voor de drinkwaterwinning [15,17].

De waterleidingbedrijven maken gebruik van betrouwbaar grondwater dat goed beschermd ligt onder ondoordringbare lagen. Deze bescherming voorkomt dat ziekteverwekkers uit lekkende riolen, infiltrerend oppervlaktewater of mest het grondwater kan bereiken. Bij de aanleg van bodemenergiesystemen worden putten aangelegd. Deze putten doorboren de bodemlagen die als barrière voor bovenliggend grondwater of oppervlaktewater dienen. De ervaring uit de drinkwatersector is dat onvoldoende hygiëne bij de aanleg van putten (gebruik verontreinigd werkwater bv.) kan leiden tot besmetting van het diepe grondwater met micro-organismen. Ook de putconstructie is belangrijk; een mantel kan voorkomen dat water vanaf maaiveld via kortsluitstroming direct langs de put of via het boorgat naar beneden toestroomt. Ook het systeem bovengronds moet voldoende bescherming bieden tegen besmettingen, met name bij open systemen. Als het water in het bovengrondse systeem besmet kan raken met ziekteverwekkers via (open) opslagreservoirs, wanverbindingen of lekkages met besmet water (rioolwater bv.) worden, in het geval van lekkages tussen beide wateren, de ziekteverwekkers naar het diepe grondwater getransporteerd. Het systeem moet dus gesloten zijn en voldoende waarborgen tegen besmetting in zich dragen.

Naast besmetting met ziekteverwekkers zijn er andere mogelijke invloeden van bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit. In het gezamenlijk onderzoeksprogramma van de waterbedrijven (BTO) loopt nu onderzoek naar de effecten van bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit en grondwaterwinning.
De populariteit van de bodemenergiesystemen vanuit oogpunt van duurzame energievoorziening en bestrijding van de uitstoot van broeikasgassen maakt het druk in de ondergrond (Figuur 10). Vanwege



Figuur 10 - Bodemenergiesystemen en grondwaterbeschermingsgebieden in de provincie Utrecht in 2007 [15]

de bescherming van het betrouwbare grondwater is het verstandig om geen bodemenergiesystemen in grondwaterbeschermingsgebieden aan te leggen.

6. Nawoord

Verschillende voorbeelden uit het domein van water en energie, maar met een gemeenschappelijke noemer: ziekteverwekkende micro-organismen zijn meesters in het gebruik maken van de mogelijkheden die we ze bieden. Of het nu gaat om het indammen van een rivier, het koelen van een gebouw, het gebruik van stadsverwarming, het lozen van koelwater of het boren van putten in de nabijheid van grondwaterwinning, we brengen veranderingen in het systeem aan met de bedoeling (duurzaam) energie te produceren of ons comfort te verhogen, maar ook met ongewenste bijwerkingen in de vorm van ziekte- en soms zelfs sterfgevallen. Kennis over het gedrag van micro-organismen in watersystemen en wat er mis kan gaan is onontbeerlijk om te komen tot een goed ontwerp, beheer en onderhoud van de watersystemen. Als deze kennis beschikbaar is, is het wel onze professionele en maatschappelijke opdracht om ze ook in de praktijk zo goed mogelijk toe te passen. Om te voorkomen dat we een dokter nodig hebben. De voorbeelden uit deze bijdrage laten zien dat het daar nog wel eens aan schort. Deze verhalen moeten daarom verteld blijven worden, want nogmaals: diegene die faalt te leren van zijn geschiedenis, is gedoemd ze te herhalen.

7. Referenties

1. Desowitz, 1987. New Guinea tapeworms and Jewish grandmothers. Tales of parasites and people. Norton, New York.
2. Southgate et al, 2001. Studies on the Biology of Schistosomiasis with Emphasis on the Senegal River Basin. Mem. Inst. Oswaldo Cruz, 96:75-78.
3. Van den Hoek, JAR, IJzerman EPF, Coutinho RA, 2006. Legionella-uitbraak in Amsterdam: koeltoren als bron. Infectieziektenbulletin 17:319-321.
4. Van Kranen, HJ, 1988. De aanwezigheid van Legionella species in door drinkwater gevoede watersystemen in Nederland. RIVM rapport, RIVM, Bilthoven.
5. Berbee RPM, 1999. Legionella in oppervlaktewater, in koelwater, in RWZI's, in....; waar eigenlijk niet?. Rapport 99.057, RIZA, Lelystad.
6. Oesterholt, F. et al., 2001. Omvang en preventie van vermeerdering van Legionella in koeltorens en luchtbehandelingsapparatuur. KOA 01.088, Kiwa Nieuwegein.
7. Wullings B., 2007. Snelle, kwantitatieve detectie van Legionella pneumophila met Q-PCR. H2O 5:39-41.
8. Oesterholt et al, 2009. Combinatie Q-PCR en specifieke kweekmethode efficiënt voor screening proceswatermonsters op Legionella. H2O, 24:42-45.
9. Volkskrant, 25 juli 2006
10. Volkskrant, 18 oktober 2006
11. Van Wolferen, 2007. Opwarmen leidingwater t.g.v. stadsverwarming. TNO, Apeldoorn
12. Koops, 1985. Menspathogene organismen in Nederlandse koeltorens. Rapport 5242 – 85MOB, KEMA, Arnhem.
13. De Jonckheere & Van de voorde, 1977. the distribution of Naegleria fowleri in man-made thermal waters. Am. J. Trop. Med. Hyg. 26:10-15.
14. Dive et al, 1981. Isolation of Naegleria fowleri from the cooling pond of an electric power plant in France. Ann. Microbiol. 132:97-105.
15. Bonte et al, 2008. Bodemenergiesystemen in relatie tot grondwaterbescherming. Bodem 5:22-26.
16. TCB, 2004. Advies inzake concept beleidsaanbevelingen project 'Bodem als Energiebron en –Buffer'
17. Van Beek et al, 2003. Gevolgen van koude warmteopslag in grondwaterbeschermingsgebieden voor de drinkwaterwinning. KWR, Nieuwegein.

62e Vakantiecursus - 15 januari 2010

“Energie uit water: hype of kans?”

Afvalwater

Prof.dr.ir. J.B. van Lier, ing. J.F.M. Raap

Druk op afvalwater

Jules van Lier
Technische Universiteit Delft
UNESCO-IHE

Johan Raap
Royal Cosun

1. Energie & Water

Het 2010 thema *'Energie uit Water: Hype of Kans?'* speelt in op de actuele tendensen en tracht een overzicht te geven van de diverse projecten waarbij de koppeling water - energie centraal staat. De energie-inhoud van water manifesteert zich op drieërlei wijzen:

- kinetische energie
- thermische energie
- chemische energie (org. + inorg.)

Gebruik makend van de warmtecapaciteit kan water tevens een belangrijke rol spelen in energieopslag en vervolgens dienst doen als thermische energiebron.

Het winnen van *kinetische energie* wordt in het vlakke Nederland niet toegepast, hoewel er wel interesse bestaat om stromingsenergie te winnen in de 'vensters' van de Oosterschelde dam. Daarnaast zijn er diverse studies om energie te halen uit de zeestroming (o.a. [1]). Elders in de vakantiecursus buigt Han Vrijling zich over de haalbaarheid van enkele mogelijkheden. Ook het winnen van thermische energie wordt nader verkend. Het mijnwaterproject in Heerlen waarbij warm water uit de oude mijnschacht wordt opgepompt is inmiddels in exploitatie. Zelfs de TU Delft wil in de toekomst met geo-thermische energie kunnen voldoen aan de warmtevraag. Warmte-koude opslag, waarbij excessieve warmte wordt opgeslagen in de aquifers om naderhand te kunnen worden ingezet als warmtebron vindt zijn weg in diverse duurzaamheidprojecten. Daarnaast vindt er verkenning plaats om ingestraalde warmte uit wateroppervlaktes te halen en worden mogelijkheden onderzocht om de thermische energie uit huishoudelijk afvalwater (douche, wasmachine) te oogsten.

Onder *chemische energie* valt zowel de potentiële energie gerelateerd aan concentratieverschillen van anorganische componenten zoals zouten, evenals de energie die opgesloten zit in de organische bestanddelen in industrieel en stedelijk afvalwater. Een overzicht en kwantificering van de diverse mogelijkheden met betrekking tot water als energiedrager binnen de Nederlandse watersector is onlangs gepresenteerd door Frijns et al. [2]. Afvalwater neemt hierbij een bijzonder plaats in, te meer daar afvalwaterzuivering normaliter gepaard gaat met energieverbruik, terwijl winning van de chemische energie eenvoudig kan worden gecombineerd met de zuivering van de afvalwaterstroom. Een mes dat aan 2 kanten snijdt dus.

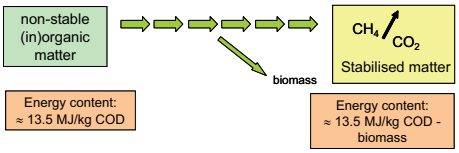
2. Organische gebonden chemische energie in afvalwater

In 2008 is een convenant gesloten tussen Minister Cramer en de Unie van Waterschappen om te komen tot een 2% per jaar energie efficiency winst, culminerend in een 30% vermindering in energieverbruik in het jaar 2020. Ook hier zijn de zinnen op afvalwater gezet. Er zijn inmiddels diverse optimalisaties verricht om de benodigde beluchtingsenergie in conventionele actiefslibinstallaties te minimaliseren. Echter grote winstslagen zijn hier niet te verwachten. Echte doorbraken zijn alleen mogelijk bij conceptuele wijzigingen. De industrieën zijn hier de waterschappen voorgegaan.

De klassieke doelstelling van afvalwaterzuivering is verwijdering van organische vervuiling en bemestende stoffen, kortweg CZV, N en P. De zuurstofvraag in een afvalwaterstroom kan eenvoudig worden weggenomen door de organische stof rijkelijk te voorzien van zuurstof. Normaliter gebeurt dit met een beluchtingsysteem dat hetzij lucht inbrengt via de bodem van een bassin of waarbij lucht wordt 'ingeslagen' aan het oppervlak. In enkele gevallen wordt zuivere O_2 gebruikt. De energiebehoefte van het beluchtingsysteem is afhankelijk van het type beluchter en de hoeveelheid te oxideren vuillast en komt gemiddeld overeen met zo'n 3.6 MJ (1 kWh) per kg organische stof. De energie inhoud van diezelfde kg CZV is zo'n 13.5 MJ aan chemisch vastgelegde energie in organische componenten. Uitgaande van uit fossiele bronnen opgewekte elektriciteit en een rendement van 40% bij de elektriciteitscentrale is het netto energieverlies 3.6/0.4 + 13.5 = 22.5 MJ. Indien de zuivering tevens tot doel heeft de N te elimineren middels nitrificatie en denitrificatie zal de fossiele energiebehoefte hoger uitvallen.

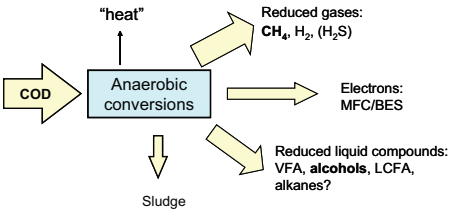
3. Anaerobe zuivering

De energiepiek in de jaren zeventig van de vorige eeuw heeft tezamen met de invoering van de Wet verontreiniging oppervlaktewateren (Wvo) tot de ontwikkeling van hoogbelaste anaerobe zuiveringsystemen geleid, gebaseerd op de UASB technologie van Lettinga [3]. In deze reactoren vindt onder reducerende condities een anaerobe oxidatie plaats van organische stof waarbij de vrijkomende elektronen worden overgedragen aan de organische stof zelf en niet aan O_2 of andere oxiden zoals NO_x en SO_4^{2-}. Het resultaat is dat een deel van de organische stof wordt geoxideerd tot CO_2 en een deel wordt gereduceerd naar CH_4. De exacte verdeling is afhankelijk van de oxidatiestaat van het binnenkomende materiaal en kan worden ingeschat door de CZV/TOK (COD/TOC) ratio vast te stellen. Het theoretische percentage CH_4 in het biogas bedraagt 18.75 * CZV/TOK [4]. De eindproducten van de anaerobe oxidatie zijn gasvormig en verlaten het reactor medium vanzelf. De energie-inhoud van de organische stof, t.w. v. 13.5 MJ/kg CZV is in zijn geheel ingesloten in het eindproduct CH_4. Slechts een klein deel van de originele energie-inhoud komt terecht in het geproduceerde slib, dat afhankelijk van het type substraat, maar in zeer kleine hoeveelheden wordt geproduceerd. Maar ook die energie is eigenlijk niet 'verloren'.



Figuur 1 - Anaerobe conversie: conservering van energie

Naast CH_4 kunnen uiteraard ook andere gereduceerde eindproducten gevormd worden waarbij het proces daar al of niet op wordt gestuurd.



Figuur 2 - Productie van gereduceerde eindproducten met behoud van ingesloten energie. Bij Microbial Fuel Cells (MFC) en Bio-Electrochemical Sytems (BES), worden de vrijgekomen elektronen direct overgedragen op een anode

De chemische energie kan als verloren worden beschouwd indien de elektronen worden overgedragen aan O_2 of NO_x, die vervolgens worden gereduceerd tot H_2O en N_2, veel voorkomende

reacties in de aerobe zuivering. Ook SO_x kan fungeren als elektronacceptor waarbij het gereduceerde HS^- ontstaat en een klein deel als H_2S de reactor via de gasfase verlaat. De energie is hierbij niet geheel verloren maar de reactie is ongewenst (maar onvermijdelijk) in de anaerobe zuivering. Het product van de anaerobe zuivering bestaat derhalve uit een mengsel van 2 gassen, CO_2 en CH_4 alsmede uit een bescheiden hoeveelheid nieuw bacteriemateriaal. Uiteraard kent een praktijk anaerobe zuivering een veelheid aan reacties en worden tevens nevenproducten gevormd, maar voor de stochiometrische vergelijking kunnen we uitgaan van het vereenvoudigde oxidatie-reductie proces van organische stof.

De praktijk, en met name de agro-food sector, heeft sinds de jaren tachtig dankbaar gebruik gemaakt van de anaerobe zuiveringstechnologie om kosteneffectief hun proceswater te kunnen behandelen. Onderzoek naar de industriële toepassing van de anaerobe techniek geeft een gestage groei aan [5] die, gecorrigeerd voor het aantal recent gebouwde reactoren in China, inmiddels heeft geleid tot zo'n 3500 anaerobe zuiveringen wereldwijd, voor bijna 90% bestaande uit (korrel)slibbedsystemen.

Zorg om de lange termijn energievoorziening en uitstoot van broeikasgassen heeft geleid tot een hernieuwde interesse in de anaerobe zuiveringstechnologie voor afval(water) behandeling en proceswaterzuivering. De dubbele energiewinst (voorkomen van gebruik fossiele brandstoffen en winnen van chemische energie uit de afval(water) stroom), plaatst de anaerobe zuivering in een geheel ander perspectief. Het zuiveringsproces wordt een energieproces en krijgt dientengevolge een heel andere plek het productieproces [6,7]. Indien een industrie zo'n 30 ton CZV per dag 'verliest' spreken we in feite over een energiewaarde van 30 * 13.5 GJ/ton = 405 GJ. Wordt dit niet anaeroob maar aeroob behandeld dan hebben we te maken met een extra energieverlies van 270 GJ, rekening houdend met 40 % rendement van de elektriciteitsproductie. Optellend levert dit een totaal energieverlies op van 675 GJ.

Bij Suiker Unie in Dinteloord is de onlangs opgestarte anaerobe waterbehandeling er gekomen puur uit energieoverweging, waarbij het waterzuiveringsaspect eigenlijk totaal niet speelt. De bestaande aerobe behandeling was voldoende groot om de lozing te laten voldoen aan de specificaties van het bevoegd gezag. Ook geuremissie was in die regio geen kwestie. Ook is slibproductie geen onderwerp, omdat in feite alle slib (de asrest althans) wordt gevormd uit lutum van de aangevoerde grond. De resterende drijfveer is dus energie, en wel op 2 fronten : fors minder beluchtingsenergie en benutting van methaan, dat laatste ongeveer 2 Mm^3 aardgasequivalent per jaar per fabriek.

Financiële rentabiliteit geen eenvoudig item. Indien dat alleen wordt berekend over de energieprijzen -forse daling in najaar 2008, net na de concern beslissing- dan is dat negatief, bij een bedrijfsperiode van 4 maanden, de campagne. Echter, Suiker Unie voorziet deze methaanreactoren als 1e technologisch noodzakelijke stap in een verdergaande ontwikkeling van biomassa vergisting met een doelstelling van 10 Mm^3 aardgasequivalent per jaar vanaf 2011. In 2012 volgt dan mogelijk de andere fabriek met een zelfde hoeveelheid. In de verdere toekomst een mogelijk 13 tal regionale vergisters, voor biomassa die niet zal worden afgevoerd naar de fabrieken. Alleen al het huidige bietenblad vertegenwoordigd een netto energie waarde van ca. 3,5 PJ per jaar, die momenteel nog niet wordt benut [8].
De technologische vernieuwing zit in de koppeling tussen vergisting (slurriereactor) en waterbehandeling (korrelreactor). De basis daarvan is dat een slurriereactor een energiepotentie heeft van maximaal 1,5 kW/m^3 (voor vergisters van rwzi's ongeveer de helft !), en een korrelreactor ongeveer 4,5 kW/m^3.

Parallel aan de energetische overwegingen die ten grondslag liggen aan bovenstaande ontwikkeling speelt ook het thema nutriëntterugwinning een belangrijke rol. Immers met name de biomassa geeft een enorme flux aan nutriënten naar een watergedragen proces.

Figuur 3 - Hoogbelaste anaerobe waterbehandeling (methaanreactoren) bij Suiker Unie Dinteloord.

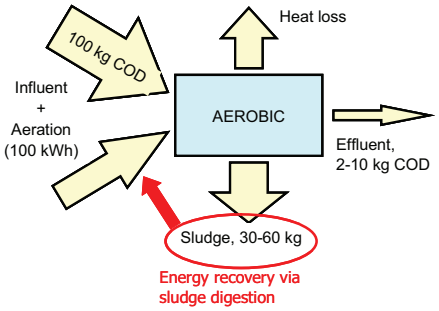
In de huidige situatie wordt de N-verwijdering nog gekoesterd, door de toegevoegde CZV alleen met nitraat te laten oxideren, en te voorkomen dat CZV met zuurstof wordt geoxideerd. Dat is geen eenvoudige opgave. Gelukkig bestaan er nu duurzame technieken als Anammox en Canon, maar ook die zijn gericht op N-verwijdering. De toekomst moet zijn N terugwinning en benutting. Voor P en K worden ook routes ontwikkeld. In het verlengde van de energiefabriek staat dus de nutriëntfabriek. Een groot struikelblok is helaas de juridische mogelijkheid voor “sluiten van de keten”. Erover praten blijkt nog steeds makkelijker dan ook doen [9]. De eerste industriële projecten gericht op het terugwinnen van P zijn reeds van start gegaan. In Olburgen wordt in een publiek-private samenwerking tussen het waterschap en het aardappelbedrijf Aviko P als struviet (NH_4MgPO_4) teruggewonnen. Ook andere agro-food industrieën bezitten deze technologie. De afzet en benutting van struviet is helaas nog lastig. Momenteel is de afzet vooral in het buitenland.

Het omzetten van het geproduceerde CH_4 in nuttige energie bij een zo hoog mogelijk rendement blijft een uitdaging. Met een moderne WKK kan tot 90% van de energie-inhoud worden teruggewonnen, waarbij 42% naar elektriciteit en de rest naar warmte, deels via motorkoelwater maar ook via benutting van de rookgassen. Alternatief voor elektriciteitsproductie is stoomproductie. Stoom wordt op diverse plaatsen in een productieproces toegepast.

4. Rioolwater

Het Nederlands rioolwater is té dun en té koud voor toepassing van een succesvolle directe anaerobe behandeling door een conventioneel ontworpen UASB reactor. Bij temperaturen onder de 15°C stagneert de anaerobe omzetting van m.n. vethoudende afvalstoffen, waardoor van een vergaande mineralisatie geen sprake kan zijn. Wijziging van het zuiveringsconcept, waarbij gescheiden gisting wordt toegepast, zou dit euvel kunnen verhelpen. Echter, de anaerobe zuivering zou, indien succesvol, alle BZV wegnemen, waardoor conventionele N verwijdering in gevaar zou komen. Wederom dient men het zuiveringsconcept op zich ter discussie te stellen om tot een grote doorbraak te komen. Refererend naar de gewenste duurzaamheid zou men kunnen stellen dat het behalen van de restrictieve effluentwaarden niet meer langer het **doel** van een zuivering is, maar de **randvoorwaarde** waarbinnen een zuivering ontworpen moet worden. Het verlaten van uitontwikkelde concepten is echter een moeilijk proces zeker indien nieuwe concepten zich (nog) niet bewezen hebben in de praktijk.

Binnen de communale sector heeft de anaerobe technologie inmiddels een erkende plek en zorgt voor gisting van spuislib uit de primaire bezinker al dan niet aangevuld met secundair slib uit de aeratietank. In veel gevallen haalt een zuivering zo’n 50% van zijn energiebehoefte uit het geproduceerde CH_4 van de slibgisting. In sommige gevallen worden zelfs waarden tot 100% dekking geclaimd, maar dat is veelal uit mee-vergisten van externe biomassa.



Figuur 4 - Energie terugwinning tijdens actief slib proces

Maximering van de anaerobe gisting van primair en secundair slib wordt momenteel naarstig onderzocht in het kader van het concept 'de EnergieFabriek'. 'Op-concentreren' en het verder omzetten van de organische stof is hierbij een belangrijke route die ook verderop in de Vakantiecursus uitvoerig zal worden besproken. Verhogen van primair slibproductie kan worden bereikt door verbeterde afscheiding van de zwevende stof in het binnenkomende rioolwater. Dosering van polyelectrolyten leidt hierbij niet alleen tot maximalisatie van de primair-slibproductie maar ook tot verhoogde P concentraties in het slib. Het verminderen (of zelfs vermijden?) van chemische toevoegingen kan worden bereikt door toepassing van een verbeterd A-B systeem. In de hoogbelaste A-trap wordt colloïdale en zwevende stof ingevangen terwijl de opgeloste CZV wordt omgezet in snelgroeiend slib. Ook fysische scheiding door middel van membranen of fijnmazige trommelzeven behoort hierbij tot de mogelijkheid. In het kader van de 'EnergieFabriek' zullen de diverse mogelijkheden verder door prof. Willy Verstraete en Ferdinand Kiestra worden behandeld.

