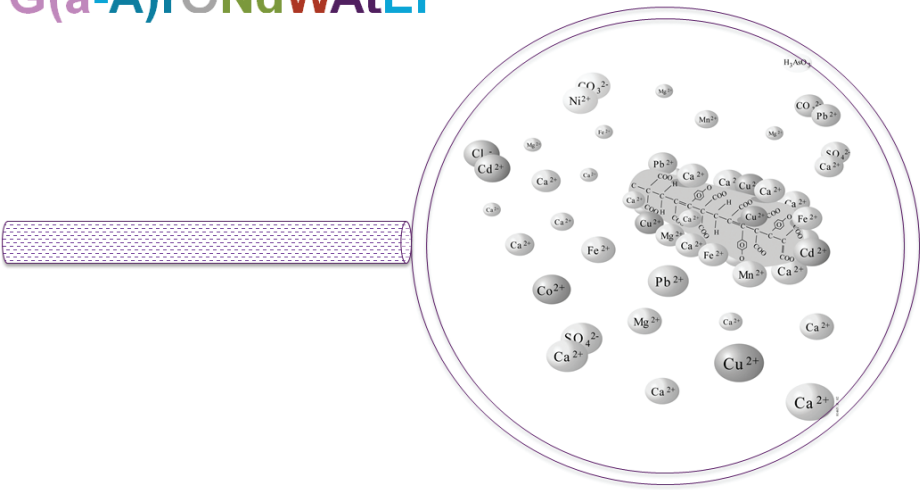
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

**Prof. dr. P.J. Stuijfzand**

# Speuren naar sporen in grondwater

## SPEuReN NaAr SPoReN In G(a-A)rONdWAtEr



TU Delft

Intreerede 17 maart 2017

# Speuren naar sporen in grondwater

Uitgesproken op 17 maart 2017
ter gelegenheid van de aanvaarding van
het ambt van bijzonder hoogleraar '(Chemische) hydrogeologie'
aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
van de Technische Universiteit Delft

door

**Prof. dr. P.J. Stuijfzand**

*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,*

Mijn intreerede gaat over ‘het speuren naar sporen in grondwater’. Velen van u zullen zich verwonderd hebben over de bijzondere schrijfwijze van deze titel en wat gekauwd hebben op het mini-rebusje m.b.t. grondwater. Dat rebusje had ik nodig omdat het element G of Gr niet bestaat, maar Ga en Ar wel, zodat je met G(a-A)r Gr krijgt. Als u pas dankzij anderen begreep dat in de titel de elementen uit het periodiek systeem der elementen versleuteld zijn, dan voldoet u helaas niet aan de toelatingseisen van mijn college, en moet u terug de middelbare schoolbanken in.
Als bijzonder hoogleraar ‘Chemische Hydrogeologie’ ga ik vooral academisch onderzoek en onderwijs doen op het gebied van kwaliteitsaspecten van grondwater in samenhang met bijna alles wat zich op en onder het aardoppervlak afspeelt. Van grondwateraanvulling t/m grondwaterwinning, van de natuurlijke invloeden van begroeiing en geochemische samenstelling van de ondergrond t/m allerlei menselijke invloeden, zoals zoutwaterintrusie, kunstmatige infiltratie van vervuild oppervlaktewater, koude-warmte opslag, landbouw, industriële en communale lozingen. Forensische hydrologie is daarvan een boeiend onderdeel, waarover de komende 35 minuten meer.

## Forensische hydrologie

Door te speuren naar sporen van bepaalde stoffen in grondwater kunnen we vroegtijdig een probleem identificeren (de concentratie is immers nog maar in uiterst lage concentraties aantoonbaar), maar ook die sporen gebruiken om te achterhalen waar het probleem vandaan komt en eventueel wie of welk natuurlijk proces schuldig is. Daarbij hebben we uiteraard ook kennis nodig over de opbouw van de ondergrond en de grondwaterstroming, èn ervaring. Alles bij elkaar betreden we dan het vakgebied van de forensische hydrologie (Fig.1), waarbij de in Fig.2 vermelde gereedschappen nodig zijn.

### Wat is forensische hydrologie?

**Forensisch** = oplossen van misdaad d.m.v. wetenschappelijke kennis of methoden

**Forensische hydrologie** = ~toepassing hydrogeochemische methode om:

- de verontreinigingsbron te detecteren: ***who did it?***
- de herkomst en route van het water te identificeren: ***how did it get on the site?***
- de ouderdom van het water te bepalen: ***when did it happen?***
- de ouderdom te controleren met wat je hydrologisch zou berekenen met Darcy: ***was it possible to happen at that time?***
- (bio)geochemische reacties te ontrafelen, verantwoordelijk voor transformatie / vertroubeling: ***which evidence has been wiped out?***

*Fig.1. Definitie en doelen van de forensische hydrologie*

*FIG. 2. De toolbox van elke hydro-detective, speurend naar sporen in (grond)water.*
*SEs = spore-elementen; OMIVE = organische microverontreinigingen, B&V = bacteriën en virussen.*

Centraal in het speurwerk staat de analyse van opgeloste en zwevende stoffen (Fig.3). We kunnen tegenwoordig routinematig ca. 150 van de 400 opgeloste anorganische stoffen (incl. species met verschillende lading en isotopen) analyseren, ~1000 van de ~$10^6$ opgeloste organische stoffen (incl. metabolieten en stoffen met afwijkende isotopen), en misschien 1000 van de ~$10^6$ verschillende zwevende stoffen.

Een cruciale rol is hierbij weggelegd voor de zogenaamde milieutracers, die van nature of door toedoen van menselijk handelen reeds in het water aanwezig zijn en dienst doen als indicatoren van de herkomst en ouderdom van het water. Een klein aantal herkomst-tracers is met hun eigenschappen en kosten gerubriceerd in Tabel 1, en zo ook een aantal dateringstracers in Tabel 2. De kunst is om tegen zo laag mogelijke kosten met zo groot mogelijke zekerheid uitspraken te doen.

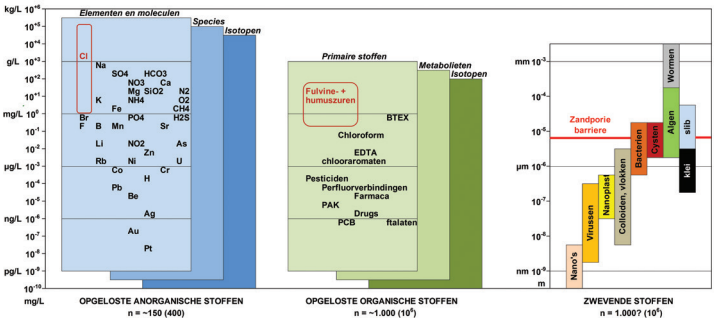



*FIG. 3. Overzicht van opgeloste en gesuspendeerde stoffen in water. Voor chloride en fulvine- + humuszuren (als koolstof) is het concentratiebereik in ons grondwater aangegeven, voor de overige opgeloste stoffen geldt een willekeurige, realistische concentratie.*

| Environmental tracers | Natural | Semi-Natural | Synthe-tic | Conser-vative | Reactive R = 1 | Reactive R > 1 | Lab. costs € | Ease + Cheap |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $^{2}H$, $^{18}O$ | X | | | X | | | 20-120 | X |
| Cl, Br | | X | | X | | | 50# | X |
| Electrical Conductivity | | X | | | X | | 5-10 | XX |
| HCO3, SO4 | | X | | | X | | 20, 50# | X |
| B, K, Li, Mg, Mo, Na, Sr | | X | | | | X | 50# | X |
| Gd-DTPA | | | X | X | | | 125? | |
| Pesticides: bentazone | | | X | X | | | ## | |

**# = multi-element analysis via ICP-MS + ICP-OES (50-72 elements)** **## single ca. 200, multi ca 1,200 €**

*TABEL 1. Overzicht van enkele herkomst-tracers met hun kenmerken en kosten.*

In lastige gevallen volstaat een enkele tracer niet, zoals Fig.4 laat zien. Het onderscheid tussen geïnfiltreerd Rijnwater en gebiedseigen duingrondwater op basis van alleen de Cl/Br-verhouding of alleen $^{18}O$ (de zware stabiele isotoop van zuurstof in het watermolecuul) is niet 100% correct, in combinatie (tegen elkaar geplot) daarentegen wel[1]. In duinen met kunstmatige infiltratie is dit onderscheid belangrijk, wanneer het waterbedrijf moet aantonen dat conform het Infiltratiebesluit Bodembescherming >95% van het geïnfiltreerde oppervlaktewater daadwerkelijk wordt teruggewonnen, of wanneer er vragen rijzen over de eventuele rol van dat water in de daling van de biodiversiteit in het duingebied.

