

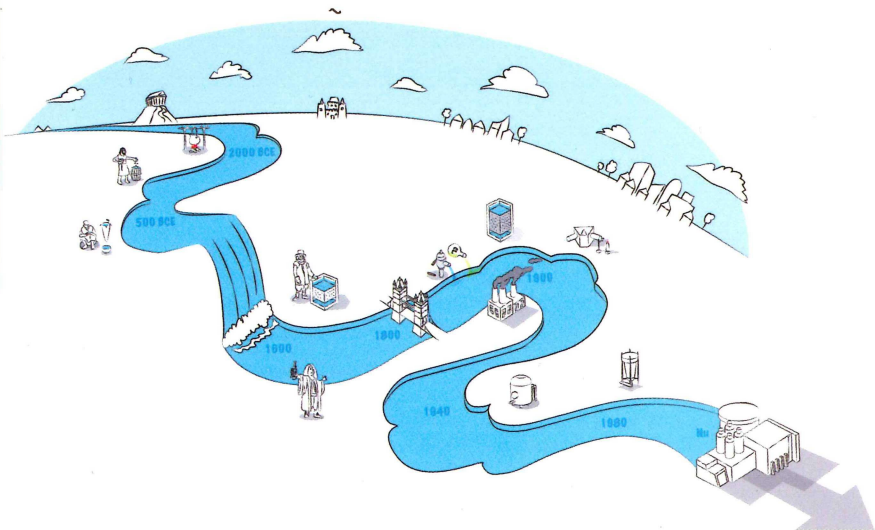
Prof.dr.ir. W.G.J. van der Meer

Het Drinkwaterbedrijf van de Toekomst?

Oratie

15 februari 2013

Faculteit Civiele Techniek
en Geowetenschappen



Het Drinkwaterbedrijf van de Toekomst?

Oratie uitgesproken op
15 februari 2013

Door Prof.dr.ir. W.G.J. van der Meer

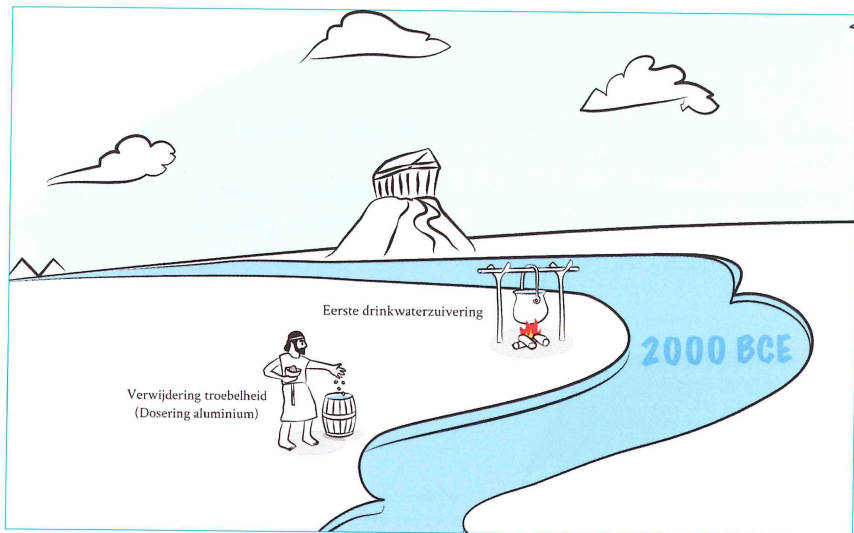
ter gelegenheid van de aanvaarding van het ambt van hoogleraar
in het vakgebied

Innovative Water Technologies

Aan de Technische Universiteit Delft
Sectie Gezondstechniek
Afdeling Watermanagement
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

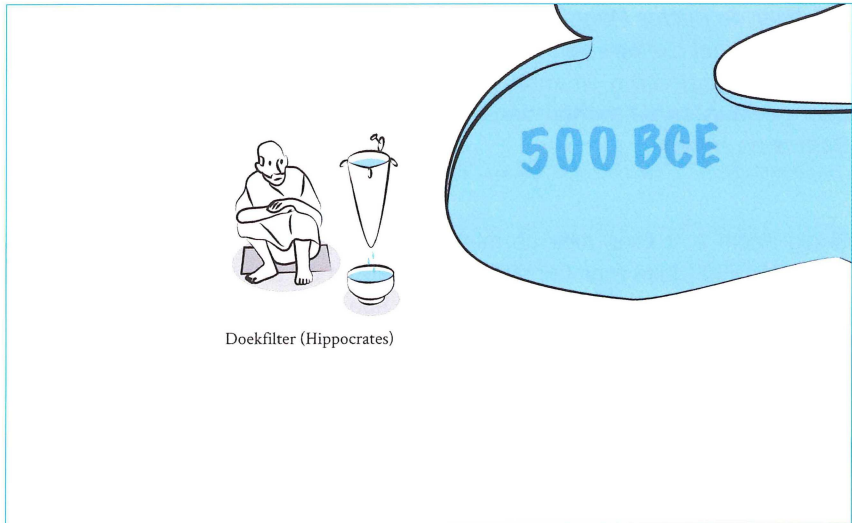
*Mijnheer de Rector Magnificus,
Leden van het College van Bestuur,
Collegae Hoogleraren en andere leden van de universitaire gemeenschap,
Zeer gewaardeerde toehoorders,
Dames en Heren,*

Graag neem ik u even mee op mijn "drinkwater" reis terug in de tijd en wel naar zo'n 2000 jaar voor Christus. Een deel van de toenmalige bewoners van onze aardbol had ontdekt dat, wanneer ze hun drinkwater verhitten boven een open vuur of door het in de zon te zetten, de smaak van het drinkwater sterk verbeterde [Figuur 1]. Dat het ook de bacteriologische kwaliteit van het water verbeterde, daar waren ze zich nog niet van bewust [Baker & Taras, 1981].



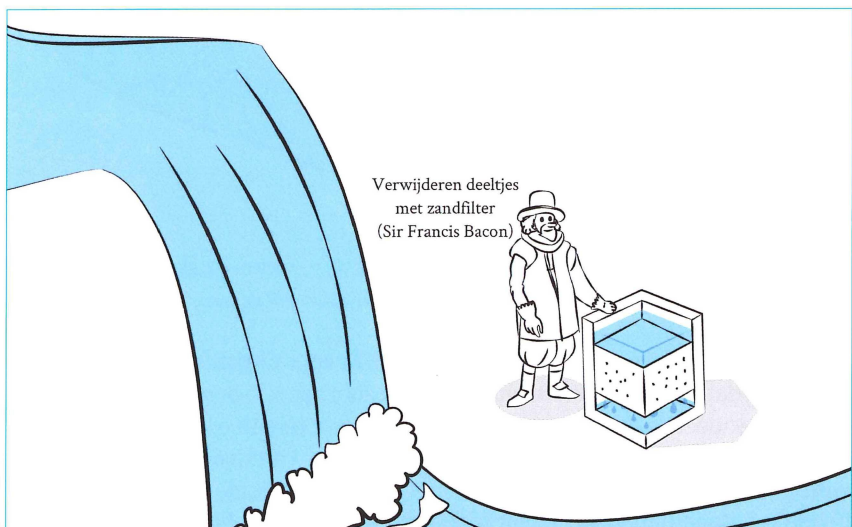
*Figuur 1: Eerste drinkwaterzuivering door middel van koken (2000 v. Chr.)
en coagulatie (1500 v. Chr.) op basis van Aluminium dosering.*

We reizen 500 jaar verder, en arriveren in 1500 voor Christus. De Egyptenaren ontdekten dat wanneer zij aluminium als fijn poeder aan hun drinkwater doseerden, er gesuspendeerde deeltjes in het water samenklonterden en bezonken, met als eindresultaat dat de troebelheid van het drinkwater verminderde [Figuur 1]. In wezen waren zij dus de uitvinders van het coagulatieproces, een proces dat nog heden ten dage uitgebreid wordt toegepast in drink- en afvalwaterbehandeling [Moel *et al.*, 2006].

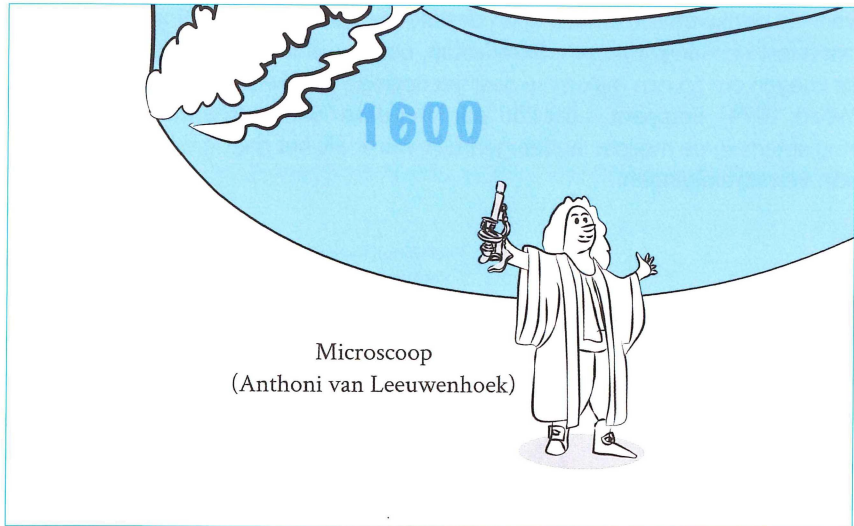


Figuur 2: Uitvinding van het doekfilter in 500 v Chr. door Griekse wetenschapper Hippocrates.

De Griekse wetenschapper Hippocrates vond 500 voor Christus het doekfilter uit [Baker & Taras, 1981]. Hiermee konden nog kleinere gesuspendeerde deeltjes (0.1-2 micrometer) uit het drinkwater worden verwijderd [Figuur 2].



Figuur 3: Uitvinding van het zandfilter in 1627 door Sir Robert Bacon.



Figuur 4: Uitvinding van de microscoop in 1676 door de Delftenaar Antoni van Leeuwenhoek.

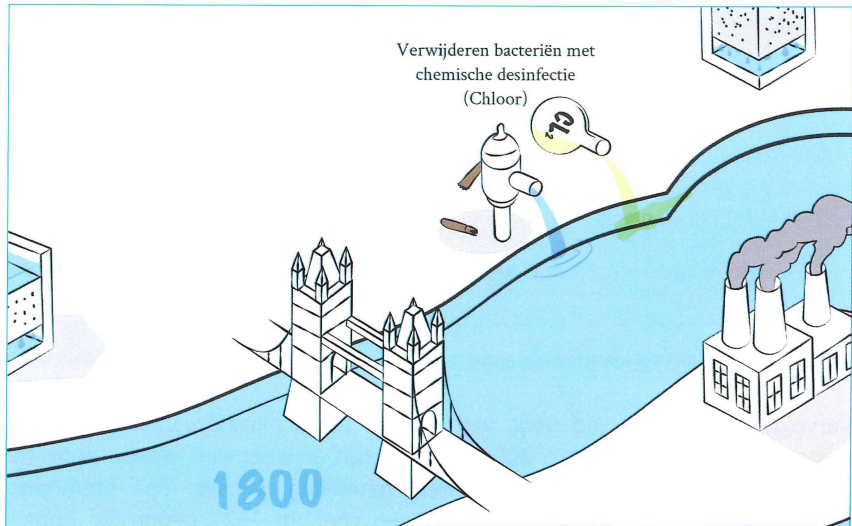
Vervolgens heeft de tijd voor wat betreft de drinkwatervoorziening even stilgestaan. Het duurde zo'n 2000 jaar voordat er weer een eerste innovatie te melden was binnen de drinkwaterbehandeling. U ziet; ook toen ging innovatie binnen de sector niet altijd even snel. In 1627 begon Sir Robert Bacon te experimenteren met zandfilters voor de verwijdering van hele kleine gesuspenderde deeltjes uit het drinkwater. [Figuur 3].

Het te behandelen water werd door een zandfilter geleid, welke was gevuld met zandkorrels van een paar millimeter. De gesuspenderde deeltjes (algen, klei, zand) bleven in het filter achter en het uiteindelijke drinkwater was helder en smakvol volgens de boeken.