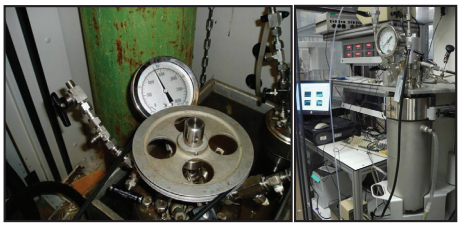
5. Vermijden van verdunning: de decentrale aanpak

Door een veelheid van redenen is de interesse in decentrale sanitatie de laatste jaren snel toegenomen. Immers, decentrale sanitatie biedt uitstekende mogelijkheden voor terugwinnen van nutriënten en meststoffen, terwijl het terugwinnen van chemische energie door vergisting van menselijk afval, al of niet gecombineerd met keukenafval, kan worden gemaximaliseerd. Daarnaast blijven de meeste pathogenen, medicijnresten en hormonale stoffen in een beheersbare kleine stroom. De kritische kanttekening bij het decentrale concept is de vermeende bedrijfsonzekerheid, "wie krijgt het beheer en hoe wordt dit uitgevoerd", alsmede de zorg om gegarandeerde prestaties van de kleine zuiveringseenheden. Vergaande automatisering van de systemen zou een oplossing kunnen bieden om deze zorg weg te kunnen nemen ervan uitgaande dat de benodigde meet- en regelapparatuur op korte termijn beschikbaar komt. Het veilig terugwinnen en nuttig hergebruik van CH_4 gas in decentrale systemen blijft echter een uitdaging. Het geproduceerde biogas komt immers vrij in kleine hoeveelheden en is bovendien verontreinigd met gereduceerde corrosieve gassen (H_2S), heeft een relatief laag calorische waarde en zou bovendien humane pathogenen kunnen bevatten. Conventionele verbranding in geisers en verwarmingsketel behoort tot de mogelijkheid maar vereist een decentrale buffer gezien de discontinuïteit in de vraag. Bovendien zal naar alle waarschijnlijk het biogas bij dergelijk gebruik moeten worden ontdaan van corrosieve bestanddelen. Het opwerken tot groen gas zou een ideaal alternatief zijn maar de bestaande technologieën zijn alleen economisch rendabel bij centrale toepassingen.

5.1 Opwerken van biogas

Opwerking van biogas voor hoogwaardig gebruik in gasmotoren, injectie in aardgasnet of als brandstof voor voertuigen, vindt normaliter plaats door middel van complexe technologieën in gecentraliseerde installaties [10]. Schaalvergroting is noodzakelijk om het opwerken van biogas rendabel te maken, d.w.z. het strippen van CO_2 en H_2S en drogen van het biogas en het al of niet comprimeren tot hoge drukken. In de SenterNovem update Groen Gas [11] wordt berekend dat injectie van opgewerkt biogas in het aardgasnetwerk op de lange termijn economisch uitkan maar dat de opwerkinstallaties alleen bij gecentraliseerde installaties, zoals rwzi's, (co-)vergisters, etc. rendabel zijn. In de Groen Gas update zijn alleen gasdebieten > 100 m^3/h meegenomen. Gezien het energieverlies dat gekoppeld is aan het opwerken van biogas, is productie van groen gas met name interessant daar waar de geproduceerde energie niet op locatie gebruikt kan worden. Helaas wordt het 'op locatie zelf gebruiken' subsidie-technisch nog niet als groen gas gezien.

Decentrale CH_4 productie met lage debieten (0-50 m^3/h) en toevoeging in het lokale aardgasnetwerk en/of in een separaat decentraal biogasnetwerk biedt op termijn zeer interessante perspectieven afhankelijk van de kosten voor het opwerken van het biogas. Decentrale CH_4 productie ontsluit een volledig nieuw biomassa aanbod en sluit nauw



Figuur 5 - Hoge druk reactor (links) met drukken tot 90 bar (rechts).

aan bij de onlangs ingezette ontwikkeling naar decentralisatie in sanitatie met scheiding aan de bron. De Nederlandse bevolking produceert per jaar ongeveer 500 kton aan organische vuillast (uitgedrukt in CZV equivalenten) per jaar via het rioolsysteem, met een potentiële energie-inhoud van 6.5-7 PJ. Bij een CH_4 rendement van 33% komt dit overeen met ongeveer 60 miljoen m^3 CH_4 per jaar dat overeenkomt met 20% van het berekende hoog scenario groen gas productie voor 2010 [11]. Tot dusver wordt deze vuillast in gecentraliseerde rwzi's afgebroken. De hiervoor benodigde jaarlijkse energiebehoefte is ongeveer 200 GWhe. De voorziene opbrengst zal meer dan verdubbelen indien ook het keuken "groen"afval mee kan worden vergist in de decentrale eenheden. Voor het verkrijgen van een hoogwaardig eindproduct zou de traditionele gistingstank en biogasopwerkingsinstallatie vervangen moeten worden door een nieuw te ontwikkelen Autogenerative High Pressure Digestion (AHPD) proces.

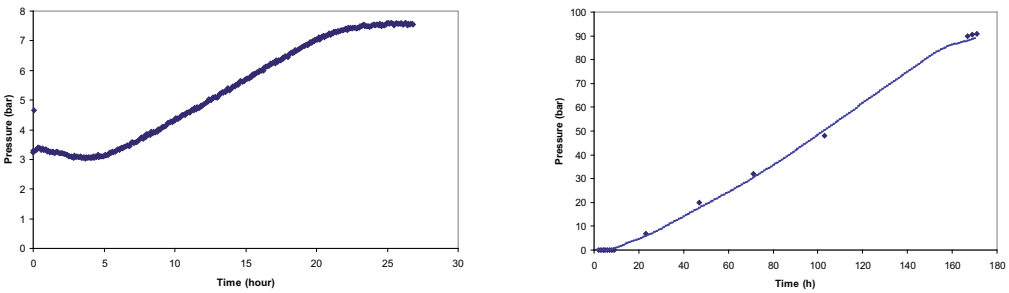
6. Auto-generatieve hoge druk

Het AHPD proces is er op gericht om door middel van auto-generatieve hoge druk gisting schoon en droog CH_4 te verkrijgen dat direct is her te gebruiken in een lokaal gasnetwerk. Tijdens het AHPD proces, waarbij drukken tussen 5-50 bar (of zelfs hoger) kunnen worden bereikt, worden ioniseerbare gassen zoals CO_2 en H_2S in de vloeistof gedrukt terwijl de waterdampconcentratie in het biogas significant wordt verlaagd. Aangezien de schone hoge druk methaan direct uit de reactor wordt verkregen kan het op zeer kleine schaal worden toegepast. De techniek is nog in een zeer pril stadium en wordt momenteel nader verkend in een SenterNovem EOS-LT project in samenwerking met Wageningen Universiteit en het milieutechnologisch bedrijf Bareau.

Recent uitgevoerd onderzoek laat zien dat drukken zeer snel kunnen oplopen tot voorbij 90 bar, waarna de proef uit veiligheidsoverwegingen is stopgezet (Figuur 5, 6)

Nieuwe technieken zoals het AHPD proces kunnen mogelijk energieverliezen tijdens het terugwinnen van de chemisch energie in een nuttig bruikbare vorm tot een minimum beperken. Voor toediening in het lokale gasnet zijn overdrukken tot maximaal 8-10 bar voldoende. Transport in de centrale transportleidingen van de gasunie vereisen drukken van 40 bar of hoger.

In samenwerking met het milieutechnologisch bedrijf Bareau, wordt de praktische haalbaarheid van het systeem nader bestudeerd. Randvoorwaarden voor toepassing zijn eenvoud en zekere bedrijfsvoering. Het is nog onduidelijk in hoeverre deze randvoorwaarden ook daadwerkelijk gehaald kunnen worden. Echter de opgebouwde biogasdruk kan worden opgevat als een 'additionele energiebron' die kan worden aangewend voor



Figuur 6 - Druk ontwikkeling in batchtesten oplopend naar 8 bar (links) en 90 bar (rechts)

toepassingen die normaliter afhankelijk zijn van het elektriciteitsnet. Voorbeelden zijn het aandrijven van een pneumatische influentpomp en het verkrijgen van een benodigd drukverschil over een zuiveringsmembraan. Ten behoeve van toepassing dient de benodigde druk geoogst te worden uit het substraat dat voldoende energetisch moet zijn om continue drukopbouw te kunnen garanderen. Zorgpunt is de hogere prijs voor de reactor die bestendig moet zijn tegen de hogere werkdrukken met een veiligheidsmarge, maar gezien de prijs van een LPG tank moeten ook hier competitieve prijzen mogelijk zijn. Indien haalbaar, betekent inzet van het AHPD proces een doorbraak in het maximeren van energieconservering m.b.t. de huishoudelijke afvalstromen. Het rendementsverlies t.b.v. van opwerken is, naar het zich laat aanzien, zeer gering. Het biologische en fysisch-chemische systeem wordt momenteel onderzocht in samenwerking met Wageningen Universiteit. Populatiedynamica, kinetiek en processturing middels CO_2 onttrekking ten behoeve van pH regulering zijn hierbij sleutelbegrippen.

7. Meststoffen

Naast energie vertegenwoordigen ook de decentraal geproduceerde meststoffen een belangrijke toegevoegde waarde van het decentrale zuiveringsconcept. Een overzicht van Zeeman [12] geeft aan dat bijna de helft van de agrarische P behoefte te winnen is uit de urbane afvalwater stroom (Tabel 1).

Wat betreft N ligt dit op een kwart en voor K is dit zelfs meer dan de helft. De actuele hoeveelheden die in het Sneek project worden teruggewonnen liggen weliswaar lager maar ze vertegenwoordigen een aanzienlijk potentiële bijdrage aan de mestvoorziening (Tabel 1).

Ook voor het decentrale concept geldt dat gebonden P en orthofosfaat naast hun bemestende waarde ook een behoorlijke energie-w-aarde vertegenwoordigen. In feite dient deze energiewaarde te worden meegenomen in het energetische rendement. Net zoals bij de industriële toepassing zijn ook hier beschikbaarheid, vraag, beleid, juridische aspecten en het kostenaspect belangrijke randvoorwaarden voor terugwinning. Gasvormige en vloeibare producten kunnen nog relatief gemakkelijk via leidingen en pijpen worden getransporteerd. Voor vaste stoffen zal het een grote uitdaging zijn om deze producten zonder overlast en met behoud van de milieuwinst uit de wijken te halen. Echter waar een wil is, is een weg. Quo vadis?

8. Referenties

1. Hulsbergen K., R. Steijn, R. Hassan, G. Klopman, and D. Hurdle (2005). Dynamic Tidal Powe (DTP). In: Proc. of 6th European Wave and Tidal Conference, August 29th – September 2nd 2005, Glasgow, UK.
2. Frijns J., J. Hofman, A. van Wezel (2009). Water as energy carrier: climate mitigation and renewable energy options in the water sector. In: Proc. of IWA Water & Energy Conference, 29-31 October 2009, Copenhagen, Denmark.
3. Lettinga G., Velsen A. F. M. v., Hobma S. W., Zeeuw W. J. de and Klapwijk A. (1980) Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment. Biotech. Bioeng. 22, 699-734.
4. Van Lier, J.B., N. Mahmoud and G. Zeeman

Tabel 1 - Hoeveelheid N, P, en K in theorie winbaar uit zwart water (BW) en keukenafval (KW) in Nederland, alsmede de actuele agrarische behoefte aan deze meststoffen en de potentiële dekkingsgraad. De laatste 2 kolommen geven de gevonden waarden tijdens het pilot experiment in een wijk van 32 huizen in Sneek. De gevonden lagere waarden worden geweten aan de relatieve grote concentraties N en P geassocieerd met de vaste fractie. Getallen zijn afkomstig uit [12].

	BW + KW [1)]	Synthetic fertiliser use [2)]	Potential coverage [3)]	N, P [4)]	$NH4^+$, PO_4^{3-} [4)]
	(ton/y)	(ton/y)	(%)	(ton/y)	(ton/y)
N	74,399	288,000	26	46,174	37,668
P	9,590	21,000	46	3,828	2,686
K	23,470	35,000	67		
CH_4				$98 \cdot 10^6$ m^3/y	

[1)] Based on per capita discharge; [2)] Actual consumption in NL; [3)] Fertiliser value; [4)] Pilot results, Sneek

(2008). Anaerobic Wastewater Treatment. In: M. Henze, M.C.M. van Loosdrecht, G.A. Ekama, D. Brdjanovic (eds.), Biological Wastewater Treatment, Principles, Modelling and Design, Chapter 16, ISBN: 9781843391883, IWA Publishing, London, UK, p. 415-456.

5. Van Lier J.B. (2008). High-rate anaerobic wastewater treatment: diversifying from end-of the pipe treatment to resource oriented conversion techniques. Wat. Sci. Technol., 57(8): 1137-1148.
6. Raap, J. F. M. (2004). Uitbreiding anaërobe waterbehandeling bij CSM. H2O (2004), 19, 32.
7. Raap, J. F. M (2009). Suikerindustrie heeft al haar energiefabriek. Waterforum (5) 4, 10-13.
8. Raap, J. F. M. et al (2009). Plant Research International Wageningen UR, rapport 241. Afvoer en vergisting van bietenloof. Burostudie naar de effecten op nutriënten, emissies en energie.
9. Raap, J. F. M et al (2009). Over de Wvo gesproken... Herinneringen uit de rijke historie van de Wet verontreiniging oppervlaktewateren en een doorkijkje naar de toekomst. 63-67.
10. Wellinger A. and A. Lindberg (1999). Biogas upgrading and utilisation. IEA Task group 24. pp. 20.
11. Welink J.H., M. Dumont, K. Kwant (2007). Groen Gas; gas van aardgaskwaliteit uit biomassa / update van 2004. Uitgave van SenterNovem, Utrecht, pp 34.
12. Zeeman G. (2009). Resource recovery from source separated wastewater. In: Proc. of The International Workshop on Strategy for Anaerobic Biotechnology, He Yangling (Ed.). 24-27 November 2009, Xi'An, China.

Prof. dr.ir. W. Verstraete

Exit conventioneel actief slib?

Willy Verstraete
Universiteit Gent

1. Hoe het groeide

In den beginne... waren huishoudelijke fecaliën in onze gewesten heel waardevol. Urine was onder andere essentieel voor de volders. De fecaliën werden met grote zorg door de boeren opgehaald in de steden, geproefd om eventuele frauduleuze aanlenging met water te onderscheppen, en dan naar de landerijen gebracht als meststof. Met de industriële revolutie ontstond het concept van 'afval'water. Het mengsel van fecaliën en huishoudelijk gebruikt water werd een bron van ziekte en aldus een gevaar voor de gezondheid van de mensen in de stad. Ca. 1850 was cholera in onze steden nog schering en inslag. Aldus is het concept ontstaan om afvalwater te verwijderen uit de stad en het op landerijen buiten de stad te bevloeien om groenten te kweken (zie o.a. Achères naast Parijs). Aansluitend is dan een bewerking ingevoerd om het minder stinkend en vies uitziend te maken nl. de beluchting door middel van oxidatiebedden of actief slib. Naderhand is de notie gekomen van niet enkel de geur en de zuurstofvraag uit het afvalwater weg te nemen, doch ook de nutriënten. Recent wordt intens gesleuteld aan het elimineren van de micropolluenten. Al bij al is gans het huidige procesgebeuren gericht op 'dissipatie': het totaal verbreken van alle structuren en molecules en die terug ad random in de natuur verspreiden. De huidige procesgang van het water resulteert in een koolzuurgas voetafdruk van de orde van 65 kg per inwoner per jaar en laat slechts beperkt hergebruik toe.

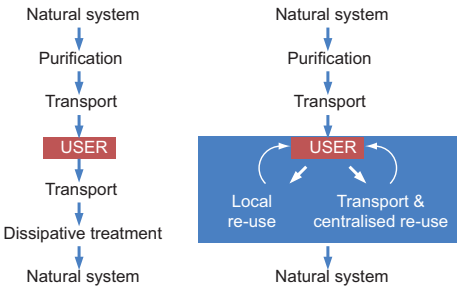
2. Quoi de neuf ?

Een hele reeks van nieuwe ontwikkelingen maken het mogelijk om de afvalwatertechnologie actueel totaal te herontwerpen. Centraal staat wel het nieuwe wereldbeeld van de eindigheid van de natuurlijke hulpbronnen, die de burger nopen om actief mee te werken en te betalen aan een andere aanpak van de watercyclus. Het heeft heel veel voeten in de aarde gehad de burger ertoe te brengen te aanvaarden dat het geheel van de waterdiensten (drinkwatertoevoer + afvalwaterafvoer en behandeling) een kostenplaatje heeft van de grootteorde van 100 Euro per inwoner per jaar. Geleidelijk dringt dit paradigma door en aansluitend hiermee kan de technologie toewerken naar het ontwerpen van een totaal nieuw gebeuren, waarbij van meet af aan gedacht en gebouwd wordt volgens de principes van Cradle to Cradle, t.t.z. alles wordt geaccentueerd op minimaliseren van energie-input en het maximaliseren van hergebruik. Bovendien beseft de burger dat dit

gebeuren niet gratuit kan worden doorgevoerd.

3. Voorspel

Vooreerst is de huidige watercyclus te sterk gericht op transport. Het water wordt vanuit de natuur over grote afstanden aangevoerd, gezuiverd en dan door de verbruiker kortstondig gebruikt. Navolgend komt terug transport over vaak grote afstanden naar een centraal punt van verwerking en dan naar een punt van lozing. In de nieuwe watercyclus wordt het water, eenmaal ter hoogte van de gebruiker, meerdere malen gebruikt in gesloten cyclus (Figuur 1).



Figuur 1 - Schema van de oude en de nieuwe watercyclus

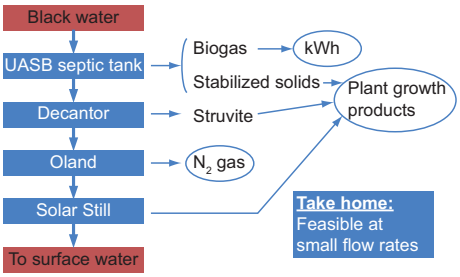
Gebruikt water bevat diverse potentiële waardevolle componenten zoals warmte, nutriënten, organische molecules die aan zich een zekere energie inhoud hebben, en tenslotte water zelf (Tabel 1).

Tabel 1 - Grondstoffen in water

Potential recovery	Per m³ sewage	Market prices	Totel per m³ sewage
Organic fertilizer	0.10 kg	0.200 €/kg	0.020 €
Methane	0.14 m³	0.338 €/m³ CH4	0.047 €
Nitrogen	0.05 kg	1.0 €/kg	0.050 €
Phosphorus	0.01 kg	0.7 €/kg	0.007 €
Water	1 m³	0.250 €/m³	0.250 €

Een primeur in het decentraal behandelen en partieel hergebruiken van afvalwater is de site Sneek in Nederland (Figuur. 2). Het is niet evident dat dit gebeuren grote navolging zal kennen.

Een primeur in het centraal behandelen en partieel hergebruiken van huishoudelijk afvalwater is de site Wulpen (Oostduinkerke) in Vlaanderen (Figuur 3). Deze site was de eerste die het aandurfde om de gebruiker van drinkwater te confronteren met het feit dat hij, ten dele, rioolwater consumeerde. Deze kringloopsluiting heeft via de overstap van de Seghers technologie naar de Keppel-Seghers configuratie, de basis gelegd voor de nu vermaarde aanpak van NEWater-productie in Singapore.



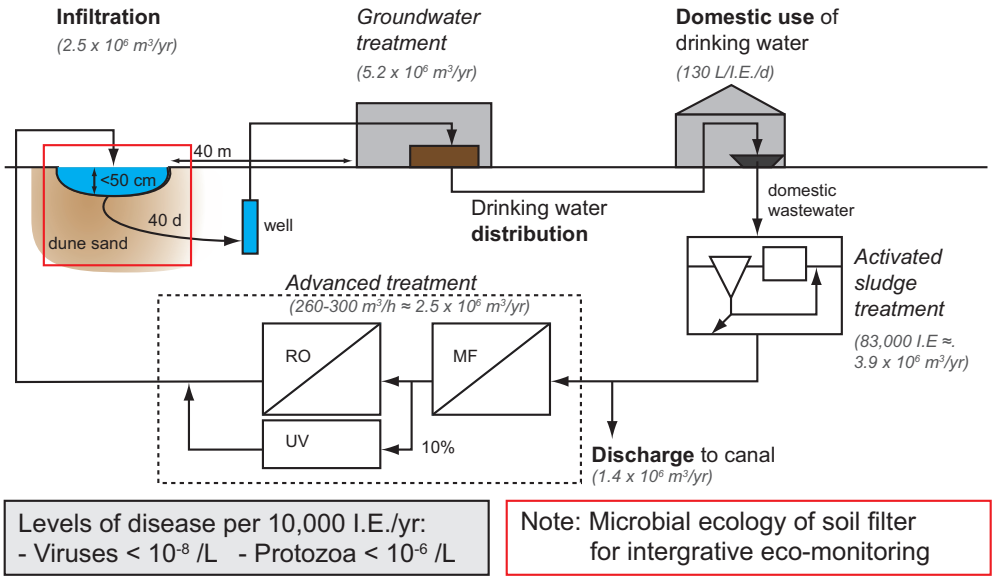
Figuur 2 - Gedecentraliseerde behandeling van afvalwater in Sneek

4. Wat moet op de schup?

Actueel is de gouden standaard in de waterzuivering het systeem van actief slib met doorgedreven nutriëntenverwijdering. Dit proces kost in termen van capex en opex van de grootteorde van 0,3 tot 0,6 Euro per m³ water behandeld. Evenwel moet worden gesteld dat van de 30-40 kWh/inw. jaar die zou kunnen worden teruggewonnen, er nauwelijks een derde tot de helft wordt gecapteerd. Zelden wordt er actief aan herwinnen van de N, P, K gedaan. De meeste organische koolstof wordt onder inbrengen van energie (beluchting) omgezet tot CO_2 respectievelijk tot spuislib. Dit laatste is een perfecte illustratie van de Wet van Murphy : het oorspronkelijke probleem is omgezet tot een nieuw probleem. De verwerking van het overschot slib (vaak via vergisten en verbranden) resulteert ook in CO_2 emissie. Het water tenslotte wordt geloosd, en als het wordt hergebruikt door middel van een aanvullende behandeling met Ultrafiltratie en Inverse Osmose dan kost dit ca 0,4 Euro per m³ behandeld. Aldus belopen de totale kosten van behandelen van ruw afvalwater door actief slib, gevolgd door een aanvullende behandeling tot drinkwater, ca. 1,0 Euro per m³. Deze weg is in velerlei opzichten toe aan grondig herdenken.

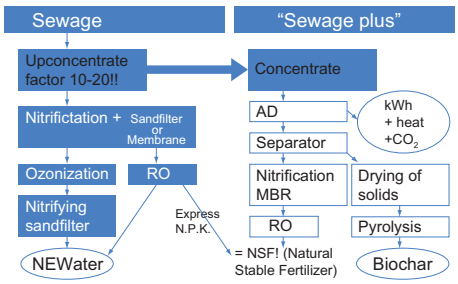
5. Wat moet kunnen

Het probleem bij de huidige watercyclus is de verdunning. Water wordt als transportmiddel bij uitstek gebruikt en daardoor wordt de ‘54g biologische zuurstofvraag per inwoner per dag‘ verdund in 100-200 L water. Het komt er op aan de



Figuur 3 - Kringsluiting afvalwater-drinkwater in Wulpen, met inbouw van HACCP & QMRA

reststoffen die via het toilet en de keuken in het water komen, en die nog voor een groot deel particulair zijn, zo snel mogelijk terug uit het water te halen. Dan kunnen deze stoffen, opgeconcentreerd, via een aparte lijn een bewerking ondergaan die helemaal gericht is op hergebruik. Figuur 4 schets de uitsplitsing aan de bron in een dunwater en een dikwater route. Het dunne water kan vervolgens, zonder te moeten onderworpen worden aan een conventioneel actief slib met organotrofe bacteriën, worden geklaard en afgeleverd als NIEWater. Het dikwater gaat doorheen een reeks van behandelingen die recent heel fel zijn bestudeerd en geoptimaliseerd geworden in de mestverwerking. Hierbij zijn de eindproducten voor



Figuur 4 - Nieuwe waterzuivering gesteund op scheiden aan de bron volgens het C2C concept

hergebruik : nutrienten van natuurlijke oorsprong die stabiel en op maat zijn van de landbouwer, biogas omgezet tot energie (kWhel en kWth) en tenslotte biochar. Heel bijzonder aan biochar is dat het koolstof is die, als ze wordt in de grond gebracht, de bodemvruchtbaarheid bevordert en bovendien voor minstens een paar honderd jaar aldaar opgeslagen is. Op die wijze wordt actief een bijdrage geleverd aan de vermindering van de CO_2-uitstoot.

