



Alles is Water

Prof. dr. ir. A. Bert van der Wal

Inaugurele rede bij de aanvaarding van het ambt van
buitengewoon hoogleraar in Electrochemical Water Treatment
aan Wageningen University op 4 april 2013



WAGENINGEN UNIVERSITY
WAGENINGEN **UR**

Alles is water

Prof. dr. ir. A. (Bert) van der Wal

Inaugurele rede bij de aanvaarding van het ambt van
buitengewoon hoogleraar in Electrochemical Water Treatment
aan Wageningen University op 4 april 2013



WAGENINGEN UNIVERSITY
WAGENINGEN UR

ISBN 978-94-6173-600-0

Alles is water

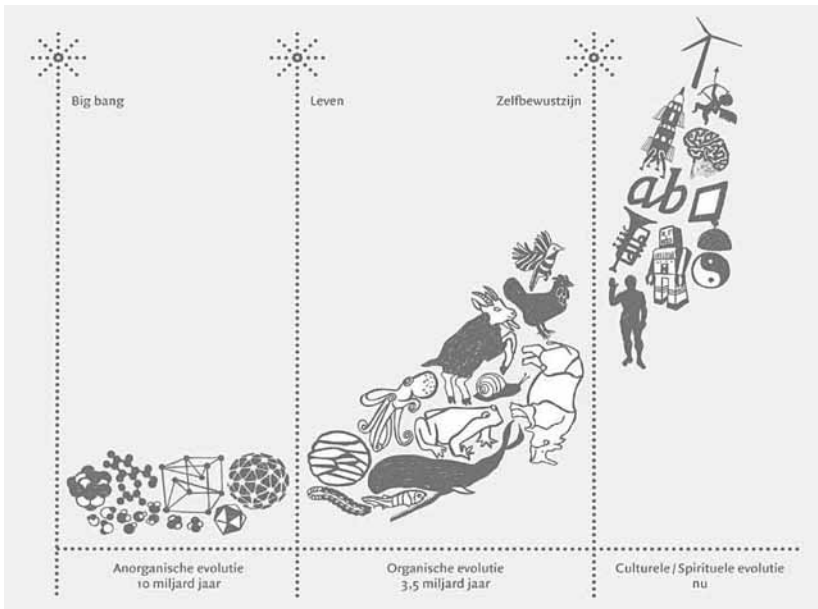
Mijnheer de Rector Magnificus, waarde collega's, beste familie, vrienden, studenten, dames en heren,

Inleiding

Water is zo alledaags, zo vertrouwd en gewoon, dat we er nauwelijks bij stilstaan. Toch gaat mijn rede vandaag over water. Alles wat leeft op aarde is van water afhankelijk, zo sterk zelfs dat zonder dat water leven niet mogelijk is. We denken er nauwelijks bij na totdat er een tekort ontstaat en dan worden we ons er weer van bewust hoe afhankelijk we van water zijn. Een mens kan gemiddeld drie dagen zonder water, een kameel in de woestijn circa acht tot tien dagen, een Afrikaanse longvis lukt het om twee jaar zonder water te overleven, maar die longvis is dan ook een speciaal geval. Niet alleen mensen en dieren, maar ook planten, en zelfs bacteriën en virussen, zijn van water afhankelijk. Uiteindelijk kan geen enkel schepsel overleven zonder water.

Dat water cruciaal is voor leven, is zo sterk in ons bewustzijn gegrift, dat we ons zelfs niet kunnen voorstellen hoe leven zonder water eruit zou kunnen zien. De mens is altijd gefascineerd geweest door de vraag of het leven op aarde uniek en eenmalig is of dat er nog andere plaatsen in het universum zijn waar leven voorkomt. Of het nu gaat om een planeet in ons eigen zonnestelsel of om een verre planeet, die miljoenen lichtjaren van de aarde verwijderd is, bij elke zoektocht naar buitenaards leven wordt altijd allereerst de vraag gesteld of er op de betreffende plaats water kan voorkomen.

Bijgaand figuur 1 komt uit het boek van een bevriende waterspecialist, Allerd Stikker, en geeft een overzicht van de verschillende evolutiefasen in de schepping. Het molecuul water is al vrij vroeg na de oerknal, als een van de eerste moleculen in het heelal, ontstaan, ongeveer 12 miljard jaar geleden, lang voordat er ook maar sprake was van enige vorm van leven. Water ontstaat als je waterstofgas en zuurstofgas samenbrengt in een verhouding van twee staat tot één, waarbij er dan bij de juiste druk en temperatuur watermoleculen worden gevormd. Hetzelfde water dat we hier op aarde kennen, komt dan ook overal in het heelal voor. Het is niet bekend waarom er juist op aarde zoveel water voorkomt, maar algemeen wordt aangenomen dat het meeste water via asteroïden hier terecht is gekomen, hoewel recent onderzoek aannemelijk heeft gemaakt dat kometen ook een belangrijke rol hebben gespeeld.



Figuur 1. Allerd Stikker, *En de mens speelt met de tijd. Drie vensters op de eeuwigheid*, Amsterdam: Wereldbibliotheek 2012. Illustratie Rosa Vitalie.

Bijna alle grote beschavingen zijn rondom water ontstaan, waarbij het water niet alleen noodzakelijk was voor consumptie, maar ook voor de ontwikkeling van de landbouw. Tegelijkertijd was het water vaak ook cruciaal voor het ontstaan van handel, transport en zelfs voor de verdediging van belangrijke steden. De ontwikkeling van grote beschavingen hing in belangrijke mate af van de vooruitgang die ze konden boeken op het gebied van watertechnologie en watermanagement.

Zo was de Egyptische beschaving ontstaan rondom de rivier de Nijl, en die rivier speelde dan ook een belangrijke rol in het dagelijkse leven van alle Egyptenaren; zonder de Nijl had het Egyptische rijk nooit kunnen ontstaan. Ook in de Romeinse cultuur speelde water, en daaraan gekoppeld een goede sanitatie, een voorname rol. Algemeen bekend zijn de publieke badruimtes, de fonteintjes en de vele aquaducten die gebouwd werden om de watertoevoer veilig te stellen. Ook hadden de Romeinen vaak een ingenieus rioleringsysteem voor de afvoer van afvalwater.

