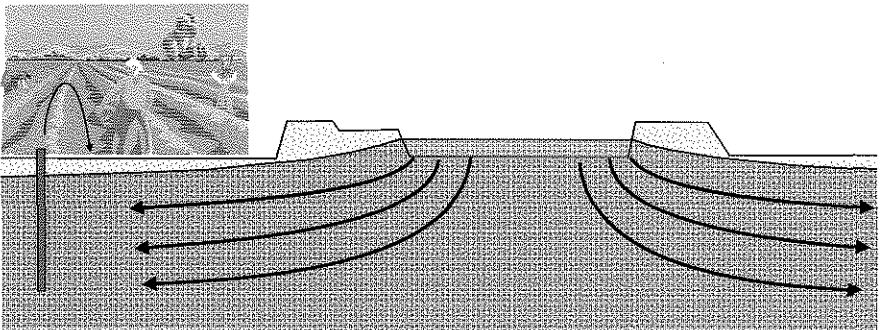


(Be)wegen van grondwater

Intreerede

Prof.dr.ir Theo N. Olsthoorn



22 november 2006

(Be)wegen van Grondwater

Rede uitgesproken door

prof. dr. ir. Theo N. Olsthoorn

op 22 november 2006 ter gelegenheid van de
aanvaarding van het ambt van hoogleraar in het vakgebied

Geohydrologie

Aan de Technische Universiteit Delft,
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

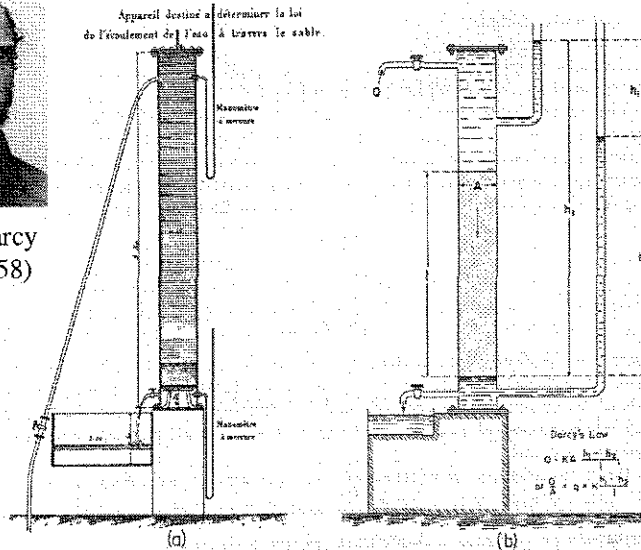
Mijnheer de Rector Magnificus, leden van het College van Bestuur, collegae hoogleraren en andere leden van de universitaire gemeenschap, zeer gewaardeerde toehoorders

Dames en heren,

het jaar 2006 is een belangrijk jubileumjaar voor grondwaterhydrologen. Het is precies 150 jaar geleden dat Henry Darcy zijn boek over de openbare fontein in Dijon publiceerde met zijn wet over de grondwaterstroming.



Henry Darcy
(1803-1858)



Figuur 1: Henry Darcy met zijn oorspronkelijke meetopstelling en de meer schematische tekening van Hubbert (1940)

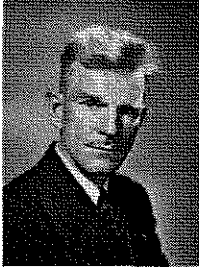
Deze eenvoudige empirische wet is sindsdien de kern van de bewegingsleer van het grondwater.

Dat de ogenschijnlijk eenvoudige wet in de praktijk weerbarstig kan zijn, moge blijken uit het feit dat geofysicus, M. King Hubbert (1903-1989) in 1940, dus 84 jaar na Darcy, constateerde dat de belangrijkste tekstboeken op het gebied van grondwaterstroming, waaronder het beroemde boek van Muskat (1937), deels uitgaan van de verkeerde vergelijking:

$$v = -(k / \mu) \text{grad}(p)$$

Dit heeft, aldus Hubbert (1940, p941), de voortgang van het vakgebied gedurende 50 jaar belemmerd. Hubbert's beroemde 150 pagina lange artikel "Theory of Groundwater Motion", is van onovertroffen helderheid en fysieke

diepgang, waarin hij voorgoed de bestaande dubbelzinnigheden uit de weg ruimt, en waarin hij en passant enkele belangwekkende vraagstukken oplost die de grondwaterexperts van zijn tijd bezig hielden (Hubbert, 1940, p166 e.v.).