6. Wat knelt?

Het kernpunt van de nieuwe waterzuivering is uiteraard het vermogen zo snel en zo goed mogelijk te scheiden. Diverse benaderingen zijn in het verleden reeds uitgeprobeerd : CEPT, flotatie, microfilters, korte aerobie (AB Verfahren), Heel uitdagend is het ontwerpen van een directe membraanfilter die op het ruwe water kan worden ingezet en ook de colloïdale fracties kan tegen houden. Dit alles moet kunnen aan een kostprijs van 1 Euro per m³; liefst minder (Tabel 2 en 3). Dit is het knelpunt. Voor de overige stappen zijn er een pak mogelijke alternatieven. Hieronder zijn een aantal nieuwe handvaten t.a.v. het behandelen van micropolluenten in de waterlijn geschetst.

Tabel 2 - Economische inschatting van huishoudelijk afvalwaterzuivering volgens C2C

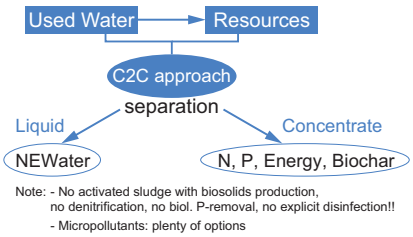
Processes	Costs (€/m³)	
Major flow		
Dissolved air flotation	0.02 - 0.03	
Dynamic sand filtration	0.05 - 0.06	
Ultrafiltration and Reverse Osmosis	0.46 - 1.06	0.53 - 1.15
Minor flow		
Anaerobic digestion	Break even	
Mechanical separation	0.08 - 0.10	
Pyrolysis	Break-even	0.08 - 0.10
	Total costs	**0.61 - 1.25**

Tabel 3 - Economische hoofdlijnen van oude en nieuwe waterzuivering

CAS design	C2C design
Total cost with water recovery ≈ **1,0 €/m³**	Total cost with up-recycling of water & nutrients ≈ **1,0 €/m³** **Perspective** • CO_2 recycling via algae • Recovery of struvite • C-storage as biochar
Take home: The C2C design can already be achieved at equal costs of the CAS + it holds plenty of extra potentials	

Aanvullende processen om micro-polluenten te verwijderen:

- Zero valent iron (ZVI) als algemeen reducerend agens upfront (Luming et al., 2008; EST 42: 5348-5389)
- Bio-Pd voor reductieve verwijderingen downstream (De Windt et al., 2005; Environ. Biot. 90: 377-389; LabMET)
- Mangaanoxiderende bacteriën voor diverse oxidatieve verwijdering in de nazuivering (Forrez et al., 2009; Wat. Res. 43: 77-86; LabMET)
- Bio-Ag voor navolgende hygiënisatie (Sintubin et al., 2008; Appl. Microbiol. Biotechnol. 84: 741-749; LabMET)



Figuur 5 - De nieuwe waterzuivering in hoofdlijnen

7. Slotsom

De watercyclus is toe aan een totaal herontwerp (Figuur 5). Er moet gedreven worden doorgedacht hoe water in de stad optimaal wordt gebruikt en hergebruikt. Er moet resoluut worden getimmerd aan een duurzame benadering waarbij water minder wordt versleept en meervoudig wordt ingezet.

Het zal uiteraard wel een generatie duren vooraleer de conventionele werkwijze wordt uitgefaseerd, doch daar waar de huidige benadering nog niet volledig is doorgevoerd, is het aangeraden de 'leap frog' in te zetten naar de nieuwe waterzuivering toe.

ir. F. Kiestra

RWZI als energiefabriek

Ferdinand Kiestra
Waterschap Aa en Maas

1. Inleiding

De Unie van Waterschappen daagde de 26 waterschappen in Nederland uit om 'fris en wild' mee te denken over vernieuwende initiatieven binnen het project WaterWegen. De Waterschappen willen over 10 jaar een sterke netwerkorganisatie zijn, sturend in de ruimtelijke ontwikkeling en verbonden met de omgeving. Waarbij ze laten zien dat ze innovatief zijn en in staat om te anticiperen op de uitdagingen van morgen. Om dit handen en voeten te geven schreef de Unie een wedstrijd uit. Het concept de Energiefabriek werd als winnaar geselecteerd en door Waterschap Aa en Maas samen met het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Waterschap Veluwe en Waterschap Rivierenland verder uitgewerkt. Inmiddels wordt al met dertien waterschappen gewerkt aan realisatie van dit concept.

De droom van de Energiefabriek werd in het eindrapport als volgt omschreven:

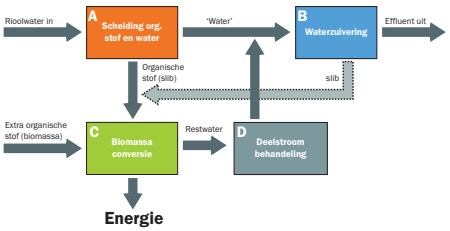
> *"**350 Nieuwe energiebronnen***
> *Afvalwater, dáár zit energie in. Rioolwaterzuiveringen (rwzi's) ontvangen grote hoeveelheden van een energiedrager: afvalwater. Waarom de energie die aan de ene kant binnenkomt, niet gebruiken voor de processen die aan de andere kant vragen om energie? Dat gebeurt al bij grotere rwzi's, maar kan breder worden uitgerold. 350 Rwzi's als 350 nieuwe energiebronnen; waarmee waterschappen in hun eigen energiebehoefte voorzien en wellicht nog overhouden voor energielevering."*

In deze uiteenzetting een samenvatting van de manieren waarop een RWZI energieneutraal kan worden gemaakt, dan wel energieleverend. Op basis daarvan volgt voor de RWZI Den Bosch een nadere uitwerking.

2. Ontwerpfilosofie

De energiedragende component in afvalwater is, naast de thermische en kinetische energie die het bezit, de aanwezige organische stof. In het huidige 'gemiddelde' zuiveringsconcept van een RWZI wordt deze organische stof voor het grootste deel geoxideerd tot CO_2. Een ander significant deel wordt gebruikt voor de aanwas van bacteriën die het zuiveringsproces katalyseren. Kortom: er wordt veel energie gestoken in de vernietiging van een potentiële energiebron!

De basisgedachte achter een Energiefabriek is deze organische componenten aan het begin van het proces zoveel mogelijk vooraf af te vangen en deze door een biomassaconversie om te zetten in een bruikbare energiebron. Omdat deze afscheiding nooit volledig zal kunnen plaatsvinden zal naar verwachting nog altijd een zuiveringsproces noodzakelijk zijn waarin wellicht nog een oxidatie van het restant moet plaatsvinden. De basisgedachte is schematisch weergegeven in figuur 1.



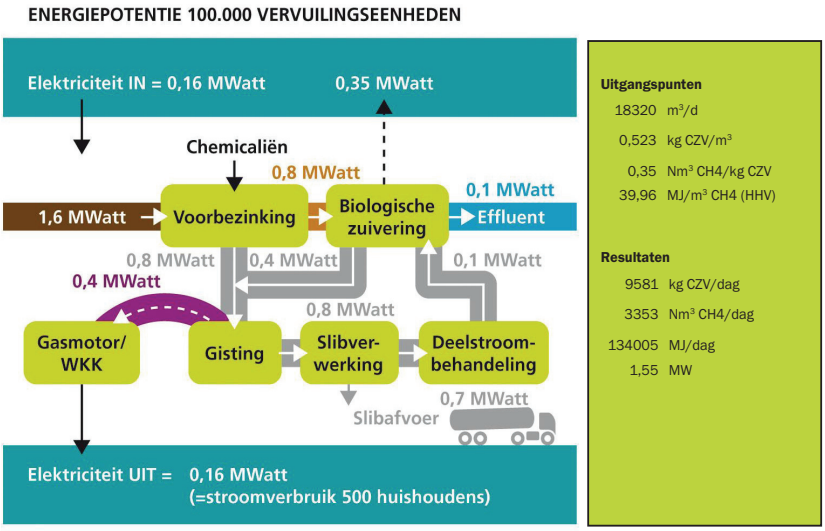
Figuur 1 - Schematische weergave filosofie De Energiefabriek

In deze figuur is tevens een deelstroombehandeling opgenomen om de resterende waterfractie vanuit de biomassaconversie nog te zuiveren. Het betreft hier over het algemeen een waterstroom met relatief hoge concentraties aan nutriënten die het aantrekkelijk maakt om apart te behandelen. Mengen met de hoofdstroom vanuit stap A zou dat efficiencyvoordeel wegnemen.

In figuur 2 is de energiebalans van een referentie RWZI van 100.000 v.e. opgenomen. Daarvoor is met onderstaande uitgangspunten te berekenen dat het influent een 'vermogen' vertegenwoordigt van ca. 1,6 MW.

Uit figuur 2 blijkt ook dat de theoretische energie-inhoud van het afvalwater (1,6 MW) ruimschoots voldoende is (factor 10) om aan de energievraag van het zuiveringsproces (0,16 MW) te kunnen voldoen.

Het gaat er dus om of de potentiële energie-inhoud ook daadwerkelijk winbaar is om in het proces in te zetten. Een belangrijk aandachtspunt daarbij is dat voldaan moet worden aan de normen van de effluentkwaliteit. Vooral voor de huidige wijze van stikstofverwijdering kan dit kritisch zijn omdat daarvoor een minimum aan organische stof nodig is. Dit zou de maximale energiewinning drastisch kunnen verlagen en er moet wellicht gezocht worden naar alternatieven voor stikstofverwijdering.



Figuur 2 - Energiebalans RWZI

3. Screening van technieken

Op basis van de ontwerpfilosofie is voor de onderdelen A t/m D een screening van de mogelijke technieken uitgevoerd. In onderstaande tekst zijn die kort toegelicht.

3.1 Processtap A (scheiding organische stof)

Voorbezinking

Voorbezinking is een bekende techniek om gravitair zwevende stof en organische stof af te scheiden uit het influent. In combinatie met chemische precipitatie (pre-precipitatie) neemt het rendement toe. Het STOWA onderzoek "fysisch-chemische voorzuivering" biedt hiervoor meerdere aanknopingspunten. Opgemerkt dient te worden dat door chemicaliëndosering, waarmee het rendement van voornoemde processen wordt verbeterd, ook chemisch slib wordt geproduceerd.

A/B-systeem

Bij een hoogbelaste (en eventueel beluchte) eerste trap (zoals bekend uit het A/B proces vindt afscheiding van organische stof plaats door groei van biomassa en sorptie van (opgeloste) organische stof aan deze biomassa.)

Fijnzeven

Met fijnzeven (bijvoorbeeld trommelfilters <1 mm maaswijdte), zoals toegepast voor de voorbehandeling bij MBR, wordt zwevende stof (en daarmee ook organische stof) uit het influent gehaald. Met membraanfiltratie van influent kan een hoog afscheidingsrendement van organische stof worden gerealiseerd (tot 25% CZV-verwijdering).

3.2 Processtap B (biomassaconversie)

Vergisting

Vergisting van zuiveringsslib is een beproefde en bekende techniek die geen toelichting behoeft.

Ethanol en waterstofproductie

Biologische productie van ethanol en waterstof uit organisch materiaal is interessant vanwege het feit dat ethanol en waterstof commercieel interessante energiedragers zijn. Een bekende toepassing is de productie van bio-ethanol uit suikerriet. Toepassingen in afvalwaterbehandeling zijn niet bekend, er wordt wel onderzoek naar gedaan. Het is niet duidelijk of er in potentie een hoger energierendement gehaald kan worden vergeleken met biogasproductie door vergisting.

Anaerobe compostering

Anaerobe compostering is analoog aan anaerobe voorbehandeling van een CZV rijk industrieel afvalwater: de bulk van de CZV wordt omgezet in biogas en het overblijvende digestaat wordt aeroob nagecomposteerd. Anaerobe compostering is een droog fermentatieproces met een droge stof concentratie rond de 30%. Natte fermentatie gaat tot 15% DS.

Verbranden

Bij verbranden van zuiveringsslib wordt organisch materiaal door toevoer van een overmaat aan zuurstof volledig omgezet in CO_2 en H_2O. In slibverbrandingsinstallaties voor ontwaterd zuiveringsslib kan door rendementsverbeteringen aan de installatie een beperkte hoeveelheid energie worden opgewekt. Door de uitgebreide rookgasbehandeling is de technologie kostentechnisch alleen aantrekkelijk op grote schaal.

Pyrolyse

Bij pyrolyse wordt relatief droge biomassa (> 90% ds) in afwezigheid van zuurstof omgezet. Hierdoor onstaat pyrolyse olie, die verder moet worden bewerkt alvorens tot energieproductie te kunnen overgaan.

Vergassing

Bij vergassing van slib wordt door het toevoeren van een ondermaat aan zuurstof het organische deel gedeeltelijk omgezet, zodat een brandbaar gas (CO, CH_4, H_2, N_2) resulteert. Dit syngas kan worden ingezet voor energieproductie. Het slib moet vrij droog zijn (> 85% ds).

Superkritische vergassing

Een variant op het vergassingsproces waarbij de biomassa juist niet droog hoeft te zijn is superkritische vergassing. Bij superkritische vergassing wordt natte slurry met ca. 85% watergehalte ingebracht in een reactor op 300

bar en 450-700 °C. In korte tijd (enkele seconden tot enkele minuten) wordt de organische stof omgezet in syngas. Dit syngas kan worden ingezet voor energieproductie. De zouten (met daarin o.a. zware metalen en fosfaat) slaan neer in een geconcentreerde slurry. Het proces is in ontwikkeling (pilotschaal).

(Natte) torrefactie
(Natte) torrefactie is een thermische voorbehandelingstechniek die reststromen geschikt kan maken als brandstof.

Turbotec ontsluiting
De Turbotec ontsluiting berust op een chemische/ thermische voorbehandeling van biomassa waardoor niet afbreekbare componenten worden ontsloten zodat ze beter afbreekbaar worden en bijvoorbeeld kunnen worden omgezet in biogas.

HTU (Hydro thermal upgrading)
In HTU (Hydro thermal upgrading) wordt natte biomassa (15% ds) onder druk (180 bar) en bij hoge temperatuur (300 °C) omgezet in een waterfractie, een oliefractie en een gasfractie. Deze techniek is nog in ontwikkeling (pilotschaal met relatief schone stromen).

CAMBI THP proces
Het CAMBI THP proces is een desintegratietechniek (5-10 bar, 100-200 °C) voor zuiveringsslib. Met het THP proces wordt slib behandeld alvorens het te vergisten. De belasting van de vergisters en het biogasrendement neemt hierdoor toe. Tevens verbetert de ontwatering sterk.

Athos
Het Athos proces betreft een natte oxydatie (50 bar, 250 °C) van slib. Het proces dient te worden beschouwd als een eindverwerkingsstap.

Niet-thermische slibdesintegratie
Bij niet-thermische slibdesintegratie wordt door mechanische energie of ultrasone energie slib “gekraakt” waardoor er meer organische stof ter beschikking komt voor biogasproductie in de slibvergisting.

3.3 Processtap C (waterzuivering)

Anaërobe waterzuivering
Met anaërobe zuivering (bijvoorbeeld met UASB proces) in de waterlijn wordt organische stof omgezet in biogas en ammonium. Een belangrijke voorwaarde voor toepassing is een hogere temperatuur (> 20 °C), ondermeer vanwege de oplosbaarheid van methaan in water. Ook is nabehandeling noodzakelijk.

De-ammonificatie
Met de-ammonificatie (Demon proces, Anammox proces) kan energiezuinig ammonium worden omgezet naar stikstofgas. Ammonium wordt voor de helft omgezet in nitriet en gekoppeld aan het resterende ammonium tot stikstofgas. Een hogere temperatuur en hogere concentraties ammonium zijn belangrijke voorwaarde voor toepassing.

Algen
Algen kunnen stikstof en fosfaat opnemen, tevens wordt CO_2 vastgelegd. Algen zouden kunnen dienen als bron voor biogasproductie, hierbij komt echter weer stikstof en fosfaat vrij. Een voorwaarde is dat licht niet limiterend is voor de algenreactor. Gebruik van zonlicht is een voorwaarde voor een energiezuinige toepassing.

Biologische brandstofcel
In een biologische brandstofcel genereren bacteriën elektriciteit door omzetting van organische stof. Het proces wordt onderzocht op labschaal.

Nereda
Nereda is een batchgewijze techniek met korrelvormig slib. Het proces wordt op momenteel praktijkschaal toegepast. De verwachting is dat bij Nereda 20-30% minder energie benodigd is dan bij conventionele biologische zuiveringstechnieken technieken (actief slib proces).

3.4 Processtap D (deelstroombehandeling)
Biomassaconversie levert een waterige reststroom op, waar componenten in kunnen zitten die verwijderd moeten worden. Ingeval van vergisting is dit bijvoorbeeld CZV, stikstof en fosfaat. Indien stikstof in de waterlijn wordt verwijderd, kost dit beluchtingsenergie en is CZV noodzakelijk. Deze CZV komt niet ten goede aan bijvoorbeeld

biogasproductie door vergisting.

De-ammonificatie

Bij stikstofverwijdering via het de-ammonificatie procesisgeenCZVnoodzakelijk.Bijde-ammonificatie wordt ammonium gedeeltelijk omgezet in nitriet. Het nitriet wordt vervolgens gekoppeld aan het resterende ammonium tot stikstofgas. Ten opzichte van traditionele stikstofverwijdering is geen CZV (C-bron) noodzakelijk, en is het energiegebruik voor beluchting aanzienlijk minder als gevolg van de partiële oxydatie van ammonium en als gevolg van de lagere slibproductie. De biologische reactie wordt uitgevoerd door de zogenaamde anammox bacterie.

Chemische precipitatie

Chemische precipitatie is een beproefde techniek voor fosforverwijdering. Voor stikstofverwijdering is dit in principe ook mogelijk, grootschalige toepassingen zijn niet bekend. Een belangrijke voorwaarde is een geschikt afzetkanaal voor de stikstofrijke reststroom (struviet).

Concentreren en afvoeren

Concentreren en afvoeren van de waterige reststromen uit bioconversie kan ook worden overwogen, indien er afzetmogelijkheden voorhanden zijn. Hiermee is echter ook energieverbruik gemoeid.

Overig

In een brandstofcel wordt met specifieke energiedragers elektriciteit opgewekt met een chemische reactie (zonder een klassiek verbrandingsproces). Bekende energiedragers voor brandstofcellen zijn waterstof en methanol. Voor grote schaal toepassingen zijn nu ook brandstofcellen op methaangas en biogas beschikbaar. In vergelijking met een gasmotor of wkk heeft een brandstofcel een hoger elektrisch rendement (ca. 55%), het temperatuurniveau van de restwarmte is hoger en tevens zijn de emissies naar de atmosfeer veel lager.

4. Samenstellen van concepten

Op basis van de inventarisatie van technieken en ontwikkelingen is een groot aantal totaalconcepten voor De Energiefabriek denkbaar. Dat grote aantal wordt vooral veroorzaakt door het feit dat een totaalconcept altijd maatwerk zal zijn voor de lokale situatie. Hieruit is echter wel een hoofdlijn te destilleren door een indeling te maken op basis van de mate van realiseerbaarheid en het innovatieve karakter. Dan kan een onderscheid worden gemaakt in drie typen minimaal energieneutrale totaalconcepten:

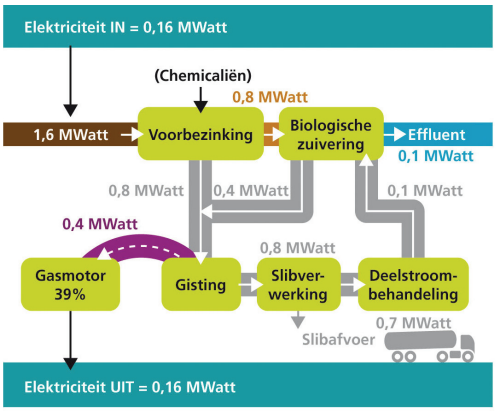
- Basis: Toepassing van bewezen technieken die leiden tot een energieneutrale situatie die vandaag al mogelijk is;
- Plus: basisscenario met toepassing van technieken die over 2 -3 jaar beschikbaar zijn. Dit levert een energieleverende situatie;
- Super: het plusscenario, waarbij de gisting plaatsmaakt voor superkritische vergassing van slib. Deze techniek vergt nog ca. 8 - 10 jaar ontwikkelingstijd.

4.1 Basisvariant

Uitbreiding van de installatie met bewezen technieken. Dit levert een energieneutrale situatie op en is vandaag al mogelijk. De techniek van het basisscenario is bewezen en kan dus direct, relatief risicoloos worden ingevoerd.

De belangrijkste bouwstenen voor de Basisvariant zijn:

- Terugdringen van het energieverbruik voor stikstofverwijdering en voor in stand houden



Figuur 3 - Schematische weergave basisvariant

van biomassa (endogene ademhaling, lage slibbelasting);
- Meer energie-inhoud uit influent naar biogas door vergisting;
- Eigen energieverbruik terugdringen door basismaatregelen in het ontwerp, apparatuurkeuze en besturing;
- Efficiënte elektriciteitopwekking door hoogrendement WKK.

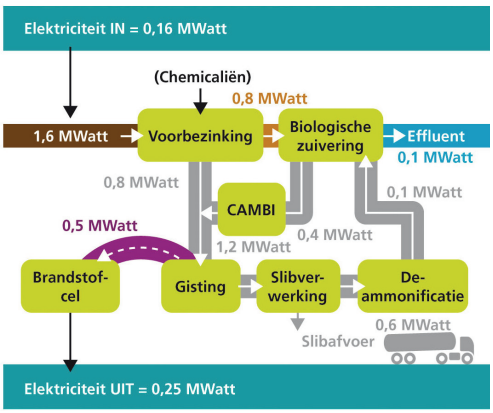
Deze bouwstenen vormen tevens het fundament voor de andere concepten.
Door voorbezinking met pre-precipitatie (of een A-trap) kan de vracht organische stof naar de vergisting worden gemaximeerd. Hiermee kan de biogasproductie worden gemaximeerd. In deze vracht bevinden zich ook stikstofverbindingen die na de vergisting in de waterfase van de slibontwatering terecht komen. De deelstroombehandeling van deze waterfase met het de-ammonificatie proces verwijderd deze stikstof energiezuinig. Van belang is dat de CZV/N verhouding van het afvalwater naar de biologische zuivering gunstig blijft voor de verwijdering van de resterende stikstof. Bijkomend effect van chemicaliëndosering is de productie van chemisch slib.

4.2 Plusvariant
In feite is dit het basisscenario met toepassing van een brandstofcel en een extra ontsluitingsstap voor de slibbehandeling, zodat netto energielevering plaatsvindt. Dit scenario zou binnen drie jaar te realiseren moeten zijn. Het plusscenario is technisch onzekerder omdat in Nederland met een aantal technieken in dit scenario nauwelijks ervaring is opgedaan. De technieken zijn echter wel beschikbaar en in het buitenland frequenter toegepast.