Niet alleen de beschavingen in Azië en Europa, maar ook de Indiaanse beschavingen in Midden- en Zuid-Amerika konden alleen tot bloei komen als ze de watertoevoer goed hadden geregeld; dat gold zowel voor de Maya's, de Inca's als de Azteken. Zo

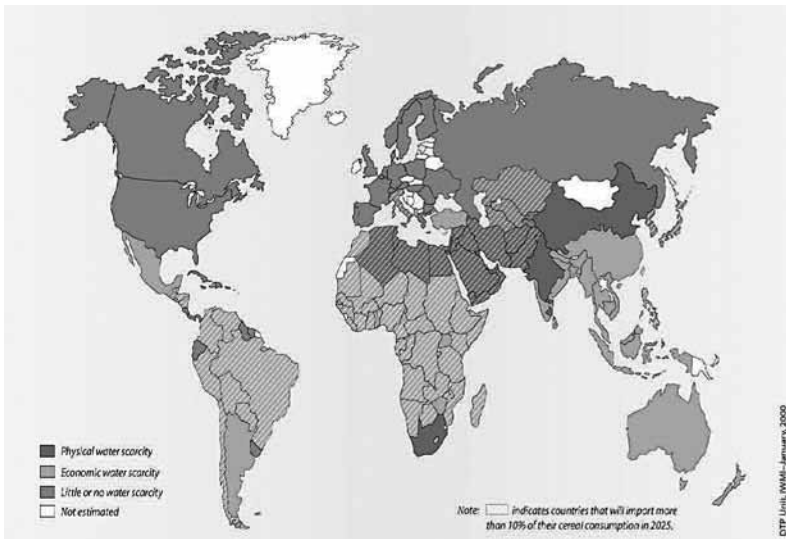
had de Maya-stad Tikal, in het huidige Guatemala, in 700 na Christus zo'n 60-80 duizend inwoners. Om deze bloeiende stad van water te voorzien, hadden de Maya's een dam gebouwd van bijna honderd meter lang en tien meter hoog, waarbij een reservoir ontstond van zo'n 100 miljoen liter water. In de 9^e eeuw ontstonden er door klimaatverandering lange perioden van droogte waardoor de watervoorziening onder druk kwam te staan en de stad uiteindelijk geheel werd verlaten.

Water en religie

Water is zo met het alledaagse leven van mensen verweven, dat het vaak ook een belangrijke rol speelt in diverse religies, in allerlei rituelen van wat voor aard dan ook, in de wijsbegeerte en ook in de kunst. Daarbij staat het water vaak symbool voor reiniging en zuivering. Algemeen bekend is de doop in de christelijke godsdienst, die een teken is van de afwassing van zonde en kwaad. Het hindoeïsme kent het rituele wassen in de Ganges in de heilige stad Varanasi en ook de Inca's kenden rituele reinigingen. Het water is kennelijk niet alleen nodig om te overleven, het speelt ook een belangrijke rol in de cultuur en alledaagse beleving van mensen. Zowel de Griekse filosofie alsook de Indiase en Chinese godsdienstige tradities en wijsgerige wereldbeschouwingen zagen water als één van de basiselementen waaruit alles wat bestaat is opgebouwd.

Het belang van water in onze tijd

In de laatste 50 jaar is de wereldbevolking meer dan verdubbeld, van circa 3 miljard mensen in 1960, naar 7 miljard in 2011; dat laatste gebeurde om precies te zijn op 31 oktober 2011, althans volgens de statistieken van de Verenigde Naties. De verwachting is dat de komende 40 jaar de wereldbevolking nog verder zal toenemen naar meer dan 9 miljard. Tegelijk met de toename van de wereldbevolking is de waterconsumptie per hoofd van de bevolking in de afgelopen honderd jaar zelfs meer dan verdubbeld. Als beide trends doorzetten zal de totale waterbehoefte de komende veertig jaar met nog eens een factor anderhalf tot twee toenemen. Hierbij moet bedacht worden dat nu al op veel plaatsen in de wereld de zoetwatervoorraden uitgeput raken door overexploitatie, dat het grondwaterpeil steeds verder daalt, en dat als gevolg daarvan het water in de kustgebieden steeds meer verzilt vanwege het binnendringen van zout zeewater. Er zal dus de komende decennia een sterk toenemende behoefte zijn aan zoet water, terwijl tegelijkertijd zowel de kwaliteit als de beschikbaarheid van het water verder zullen afnemen. Een belangrijke vraag is dan ook, waar al die mensen straks hun zoet water vandaan moeten halen om in hun dagelijkse behoeften te voorzien.



Figuur 2. Verwachte waterschaarste in 2025, International Water Management Institute

Volgens het *International Water Management Institute (IWMI)* leeft nu al wereldwijd een op de drie mensen in gebieden waar de watervoorraden schaars zijn of waar waterzuiveringstechnologieën en de infrastructuur om water van goede kwaliteit te kunnen produceren, ontbreken. De vooruitzichten zijn dan ook niet rooskleurig. In 2025 zullen zo'n 2,5 miljard mensen te maken krijgen met ernstige watertekorten, terwijl nog eens zo'n 2,5 miljard mensen in gebieden zullen leven waar onvoldoende zoet water is om in al hun behoeften te voorzien (zie ook figuur 2).

Er zal daarom niets anders opzitten dan alternatieve waterbronnen aan te boren, zoals het soms moeilijk bereikbare brakke grondwater of het zoute zeewater. En daarnaast zullen we veel efficiënter moeten omgaan met bestaande watervoorraden. Waterhergebruik zal de norm moeten worden in plaats van de uitzondering. Momenteel wordt industrieel en huishoudelijk afvalwater, meestal na eenmalig gebruik, op het oppervlaktewater geloosd. Maar het afvalwater kan, na een gehele of gedeeltelijke zuivering, ook voor andere doeleinden hergebruikt worden, in landbouw, recreatie, industrie, of zelfs voor dierlijke en menselijke consumptie. Dit concept, *Water Fit for Use*, vereist niet alleen nieuwe, innovatieve waterzuiveringstechnologieën, maar ook een heel andere manier van denken, waarbij water wordt gezien als een waardevol product dat je meermalen voor verschillende doeleinden kunt gebruiken in plaats van een artikel dat je na eenmalig gebruik wegwerpt.

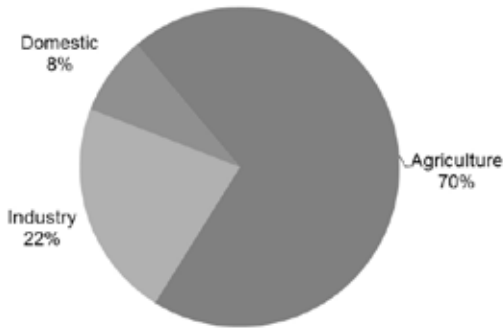
Als je vanuit de ruimte naar de aarde kijkt dan is het eigenlijk verbazend dat er een waterprobleem is: zo'n 71% van het aardoppervlak is bedekt met water. Het probleem is echter dat het overgrote deel, namelijk zo'n 96%, zeewater is en niet direct gebruikt kan worden, in ieder geval niet voor consumptie. Van de resterende 4% is ongeveer de helft opgeslagen in ijskappen en gletsjers, waardoor het niet beschikbaar is op de plaatsen waar de behoefte eraan het grootst is, namelijk in de dichtbevolkte gebieden van Zuidoost-Azië, en de andere helft is grondwater, soms zoet, heel vaak ook brak. Slechts een heel klein gedeelte, minder dan 0.1% komt voor in rivieren en meren en in de atmosfeer en dat is onvoldoende om in de menselijke behoefte te voorzien. Bovendien is veel oppervlaktewater vervuild, waardoor dit water niet direct gebruikt kan worden voor consumptie. Als je al het water op aarde in een literfles zou kunnen gieten, dan zou de hoeveelheid water die mensen kunnen drinken slechts een half theelepeltje zijn. De rest van het water is te brak, te vies, te onbereikbaar of het is volstrekt ondrinkbaar, zoals zeewater.