Laatstgenoemde speelde vooral in de jaren 60 en 70 van de vorige eeuw, toen een gebrekkige voorzuivering en slechte oppervlaktewaterkwaliteit voor veel eutrofiëring zorgden. De Rijncommissie had graag beschikt over goede tracers van Rijnwater in het slepende proces tegen de Franse kalimijnen in de periode 1977-1990. Dan hadden zij er eerder en meer uitgesleept.

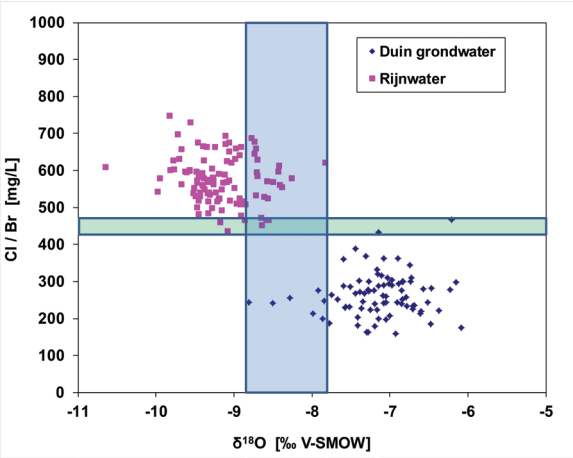



*FIG. 4. Combinatie van meerdere herkomst-tracers levert een beter onderscheid tussen watersoorten op. Enkelvoudig gebruik leidt tot overlap.*

Ook voor datering beschikken we over een ruime keuze aan mogelijke tracers en tracercombinaties (Tabel 2). Hierbij spelen kosten en complicaties bij zowel de bemonstering als interpretatie een grotere rol. Van de diverse methoden springen 2 eruit: datering via 'peak matching' en datering via radioactief verval. Het principe van peak matching is voor relatief jong grondwater (<75 jaar) betrekkelijk eenvoudig. Men gebruike b.v. het door Cook & Bohlke gereconstrueerde inputsignaal voor regenwater[2]. Na rechtsom kantelen van deze grafiek en toevoeging van de diepte-as vergelijke men deze grafiek met een gemeten verticaal kwaliteitsprofiel in grondwater (Fig.5). De diepte-as is dan gelijk aan de gemiddelde grondwateraanvulling. In Nederland met gemiddeld 1 mm/d en een porositeit van 0,35 komen we dus uit op ~1m/jaar.
Gelukkig is dit niet zo eenvoudig want dan zou bijna iedereen het kunnen. Er zijn veel complicaties vanwege ruimtelijke afwijkingen van het inputsignaal, variaties in grondwateraanvulling, menging in de ondergrond, preferente stroombanen, biodegradatie of radioactief verval, en uitwisseling met de bodem.
Datering via radioactief verval is relatief eenvoudig wanneer het moeder-dochter paar $^{3}He$-$^{3}H$ wordt gekozen, maar het ouderdomsbereik daarmee is beperkt tot jong grondwater. Voor ouder grondwater kan $^{14}C$ uitkomst bieden, maar dient men rekening te houden met een vrij grote marge van onzekerheid door uitwisseling met $^{14}C$-loze, oude kalk.

| Tracer | T½ jaar | Ouderdoms bereik [ j ] | Bemonstering | | Kosten | Prestatie / complicaties |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Gemak | Volume [ L ] | [ € ] | |
| $^{2}H$, $^{18}O$ | stabiel | 0.1 - 2 | ++ | 0.01 | 20 - 120 | goed als weinig dispersie |
| $^{3}H$ laag niveau | 12.32 | 60 - 110 | | 0.25-1 | 250 | kwalitatief |
| $^{3}He$ – $^{3}H$ | 12.32 | 0.5 - 60 | + | 2 | 500 | goed |
| $^{14}C$ | 5730 | 500 - 30,000 | + / - | 1-50 | 300 | uitwisseling dode koolstof |
| $^{39}Ar$ | 269 | 30 - 1,500 | - - | >3,000 | 5,000 | goed |
| $^{85}Kr$ | 10.76 | 1 - 45 | | >500 | 1,500 | goed |
| CFC11, -12, -113 | # | 3 - 60 | + | 1 | 150 | vaak (bio)degradatie |
| SF6 | # | 1- 40 | | 1 | 150 | soms (bio)degradatie |

# = afhankelijk van milieu

*TABEL 2. Overzicht van enkele daterings-tracers met hun kenmerken en kosten.*

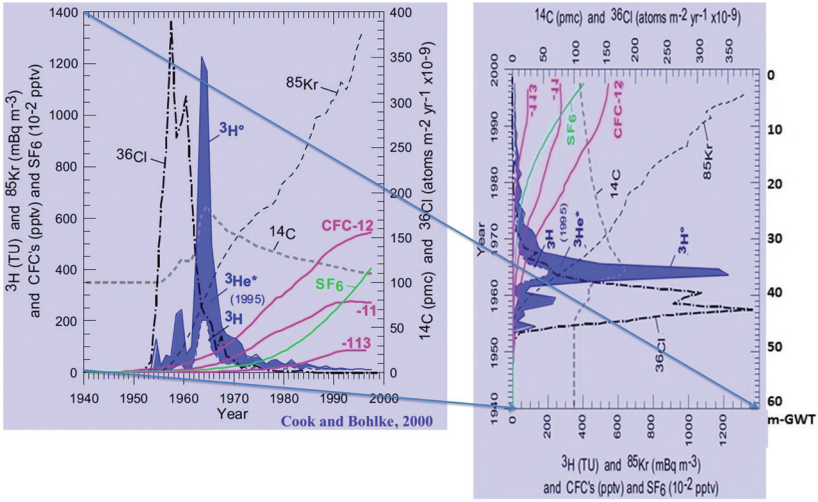



*FIG. 5. Het omzetten van het tracer-inputsignaal van regenwater naar het tracer-outputsignaal in grondwater verloopt idealiter door eerstgenoemde te kantelen en aan de rechterzijde de diepte-as (in Nederland ~1 m/jaar) toe te voegen. GWT = grondwaterspiegel. Sterk gewijzigd naar[2].*

## Grondwaterlichamen in de stress

Voordat ik iedereen alarmeer met mijn zorgen over de toestand van ons grondwater, benadruk ik dat de drinkwatervoorziening in Nederland uitstekend in elkaar zit. We hebben 99.99 % van alle huishoudens aangesloten, de leidingnetverliezen zijn <2%, de drinkwatervoorziening is ‘hightech’, de distributie geschiedt zonder chloor en er is een rigoureus systeem van kwaliteitsbewaking. De smaak van ons kraanwater is excellent, want het wordt graag gedronken, het bevat geen chloor noch nevenproducten van chloring, is microbiologisch betrouwbaar en voldoet ruimschoots aan de vigerende drinkwaternormen. Bovendien kost ons drinkwater uit de kraan weinig (gemiddelde ca. 1,10 € / 1000 L), in vergelijking met flessenwater of mineraalwater (kosten 500-3.000 € / 1000 L). Doorgaans voldoet een eenvoudige zuivering; nog, want er liggen gevaren op de loer.

De term grondwaterlichaam is ‘in’, vooral sinds de EU zich ermee bemoeit en wel via de Kader Richtlijn Water (KRW niet te verwarren met KWR). Deze richtlijn beoogt de gezondheidstoestand van grondwaterlichamen binnen de EU grenzen te vergroten en veilig te stellen. Dit is hard nodig want onze zoete Aquasaurus (Fig.6) wordt op mondiale schaal geplaagd door allerlei kwalen, waaronder: uitdroging door overmatige onttrekking, verzuring en osteoporose door zure regen en oxidatie van pyriet en veen in onze ondergrond, eutrofiëring door uitspoeling van overbemeste landbouwgronden, polyfarmacie via infiltrerend oppervlaktewater waarop riolen lozen die uitgescheiden geneesmiddelen

onvoldoende afbreken, vergiftiging door uitspoeling van pesticiden op onze landbouwgewassen, bestraling door nucleaire fall-out, hyperthermie of koorts door stedelijke warmte-eilanden en global heating, etc.