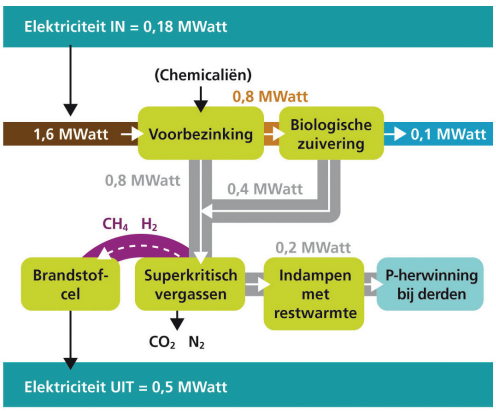
De thermische slibdesintegratie zorgt voor een extra opbrengst van biogas in de vergisting. De extra energie opbrengst weegt op tegen het extra energiegebruik van het slibdesintegratie proces. Toepassing van brandstofcellen verhoogt het rendement van de elektriciteitproductie met biogas. Voor de referentiezuivering van 100.000 v.e. kan op een totaal elektriciteitverbruik van 0,16 MW een overschot van 0,09 MW worden gerealiseerd. Dit is equivalent aan het elektriciteitsverbruik van 225 huishoudens. Door inzet van een warmtepomp kan er extra thermische energie worden gewonnen uit effluent.

4.3 Supervariant
Dit scenario borduurt voort op het plusscenario, waarbij de gisting plaatsmaakt voor superkritische vergassing van slib. Deze optie levert serieuze energielevering op, maar vergt nog wel enkele jaren ontwikkelingstijd met name omdat superkritische vergassing nog in de kinderschoenen staat.

Superkritisch vergassen is nog geen volwassen techniek en laat daarom nog enkele jaren op zich wachten. Voor de referentiezuivering van 100.000 v.e. kan op een totaal elektriciteitsverbruik van 0,18 MW kan een overschot van 0,32 MW



Figuur 4 - Schematische weergave plusvariant



Figuur 5 - Schematische weergave supervariant

worden gerealiseerd. Dit is equivalent aan het elektriciteitsverbruik van 800 huishoudens.

5. Conclusies concept Energiefabriek

- Met de bestaande technieken is energieneutraal zuiveren nu al mogelijk! Dit betekent voor een moderne zuivering een verbeterde voorbezinking, verbeterde gasmotor (39% rendement) en deelstroombehandeling voor stikstofverwijdering.
- De chemische energie-inhoud van het influent bevat zelfs tien keer de benodigde energie om het zuiveringsproces te laten draaien. De winbaarheid van deze energie-inhoud bepaalt of er sprake kan zijn van een energieleverende situatie.
- Het blijkt ook dat voor een energieneutrale zuivering een levering ontstaat, door slechts de gasmotor te vervangen door een brandstofcel (rendement van 60% in plaats van 38%).
- De potentie van energielevering is tweemaal het huidige verbruik van de zuiveringen: van 'min 100%' naar 'plus 200%'!
- Een compleet energieneutrale branche zou deze in de markt tot de grootste 'groene energie'-producent van Nederland maken.

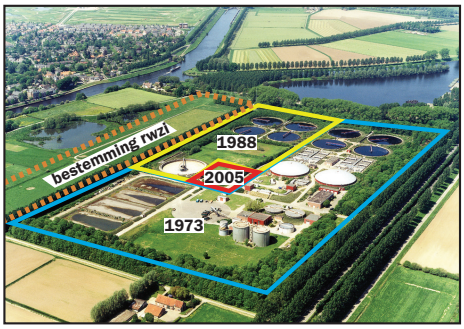
6. Uitwerking case energiefabriek RWZI Den Bosch

6.1 Case RWZI Den Bosch

De huidige opzet van de rwzi 's-Hertogenbosch, met een ontwerpcapaciteit van 342.000 v.e. (136 gram /l TZV), is het resultaat van een gefaseerde bouw. De gefaseerde bouw is 'in grote lijnen' weergeven in de overzichtsfoto (figuur 6).

De eerste fase van de rwzi is in begin zeventiger jaren gebouwd en in bedrijf genomen. De waterlijn bestaande uit roostergoed- en zandververwijdering voorbezinking en het actiefslibproces maakt nog steeds deel uit van de huidige procesopzet. De sliblijn bestaat uit gravitaire primair- en surplusindikking, slibgisting en ontwatering met centrifuges. Midden jaren tachtig is de rwzi hydraulisch uitgebreid van 9.000 m^3/h naar 18.000 m^3/h door realisatie van een bufferbezinkbasin en uitbreiding van de nabezinktankcapaciteit.

Aanpassing voor verdergaande fosfaat- en stikstofverwijdering, waaronder herinrichting



Figuur 6 - Luchtfoto RWZI Den Bosch met contouren bouwfasen vanaf 1973

van de configuratie van de beluchtingstanks, en plaatsing van een slibontwateringscentrifuge, hebben plaatsgevonden in de periode 1998-2000. In 2005 is de deelstroombehandeling via het Babe-proces in bedrijf genomen.

Het overgrote deel van de RWZI is gebouwd in 1973 en voldoet niet meer aan de huidige maatstaven. Ook kan de RWZI niet meer voldoen aan de strenger wordende lozingseisen. Medio 2009 is besloten dat voor de RWZI Den Bosch nieuwbouw zal worden gepleegd voor de verwerking van ca. 350.000 v.e. Dit besluit viel nagenoeg samen met de eerste conclusies van het project de Energiefabriek. Reden waarom voor de RWZI Den Bosch ook een variant 'Energiefabriek' verder is uitgewerkt.

6.2 Omschrijving te onderzoeken varianten

Voor de Energiefabriek van de rwzi Den Bosch wordt voor alle te onderzoeken varianten in de waterlijn uitgegaan van verbeterde voorbezinking door PE-dosering en toepassing van deelstroombehandeling op de centraatstroom na de gisting. Voor de benutting van het gistingsgas zijn in het geval van de rwzi Den Bosch de volgende subvarianten interessant:

1. Eigen energieopwekking met verbeterde gasmotoren (ter vervanging van de bestaande gasmotoren reeds besteld en daarom onderdeel van de referentie-variant);
2. Levering aan industrie. In dat geval vervalt de eigen energie opwekking op de rwzi Den Bosch en moet de verwarming van de gistingstanks op een andere manier plaats vinden. Hiervoor zullen de volgende mogelijkheden worden beschouwd:
   a. Levering van externe warmte door de

toekomstige biomassacentrale van de gemeente Den Bosch;
b. Warmteproductie uit effluent m.b.v. een warmtepomp;
c. Warmteproductie uit gistingsgas m.b.v. een CV-ketel.

3. Productie van groen gas. Hierbij wordt het gistingsgas opgewerkt tot aardgaskwaliteit. Het opgewerkte gas kan worden teruggeleverd aan het aardgasnet of worden gecomprimeerd tot biobrandstof voor voertuigen. Voor de verwarming van de gistingstanks komen dezelfde mogelijkheden in aanmerking als hierboven genoemd.

6.3 Energiebalansen

Calibratie

Voor de calibratie van het rekenmodel zijn de bedrijfsresultaten van de huidige rwzi gebruikt. De calibratie betrof met name de parameters voor de berekening van de slibproductie en voor de parameters voor de slibgisting (omzettingspercentage, specifieke gasproductie) en de eigen energieopwekking (methaangehalte gistingsgas).

Vervolgens is voor de bestaande rwzi een energiebalans opgesteld. Het energieverbruik is per procesonderdeel afgeschat op basis van door DHV gehanteerde kentallen. Voor de energieproductie m.b.v. gasmotoren is uitgegaan van een spuiverlies van 15% (gebaseerd op de bedrijfsresultaten) en een gemiddeld rendement van 32,5% (bestaande gasmotoren).
De energiebalans van de huidige rwzi (gemiddelde belasting 352.000 v.e.) bedraagt:

- Electriciteitsverbruik +651 kW
- Eigen energieopwekking -383 kW
- Electriciteitsinkoop +268 kW

Referentievariant

Het energieverbruik van de referentievariant is op de hierboven beschreven wijze bepaald met gebruik van de parameters uit de calibratie. Bij de referentievariant wordt geen PE gedoseerd voor extra CZV-verwijdering en vindt geen deelstroombehandeling plaats. Voor de energieproductie m.b.v. gasmotoren is uitgegaan van een spuiverlies van 10% (minder uitval van nieuwe gasmotoren) en een gemiddeld elektrisch rendement van 37,4% (verbeterde gasmotoren).

De energiebalans van de referentie-variant bedraagt dan:

- Electriciteitsverbruik +549 kW
- Eigen energieopwekking - 429 kW
- Electriciteitsinkoop +120 kW

T.o.v. de huidige rwzi is het electriciteitsverbruik in de referentievariant met name lager door de efficiëntere zuurstofoverdracht in de diepere aëratietanks.

Onderzochte basisvarianten

De onderzochte basisvarianten verschillen onderling alleen in de wijze van benutting van het biogas. In de waterlijn wordt bij alle varianten verbeterde voorbezinking toegepast. Hierbij wordt het rendement van de voorbezinking verhoogd door dosering van poly-electroliet (PE). Het effect van de PE-dosering op het rendement van de voorbezinking is afhankelijk van de samenstelling van het afvalwater en kan per rwzi verschillen. Omdat op dit moment specifieke resultaten hiervan voor de rwzi den Bosch ontbreken, is gebruik gemaakt van de resultaten uit het STOWA-onderzoek “Geavanceerde voorzuivering van afvalwater”, waarbij veiligheidshalve de behaalde rendementen bij een gemiddelde PE-dosering (0,8 mg/l) zijn gehanteerd.

In tabel 1 zijn de gebruikte rendementen met en zonder PE-dosering samengevat.
Vanwege het hogere verwijderingsrendement van voorbezinking met PE is in vergelijking met de referentievariant de benodigde beluchtingsenergie lager en neemt de gistingsgasproductie toe. De energiebalansen van de onderzochte

Tabel 1 - Verwijderingsrendementen voorbezinking met en zonder PE-dosering

Parameter	Rendement zonder PE-dosering (%)	Rendement met PE-dosering (%)
Zwevende stof	50	73
CZV	30	53
BZV	26	51
N(kj)	7	14

Tabel 2 - Energiebalansen onderzochte basisvarianten

Post	Basisvariant						
	WKK	Gaslevering Heineken			Groen gas		
		Inkoopwarmte	Warmtepomp	CV-ketel	Inkoopwarmte	Warmtepomp	CV-ketel
Elektriciteitsverbruik	437	437	527	437	474	564	466
Eigen e-opwekking	456	0	0	0	0	0	0
Elektriciteitsinkoop	0	437	527	437	474	564	466
Warmte inkoop	0	270	0	0	270	0	0
Biogaslevering	0	1.427	1.427	1.298	1.427	1.427	1.298
Netto energieverbruik	*-19*	*- 720*	*- 900*	*-861*	*- 683*	*- 863*	*- 832*

basisvarianten zijn samengevat in tabel 2. Bij alle varianten geldt, dat het gistingsgas continu wordt geleverd en er derhalve geen spuiverlies is.
Uit de resultaten blijkt dat bij alle varianten de rwzi Den Bosch netto energie levert. In de varianten met (groen) gaslevering wordt de volledige energie-inhoud van het beschikbare gistingsgas aan de energieproductie toegerekend en moet de elektriciteit volledig worden ingekocht. Bij de WKK-variant kan het elektriciteitsverbruik van de rwzi volledig worden opgewekt uit het gistingsgas en is er sprake van een warmteoverschot. Omdat hiervoor geen externe bestemming is, draagt dit overschot niet bij aan de energiebalans.

6.4 Intermezzo - Duurzaamheid

Voor de energiefabriek-varianten is een extra dosering van polyelectroliet noodzakelijk. Ook deze vertegenwoordigen vanwege de productieketen een zeker energieverbruik. Zo komt PE overeen met een energieverbruik van 17 GJ/ton PE-actief. Daar staat echter tegenover dat de slibproductie afneemt en dus ook het chemicaliënverbruik voor de slibontwatering. Het netto extra PE-verbruik van de varianten ten opzichte van de referentie komt overeen met 250 GJ/jaar = 8 kW. Dit verbruik is niet significant van invloed op de in tabel 2 gepresenteerde energiebalansen.

6.5 Kosten

Voor de kostenberekening zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Inkoop elektriciteit € 0,10/kWh
- Inkoop externe warmte € 5,00/GJ
- Verkoop biogas Industrie € 0,15/Nm^3
- Slibafzet € 273/ton d.s.
- PE € 4,00/kg actief
- Afschrijving civiel 6,1 %
- Afschrijving mech/elektr. 9,3 %

De kosten van de onderzochte varianten zijn vergeleken met de referentievariant.
De volgende punten zijn van invloed op de kosten:

- bij PE-dosering op de voorbezinktanks moet t.o.v. de referentievariant een PE-opslag en -doseerinstallatie worden geïnstalleerd. Het benodigde volume van de aëratietanks neemt met ongeveer 4.000 m^3 af;
- bij PE-dosering op de voorbezinktanks neemt de uitgegist slibproductie t.o.v. de referentievariant af met ca. 670 kg DS/d;

In tabel 3 zijn de verschillen in jaarlijkse lasten tussen de onderzochte varianten en de referentievariant samengevat.

Tabel 3 - Verschil in jaarlijkse lasten tussen de onderzochte basisvarianten en de referentievariant.

Variant	Verschil in jaarlijkse lasten (in €)
WKK (elektra voor eigen gebruik)	- 120.000
Gaslevering Industrie - warmte inkoop	+ 165.000
Gaslevering Industrie - warmtepomp	+ 245.000
Gaslevering Industrie - CV-ketel	+ 185.000
Groen gas aardgas- warmte inkoop	+ 155.000
Groen gas aardgas- warmtepomp	+ 235.000
Groen gas aardgas CV-ketel	+ 220.000
Groen gas brandstof- warmte inkoop	+ 5.000
Groen gas brandstof- warmtepomp	+ 85.000
Groen gas brandstof- CV-ketel	+ 120.000

Uit de resultaten blijkt dat alleen bij de variant met eigen energieopwekking (WKK) sprake is van een besparing op de jaarlijkse lasten; bij alle andere varianten zijn de jaarlijkse lasten hoger. Bovendien zijn alle varianten met uitzondering van de eigen energieopwekking gevoelig voor de elektriciteitsprijs, omdat het volledige

elektriciteitsverbruik moet worden ingekocht. De WKK-variant is ongevoelig voor de elektriciteitsprijs, omdat de elektriciteitsbehoefte volledig zelf wordt opgewekt.

7. Conclusies energiefabriek RWZI Den Bosch

De RWZI Den Bosch kan energieneutraal en, zeker bij gaslevering, zelfs energieleverend worden gebouwd. Dit kan gerealiseerd worden met bewezen technieken zoals voorbezinking met gisting, hoog rendement gasmotoren en het de-ammonificatieproces. De nieuwbouwsituatie heeft vervolgens nog het bijkomend voordeel dat de winst in het beluchtingsproces (door hoger rendement voorbezinking en toepassing van de-ammonificatie kan de beluchting aanzienlijk kleiner) gekapitaliseerd kan worden. Dit levert voor de energieneutrale situatie ook nog een kostenneutrale situatie op bij vergelijking met de referentiesituatie.

Drs. M.G. Flick

Industriewater: tak of vak?

Markus Flick
Evides Industriewater

1. Industriewater: tak of vak?

Industriewater wordt wel als verzamelterm gebruikt waarachter productdefinities (alle niet-drinkwater?), marktdefinities (water voor alle industriële processen, afvalwaterzuivering), contractformats (DBFO, BOT, O+M) en totale industriële servicebedrijven schuil gaan. Toch is de markt van industriewater zeer volwassen, met internationale spelers van grote allure, en met mooie, complexe projectreferenties van vaak ketengeïntegreerde technologie oplossingen. Daarbij hebben alle projecten een sterk realisatiekarakter en een resultaat dat zowel technologisch/technisch als financieel/organisatorisch niet zeldengrensverleggend is.

Het blijkt dat Industriewater een zeer volwassen bedrijfstak is. Toch gaat elk industriewaterproject gepaard met veel onderzoek, zowel vooraf alsook tijdens de operatie. Voor een succesvolle integratie van industriële processen en industriewater is blijkbaar grote behoefte aan kennisontwikkeling rondom de toegepaste technologie. Tevens vragen maatschappelijke ontwikkelingen rondom duurzaamheid en zorg voor het milieu een continue ontwikkeling van de processen.

De kennisintensiteit blijkt aanzienlijk, want er blijken geen pasklare antwoorden terwijl het landschap van kennisinstituten en onderzoeksinstellingen versnipperd is en niet zelden onvoldoende gericht is op de ontwikkeling van toepasbare technologie voor de industriële praktijk. Wat de vraag rechtvaardigt of in het werkveld van Industriewater niet een enorme kans ligt voor de ontwikkeling van onderzoek en onderwijs. De lezing zal dit nader uitdiepen en een nieuwe ontwikkeling in industriewaterland aankondigen.

ir. L.D. Korving

Zuiveringsslib: kostenpost, energiedrager of grondstof?

Leon Korving
N.V. Slibverwerking
Noord-Brabant

1. Inleiding

De huidige methoden voor slibverwerking in Nederland zijn in de jaren tachtig en negentig van de vorige eeuw ontwikkeld en gerealiseerd. Mede dankzij deze ontwikkeling is er op dit moment een stabiele en veilige verwerking ontstaan voor deze belangrijkste reststof uit de rioolwaterzuivering. Sinds die tijd hebben de maatschappelijke ontwikkelingen niet stil gestaan en daarom is het belangrijk om na te blijven denken over de eisen die we moeten stellen aan de verwerking van het slib. Tijd dus om eens goed te kijken naar de prestaties van de huidige slibverwerkingsmethoden op het gebied van kosten, energie en hergebruik van grondstoffen.

2. Slibverwerking in Nederland

De wijze waarop de maatschappij om moet gaan met haar eigen uitwerpselen is al sinds de Romeinen een bron van discussie. Enerzijds wil men zich om hygiënische redenen zo snel mogelijk ontdoen van deze uitwerpselen, anderzijds is de mestwaarde van deze uitwerpselen altijd een belangrijk aandachtspunt geweest. Eeuwenlang heeft men deze uitwerpselen zo snel mogelijk de stad uit proberen te krijgen. Oorspronkelijk gebeurde dit met mestkarren en importeerde Vlaanderen bijvoorbeeld al stadsmest uit Amsterdam. In de negentiende eeuw kreeg de “kwestie der faecaliën” steeds meer aandacht en werd geëxperimenteerd met allerlei methoden om met deze materie om te gaan. Vanwege het ter beschikking komen van goedkopere kunstmest werd het steeds belangrijker om de mestwaarde van deze fecaliën aan te tonen en verzon men zelfs marketing termen als “Stadsguano”. Het op water gebaseerde afvoersysteem dat we nu hebben was toen zeker nog geen vanzelfsprekendheid. Zo patenteerde Liernur al in 1866 een pneumatisch systeem voor de waterloze verwijdering van fecaliën en dit systeem is in Nederland zelfs toegepast in Leiden, Dordrecht en Amsterdam. De huidige proeven met vacuümtoiletten zijn in dit verband dus hopeloos ouderwets! Volgens Daru [1] is de invoering van het watergebaseerde rioleringssysteem in alle westerse landen vooral het gevolg geweest van de voorliefde in die tijd voor grootschalige stedelijke infrastructuurprojecten en het idee dat door gebruik van overvloedig water alle nare luchten snel verdreven konden worden.

Uiteindelijk heeft dit er in de twintigste eeuw toe geleid dat wij in Nederland een bijna landelijke dekking hebben om met water

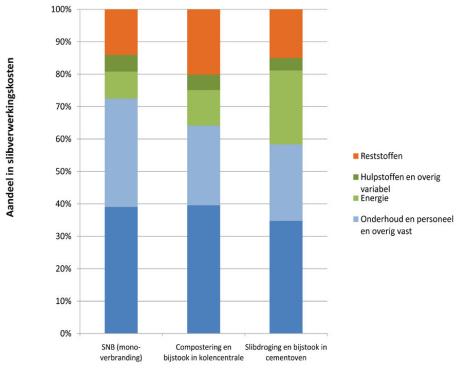
al onze uitwerpselen weg te kunnen spoelen. In de twintigste eeuw is de bemestende waarde van deze uitwerpselen langzaam aan steeds meer een probleem geworden voor het ontvangende oppervlaktewater waardoor we rioolwaterzuiveringen hebben opgericht om deze meststoffen steeds verder af te breken en te concentreren in het zuiveringsslib. Jarenlang is dit slib ook in Nederland ingezet als een meststof totdat we in de jaren tachtig en negentig tot de conclusie kwamen dat we in Nederland eigenlijk al genoeg mest hadden in de vorm van dierlijke mest en dat er mogelijk toch ook allerlei andere verontreinigingen in het slib zaten die wel eens schadelijk voor het milieu of onze gezondheid konden zijn. Dit leidde er uiteindelijk dat toe dat in 1993 het “Besluit kwaliteit en gebruik overige organische meststoffen” (BOOM-besluit) vastgesteld werd en dat strenge eisen stelde aan het gehalte aan zware metalen in zuiveringsslib dat in de landbouw werd ingezet. Deze richtlijnen waren zo streng dat deze er op neer kwamen dat er in de praktijk geen communaal zuiveringslib meer als meststof kon worden ingezet. Dit noodzaakte de waterschappen er toe om in de jaren tachtig en negentig actief op zoek te gaan naar alternatieve methoden om het zuiveringslib te verwijderen. Deze zoektocht leidde er toe dat er uiteindelijk drie belangrijke methoden in Nederland zijn voor de verwerking van het zuiveringsslib.

Ongeveer 50% van al het communale zuiveringslib in Nederland wordt na een voordroging verbrand in twee speciale verbrandingsinstallaties in Moerdijk (SNB) en Dordrecht (DRSH). In deze installaties wordt het slib eerst voorgedroogd tot ongeveer 35-40% droge stof, waarna het in wervelbedovens wordt verbrand. De energie die bij de verbranding vrijkomt wordt omgezet in stoom waarmee de slibdroging bedreven wordt. Hierdoor is er nauwelijks externe brandstof nodig voor de verwerking van het slib en kan ongeveer 10% van het eigen elektriciteitsgebruik zelf opgewekt worden. In een geoptimaliseerde installatie kan de verwerking zelfs geheel energieneutraal plaatsvinden.

Figuur 1 - Slibverwerkingsinstallatie van SNB in Moerdijk

Verder wordt ongeveer 25% van het slib gedroogd in een vijftal drogerinstallaties tot een volledig droge slibkorrel. Voor het drogen van dit slib wordt meestal aardgas ingezet om warmte te produceren om het water uit het slib te verdampen. Eén installatie gebruikt de lage druk stoom uit de speciaal voor dit doel opgerichte warmtekrachtinstallatie om het slib te drogen. Het gedroogde slib wordt vervolgens voornamelijk ingezet als energiedrager in de cementoven van de ENCI in Maastricht. Daarnaast wordt het gedroogde slib afgezet naar Duitsland als brandstof in kolencentrales. In Nederland is de inzet van gedroogd slib in kolencentrales beperkt vanwege de grenzen die in het “Besluit Verbranden Afvalstoffen” gesteld zijn aan de kwikconcentratie van alternatieve brandstoffen (kwikgehalte moet < 0,4 mg/kg droge stof zijn). In de nabije toekomst is de inzet van gedroogd slib in de cementoven in Maastricht waarschijnlijk niet meer mogelijk vanwege de plannen om de cementoven te sluiten.