Niet alleen in Nederland, maar ook internationaal worden de mensen zich er steeds meer van bewust dat er iets met de zoetwatervoorraden aan de hand is. Ook in Europa realiseert men zich dat de aanvulling van de zoetwatervoorraden door regenwater begrensd is en dat een duurzaam waterbeleid vereist is om aan de toenemende vraag naar zoet water te kunnen voldoen. Zo heeft de Europese Unie (EU) in het jaar 2000 met de *European Water Framework Directive* zijn meest strenge regelgeving op het gebied van water aangenomen, waarbij lidstaten verplicht zijn om per 2015 aan te tonen dat zij een goed waterkwaliteitsbeleid voeren.

De beschikbaarheid van water is ook een belangrijk punt van zorg voor de Verenigde Naties, omdat water van goede kwaliteit cruciaal is, niet alleen voor een gezonde bevolking maar ook voor een duurzame economische ontwikkeling. Volgens de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) sterven er jaarlijks circa 1,6 miljoen mensen door het drinken van besmet water, voor het overgrote deel kinderen. De periode 2005-2015 is daarom door de Verenigde Naties uitgeroepen als het *Water for Life*-decennium waarvan de vier belangrijkste doelstellingen zijn (i) om het aantal mensen dat geen toegang heeft tot veilig drinkwater te halveren, (ii) om niet-duurzame exploitatie van waterbronnen te stoppen, (iii) om een integraal waterbeheer na te streven, (iv) om het aantal mensen dat geen toegang heeft tot een vorm van basis-sanitatie te halveren.

Watergebruikers en waterhergebruik

Wereldwijd is de landbouw een van de grootste gebruikers van zoet water: circa 70% van de zoetwatervoorraden wordt aangewend voor irrigatiedoeleinden. Verder wordt circa 22% gebruikt voor industriële processen, terwijl zo'n 8% bestemd is voor



Figuur 3. Gebruik van de zoetwatervoorraden voor verschillende doeleinden

menselijke consumptie (zie figuur 3). In de praktijk wordt vaak veel water verkwest, bijvoorbeeld door ondoelmatige irrigatiemethoden, verouderde infrastructuur voor de waterdistributie en inefficiënte zuiveringstechnologieën.

Voor de landbouw kan huishoudelijk en industrieel afvalwater uitstekend geschikt gemaakt worden, als de hoeveelheid zout in het gezuiverde water maar laag genoeg is, omdat er anders verzilting van de grond optreedt, met afnemende oogsten tot gevolg.

Om afvalwater voor industriële toepassingen of menselijke consumptie geschikt te maken, zijn veel meer zuiveringsstappen nodig. Zo moet in de voedingsindustrie het productiewater aan strenge kwaliteitseisen voldoen, opdat het voedsel veilig en gezond is en bovendien goed smaakt. Te denken valt hierbij aan verwijdering van organische stoffen, zouten, mineralen, micro-organismen, gifstoffen en microverontreinigingen, zoals hormonen en medicijnresten.

Volledig waterhergebruik is met bestaande technologieën vaak niet mogelijk omdat die te duur en te inefficiënt zijn. Zo bedraagt de wateropbrengst bij bestaande ontzoutings-technologieën vaak niet meer dan circa 50 à 60%, waardoor er relatief grote afvalstromen ontstaan. Door een combinatie van goed watermanagement en de ontwikkeling van nieuwe waterbesparende zuiveringstechnologieën, kan veel meer van het beschikbare water ook daadwerkelijk worden benut. Elektrochemische waterbehandelingsmethoden kunnen bij het oplossen van deze problemen een belangrijke rol spelen, zodat een volledig gesloten waterkringloop mogelijk wordt gemaakt.

Mijn belangstelling voor water

Mijn belangstelling voor water is ontstaan tijdens mijn carrière bij Unilever Research & Development eind jaren negentig, omdat zowel bij wasmiddelen als bij producten voor persoonlijke verzorging water een belangrijke rol speelt. Zo wordt in Europa

circa 10% van het huishoudelijk water gebruikt voor het wassen van kleding, en in een land als India ligt dat getal nog veel hoger, tot wel 40%. Het betreft dan water dat in principe bedoeld is als drinkwater, maar na eenmalig gebruik gewoon wordt geloosd. Als je in Nederland bent opgegroeid dan vind je het heel gewoon dat er stromend water uit de kraan komt, en ook dat dat water van zo'n goede kwaliteit is, dat je het zelfs gewoon kunt drinken. Echter, tijdens mijn bezoeken bij consumenten thuis in India, en later ook in andere landen, werd ik mij er steeds meer van bewust dat drinkwater van goede kwaliteit voor veel mensen op deze wereld helemaal niet zo vanzelfsprekend is, zeker niet in Azië. Bovendien heb je in veel grote steden in India, zoals Mumbai en Chennai, alleen slechts enkele uren per dag water. Dat was voor mij dan ook een sterke stimulans om me te verdiepen in waterbesparingstechnologieën en hergebruik van water om te voorkomen dat je het vroegtijdig als afvalwater loost.

Ik ben mij toen gaan richten op elektrochemische technologieën om water te behandelen. Nu is elektrochemie niet bepaald een vakgebied dat zijn imago mee heeft. Veel mensen, en wie weet rekent u zich daartoe, vinden het zelfs lastig om zich er een voorstelling van te maken en misschien is dat ook mede de reden geweest dat deze buitengewone leerstoel is ingesteld en dat ik nu het eveneens buitengewone voorrecht heb om hier voor u te staan.

In de elektrochemie is altijd sprake van een elektrisch circuit met twee ladingsstromen, een elektrische en een chemische. De elektrische stroom wordt gevormd door de beweging van elektronen, en de stroom van geladen chemische deeltjes wordt gevormd door ionen die zich in een al dan niet waterige oplossing bevinden. Ergens moet de elektrische lading overgedragen worden op de chemische lading. In de praktijk gebeurt dat vaak aan een grensvlak, bijvoorbeeld het oppervlak van een elektrode. De overdracht gaat meestal gepaard met een redoxreactie, maar dat hoeft niet. Het is namelijk ook mogelijk om de beide ladingsstromen – de elektrische en de chemische – zodanig te laten optreden dat er uitsluitend een gescheiden ladingsopbouw aan het grensvlak plaatsvindt. Hoe dit kan zal ik straks in meer detail uitleggen.

