

# Water en energie als onafscheidelijke tweeling in de watercyclus

## SAMENVATTING

Ondanks dat de watercyclus slechts een klein deel van het totale energieverbruik uitmaakt, is het minimaliseren van het energieverbruik essentieel voor een duurzame watercyclus. De behandeling van afvalwater zal daarom niet alleen op de effluentkwaliteit gericht moeten zijn, maar ook hergebruik van de in het afvalwater aanwezige nutriënten en het terugwinnen van energie zijn van belang. Uit een energieanalyse van de Nederlandse watercyclus is geconcludeerd dat een energieneutrale watercyclus in Nederland binnen handbereik ligt, door gebruik te maken van aanwezige warmte en organische stof.

## INLEIDING

Bevolkingsgroei en toenemende economische ontwikkeling leiden tot een groeiend tekort aan beschikbaar zoet water. Door het optreden van klimaatverandering kan dit effect worden versneld of versterkt. Het is daarom van groot belang om het gebruik en afvoer van water in de watercyclus kritisch onder de loep te nemen. Drinkwatervoorziening en inzameling en zuivering van afvalwater zijn belangrijke aspecten in dichtbevolkte gebieden. De uitdagingen van deze water-vraagstukken kunnen echter niet los gezien worden van een ander probleem: de toenemende vraag naar energie en de wereldwijde milieuproblematiek. Hoewel de watercyclus maar een heel kleine factor is in het totale energieverbruik, kunnen water en energie toch niet los van elkaar gezien worden bij de zoektocht naar duurzame oplossingen in de watercyclus.

Drinkwater, riolering en afvalwater zijn – ondanks dat ze water gemeenschappelijk hebben – sterk gescheiden werelden. De weg naar echt duurzame oplossingen ligt echter opgesloten in de integratie van deze werelden. Afzonderlijke optimalisering van drinkwater, riolering en afvalwater betekent niet dat daarmee de gehele watercyclus ook optimaal functioneert. Om een duurzame watercyclus te realiseren is een integrale aanpak nodig, die rekening houdt met de energie-efficiëntie van alle processen, waarbij afvalwaterzuivering gericht is op het terugwinnen van nutriënten en energie. Paminger en Kenway (2008) gaan zelfs een stap verder door een stad te beschouwen als een stedelijk metabolisme, waar water, energie, voedsel en materialen in gaan, en waar afvalwater, regenwater, vast afval en onder andere broeikasgassen uitkomen. Het optimaliseren van interne cycli in de stad, inclusief de watercyclus, kan leiden tot een verder verbetering van de duurzaamheid.

## **DE NEDERLANDSE SITUATIE**

### **Waterstress in Nederland?**

Water in Nederland is in overvloed aanwezig. Liggend aan de delta van Maas en Rijn, en een hoeveelheid neerslag van rond de 800 mm per jaar betekent dat er gemiddeld in principe ruim voldoende water beschikbaar is. Echter door seizoensgebonden variatie kan de waterkwaliteit drastisch veranderen. In het bijzonder bij lage rivierafvoeren, kan de waterkwaliteit sterk achteruitgaan (Zwolsman and Van Bokhoven, 2007; Van Vliet and Zwolsman, 2008). De verwachting is dat de frequentie van droge periodes en lage rivierafvoer zal toenemen door klimaatverandering.

In de wateren rondom de Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden is zoetwater ook schaars. Industriële gebruikers en de landbouw worden daardoor gedwongen het water over grote afstand aan te voeren, of om op zoek te gaan naar alternatieve bronnen zoals effluent van rioolwaterzuiveringen of het toepassen van ontzoutingstechnologie, beide met een relatief hoog energieverbruik (Mulder et al., 2009).