Vervolgens wordt ongeveer 14% van het slib omgezet in compost in twee composteringsinstallaties in Tiel en Zutphen. Bij de omzetting van de organische stof in dit composteringsproces onder toevoeging van houtsnippers ontstaat warmte waardoor een deel van het water in het slib verdampt. Hierdoor wordt uiteindelijk een compost gekregen die een veel hoger gehalte aan droge stof heeft dan het uitgangsmateriaal. Omdat het gehalte aan verontreinigingen niet verandert door dit proces is het compost als meststof onbruikbaar en daarom is de term “biologisch drogen” eigenlijk een betere beschrijving van dit proces. Het geproduceerde compost is wel bruikbaar als secundaire brandstof in een kolencentrale. Het compost wordt ingezet in kolencentrales in Nederland en in Duitsland. Inzet



Figuur 2 – vergelijking kostenopbouw voor slibverwerking

in de kolencentrales in Nederland is onder andere gelimiteerd door het maximale kwikgehalte dat een kolencentrale in zijn secundaire brandstof mag hebben.

Ten slotte wordt op dit moment ongeveer 7% van het slibaanbod meeverbrand in de huisvuilverbranding van het Afval Energie Bedrijf van Amsterdam en wordt ongeveer 5% structureel geëxporteerd naar Duitsland voor bijstook in bruinkoolcentrales. Met de meeverbranding in de huisvuilverbranding zijn wisselende ervaringen, vooral door de mogelijk negatieve invloed die het meeverbranden kan hebben op de kwaliteit van de bodemas van de huisvuilverbranding.

Bij al deze methoden staat een maximale volumereductie voorop met gebruikmaking van de energie-inhoud van het slib. Oorspronkelijk was een verantwoorde en stabiele verwerking van het zuiveringslib het hoofddoel, maar in de loop der jaren is er steeds meer aandacht gekomen voor een zo energie-efficiënt mogelijke verwijdering, totdat we nu zelfs het idee hebben dat we slib als energiebron moeten gaan zien.

3. Kosten van slibverwerking

Om een beter gevoel te krijgen voor het belang van de energie-inhoud van het slib in deze verwerkingsroutes is het goed om stil te staan bij de kostenstructuur voor de verwerking van dit slib. De hierboven beschreven wijzen van slibverwerking leiden tot kosten die in dezelfde orde van grootte liggen van 270 tot 330 euro/ton droge stof. De combinatie van slibdroging en bijstook in een cementoven geeft de hoogste kosten. De kosten voor directe verbranding en compostering van slib lijken elkaar niet veel te ontlopen. Figuur 2 vergelijkt de kostenopbouw van deze drie routes voor slibverwerking. De kostenopbouw voor SNB is gebaseerd op de begroting voor 2010, terwijl de kostenopbouw voor de twee andere routes is gebaseerd op een kostenschatting uit de slibketenstudie van de STOWA uit 2005 [2].

De figuur laat zien dat voor alle drie de routes 58-72% van de kosten bestaan uit vaste kosten die samenhangen met de realisatie en bedrijfsvoering van de installatie. Andere belangrijke kosten zijn kosten voor de inzet van energie en de afzet van de restproducten. Voor compostering en droging houdt dit de afzet van het gedroogde eindproduct in. Dus ondanks dat deze producten worden ingezet als vervangers van brandstoffen moet er geld betaald worden om deze af te zetten! Dit komt doordat het verwerkingstarief voor deze producten gebaseerd is op marktomstandigheden. Zolang er genoeg andere biomassastromen worden aangeboden en er weinig alternatieven zijn voor de afzet kan de ontvanger geld vragen voor het verwerken van slib. Bovendien kan de kwaliteit van het product ook nog eens zodanig slecht zijn dat de ontvanger extra kosten maakt voor de inzet van het product in zijn installatie. Deze kosten zijn vaak verborgen en moeilijk toe te rekenen aan de inzet van slib. Zo is bekend dat de inzet van slib leidt tot een snellere vervuiling van de stoomketel van een kolencentrale, maar het is lastig om deze kosten goed toe te rekenen aan de inzet van het slib.

Het voordeel van monoverbranding van slib zoals dat bij SNB gebeurt is dat alle kosten voor de verwerking van het slib inzichtelijk en transparant zijn omdat de installatie alleen slib verwerkt. Daarom is het interessant om eens beter te kijken waar de kosten voor de verwerking van slib bij SNB nu precies door ontstaan. De volgende vijf eigenschappen van zuiveringsslib blijken de belangrijkste kostenveroorzakers te zijn (in volgorde van importantie):

1. De organische stof in het slib;
2. Het water in het slib;
3. Het zwavelgehalte van het slib;

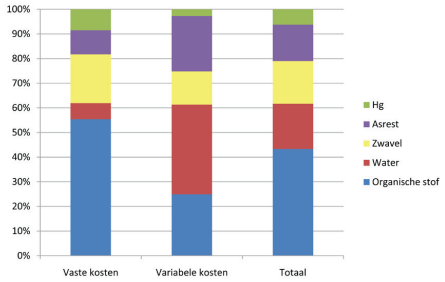
4. De asrest van het slib;
5. Het kwikgehalte van het slib;

Figuur 3 laat zien welk deel van de vaste en variabele kosten aan deze eigenschappen van het slib kunnen worden toegerekend. Voor de vaste kosten is daarbij gekeken naar het deel van de oorspronkelijke investering dat toegerekend kan worden aan die eigenschap. Vervolgens zijn alle vaste kosten naar rato toegerekend aan deze eigenschap. Voor de variabele kosten is steeds gekeken welke eigenschap het meest bepalend is voor deze kosten.

Om de gewenste volumereductie voor elkaar te krijgen wordt de organische stof in de installatie verbrand. De energie die daarbij vrijkomt wordt zo efficiënt mogelijk teruggewonnen en ingezet voor het drogen van het slib. Een deel van de energie kan gebruikt worden voor de productie van elektriciteit. Aan de andere kant kost de verbranding van de organische stof lucht en worden er rookgassen geproduceerd. Het transport van lucht en rookgassen is een belangrijke energiepost in de installatie. Op basis van deze overwegingen zijn de investeringen voor de oven en de stoomketels toegerekend aan de organische stof. Verder is ook het elektriciteitsverbruik voornamelijk aan de organische stof toegerekend.

Het water in het slib veroorzaakt vooral kosten omdat hiervoor een investering in een drogerinstallatie nodig is en het verdampte water na condensatie weer geloosd dient te worden, eventueel na behandeling in een afvalwaterzuivering. Daarnaast is het watergehalte de belangrijkste veroorzaker van de transportkosten en daarom is het merendeel van de transportkosten ook toegerekend aan het watergehalte in het slib. Uiteindelijk komen ongeveer 50% van de totale kosten die toegerekend worden aan het watergehalte voor rekening van het transport van slib.

Gemiddeld bevat de droge stof van slib ongeveer 1% aan zwavelverbindingen. Bij de verbranding van het slib ontstaat hierdoor een relatief hoge concentratie aan zwaveldioxide. Daarom is de installatie voorzien van een kalkdosering in de



Figuur 3 - relatieve bijdrage kostenveroorzakers aan kosten slibverwerking (SNB)

oven en een rookgaswasser om het zwaveldioxide af te vangen. Het spuiwater van de rookgaswasser bevat vervolgens een hoog gehalte aan sulfaat dat SNB niet mag lozen en daarom volledig moet indampen. Aan de component zwavel zijn daarom investeringen voor de rookgaswasser en de indampinstallatie toegerekend. Voor de variabele kosten is het verbruik aan kalk en natronloog en de afzet van indampzout toegerekend aan het zwavelgehalte van het slib.

Het onbrandbare deel van het slib blijft over als asrest, ook wel vliegas. Deze vliegas wordt in de installatie voornamelijk afgevangen met een elektrofilter. De investering van dit elektrofilter is daarom toegerekend aan de asrest. Verder zijn ook de kosten voor de afzet van de vliegas logischerwijs toegerekend aan de asrest.
Ten slotte zorgt het kwikgehalte van het slib voor een belangrijke kostenpost in de verwerking van het slib. Het kwik komt vrij bij de verbranding en wordt afgevangen in de rookgaswasser en in een doekenfilterinstallatie met injectie van actief kool. In deze analyse is de investering en bedrijfsvoering van de doekenfilterinstallatie toegerekend aan het kwikgehalte. Er zijn geen kosten toegerekend voor de rookgaswasser omdat de investering en bedrijfsvoering van deze wasser vooral bepaald wordt door de SO_2-last van de rookgassen.

Deze analyse laat zien dat de organische stof in het slib, de brandstof, verantwoordelijk is voor ongeveer de helft van de kosten van de slibverwerking. Het grootste bestanddeel van zuiveringsslib, water, blijkt maar maar verantwoordelijk voor ongeveer 20% van de kosten. Daarnaast leveren twee in concentratie relatief geringe bestanddelen van zuiveringsslib

als zwavel en kwik juist een naar verhouding belangrijke bijdrage aan de verwerkingskosten. Verder bepalen de zware metalen in de asrest de kosten voor de verwerking van deze as. Als de as vrij zou zijn van dergelijke verontreinigingen zouden de kosten voor de afzet enorm afnemen en mogelijk zelfs omslaan naar opbrengsten. Ongeveer 40% van de kosten van slibverwerking ontstaan dus door de verontreinigingen in het slib, namelijk zwavel en het gehalte aan zware metalen (inclusief kwik).

Overigens geldt deze analyse van de kostenveroorzakers alleen voor een nieuw te realiseren installatie. Zodra de installatie al gerealiseerd is, zoals bij SNB, worden de vaste kosten op een andere manier toegerekend aan het aangeleverde slib. Bij de installatie van SNB, maar ook bij de andere slibverwerkingstechnieken, bepalen de vaste kosten grotendeels het verwerkingstarief. Daarom is het uitermate belangrijk dat onderbezetting van de installatie vermeden wordt en de installatie zo veel mogelijk belast wordt. Op deze manier kunnen de vaste kosten gedeeld worden door een zo groot mogelijk slibvolume zodat de kosten per ton slibkoek zo laag mogelijk uitvallen.

Bij de installatie van SNB is de stoomketel het doorzetbepalende onderdeel van de installatie. De hoeveelheid thermische energie die deze ketel kan verwerken is begrensd en daarmee ook de hoeveelheid slib die SNB per uur kan verbranden. De overige onderdelen van de installatie hebben nog wel capaciteitsruimte. Hierdoor bepaalt de verbrandingswaarde, en dus het gehalte aan organische stof in het slib, de verwerkingscapaciteit van SNB. Hoe lager het gehalte aan organische stof, hoe lager de stookwaarde van het slib, waardoor er meer slib per uur kan worden verwerkt. Het gehalte aan organische stof in het slib bepaalt dus volledig welk deel van de vaste kosten aan het slib moeten worden toegerekend. In deze bestaande situatie is bijvoorbeeld het gehalte aan droge stof of het zwavelgehalte niet meer relevant voor de toerekening van de vaste kosten. De benodigde installatiedelen zijn immers al gerealiseerd en het gaat er vooral om de vaste kosten hiervan uit te smeren over zo veel mogelijk slib. In een bestaande situatie bepaalt het gehalte aan organische stof in het slib dus een nog veel groter deel van de kosten voor slibverwerking dan figuur 3 aangeeft. In de bestaande situatie bepaalt de organische stof in het slib ruim 70% van het verwerkingstarief. Een grotere energie-inhoud van het slib leidt dus tot hogere kosten!

Dit lijkt strijdig met de gedachte dat de energie-inhoud van het slib nodig is voor de verwerking van het slib en dus een positieve zaak is. De installatie van SNB is echter een verwerkingsinstallatie en geen energieopwekkinginstallatie. Een kolencentrale zal zo veel mogelijk elektriciteit willen maken met zo weinig mogelijk kolen en dan is een hoge stookwaarde van de kolen interessant. Maar in het geval van SNB gaat het er vooral om de kosten voor de verwerking van het slib zo laag mogelijk te maken en dan is het juist interessant om zoveel mogelijk brandstof (slib) te kunnen verwerken met dezelfde installatie tegen dezelfde vaste kosten.

Dit verrassende resultaat geldt niet alleen voor de wijze van slibverwerking door SNB. Ook als het slib eerst gecomposteerd of gedroogd wordt, bepaalt het gehalte aan organische stof in het slib uiteindelijk het tarief dat betaald moet worden aan de kolencentrale of cementoven. De invloed op de totale kostprijs is hierbij wel lager omdat het grootste deel van de kosten bij deze routes gaat zitten in het drogen van het slib. Juist bij deze routes is dus het gehalte aan droge stof bepalend voor de kostprijs. Toch bepaalt ook voor deze route het gehalte aan organische stof in het eindproduct de afzetmogelijkheden. Uiteindelijk kan echter ook hier een hoger organische stof gehalte juist onverwacht leiden tot een hoger tarief. Een belangrijke reden voor een kolencentrale voor het bijstoken van slib is de extra omzet die kan worden gegenereerd door tegen betaling slib of andere biomassastromen mee te stoken. Dit kan er dan toe leiden dat een kolencentrale voor een slibstroom met een hoge stookwaarde hogere kosten in rekening brengt omdat hij bij een hogere stookwaarde immers minder slib kan bijstoken en dus minder omzet heeft door deze slibstroom. Deze redenering gaat

op zolang gedroogd of gecomposteerd slib een negatieve marktwaarde heeft. Deze marktwaarde zal negatief blijven zolang slib in vergelijking tot andere biomassastromen een lagere kwaliteit heeft, er een voldoende aanbod van andere biomassastromen is en er weinig alternatieven zijn voor de verwerking van het gedroogde of gecomposteerde slib.

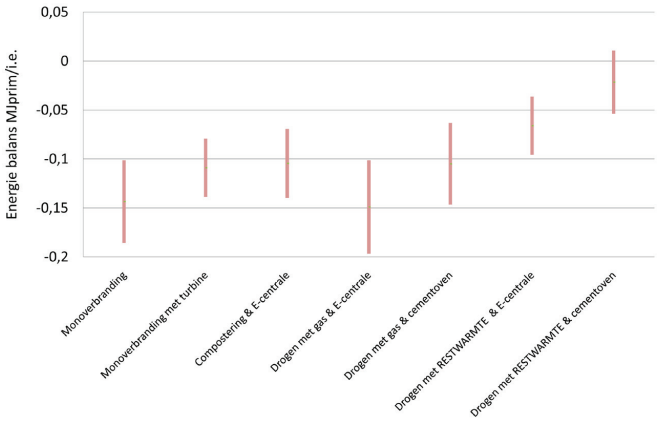
4. Slib als brandstof

De analyse van de kosten voor de verwerking van slib laat zien dat de energie-inhoud van slib een bepalende factor is voor de verwerking van het slib en dat een hogere energie-inhoud verrassend genoeg een kostenverhogende factor is. Deze paragraaf gaat nader in op de waarde van slib als brandstof. Figuur 4 laat zien dat prestatie van de huidige slibverwerkingsroutes min of meer vergelijkbaar is en dat deze routes over de keten gezien geen energiewinst opleveren. Dit is zelfs niet het geval als er restwarmte wordt gebruikt voor het drogen van het slib, wat tot op heden nauwelijks gebeurt.

Dit resultaat geeft al aan dat we niet al te hoge verwachtingen moeten hebben van slib als brandstof. Om de eigenschappen van slib als brandstof verder te onderzoeken vergelijkt Tabel 1 de kwaliteit van slib met andere brandstoffen. De tabel laat zien dat de samenstelling van slib nogal afwijkt van relatief schone brandstoffen als hout en kolen (NB: niet iedereen ziet kolen als een schone brandstof!). Slib bevat naar verhouding veel meer as, stikstof, zwavel, fosfaat en zware metalen. Deze eigenschappen hebben nogal wat consequenties voor de inzet van slib als brandstof.

Het hoge asgehalte van slib zorgt voor een relatief grote productie van as bij verbranding. Dit kan leiden tot extra vervuiling van de stoomketel en vergt adequate apparatuur voor het afvangen van de vliegas. In vergelijking met de verbranding van kolen en hout ontstaat er een relatief grote stroom aan vliegas waar vervolgens weer een bestemming voor gezocht moet worden. De relatief schone as van kolen kan goed gebruikt worden voor de productie van cement. Deze as wordt hiervoor minder geschikt als slib bijgestookt wordt. Het slib zorgt voor een toename van de zware metalen en brengt ook nog eens fosfaat met zich mee dat de harding van cement vertraagt. Het fosfaat kan daarnaast zorgen voor een lagere smelttemperatuur van de as waardoor eerder vervuiling van de stoomketel kan optreden.

Het hogere stikstofgehalte van slib maakt dat er bij de verbranding ongewenste stikstofverbindingen kunnen ontstaan. Het grootste deel van de stikstof wordt omgezet naar stikstofgas, maar de vorming van stikstofoxiden of de emissie van ammoniak is ongewenst en dit vergt extra inspanningen bij de verbranding van het slib. Het hogere zwavelgehalte zorgt voor een emissie van zwaveldioxide dat



Figuur 4 - Energiewinst huidige verwerkingsroutes over de gehele slibketen (positief: energiewinst). Gebaseerd op slibketen studie STOWA [2]

vervolgens in de rookgasreiniging moet worden afgevangen. Deze rookgasreiniging moet deze extra vracht aan zwaveldioxide dan wel aankunnen. Bovendien zal dit leiden tot de inzet van extra hulpstoffen voor het afvangen van het zwaveldioxide en betekent het dat er meer reststoffen in de rookgasreiniging worden geproduceerd.

Ten slotte vormt het kwikgehalte van slib een belangrijk aandachtspunt bij verbranding van slib. Met uitzondering van kwik komen alle zware metalen uit het slib terecht in de vliegas van de verbrandingsinstallatie. Het relatief vluchtige kwik vormt hierop een uitzondering en het kwik zal zonder bijzondere voorzieningen normaal gesproken via de schoorsteen worden uitgestoten. Dit is de reden dat de installatie van SNB als laatste reinigingsstap voorzien is van een doekenfilter installatie met injectie van kool om juist dit kwik af te vangen. Wanneer slib meegestookt wordt in een kolencentrale zal de kwikemissie niet meer te meten zijn door het grote rookgasvolume, maar wel aanwezig zijn. Daarom zijn er in het Besluit Verbranden Afvalstoffen grenzen gesteld aan het kwikgehalte dat meegestookte brandstoffen mogen bevatten. Ook bij het meestoken van slib in een cementoven is de mogelijke emissie van kwik een belangrijk aandachtspunt. De kwikvracht in slib is ook voor Stichting Milieukeur reden om vooralsnog elektriciteit die geproduceerd wordt uit zuiveringslib niet te voorzien van het milieukeur groene energie, zelfs niet als er sprake is van een rookgasreiniging die de kwikemissie naar de lucht minimaliseert. Men stelt dat het kwik dan toch ergens anders in de reststromen van de installatie terecht komt en daar voor milieuproblemen zorgt.

Droog slib heeft een verbrandingswaarde die in de buurt komt van andere brandstoffen. De benutting van deze energie is echter niet vanzelfsprekend gezien de samenstelling van het slib. Enerzijds komt dit slib vrij bij een droge stof gehalte van circa 23% waardoor het eerst gedroogd moet worden voordat het bruikbaar wordt als brandstof. Anderzijds vormt de samenstelling van het slib problemen bij de verbranding van het slib. Verder kunnen er vraagtekens gesteld worden bij het belang van slib als energiedrager. Zonder rekening te houden met de watervracht in het slib, vertegenwoordigt alle slib in Nederland maximaal 4 PJ aan energie, ofwel 0,1% van de totale inzet van energiedragers in Nederland die 2843 PJ bedraagt [3]. Gezien de samenstelling en het beschikbare volume vormt slib dus geen energiedrager van betekenis. Ook de financiële waarde van slib als brandstof is betrekkelijk. Momenteel kosten kolen ongeveer 2,8 euro/GJ stookwaarde [4]. Een ton gedroogd slib heeft een stookwaarde van 12 GJ, waardoor deze energie-inhoud dus maximaal een financiële waarde van 34 euro per ton droge stof vertegenwoordigt als slib dezelfde kwaliteit zou hebben als kolen. De huidige verwerkingstarieven voor slib bedragen 270 – 330 euro/ton ds. De potentiële opbrengsten staan dus niet in verhouding tot de kosten om slib om te zetten in een energiedrager.

Dit laat onverlet dat de energiewaarde van het slib van groot belang is in de huidige verwerkingsroutes en dat het altijd belangrijk is om de verwerking zo energiezuinig mogelijk te laten plaatsvinden. Toch moet men blijven afwegen welke doelen bij de verwerking van zuiveringslib de hoogste prioriteit moeten hebben. Het is de vraag of energieproductie

Tabel 1 - Vergelijking kwaliteit slib met andere brandstoffen (data slib: SNB, data overig: Phyllis database ECN, www.ecn.nl/phyllis)

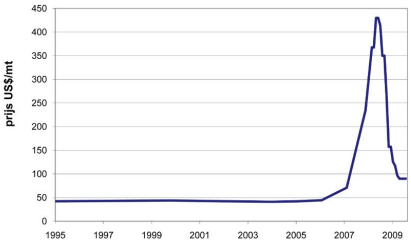
Eigenschap	Slib	Onbehandeld hout	Kolen	Huisvuil
Stookwaarde (LHV, MJ/kg ds)	12	19	28	11
Asgehalte (% van ds)	38	2,2	14	38
Stikstofgehalte (gew% N van ds)	5	0,4	1,5	1
Zwavelgehalte (gew% S van ds)	1	0,1	0,7	0,5
Fosfaatgehalte (gew% P van ds)	3,5	0,1	0,1	g.d.
Zink (mg/kg ds)	2000	49	29	13000
Koper (mg/kg ds)	1000	20	12	2000
Kwik (mg/kg ds)	2	0,1	0,1	0,8
Metolachlor	27	16		33

dan het belangrijkste doel moet zijn.

5. Slib als grondstof

Eeuwenlang zijn menselijke uitwerpselen gebruikt als meststof voor de landbouw. Ook na de introductie van de riolering en de rioolwaterzuivering bleef slib uit de rioolwaterzuivering een belangrijke bron van meststof. Sinds de negentiende eeuw is deze rol als meststof steeds minder belangrijk geworden doordat in die tijd goedkope kunstmest beschikbaar kwam. De ontwikkeling van het Haber Bosch proces in 1909 maakte het mogelijk om ammoniak te maken uit de stikstof in lucht. Fosfaat was in grote hoeveelheden beschikbaar door goedkoop fosfaaterts. Mede hierdoor kon de wereldbevolking sterk toenemen doordat hierdoor de voedselproductie sterk kon toenemen.

Deze overvloedige beschikbaarheid van kunstmest drukte ook het belang van hergebruik van slib als meststof steeds meer naar de achtergrond. Dit werd in de jaren tachtig en negentig nog eens versterkt door het mestoverschot in Nederland en zorgen over de verontreinigingen in het slib. De laatste jaren komt er echter steeds meer aandacht voor de eindigheid van de fosfaatvoorraden op de wereld [5]. Bovendien blijkt ook fosfaaterts en daarmee ook kunstmest zeker niet vrij van zware metalen te zijn [6]. Verder is de beschikbaarheid van fosfaaterts niet gelijkelijk verdeeld over de wereld waardoor Europa voor haar voedselvoorziening geheel afhankelijk is van de import van fosfaaterts. Fosfor is voor mensen een essentiële nutriënt en gemiddeld hebben we per dag 0,7 gram fosfor nodig. Op wereldschaal wordt jaarlijks 3 Mton P via ons voedsel ingenomen. Om deze hoeveelheid in ons voedsel te krijgen wordt er jaarlijks 18 Mton P aan fosfaaterts gewonnen [6,7] . Dit betekent dat op wereldschaal ongeveer 17% van alle fosfaaterts uiteindelijk in menselijke uitwerpselen terechtkomen en in westerse landen dan ook in de rioolwaterzuivering. Ook op Europese schaal heeft dit percentage dezelfde ordegrootte [8]. Het fosfaat in slib vormt dus een belangrijk bestanddeel van de totale fosfaatketen. Het fosfaatgehalte van rioolwater en slib vertegenwoordigt daarom vanuit maatschappelijk oogpunt een relevanter thema dan de energie-inhoud ervan.