M. King Hubbert
(1903-1989)

THE
JOURNAL OF GEOLOGY

November-December 1940

THE THEORY OF GROUND-WATER MOTION

M. KING HUBBERT
Columbia University

ABSTRACT

The existing analytical treatments of ground-water flow have mostly been founded upon the erroneous conception, borrowed from the theory of the flow of the ideal fluid, that ground-water motion is derivable from a velocity potential. This conception is in conformity with the principle of the conservation of matter but not with that of the conservation of energy. In the present

~~$$v = -\sigma \text{ grad}(p)$$~~

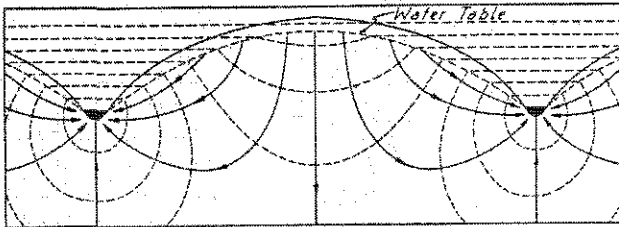


FIG. 45.—Approximate flow pattern in uniformly permeable material between the sources distributed over the air-water interface and the valley sinks.

Figuur 2: Het baanbrekende werk van M.King Hubbert, 1940.

Zijn we nu, zolang na Hubbert, klaar met het grondwater? Ik wil dit krachtig ontkennen; aangezien de huidige grondwaterproblematiek nieuwe oplossingen van ons vraagt. Ik hoop u daarvan het komende half uur te kunnen overtuigen.

De KNAW concludeert in haar hydrologische verkenning uit 2005 dat de hydrologie een belangrijke taak heeft bij het oplossen van mondiale waterproblemen (KNAW, 2005).

De hydrologie bestudeert de samenhang in de watercyclus op alle ruimte- en tijdschalen. Het is haar taak te voorspellen hoe veranderingen in klimaat, in landgebruik en de waterhuishouding doorwerken op de dynamiek van water- en stofstromen, en verder op de watervoorraden en de waterkwaliteit in alle voorkomende compartimenten van het watersysteem.

Doet zij dit goed, dan draagt zij de kennis aan die nodig is om op een verantwoorde wijze in te kunnen grijpen in de watercyclus. Haar taak is belangrijk, omdat veranderingen grootschalig zijn en complex, vaak met onverwachte gevolgen.

Mijn leerstoel Groundwater Exploration richt op onderzoek en onderwijs op het gebied van de grondwaterhydrologie. Daar gaat het om het winnen, aanvullen en beheersen van grondwater voor maatschappelijke doelen, zoals met name de watervoorziening en het grondwaterbeheer. Robuustheid inzake bodemdaling, zeespiegelrijzing en klimaat is een centraal thema.

Oplossingen die ons helpen ons aan te passen aan het veranderende klimaat zijn ongetwijfeld het meest urgent.

Grondwater in de wereld

Voordat ik met u de volgens mij belangrijkste grondwatervraagstukken langsloop, wil ik eerst laten zien hoeveel grondwater we in de wereld hebben en waarvoor het wordt gebruikt.

Verdeel al het zoete grondwater gelijkmatig over de continenten en u krijgt een laag van zo'n 70 m dik. Maar, omdat ondergronds alleen de poriën water bevatten, kunnen we er een grondlaag mee vullen van zo'n 700 m dikte. In werkelijkheid varieert de dikte van nul tot duizenden meters, zoals aan de voet van de Himalaya in India. In Nederland varieert de dikte van de laag zoet grondwater van bijna nul op plaatsen in het westen tot zo'n 400 m onder de Veluwe en uitschieters tot zo'n 1000 m onder de Centrale Slenk.

Deze grote hoeveelheid impliceert ook een grote verblijftijd van het water in de grond. Vanaf het moment dat een druppel in de bodem wegzakt tot het moment waarop hij ergens anders uitreedt, bijvoorbeeld in een meer, moeras of rivier, is hij gemiddelde 600 jaar onderweg. Ook hier is de variatie groot, van enkele dagen in een gedraineerd perceel tot vele miljoenen jaren voor bijvoorbeeld water onder woestijnen dat in vervlogen natte perioden infiltreerde.

Ook grondwater in Nederland, gewonnen onder diepe kleilagen kan duizenden jaren oud zijn. Dit "oude" water is onbesmet en komt op veel plaatsen zo uit de kraan, waarbij het op geen enkele manier onderdoet voor het beste mineraalwater, dat echter wel duizend keer duurder is.