### **Energie en de emissie van broeikasgassen in de watercyclus**

Door de bevolkingsgroei en een toename van het gebruik van stoffen als medicijnen en bestrijdingsmiddelen, is er meer aandacht voor aanwezigheid van deze stoffen in drink- en afvalwater. Daarnaast wordt door temperatuurstijging ten gevolge van klimaatverandering verwacht dat er een toename van de groei van micro-organismen en een algemene verslechtering van de kwaliteit van oppervlaktewater zal optreden. Dit betekent dat meer en nieuwe technologie zal moeten worden ingezet om deze stoffen weer te verwijderen. Daarnaast zal de situatie gecompliceerder worden door toename van de kennis over negatieve effecten van de aanwezigheid van verontreinigingen, verbeterde analysemogelijkheden verminderde acceptatie van gezondheidsrisico's. Dit leidt tot strengere eisen voor de zuivering. Nieuwe technologie, zoals membranen en UV-oxidatie, zullen leiden tot een hoger energieverbruik voor drink- en afvalwaterzuivering, en weer een bijdrage leveren aan een toename van de milieubelasting. Technologie als UV-oxidatie (Tuhkanen, 2004) of membraanfiltratie (Fritzmann et al., 2007) hebben een hoog energieverbruik: 0,5-2 kWh/m<sup>3</sup> of 5-10 W/cap. In veel gevallen betekent de inzet van deze technologie een verdubbeling van het energieverbruik van de zuivering. Daarnaast zijn er vaak ongewenste neveneffecten, zoals de vorming van bijproducten. Ook het lozen van membraanconcentraat kan tot problemen leiden. Het is duidelijk dat deze technologie, hoewel ze een excellente waterkwaliteit leveren, op lange termijn duurzame oplossingen in de weg kunnen staan.

Door toepassing van een integrale benadering kan emissie van verontreinigingen naar de watercyclus worden voorkomen. Voor veel componenten zoals hormonen en geneesmiddelen, is een aanpak aan de bron – in huis, bij zorginstellingen, bij kantoorgebouwen – dan noodzakelijk. Hiervoor is robuuste, simpele en effectieve technologie met lage kosten gewenst, bij voorkeur aangedreven met 'overtollige' energie in het gebouw. Desondanks zullen diffuse emissies en calamiteiten optreden. Hiervoor is een strategisch management van bronnen en end-of-pipe behandeling nodig. Moderne adsorptietechnieken, gebaseerd

op (reactieve) adsorbents en vloeistof-vloeistof extracties, kunnen een effectieve oplossing bieden.

Nederland heeft een relatief stabiel bevolkingsaantal van ongeveer 17 miljoen en ruim 7 miljoen huishoudens (gemiddeld 2,3 personen per huishouden). De totale drinkwaterproductie in 2007 bedroeg 1.150 miljoen m<sup>3</sup>, waarvan 789 miljoen m<sup>3</sup> is gebruikt voor huishoudelijke toepassingen. Daarmee komt het hoofdelijk verbruik uit op 134 l/cap.d (Geudens, 2007). De overige 30% is voornamelijk afgenomen door industriële gebruikers. In 2006 bedroeg het totale energieverbruik van de drinkwatervoorziening, inclusief winning, zuivering en distributie 0,47 kWh/m<sup>3</sup>, waarvan 0,16 kWh/m<sup>3</sup> duurzaam was opgewekt (Geudens and Beek, 2007). Omgerekend per persoon betekent dat dus een afgenomen vermogen van 2,6 W.

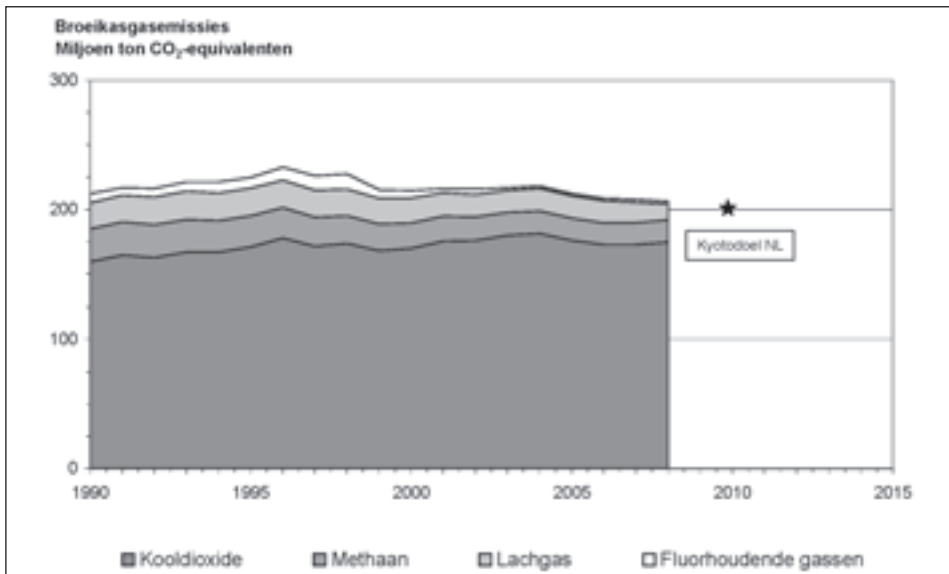
*Tabel 1: De Global Warming Potential (in ton CO<sub>2</sub>-equivalenten) van de Nederlandse watercyclus (Frijns et al., 2008).*