Zo'n 50 jaar later, in 1676 om precies te zijn, vond de Delftenaar Antoni van Leeuwenhoek de microscoop uit [Figuur 4] [Wilson, 1995]. Met deze microscoop ontdekte hij dat water, maar ook het drinkwater, vol zat met "animalcules" of "dierkens" en mogelijk zag hij ook al bacteriën in het water [Schierbeek, 1960, Dobell, 1932].

In 1854 ontdekte de Engelse arts Dr. John Snow dat cholera werd verspreid door met rioolwater besmet drinkwater [Figuur 5]. Snow ontdekte dat cholera minder of zelfs helemaal niet voorkwam in gebieden waar het drinkwater behandeld werd met langzame zandfiltratie, een ontdekking van grote betekenis

voor de drinkwaterbehandeling en desinfectie van drinkwater. Snow adviseerde om naast een langzame zandfiltratiestap, ook nog chloor aan het drinkwater toe te voegen om zo een maximale desinfectiegraad te bewerkstelligen [Huisman & Wood, 1974]. Frappant is dat 250 jaar later deze "double treatment philosophy" nog steeds in de meeste landen gebruikt wordt als het gaat om het verwijderen van verontreinigingen.



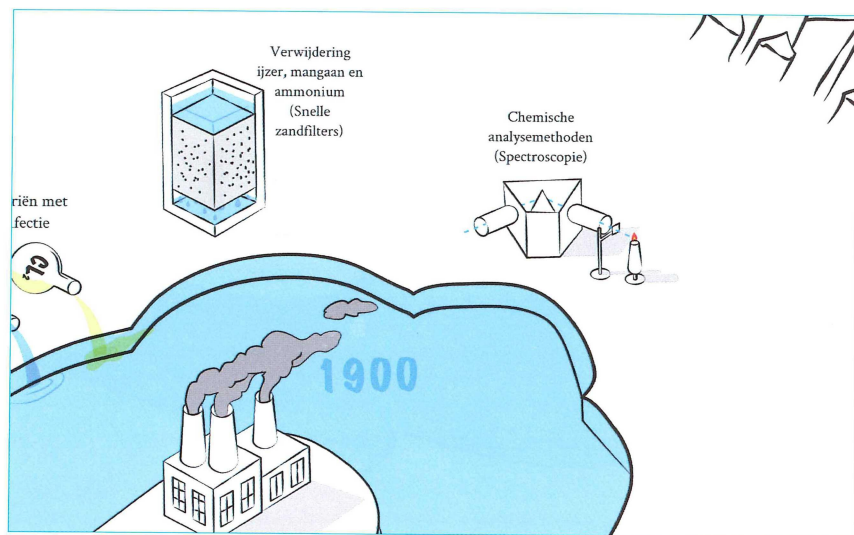
Figuur 5: Uitvinding van chemische desinfectie door Dr. John Snow in 1854.

Tevens was deze ontdekking van Snow aanleiding voor de Engelse regering om op stadsniveau langzame zandfilters plus chloor-doseringen te installeren [Christman, 1998]. Historisch gezien een mijlpaal, de start van de eerste regulering van de (publieke) drinkwatervoorziening door een overheid.

Rond 1860 kwamen de eerste chemische analysemethoden, op basis van spectroscopie, beschikbaar [Figuur 6]. Na het met het oog zichtbaar zijn van gesuspenderde deeltjes, het met de microscoop zichtbaar maken van bacteriën en andere organismen in het water, was men vanaf nu in staat om op molecuul niveau de samenstelling van het drinkwater te bepalen. Dit leidde tot de ontwikkeling door Dr. Fuller van de zogenaamde snelle zandfilters [Figuur 6] [Binnie *et al.*, 2002].

Met deze snelle zandfilters was men in staat om voor de drinkwaterwereld relevante stoffen zoals ijzer, mangaan en ammonium grotendeels te verwijderen respectievelijk om te zetten. De eerste twee stoffen, ijzer en mangaan, geven

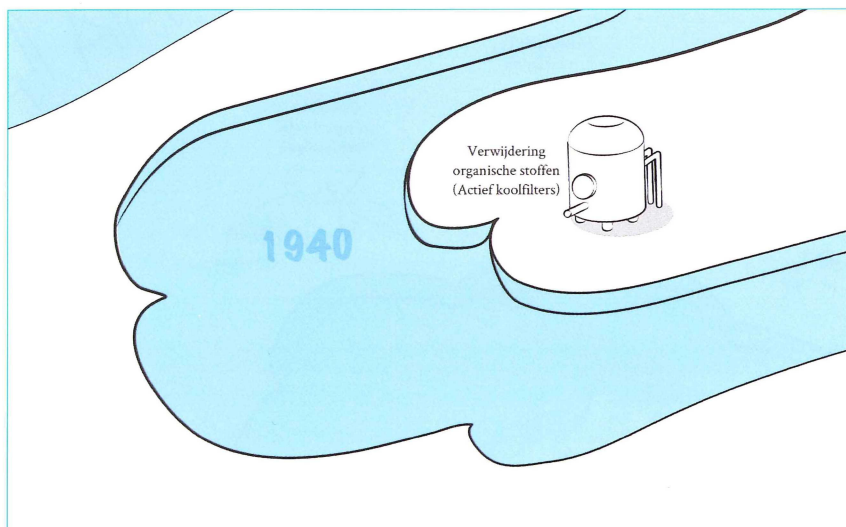
naast een bruin/zwarte kleur aan het drinkwater, vlekken in het wasgoed. Ammonium kan bij onvolledige omzetting leiden tot nitriet, een met name voor baby's toxische stof [Moel *et al.*, 2006].



Figuur 6: Uitvinding van de verschillende chemische analysemethoden op basis van spectroscopie in 1860 en de ontwikkeling van het snelle zandfilter door Dr. Fuller.

Sommige succesvolle, veelbelovende doorbraken, kunnen soms ook leiden tot "tragiek". Dit blijkt wel uit het feit dat in 1948 Dr. Paul Muller nog de nobelprijs voor fysiologie of geneeskunde ontving voor zijn werk rondom het toepassen van DDT (Dichloor-Diphenyl-Trichloor-ethaan) ter bestrijding van insect-born diseases, zoals malaria, gele koorts en tyfus. In de jaren vijftig en zestig kwamen echter de eerste rapporten naar buiten waarin de nadelige gevolgen van het toepassen van DDT duidelijk naar voren kwamen [Carson, 1962]. Bijwerkingen waren onder andere een verhoogde kans op kanker en genetische beschadigingen. Deze bevindingen waren aanleiding voor de oprichting van de Environmental Protection Agency [EPA, 2000]. Vanaf dat moment vond er een verschuiving plaats van de preventie van allerlei water gerelateerde ziekten (waterborne illnesses) naar het voorkomen van antropogene watervervuiling door pesticiden, herbiciden en andere organische microverontreinigingen (benzeen, MTBE, etc.) [Cotruvo, 1985]. Deze zelfde verschuiving leidde ook tot een snelle ontwikkeling van de diverse analysemethoden voor het kunnen aantonen van de diverse antropogene verontreinigingen in het drinkwater.

Voor verwijdering van deze antropogene stoffen uit het drinkwater wordt binnen de drinkwatersector sinds de jaren zeventig op grote schaal actief koolfiltratie toegepast [Figuur 7] [Ridder, 2012].

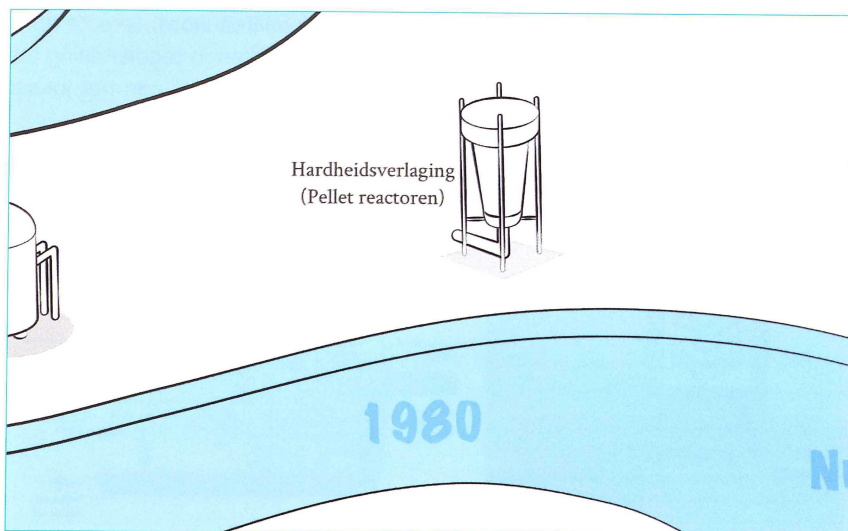


Figuur 7: Toepassen van actief koolfiltratie op grote schaal binnen de drinkwatersector in jaren '70.

Frappant detail is dat al in 2000 voor Christus actief kool door de Egyptenaren werd toegepast binnen de lucht en water behandeling, al was het toen alleen voor geur- en smaakverbetering.

Tot nu toe heb ik u alleen maar voorbeelden van filtratiestappen en behandelingsstappen laten zien, gedreven door het ontdekken van organismen en/of stoffen, die we als drinkwaterklant en dus als drinkwatersector niet in het drinkwater willen hebben. De eerste behandelingsstap, die vanuit het klantperspectief werd ontwikkeld en geïntroduceerd in drinkwaterbereiding, was ontharding [Graveland *et al.*, 1983]. Door het verlagen van de hardheid van drinkwater, had de klant minder last van ketelsteen en hoefde er ook minder zeep te worden gebruikt [Figuur 8].

Dit brengt ons tot vandaag de dag, 15 februari 2013. Tot nu toe was de ontwikkeling van de verschillende behandelingsstappen (langzame zandfilters, snelle zandfilters, actief kool, chlorering, ontharding) veelal gedreven door een steeds grotere bewustwording vanuit de wetenschap en de drinkwatersector



Figuur 8: Ontwikkeling van de pelletreactoren voor de hardheidsverlaging van het drinkwater.

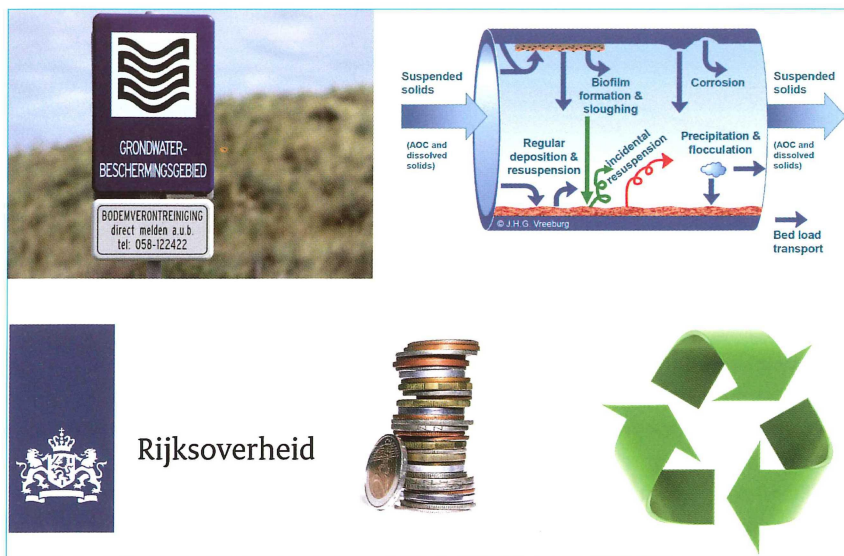
over wat er in het drinkwater zat en wat de nadelige gevolgen hiervan waren op onze gezondheid. De volgende stap in drinkwaterzuiveringsland zal volgens mij worden ingezet door de klant. Allereerst een drinkwaterklant die steeds mondiger en kritischer wordt, denk maar aan de discussies op social media en op radio en TV. Verder wordt de klant al dan niet terecht steeds veeleisender. Men "eist" naast een onberispelijke drinkwaterkwaliteit, vrij van welke verontreiniging dan ook, een verrassingsvrije drinkwaterlevering; waterlevering 24 uur per dag, zeven dagen in de week [Figuur 9].



Figuur 9: De eisen van een kritische "gebonden" drinkwaterklant.

Geen water, bruin water of een mindere drinkwaterkwaliteit wordt terecht door de klant niet langer meer getolereerd. Daarbij heeft de klant in tegenstelling tot bij de gas- en elektrabedrijven geen keuze, men is “gebonden” aan het lokaal opererende drinkwaterbedrijf.