Figuur 5: Ontwikkeling prijs fosfaaterts t/m oktober 2009 [9]

De potentiële economische waarde van het fosfaat in slib heeft dezelfde orde grootte als de energiewaarde. Momenteel kost fosfaaterts ongeveer 90 $/ton [9]. Uitgaande van een fosfaatgehalte van erts van 30% P_2O_5 en een P-gehalte van slib van 3,5% (als P) komt dit neer op een waarde van ongeveer 16 euro/ton droge stof van het slib. Vorig jaar voordat de financiële crisis uitbrak, piekte de prijs van fosfaaterts nog bij 430 $/ton en dan zou deze waarde dus nog veel hoger geweest zijn. Deze waarde is natuurlijk een zuiver theoretische waarde omdat de daadwerkelijke waarde bepaald wordt door de winbaarheid van het fosfaat.

De technieken hiervoor zijn echter steeds meer in ontwikkeling en verschillende projecten bij SNB laten zien dat hergebruik van het fosfaat in het slib mogelijk is (meer informatie: www.fosfaatrecycling.nl). Zo kan SNB door de productie van een speciale vliegaskwaliteit deze as inzetten als grondstof voor de fosforindustrie. Hierdoor slaat de negatieve waarde van deze as om in een positieve waarde. Verder lijkt het mogelijk om de vliegas met een thermische behandelingsstap om te zetten in een kunstmest. Ook bij deze techniek krijgt de as een positieve waarde. Recent is SNB ook gestart met onderzoek naar andere natchemische technieken die naast hergebruik van fosfaat tegelijk ook hergebruik van het ijzer in de as mogelijk maken. De financiële waarde van het ijzergehalte is echter veel geringer dan die van het fosfaat (maximale waarde ca. 2 euro/ton droge stof). Verder lijkt ook terugwinning van fosfaat in de rioolwaterzuivering of bij de toiletten door vorming van struviet langzaam steeds meer volwassen te worden.

Net als bij de beoordeling van slib als een brandstof, blijft echter ook hier gelden dat de potentiële opbrengsten kleiner zijn dan de huidige verwerkingskosten. Ook voor slib als een grondstof geldt dus dat de opbrengsten er niet voor zullen zorgen dat slib plotseling een inkomstenbron wordt.

6. Slib als stofzuiger

De voorgaande paragrafen laten zien dat de kosten van de huidige wijzen van slibverwerking duidelijk hoger zijn dan de potentiële opbrengsten, dan wel als brandstof, dan wel als grondstof. Dit laat zien dat we niet moeten vergeten dat zuiveringslib gewoon een afvalstof is, met alle problemen voor de afzet van dien. Slib is een afvalstof omdat het slib in de rioolwaterzuivering fungeert als een stofzuiger voor de verwijdering van allerlei ongewenste verbindingen uit het rioolwater. Zo wordt met het slib ongeveer 40 tot 90% van de zware metalen uit het rioolwater verwijderd, afhankelijk van het type metaal [10]. Zo verwijdert het slib bijvoorbeeld 80% van het kwik uit het rioolwater.

Daarnaast worden via het slib ook een groot scala aan organische microverontreinigingen uit het rioolwater verwijderd. In Nederland verzamelen we hier nog maar weinig gegevens meer over doordat vrijwel alle slib uiteindelijk verbrand wordt en daarmee ook deze verontreinigingen vernietigd worden. Voor de verwerking van het slib zijn deze verontreinigingen daarom niet zo relevant. Daarom konden voor een studie van de STOWA over de kwaliteit van slib in 2005 alleen gegevens worden gevonden over PAK's in slib: het slib blijkt 90% van de PAK's uit het rioolwater te verwijderen. In andere landen in Europa waar men het slib nog wel in de landbouw inzet, meet men veel meer aan dit soort componenten en dan blijken er veel schadelijke verbindingen in het slib terecht te komen. Men maakt zich daarbij zorgen over verbindingen als dioxines, PCB's, organische chloorverbindingen, muskverbindingen, brandvertragers, ftalaten en endocriene verstoorders als bijvoorbeeld nonylphenol [11]. Ook Greenpeace toont op haar website dat endocriene verstoorders als alkylphenolen veel voorkomen in zuiveringslib en dat dit wat hun betreft een belangrijk aandachtspunt is.

Enerzijds vormen deze verontreinigingen dus een probleem bij de verwerking van het slib, anderzijds wordt hierdoor wel voorkomen dat deze stoffen geloosd worden naar het oppervlaktewater. Deze rol van slib als stofzuiger willen we wel eens vergeten, maar verklaart wel het ontstaan van de huidige verwerkingsroutes. Doordat al het slib uiteindelijk verbrand wordt, worden daarmee alle schadelijke organische microverontreinigingen vernietigd en dus uit het milieu verwijderd. De zware metalen uit het slib komen in de asrest terecht en worden daar bij de meeste toepassingen geïmmobiliseerd. De emissie van kwik blijft dan bij sommige routes wel een aandachtspunt.

7. Conclusie

De verwerking van zuiveringslib is een belangrijke kostenpost bij de zuivering van rioolwater. Bij alle huidige verwerkingsroutes vormen de vaste kosten het grootste deel van de kosten. Dit betekent dat realisatie, onderhoud en beheer van de installaties voor de verwerking van het slib bepalend zijn voor de kosten. Daardoor is het niet eenvoudig om eenmaal gemaakte keuzes voor de wijze van slibverwerking terug te draaien. Reden dus om vooraf goed na te denken over de eisen die gesteld moeten worden aan de slibverwerking.

Een nadere analyse van de achtergrond van de kosten van slibverwerking laat zien dat in ieder geval bij de monoverbranding van slib ongeveer 40% van de kosten toegeschreven kunnen worden aan verontreinigingen in het slib zoals zwavel, kwik en andere zware metalen. Verder blijkt ook dat juist het terugwinnen van energie uit de organische stof van het slib eerder kosten met zich meebrengt dan dat hier opbrengsten tegenover staan. Dit heeft te maken met de lage kwaliteit van slib als brandstof die samenhangt met de eerder genoemde verontreinigingen. Bovendien vertegenwoordigt het beschikbare slibvolume maar een zeer gering potentieel voor energieopwekking. Slib is dan ook zeker niet de energiedrager van de toekomst.

Eeuwenlang fungeerden menselijke uitwerpselen als een bron van meststoffen. Door een overvloedig aanbod van kunstmest is deze rol naar de achtergrond gedrongen. Toch blijkt deze

overvloed nu minder groot dan ooit gedacht en daardoor neemt deze oude rol weer toe aan belang. Aangezien ongeveer een vijfde van alle gewonnen fosfaaterts uiteindelijk in de riolering belandt, lijkt de rol van slib als grondstof relevanter dan die van slib als brandstof. Vanuit financieel oogpunt zullen de kosten voor de verwerking van slib hierdoor wel afnemen, maar niet plots een totaal andere kostenstructuur laten zien. Daarvoor is de invloed van de verontreinigingen in het slib bij de verwerking te groot.

De meest bepalende rol van slib in de rioolwaterzuivering voor de kosten van slibverwerking is de rol van slib als stofzuiger in de rioolwaterzuivering. In het slib worden alle ongewenste bestanddelen uit het rioolwater geconcentreerd waardoor de emissie van deze verontreinigingen naar het oppervlaktewater voorkomen wordt. Juist deze verontreinigingen zijn de reden dat slib verbrand wordt en zij bepalen daardoor de kostenstructuur van de verwerking van het slib. Dat slib daarnaast ook een brandstofwaarde vertegenwoordigt en grondstoffen herbergt is dan eigenlijk een bijzaak. Deze bijzaken maken het wel mogelijk om de kosten voor de verwerking zo laag mogelijk te houden en tegelijk zoveel als mogelijk een bijdrage te leveren aan maatschappelijke doelstellingen als verlaging van het energie- en grondstoffengebruik.

Zuiveringslib is dus in eerste instantie een kostenpost omdat we hierdoor voorkomen dat verontreinigingen uit het rioolwater op een ongewenste manier in het milieu terechtkomen. Op de tweede plaats vormt slib een grondstof voor de productie van kunstmest en pas op de laatste plaats is slib een energiedrager waarmee we de eerste doelen kunnen bereiken en misschien in de toekomst netto ook nog wat energie kunnen produceren. Hopelijk helpen deze overwegingen om na te denken over nieuwere, betere slibverwerkingsmethoden. De visie dat we vooral energie uit rioolwater moeten gaan maken is daarvoor te beperkt.

8. Literatuur

1. Myriam Daru, “Wens- en schrikbeelden van poep- en poepverwijdering, theorie en praktijk van de ‘Kwestie der Faecaliën’ in de 19e eeuw”, Medische Antropologie 11 (1) 1999, pp 19-37
2. STOWA, “Slibketenstudie”, rapport 2005-26, 2005
3. CBS Statline, Energiebalans; kerncijfers, http://statline.cbs.nl.
4. CBS Statline, Ketelkolen; invoerprijs uit niet EU-landen, 2e kwartaal 2009, http://statline.cbs.nl.
5. Udo de Haes, H.A., J.L.A. Jansen, W.J. van der Weijden en A.L. Smit, “Fosfaat, van te veel naar tekort”, Beleidsnotitie van de Stuurgroep Technology Assessment van het ministerie van LNV, 2009.
6. Smit, A.L., P.S. Brindaban, J.J. Schröder, J.G. Conijn, H.G. van der Meer, “Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments”, Plant Research Internatiol, Universiteit Wageningen, 2009, Report 282.
7. Cordell, “The story of phosphorous: missing global governance of a critical resource”, SENSE A’dam, August 2008, via: http://phosphorusfutures.net/files/DCordell_SENSEpaper.pdf.
8. Rechberger,H. ,“Komponenten der gesellschaftlichen P-Bilanz”, TU Wenen, presentatie op Braunschweiger Nahrstofftage, Julius Kuhn Institut, 2008.
9. Wereldbank, “Commodity Price Data”, November 2009, http://siteresources.worldbank.org/INTDAILYPROSPECTS/Resources/Pnk_1109.pdf
10. STOWA, “Toekomstige kwantiteit en kwaliteit van zuiveringsslib”, rapport 2005-06, 2005
11. Leschber,R. B.M. Gawlik, G. Bidoglio, “Background values in European soils and sewage sludges, Results of a JRC-coordinated study on background values, part I, Evaluation of the relevance of organic micro-pollutants in sewage sludge”, EUR 22265 EN, European Commission, Directorate-General Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability, 2006, ISBN 92-79-02120-6.

ir. M. Bruggers

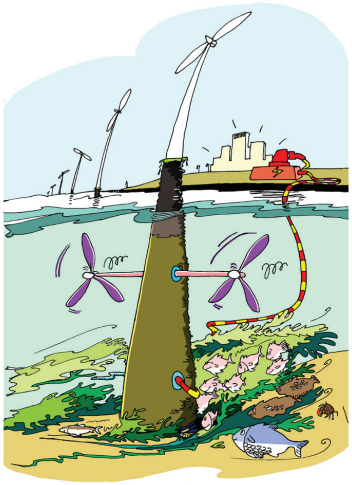
Water als energieke bondgenoot

Marcel Bruggers
Deltares

1. Inleiding

Nu fossiele brandstoffen lastiger winbaar raken en de wereld streeft naar duurzaamheid, is de mondiale zoektocht gestart naar nieuwe, duurzame energiebronnen. Water is in Nederland nog geen geaccepteerde energiebron, maar Nederland heeft van oudsher een sterke band met water en heeft in het verleden op verschillende momenten getoond dat ze de bedreigingen van water kan omzetten in kansen. Rijkswaterstaat en Deltares werken samen vanuit het WINN-programma om kennis over het winnen van energie uit water te delen, toe te passen en de ontwikkeling ervan te stimuleren.

Het gevecht van de mens tegen het water is al zo oud als er mensheid zelf. De natuurlijke vijand die bij nacht en springtij slachtoffers maakt en oogsten verwoest. Tegelijkertijd heeft de mens al die tijd niet zonder water gekund. Zonder water is er immers geen leven en geen voedsel. Nu, duizenden jaren later, willen we graag meer: televisie kijken, computeren, auto rijden, vliegen, naar de maan, naar Mars en verder. Dat alles kost enorm veel energie. De energie uit fossiel materiaal is niet onuitputtelijk, zeker niet in de mate waarin we het nu verbruiken. De schaarste maakt het steeds kostbaarder en de milieueffecten steeds ongewenster. Tijd om uit te kijken naar nieuwe bronnen van energie.



Figuur 1 – Energie uit Getijstroming

Energiewinnen met water kan op verschillende manieren. Om doorwerking van innovatieve technologieën en concepten te realiseren, is het vaak nodig slimme combinaties te maken met andere gebruiken en functies. Winning van energie uit getijdenstroming, golven en aquatische biomassa kan bijvoorbeeld goed gecombineerd worden met offshore windturbineparken.

2. Strijd mét water

Nederland is voorloper in de strijd tégen het water, maar nog geen voorloper in de strijd mét het water. Rijkswaterstaat en Deltares ondernemen nu actie om te strijden mét het water, door de kracht van het water te benutten. Specifiek wordt ingezet op het stimuleren en faciliteren van exploitatie van water als bron van duurzame energie. Er liggen veel mogelijkheden, aangezien de aarde voor tweederde uit water bestaat dat continu in beweging is. Dat brengt een aanzienlijk potentieel met zich mee. Een eerste poging om inzicht te krijgen in het winbare potentieel heeft geleid tot de rapportage 'Water als bron van duurzame energie – Inspiratieatlas van mogelijkheden'. Drie categorieën zijn te onderscheiden bij energiewinning uit water: energie uit waterbeweging, energie uit samenstelling van het water en thermische energie uit water. Binnen de categorie 'waterbeweging' vallen waterkracht (stroming & verval) in rivieren en estuaria en golfenergie. De categorie 'samenstelling' bestaat uit Blue Energy (zoutgradiënt) en aquatische biomassa. De laatste categorie bevat thermische energie uit oppervlaktewater voor koeling en verwarming, warmte- en koudeopslag en aardwarmte (feitelijk alle opslag).

3. Groot beheersgebied

Het besluit om energie te introduceren in het WINN-programma is mede gevoed door de ambitie van het huidige kabinet met betrekking tot energie. In het regeerakkoord is de doelstelling opgenomen dat in het jaar 2020 twintig procent van alle energie uit duurzame bronnen komt en dat de uitstoot van broeikasgassen met dertig procent is verminderd ten opzichte van 1990. Rijkswaterstaat heeft zich gerealiseerd dat zij beschikt over een groot nat beheersgebied met veel mogelijkheden en ongekende potenties en wil ook vanuit de rol van beheerder bijdragen aan het behalen van de regeringsdoelstelling. Daarom is de aanzet gegeven voor verschillende projecten waarin duurzame energieopwekking met water het uitgangspunt vormt. Rijkswaterstaat wil de energie uit het water benutten voor energieneutrale bediening van sluizen en bruggen en (afhankelijk van de potentie) ook een bijdrage leveren aan de groene stroomvoorziening van Nederland.

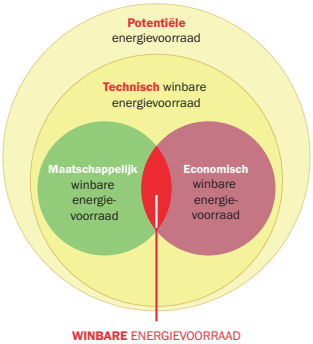
Figuur 2 – Oosterscheldekering. Het beheersgebied van Rijkswaterstaat kan in de toekomst mogelijk niet meer gezien worden als energieconsumerend, maar als energieproducerend

4. Aanzetten tot discussie

Deltares is gevraagd om inzichtelijk te maken hoe groot de potentie is van water als bron van duurzame energie in Nederland. Daarvoor is geïnventariseerd welke technologieën ontwikkeld zijn voor het winnen van energie met water. Ook zijn de verschillende typen energievoorraden in Nederland gekwantificeerd. Vaak heeft "engineering judgement" de oplossing geleverd bij het ontbreken van algemeen bewezen en geaccepteerde wetenschappelijke kennis. Naast verbeterd inzicht in de potentie en in de onzekerheid hierin, heeft de "Inspiratieatlas ook aangezet tot veel discussie over de potentie en haalbaarheid van exploitatie van energie uit water. Rijkswaterstaat is naar aanleiding hiervan de Inspiratieatlas bezig met een verkenning naar de toekomstige rol die zij kan hebben bij de winning van duurzame energie in het beheergebied.

5. Definities van energievoorraden

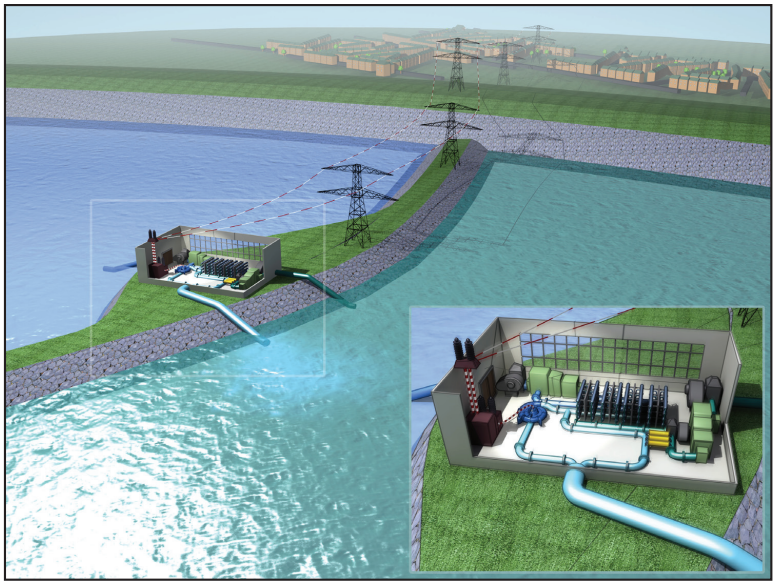
Er zijn verschillende definities om energievoorraden te kwantificeren. De 'potentiële voorraad', oftewel alles wat in het natuurlijke systeem aanwezig is en dus in theorie benut kan worden, vormt de natuurlijke basisvoorraad. Met de huidige technologische mogelijkheden is niet alle potentiële energie technisch winbaar. Dat zit hem in praktische beperkingen door de geometrie van de installaties, door noodzakelijke ruimte voor het plegen van onderhoud en veiligheid en uiteraard door de omzetting- en wrijvingsverliezen van de installaties. De 'technisch winbare voorraad' valt dus lager uit dan de voorraad potentiële energie. In werkelijkheid valt de voorraad nog lager uit,



Figuur 3 – Definiëring energievoorraden

omdat ook argumenten vanuit milieu en sociale en maatschappelijke belangen een beperkende factor zijn voor het aantal en de omvang van winlocaties. Daarmee wordt de 'maatschappelijk winbare voorraad' gedefinieerd. Een andere beperkende factor is de economische haalbaarheid. Locaties zijn alleen exploitabel wanneer de inkomsten door energieverkoop opwegen tegen de investeringen en operationele kosten. Er is dan sprake van 'economisch winbare energievoorraden'. De energievoorraad die binnen alle grenzen valt, is de exploitabele voorraad. In Figuur 3 is de relatie tussen deze voorraden gevisualiseerd.

In de inventarisatie is voor deze voorraden een eerste schatting gemaakt met de daaraan verbonden kansen om duurzame energieoplossingen te realiseren. De totale, jaarlijkse potentiële energievoorraad bedraagt circa tweemaal het Nederlandse energieverbruik. Maatschappelijk winbaar geacht wordt 10% van de Nederlandse elektriciteitsbehoefte en 100% van de warmtevraag. Hiermee zijn dit nog geen bewezen voorraden of reserves; daarvoor zijn kwantitatieve, locatiespecifieke reservestudies nodig. Ook het bepalen van de economisch winbare voorraad is nog niet mogelijk; deze is afhankelijk van de stand van de (innovatieve) techniek (zie figuur 4) en dienen per technologie in nadere studies berekend te worden.



Figuur 4 – Een of meerdere Blue Energy – centrales kunnen in de toekomst een groot aandeel hebben in de Nederlandse elektriciteitsvoorziening. De artist impression van deze innovatieve technologie geeft een locatie weer van de monding van een rivier, waarbij de scheiding tussen zoet- en zoutwater scherp is. Beide typen water worden aan weerszijden van de dijk de centrale ingepompt, waarmee energie geproduceerd wordt. Het brakke water dat na opwekking gevormd is, dient naar een voldoende afstand te worden weggepompt teneinde kortsluitstromen te voorkomen.

62e Vakantiecursus - 15 januari 2010

“Energie uit water: hype of kans?”

Gezamenlijke slotsessie

Drs.Th.T.J. Schmitz

Amongst Lions: Singapore en Nederland

Theo Schmitz
VEWIN

Op weg naar een effectieve en efficiënte drinkwatersector in 2050: doelen, scenario's en transitiemanagement. Op die onderwerpen ligt in de presentatie de nadruk. Gezocht wordt naar drivers voor (inter)nationale innovaties. Het kernthema 'water en energie' van deze VC2010 is een goed startpunt voor 'n breder denken over nieuwe paradigma's tegen de achtergrond van een snel veranderende mondiale samenleving. Onderstaand een beknopte excerpt van de presentatie op 15 januari 2010.

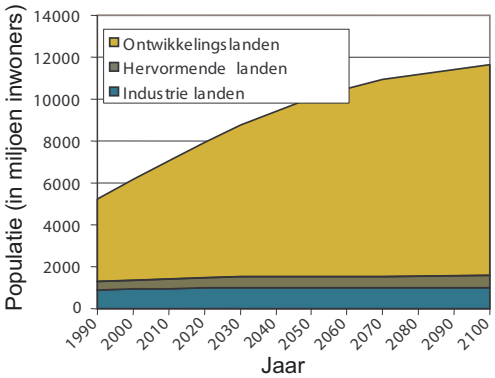
1. Terugblik

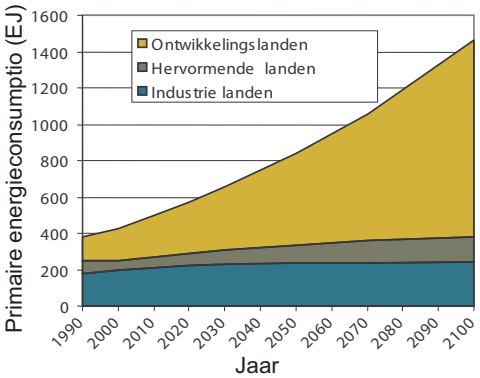
Bij de start van 2010 past niet alleen een blik voorwaarts naar 2025 en 2050, maar evenzeer een terugblik op het begin van de 21 eeuw: een 'angst'decade voor de westerse wereld, in het bijzonder voor Europa. Oudejaarsavond 1999 en de schrik voor een millenniumbug staan velen nog helder voor de geest. Groot was het gevoel van opluchting op Nieuwjaarsdag 2000. Al te snel echter volgden 9/11 (Twin Towers) en 6/5 (Fortuin). De grootste calamiteit van de decade vond plaats in september 2008. De bug barstte toen alsnog los, daags na Prinsjesdag, met dramatische verliezen op de wereldwijde effectenbeurzen en ongekende vertrouwens-crises in de internationale bankwereld. Een crisis die nog steeds niet helemaal voorbij is.