Elektrochemische waterbehandeling

Elektrochemische zuiveringstechnologieën worden al enige tijd toegepast: je kunt met een elektrochemische cel bijvoorbeeld water desinfecteren. Dit is gebaseerd op de methode waarbij twee elektroden worden geplaatst in water waarin een beetje zout is opgelost. Vervolgens wordt daar een elektrische stroom doorheen geleid waardoor hyperchloriet, oftewel chloorbleek, wordt gevormd. Dat is bekende technologie, die ook vaak op scheikundepractica wordt gedemonstreerd. Wat echter ook kan, iets wat veel minder bekend is, is dat je water elektrochemisch kunt ontzouten.

Elektrochemische ontzoutingstechnologieën hebben een aantal duidelijke voordelen boven bestaande ontzoutingstechnologieën, zoals omgekeerde osmose. Ze kunnen namelijk op kleine schaal efficiënt opereren, ze kunnen decentraal, dus op locatie worden toegepast, en ze behoeven niet continu te functioneren, maar ze kunnen worden in- of uitgeschakeld naar behoefte.

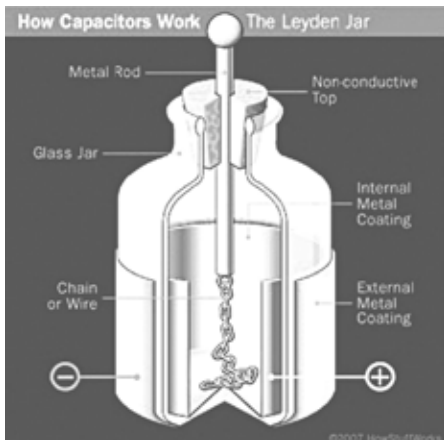
Kleinschaligheid en decentrale toepassing zijn nauw met elkaar verbonden en ze zijn belangrijk omdat ze grote investeringen in centrale infrastructuur en operationele expertise overbodig maken. Bij kleinschalige en decentrale waterzuivering kan bijvoorbeeld gedacht worden aan lokale waterontharding voor huishoudens, plaatselijke waterontzouting voor koeltorens of tuinbouwkassen, of aan de drinkwaterproductie in een afgelegen dorp in Bangladesh. Toepassing van elektrochemische zuiveringsmethoden kunnen ervoor zorgen dat er hoge wateropbrengsten worden behaald, dat de afvalwaterstromen drastisch kleiner worden en dat dus de algehele waterverkwisting afneemt. Ik ben er dan ook van overtuigd dat nieuwe, innovatieve elektrochemische technologieën een belangrijke bijdrage zullen leveren aan de oplossing van het mondiale waterprobleem.

Wat is een condensator

De meesten van u weten wat een condensator is. Condensatoren worden algemeen gebruikt, soms eenvoudigweg om er elektrische lading in op te slaan, maar ook om fluctuaties in voltages op te vangen of om een gelijkstroom niet door te laten en een wisselstroom wel. In elk elektronisch circuit zit wel ergens een condensator. Een condensator heeft eigenschappen die vergelijkbaar zijn met een batterij, omdat je elektrische energie in kunt opslaan, maar de manier waarop hij werkt is wel heel anders.

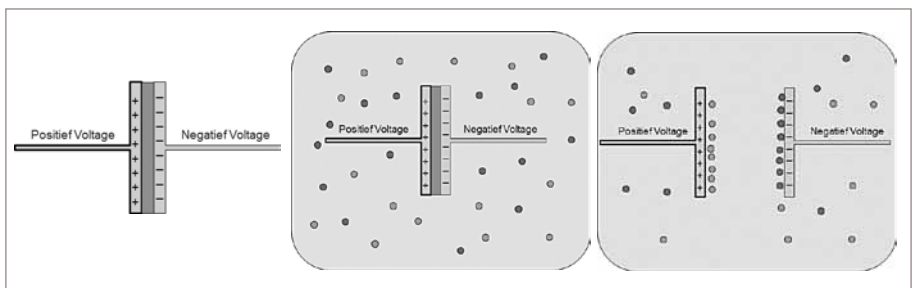
Een condensator bestaat normaalgesproken uit twee parallelle elektrisch geleidende platen, die van elkaar zijn gescheiden door een niet-geleidend materiaal, ook wel diëlektrisch medium genoemd. Dat niet-geleidend materiaal kan bijvoorbeeld glas zijn of keramiek of teflon of zelfs gewoon lucht. De condensator werd in 1746 uitgevonden door de Nederlander Pieter van Musschenbroek (1692-1761), die hoogleraar was aan de universiteit van Leiden. Deze condensator stond wereldwijd bekend onder de naam Leidse fles. Een voorbeeld van de Leidse fles ziet u in figuur 4, waarin zowel op de binnenkant als op de buitenkant van de fles een metalen coating zit. In die metalen coating wordt de elektrische lading opgeslagen, en in dit geval is glas het diëlektrische medium.

In een condensator wordt de lading van de ene plaat volledig gecompenseerd door de lading op de andere plaat, zodat de totale lading nul is. Maar als je nu een condensator in water brengt waarin wat zout zit opgelost, en vervolgens maak je de afstand



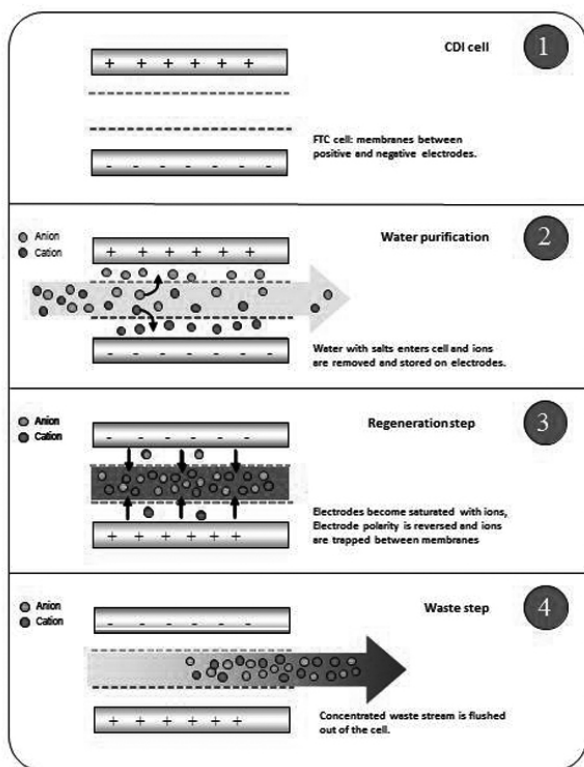
Figuur 4. Voorbeeld van de Leidse fles

tussen de platen steeds een beetje groter, dan wordt op een gegeven moment de lading op de ene plaat niet meer gecompenseerd door de lading op de andere plaat, maar door zoutionen die in de spleet gaan zitten tussen de twee platen (zie figuur 5). Feitelijk heb je nu twee condensatoren gekregen die in serie geplaatst zijn. Voor beide in serie geplaatste condensatoren geldt dat de ene helft van de condensator bestaat uit een geleidende plaat die in dit geval ook elektrisch geladen is en de andere helft uit een dunne waterlaag, waarin de tegengesteld geladen zoutionen diffuus verdeeld zitten. De geleidende plaat is nu feitelijk een elektrode geworden, waarbij tijdens het opladen de zoutionen worden opgeslagen aan het grensvlak. In de praktijk bestaat de geleidende plaat vaak uit poreus materiaal, zoals bijvoorbeeld actieve kool, wat een hoog specifiek oppervlak heeft van zo'n 1000 tot 2000 m² per gram. Op deze manier heb je een elektrochemische condensator gemaakt die ook wel ultra- of supercondensator genoemd wordt. Dit type condensatoren wordt veel gebruikt als batterij in bijvoorbeeld uw mobiele telefoon of laptop.