	Drinkwater	Riolering	Afvalwater	Totaal
Energie gerelateerde emissies	335.533	120.300	475.110	930.943 56%
Directe emissies (CH <sub>4</sub> ,N <sub>2</sub> O)	47.915	3.320	559.110	610.345 36%
Indirecte emissies	53.427	0	80.088	133.515 8%
Totaal	436.875 26%	123.620 7%	1.114.308 67%	1.674.803

Tabel 1 geeft een overzicht van de klimaatvoetafdruk van de Nederlandse watercyclus. Uit deze tabel valt af te leiden dat directe emissies (voornamelijk methaan en lachgas) een belangrijke bijdrage leveren aan de voetafdruk (33%). Energiegerelateerde emissies hebben een nog groter aandeel met 56%.

De totale emissie van broeikasgassen in Nederland is weergegeven in figuur 1. De gegevens in deze figuur tonen aan dat Nederland niet ver verwijderd is van het Kyotodoel, dat voor 2010 gesteld is. De Nederlandse watersector is met zijn 1,7 miljoen ton CO<sub>2</sub>-equivalenten maar een heel kleine speler, maar een substantiële verlaging zou ertoe kunnen leiden dat het Kyotodoel bereikt wordt.

Het huishoudelijk drinkwaterverbruik van 789 miljoen m<sup>3</sup>/j zal ongeveer een even grote stroom huishoudelijk afvalwater opleveren. Naast het huishoudelijk afvalwater, komt ook industrieel afvalwater en regenwater in het riool terecht. Daarnaast dringt vaak een substantiële hoeveelheid grondwater in het riool binnen. Het volume aan rioolwater dat daarmee behandeld moet worden komt op 2.069 miljoen m<sup>3</sup>/j (24,5 miljoen IE). Het totale energieverbruik van alle rioolwaterzuiveringen in Nederland is samengevat in tabel 2. In 2007 bedroeg dat 5490 TJ. Ongeveer 33% hiervan wordt op de zuiveringen zelf opgewekt uit het geproduceerde biogas. Het energieverbruik van rioolwaterzuiveringen bedraagt daarmee in totaal 7 W/IE of 4,6 W/IE extern aangevoerde energie.

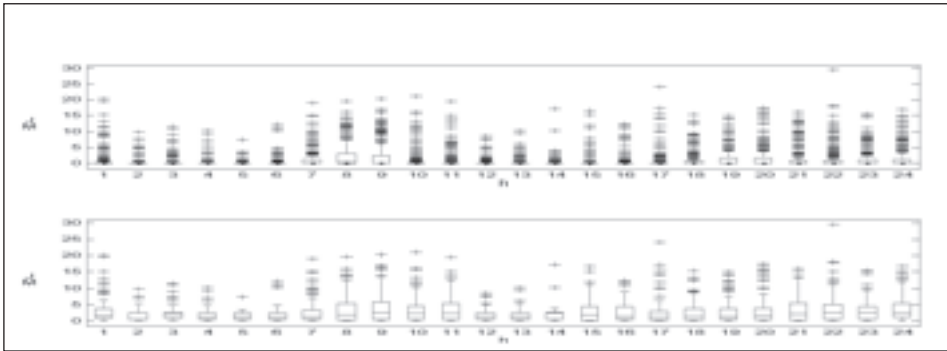


Figuur 1: Emissie van broeikasgassen in Nederland (PBL, 2009).

Tabel 2: Energiegebruik ruzi's in 2007 (CBS, 2009)

Energie	Gebruik (TJ/y)
Elektrisch	2606
Aardgas: 29,574 m <sup>3</sup> , $\Delta H_c = -32$ MJ/Nm <sup>3</sup>	946
Biogas: 73,527 m <sup>3</sup> , $\Delta H_c = -25$ MJ/Nm <sup>3</sup>	1838
<b>Totaal</b>	<b>5390</b>
356 WWTP; 24.462.000 IE	7 W/IE