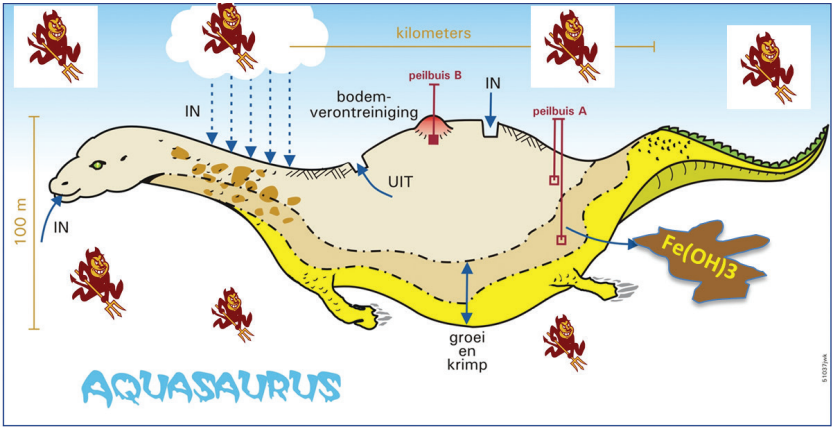



*Fig. 6. Een grondwaterlichaam verbeeld als levend organisme: de zoetwater Aquasaurus, geplaagd door allerlei moderne kwalen. Iets gewijzigd naar [3].*

In de loop der tijd zijn de waterkwaliteitsproblemen geëvolueerd van simpele stankoverlast tot prioritaire stoffen als farmaca, PCPs, brandvertragers en nanodeeltjes (Fig.7). Net zoals met de natuurlijke evolutie van het leven op aarde, zijn de eerste primitieve verschijningsvormen lokaal nog steeds pregnant aanwezig (vooral in ontwikkelingslanden) maar wordt het toneel meer en meer bezet door steeds complexere vormen (zoals in Nederland).

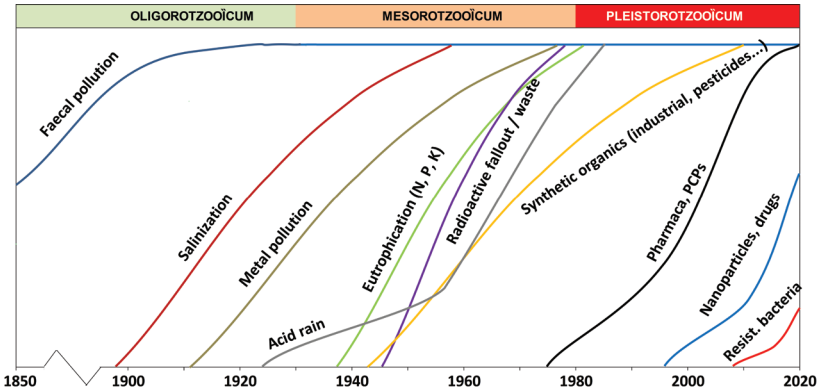



*Fig. 7. Evolutie van waterkwaliteitsproblemen: van stankoverlast tot prioritaire stoffen als farmaca, personal care products (PCPs), drugs en nanodeeltjes.*

Pesticiden zoals bentazon en metabolieten (afbraakproducten) van pesticiden zoals desfenylchloridazon zitten inmiddels op grote schaal en tot grote diepte in ons grondwater (Fig.8). Dit blijkt uit een recente KWR inventarisatie en interpretatie van waterkwaliteitsmetingen in de periode 2011-2014 aan waarnemingsputten, individuele pompputten en puttenvelden van alle waterleidingbedrijven in Nederland[4]. In dat onderzoek zijn 492 pesticiden onderzocht, waarvan er 321 niet aantoonbaar waren, in 29.500 monsters afkomstig van 4.145 locaties uit 265 wingebieden (incl. oppervlaktewater innamestations; 70% van de 265 met aantoonbare concentraties).

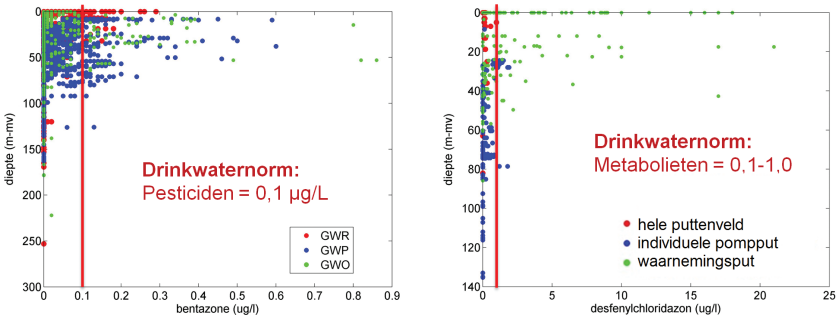



*FIG. 8. Vers van de pers: alarmerende omvang van pesticiden in Nederlands grondwater[4].*

Uit diverse onderzoeken blijkt dat ook geneesmiddelen, personal care products en diverse industriële stoffen zoals EDTA ruim verspreid in ons grondwater voorkomen. Dit wekt aanvankelijk enige verbazing, omdat we deze stoffen niet verwachten in het regenwater dat veel van onze grondwaterlichamen voedt. De omvangrijke interactie van grond- en oppervlaktewater in ons land zorgt er echter voor dat stoffen, die op het oppervlaktewater geloosd worden, toch ons grondwater bereiken, vooral via infiltrerende waterlopen, irrigatiesystemen die uit oppervlaktewater putten, en de kunstmatige infiltratie. Rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) vormen hierbij een bijzonder grote emissiebron, hetgeen m.i. pleit voor verdere zuivering (een 4$^{e}$ trap met Reverse Osmosis [RO]?) en bevriezing van projecten met direct hergebruik van RWZI-effluent indien zonder passende extra zuivering.

De autoriteiten claimen 'geen probleem' voor de meeste prioritaire stoffen (waaronder pesticiden, geneesmiddelen, PCPs en perfluorverbindingen), omdat zij individueel immers voldoen aan de WHO gezondheidskundige richtlijnen voor de mens. Daarbij wordt echter voorbijgegaan aan eventuele synergistische / stapelende effecten van cocktails aan stoffen, en aan ecologische effecten vooral in de onverzadigde zone en in het ontvangende oppervlaktewater. Verder is 1 ng/L altijd nog 2.4 $10^{12}$ moleculen in 1 liter water (met 3.4 $10^{25}$ water moleculen), indien we als modaal molecuulgewicht 250 g/mol hanteren en voor

het getal van Avogadro 6.022 $10^{23}$ deeltjes/mol. Dat getal klinkt onrustbarender, terwijl de concentraties in beïnvloed grondwater toch veelal 10-100 ng/L bedragen en in drinkwater daaruit heel globaal 10% daarvan.
Gevolg is dat grondwater hierdoor langzamerhand zijn imago verliest van heilzame drank of vloeistof (bronwater, Nederlands kraanwater, thermen, oasen). Chemische rampen zoals de in 1993 onderkende arseenramp die zich voltrekt in Bangladesh dragen hieraan bij[5].
Daar schakelde men massaal over van microbiologisch besmet oppervlaktewater naar pathogenenvrij grondwater als bron van drinkwater, en pas na jaren gebruik van dat water werd duidelijk dat zich hier een ramp voltrekt die tientallen miljoenen mensen ziek maakt en velen langzaam de dood injaagt. Het gaat hier om spoortjes arseen, orde 50-2000 µg/L, maar wel ruim boven de drinkwaternorm die inmiddels verlaagd is van 50 naar 10 µg/L en in Nederland misschien naar 1 µg/L gaat. Het arseen is hier van natuurlijke herkomst; het zit ingekapseld in de ijzerhydroxide huidjes om sedimentkorrels en lost daaruit op zodra de condities voldoende anaëroob zijn. Daarbij verandert het arseen ook zelf, namelijk van negatief geladen arsenaat ($AsO_4^{3-}$) naar ongeladen arseniet ($H_3AsO_3$) dat in de bodem vele malen mobieler is en 60 maal giftiger dan arsenaat. De dames in de speelfilm 'Arsenic and Old Lace' uit 1944 gebruikten blijkbaar arseniet, want het werkte snel. Men gebruike dus niet arsenaat..... Op de Nederlandse arseensituatie kom ik later terug.