Figuur 5. Elektrochemische condensator voor waterontzouting

Wat nieuw is, is dat je met zo'n condensator ook water kunt ontzouten. Dat kan door zout water tussen twee geleidende platen – die dus als elektrode functioneren – te laten stromen, waarover een klein potentiaalverschil staat, vaak niet meer dan 1 à 1,5 Volt. Als gevolg daarvan gaan de zoutionen in het water bewegen, de negatieve ionen gaan naar de positieve elektrode en worden daar opgeslagen, terwijl gelijktijdig de positieve ionen zich aan het grensvlak van de negatieve elektrode ophopen. Op zeker moment raken de elektroden verzadigd met zout en moeten ze worden geregenereerd. Dat kan door het opgelegde voltage flink te verlagen of door de polariteit zelfs om te draaien. De zoutionen komen dan vrij in de ruimte tussen de twee elektroden, waarna je ze met een beetje water kunt wegspoelen. Vervolgens kan het proces opnieuw beginnen. Dit principe wordt *capacitieve deïonisatie* genoemd, omdat je met hulp van een elektrochemische condensator (of *capacitor* in het engels) een zoute waterstroom kunt splitsen in twee waterstromen, namelijk een ontzoute stroom en een stroom waarin de zoutconcentratie is verhoogd. De stroom met verhoogde zoutconcentratie is normaalgesproken veel kleiner dan de ontzoute stroom.



Figuur 6. Waterontzouting m.b.v. capacitieve deïonisatie (CDI)

Membraantechnologie

Het blijkt dat je ontzouting op basis van capacitieve deïonisatie nog veel effectiever kunt maken door deze methode te combineren met membraantechnologie. Een membraan is een dun laagje materiaal dat bepaalde stoffen doorlaat en andere tegenhoudt. Er zijn specifieke membranen die alleen negatieve of alleen positieve ionen doorlaten. Deze ionselectieve membranen worden gelegd op de elektroden: het membraan dat alleen positieve ionen doorlaat wordt op de negatieve elektrode gelegd; het membraan dat alleen negatieve ionen doorlaat wordt op de positieve elektrode gelegd. Dit heeft tot gevolg dat tijdens het ontzoutingsproces alle positieve ionen naar de ene elektrode gaan en alle negatieve ionen naar de tegenoverliggende elektrode. Positieve en negatieve ionen worden dus volledig van elkaar gescheiden zodra er een potentiaalverschil wordt opgelegd. Een groot voordeel van deze ionselectieve membranen is dat er tijdens de ontzouting geen neerslagvorming (precipitatie) kan optreden. Een ander groot voordeel is dat tijdens de regeneratie van de elektroden de ionen niet naar de tegenoverliggende elektrode kunnen migreren, maar geconcentreerd worden in het stromingskanaal tussen de membranen. Hierdoor kunnen er significant hogere wateropbrengsten behaald worden. Het gehele proces wordt aanschouwelijk gemaakt in figuur 6.

Capacitieve deïonisatie in combinatie met membraantechnologie vormt de basis van de vernieuwende ontzoutingstechnologie waaraan ik de afgelopen tien jaar samen met mijn collega Hank Reinhoudt heb gewerkt. Dit werk zijn we begonnen bij Unilever Research & Development, wat heeft geleid tot de oprichting van de zelfstandige onderneming Voltea. In dezelfde periode heb ik ook intensief samengewerkt met Wageningen Universiteit en Wetsus, eerst in de personen Cees Buisman en Wim Rulkens en later ook met Huub Rijnaarts. In dit verband wil ik ook graag Maarten Biesheuvel noemen. Hij heeft er mede voor gezorgd dat in een relatief kort tijdsbestek we een veel beter inzicht hebben gekregen in de wetenschappelijke principes van deze technologie en dat Nederland nu internationaal beschouwd wordt als een toonaangevend land op dit gebied. Dat is een hele mooie prestatie. Ook Bart van Limpt en de AIO's Ran Zhao en Slawomir Porada hebben hieraan bijgedragen. De technologie wordt inmiddels ook al toegepast in twee andere AIO-projecten, zoals terugwinning van nutriënten uit urine, en de opwekking van duurzame energie door de menging van zoet en zout water, zoals plaatsvindt bij Wetsus in de groep van Bert Hamelers.

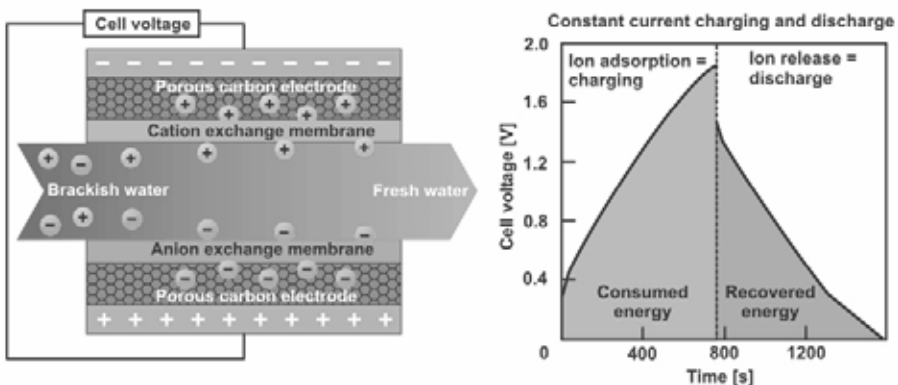
Capacitieve deïonisatie is een platformtechnologie. Dit wil zeggen dat één en hetzelfde technische principe kan leiden tot meerdere toepassingen. In mijn leeropdracht wil ik de komende jaren het principe van capacitieve deïonisatie in combinatie met ionselectieve membraantechnologie, wetenschappelijk onderzoeken en op basis

daarvan technologieën ontwikkelen voor de volgende aandachtsgebieden:
 1) energiezuinige ontzouting, 2) selectieve verwijdering van ionen, 3) terugwinning van waardevolle stoffen uit afvalstromen, en 4) mineraalwinning uit zeewater.
 Hierna ga ik nog kort op deze aandachtsgebieden in.