Het samenvallen van de krediet- en klimaatcrises is een opgave die in de jaren 2010–2020 veel vernuft zal vragen. Voor de watersector speelt met name de milieufactor een grote rol. De sector zal zijn rol moeten spelen bij de reductie van broeikasgassen: het gebruik van energie zal terug moeten om klimaatneutraal en duurzaam te zijn. Cradle to cradle opereren is reeds gemeengoed in de sector. Bij energiereducties kan ook gekeken worden naar minder chemicaliëngebruik of meer groene opwarming van douchewater (via zonnepanelen). Overall mag de wereld temperatuurstijging de 2° C niet overschrijden.

2. Perspectief 2010-2025: periode van schaarste

Onlangs vond de wereldwijde COP15 meeting te Kopenhagen plaats, waar energie en CO_2 voorop stonden. Er spelen in de komende jaren echter nog méér trends. Belangrijk zijn de mondiale bevolkingsgroei en verstedelijking, m.n. wat betreft de regionale verdeling ervan over de aarde. Er worden tientallen meta cities voorzien, die vrijwel allemaal in rivierdelta's van arme landen hun





Figuur 1 - Bevolkingsgroei en wereldenergieverbruik

plek zoeken. Peri urbane gebieden die van oudsher veel voedsel leveren, vallen stuk voor stuk ten prooi aan voortdurend verder uitdijende steden. Duidelijke voorbeelden: Mexico en Manila.

De groei naar negen miljard bewoners op aarde (na 2050) zal ernstige consequenties voor het urbane milieu en de sociale leefomgeving hebben. De huidige methodes van energie-, water en voedsel-productie schieten nu reeds tekort. Zonder baanbrekende innovaties zal op vele terreinen schaarste ontstaan, met name ook op grondstoffen en mineralenmarkten.

Verwerking van de kredietcrisis 2008 zal zeker tien jaar vergen. Er dreigen twee decades van groeiende schaarste op de energiemarkten: nieuwe oliecrises tekenen zich nu reeds af. Alleen de opkomst van zonne-energie (2035/2050) en bio- & nanotechnologie lijkt als tegenhanger een keer ten goede in te houden.

3. Transitiemanagement

Het ombouwen van de verouderende economische sectoren in het rijke Westen vraagt om een uitgekiend beleid bij bedrijfsleven en overheid. Regeringsleiders zullen overtuigingskracht en leiderschap moeten uitstralen. Er moet gedacht gaan worden in nieuwe paradigma's.

> ***Voorbeeld***
> *Oud paradigma: afvalwater vraagt veel energie bij zuivering. Nieuw paradigma: afvalwater levert bij reiniging energie op.*

Bovenal moet duidelijk zijn waarheen de wereld zich beweegt, resp. zich heen kan bewegen. Doelen moeten helder zijn. Zo helder dat ze hoop en vertrouwen onder de bevolking creëren.

Figuur 2 - Een van de duidelijke voorbeelden van voortdurend uitdijende steden: Manila

Punten op de horizon
Kortom, er wordt gevraagd om duidelijke 'punten op de horizon' (bijv. 'Zon 2050'). Inertia op de route erheen moeten overwonnen worden. Ongetwijfeld zullen oude sectoren zich verzetten en vernieuwingen vertragen. De wetten van de vertragende voorsprong dreigen hier volop. Er is echter geen weg terug. Vertraging leidt tot verarming. Dit kan voorkomen worden door meer vanuit de toekomst naar het heden 'terug' te denken.

> ***Voorbeeld***
> *Duitsland geeft een eerste voorbeeld van zo'n 'punt op de horizon'. Bij onze buren wordt fors ingezet op groene energie, met name zonne-energie: de infrastructuur wordt er daadwerkelijk op afgestemd. Er wordt geredeneerd vanuit 2050. Decentrale opwekkers van energie krijgen premies voor groene energie die zij op de centrale netten weten te brengen. Een fraai voorbeeld van vernieuwd denken en opereren.*

Transitiemanagement kan dus aan kracht winnen door nieuw beleid vanuit het doel '2050' te ontwikkelen in plaats van aanpassing van bestaand beleid vanuit 2010. Mensen op straat moeten – letterlijk en figuurlijk - verlokt worden om recht over te steken naar een nieuw doel.

4. Millennium Development Goals
In 2050 zullen schoon drinkwater en sanitatie onverminderd van belang zijn als doelstellingen voor een gezonde en productieve samenleving. Dat geldt niet alleen voor Europa en ons land maar evenzeer voor landen in de Derde Wereld.

WOP's
Vewin is gestart met een nieuw type internationale hulp: Water Operator Partnerships (WOP), waarin capacity building centraal staat. Een aanpak die duurzame vernieuwing garandeert door die door de inwoners van Derde Wereld landen zelf te laten dragen. Een aanpak die ook rekening houdt met het milieu ter plekke en uitputting van drinkwatervoorraden en landbouw areaals zoveel mogelijk voorkomt. De Vewin bedrijven zoeken

Figuur 3 - Z.K.H. Prins Willem Alexander bij the lancering van de Global Water Operators Partnerships (WOPs) Alliance tijdens de World Water Week 2007.

daarbij internationaal naar brede partnerships met zusterbedrijven, overheden en internationale banken.

5.Epiloog
Singapore en Nederland hebben met hun:

- Afsluitdijken en stuwmeren vol zoet water
- Hightech zuiveringstechnologieën
- Volwaardige distributiestelsels

gelijksoortige bases voor een goede en continue drinkwatervoorziening. Bovendien vormen zij uitgelezen uitvalbases voor capacity building voor landen in de Derde Wereld. Het is de bedoeling vanuit zulke hubs een sterk netwerk van water operator partnerships op te zetten.

T.C. Khoo

Water and energy in Singapore

Abstract

Singapore is blessed with 2,400 millimetres of rain a year. Unfortunately, Singapore is a small island city state, about 700 sq km, so it does not have enough land to collect and store the rainwater. It has had to invest in technology and good water management to achieve water sustainability.

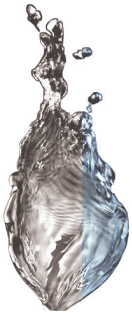
Singapore has diversified its water supply with a Four National Taps strategy, where it has increased water supply from local catchments by building 17 reservoirs and turning 2/3 of the country into water catchment areas, recycled water using advanced membrane technology producing what we call NEWater, as well as desalination. But equally important is managing the demand through a partnership approach among the public, private and people sectors to conserve, value and enjoy water, even as Singapore continues to grow and develop.

Against unprecedented trends of urbanisation and emerging concerns of climate change, ensuring water sustainability is more challenging and critical than ever. One of the foremost strategies to achieve water sustainability is to minimse the use of energy in the management of the entire water cycle. For instance, the advent of NEWater has provided Singapore with a more energy efficient National Tap, as compared to desalination. A key research priority of PUB is to find avenues to increase the energy efficiency of water production processes, which currently form the bulk of energy use in water provision. Under a Challenge Request-for-Proposal for energy-efficient seawater desalination technologies, the Environment and Water Industry Development Council (EWI) awarded VS$4 million in June 2008 to Siemens Water Technologies to develop an innovative electro-chemical process that uses only 1.5kWh of energy per m^3 of seawater – much lower than current standards – to purify seawater to meet drinking standards. Another emerging technology is membrane distillation, which utilizes low-grade waste heat to supplement the energy requirements of desalination, resulting in a net energy input of less than 1kWh/m^3 of freshwater produced.

Khoo Teng Chye
PUB Singapore

Appendices

- Nominaties Jaap van der Graaf prijs 105
- Nominaties Gijs Oskam prijs 111
- Samenvattingen voordrachten 119
- Eerdere uitgaven 123



Nominaties Jaap van der Graaf Prijs 2010

Op 15 januari 2010 zal voor de eerste keer de Jaap van der Graaf-prijs worden uitgereikt. De prijs wordt toegekend aan een student of onderzoeker, die in 2009 het beste Engelstalige artikel over de behandeling van afvalwater heeft geschreven. De onderscheiding bestaat uit een geldbedrag van €5.000,- en een glasobject en zal jaarlijks worden toegekend.

Prof.ir. J.H.J.M. (Jaap) van der Graaf was vanaf 1989 hoogleraar in de Behandeling van Afvalwater aan de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft en van 1988 tot 2003 algemeen directeur van Witteveen+Bos. Op 13 mei 2009 heeft Van der Graaf afscheid genomen als hoogleraar. Ter ere hiervan is door Witteveen+Bos besloten de Jaap van der Graaf-prijs in te stellen. De doelstelling is om de Nederlandse expertise op het gebied van behandeling van afvalwater verder te profileren. Het geldbedrag dient in het kader hiervan te worden aangewend. Dit kan zijn in de vorm van een studiereis of promotionele activiteiten.

Afscheidsrede Jaap van der Graaf

Wetenschappelijke artikelen dienen, om in aanmerking te kunnen komen voor de prijs, te voldoen aan de volgende voorwaarden:

- het onderwerp heeft betrekking op de inzameling of behandeling van afvalwater;
- de auteur dient universitair student te zijn of werkzaam te zijn binnen de Nederlandse beroepspraktijk;
- het Engelstalige artikel moet gepubliceerd zijn in een vaktijdschrift uit 2009;
- het onderwerp moet in de praktijk toepasbaar zijn.

De deelname staat open voor auteurs van alle nationaliteiten.

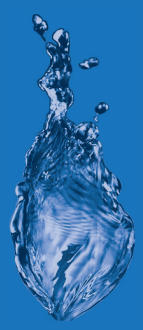
Een onafhankelijke jury zal bepalen aan wie de prijs wordt toegekend. De jury bestaat uit

- prof.dr.ir. J.B. van Lier, TU Delft/Unesco-IHE (voorzitter)
- ir. J. Kruit, Pacques
- ir. A.W.A. de Man, Waterschapsbedrijf Limburg
- dr.ir. A.F. van Nieuwenhuijzen, Witteveen+Bos
- dr.ir. H. Temmink, WUR/Wetsus

De jury heeft van 10 inzendingen 3 artikelen genomineerd die in aanmerking komen voor de prijs:

- Marlies J. Kampscheur et al. Nitrous oxide emission during wastewater treatment
- David Jeison et al. Thermophilic Sidestream Anaerobic Membrane Bioreactors: The Shear Rate Dilemma
- Adrien A. Moreau et al. The (in)significance of apparent viscosity in full-scale municipal membrane bioreactors

Van de genomineerden is een Engelstalige samenvatting (abstract) van het artikel opgenomen in deze bundel. De winnaar zal worden bekend gemaakt tijdens de 62e Vakantiecursus Drinkwater en Afvalwater. De prijs zal dan worden uitgereikt door prof. ir. Jaap van der Graaf.



M.J. Kampschreur

Nitrous oxide emission during wastewater treatment

Abstract

Nitrous oxide (N_2O), a potent greenhouse gas, can be emitted during wastewater treatment, significantly contributing to the greenhouse gas footprint. Measurements at lab-scale and full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) have demonstrated that N_2O can be emitted in substantial amounts during nitrogen removal in WWTPs, however, a large variation in reported emission values exists. Analysis of literature data enabled the identification of the most important operational parameters leading to N_2O emission in WWTPs: (i) low dissolved oxygen concentration in the nitrification and denitrification stages, (ii) increased nitrite concentrations in both nitrification and denitrification stages, and (iii) low COD/N ratio in the denitrification stage. From the literature it remains unclear whether nitrifying or denitrifying microorganisms are the main source of N_2O emissions. Operational strategies to prevent N_2O emission from WWTPs are discussed and areas in which further research is urgently required are identified.

Marlies Kampschreur

Journal

Water Research, Volume 43, Issue 17, September 2009, Pages 4093-4103

Marlies J. Kampschreur, Hardy Temmink, Robbert Kleerebezem, Mike S.M. Jetten, Mark C.M. van Loosdrecht

International Water Association

D. Jeison

Thermophilic Sidestream Anaerobic Membrane Bioreactors: The Shear Rate Dilemma

David Jeison

Abstract

Anaerobic biomass retention under thermophilic conditions has proven difficult. Membrane filtration can be used as alternative way to achieve high sludge concentrations. This research studied the feasibility of anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) under thermophilic conditions. A sidestream MBR was operated at crossflow velocities up to 1.5 m/s. For comparison, a thermophilic upflow sludge blanket reactor also was operated. Results confirmed that biomass retention may limit the performance of sludge bed reactors during long-term operation.During MBR operation, cake formation was identified as the key factor limiting the applicable flux. Low levels of irreversible fouling were observed. Even though high shear can provide an increase in particle backtransport, exposure of the sludge to a high shear stress produced a reduction of particle size, affecting the attainable flux. The concept of ''shear rate dilemma'' is introduced to describe this dual effect of shear during the operation of MBRs.

Journal

Water Environment Research, Volume 81, Issue 11, November 2009, Pages 2372 - 2380

Jeison, D; Telkamp, P; van Lier, J.B

A.A. Moreau

The (in)significance of apparent viscosity in full-scale municipal membrane bioreactors

Abstract

Ten pilot and full-scale municipal membrane bioreactor (MBR) plants throughout Europe were investigated during the period 2007–2008 using the Delft Filtration Characterisation method. Next to information on filterability the data also contain the necessary information to determine the apparent viscosity of activated sludge. The aim of this study was to quantify variations in the apparent viscosity of activated sludge in pilot and full-scale municipal MBR plants and correlate them with membrane performance. A statistical analysis was carried out in order to quantify the significance of the correlations between apparent viscosity and activated sludge characteristics. The main factor influencing activated sludge's apparent viscosity was found to be total suspended solids. Temperature was found not to have a direct impact on apparent viscosity within the range of temperatures of the pilot and full-scale municipal MBR plants studied (9.7–27.4◦C). In terms of the reversible fouling potential and membrane performance, activated sludge filterability andMBRplantmembrane permeabilitywere not statistically affected by activated sludge's apparent viscosity variations. Therefore, even if apparent viscosity plays a major role in terms of oxygen transfer efficiency, it is not relevant when optimising membrane fouling control and membrane performance of current, full-scale municipal MBR applications.

Adrien Moreau

Journal

Journal of Membrane Science, Volume 340, Issues 1-2, 15 September 2009, Pages 249-256, A.A. Moreau, N. Ratkovich, I. Nopens, J.H.J.M. van der Graaf

evers + manders subsidieadviseurs

TU Delft

Nominaties Gijs Oskam prijs 2010

Op de Vakantiecursus 2010 zal voor de zesde maal de Gijs Oskam prijs worden uitgereikt. Voor deze prijs komen jonge of aankomende academici in aanmerking. De prijs, die om de twee jaar wordt uitgereikt, werd in de jaren 2000-2008 gesponsord door Waterwinbedrijf Brabantse Biesbosch/Evides. Dit jaar is de sponsoring overgenomen door Evers + Manders Subsidieadviseurs BV en de aanmoedigingspremie verhoogd.

Uitreiking van de Gijs Oskam award in 2008

De prijs, met een aanmoedigingspremie van €2.500,- moet jonge onderzoekers in de watervoorziening een extra stimulans geven. De belangrijkste criteria voor het winnen van de prijs zijn orginaliteit en kwaliteit van het onderzoek.

Voor de Gijs Oskam prijs van 2010 zijn de volgende drie personen genomineerd:

- Harmen van der Laan — Investigating subsurface iron and arsenic removal: anoxic column experiments to explore efficiency parameters
- Perry van Overveld — Threats to European drinking water quality: countering micropollutants by influencing decision-making
- Evgenia Rabinovitch — Drinking with the wind

De prijswinnaar zal geselecteerd worden door de jury, bestaande uit prof. ir. Van Dijk (TU Delft, vz), dr. ir. Rietveld (TU Delft/Waternet) en dr.ir. J.Q.J.C. Verberk (TU Delft). De prijs zal op 15 januari tijdens de Vakantiecursus worden uitgereikt door drs. Gijs Oskam, voormalig directeur van NV Waterwinbedrijf Brabantse Biesbosch.

De voorgaande edities van de Gijs Oskam prijs zijn toegekend aan de volgende personen:

Jaar	Naam	Project titel
2008	ir. Doris van Halem	Ceramic silver-impregnated pot filters for household drinkwater treatment in developing countries
2006	ir. Anke Grefte	Behaviour of particles in a network; Test rig results
2004	ir. Sawan Raktoe	Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes
2002	ir. Jan Post	Capillaire membraanfiltratie
2000	ir. Rene van de Aa	Nitrificatie in snelfilters

ir. H. van der Laan

Investigating subsurface iron and arsenic removal: anoxic column experiments to explore efficiency parameters

Introduction

Recently subsurface treatment as a possibility for arsenic removal for drinking water supply on community scale in rural Bangladesh has been recognized. The technique involves the injection of aerated water into an anoxic aquifer, where consequently ferrous iron is oxidized by the injected oxygen. Subsequently, the flow is reversed and a multiple of the injected volume can be extracted with lowered iron concentrations, which makes the technology successful. Efficiency ratios (V/V_i) of extracted water (V) over injected water (V_i) are typically increasing over the successive cycles and may range from 3 to 30. The freshly formed ferric oxides are potentially effective adsorbents for trace elements like arsenic. Yet, the dominant reaction mechanisms responsible for the retardation of iron and arsenic are still not well understood. This research aims to gain a better understanding of these reactions, to enhance the operational efficiency of subsurface iron and arsenic removal.

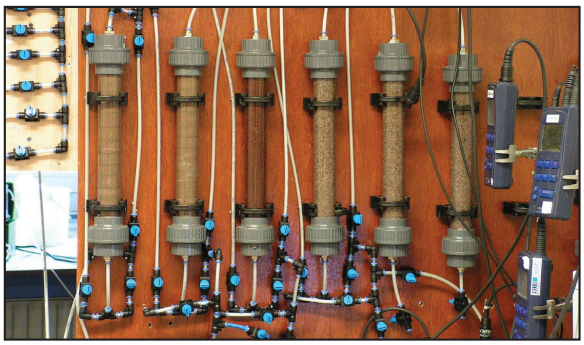


Figure 1 - Part of the experimental setup

Methodology

Several successive injection/abstraction cycles were simulated with anoxic column experiments. Various experiments were performed, adjusting and comparing the influence of different parameters: two types of soil material (clean sand and ripened sand), pH variation, a different injection method and the influence of a background electrolyte (0.1M $NaNO_3$).

Harmen van der Laan
afgestudeerd aan de TU Delft, nu werkzaam als research assistent bij de TU Delft.

September 2009

Afstudeercommissie
Prof. J.C. van Dijk
ir. D. van Halem
Dr. B. Petrusevski MSc. (UNESCO-IHE)
Prof.dr.ir. T.N. Olsthoorn

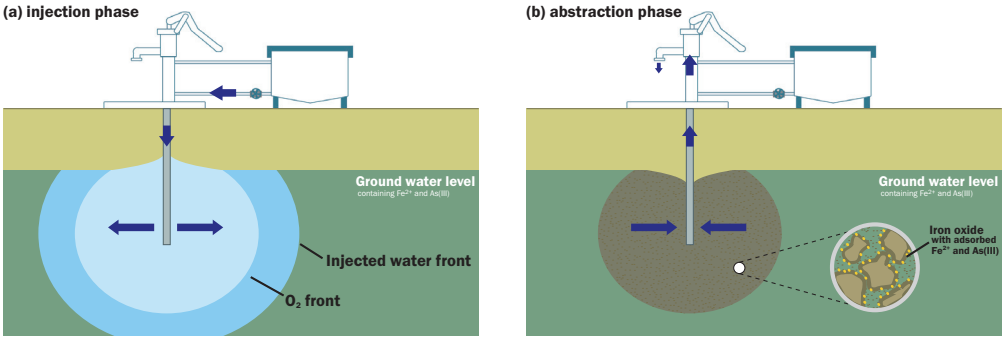


Figure 2 -The principle of subsurface iron and arsenic removal

Results

The results of this study are promising and provide new insights in the mechanisms during subsurface iron and arsenic removal. Very high adsorption capacities for both iron and arsenic were measured. The retardation for arsenic was increasing over the successive cycles, whereas the iron retardation remained stable. Furthermore, with a higher ionic strength the adsorption of arsenite increased, while the adsorption of iron decreased.

Under the given conditions the technology demonstrated a very good efficiency. Yet, the adsorption characteristics showed conflicting results with the known surface complexation modeling parameters, suggesting that other mechanism may be occurring which could explain the high retardation. Different mechanisms were hypothesized and evaluated: ion exchange, interfacial electron transfer and the influence of the point-of-zero-charge of the soil materials.

It is concluded that the ion exchange mechanism played a dominant in the retardation of iron. The increasing efficiency of arsenic is a result of the increasing amount of iron oxides at the soil material. As a general conclusion it is stated that this study shows that subsurface treatment has a large potential for iron and arsenic removal. The results may illustrate the theoretical possibilities under ideal circumstances. More research is required to come to more practical implications to optimize the operational efficiency in the field.

ir. P.J.M. van Overveld

Threats to European drinking water quality: countering micropollutants by influencing decision-making

Problem statement

Organic micropollutants (MPs), like pesticides and pharmaceuticals, are frequently detected in surface water as a result of emissions from sources like agriculture, industry and households. Due to their specific physical and chemical properties, some MPs cannot be completely removed in drinking water treatment plants and are therefore occasionally also detected in drinking water. To reduce the risk to the environment and public health, legislation has been developed via decision-making processes at the level of the European Union (EU) to restrict the emissions of MPs. Initiated by the Water Framework Directive in 2000, over the last decennium Priority Substances (PS, 2001) have been identified – including several pesticides – which are bound to maximum acceptable surface water concentrations (Environmental Quality Standards, EQS, 2008). To protect their interests, stakeholders attempt to influence EU decision-making. The research question is: how can EU decision-making more effectively be influenced in the future?

Methodology

By reconstructing the decision-making processes regarding PS and EQS, factors that have a significant impact on the decision-making outcome can be identified and not only be used to counter the threat from pesticides, but the emerging threat of pharmaceuticals – and other MPs – as well. To collect the data, document analysis has been undertaken and interviews were conducted throughout Europe with thirty representatives from stakeholders and formal decision-makers.

Conclusions and recommendations

The stakeholders attempt to influence EU decision-making processes by lobbying the formal decision-makers: the European Commission, the European Parliament and the Council of the European Union. Each of the two consecutive rounds (PS and EQS) consists of two phases. First, in the informal pre-decision making phase a scientific methodology is developed and applied. This phase was led by the Commission and Fraunhofer Institute in consultation with Member States and stakeholders. Second, in the formal decision-making phase the Commission submits a Proposal for new legislation based on the first phase, and via the codecision procedure the Parliament and Council adopt the

Perry van Overveld
afgestudeerd aan de TU Delft, nu werkzaam als strategy consultant voor Deloitte Consulting.

November 2008

Afstudeercommissie
Prof. ir. J.C. van Dijk
prof. dr. ir. W.A.H. Thissen
dr. ir. A.R.D. Verliefde
dr. ir. L.M. Hermans,
dr. J.F.M. Koppenjan
ir. N.T.C. Zantkuijl (Vewin)

new legislation together. The first phase is strongly focused on science whereas the second phase is of a strong political nature.
Based on this reconstruction, the decision-making is strongly impacted by the following factors: timing (early involvement is the key), technical information (prerequisite for early involvement), organizational empowerment (management of lobby) and public opinion. However, analysis of the two decision-making rounds (PS and EQS) has revealed that the water sector has mainly focused on the second political-oriented phase, whereas the other stakeholders have been actively involved in both phases. My research also shows that – if the water sector would have been more active in the first informal pre-decision making phase – glyphosate would have been listed as PS already in 2001, and the EQS of atrazine would have been much lower than it currently is. Thus, the water sector can really counter the threat from MPs more effectively by enhancing its lobby strategy.