Een groot deel van het drinkwater in huis wordt verwarmd tot comfortabele temperaturen of zelfs hoger, voor reinigingsdoeleinden. In Nederland wordt ongeveer 54% van het huishoudelijk verbruik verwarmd (Geudens, 2007). Het resultaat hiervan is dat de 24-uurs gemiddelde temperatuur van het afvalwater dat een huis verlaat 27°C bedraagt terwijl het met gemiddeld 10°C wordt aangeleverd. De actuele temperatuur van het afvalwater per huis kent natuurlijk sterke variaties en kortstondige pieken, gerelateerd aan het gebruik. Figuur 2 toont de gesimuleerde warmte-inhoud van het afvalwater, afkomstig van huishoudelijk gebruik. In de simulatie zijn 300 stochastisch bepaalde drinkwaterafnamepatronen gebruikt. Op basis van het gebruik – bad, vaatwasser, wasmachine – is de temperatuur bepaald waarmee het water het huis verlaat. Op deze wijze kan het warmteverlies via het rioolwater worden berekend: deze bedraagt 110 W/cap of 7,7 TJ/jaar per huis. Voor een gemiddelde woning is dit ongeveer 40% van het totale warmteverlies. De overige warmte gaat verloren via muren, ramen, dak (10 MJ/m<sup>2</sup>.j) en de schoorsteen.



*Figuur 2: Warmteinhoud van 300 stochastisch bepaalde drinkwaterafnamepatronen in gemiddelde huishoudens. Referentietemperatuur = 10°C, Nul-waarden zijn niet weergegeven in de grafiek (Blokker, 2009).*

Dit betekent dus dat het energieverlies via het riool ongeveer 10 keer hoger is dan de energie nodig om drinkwater te produceren en distribueren en het afvalwater weer te zuiveren. Het besparen van 6% op het warmwaterverbruik of het terugwinnen van 10% van de warmte uit het rioolwater zal evenveel energie opleveren dan de drinkwater- en afvalwaterzuivering samen kost. Besparing van warm water en/of gebruik maken van zonneboilers is dus veel effectiever voor het creëren van een duurzame watercyclus dan het optimaliseren van de zuivering.

### **Afvalwater als energiedrager**

Omdat water een relatief hoge warmte-inhoud heeft, kan het gebruikt worden voor energietransport en -opslag. Het integreren van water- en energiebalansen op gebouwniveau kan tot aanzienlijke energiebesparingen leiden, broeikasgasemissies reduceren en een goede bijdrage leveren aan het beheersen van het binnenklimaat. Technologie waarmee warmte kan worden teruggewonnen uit afvalwater (bijvoorbeeld douchewarmtewisselaars) of uit het gebouw, in combinatie met ondergrondse warmte-koude opslag (WKO) systemen worden steeds meer toegepast. Met name voor nieuwe gebouwen of woonwijken kan het effectief zijn om deze systemen te implementeren.

### **Nuttig gebruik van afvalwater**

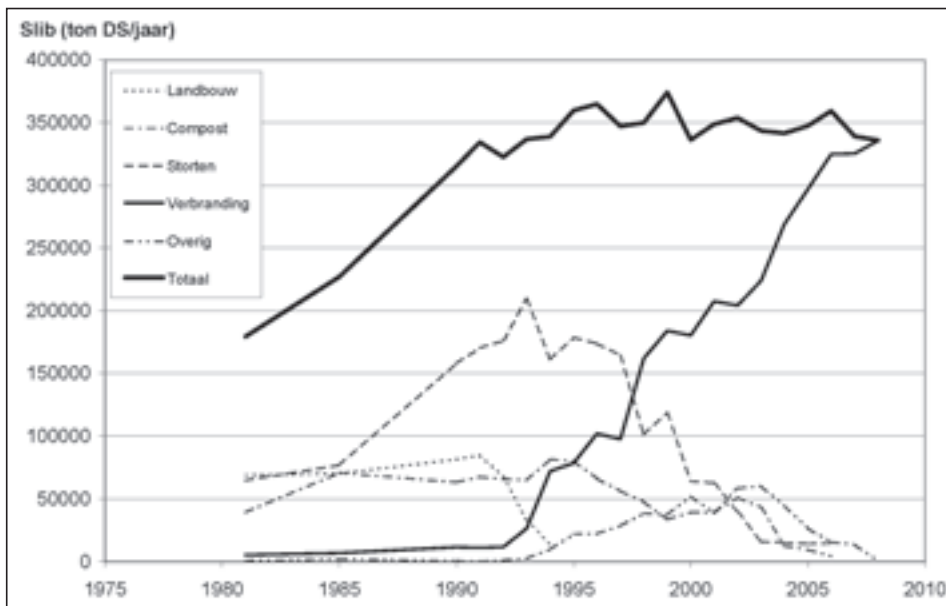
Naast warmte bevat huishoudelijk afvalwater een grote vracht aan organische stof, in het algemeen uitgedrukt als CZV (chemisch zuurstof verbruik). Daarnaast bevat afvalwater natuurlijk veel nutriënten zoals stikstof en fosfor.