Energiezuinige ontzouting

In het eerste aandachtsgebied wil ik mij richten op energiezuinige ontzouting van water. Voor de ontzouting van water is altijd energie nodig, en de energiekosten vormen dan ook een belangrijke post in de totale waterproductiekosten; voor omgekeerde osmose is dit vaak meer dan 40%. Momenteel zijn alle beschikbare ontzoutingstechnologieën energetisch zeer onrendabel. In de praktijk wordt hooguit 2% van de vereiste energie daadwerkelijk benut voor ontzouting, terwijl 98% verdwijnt als warmte. Ter vergelijking, voor een auto geldt dat circa 15% van de brandstofenergie wordt omgezet in beweging. Er zal dus nog een behoorlijk grote stap gezet moeten worden om het rendement bij ontzouting te verhogen en dat zal een belangrijk aandachtsgebied zijn in de komende jaren.

Ook de ontzouting met capacitieve deïonisatie kost energie, maar in principe is de energie per volume-eenheid productiewater wel een stuk lager. Dat komt omdat het energetisch gunstiger is om de ionen uit het water te verwijderen in plaats van het water door een membraan te filteren, zoals dat gebeurt met omgekeerde osmose. Bovendien zijn ontzoutingsapparaten die gebaseerd zijn op capacitieve deïonisatie – zoals eerder opgemerkt – eigenlijk batterijen die worden opgeladen terwijl tegelijkertijd het water wordt ontzout. Recentelijk heeft Piotr Dlugolecki bij Voltea laten zien dat het in principe mogelijk is om ruim 80% van de energie die nodig is om zoutionen uit water te verwijderen, terug te winnen en opnieuw te gebruiken (zie figuur 7).

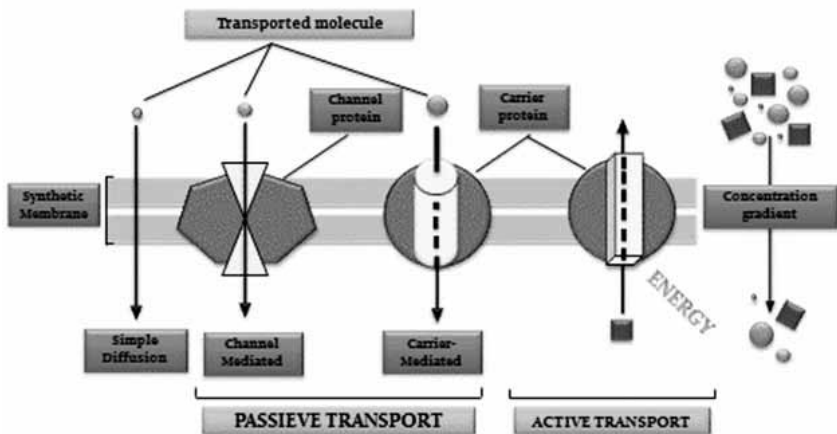


Figuur 7. Energie terugwinning in capacitieve deïonisatie

Momenteel kan alleen brak water energetisch voordelig ontzout worden. Maar naar verwachting zal met de ontwikkeling van nieuwe materialen die minder elektrische weerstand hebben, zoals bijvoorbeeld grafeen of koolstofnanobuisjes, de energieconsumptie nog veel lager kunnen worden, waardoor op termijn zeewaterontzouting met capacatieve deïonisatie rendabel kan worden.

Selectieve verwijdering van ionen

In het tweede aandachtsgebied wil ik mij richten op de selectieve verwijdering van ionen uit water. Hierbij kan gedacht worden aan ionen die voor een bepaalde watertoepassing schadelijk of zelfs toxisch kunnen zijn. Selectieve verwijdering van ionen uit water is mogelijk door bijvoorbeeld membranen te gebruiken die alleen één specifiek ion of een klasse van ionen doorlaten. Er zijn op dit moment twee AIO-projecten bij Wetsus waarin geprobeerd wordt om met ionoforen ammonium en lithium selectief te verwijderen. Dit gaat mogelijk in de nabije toekomst al resultaat opleveren. Echter, in de wat verdere toekomst denk ik dat het mogelijk zal zijn om membranen te ontwikkelen die heel selectief zullen zijn voor specifieke ionen, op dezelfde manier als levende cellen selectief ionen door de celmembraan kunnen transporteren. Dat gebeurt met behulp van transporteiwitten die passief of actief het transport van ionen door het membraan faciliteren en reguleren. Een schematisch voorbeeld hiervan ziet u in figuur 8. Het is mogelijk om deze transporteiwitten in te bouwen in een synthetisch membraan, dat vergelijkbare eigenschappen heeft als een natuurlijk membraan. Op deze manier zullen alleen die ionen uit het water ver-

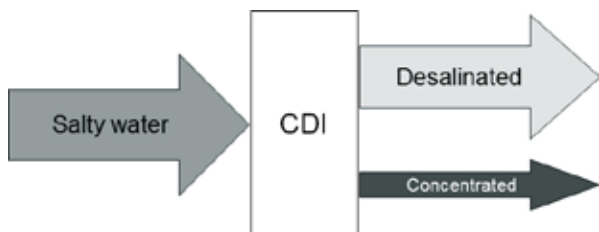


Figuur 8. Schematisch overzicht van selectief iontransport via transporteiwitten in een synthetisch membraan

wijderd worden die via de transporteiwitten door het membraan kunnen worden getransporteerd, waarbij ze aan de andere kant worden opgeslagen aan het grensvlak van de elektrode.

Ik wil hierbij twee voorbeelden nader uitwerken waarbij selectief transport van ionen belangrijk is. In de eerste plaats de verwijdering van arsenicum uit drinkwater. Op veel plaatsen in de wereld komt arsenicum van nature in het grondwater voor. In water opgelost arsenicum is kleurloos en het heeft geen smaak. Desalniettemin is arsenicum al bij extreem lage concentraties uitermate toxisch, omdat het ion zich in het lichaam ophoopt en vervolgens de energieproductie verstoort. Arsenicum is erg moeilijk te verwijderen uit het water, omdat het een klein ion is, bovendien bijna geen lading heeft en ook nog eens chemisch weinig reactief is. Volgens de Wereldgezondheidsorganisatie mag de concentratie arsenicum in drinkwater niet hoger zijn dan tien microgram per liter, maar in bijvoorbeeld Bangladesh zijn concentraties van 200 tot 300 microgram per liter heel gewoon, wat kan leiden tot arsenicumvergiftiging met een vroege dood tot gevolg. Onderzoek bij Voltea heeft laten zien dat je momenteel in het gunstigste geval zo'n 60 à 70% van het arsenicum kunt verwijderen met capaciteive deïonisatie. Dit is voorlopig nog onvoldoende om onder de norm van de Wereldgezondheidsorganisatie te komen. Met behulp van selectieve membranen waarin transporteiwitten, zoals bepaalde typen glyceroporines, zijn aangebracht, kan het arsenicumverwijderingspercentage mogelijk oplopen tot circa 98 a 99%. Daardoor zal het mogelijk worden om vrijwel alle met arsenicum verontreinigde grondwaterputten, waar ook ter wereld, geschikt te maken voor menselijke consumptie. Dit is momenteel nog toekomstmuziek, maar het kan uitgroeien tot een veelbelovend onderzoeksgebied.