Maar dit is niet het enige wat op de drinkwatersector afkomt, er komt meer op haar af [Figuur 10].



Figuur 10: Nieuwe en bestaande ontwikkelingen die op de drinkwatersector afkomen.

Naast de al dan niet bestaande bedreigingen van de drinkwaterbronnen (o.a. pesticiden, medicijnen, organische microverontreinigingen) zal de sector ook te maken krijgen met nieuwe bedreigingen en/of aspecten:

- Klimaatsveranderingen (extreem droge en natte perioden) [KNMI, 2006];
- Verzilting van de bronnen (oppervlakte- en grondwater);
- Nieuwe chemische verontreinigingen (hormonen, organische microverontreinigingen, nanodeeltjes) [Cotruvo, 1985, Heberer, 2002, Murphy & Corsin, 2005, Schwarzenbach *et al.*, 2006, Struijs *et al.*, 2007, Houtman, 2010, Schriks *et al.*, 2010];
- Nieuwe bacteriologische en virale bedreigingen [Krewski *et al.*, 2002, Medema, 2010];

- Mogelijke toename van lekkages van het distributienet door veroudering van het net [Vreeburg, 2007];
- Ongewenste bacteriologische en chemische processen in het distributienet (nagroeï, hogere organismen, Legionella, uitloging) [Kuiper *et al.*, 2005, Liu, 2013, Vreeburg, 2007];
- Een terugtrekkende overheid, van een adviesrol naar een regulerende respectievelijk controlerende rol;
- Een voornamelijk op kosten gebaseerde sector benchmark, waarin de drinkwaterkwaliteit op een tweede plaats lijkt te komen [VEWIN, 2010];
- Duurzaamheid in al haar aspecten, van CO2 uitstoot tot sluiten van de (lokale) waterkringloop (people, planet, profit) [Kernteam Waterketen, 2009, Moglia *et al.*, 2011].

Waar kan een drinkwaterklant mee te maken krijgen?

Dit is waar de drinkwatersector mee te maken heeft of mee te maken krijgt, maar hoe ligt dit bij de klant? De huidige drinkwaterklant kan te maken krijgen met de volgende zaken [Figuur 11]:

- (overmatige) kalkafzetting op sanitair en in warmwaterapparatuur;
- een advies om het water 3 minuten te koken voor consumptie ten gevolge van een ingreep in het distributienet of bacteriologische besmetting van het drinkwater;
- bruin water uit de kraan als gevolg van opwerveling van sediment door spuiwerkzaamheden in het distributienet of door een sterke toename van het drinkwaterverbruik als gevolg van bluswerkzaamheden;
- geen water uit de kraan als gevolg van een leidingbreuk.



Figuur 11: Aspecten welke op klantniveau spelen.

Wat zou de drinkwaterklant willen?

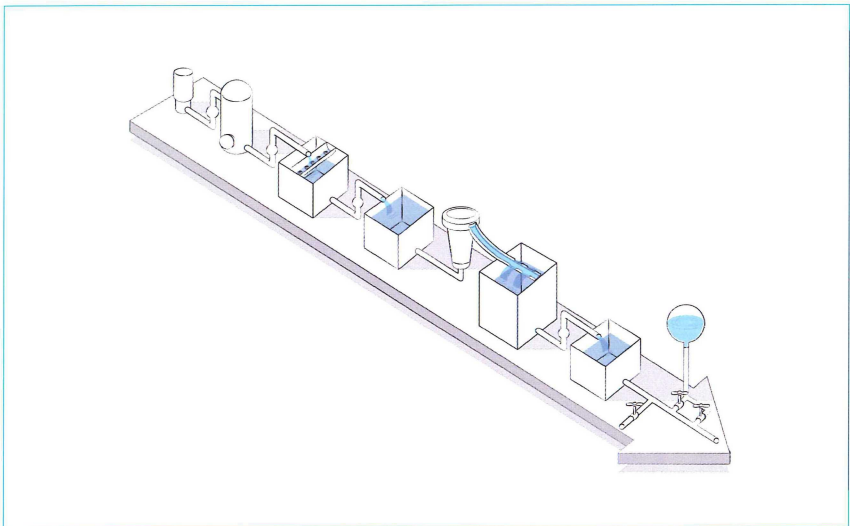
In mijn opinie zou de huidige drinkwaterklant willen dat zijn of haar drinkwater altijd een onberispelijke kwaliteit bezit, nu en in de toekomst. Verder wil die klant dat er altijd voldoende drinkwater uit de kraan stroomt, 24 uur per dag, 7 dagen per week, kortom een verrassingsvrije drinkwaterlevering. Dit alles tegen de laagst mogelijke maatschappelijke kosten op een duurzame wijze [Figuur 12].

- Onberispelijke waterkwaliteit
- Verrassingsvrije levering
- Lage maatschappelijke kosten
- Duurzaam

Figuur 12: Klantwensen.

Is dit haalbaar voor de drinkwatersector?

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, wil ik graag eerst even inzoomen op de "traditionele" drinkwaterzuivering in Nederland. Het merendeel van het drinkwater wordt gezuiverd op basis van chemische, biologische en/of adsorptietechnieken. Denk maar aan zandfilters voor de chemische omzetting



Figuur 13: Voorbeeld van een traditioneel drinkwaterzuiveringsproces, gebaseerd op beluchting, zandfilters, onthardingsreactoren en actief koolfilters.

van ijzer en mangaan, pelletreactoren voor het verlagen van de hardheid, biologische omzetting van ammonium in nitraat en verwijderen van organische microverontreinigingen met behulp van actief koolfilters, een voorbeeld van een adsorptieproces [Figuur 13].

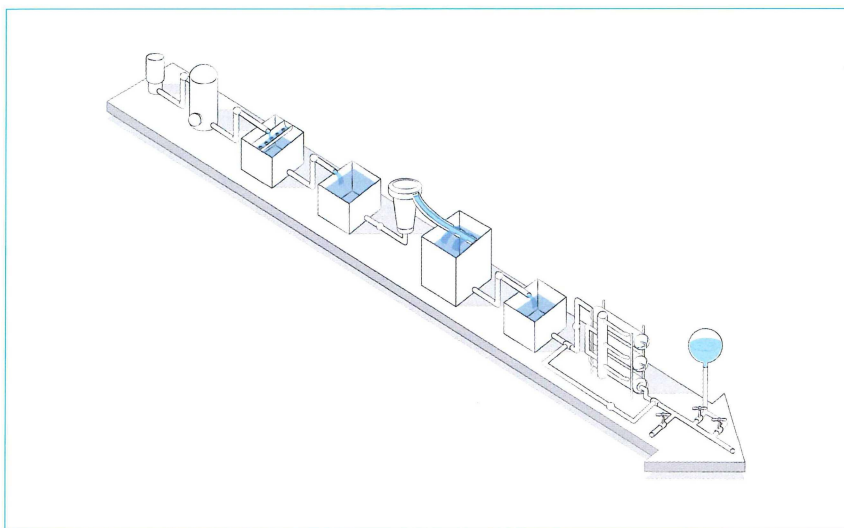
Op basis van deze verschillende zuiveringsprocessen/stappen wordt in Nederland maar ook wereldwijd al decennia lang drinkwater geproduceerd met een hoge tot zeer hoge chemische en bacteriologische kwaliteit [Inspectie Leefomgeving en Transport, 2012].

Op zich dus geen reden tot zorg, maar omdat deze “traditionele” zuivering veelal gebaseerd is op chemische, biologische en/of adsorptie-processen, blijkt een gegarandeerde 100% volledige omzetting respectievelijk verwijdering in de praktijk niet altijd haalbaar te zijn. Biologische processen kunnen door een simpel feit als een temperatuurverlaging in de winter minder goed gaan verlopen. Chemische processen kunnen door verandering in de procescondities (pH, debiet, concentratie) minder goed of zelfs totaal niet meer verlopen. En als laatste adsorptie van een specifieke component aan bijvoorbeeld actief kool kan door competitie (hogere of dezelfde affiniteit) met andere stoffen minder efficiënt verlopen dan verwacht wordt. Nog los van het feit dat sommige organische microverontreinigingen slecht of in totaal niet door actief kool worden verwijderd of geadsorbeerd, zij lopen als het ware dwars door de zuivering heen [Ridder, 2012, Murpy *et al.*, 2012, Oost, 2011, Hoek, 2012]. Kortom, al deze factoren kunnen individueel of collectief leiden tot een ongewild lagere drinkwaterkwaliteit, gedurende een korte of lange tijd, iets wat uiteraard een ongewenste situatie is.

Een tweede kanttekening die bij het “traditionele” zuiveringsproces geplaatst kan worden, is het feit dat dit proces niet in staat is om opgeloste zouten uit het drinkwater te halen. Met de bestaande “traditionele” drinkwaterzuivering zijn de opgeloste zouten niet uit het drinkwater te verwijderen. Geen van de processtappen (biologisch, chemisch of adsorptieprocessen) vormen een barrière voor de opgeloste zouten. Was deze beperking in het verleden minder relevant, vandaag de dag worden drinkwaterbedrijven in een toenemende mate geconfronteerd met verzilting van hun bronnen, zowel van het oppervlaktewater als van het grondwater [KNMI, 2006].

Oorzaak van deze verzilting is naast klimaatveranderingen (lange, droge en warme zomers) ook de intrusie van brak oppervlaktewater of grondwater.

Deze beperking, het niet verwijderen van opgeloste zouten, samen met de eerder genoemde kanttekeningen rondom de “traditionele” zuivering is voor menig drinkwaterbedrijf [Kamp *et al.*, 2000] aanleiding geweest om de zuivering uit te breiden met een membraanfiltratiestap [Figuur 14]. Membraanfiltratie is een fysisch proces, dat afhankelijk van het gekozen membraan een absolute barrière kan vormen voor virussen, bacteriën, organische microverontreinigingen en zouten [Mallevialle *et al.*, 1996, Schäfer, 2003]. Echter om te kunnen voldoen aan eisen die de Drinkwaterwet stelt aan het drinkwater, waaronder minimale hardheid, buffercapaciteit, enzovoort, wordt een gedeelte van het drinkwater via een zogenaamde bypass om de membraanfiltratie-installatie heengeleid (deelstroombehandeling).

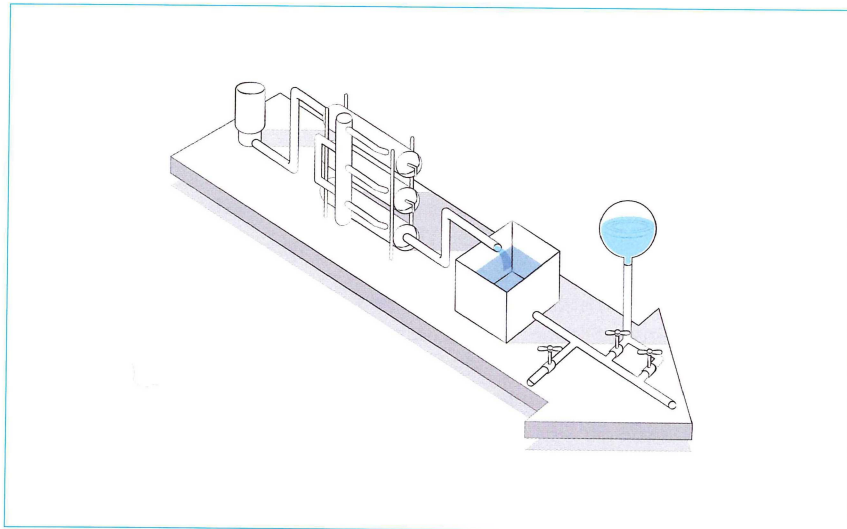


Figuur 14: Drinkwaterzuiveringsproces bestaande uit traditionele zuiveringsprocessen (zandfilters, onthardingsreactoren, actief koolfilters) in combinatie met een deelstroom membraanfiltratiestap.