## Wat doet bodempassage?

Gelukkig bezit de bodem / ondergrond het vermogen om door de mens geïntroduceerde verontreinigende stoffen af te breken, te vertragen (retarderen), neer te slaan (precipiteren) of te verdunnen (Fig.9). De bodem heeft daarvoor ook enige tijd ter beschikking, want de reistijd van het grondwater zelf, van maaiveld t/m pompput, is doorgaans vrij lang: 40-100 dagen voor duininfiltratie, 5-100 jaar voor ondiepe grondwaterwinningen en vele 1000en jaren voor diepe winningen langs de noordrand van Noord-Brabant.
Het zelfreinigend vermogen van de bodem berust vooral op de continue werking van micro-organismen en schimmels die vele stoffen en pathogene indringers kunnen afbreken (degraderen), zolang de omstandigheden gunstig zijn. Stoffen met een bepaalde lading of grootte kunnen adsorberen aan en desorberen van bodembestanddelen (vooral klei, organische stof en ijzerhydroxiden). Dat levert vertraging op ten opzichte van het water waarin die stoffen opgelost zijn. Dat is meestal gunstig, want het geeft de bodem meer tijd om aan de afbraak te werken, en het geeft het waterleidingbedrijf meer tijd om te reageren op een naderende verontreiniging. Door chemische reacties met de bodem kunnen opgeloste stoffen ook neerslaan. Dit gebeurt b.v. waar veenoxidatie door sulfaat tot de neerslag van metaalsulfiden leidt. Verdunning helpt kortdurend om

de concentratie te verlagen tijdens de doorbraakfase, of permanent wanneer de verontreiniging slechts in een bepaald deel van het intrekgebied voorkomt. Het voorspellen van al deze reacties, dus van reactief stoftransport door de bodem, is een belangrijke taak van de chemische hydrogeoloog. Daartoe zijn veldmetingen nodig, kolomproeven in het laboratorium en simulaties met computermodellen.

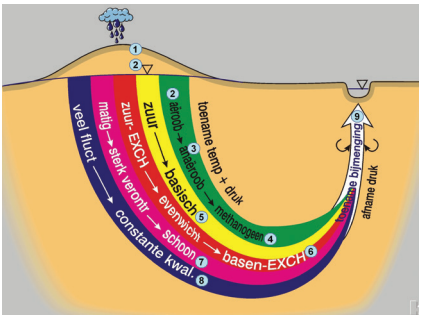



*Fig. 9. Processen die bijdragen aan het zelfreinigende vermogen van de bodem[6]. Deze processen spelen ook bij de infiltratie van oppervlaktewater.*

*1: filtratie, vervluchtiging*
*2 -4: afbraak, afsterving*
*4: neerslag metaalsulfiden*
*5: ontzuring, neerslag $(Al,Fe)(OH)_3$ + adsorptie zware metalen*
*6 ontzuring, afname Ca*
*7: adsorptie, afbraak, radioactief verval*
*8: afvlakking*
*9: verdunning*

## Wat doen wij eraan?

Belangrijke maatregelen die wij kunnen nemen, zijn in Fig.10 opgesomd. Voorkomen is beter dan genezen. Dat heeft geleid tot de instelling van grondwaterbeschermingszones binnen het intrekgebied van een puttenveld, en tot het zoveel mogelijk laten samengaan van natuur en waterwinning (niet altijd tot genoegen van ecologen). Dit is echter in ons dichtbevolkte en geïndustrialiseerde land onvoldoende gebleken, zodat bewaking van de grondwaterkwaliteit door intensieve monitoring op steeds meer verontreinigende stoffen nodig is. Het is daarbij speuren naar sporen geblazen, want een vroegtijdige opsporing van kwaliteitsproblemen en een snelle diagnose van hun oorzaak leiden immers tot minder voortwoekering en een meer gerichte aanpak of behandeling, net zoals in de geneeskunde.

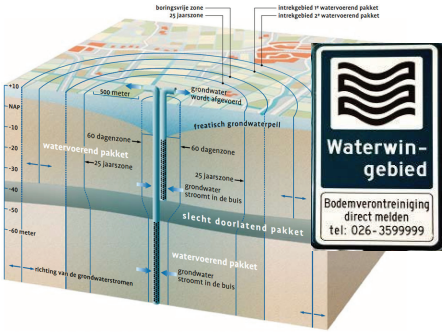



*Fig. 10. Waterwingebieden dienen beschermd te worden tegen verontreiniging. Dat brengt veel activiteiten en kosten met zich mee. Het betreft vooral:*

- *Een goede locatiekeuze vooraf*
- *Afbakenen beschermingszones*
- *Activiteiten verbieden / uitkopen*
- *Monitoren van de waterkwaliteit via waarnemings- en pompputten, en ruw*
- *Prognoses d.m.v. modellen*
- *Nazuivering (versterken)*
- *Belangen behartigen (VEWIN)*

*Naar Bosatlas / KWR.*

In navolgende casuïstiek, waarin de forensische hydrologie een rol van betekenis speelt in 3 gevallen, beginnen we met een Nederlands arseenprobleem.

### Casus 1: Waarom nam arseen toe in de winning Ouddorp sinds 2001?

In het duingebied van Ouddorp wordt sinds 1934 duinwater gewonnen en sedert 1955 kunstmatige infiltratie van oppervlaktewater toegepast voor de drinkwatervoorziening. Begin jaren 80 stak arseen (As) even zijn kop op, waarschijnlijk als gevolg van een complexe infiltratiegeschiedenis waarbij relatief hoge concentraties in bevloeid polderwater een rol speelden. Sinds 2001 zien we echter een duidelijke As toename in het ruwe (teruggewonnen) water van 1 tot 13 µg/L (Fig.11), terwijl thans (nog niet in de jaren 80) een verlaging van de As drinkwaternorm ter discussie staat. Eén van de hamvragen van waterbedrijf Evides was derhalve: wat veroorzaakt die toename?

Er waren maar liefst 12 potentiële oorzaken[7], waarvan ik de 3 belangrijkste noem: (i) oxidatie van arseenhoudend pyriet vooral in de meer fijnzandige en meer slibhoudende mariene afzettingen, (ii) reductieve oplossing van arseenhoudende ijzer(hydr)oxiden die de duin- en zeezandkorrels als coating omhullen, en (iii) veranderingen in het grondwaterstromingspatroon als gevolg van verhoogde waterpeilen, verbreding van de kanalen en hun natte oeverzones, en verlaging van de infiltratiesnelheid.

Arseen komt niet alleen. Via deze stelling kon pyrietoxidatie uitgesloten worden, want daarbij komt vooral sulfaat vrij en dat was niet het geval. Correlatie van de opwaartse As trend met een dalende trend in $NO_3$ en $O_2$ concentratie, en met een opwaartse trend in $NH_4$, Mn, Fe, $HCO_3$ en TOC concentratie (Fig.11), wijst daarentegen eenduidig op reductieve oplossing van ijzer(hydr) oxiden als bron. De toename van reducerende omstandigheden in de ondergrond is te verklaren door een vooral sinds 2006 gestegen grondwaterstand en verlaagde infiltratiesnelheid, als gevolg van de instelling van hogere kanaal- en drainpeilen om natuurwaarden in en rondom het infiltratiegebied te verhogen[7].

We zien hier dus een nieuw conflicterend belang tussen enerzijds de ecologie en anderzijds de waterwinning, ontstaan door de ecologisch gedreven herinrichting van het infiltratiegebied in 2000-2001. Evides beschikt gelukkig over een nazuivering die thans afdoende werkt, maar wel aanpassing behoeft als de drinkwaternorm voor arseen in de toekomst verlaagd zou worden tot 1 µg/L.

Ouddorp is sinds 2009 de twaalfde arseenhotspot van de Nederlandse puttenvelden voor de drinkwatervoorziening (rode punten in Fig.11)[8]. Een toename van het aantal arseenhotspots (ook buiten puttenvelden) valt te verwachten vooral waar grondwaterstanden stijgen b.v. door inundatie of bodemdaling, en waar infiltrerende waterlopen, estuaria en meren dichtslibben. Een voorbeeld van dichtslibbende, infiltrerende estuaria met een sterke As mobilisatie is het Haringvliet (B in Fig.11)[9].