Een tweede voorbeeld is de verwijdering van natrium uit gietwater dat gebruikt wordt in de kassuinbouw. Daarin moet de natriumconcentratie en in mindere mate ook de chlorideconcentratie zo laag mogelijk zijn, omdat hoge concentraties natrium en chloride een negatief effect hebben op de plantengroei. In Nederland moet, als



Figuur 9. Schematisch overzicht van capaciteive deïonisatie, waarbij een waterstroom wordt gesplitst in een ontzoute en een geconcentreerde stroom

gevolg van de Kaderrichtlijn water, uiterlijk in 2027 de lozing van kaswater waarin nog meststoffen en gewasbestrijdingsmiddelen voorkomen, nagenoeg zijn teruggebracht tot nul. Daardoor wordt waterhergebruik in de kassuinbouw steeds belangrijker, waarbij het uiteindelijke doel is om de watercyclus in de kassuinbouw volledig te sluiten. Dat laatste zal alleen mogelijk zijn als natrium selectief uit het gietwater kan worden verwijderd en daarvoor is het noodzakelijk om natrium-selectieve membranen te ontwikkelen.

Terugwinning van waardevolle stoffen uit afvalstromen

Zoals eerder opgemerkt kun je met capacitieve deïonisatie een waterstroom waarin ionen zijn opgelost splitsen in twee waterstromen, namelijk een ontzoute stroom en een geconcentreerde stroom (zie figuur 9). In de twee voorgaande aandachtsgebieden ging het in eerste instantie om de ontzoute waterstroom, waarbij het gewenste product dus het gezuiverde water is. Maar het is ook mogelijk om de geconcentreerde waterstroom als het gewenste product te beschouwen waarin de ionenconcentratie met een factor oplopend tot 1000 à 10.000 is verhoogd.

En dat brengt ons bij het derde aandachtsgebied, namelijk het terugwinnen van metalen, waardevolle nutriënten en organische verbindingen uit huishoudelijk en industrieel afvalwater. Als voorbeeld kunnen we noemen de terugwinning van

de Volkskrant

Zaterdag 26 november 2016

Mijnbouw op zee

Milieutechnologen van Wageningen Universiteit en het centrum voor duurzame watertechnologie Wetsus hebben een methode ontwikkeld om op goedkope en eenvoudige manier mineralen te winnen uit zeewater. De bestaande methoden zijn veelal complex en inefficiënt. In de nieuwe methode wordt in het water een spanningsverschil gecreëerd met behulp van elektroden. De mineraal-ionen bewegen door hun lading via een ionselectief membraan naar deze elektroden en kunnen in geconcentreerde vorm worden afgetapt. Met deze methode kunnen mineralen wereldwijd uit zeewater worden gewonnen. Daarmee draagt Wageningen UR bij aan de kwaliteit van het leven. De methode wordt momenteel verder ontwikkeld voor grootschalige toepassing. www.wur.nl



WAGENINGEN UR
For quality of life

Figuur 10. Toekomstmuziek

fosfaat – zoals bekend een waardevolle meststof – uit huishoudelijk afvalwater. Een ander voorbeeld is de terugwinning van mineralen die zijn opgelost in het water dat vrijkomt in de mijnbouw. Met capacatieve deïonisatie in combinatie met selectieve membraantechnologie zal het in de toekomst mogelijk worden om zulke mineralen selectief aan het grensvlak van de elektroden op te slaan en ze vervolgens in hoge concentratie weer te laten vrijkomen, zodat ze gebruikt kunnen worden voor vervolgoepassingen. Het beoogde doel – een productstroom met daarin het geconcentreerde mineraal – kan het beste bereikt worden door zowel de elektrode als het membraan selectief te maken voor de mineralen die je wilt concentreren.

Mineraalwinning uit zeewater

En daarmee zijn we aangekomen bij het vierde en laatste aandachtsgebied: de winning van metaalionen uit zeewater. Er komen in zeewater veel waardevolle metaalionen voor; het probleem is echter dat voor de meeste ionen de concentraties erg laag zijn, waardoor het met de huidige stand van de technologie vaak economisch niet rendabel is om deze metaalionen te winnen. Door nu met capacatieve deïonisatie deze ionen selectief uit het zeewater te halen en daar vervolgens een geconcentreerde productstroom van te maken, is mineraalwinning uit zee wel mogelijk. Je kunt daarbij denken aan de winning van kalium, calcium, magnesium, maar ook aan zink, tin, koper, lithium, zilver en – wie weet – misschien zelfs wel goud. Dat zal op termijn kunnen leiden tot een alternatief voor de mijnbouwindustrie, namelijk metaalwinning uit zee. Zoals bekend is de huidige mijnbouw vaak destructief voor het milieu. Mineraalwinning uit zeewater is veel minder belastend voor de aarde en veel meer in harmonie met de natuur. Mijnbouw op zee, het klinkt nog als verre toekomstmuziek, maar wellicht is die dag dichterbij dan menigeen denkt en zien we mogelijk over een aantal jaren dit artikeltje in de Volkskrant (zie figuur 10).



Figuur 11. Thales van Milete (624 - 547 B.C.)

Alles is water

Ten slotte, ik hoop met mijn rede duidelijk te hebben gemaakt dat het belang van water alomvattend is: het is de basisvoorwaarde voor het leven, beschavingen staan of vallen ermee, het is cruciaal voor de economie en in de toekomst ook voor de winning van noodzakelijke grondstoffen. Kortom, de mens is in alle aspecten van zijn bestaan geheel van water afhankelijk. Vandaar dat ik als titel voor mijn rede gekozen heb: 'Alles is Water', uiteraard in hyperbolische zin.

Deze titel heb ik ontleend aan een uitspraak van een Griekse wijsgeer, Thales van Milete, die leefde in de zesde eeuw voor Christus (zie figuur 11). Thales wordt beschouwd als de grondlegger van de Griekse filosofische traditie en daarmee ook impliciet van de westerse manier van denken. Thales was van mening dat alles wat bestaat uit water is voortgekomen. Dat geldt niet alleen voor de aarde, maar ook voor de zon, de maan, de sterren en het gehele universum. Met de uitspraak 'Alles is water' bedoelde Thales niet alleen dat alles uit het water is voortgekomen, maar ook, dat alles wat bestaat, naar zijn innerlijkste wezen nog steeds water is.