Hoewel deze deelstroombehandeling van het drinkwater met membraanfiltratie [Figuur 14] absoluut tot een significante verbetering van de drinkwaterkwaliteit leidt, zal nog steeds via de bypass een deel van de in het drinkwater aanwezige “verontreinigingen” aan de membraanfiltratie-unit ontsnappen en dus in het drinkwater aanwezig blijven. Hoewel de uiteindelijke concentraties in het drinkwater van deze “verontreinigingen” (ver) onder de drinkwaternormen blijven, is het maar de vraag of dit nu een gewenste situatie is. In feite wordt de onberispelijke kwaliteit van het productwater van de membraanfiltratie gemengd

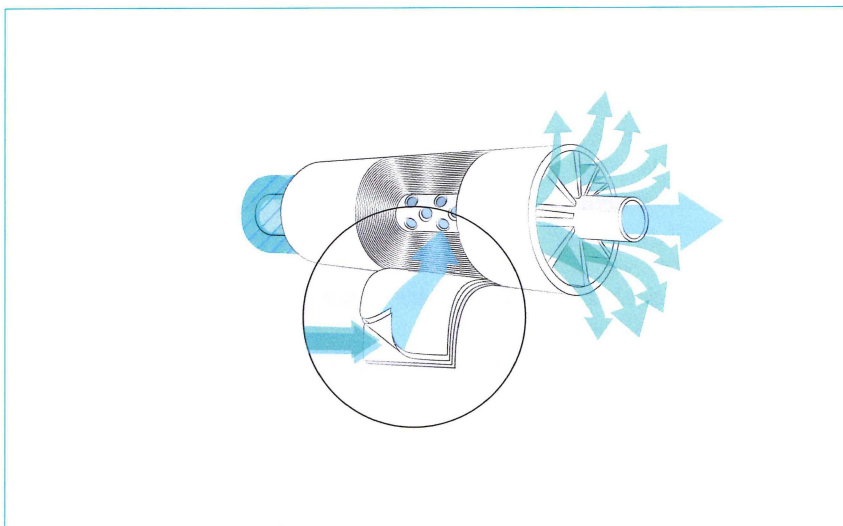
met een "mindere" drinkwaterkwaliteit om op die manier te kunnen voldoen aan de drinkwaternormen als het gaat om hardheid, buffercapaciteit, zuurgraad (pH) en verzadigingsindex (SI). In wezen een vreemde zaak omdat het extreem hoge zuiveringsrendement van de membraanfiltratiestap, vergeleken met de traditionele zuiveringsprocessen, maar ten dele wordt gebruikt, immers de bypass wordt niet via de membraanfiltratie-installatie geleid.

Dit gegeven, samen met de wens om uit elke bron, van zoet, brak, of zout oppervlakte- en grondwater tot zelfs uit effluent van een rioolwaterzuiveringsinstallatie, zuiver drinkwater te kunnen maken, leidde tot het volgende zuiveringsconcept: volstroomsbehandeling van welke drinkwaterbron dan ook met het meest dichte Reverse Osmosis (RO) membraan [Figuur 15]. Op die manier worden alle in het drinkwater aanwezige stoffen, bekende en nu nog onbekende verontreinigingen, zouten, hardheid, enzovoort, voor de volle 100% verwijderd. Het productwater uit een dergelijke installatie is van onberispelijke kwaliteit; 100% zuiver water. Vervolgens worden aan dit 100% zuivere water die componenten (calcium, bicarbonaat, zuurstof) toegevoegd om het tot drinkwater te maken met een onberispelijke kwaliteit. Ten opzichte van de "standaard" drinkwaterzuiveringsfilosofie is dit een totaal andere insteek. Het water wordt niet langer meer in een deelstroom met membraanfiltratie behandeld om het vervolgens te mengen met de "bypass" in een zodanige mengverhouding dat het uiteindelijke water voldoet aan de drinkwaternormen, maar volstrooms behandeld.



Figuur 15: Volstroomsbehandeling van drinkwater met membraanfiltratie.

Graag wil ik met u nog even inzoomen op de membraanfiltratie-installatie. Het hart van de installatie wordt gevormd door de membraanelementen. Afhankelijk van de productiecapaciteit ligt het aantal membraanelementen in een full-scale installatie al snel tussen de 100 en 1000 membraanelementen [Figuur 16]. Door het aanleggen van een druk wordt het water vanuit het voedingskanaal (Feed) door het membraan heen geperst. Dit productwater, ook wel permeaat (Permeate) genoemd, stroomt spiraalsgewijs via het permeaatkanaal van de buitenkant van het element naar de binnenkant, waar het terecht komt in de permeaatbuis. De tegengehouden stoffen verlaten het membraanelement via de concentraatstroom (Concentrate). Vanwege de configuratie respectievelijk stroming van het permeaat wordt dit type membraanelementen spiraal gewonden membraanelementen genoemd (spiral-wound modules [SPW-modules]).



*Figuur 16: Principe van een spiraal gewonden membraanelement
(Spiral-Wound [SPW]-module).*

Afhankelijk van de membraanporie spreekt men van microfiltratie (MF), ultrafiltratie (UF), nanofiltratie [NF] of omgekeerde osmose (Reverse Osmosis [RO]). Is men met MF in staat om naast kleine deeltjes [1-2 μm] ook nog bacteriën en virussen te verwijderen, met Omgekeerde Osmose membranen is men in staat om zelfs de kleinste ionen respectievelijk moleculen uit het water te verwijderen [Figuur 17] [Fritzmann *et al.*, 2007].

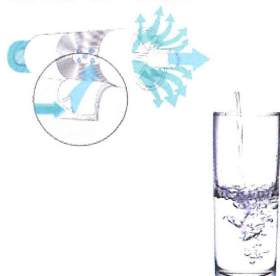
Absolute barrière



Figuur 17: Voorbeelden van componenten, bacteriën, virussen, (nog) onbekende stoffen, nanodeeltjes, organische microverontreinigingen, zouten en medicijnen waar omgekeerde osmose (Reverse Osmosis [RO]) membranen een absolute barrière voor vormen.

In wezen kan men van een absolute barrière spreken voor welke stof dan ook. Van bacteriën, virussen, zouten, organische micro-verontreinigingen, nanodeeltjes, medicijnen tot componenten die op dit moment nog niet aangetoond kunnen worden of nog op ons afkomen. Dit laatste is misschien wel het sterkste punt van membraanfiltratie, componenten die nu nog niet kunnen worden aangetoond in het laboratorium of die nog op ons afkomen, worden tegengehouden door de RO-membranen. Richting de drinkwaterconsument kan dus nu en in de toekomst te allen tijde een onberispelijke drinkwaterkwaliteit gegarandeerd worden. Iets wat helaas van de huidige, meer traditionele, drinkwaterzuiveringen niet altijd gezegd kan worden. Nieuwe en/of nauwkeurige analysemethoden hebben in het verleden laten zien dat deze zuiveringsprocessen helaas toch niet alle verontreinigingen uit drinkwater verwijderden [Versteegh *et al.*, 2002, Mons *et al.*, 2003, Aa *et al.*, 2009].

Van zuiver water....



... naar 100% zuiver drinkwater

Van zuiver water naar zuiver drinkwater

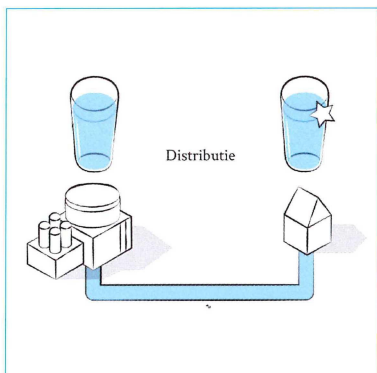
Zoals al eerder aangegeven, is men in staat om met RO-membraanfiltratie uit welke bron dan ook, zoet, brak of zout, regenwater of effluent van een rioolwaterzuivering, zuiver water te maken [Lee *et al.*, 2011]. Echter dit zuivere water is nog geen zuiver drinkwater. Om hieraan te voldoen moet het zuivere water nog een aantal componenten bevatten om het zuiver drinkwater te mogen noemen

[Ministerie Infrastructuur en Milieu, 2009]. Daarnaast moet het voldoen aan een aantal fysische eisen. Beide type eisen zijn wettelijk vastgelegd in de Drinkwaterwet [Figuur 18].

Je moet er wat aan toevoegen...



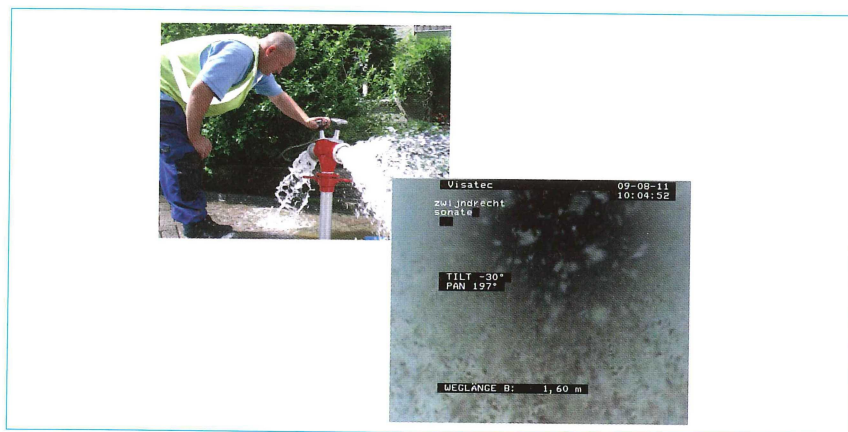
Figuur 18: Voorblad Nederlandse Drinkwaterwet.



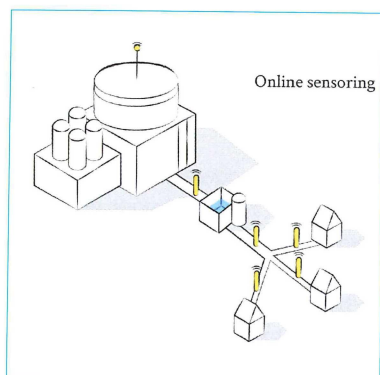
Distributie van zuiver drinkwater

Vervolgens wordt dit drinkwater met een onberispelijke kwaliteit via een distributienet van soms tientallen kilometers getransporteerd naar de klant. Door de onberispelijke kwaliteit zullen (verdere) chemische en microbiologische processen in het net niet langer plaatsvinden. Biofilmvorming aan de wand van de leidingen [Kuiper *et al.* 2005, Taylor, 2009, Kooij *et al.*, 2003], nagroei van bacteriën, maar ook uitloging van het

leidingmateriaal (oplossen van kalk vanuit het leidingmateriaal) en als laatste het bezinken van deeltjes (zand, kalk, ijzer en mangaan) behoren tot het verleden. Doordat het membraan enerzijds een absolute barrière vormt voor bacteriën, virussen en hogere organismen, anderzijds doordat het membraan de voedingsstoffen, zoals fosfaat, maar ook stikstof- en koolstofbronnen uit het water voor de volle 100% uit het water verwijdert, waardoor microbiologische groei niet mogelijk is. Verder verwijdert het membraan de in het drinkwater gesuspendeerde deeltjes (ijzer, mangaan, kalk, zand, enzovoort), waardoor bezinking hiervan in het distributienet tot het verleden behoort en spuien niet langer nodig zal zijn [Figuur 19]. Vanuit klantperspectief en kosten voor het drinkwaterbedrijf is dit een goede zaak.



*Figuur 19: Spuien van het distributienet (links)
en foto van het opgewervelde sediment (rechts).*

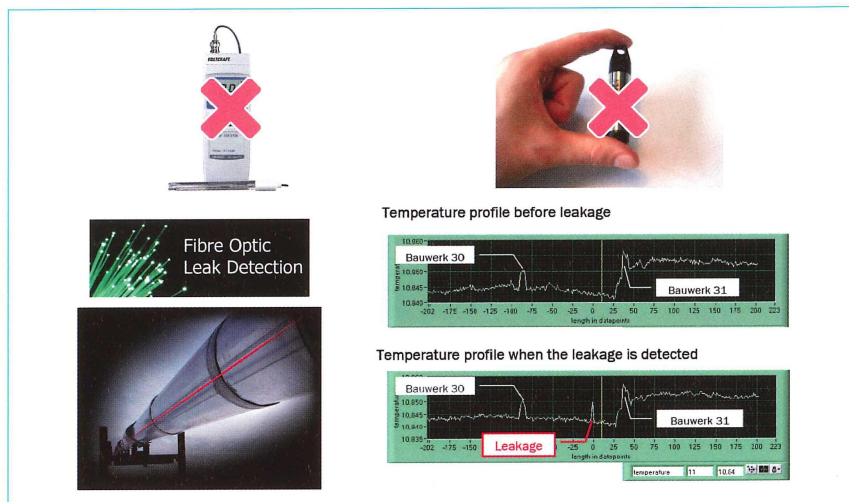


On-line sensing van het distributienet

Binnen de drinkwatersector is er een toenemende interesse te bespeuren naar het on-line meten van de drinkwaterkwaliteit in met name het distributienet [Storey *et al.*, 2011]. Dit wordt mede geïnitieerd door het feit dat met de huidige zuivering er niet altijd een "stabiele" drinkwaterkwaliteit kan worden bereikt. Nagroei (*Aeromonas*, *Legionella*), biofilmvorming en sedimentvorming is in

de praktijk veelal niet te voorkomen. Dus kan bewaking en controle van de drinkwaterkwaliteit tijdens transport en levering relevant zijn. Op het moment dat de drinkwaterkwaliteit onberispelijk en "stabiel" is, iets wat de voorgestelde volstromingsbehandeling mogelijk maakt, wordt dit type on-line sensing en daarmee het continu meten van de drinkwaterkwaliteit echter veel minder relevant. Wat meer relevant is, is het meten van de status van het distributienet [Figuur 20].