De totale vracht aan organische stof bedroeg in Nederland in 2007 ongeveer 942.000 ton CZV. Als we aannemen dat de organische stof is opgebouwd uit glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ), dan komt de organische vracht overeen met  $4,9 \cdot 10^9$  mol glucose per jaar. Uitgaande van een verbrandingsenthalpie van 2808 kJ/mol voor glucose, levert de totale vracht CZV in potentie 13.800 TJ per jaar aan energie of 18 W/IE op. Theoretisch kan deze energie worden teruggewonnen. Aangezien de levering van drinkwater en zuivering van afvalwater samen zo'n 10 W/IE kost, is het mogelijk om op basis van de aanwezige organische stof een energieneutrale waterketen te realiseren.

De beste optie voor energieproductie uit afvalwater zijn biogasproductie of het verbranden van (gedroogd) slib. Volgens Wiegant et al. (2005) is de beste optie (hoogste energie-efficiënte) voor energiewinning uit afvalwater het toepassen van een voorbezinker zonder vergisting, chemische fosfaatverwijdering met aluminium, indirect thermisch drogen en het slib verbranden in een cementoven. In Nederland wordt bijna alle slib verwerkt door verbranding (inclusief cementovens en energiecentrales). Figuur 3 laat de ontwikkeling van de slibeindverwerking in Nederland zien.

Tabel 3: Opties voor energierugwinning uit afvalwater

Technologie	Opmerking
Microbiële brandstofcellen	Limitering van stofoverdracht bij de elektroden geeft lage stroomdichtheid (4 W/m <sup>2</sup> elektrodeoppervlak) (Du et al., 2007); Hoge kosten
Donkere vergisting tot waterstof	Maximaal slechts 30% van de aanwezige organische stof wordt benut
Directe vergisting van rioolwater	Concentratie organische stof is te laag, waardoor de gevormde methaan in oplossing blijft
Slibvergisting	Verzamelen van slib kost energie, maar de gevormde methaan kan worden toegepast (bewezen technologie op rwzi's).
Drogen en verbranden van slib inclusief fosforterugwinning	Kost energie om slib te verzamelen en te drogen. Aluminium nodig voor chemische fosfaatbinding



Figuur 3: Eindbestemming van rwzi slib in Nederland (CBS, 2010).

Ook nutriënten vertegenwoordigen een energie-inhoud in het afvalwater. Efficiënt terugwinnen van nutriënten kan namelijk besparen op de energie voor de productie van kunstmest. Voor de productie van kunstmest kunnen de volgende kentallen worden gehanteerd: 45 MJ/kg N voor stikstofhoudende meststof en 29 MJ/kg P voor fosfaatmeststof. Hergebruik van nutriënten uit afvalwater vertegenwoordigt daarom een energie-inhoud van 3140 TJ/j of 6,1 W/cap voor stikstof en 370 TJ/j of 0,7 W/cap voor fosfor.

## CONCLUSIE

De klimaat- en energievoetafdruk van de watercyclus zijn niet erg groot. Door besparingen in de watercyclus in Nederland ligt het Kyoto-doel voor Nederland in 2010 binnen handbereik. De watersector heeft dit inmiddels ook erkend, hetgeen geleid heeft tot het ondertekenen van het Klimaataccoord door de Unie van Waterschappen en de Nederlandse overheid, waarin is vastgelegd dat de Waterschappen het aandeel zelfopgewekte energie gaan vergroten tot 40% in 2020.

Er zijn verschillende methoden om een energieneutrale watercyclus te realiseren: terugwinnen van warmte uit rioolwater en gebruik maken van de vracht aan organische stof in het afvalwater liggen zijn daarbij de belangrijkste uitgangspunten. Onder de huidige omstandigheden is een energieneutrale levering van drinkwater en zuivering van afvalwater mogelijk. De kunst is om ook in de toekomst, wanneer nog strengere waterkwaliteitseisen nopen tot extra zuiveringsstappen, dat te blijven doen. Voorkomen van verontreiniging, verwijdering aan de bron en ontwikkeling en toepassing van nieuwe energiezuinige zuiveringstechnieken met een hoge specifieke selectiviteit voor aanwezige verontreinigingen zijn daarbij van groot belang.

*Jan Hofman, Roberta Hofman-Caris, Maarten Nederlof en Jos Frijns,  
KWR Watercycle Research Institute  
Mark van Loosdrecht,  
KWR en Technische Universiteit Delft*