Thales wist uiteraard niet wat wij nu weten, maar in een bepaalde zin des woords had hij wel gelijk. Door water als een wegwerpartikel te beschouwen, hebben we in de afgelopen decennia het universele belang van water miskend. De mensheid staat voor de uitdaging om de watervoorziening voor een groeiende wereldbevolking veilig te stellen. Het is daarom essentieel om opnieuw het alomvattende belang van water in ogenschouw te nemen. Hiermee wordt een nieuwe betekenis gegeven aan Thales' oude uitspraak 'Alles is Water'. Er zal gezocht moeten worden naar alternatieve zoetwaterbronnen, waarbij ontzouting van zeewater en brak (grond)water, maar ook hergebruik van huishoudelijk en industrieel afvalwater een belangrijke rol zullen spelen. De noodzaak om innovatieve zuiveringstechnologieën voor een duurzame waterproductie te ontwikkelen zal daarom sterk toenemen. Ik hoop aan de ontwikkeling van deze technologieën, samen met collega's, studenten en promovendi, in het kader van deze nieuwe leerstoel 'Elektrochemische Waterbehandeling', een bijdrage te kunnen leveren.

Dankwoord

En daarmee ben ik bijna aangekomen aan het eind van mijn rede. Maar voordat ik afsluit wil ik, zoals gebruikelijk, een aantal mensen bedanken. In de eerste plaats wil ik jullie allemaal bedanken voor het feit dat jullie hier vandaag bij deze inauguratie aanwezig zijn. Op deze manier weet ik ook zeker dat ik niemand ben vergeten.

De basis voor mijn carrière is gelegd in Wageningen en wel om precies te zijn bij de vakgroep Fysische en Kolloïdchemie. Beste Hans, ik heb veel aan jou te danken, eigenlijk te veel om dat nu allemaal op te noemen. Als promovendus heb je mij niet alleen geleerd hoe je hoogstaand wetenschappelijk onderzoek moet doen, maar ook, hoe je dat samen met anderen kunt doen waardoor je veel meer kunt presteren dan wanneer je alles alleen voor elkaar probeert te krijgen. Die ervaring was ook uitermate waardevol bij mijn latere carrière bij Unilever, waar je samen met een team heel veel kunt bereiken. Ik wil niet alleen jou, maar ook al mijn collega's van Fysco hiervoor heel hartelijk bedanken.

Ik sta hier slechts doordat anderen mij hun vertrouwen hebben gegeven en mij hebben gesteund. Beste Huub, al tijdens mijn promotieonderzoek was je gedwongen om naar mijn gedachtenspingsels te luisteren. Blijkbaar is dat zo goed bevallen, dat je besloten hebt mijn leerstoel onder te brengen in je eigen leerstoelgroep Milieu- en Watertechnologie. Ik ben jou en ook Cees daar erg dankbaar voor en ik zie uit naar een succesvolle voortzetting van onze samenwerking.

Een speciaal woord van dank ook voor mijn collega's van Unilever en Voltea. Ik ben erg blij om hier vandaag zoveel bekende gezichten te zien. In dit verband wil ik twee personen specifiek noemen. Dat is in de eerste plaats Hank Reinhoudt, die hier vandaag helaas niet bij kan zijn, vanwege de presentatie van ons product op de aquatechbeurs in America. Maar iemand die er vandaag wel is, is Allerd Stikker. Allerd, vanaf de eerste dag dat ik je ken heb je mij gesteund, gestimuleerd en vooral ook geïnspireerd en dat laatste doe je nog steeds. We zijn het Voltea project samen begonnen en ik hoop dat je nog zult meemaken dat we dit project ook af kunnen maken.

Ik heb veel van mijn vrienden leren kennen via de studentenvereniging VGSW en het is dan ook een waar genoegen om zoveel van jullie hier vandaag te zien, oud en nieuw. We moeten er vandaag maar een beetje een reünie van maken. Van mijn vrienden wil ik een iemand specifiek noemen en dat is Arie Sonneveld. Arie, voor het oplossen van diepzinnige levensvragen ben je altijd te vinden, en je doet dit het liefst onder het genot van een glas port. Ik hoop dat we hier nog vele jaren mee door kunnen gaan.

En natuurlijk wil ik ook mijn familie noemen en mijn kinderen, die mij er elke dag aan herinneren dat het leven niet enkel uit wetenschap bestaat. Mario, Lenna en Samuel, als je ooit hier wilt staan dan zul je nu al heel erg je best moeten doen op school, maar als je dat doet dan kun je ook veel bereiken.

En tenslotte, quiero mencionar una persona que es los más importante en mi vida.

Erika,

tu eres la flor de mi vida

Tú has llegado a encender

Cada parte de mi alma

Cada espacio de mi ser

Te quiero, te adoro, te amo.

Meneer de rector magnificus, zeer gewaardeerde toehoorders:

ik heb gezegd.

Referenties

Allerd Stikker, En de mens speelt met de tijd. *Drie vensters op de eeuwigheid*, Amsterdam: Wereldbibliotheek 2002 (ill. Rosa Vitalie).

V. L. Scarborough, N. P. Dunning, K. B. Tankersley, C. Carr, E. Weaver, L. Grazioso B. Lane, J. G. Jones, P. Buttles, F. Valdez and D.L. Lentz, 2012. *Water and sustainable land use at the ancient tropical city of Tikal, Guatemala*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109 (31) 12408-12413.

H. Cooley, P. H. Gleick, and G. Wolff. 2006. *Desalination with a grain of salt, a California perspective*. Pacific institute for Studies in Development, Environment, and Security.

H. Bhattacharjee, R. Mukhopadhyay, S. Thiyagarajan and B. P. Rosen. 2008. *Mini-review, Aquaglyceroporins: ancient channels for metalloids*. Journal of Biology, 7, 33.

International Water Management Institute. 2000. *Input for the world water vision*, The Hague.

P. Długołęcki and A. van der Wal. 2013. *Energy Recovery in Membrane Capacitive Deionization*. Environ. Sci. Technol. 47, 4904–4910.

Ran Zhao. 2013. *Theory and operation of capacitive deionization systems*. Thesis Wageningen University.



Prof. dr. ir. A. Bert van der Wal

'De watervoorziening voor een groeiende wereldbevolking is een enorme uitdaging van de mensheid, nu en in de komende decennia. Veel watervoorraden zijn door overexploitatie en slecht beleid uitgeput. Er zal gezocht moeten worden naar alternatieve zoetwaterbronnen, waarbij ontzilting van zeewater en brak (grond)water, maar ook hergebruik van huishoudelijk en industrieel afvalwater een belangrijke rol zullen spelen. De noodzaak om innovatieve waterzuiveringstechnologieën voor een duurzame waterproductie te ontwikkelen zal daarom sterk toenemen en het onderzoek zal hierop gericht moeten zijn.'