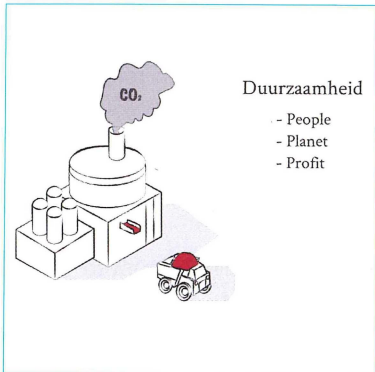
De veroudering van het leidingmateriaal wordt veroorzaakt door de grondsoort (bijvoorbeeld zuurgraad) op het materiaal en de spanning die door de omgeving op het leidingmateriaal wordt uitgevoerd (grondzetting, grondwerkzaamheden, heien, wegwerkzaamheden, enzovoort). Door een dergelijke monitoring kan de technische levensduur van de leidingen worden gemaximaliseerd. In de wetenschap dat driekwart van de investeringen van een drinkwaterbedrijf



Figuur 20: Voorbeeld van on-line sensing van de status van een leiding via een optische glasvezelkabel.

"onder de grond" ligt, zal dit direct leiden tot een kostenbesparing, minimale afschrijvingen, en dus een lagere drinkwaterprijs en/of vastrecht voor de klant. Verder zal deze monitoring ervoor gaan zorgen dat lekkages van transport-, distributie-, hoofd- en aansluitleidingen tot het verleden behoren. Daardoor zal het vervelende fenomeen van nauwelijks tot geen water uit de kraan of douchekop niet meer voorkomen. Ook dit zal leiden tot een kostenreductie door, in de meest extreme vorm, het niet meer nodig zijn van een storingsdienst.

Naast de kostenbesparing levert het nog meer voordelen op voor de totale maatschappij, minder schade aan de omgeving door lekkages en minder ongemak door opgebroken straten.



Duurzaamheid

Als er een sector is die sinds haar ontstaan duurzaamheid hoog in het vaandel heeft dan is dat wel de drinkwatersector. Al voor het woord "duurzaam" een begrip werd, was de drinkwatersector hier mee bezig. Er werd al duurzaam omgegaan met het milieu, denk maar aan wingebieden (waterleidingduinen), het hergebruik van de reststoffen (ijzer- en kalkslib, kalkkorrels, humuszuren) die vrijkomen tijdens het zuiveringsproces en het

hergebruik van oud leidingmateriaal (PVC, gietijzer) dat vrijkomt bij vervangingen van het distributienet. Er is door de sector zelfs een eigen Reststoffenunie opgericht voor het hergebruik van deze reststoffen [Reststoffenunie, 2012]. Verder gaat de sector natuurlijk op duurzame manier om met het drinkwater, van waterbesparingsacties tot hergebruik van het spoelwater van de filters.

Met het aan u geschetste drinkwaterbedrijf van de toekomst kan er mijn inziens nog een stap gezet worden. Kijkend naar de People, Planet en Profit aspecten zouden de volgende stappen gezet kunnen worden.

Planet:

Het sluiten van de (lokale) waterkringloop komt dichterbij en wordt reëler, gelet op het extreem hoge zuiveringsrendement van de membranen en de mogelijkheid van het realiseren van kleine en compacte zuiveringsunits. Van oudsher staan membraanfiltratie-units hierom bekend. Verder is het mogelijk om van elke bron, zoet of zout water, van grondwater tot rioolwater, drinkwater te maken. Door het nauwelijks kalkafzettend zijn van het drinkwater, zal het gebruik van antikalkmiddelen in de huishoudens en industrie minimaal zijn of in het meest extreme geval tot nul gereduceerd zijn. Verder zullen door het afwezig zijn van kalkaanslag op verwarmingselementen in heetwater-apparatuur de temperatuuroverdracht maximaal en dus de energieverliezen minimaal zijn. Ook hoeft het water niet te worden verhit tot minimaal 65 graden om Legionella-besmettingen te voorkomen [Oesterholt & Van der Kooij, 2003, Boer, 2008, IJzerman 2009].

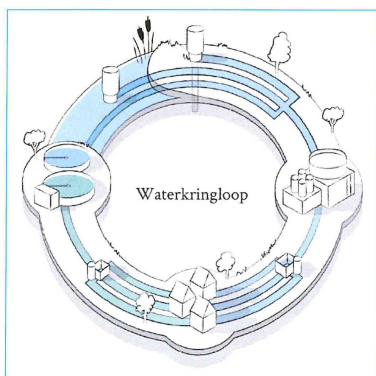
People:

Kijkend naar het "People" aspect zullen door de overgang naar het volstrooms-behandelen van het drinkwater, watergerelateerde ziekten tot nul worden gereduceerd. Legionella-besmetting via het douchewater komt niet meer voor, maar ook andere bacteriologisch en/of viraal gerelateerde watergerelateerde ziekten verdwijnen.

Verder zal de discussie rondom mogelijke gezondheidsrisico's in relatie tot de chemische samenstelling van het drinkwater door de totale afwezigheid van welke chemische verontreiniging dan ook definitief tot het verleden behoren [Krewski *et al.*, 2002, Oost, 2011, Murphy *et al.*, 2012].

Profit:

Op het "Profit"-gebied is er winst te behalen door het minder hoeven spuien van het leidingnet door de afwezigheid van sediment, immers er wordt deeltjesvrij drinkwater geproduceerd. Verder vallen de kosten voor chemische en bacteriologische analysekosten veel lager uit, zowel door het kleinere aantal zuiveringsstappen als wel het minder hoeven te controleren van de drinkwaterkwaliteit tijdens transport en levering. Door het niet meer te hoeven voorkomen van Legionella in het drinkwater, zijn de kosten voor Legionella-preventie en bestrijding tot nul gereduceerd. Op dit moment liggen deze kosten alleen al voor Nederland rond de 50 miljoen Euro per jaar [Boer, 2008]. En tot slot gaan energiekosten en kosten voor kalkverwijdering lager uitvallen door het ontbreken of het minimaliseren van de kalkafzetting op sanitair en warmwaterapparatuur.

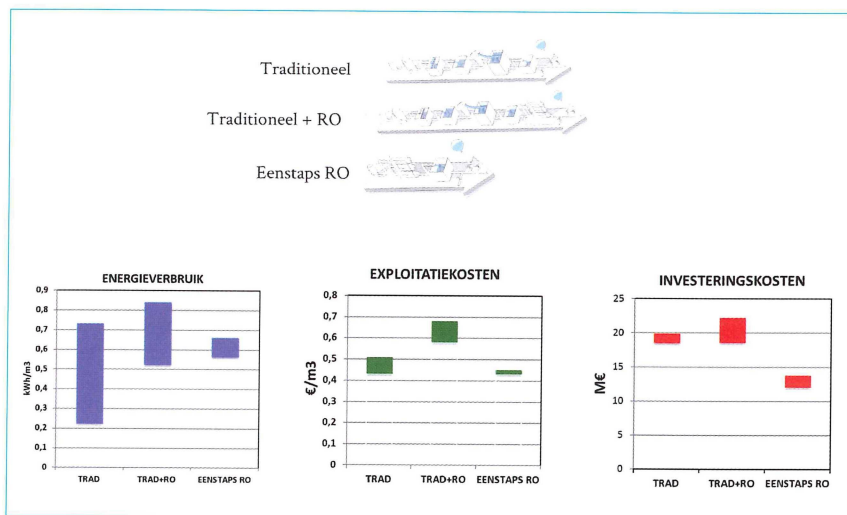


Sluiten van de waterkringloop

Het sluiten van de waterkringloop op decentrale schaal, wijk of stadsniveau, staat vandaag de dag steeds meer in de belangstelling. Drijvende kracht hierachter is zeker niet alleen het duurzamer om willen gaan met water, maar ook de technologische mogelijkheden om op relatief kleine schaal grondstoffen (stikstof en fosfor) en energie uit het huishoudelijke afvalwater te halen. Verder spelen hierbij de lagere investerings- en

exploitatiekosten (energie) door kortere transportafstanden voor zowel drink- als afvalwater een rol.

Echter in het hergebruik van het water schuilt een gevaar en dat is de accumulatie van bijvoorbeeld zware metalen, medicijnresten, organische microverontreinigingen, nanodeeltjes, of andere nu nog onbekende toxische stoffen. Door het niet voor de volle 100% verwijderen van deze stoffen in de afvalwater- of drinkwaterzuivering blijven deze stoffen in de waterkringloop zitten en zullen deze op termijn leiden tot ontoelaatbare concentraties als het gaat om de volksgezondheid. Wil men dus op decentraal niveau vanuit duurzaamheid de waterkringloop sluiten, dan zullen de eerder genoemde stoffen voor de volle 100% verwijderd moeten worden. Eenstapsmembraanfiltratie is hier net als bij de "normale" drinkwaterzuivering het antwoord op. De ongekend hoge verwijderingsrendementen die met membranen gehaald kunnen worden, sluiten accumulatie van ongewenste stoffen uit of reduceren de kans hierop tot een absoluut minimum ten opzichte van. de huidige standaard gebruikelijke chemische, biologische of adsorptieprocessen zoals zandfilters en actief koolfiltratie.



Tabel 1: Investerings- en exploitatiekosten voor de verschillende zuiveringsconcepten [capaciteit 1000 m³/uur]; traditioneel, traditioneel met deelstroom membraanfiltratie en volstroom eenstapsmembraanfiltratie.

Wat gaat dat kosten?



Kosten

Tot nu toe is er alleen maar ingezoomd op de voordelen en mogelijkheden van eenstapsmembraanfiltratie als het gaat om de onberispelijke drinkwaterkwaliteit, het verrassingsvrije leveren van drinkwater, de duurzaamheidsaspecten en andere mogelijke voordelen van het toepassen van dit zuiveringsconcept.

Maar we blijven toch Nederlanders, dus de vraag "Wat gaat dit allemaal wel niet kosten" zal bij menigene van u toch opdoemen of al naar boven zijn gekomen. Het antwoord op deze vraag staat in Tabel 1. In deze tabel worden de investerings- en exploitatiekosten van de drie typen drinkwaterzuiveringen; traditionele, traditionele met deelstroom-membraanfiltratie en volstroom eenstapsmembraanfiltratie met elkaar vergeleken.