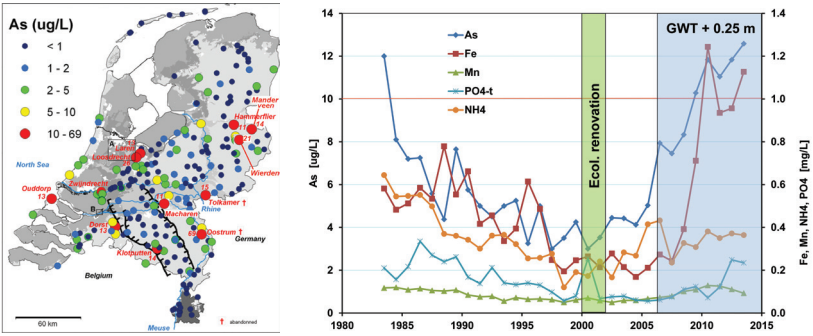


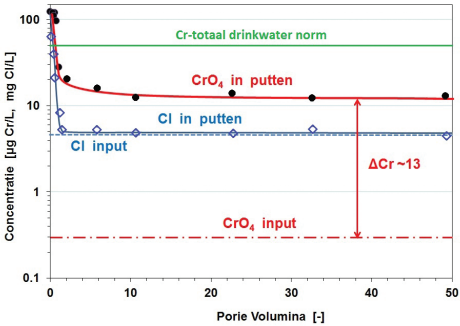

*Fig. 11. De waterwinning Ouddorp (op kaart links) behoort sinds 2009 tot de top 12 arseen-hotspots van de Nederlandse drinkwatervoorziening[8]. De arseentoename sinds 2000 (rechts) houdt verband met de verhoogde grondwaterstanden (GWT) ten behoeve van ecologische optimalisatie van het infiltratiegebied[7].*

## Casus 2: Bedreigt chromaat de ondergrondse, strategische voorraad van AD City?

Al het (drink)water van Abu Dhabi City ($10^6$ inwoners) wordt geleverd door grote ontziltingsinstallaties langs de kust van de Arabische Golf. De buffervoorraad bedraagt slechts 3 dagen, zodat zeewater-innamestops door frequenter en langduriger wordende algenbloei in de Golf de leveringszekerheid bedreigen. Terrorisme en gewapende conflicten vormen een andere reden om strategische voorraden aan gedemineraliseerd zeewater in de ondergrond (geen verdamping!) aan te leggen.

Een belangrijk project is inmiddels gerealiseerd in de woestijnduinen van Liwa op 150 km afstand van AD City. Ontzilt zeewater wordt daar door subirrigatie met ondergrondse bekkens kunstmatig geïnfiltreerd (Fig.12). Het Aquifer Storage and Recovery (ASR) systeem bestaat uit 3 grote ondergrondse infiltratiebekkens, elk omringd door 105 terugwinputten, die in geval van een calamiteit direct (zonder nazuivering) drinkwater kunnen leveren aan de hoofdstad. Doel is om gedurende tenminste 90 dagen in totaal 15,5 $Mm^3$ drinkwater te leveren vanuit de ondergronds aangelegde voorraad aan ~22 $Mm^3$ ontzilt zeewater. Tijdens de aanleg van het systeem in 2009-2015 ontstond in 2014 grote ongerustheid over de mogelijke mobilisatie in de aquifer van vooral chromaat ($CrO_4^{3-}$, de zeswaardige dus meer geoxideerde variant van chroom), maar ook van As, F en Na. De chromaat concentraties in het natuurlijke grondwater (52-129 µg Cr/L) bleken namelijk overal ruim boven de drinkwaternorm (50 µg $Cr_{totaal}$/L), zodat langdurige opslag in de aquifer (b.v. 10 jaar) wel eens voor normoverschrijding zou kunnen zorgen. Belangrijke bronnen van chromaat voor ontzilt zeewater in de ondergrond zijn verwerende, chroom houdende mineralen als pyroxeen, desorptie en bijmenging van gebiedseigen duingrondwater tijdens terugwinning.

Gelukkig konden wij de projectleiders geruststellen dankzij een grondige interpretatie van alle beschikbare gegevens, onze bemonstering en analyse van 6 jaar geleden geïnfiltreerd, ontzilt zeewater (tijdens een pilot), en berekeningen met een reactief-transport model[10]. Chromaat blijkt namelijk bij hoge pH zeer snel uit te spoelen (retardatiefacor 1,5-2) en beperkt op te lossen (Fig.12).
Toch zijn er diverse bedenkingen. Ten eerste, de chromaatnorm staat al geruime tijd ter discussie sinds het Hinkley (Californië) schandaal. Wie de biografische speelfilm 'Erin Brockovich' uit 2000 kent, weet dat daar een pluim afvalwater afkomstig van een galvaniseerstation de drinkwaterbronnen van het stadje contamineerde met chromaatsporen (orde enkele µg/L).



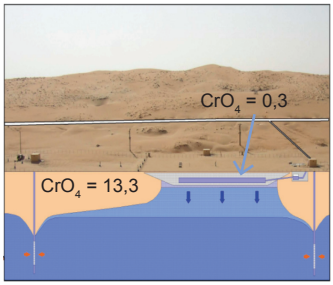




*Fig. 12. Schema van het ASR-systeem in de woestijnduinen van Abu Dhabi (rechts), met de inputconcentratie van chromaat en chloride in ontzilt zeewater en hun outputconcentratie in met putten teruggewonnen water, als functie van het aantal doorspoelde porievolumina (links). Natuurlijk duingrondwater waar X-as = 0; ontzilt zeewater waar X-as >2.*

Hier speelt een late ontdekking van de relatie tussen verhoogd chromaat en kanker een rol, waarbij drinkwaterkwaliteitsnormen in opspraak kwamen. In Californië was er destijds al sprake van een verlaging van 50 µg/L totaal chroom naar 0,2 µg/L voor chromaat. Deze discussie herhaalt zich nu in Duitsland en Nederland[11].
In de tweede plaats ben ik er niet helemaal gerust op dat dit ASR project in staat is om 70-80% van het geïnfiltreerde water terug te winnen, omdat de geïnfiltreerde zoetwaterlens verder kan afdrijven en opdrijven dan gemodelleerd, en ook upconing van zout grondwater bij terugwinning op de loer ligt.

## Casus 3: Stofgedrag tijdens bodempassage van oppervlaktewater

Oppervlaktewater bevat nog steeds veel ongewenste verontreinigingen, die ook na voorzuivering of na bodempassage nog prominent aanwezig kunnen zijn. Bodempassage van oppervlaktewater speelt niettemin een essentiële rol in het verwijderen van een deel van de vuillast (Fig.9), niet alleen in systemen met kunstmatige infiltratie en oeverfiltratie[12,13], maar ook in ondiepe grondwater-

winningen waarvan het wingebied doorsneden wordt door infiltrerende waterlopen of waarin oppervlaktewater gebruikt wordt voor beregening.
De explosieve groei van nieuwe chemicaliën, die vroeg of laat in het milieu en dus ook oppervlaktewater belanden, maakt het noodzakelijk het gedrag van nieuwe stoffen (en sommige oude) bij bodempassage van grondwater blijvend te bestuderen. Alleen dan ontdekken we of deze stoffen in natuurlijke grondwatermilieus afbreken en hoe snel. Die kennis kan bijdragen aan het verbieden van een stof, en aan de beoordeling of de (na)zuivering een aanpassing behoeft omdat de stof (op termijn) door kan dringen tot de winputten.
Bij de toelating van nieuwe stoffen komt de afbraak ervan vaak te geflatteerd uit de bus, zoals de beoordelingsfout van het herbicide bentazon laat zien. Diverse proeven met aëroob sediment o.a. uit de bouwvoor leverden een redelijk snelle afbraak op (halfwaardetijd enkele tientallen dagen), terwijl we in grondwater moeten rekenen met halfwaardetijden van duizenden dagen. Een onderzoek naar de afbraaksnelheid van diverse farmaca en röntgen contrastmiddelen leverde zeer uiteenlopende afbraaksnelheden op (Fig.13)[14], die niet alleen verklaard kunnen worden met verschillen in redox milieu (aërobiegraad). Andere factoren spelen blijkbaar ook een rol, zoals de temperatuur, reistijd ondergronds, het sorberend vermogen van de grond, tijd sinds verstoring van de bodem (microbiologische adaptatie), toxicologie van het water, en het type experiment (kolom versus pilot versus praktijk).
Dit pleit voor langlopende meetprogramma's langs een raai waarnemingsputten tussen enerzijds een rivier, infiltratiegeul of infiltratieput, en anderzijds de (terug)winning (meestal op 50-1500 m afstand). Deze waren vroeger talrijk, maar zijn helaas grotendeels wegbezuinigd. Drinkwaterbedrijf Oasen is er in 1999 weer mee begonnen langs de Lek (vergelijkbaar met Fig.13 rechts), een