Two main recommendations for the drinking water sector are:

- Further empower the organization of lobby activities within the water coalition: manage measurement data, determine drinking water EQS, coordinate knowledge and arguments;
- Strengthen the argumentation structure with QSARs: QSARs scientifically support the argument of limited removal efficiency in treatment and will have a large impact on several methodologies – and consequently on the decision-making outcomes.

ir. E.N. Rabinovitch

Drinking with the wind

Introduction

Sea water is often the only available water source in arid, remote areas. Reverse osmosis (RO) desalination is the most energy-efficient technology to treat saline water for drinking water purposes. Nevertheless it is still an energy-intensive process, traditionally powered by fossil energy sources. Due to increasing costs and environmental drawbacks of fossil energy sources it becomes economically feasible to use renewable energy sources. In this project wind energy is used to power an RO-installation. Indirect, mechanical drive is used instead of an electric drive to prevent energy losses by conversion and expensive electrical energy storage.

Research

The first prototype of a small scale RO-installation mechanically driven by wind power was designed, built and tested. The operation was variable due to the characteristics of the wind power supply. The process controls were operating mechanically/hydraulically without the use of electricity. To prevent delamination of the RO-membranes a fresh flush was included.

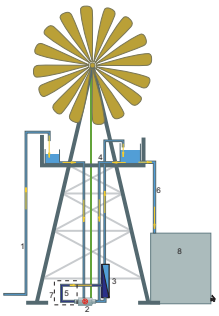


Figure 1 - Schematic drawing 'drinking with the wind'

Conclusions and Recommendations

The production of nearly 5 m³ a day was reached at a measured average wind speed of 7 m/s. The specific energy was 5,2 kW/ m³ of permeate. However, the specific energy is not normative for the production costs of the product water, for this concept, because wind energy is freely available. The investment costs have the largest influence on the production costs and have to be optimized in the future. By using the method of fitting the required power of the pump and the power curve of the windmill, the best pump can be chosen for a certain wind regime. This can lead to more efficient wind power extraction and even smaller installations.

The fresh flush was activated hydraulically when the wind speed dropped below a certain level and the recovery was controlled mechanically as well. This prevented scaling and made the use of anti-scalants and acids redundant.

Evgenia Rabinovitch
afgestudeerd aan de TU Delft, nu werkzaam bij Royal Haskoning

November 2008

Afstudeercommissie
Prof.ir. J.C. van Dijk
Dr.ir. S.G.J. Heijman
Dr.ir. J.Q.J.C. Verberk
Prof.dr. G.J.W. van Brussel

Samenvattingen van de voordrachten

62e Vakantiecursus

Drinkwater

Energie en drinkwater

Prof.ir. J.C. van Dijk (TU Delft)
Dr.ir. L.C. Rietveld (TU Delft)
Dr. J.A.M.H Hofman (KWR)

Tijdens het winnen, transporteren, zuiveren en distribueren van drinkwater wordt energie gebruikt. Wat is de energie "footprint" van de drinkwatervoorziening en op welk gebied zijn verbeteringen zinvol? Doordat het om grote hoeveelheden geproduceerd drinkwater gaat zijn kleine maatregelen reeds voldoende om veel energie te sparen. Hierbij valt onder andere te denken aan het afvlakken van verbruiksvariaties bij watertransport en -zuivering. Ook zijn er ontwikkelingen om duurzame (wind- en zonne-) energie rechtstreeks in te zetten voor de drinkwaterzuivering. In ontwikkelingslanden kan de beschikbaarheid van energie een groot knelpunt zijn, waardoor de inzet van wind en zon nog grotere voordelen biedt. Tijdens de voordracht zullen meerdere van deze voorbeelden de revue passeren.

Een wereld te winnen!

Ir. H. Hoogeveen
(Waterbedrijf Groningen)

Groningen wordt niet alleen gekenmerkt door veel ruimte, veel ondernemingszin en weinig woorden, maar ook door Chemie, Energie, Landbouw en Natuur. De verbindende schakel is Water. Aan de hand van praktijkvoorbeelden wordt geschetst welke kansen er liggen op de raakvlakken van deze domeinen.
Er wordt bovendien ingegaan op de uitdagingen die er liggen voor de komende 25 jaar. Hoe zou een duurzaam Groningen er in 2033 uit kunnen zien, hoe spelen we in op klimaatverandering en hoe kunnen de verschillende actoren elkaar versterken bij het realiseren van duurzame oplossingen?

Blauwe energie: van goed idee naar veelbelovende technologie

Prof.dr.ir. C.J.N. Buisman
(TTI Wetsus)
Dr.ir. J.W. Post (KWR)

Wetsus – Centre for Sustainable Water Technology in Nederland – begon in 2005 met het project 'Blue Energy' met een focus op omgekeerde elektrodialyse. Het academisch onderzoek heeft geleid tot technologische doorbraken: het opgewekte vermogen per membraanoppervlakte is verdrievoudigd (>1.2 W/m^2), aangetoond is dat het proces met een hoog energetisch rendement kan worden bedreven (>80% is gehaald) en ook zijn de eerste stappen gezet in het voorkomen van vervuiling en in het opschalen van de technologie naar de praktijk. In de presentatie gaan we in op de uitdagingen waarmee wij worden geconfronteerd met betrekking tot de economische en technologische haalbaarheid. De volgende onderwerpen worden besproken: (i) de uitdaging om goedkope membranen in grote hoeveelheden te verkrijgen kan als overkomelijk worden beschouwd als we kijken naar de vergelijkbare bulkmarkt voor ionenwisselaars, (ii) de uitdaging om een goedkoop en een energiezuinig proces te ontwerpen is genomen met de toepassing van een eenvoudige trommelzeef als voorbehandeling voor een spacer-vrije stack, en (iii) de economische haalbaarheid van een 200 kW eenheid leert dat Blauwe Energie kan concurreren met andere energiebronnen zoals windenergie. Verdere stappen op het pad van de ontwikkeling van omgekeerde elektrodialyse worden gepresenteerd. Voor de volgende stap wordt aanbevolen om te beginnen met een opgeschaalde pilot op de Afsluitdijk (Nederland), parallel aan begeleidende studies met betrekking tot de ecologische en de hydrologische aspecten.
Ook geven wij de vooruitzichten van de nieuwe technologie, op mondiaal en nationaal niveau. De theoretische potentie van vermogen uit zoutgradiënten wordt geschat op 1724 GW. De technische potentie – het deel dat kan worden gewonnen met de huidige technologie – wordt geraamd op 983 GW.
Het technische en economische potentieel van de rivieren Rijn en Maas (met de riviermonding in Nederland) wordt in meer detail besproken. Het technische potentieel voor deze rivieren is 2,4 GW. Het economische potentieel wordt geschat op 1,5 GW, nadat in meer detail gekeken

is naar de Nederlandse Delta. De veelbelovende vooruitzichten – vooral voor Nederland, waar de zoutgradiënten een belangrijke bron van energie kunnen worden – leiden tot een sterke aanbeveling aan beleidsmakers, captains of industry en vooraanstaande wetenschappers om verder te gaan met onderzoek en ontwikkeling van omgekeerde elektrodialyse.

Wat kost energie uit water?
Prof.dr.ir. J.K. Vrijling (TU Delft)
Droom of daad? De CO_2 problematiek leidt tot veel nieuwe ideeën vooral op energie gebied. Windmolens, watermolens, getijcentrales: allemaal voorstellen, die doordacht lijken. Hoe doordacht? Kunnen ze het probleem oplossen en is het betaalbaar? Of is het gewoon duurzaam?

Energie in de watercyclus
Dr.ir.J.P. van der Hoek (Waternet)
De relatie tussen energie en water wordt steeds belangrijker. Water is een energiedrager, maar water kan zelf ook energie bevatten, hetzij thermische energie (koude of warmte), hetzij chemische energie (o.a. in de vorm van organische stof). De relatie tussen energie en water kan door waterbedrijven benut worden: om klimaatneutraal te opereren, om klantprocessen te verbeteren, om nieuwe diensten te ontwikkelen, etc. Voor een watercyclus bedrijf liggen er veel mogelijkheden doordat een dergelijk bedrijf zich bezighoudt met oppervlaktewater, drinkwater, afvalwater en grondwater. Welke opties bieden de beste kansen? Wat is er nodig om die kansen te verzilveren?

Is er een dokter in de zaal?
Prof.dr. G.J. Medema (KWR/TU Delft)
Water en energie, is dat een gezonde combinatie? Dat kan wel, maar er zijn veel voorbeelden waar het geen gezonde combinatie is gebleken. Stuwdammen voor energievoorziening leverden niet alleen energie, maar ook bilharzia aan de bevolking. Koelsystemen maken het binnen koel, maar sproeien buiten Legionella over de voorbijgangers. Stadsverwarming verwarmt niet alleen onze woningen, maar ook onze drinkwaterleidingen zodat er Legionella in gaat groeien. Koude- en warmteopslag gebruikt de warmtecapaciteit van de bodem, maar prikt ook gaten in de bodemlagen die zorgen voor de verwijdering van ziekteverwekkers.

Afvalwater

Druk op afvalwater
Prof.dr.ir. J.B. van Lier (TU Delft/IHE)
Ing. J.F.M. Raap (Royal Cosun)
Energie en water zijn intrinsiek gekoppeld. De aerobe verbranding van opgelost CZV in een conventioneel actiefslib installatie kost gemiddeld zo'n 3.6 MJ (1 kWh) aan elektrische energie per kg CZV verwijderd. De energie inhoud van diezelfde kg CZV is zo'n 13.5 MJ aan chemisch vastgelegde energie in organische componenten. Verbetering van de energiehuishouding in rwzi's is lange tijd gericht op verhoging van het beluchtingsrendement. Echter, de grootste sprong voorwaarts is te maken met het omzetten en terugwinnen van de chemisch gebonden energie in de organische vuillast, waarbij uitsparing van de beluchtingsenergie kan worden opgeteld bij de 'overall' energiewinst, die dan kan oplopen tot meer dan 20 MJ/kg CZV verwijderd. M.b.v. anaerobe conversietechnieken wordt vrijwel de gehele energie inhoud van de organische stof vastgelegd in het eindproduct: methaan. Aanwending van biogas op de communale zuivering of binnen industriële productieprocessen draagt bij aan een verbeterde energiehuishouding en CO2 emissiereductie doelstellingen. De afvalwaterzuivering ontstijgt zijn doel en wordt een energieleverancier, met de zon als oorspronkelijke bron.

Exit conventioneel actief slib?
Prof.dr.ir. W. Verstraete (Universiteit Gent)
De historie van het actief slibproces gaat zo'n kleine honderd jaar terug. Een simpele beluchting in een Engels bekerglas met afvalwater leidde uiteindelijk tot bezinkbare slibvlokken en een heldere bovenstaande vloeistof. De geboorte van het actief slibproces betekende een oplossing voor de toenemende vervuiling van het oppervlakte water rondom de grote steden. Echter pas in de laatste decennia van de vorige eeuw werd de zuivering verplicht gesteld in de Europese landen. Wijselijk wachtte België tot het allerlaatste om de meest

moderne trends mee te kunnen nemen in de publieke werken. Recente inzichten geven echter goede mogelijkheden voor een radicale modernisering van de communale zuiveringen waarbij de zorg om het gebruik van fossiele brandstoffen en het terugwinnen van grondstoffen, zoals energie en nutriënten, worden meegenomen in het concept. Die Duitsers met hun AB proces waren zo gek nog niet, zeker nu revolutionaire veranderingen ten aanzien van de autotrofe stikstofverwijdering in de kinderschoenen staan. Had België nog maar langer gewacht...

RWZI als energiefabriek
Ir. F. Kiestra
(Waterschap Aa en Maas)
De rioolwaterzuivering van de toekomst moet minimaal energieneutraal kunnen opereren. Twaalf waterschappen hebben inmiddels hun krachten gebundeld om elk minimaal één energiefabriek te realiseren. Welke technieken en ontwikkelingen zijn daarvoor nodig en wat betekent dat in de hele afvalwaterketen? Tijdens de lezing zullen enkele uitgewerkte cases nader worden bekeken.

Industriewater: tak of vak?
Drs. M.G. Flick (Evides)
Industriewater wordt wel als verzamelterm gebruikt waarachter productdefinities (alle niet-drinkwater?), marktdefinities (water voor alle industriële processen, afvalwaterzuivering), contractformats (DBFO, BOT, O+M) en totale industriële servicebedrijven schuil gaan. Toch is de markt van industriewater zeer volwassen, met internationale spelers van grote allure, en met mooie, complexe projectreferenties van vaak ketengeïntegreerde technologie oplossingen.
Daarbij hebben alle projecten een sterk realisatiekarakter en een resultaat dat zowel technologisch/technisch als financieel/organisatorisch niet zelden grensverleggend is.
Het blijkt dat Industriewater een zeer volwassen bedrijfstak is. Toch gaat elk industriewaterproject gepaard met veel onderzoek, zowel vooraf alsook tijdens de operatie. Voor een succesvolle integratie van industriële processen en industriewater is blijkbaar grote behoefte aan kennisontwikkeling rondom de toegepaste technologie. Tevens vragen maatschappelijke ontwikkelingen rondom duurzaamheid en zorg voor het milieu een continue ontwikkeling van de processen. De kennisintensiteit blijkt aanzienlijk, want er blijken geen pasklare antwoorden terwijl het landschap van kennisinstituten en onderzoeksinstellingen versnipperd is en niet zelden onvoldoende gericht is op de ontwikkeling van toepasbare technologie voor de industriële praktijk. Wat de vraag rechtvaardigt of in het werkveld van Industriewater niet een enorme kans ligt voor de ontwikkeling van onderzoek en onderwijs. De lezing zal dit nader uitdiepen en een nieuwe ontwikkeling in industriewaterland aankondigen.

Zuiveringsslib: kostenpost, energiedrager of grondstof?
Ir. L.D. Korving (SNB)
Het slib in een RWZI is onlosmakelijk verbonden met de kerntaak van een RWZI: het zuiveren van rioolwater: zonder slib geen zuivering. Tegelijk zorgt de productie van slib voor een belangrijke kostenpost voor deze zuivering. Leon Korving van Slibverwerking Noord-Brabant zal ingaan op de achtergrond van deze kosten. Aan de hand van enkele praktijkvoorbeelden zal hij laten zien wat de (on) mogelijkheden zijn van de visie dat slib een energiedrager of grondstof is.

Water als energieke bondgenoot
Ir. M. Bruggers (Deltares)
Het winnen van duurzame energie wordt steeds belangrijker. Water in op en onder de grond kan een belangrijke energiebron worden. Water beschikt over grote hoeveelheden energie, omdat het direct en indirect veel energie opvangt van de zon, maan en de aardkern. De uitdagingen bij winning van energie uit water betreffen vooral de aanpak waarmee de in water en tevens diffuus voorkomende energie gewonnen kan worden en hoe de winning te combineren is met andere functies gerelateerd aan het water. De presentatie zal gaan over de diverse aspecten betreffende de winning van duurzame energie uit water en belicht welke potenties nu en in de toekomst haalbaar zijn.

Gezamenlijke slotsessie

Water en energie: verantwoordelijkheid voor politiek en sector

Drs. Th.T.J. Schmitz (Vewin)

Amongst Lions - Water staat onmiskenbaar op de politieke agenda. Steeds meer landen en politici zijn aanwezig op internationale watercongressen en symposia. De groeiende aandacht, van Istanbul tot Singapore, van Kyoto tot Kopenhagen, krijgt onvoldoende vertaling in budgettaire prioriteiten. Gebukt onder vele crises (financiën, energie, voedsel, klimaat en grondstoffen) staat de groei van het aantal mondiale watervoorzieningen onder druk. De Millennium Development Goals voor drinkwater en sanitatie (MDG7C) vragen om een hogere inzet. Extra impulsen en katalysatoren voor procesversnelling zijn nodig, ruraal én stedelijk. Dreigende calamiteiten als waterschaarste voor ¼ van de wereldbevolking in 2025 moeten worden voorkomen.

Op tal van fronten heeft ons land in de afgelopen jaren initiatieven genomen: institutioneel, financieel, (milieu)technisch. De presentatie besteedt (in woord en beeld) aandacht aan de 1%-faciliteit voor MDG's en de opkomst van de Water Operator Partnerships. De nieuwe OS-strategie 2015 van Vewin wordt toegelicht met zijn focus op coördinatie in internationale netwerken ter verhoging van efficiency en effectiviteit. Het gaat om een totale cradle-to-cradle aanpak van mensen en middelen, van bodem tot regenwater, van zoet tot zout, met als logisch sluitstuk een verduurzaming van WOP-projecten. Waar de overheid de sector te hulp vraagt, zal zij zelf als eerste moeten acteren: voorwaarden scheppend en structurerend, nationaal en internationaal. Alle kennis, netwerken en middelen moeten worden gemobiliseerd: een dolfijnsprong. Innovatiecentra als Nederland en Singapore kunnen internationaal leidend zijn.

How roaring lions can make dolphins jump.

Water and energy in Singapore

T.C. Khoo (PUB Singapore)

Singapore is blessed with 2,400 millimetres of rain a year. Unfortunately, Singapore is a small island city state, about 700 sq km, so it does not have enough land to collect and store the rainwater. It has had to invest in technology and good water management to achieve water sustainability.

Singapore has diversified its water supply with a Four National Taps strategy, where it has increased water supply from local catchments by building 17 reservoirs and turning 2/3 of the country into water catchment areas, recycled water using advanced membrane technology producing what we call NEWater, as well as desalination. But equally important is managing the demand through a partnership approach among the public, private and people sectors to conserve, value and enjoy water, even as Singapore continues to grow and develop.

Against unprecedented trends of urbanisation and emerging concerns of climate change, ensuring water sustainability is more challenging and critical than ever. One of the foremost strategies to achieve water sustainability is to minimse the use of energy in the management of the entire water cycle. For instance, the advent of NEWater has provided Singapore with a more energy efficient National Tap, as compared to desalination. A key research priority of PUB is to find avenues to increase the energy efficiency of water production processes, which currently form the bulk of energy use in water provision. Under a Challenge Request-for-Proposal for energy-efficient seawater desalination technologies, the Environment and Water Industry Development Council (EWI) awarded VS$4 million in June 2008 to Siemens Water Technologies to develop an innovative electro-chemical process that uses only 1.5kWh of energy per m^3 of seawater – much lower than current standards – to purify seawater to meet drinking standards. Another emerging technology is membrane distillation, which utilizes low-grade waste heat to supplement the energy requirements of desalination, resulting in a net energy input of less than 1kWh/m^3 of freshwater produced.

Eerdere uitgaven

Reeds in onderstaande volgorde in boekvorm verschenen voordrachten van de volgende cursussen in Drinkwatervoorziening:

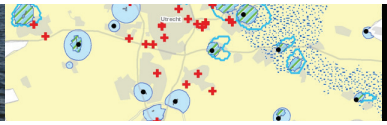
1. Filtratie; 2. Vervaardiging van buizen voor transport- en distributieleidingen; 3. Winning van grondwater; 4. Waterzuivering; 5. Hygiënische aspecten van de drinkwatervoorziening; 6. Het transport en de distributie van leidingwater; 7. Keuze, aantasting en bescherming van materialen voor koud- en warmwaterleidingen; 8. 9. en 10. Enige wetenschappelijke grondslagen der waterleidingtechniek I, II, en III; 11. Radio-activiteit; 12. Grondwater; 13. De Rijn; 14. Nieuwe ontwikkelingen in de waterleidingtechniek op physisch, chemisch en biologisch gebied; 15. De watervoorziening en de industrie; 16. Gebruik van moderne statistische methoden; 17. Kunstmatige infi ltratie; 18. De biologie en de watervoorziening; 19. Snelfiltratie; 20. Physische technologie en de waterzuivering; 21. Van goed naar beter water; 22. Het ontwerpen van waterzuiveringsinstallaties; 23. Kwaliteitsbeheersing bij de openbare drinkwatervoorziening; 24. De Maas; 25. De openbare watervoorziening in de maatschappij van morgen; 26. Watertransport door leidingen; 27. Regel- en stuurtechniek in het waterleidingbedrijf; 28. De winning en aanvulling van grondwater en beïnvloeding van de omgeving; 29. Nieuwe zuiveringstechnieken; 30. Distributienetten en binnenleidingen; 31. Drinkwater in breder verband; 32. De drinkwatervoorziening in ontwikkelingslanden; 33. Toxicologische aspecten van drinkwater; 34. Microbiologie bij de waterbereiding; 35. Europees milieubeleid en de gevolgen voor de waterleidingbedrijven; 36. Systeembenadering en modellering in de waterhuishouding; 37. Bedrijfsmatige aspecten van winning en zuivering; 38. Bedrijfsmatige aspecten van transport en distributie; 39. Informatica, automatisering en computertoepassingen; 40. Radio-activiteit en de drinkwatervoorziening; 41. Effecten van milieuverontreinigingen op de waterkringloop; 42. Recente relevante ontwikkelingen met betrekking tot de drinkwatervoorziening; 43. Technische maatregelen voor kwaliteitszorg voor grondstof en eindprodukt; 44. Beschouwingen met betrekking tot het VEWIN-Milieuplan; 45. Grondwater of oppervlaktewater?; 46. Een glasheldere toekomst?; 47. Bouwen voor de 21e eeuw; 48. Drinkwater in Nederland: natuurlijk het beste?; 49. Niet alleen drinkwater?!; 50. Uitdagingen voor de drinkwatersector; 51. Strategische ontwikkelingen; 52. Kosten of kwaliteit?

Reeds in onderstaande volgorde in boekvorm verschenen voordrachten van de volgende cursussen in Riolering en Afvalwaterbehandeling:

1. De afvoer van afvalwater naar zee; 2. Slibverwerking; 3. De technologie van het beluchtingsproces; 4. Recreatie en waterverontreiniging; 5. Afvalwater thans en in de toekomst; 6. De oxydatiesloot; 7. Rioleringen - bijzondere onderwerpen; 8. Centralisatie van behandeling van afvalwater en slib; 9. Vooruitgang in de zuiveringstechniek; 10. Doelstellingen en optimalisatie; 11. Beluchting; 12. Milieu en economie in het spanningsveld van onze maatschappij; 13. De belasting van het milieu door fosfaten en verspreide lezingen; 14. De Rijn; 15. Milieueffectrapportage; 16. Slib opnieuw bekeken; 17. Wat de industrie doet; 18. Voordrachtenbundel 18e Vakantiecursus in Riolering en Afvalwaterbehandeling; 19. Nieuw ontwikkelingen in de afvalwaterketen.

Reeds in onderstaande volgorde in boekvorm verschenen voordrachten van de volgende gecombineerde cursussen in Drinkwatervoorziening, Riolering en Afvalwaterbehandeling:

53/20. Internationale ontwikkelingen in de waterketen; 54/21. Gezondheid en (water)kwaliteit; 55/22. (Net)werken; 56/23. Water zonder grenzen; 57/24. Door water verbonden; 58/25. Risicomanagement en/of innovatie?; 59/26. Grenzen verleggen; 60/27. Water and sanitation for all; 61/28 Nieuwe uitdagingen.



VC 2010

TU Delft