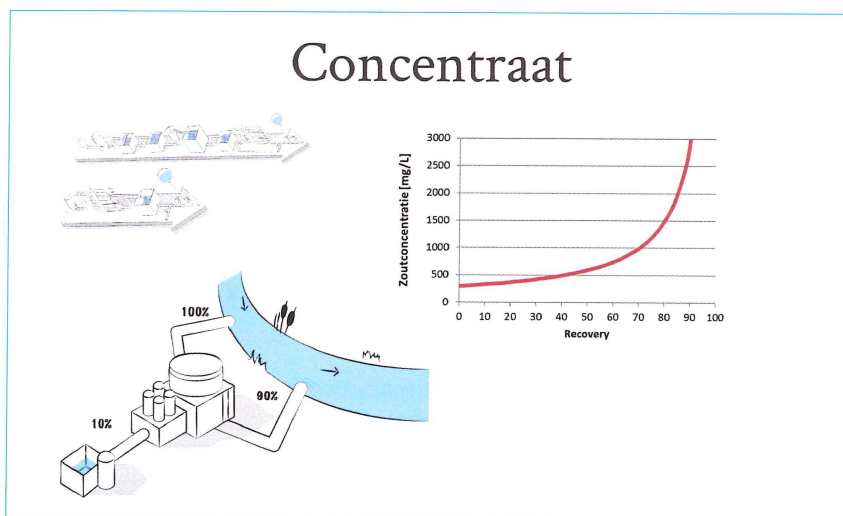
Tabel 1 laat zien dat volstroom eenstapsmembraanfiltratie ten opzichte van de andere twee "traditionele" zuiveringsconcepten qua investeringskosten gunstiger uitvalt, 12 tot 13 miljoen € ten opzichte van 18 tot 22 miljoen € voor de twee andere [WE Consult, 2013]. Ook de exploitatiekosten zijn gunstiger, deze zijn vergelijkbaar met die van de traditionele zuivering maar liggen onder die van de traditionele zuivering inclusief deelstroom membraanfiltratie. Voor wat betreft de energiekosten scoort volstroom eenstapsmembraanfiltratie, zoals verwacht kan worden, neutraal en dus niet significant hoger of lager dan de beide andere.

Concentraat problematiek

Een van de belemmeringen van het toepassen van membraanfiltratie in het algemeen, zijn de problemen rond het lozen van de vrijkomende concentraatstroom [Mauguin & Corsin, 2005, Nederlof *et al.*, 2005, Perez-Gonzales *et al.*, 2012]. Vanwege het feit dat membraanfiltratie een puur fysisch proces is en er dus geen conversie plaatsvindt van stoffen, verlaten alle door het membraan tegengehouden stoffen via de concentraatstroom het systeem. Verder raken we via deze stroom een deel van het water kwijt. In het algemeen wordt gestreefd naar een maximale recovery, zoveel mogelijk drinkwater produceren uit de gebruikte drinkwaterbron. Dit is met name het geval wanneer grondwater wordt gebruikt als drinkwaterbron. Een tweede,

meer algemene reden, om te streven naar een zo hoog mogelijke recovery, wordt ingegeven door de kosten van de voorgeschakelde zuiveringsstappen. Zoals al eerder is geschetst, wordt het voedingswater van een Nanofiltratie (NF) of Omgekeerde Osmose (RO) installatie meestal vergaand vorgezuiverd door onder andere een flocculatie/coagulatie stap, een zandfilter of ultrafiltratie, een andere vorm van membraanfiltratie gebaseerd op membranen met een grotere poriegrootte. Om nu de voorzuiveringskosten zoveel mogelijk te beperken wordt er uiteraard gestreefd naar een hoge recovery, op die manier worden de voorzuiveringskosten per kubieke meter geproduceerd drinkwater zoveel mogelijk gereduceerd.

Er wordt dus gestreefd naar een maximale recovery vanwege de voorbehandelingskosten en ook om de grondwaterwinvergunning volledig uit te nutten. Die maximale recovery heeft als groot nadeel dat de vrijkomende concentraatstroom vanwege de hoge concentratie aan zouten en andere stoffen lastig te lozen is op het oppervlaktewater. Figuur 21 laat het effect van de recovery zien op de concentratie aan zouten in de vrijkomende concentraatstroom.



Figuur 21: Invloed van de recovery op de zoutconcentratie van de vrijkomende concentraatstroom [zoutconcentratie voeding: 250 mg/l, 100% retentie].

Een verhoging van de recovery van 50 naar 90% leidt tot een stijging van de zoutconcentratie van 500 naar 2500 mg/l op basis van een beginconcentratie in de voeding van 250 mg/l en 100% retentie.

Dit streven naar een maximale recovery heeft iets tegenstrijdig in zich, qua kosten en uitnutten van de vergunning zo hoog mogelijk, qua lozing het liefst zo laag mogelijk, minimale effecten op de omgeving door lage zoutconcentratie in het concentraat. Op dit moment winnen, al dan niet terecht, de kosten en in het geval van grondwater het maximale uitnutten van de vergunning het van het minimaliseren van de omgevingseffecten.

Door het gaan toepassen van volstroom eenstapsmembraanfiltratie als zuiveringsconcept is hier een verandering in aan te brengen, zeker wanneer oppervlaktewater of zeewater als drinkwaterbron dient [*Figuur 21, linksonder*]. Door het ontbreken van een uitgebreide voorzuivering in combinatie met het toepassen van zogenaamde energy recovery units [ECU] om energie (lees: druk) uit de vrijkomende concentraatstroom terug te winnen, maakt dat het opereren van membraanfiltratie-installaties onder lage recovery-condities binnen handbereik komt. Hiermee zullen de lozingsproblemen, de vermeende hoge zoutconcentraties, van het vrijkomende concentraat tot het verleden gaan behoren.

ONDERZOEK

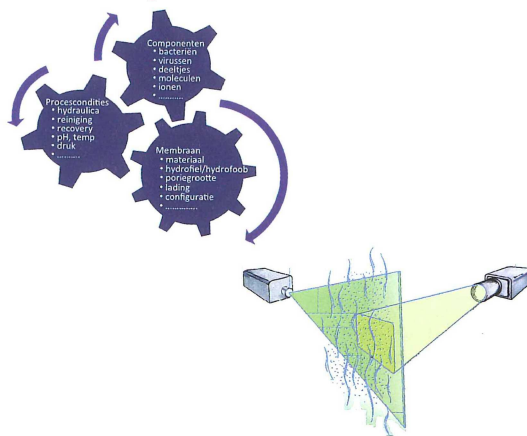
Eenstapsmembraanfiltratie

Het concept van eenstapsmembraanfiltratie is nog geen “proven technology”, zeker als het om toepassingen gaat waar zoet of brak oppervlaktewater als drinkwaterbron gebruikt wordt. Voor grondwater ligt dit iets genuanceerder, zeker als het gaat om anaeroob diep grondwater als bron, binnen de verschillende drinkwaterbedrijven worden NF en RO membraanfiltraties al wel ingezet, maar als een deelstroomsbehandeling, dus naast een traditionele drinkwaterzuivering [Van der Meer & Van Winkelen, 2001, Rietman, 2006].

Om van dit concept een bewezen, robuuste en betrouwbare zuiveringstechnologie te maken, is zowel praktijkgericht als fundamenteel onderzoek nodig. Samen met Bas Heijman als supervisor bestudeert Amir Haidiri, één van mijn promovendi, de drie belangrijkste actoren van het membraanfiltratieproces: de procescondities (druk, temperatuur, debiet, enzovoort), het membraan (waaronder materiaal, configuratie en lading) en de componenten (onder andere ionen, moleculen, bacteriën en deeltjes) [*Figuur 22*].

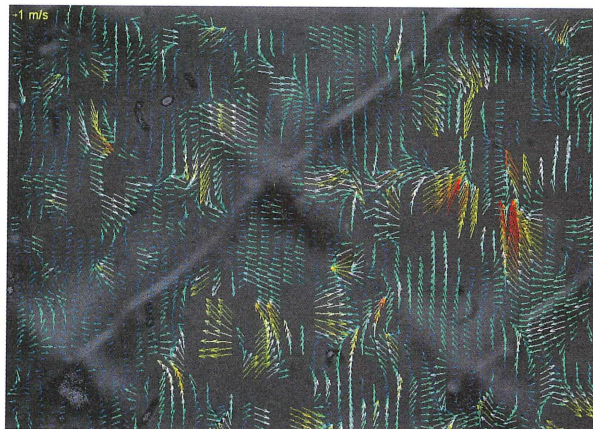
Met behulp van geavanceerde lasertechnologie in combinatie met een high-speed camera is hij in staat om de stromingsbaan van individuele deeltjes in een voedingskanaal in beeld te brengen [Zaruba *et al.*, 2005, Gimmelshtein &

Onderzoek éénstaps membraanfiltratie (Amir Haidiri)



Figuur 22: De drie belangrijkste actoren binnen het membraanfiltratieproces.

Semiat, 2005, Ngenna, 2010]. Op deze manier kan op een directe en visueel zichtbare wijze de interactie tussen de, in dit geval, deeltjes en het membraan- of spaceroppervlak inzichtelijk worden gemaakt [Figuur 23].



Figuur 23: Stromingsrichting en snelheid van de diverse deeltjes in een voedingskanaal. [blauw lage snelheid, rood hoge snelheid].

Uit deze stromingsbanen is al dan niet met behulp van mathematische modellen af te leiden welke interacties op deeltjesniveau nu juist wel of geen rol spelen en wat de invloeden zijn van de verschillende procescondities zoals voedingssnelheid, recovery en permeaatflux. Het ultieme streven is natuurlijk totaal geen interactie tussen membraan en spacer en welke componenten dan ook. Men wil te allen tijde voorkomen dat er (bio)fouling [Berenschenko, 2010, Marin *et al.*, 2011, Loosdrecht *et al.*, 2012], scaling of simpel verstopping van

het membraan optreedt [Le-Clech *et al.*, 2006]. De praktijk is echter weerbarstiger, men heeft binnen vrijwel alle toepassingsgebieden van membraanfiltratie te maken met de een of andere vorm van membraan- of spacervervuiling. Afhankelijk van de mate en het type vervuiling kan de frequentie van reinigen sterk variëren; van één keer per jaar tot één keer per tien minuten. Globaal kan er onderscheid gemaakt worden tussen drie reinigingsmethoden: fysisch, chemisch en mechanisch [Verberk, 2007, Zondervan & Roffel, 2007, Cornelissen *et al.*, 2007]. Het reinigingseffect van deze drie reinigingsmethoden kan met de eerder geschetste proefopstelling eenvoudig visueel zichtbaar gemaakt worden. Tevens kan op uitermate gestructureerde en gecontroleerde wijze de invloed van de diverse procescondities; lucht/water verhouding, reinigingstijd, concentratie reinigingschemicalie, type chemicalie (zuur, base), enzovoort eenvoudig in beeld gebracht worden. Iets wat in de praktijk bij grootschalige membraanfiltratie-installaties niet of nauwelijks mogelijk is.

Distributie



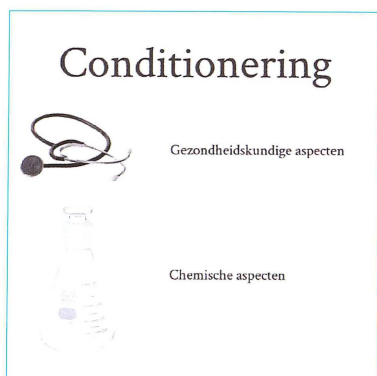
Leidingmateriaal

Door het concept van eenstapsmembraanfiltratie toe te passen op welke drinkwaterbron dan ook, is het mogelijk om drinkwater van een onberispelijke kwaliteit te produceren, eigenlijk dus het ideale plaatje voor de drinkwaterconsument, 24 uur per dag onberispelijk en verrassingsvrij drinkwater thuis uit de kraan. Dit stelt alleen vrijwel zeker nieuwe eisen aan het leidingmateriaal. Je wil voorkomen dat de verkregen hoge kwaliteit van

het drinkwater tijdens transport achteruit gaat door interactie respectievelijk wisselwerking met het leidingmateriaal. Uiteraard werd hier in verleden ook al op gelet en naar gehandeld, denk maar aan het grootschalig vervangen van de loden (dienst)waterleidingen, maar door de hoge drinkwaterkwaliteit die

bereikt wordt met eenstapsmembraanfiltratie zullen er mogelijk hogere eisen gesteld gaan worden aan het leidingmateriaal. Werd in het verleden uitloging mogelijk gemaskeerd door de "lagere" kwaliteit van het drinkwater, met het gaan toepassen van eenstapsmembraanfiltratie en dus een onberispelijke drinkwaterkwaliteit zal dit niet langer het geval zijn. De laagste concentratie van welke stof dan ook (metalen, zware metalen, organische verbindingen, polymeren, oplosmiddelen, losmiddelen, enzovoort) zullen direct "opvallen" en leiden tot een onnodige verslechtering van de drinkwaterkwaliteit.