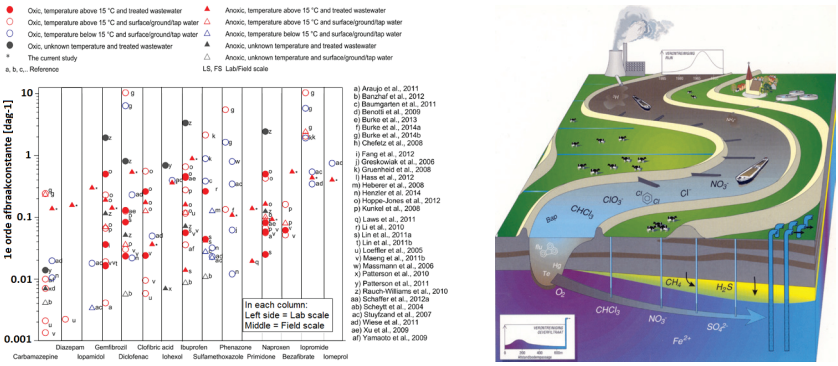
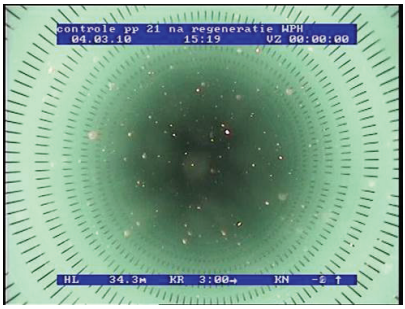



*Fig. 13. De afbraaksnelheid van o.a. farmaca en röntgencontrastmiddelen tijdens bodempassage varieert sterk en hangt niet alleen af van de redox (links)[14]. Dit noopt tot metingen langs meetraaien van waarnemingsputten in echte grondwatersystemen (rechts)[12].*

lichtend voorbeeld met interessante resultaten[15].
Lange hiaten in tijdreeksen zijn ongewenst, omdat de veranderende condities in de bodem er veel toe doen bij de interpretatie.

## Nieuw 1: Putverstopping (deel 3)

Na 2 promoties op dit onderwerp, Bert-Rik de Zwart in 2007[16] en Kees van Beek in 2010[17], nu de schone taak aan mijn kersverse TUD promovendus Martin van der Schans om verder voortgang te boeken met de diagnose, remedie en preventie van diverse soorten putverstopping. Zoals met onderzoek naar hart- en vaatziekten (de analogie met putverstopping is groot), leidt voortgaand onderzoek tot steeds meer inzichten maar ook meer vragen. Onderwerpen die nu aan bod komen zijn o.a.: (i) een nationale risicoanalyse van chemische en mechanische putverstopping, waarbij aandacht voor trendmatige ontwikkelingen door benedenwaarts oprukkende nitraat- en zuurfronten; (ii) verbetering van methoden ter bewaking en vaststelling van de effectiviteit van putregeneratietechnieken; (iii) zeldzame vormen van putverstopping zoals door aluminiumhydroxiden en silicagel; en (iv) het ontwikkelen van methoden om kortsluitstroming / lekkage via de boorgatopvulling, het putfilter (tijdens stilstand) of de stijgleiding aan te tonen. Deze onderwerpen worden opgepakt in het kader van TKI en het BTO van KWR.
Zo vonden we in Brabant een bijzonder geval van putverstopping[18], uiterlijk veel lijkend op de frequent voorkomende verstopping door ijzerhydroxide (Fig.14), maar bij nadere analyse voornamelijk bestaande uit aluminiumhydroxide (43% als $Al(OH)_3$), organische stof (31%), water (19,3%) en ijzerhydroxide (5,7% als $Fe(OH)_3$). Dit is waarschijnlijk het eerste geval in Nederland met deze verstoppingsvorm, te verklaren door menging in de put van ondiep instromend, zuur, aluminium-rijk grondwater met diep instromend, basisch, bicarbonaat-rijk grondwater.
Omdat het grondwater op filterdiepte overal zuurstofloos lijkt te zijn, is het aantreffen van ijzer(III)hydroxide in het verstoppende neerslag bijzonder. Onderzoek naar de bacteriepopulaties in het grondwater en het neerslag d.m.v. Next Generation DNA Sequencing liet zien dat Methylophilaceae, Nitrospira en Gallionella talrijk zijn. Hun aanwezigheid wijst erop dat spoortjes zuurstof (in water <0.5 mg/L gemeten) toch een rol spelen. Enfin, stof tot verder nadenken voor Martin.



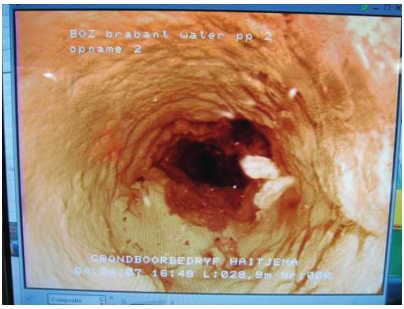



*Fig. 14. Een schoon pompputfilter van bovenaf gezien met videocamera (linksboven), dito maar dan verstopt met aluminiumhydroxiden en organisch materiaal (rechtsboven), en de met hetzelfde materiaal verstopte onderwaterpomp na uitbouw. Foto's door Brabant Water.*

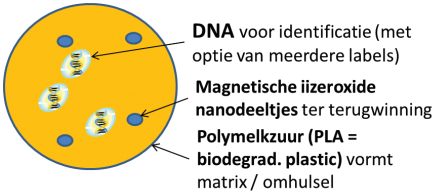
## Nieuw 2: Water-labeling met DNA verpakt in microbolletjes

Het doseren van conventionele tracers aan oppervlakte- en grondwater, ter tracering van de waterstroming in ruimte en tijd, kent beperkingen qua aantallen tracers en daardoor qua resolutie. Met kunstmatig DNA verpakt in microbolletjes (150-200 nm), eventueel samen met paramagnetische ijzeroxide nanodeeltjes ter terugwinning en concentrering (Fig.15), is het in principe mogelijk om een onbegrensd aantal tracers te maken met identieke transporteigenschappen, en deze in ultralage concentraties te meten. Door verschillende DNA tracers op meerdere locaties en/of op verschillende momenten toe te dienen ontstaat een zeer gedetailleerd beeld van stroombanen en reistijden (Fig.15).

Het onderzoek richt zich op: (i) technische aspecten (het fabriceren van DNA en microbolletjes, de concentrering en analyse), (ii) de toepassing op een klein stroomgebied met focus op het ontrafelen van reistijden en de diverse componenten die bijdragen aan oppervlaktewaterafvoer, en (iii) de toepassing op grondwater b.v. binnen het beschermingsgebied van een puttenveld, in een systeem met koude-warmte opslag of in een systeem met kunstmatige infiltratie.

Mijn rol is om samen met prof. dr. Schijven (Universiteit Utrecht; UU) promovendus Jesse van der Hoeven te begeleiden in het grondwater onderdeel, dat naast veldonderzoek tevens kolomonderzoek en transportmodellering omvat. Doel is om naast het karteren van stroombanen en reistijden, ook te onderzoe-

ken hoe DNA-tracers zich ten opzichte van model-micro-organismen gedragen, en of zij die kunnen vervangen om de efficiency van bodempassage te bepalen in het verwijderen van micro-organismen.
Het geheel betreft een STW-project met TUD, UU, Unesco-IHE, KWR, Deltares, BioLegio, HydroRock en ETH.