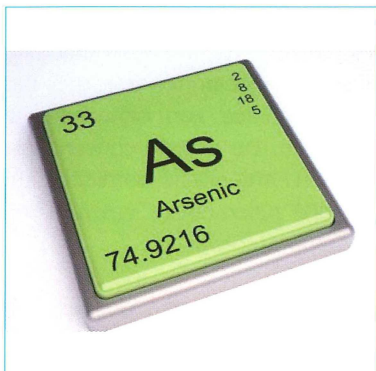
In lijn met misschien wel een van de historische pijlers van de Faculteit Civiele Techniek & Geowetenschappen zal dit een van de speerpunten van mijn onderzoeksprogramma worden, naast onderzoek naar de levensduur van leidingmateriaal (zoals PVC, HPE en PE) en de invloed van de omgeving (waaronder grondsoort, ligging en belasting) hierop.



Conditionering

Zoals eerder is aangegeven wordt de huidige samenstelling van het geproduceerde drinkwater grotendeels bepaald door het type bron in combinatie met eventuele seizoensinvloeden en variatie in bodemsamenstelling. Dit ziet men ook terug in de drinkwaternormen, elke norm laat een bepaalde variatie toe of het nu gaat om iets eenvoudigs zoals de zuurgraad tot de meer complexere zaken als organische microverontreinigingen.

Het eenstapsmembraanfiltratie concept biedt echter de mogelijkheid om ongeacht de bron, de samenstelling van het uiteindelijke drinkwater voor de volle 100% te laten bepalen op wat nu werkelijk noodzakelijk is wat betreft chemische en gezondheidskundige aspecten. Binnen de vakgroep zal nader onderzoek worden verricht naar wat die optimale chemische samenstelling dan zou moeten zijn. Met name het kalkafzettend zijn van het drinkwater zal een van de speerpunten zijn binnen dit deelonderzoek. Wat betreft de gezondheidskundige eisen, dit zal in nauwe samenwerking met medische en epidemiologische deskundigen nader moeten worden uitgezocht.



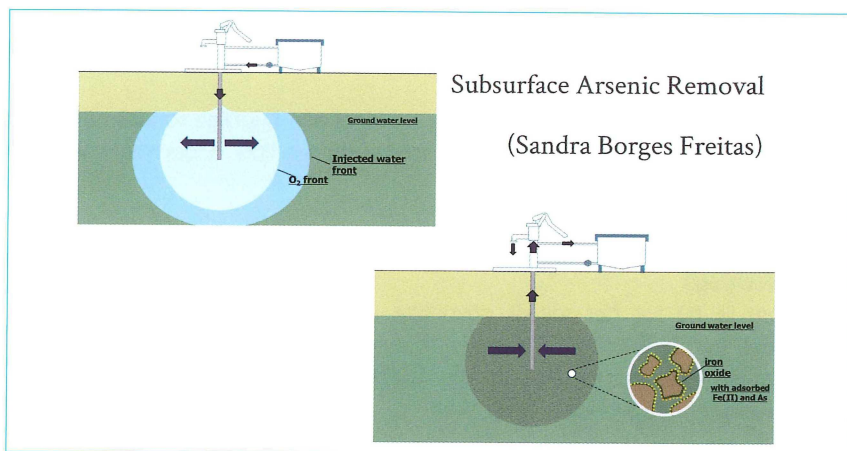
Arseenverwijdering

Een totaal ander onderzoek is het onderzoek naar Arseenverwijdering in derde wereld landen. Hoewel dit geen directe link heeft met het onderzoek rond eenstapsmembraanfiltratie, is het wel een onderwerp dat me zeer na aan het hart ligt [Petrusevski et al., 2007, Petrusevski et al., 2008]. Wereldwijd hebben circa 50 miljoen mensen te kampen met drinkwater dat verontreinigd is met Arseen. In het kader van een zogenaamd NWO-WOTRO

project wordt door promovenda Sandra Borges Freitas nader onderzoek verricht naar Subsurface Arsenic Removal (SAR) [Figuur 24]. Deze SAR-technologie is voortgekomen uit het eerdere promotieonderzoek van Doris van Halem [Halem, 2011]. In dit vijf jaar durende onderzoeksproject wordt nauw samengewerkt tussen de volgende partners uit Bangladesh en Nederland: Dhaka University, Department of Public Health Engineering Bangladesh, UNICEF, WaterAid, Wageningen Universiteit, UNESCO-IHE, VU Amsterdam en TU Delft.

WOTRO is een divisie van NWO die zich richt op de ondersteuning van wetenschappelijk onderzoek op het gebied van ontwikkelingsvraagstukken, in het bijzonder armoedeverlichting en duurzame ontwikkeling.

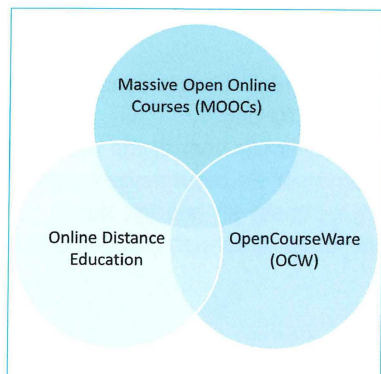
Doel van het vijfjarige project is om de sociale acceptatie, de sociaal-technologische haalbaarheid en de duurzaamheid van de Subsurface Arsenic Removal-technologie te onderzoeken in de in geohydrologisch en sociaal opzicht zeer diverse rurale gebieden van Bangladesh. De arseenvergiftiging van drinkwater uit waterpompen in Bangladesh is een groot gezondheids- en ontwikkelingsprobleem dat vooral degenen treft die het meest afhankelijk zijn van deze drinkwaterbronnen: de armen op het platteland. De Subsurface Arsenic Removal-technologie (SAR) is ontwikkeld op basis van de bestaande infrastructuur van handwaterpompen en zorgt ervoor dat het arseen in de diepere bodemlagen blijft. Daardoor heeft deze technologie cruciale voordelen boven andere huishoudelijke/gemeenschappelijke arseen-verwijderingsfilters: er zijn geen kostbare filtermaterialen nodig, de waterpomp blijft de belangrijkste drinkwaterbron, eventueel benodigde extra materialen zijn algemeen verkrijgbaar, ook ijzer wordt uit het water verwijderd en de waterkwaliteit kan beter gecontroleerd worden.



Figuur 24: Principe van Subsurface Arsenic Removal.

Fase 1: het injecteren van zuurstofrijk grondwater (linksboven) gevolgd door het oppompen van Arseenvrij grondwater (Fase 2 :rechtsonder)

Hoewel er inmiddels uitgebreide praktische ervaring is opgedaan met de verwijdering van ijzer en mangaan uit diepere grondlagen in Europa, is het onderzoek naar de verwijdering van arseen uit diepere grondlagen nieuw. Om SAR op grote schaal in Bangladesh toe te kunnen passen is het van het grootste belang dat de geochemische en microbiële processen van ijzer -en arseen(im) mobilisatie onder veranderende redoxomstandigheden in de natuurlijke, uit meerdere componenten bestaande diepere grondlagen volledig bekend zijn. Ook moet onderzocht worden of SAR niet botst met plaatselijke religieuze gebruiken en gewoonten met betrekking tot gezondheid en watergebruik en de plaatselijke opvattingen over risicobeheersing.



ONDERWIJS

Als laatste wil ik het met u hebben over het onderwijs binnen de TU Delft. Ik draag dit een zeer warm hart toe. Als gevolg van mijn deeltijd hoogleraarschap is mijn bijdrage op dit moment beperkt tot het geven van een deel van het college Drinking Water Treatment (CEI4475), zijnde de theorie en toepassingen van Nanofiltratie (NF) en Reverse Osmosis

(RO) binnen de drinkwaterbereiding. Daarnaast verzorg ik samen met Doris van Halem en Amir Haidiri een werkcollege rondom NF en RO.

Verder lever ik via Anke Grefte en Peter de Moel een bijdrage rondom dezelfde onderwerpen NF en RO aan de verschillende on-line onderwijs varianten (MOOC, OCW en ODE).

DANKWOORD

Dan kom ik nu tot het meest gevoelige maar misschien ook belangrijkste onderdeel, het dankwoord. Graag zou ik een ieder persoonlijk willen bedanken maar dat is helaas onmogelijk. Zonder anderen te kort te doen, wil ik toch een aantal van u in het bijzonder bedanken.

Allereerst wil ik het College van Bestuur en de Rector Magnificus van de TU Delft bedanken voor het in mij gestelde vertrouwen dat geleid heeft tot mijn aanstelling als deeltijdschoolleerling.

Dan wil ik mijn collega's van de sectie Gezondheidstechniek van de TU Delft bedanken en in het bijzonder mijn collega hoogleraren Jules van Lier, Luuk Rietveld, Gertjan Medema, Jan Peter van der Hoek, Francois Clemens en Arne Verliepde. Ik hoop in de toekomst nog intensiever met jullie samen te kunnen werken.

Daarnaast wil ik Bas Heijman, Doris van Halem, Peter de Moel en in het verleden Jasper Verberk bedanken voor hun ondersteuning van zowel mijn afstudeerders als mijn twee promovendi, Amir Haidiri en Sandra Borges Freitas.

Om bij de laatste twee te blijven, Amir en Sandra, ik vind het een voorrecht om met jullie samen te mogen werken.

Beste Mieke en Jennifer zonder jullie secretariële ondersteuning vanuit de TU zou alles minder ordentelijk verlopen op mijn vaste TU-dag.

Verder wil ik emeritus-hoogleraar Hans van Dijk bedanken voor al zijn wijsheid, **en** voor het voortijdig verlaten van de TU, ruim voor de pensioengerechtigde leeftijd. Je hebt hierdoor voor mij de weg vrij gemaakt en begrijpt dat ik het een enorme eer vind om een deel van jouw leerstoel te kunnen overnemen en verder te gaan invullen de komende jaren.

De vakgroep Membraantechnologie van de Universiteit Twente onder de bezielende leiding van Prof Matthias Wessling wil ik bedanken voor het feit dat ik zes jaar deel hebben mogen uitmaken van zijn fantastische onderzoeksclub.

Mijn voormalige werkgever Vitens wil ik bedanken voor het destijds mogelijk maken om mijn werk binnen Vitens te combineren met mijn deeltijd-hoogleraarschap.

Verder wil ik de RvC van mijn huidige werkgever Oasen bedanken. Jullie stonden er bij mijn aanstelling op om mijn deeltijdhoogleraarschap te blijven combineren met mijn werk.

Mijn dank gaat ook uit naar al mijn collega's binnen Oasen in het bijzonder het MT en het secretariaat, jullie stimulans en interesse in mijn hoogleraarschap maken dat ik iedere donderdag met veel plezier afreis naar Delft.

En niet te vergeten Joost van Luijt voor het werk wat hij aan deze presentatie heeft gehad.

Ook wil ik Peter Wessels van WE Consult bedanken, al zo'n 20 jaar zijn wij elkaars sparring partner.

Mijn Ouders, mijn schoonouders en verdere familie, jullie al jarenlange warme en oprechte belangstelling in mij waardeert ik enorm.

Lieve Corine, opnieuw mag en kan ik vanuit eenzelfde hoedanigheid je bedanken voor jouw tomeloze energie en interesse in alles wat ik doe en denk, zowel privé als zakelijk. Je wijze raad, je kijk op zaken, je humor en je relativering maken steeds opnieuw dat mijn leven een feest is.

Sven, samen met Yldau, en Jim, hoe ouder jullie worden, hoe meer we samen kunnen delen. Jullie belangstelling voor mijn werk, maar ook onze gezamenlijke hobby's zijn erg waardevol voor mij. Jullie jeugdige, ongedwongen en zuivere kijk op het leven, zorgen ervoor dat ik met beide benen op de grond blijf staan en beseft dat er meer in het leven is dan water maken.

Ik heb gezegd.

REFERENTIES

- Aa, N.G.F.M. van der, Dijkman, E., Bijlsma, L., Emke, E., Ven, B.M. van de, Nuijs, A.L.N. van, Voogt, P. de (2010). *Drugs of abuse and tranquilizers in Dutch surface waters, drinking water and wastewater - Results of screening monitoring 2009*. RIVM rapport 703719064/2010, Bilthoven, Nederland.
- Baker, M.N., and Taras, M.J. (1981). *The quest for pure water: The history of the twentieth century*. Vol 1 & 2. Denver: AWWA.
- Bereschenko, L.A. (2010). *Biofilm Development: On New and Cleaned Membrane Surfaces.* Ph.D. Thesis, 2010. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Binnie, C., Kimber, M., and Smethurst, G. (2002). *Basic Water Treatment (3rd ed.)*. London: Thomas Telford Ltd.
- Boer, J.W. den (2008). *Legionnaires' disease in the Netherlands*. Ph.D. Thesis. Universiteit van Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands.
- Buchan, J. (2003). *Crowded with genius: the Scottish enlightenment: Edinburgh's moment of the mind*. New York: harper Collins.
- Carson, R. (1962). *Silent Springs*. Houghton Mifflin Company, Boston, USA.
- Christmas, K. (1998). *The history of chlorine*. Waterworld, 14 (8), 66-67.
- Cornelissen, E.R., Vrouwenvelder, J.S., Heijman, S.G.J., Viallefont, X.D., Kooij, D. van der, and Wessels, L.P. (2007). *Periodic air/water cleaning for control of biofouling in spiral wound membrane elements*. Journal of Membrane Science, 287 (1), 94.
- Cotruvo, J.A. (1985). *Organic micropollutants in drinking water: an overview*. The Science of the total environment, 47, 7-26.
- Delay M., and Frimmel, F. (2012). *Nanoparticles in aquatic systems*. Anal. Bioanal. Chem. 402, 583-592.
- Dobell, C. (1932). *Anthony van Leeuwenhoek and His Little Animals*, Amsterdam: Swets & Zeitlinger.

- EPA (2000). *The History of Drinking Water Treatment*. Environmental Protection Agency, Office of Water (4606), Fact Sheet EPA-816-F-00-006, USA.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., and Melin T. (2007). *State-of-the-art of reverse osmosis desalination*. Desalination, 2007. 216 (1-3), 1.
- Gimmelshtein, M.M. and Semiat, R. (2005) *Investigation of flow next to membrane walls*. Journal of Membrane Science, 264 (1-2), 137.
- Graveland, A., Dijk, J.C. van, Moel, P.J. de, Oomen, J.H.C.M (1983). *Developments in water softening by means of pellet reactors*. Journal AWWA, 75 (12), 619 625.
- Halem, D. van (2011). *Subsurface iron and arsenic removal for drinking water treatment in Bangladesh*. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Heberer, T. (2002). *Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment: a review of recent data*. Toxicology letters, 131, 5-17.
- Hoek, J.P. van der (2012). *Topkwaliteit drinkwater: nimmer vanzelfsprekend*. Intreerede TU Delft, 27 januari 2012.
- Houtman, C.J. (2010). *Emerging contaminants in surface waters and their relevance for the production of drinking water in Europe*, Journal of Integrative Environmental Sciences, 1-25.
- Huisman, L., Wood, W.E. (1974). *Slow Sand Filtration*. World Health Organization, Geneva. ISBN 92-4-154037-0.
- Inspectie Leefomgeving en Transport (2012). *De kwaliteit van het drinkwater, in 2011*. Inspectie Leefomgeving en Transport Water, Bodem en Bouwen, Utrecht, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Kamp, P.C., Kruithof, J.C. and Folmer, H.C. (2000). *UF/RO treatment plant Heemskerk: from challenge to full scale application*. Desalination, 131, 27.
- Kernteam Waterketen (2009). *Verbindend Water - Langetermijnvisie Waterketen - Een visie voor en door Rijk, Provincies, Waterschappen*,

Gemeenten en Drinkwaterbedrijven. Rapport Vewin, Unie van Waterschappen, IPO, VNG en Ministerie VROM.

Kooij, D. van der, Vrouwenvelder, J.S., and Veenendaal, H.R. (2003). *Elucidation and control of biofilm formation processes in water treatment and distribution using the Unified Biofilm Approach*, Water Sci Technol. 2003,47(5), 83-90.

Kozisek F. (2004). *Health risks from drinking demineralized water*. World Health Organization, Geneva. Rolling revision of the WHO Guideline for drinking-water quality, 1-21.

Krewski, D., Balbus, J., Butler-Jones, D., Haas, C., Isaac-Renton, J., Roberts, K.J., and Sinclair, M. (2002). *Managing health risk from drinking water - A report to the Walkerton inquiry*. Journal of Toxicology and Environmental Health -Part A., 65 (21), 1635-1823.

Kuiper, M., Wullings, B., en Kooij, D van der. (2005) *Legionella pneumophila* groeit in biofilms uitsluitend op protozoa. H2O, 38 (7), 51-53.

Kumar, M., and Puri, A. (2012). *A review of permissible limits of drinking water*. Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine, 16 (1), 40-44.

Le-Clech, P., Chen, V., and Fane, T.A.G. (2006). *Review: Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment*. Journal of Membrane Science, 284, 17-53.

Lee, P.L., Arnot ,T.C., and Mattia, D. (2011). *A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-Development to date and future potential*. Journal of Membrane Science, 370, 1-22.

Liu, G. (2013). *Microbiological water quality in drinking water distribution systems: Intergral study of bulk water, suspended solids, loose deposits, and pipe wall biofilm*. Ph.D. Thesis, 2013. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Loo, S-L., Fane, A.G., Krantz, W.B., and Lim, T.T. (2012). *Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria*. Water Research, 46, 3125-3151.

Loosdrecht, M.C.M. van, Berenschenko, L., Radu, A., Kruithof, J.C., Picioreanu, C., Johns, M.L., and Vrouwenvelder, J.S. (2012). *New Approaches to characterizing and understanding biofouling of spiral wound membrane systems*. Water Science & Technology, 66 (1), 88-94.

Mallevialle, J., Odendaal, P.E., and Wiesner, M.R. (1996). *Water treatment membrane processes*, New York: McGraw-Hill.

Matin, A., Khan, Z., Zaidi, S.M.J., and Boyce, M.C. (2011). *Biofouling in reverse osmosis membranes for seawater desalination: Phenomena and prevention*. Desalination, 281, 1-16.

Mauguin, G., and Corsin, P. (2005). *Concentrate and other waste disposals from SWRO plants: characterization and reduction of their environmental impact*. Desalination, 182 (1-3), 355.

Medema, G.J. (2010) *Water en gezondheid*. Intreerede TU Delft, 28 mei 2010.

Meer, W.G.J. van der, and Winkelen, J.C. van (2001) *Method for purifying water, in particular ground water, under anaerobic conditions, using a membrane filtration unit, a device for purifying water, as well as drinking water obtained by such a method*. European Patent 1034139 (2001), US Patent 6395182 (2002).

Ministerie Infrastructuur en Milieu, 2009. *Drinkwaterwet*, 18 juli 2009, BWBR0026338

Moel, P.J. de, Verberk, J.Q.J.C., and Dijk, J.C. van (2006). *Drinking Water*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. ISBN 981-256-836-0.

Moglia, M., Sharma, A., Alexander, K., Mankad, A. (2011). *Perceived performance of decentralised water systems: a system approach*. Water Science & Technology: Water Supply, 11(5), 516-526.

Mons M.N., Hoogenboom A.C., and Noij, T.H.M. (2003). *Pharmaceuticals and drinking water supply in the Netherlands*. Rapport Kiwa BTO 2003.040, Nieuwegein, Nederland.

Murphy, E.A., Post G.B., Buckley, B.T., Lippincott, R.L. and Robson, M.G. (2012). *Future challenges to protecting public health from drinking water*

contaminants. Annual Review of Public Health, 33, 209-224.

Nederlof, M.M., Paassen, J.A.M. van, and Jong, R. (2005). *Nanofiltration concentrate disposal: experiences in The Netherlands*. Desalination, 178 (1-3), 303.

Ngene, I. (2010) *Real time visual characterization of membrane fouling and cleaning*. Ph.D. Thesis, Mesa+, University of Twente, The Netherlands.

Oosterholt, F, and Kooij, D. van der (2003) *Legionella in woninginstallaties*. H2O, 4, 19-20.

Oost, R. van der. (2011). *Emerging substances: what about emerging risks? Proceedings of the 8th IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Technologies*, Amsterdam, the Netherlands.

Outwater, A. (1996). *Water: A natural history*. New York: Basic Books.

Perez-Gonzales, A., Urriaga, A.M., Ibanez, R. and Ortiz, J. (2012). *State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates*. Water Research, 46, 267-283.

Petrusevski, B., Meer, W.G.J. van der, Baker, J., Kruis, F., Sharma. S.K., and Schippers J.C. (2007). *Innovative approach for treatment of arsenic contaminated groundwater in Central Europe*. Water Sci. Technol.; Water Supply, 7(3), 131-138.

Petrusevski, B, Sharma, S.K., Meer, W.G.J. van der, Kruis, F., Khan, M., Barua, M., and Schippers J.C. (2008). *Four years of development and field-testing of IHE arsenic removal family filter in rural Bangladesh*. Water Sci. Technol., 58(1), 53-58.

Reststoffenunie Waterleidingbedrijven (2012). *Jaarbericht 2011*. Juni 2012, Nieuwegein, Nederland.

Ridder, D. de (2012). Adsorption of organic micropollutants onto activated carbon and zeolites. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology. Water Management Academic Press. ISBN 978-94-6186-068-2.

- Rietman, B. (2006). *Anaerobic nanofiltration in drinking water production - 7 years of successful operations*. Techneau Workshop "Operational experience and research results", December 14th- 15th 2006, Aachen, Germany.
- Schäfer, I., Fane, A.G., and Waite, T.D. (2003) *Nanofiltration: Principles and Applications*, Oxford, Elsevier Advanced Technology.
- Schierbeek, A. (1960). *De Van Leeuwenhoekbrief van 9 Oktober 1676*, Delft: Nederlandse Gist- en Spiritusfabriek.
- Schriks, M., Heringa, M.N., Kooi, M.M.E. van der, Voogt, P. de, Wezel, A.P. van (2010). *Toxicological relevance of emerging contaminants for drinking water quality*. Water Research, 44, 461-476.
- Schwarzenbach, R.P., Escher, B.I., Kenner, F., Hofstetter, T.B., Johnson, C.A. , Gunten, U. von, and Wehrli, B. (2006). *The challenge of micropollutants in aquatic systems*. Science 313: 1072-1077.
- Storey, M.V., Gaag, B. van der, and Burns, B.P. (2011). *Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems*. Water Research, 45(2), 741-747.
- Struijs, J., Meen, D. van der, Peijnenburg, W.J.G.M., Heugens, E., Jong, W. de, Hagens, W., Heer, C. de, Hofman, J., and E. Roex, E. (2007). *Nanodeeltjes in water*. RIVM Rapport 6078030001, ISBN 9789036914079, Bilthoven, Nederland.
- Taylor, M., Ross, K., and Bentham, R. (2009). *Legionella, Protozoa, and Biofilms: Interactions within complex microbial systems*. Microb. Ecol., 58, 538-547.
- Verberk, J.Q.J.C. (2005). *Application of air in membrane filtration*. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Versteegh. J.F.M., Stolker A.A.M., Niesing W., and Muller, J.J.A. (2002). *Geneesmiddelen in drinkwater en drinkwaterbronnen - Resultaten van het meetprogramma*. RIVM Rapport 703719004/2003. Bilthoven, Nederland.
- Vewin (2008). Drinkwaterstatistieken 2008 - *De watercyclus van bron tot kraan*. Rapport Vewin nr 2009/93/6259. Rijswijk, Nederland.

Vewin (2010). *Water in Zicht 2009*, Rapport Vewin nr 2010/102/6209. Rijswijk, Nederland.

Vreeburg J. (2007). *Discolouration in drinking water systems: a particular approach*. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.

WE Consult (2013). *Kostencalculatie drinkwaterzuivering*. Februari 2013, Vianen, Nederland.

WHO (2005). *Nutrients in drinking water*. WHO Press, Geneva, Switzerland.

Wilson, C. (1995). *The invisible world: early modern philosophy and the invention of the microscope*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

IJzerman, E.P.F. (2009). *Progress in diagnostic and prevention of Legionnaires' disease*. Ph.D. Thesis. Rijksuniversiteit Groningen, Groningen, The Netherlands.

Zaruba, A., Krepper, E., Prasser, H.-M., and Reddy Vanga, B.N. (2005). *Experimental study on bubble motion in a rectangular bubble column using high-speed video observations*. Flow Measurement and Instrumentation, 16 (5), 277.

Zondervan, E., and Roffel, B. (2007) *Evaluation of different cleaning agents used for cleaning ultra filtration membranes fouled by surface water*. Journal of Membrane Science, 304 (1-2), 40.