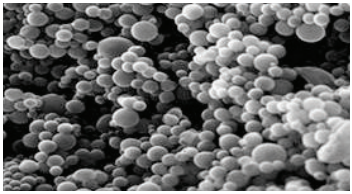



*Fig. 15. Water-labeling met DNA verpakt in microbolletjes van PLA waarin tevens paramagnetische nanodeeltjes (linksboven); microsco-pische opname van de microbolletjes (rechtsboven); en toepassing in het veld waarbij op elke locatie dosering van microbolletjes met verschillend DNA. Deels ontleend aan BEE Cornell Univ., New York.*

## Nieuw 3: AgriMAR (Agriculture & Managed Aquifer Recharge)

De landbouw ondervindt hinder van plant pathogenen in oppervlaktewater wanneer dit water aangewend wordt voor irrigatie / beregening, of van brak grondwater. De pathogenen veroorzaken ziektes zoals bruinrot bij (poot)aardappelen en bloembollen, waardoor oppervlaktewaterberegening zelfs verboden is voor diverse teelten. Brak grondwater is in dat opzicht een betere bron maar overstijgt dikwijls de zouttolerantie van het gewas.
Het AGRIMAR project beoogt oplossingen te bieden voor beide problemen, door het overtollige grondwater dat drains in de winter afvoeren te bergen in de ondergrond, totdat het in de zomer wordt teruggewonnen voor irrigatie (Fig.16). Dit ASR systeem zorgt in principe voor leveringszekerheid, recyclet water en nutriënten, verbetert de oppervlaktewaterkwaliteit, en verhoogt de winst. Maar het moet wel (vrijwel) probleemloos werken, want drain- of putverstopping en het op- en afdrijven van de zoetwaterbel liggen op de loer. Daarnaast moet nog worden aangetoond dat er met dit ASR systeem geen risico's zijn van grondwaterverontreiniging en pathogeenuitbraken.
Kortom, onderzoeksvragen genoeg voor een NWO-project met TUD, UU, Acacia Water en vele andere partijen. Mijn rol is om samen met dr. Van Breukelen

(TUD) promovendus Emiel Kruisdijk te begeleiden in het abiotische onderdeel, dat naast veldonderzoek tevens transportmodellering en extrapolatie van lokale naar regionale toepassing omvat. Doel is om het gedrag van de zoetwaterbel en de daarin opgeloste pesticiden en nutriënten te bepalen, en het ASR-systeem via modelonderzoek te optimaliseren.

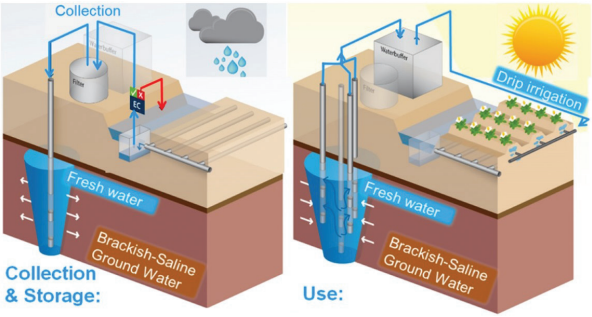



*Fig. 16. Het project Agri-culture & Managed Aquifer Recharge (Agri-MAR) in een notendop. Overtollig grond-water dat drains afvoeren in de winter wordt in de ondergrond geborgen, totdat het in de zomer wordt teruggewonnen voor irrigatie.*

## Nieuw 4: COASTAR (COastal Aquifer STorage And Recovery)

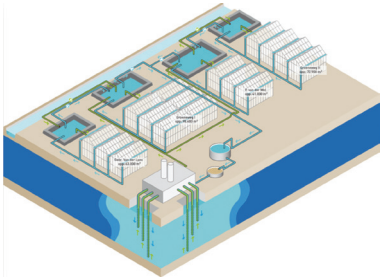
ASR-Coastal, Kreekruginfiltratie en de Freshkeeper (Fig. 17) zijn voorbeelden van kleinschalige inzet van de ondergrond voor verbeterde zoetwatervoorziening in kustgebieden, waar brak en zout grondwater altijd op de loer liggen. Andere voorbeelden dan getoond in Fig.17 zijn de ondergrondse berging van overtollig regenwater in stedelijk gebied met hergebruik tijdens droogte, en de ondergrondse berging van overtollig water in de agrarische sector voor later gebruik inclusief desinfectie en behoud van waardevolle meststoffen (AgriMAR; Fig.16).

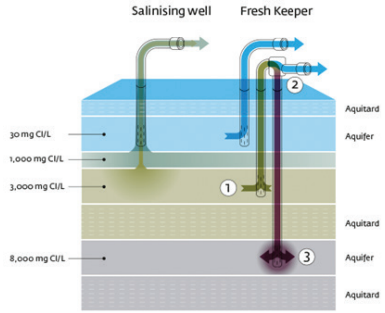
Op grotere schaal kan gedacht worden aan het creëren van ondergrondse barrières tegen zoutwaterintrusie door diepinfiltratie van (regen)water, en de combinatie van kustuitbreiding via zandsuppleties met resulterende groei van zoetwaterlenzen, ter vergroting van voorraden en ter afsluiting van aquifers. Laatstgenoemde voorkomt dat zeewater ongehinderd richting droogmakerijen stroomt en daar te zijner tijd de zoutlast aanzienlijk verhoogt.

Deze concepten zijn in de afgelopen 10 jaar door kennisinstellingen, installateurs en drinkwaterbedrijven in Nederland ontwikkeld en worden toegepast op een schaal van tientallen hectaren. Maar het toepassingsbereik is groter, analoog aan hoe we sinds de jaren 1950 de Nederlandse kust hebben ingericht ten behoeve van onze drinkwatervoorziening.

Als oplossing voor problemen in de Nederlandse zoetwatervoorziening is onlangs COASTAR[19] in het leven geroepen: een handelingsperspectief voor een robuuste watervoorziening in Laag Nederland. COASTAR (COastal Aquifer STorage And Recovery) heeft als doel om ervaringen met grootschalige ingrepen door de drinkwatersector en nieuwe lokale opslagtechnieken buiten de

drinkwatersector samen te brengen in een nationaal uitvoeringsprogramma. Het programma benut de potenties van de ondergrond – als aanvulling op die van het hoofdwatersysteem – voor grootschalig zoetwaterbeheer. Hiermee komt het tegemoet aan de ambities van het Deltaprogramma Zoetwater met betrekking tot een 4D benadering van zoetwatervoorziening in ruimte én tijd. Pijlers onder COASTAR zijn het gebruik van overtollig zoetwater na ondergrondse opslag en afvang en gebruik van binnendringend en opwellend brakwater, waarmee ook 'bovengrondse problemen' als wateroverlast, eutrofiëring en verzilting kunnen worden tegengegaan.





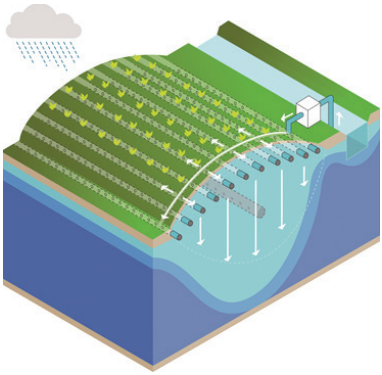



*Fig. 17. Ondergrondse oplossingen voor het zoetwaterbeheer en de droogtebestrijding in overbevolkte kustgebieden, geframed in COASTAR[19]. Linksboven: Combinatie van bassins met extra opslag van regenwater in de ondergrond en terugwinning via 'multiple partially penetrating wells'. Rechtsboven: een Freshkeeper put (1) die het brakke water afvangt maar tevens via RO zoetwater produceert (2) en het membraanconcentraat dieper infiltreert (3). Linksonder: Kreekruginfiltratie via drains waarbij terugwinning via een horizontale put.*

COASTAR is een initiatief van de stichting ALLIED WATERS en wordt voor Nederland verder vormgegeven door KWR, Arcadis en Deltares. Hoewel het de primaire ambitie is van COASTAR om tot grootschalige, regionale realisaties te komen, is het zeer waarschijnlijk dat initiatieven als deze leiden tot belangrijke vragen aan de wetenschap. Hoe organiseer je grootschalig ondergronds waterbeheer? Welke zuiveringseisen stellen we aan RWZI effluent wanneer we dat ondergronds willen bergen voor later hergebruik, hetgeen tevens vervuiling van binnenwater en kustlangs zeewater voorkomt? Hoe verwijderen we in korte tijd zwevende stof, liefst op een simpele, onderhoudsarme manier, uit afstromend

regenwater in de stad, zodat we dit kunnen diep-infiltreren en zo afvoerpieken kunnen afvlakken? Kan het economisch uit om brakke kwel naar polders te onderscheppen, met voordelen voor de oppervlaktewaterkwaliteit, en te gebruiken als bron voor zoetwater. En waar laat je het concentraat dat overblijft na ontzilting? Kortom, ook praktische initiatieven als COASTAR zullen genoeg stof opleveren voor de wetenshap, omdat elke toepassing maatwerk vergt. Genoeg werk aan de winkel.

## De leerstoel en de toekomst

De leerstoel (chemische) hydrogeologie vormt een belangrijke brug tussen praktijkgericht onderzoek bij KWR en meer wetenschappelijk onderzoek bij CiTG, en tussen de verschillende CiTG-secties die hydrogeochemische facetten in hun onderzoek ontmoeten.

Ik hoop eraan bij te dragen dat deze leerstoel na mijn pensionering uitgroeit tot een voltijds leerstoel. Het afstoten door VU (Amsterdam) van de hydrogeologie groep in 2015 biedt de TUD volop kansen om deze discipline ruimer in te bedden in haar CiTG curriculum. Andere drivers zijn de klimaatverandering die noopt tot meer ondergrondse berging van water en energie, en het toenemende waterhergebruik dat meer onderzoek vergt naar stofgedrag in de bodem (Fig.18).

Ik adviseer de politiek om meer in te zetten op de volgende onderwerpen: (1) aanzienlijk stringenter mest- en pesticidenbeleid; (2) meer ondergrondse opslag van zoet water als het van goede kwaliteit is; (3) de ontwikkeling van nieuwe technieken om hemelwater snel te ontdoen van zwevend stof, zodat we het makkelijker in de urbane ondergrond kunnen bergen (met minder verstopping); (4) verdere voorzuivering van RWZI effluent (b.v. met een R.O. trap), omdat dit water vooral in de zomer teveel schadelijke stoffen inbrengt; en (5) water als bron en opslagmedium van energie.

Voor waterjuristen en forensische hydrologen voorspel ik een groeiende werkvoorraad, want de toenemende drukte in de ondergrond gaat voor forse spanningen zorgen.

*Fig. 18. In het vooruitzicht zie ik zeer relevante onderzoeks-onderwerpen die m.i. prolongatie en uitbreiding van de leerstoel (chemische) hydro-geologie rechtvaardigen.*

## Woorden van dank

Dames en heren, ik heb u hopelijk duidelijk gemaakt dat het speuren naar sporen in grondwater leuk, intrigerend en belangrijk is. Dit doe ik gelukkig niet alleen, want b.v. het uitvoeren van chemische en microbiologische analyses is specialistenwerk dat ik graag aan mijn collega's van o.a. KWR toevertrouw.
De lijst van mensen die ik dank verschuldigd ben, is te lang om hier te noemen. Dank aan u allen die hier aanwezig zijn. Dank aan het CvB en de Rector van de TU Delft, en aan onze decaan Bert Geerken, voor het vertrouwen. En zo ook grote dank aan de directie van KWR, vooral Wim Van Vierssen en Jos Boere.
Waarde CiTG collega's, ik zie uit naar onze verdere samenwerking. Collega's van KWR, jullie maken mijn gedoseerde kantoorbezoek altijd tot een plezier. Jan Willem bedankt voor je bezielde teamleiderschap.
Ex-collega's van de VU hydrogeologie groep, ik ben blij dat jullie allemaal terecht zijn gekomen op goede posities, en hoop op voortdurende samenwerking.
In mijn naam ligt mijn lot, dubbel en dwars. Pieter stamt van het Griekse woord petèr = rots, vast, terwijl stuifzand staat voor makkelijk door de wind verplaatsbaar zand. Rotsvast tegenover mobiel. Dat ik toch meer een Pieter ben dan een stuifzand, bewijst mijn langdurige staat van dienst bij KWR (1981-heden).
Tenslotte dank ik mijn vrouw Loredana. Zij heeft mij de ruimte gegeven om teveel tijd aan speuren naar sporen te besteden.
Ik heb gezegd.

## Referenties


1. Stuyfzand, P.J. 2010. Multitracing of artificially recharged Rhine River water in the coastal dune aquifer system of the Western Netherlands. In 'Achieving groundwater supply, sustainability and reliability through Managed Aquifer Recharge', Proc. ISMAR-7, Abu Dhabi, 9-13 Oct 2010, published 2012, p.188-195, available on line via http://www.dina-mar.es
2. Cook, P.G. and Böhlke, J.K. 2000. Determining timescales for groundwater flow and solute transport. Environmental Tracers in Subsurface Hydrology (Cook, P.G. and Herzeg, A., Eds), Kluwer Academic Publishers, Boston (2000), 1–30.
3. Kooiman J.W. Personal communication 2005, KWR.
4. Sjerps, R., P.J. Stuyfzand, P. Kooij, B. de la Lomo Gonzáles, A. Kolkman & L. Puijker 2017. Vulnerability of drinking water resources in the Netherlands to pesticides. KWR report BTO 2017, in press.
5. Appelo C.A.J. [ed] 2008. Arsenic in groundwater, a world problem. Proc Seminar Utrecht 29 Nov 2006, Netherlands National Committee IAH Publ. 5, 125p. http://www.samsamwater.com/library/Arsenic_in_Groundwater_A_World_Problem.pdf (accessed on 25 feb 2017)
6. Stuyfzand, P.J. 1999. Patterns in groundwater chemistry reflecting groundwater flow. Hydrogeol. J. 7, Theme issue 'Groundwater as a geologic agent', J. Tóth (ed), Hydrogeology J. (7), 15-27.
7. Stuyfzand, P.J., C.J.S. Aggenbach & R. Lafort 2014. Diagnose en prognose van de arseenconcentratie in het ruwe water van de winning Ouddorp. KWR-rapport KWR 2014.032, 89p.
8. Stuyfzand, P.J. 2015. Arsenic and Chromium concentrations and speciation in groundwater resources for drinking water supply in the Netherlands. Ch.2 in KWR report BTO 2015.017, 25-44.
9. Stuyfzand, P.J., M.H.A. Juhasz-Holterman, W.J. de Lange 2006. Riverbank filtration in the Netherlands: well fields, clogging and geochemical reactions. In: Riverbank filtration hydrology: impacts on system capacity and water quality (ed. S.A. Hubbs), Proc. NATO Advanced Research Workshop on Riverbank Filtration Hydrtology, Bratislava, 7-10 Sept. 2004, Springer NATO Science Series IV, Earth and Envir Sciences 60, 119-153.
10. Stuyfzand P.J., E. Smidt, K.G. Zuurbier, N. Hartog, M.A. Dawoud 2017. Observations and prediction of recovered quality of desalinated seawater in the Strategic ASR Project in Liwa, Abu Dhabi. J. Water 2017, doi:10.3390/w9030177, http://www.mdpi.com/2073-4441/9/3/177/pdf (open access)
11. Ahmad, A., S. Kools, M. Schriks, P.J. Stuyfzand, B. Hofs 2015. Arsenic and chromium concentrations and their speciation in groundwater resources and drinking water supply in the Netherlands. KWR report BTO 2015.017, 77p.

12. Stuyfzand, P.J. & F. Luers 1996. Gedrag van milieugevaarlijke stoffen bij oeverinfiltratie en kunstmatige infiltratie; effecten van bodempassage gemeten langs stroombanen. Kiwa-Meded. 125, 272p.
13. Stuyfzand, P.J. 1998. Fate of pollutants during artificial recharge and bank filtration in the Netherlands. In: Peters J.H. (ed), Artificial recharge of groundwater, Proc. 3rd Intern. Symp. on Artificial Recharge, Amsterdam the Netherlands, Balkema, 119-125.
14. Nham H.T.T., J. Greskowiak, K. Nödler, M.A. Rahman, T. Spachos, B. Rusteberg, G. Massmann, M. Sauter, T. Lich 2015. Modeling the transport behavior of 16 emerging organic contaminants during soil aquifer treatment. Science of the Total Environment 514 (2015) 450–458.
15. Hamann, E., P.J. Stuyfzand, J. Greskowiak, H. Timmer & G. Massmann 2016. The fate of organic micropollutants during long-term/long-distance river bank filtration. Sci Total Envir. (STOTEN), 545-546, 629-640.
16. De Zwart, B.R. 2007. Investigation of clogging processes in unconsolidated aquifers near water supply wells. PhD TU Delft, 200 p.
17. Van Beek, C.G.E.M. 2010. Cause and prevention of clogging of wells abstracting groundwater from unconsolidated aquifers. PhD VU University, 203p.
18. Stuyfzand P.J., M. van der Schans, B. Wullings, W. Lemmens, C. van Rosmalen, J. van Sijl 2016. Oorzaken van neerslagvorming in pompputten van puttenveld Bergen op Zoom van Brabant Water. KWR rapport KWR 2016.102, 54p.
19. Allied Waters 2016. COASTAR, robuuste zoetwatervoorziening voor Laag-Nederland schuilt in de ondergrond. http://www.alliedwaters.com/wp-content/uploads/2016/08/ALWA_Coastar-Rapport_Web_spreads.pdf (accessed on 16 mrt 2017).

TU Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Afdeling Geoscience & Engineering, sectie Geo-Engineering

Gebouw 23
Stevinweg 1
2628 CN  Delft

E:  P.J.Stuijfzand@tudelft.nl
T:  +31 (0)15 278 14 23

www.gse.citg.tudelft.nl