Grondwatergebruik in de wereld

Als we kijken waarvoor het grondwater in de wereld wordt gebruikt, dan zien we dat 70% voor irrigatie wordt benut; de rest gaat naar de industrie en huishoudens. Kijken we naar drinkwater, dan blijkt wereldwijd 50% afkomstig te zijn van grondwater (Fornés et al, 2005). In Nederland is dat ongeveer 65% (Waterleidingstatistiek, 2005).

Het grondwatergebruik in de wereld is met name begin jaren zeventig van de vorige eeuw bij wijze van spreken geëxplodeerd. Goedkope boorputten en kleine pompen verschaffen honderden miljoenen boeren individueel toegang tot de grondwatervoorraden onder hun land.

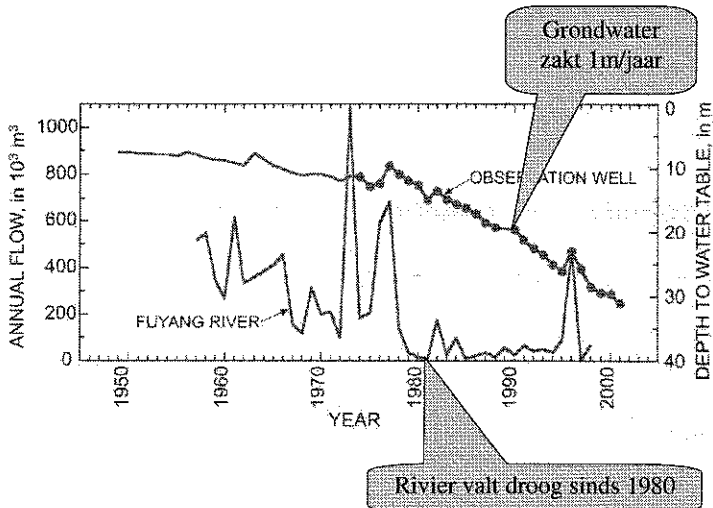
Deze zogenoemde "stille revolutie" is wereldwijd door de waterinstituten veronachtzaamd. Zij hielden zich tot voor kort hoofdzakelijk bezig met dammen en grootschalige irrigatieprojecten, en hadden nauwelijks oog voor grondwater.

Voor de individuele boer blijkt deze revolutie over het algemeen een geschenk. Zijn put garandeert hem namelijk altijd het benodigde water, zodat hij geen droogterisico meer loopt en hoogwaardiger gewassen kan verbouwen. Hierdoor kunnen velen ontkomen aan een altes overheersende armoede.

In India wordt inmiddels 76% van het geïrrigeerde land uitsluitend bevoeid met grondwater (Shah et al., 2006). Volgens het International Water Management Institute in Sri Lanka, ligt dit in China op 52% en is de situatie in landen als Pakistan, Iran, Noord-Afrika niet veel anders.

In Andalusië in Spanje bleek de het rendement in termen van Euro's per druppel bij grondwaterirrigatie 5 maal hoger dan bij bevoeiing met oppervlaktewater (Fornés et al. 2005). Belangrijk ingrediënt hiervoor zijn de kosten, die bij grondwaterirrigatie geheel bij de individuele boer liggen. Hij is daardoor gemotiveerd zijn waterverbruik te optimaliseren.

Maar, onttrekking van grondwater op zo'n grote schaal leidt tot rappe daling van de grondwaterstanden, zoals al langer bekend van de High-Plains in de VS. De daling ligt veelal in de orde van een meter per jaar zoals Figuur 3 laat zien voor een plek in Noord China (Konikow en Kandy, 2005).



Figuur 3: Snelle grondwater daling in een put in Noord China, correlatie met droogvallen van de Fuyang Rivier (uit Konikow en Kandy, 2005, Hydrogeology Journal, 13: p319, thenummer "the Future of Hydrogeology").

Bij een kenmerkende laagdikte van 50 m impliceert dit, dat het grondwater na twee generaties op raakt. In de komende decennia moeten we dan ook in toenemende mate uit verschillende delen van de wereld berichten verwachten over uitputting van grondwatervoorraden.

Het andere grote grondwaterprobleem is het aanzuigen van zout water, vooral, maar lang niet uitsluitend, in kuststreken. Een voorbeeld is verzilting van de 75 km brede kustzone nabij Hydrabad in Pakistan (Voordracht Salt Water Intrusion Meeting, Cagliari, Sept. 2006, in druk).

Deze ontwikkelingen vergen zorgvuldig grondwaterbeheer. Dit blijkt tot nu toe echter praktisch onmogelijk door het individuele karakter van de grondwateronttrekkingen, de grote maatschappelijke impact en door gebrek aan effectieve instituties.

Beheersing van de grondwateruitputting komt uiteindelijk neer op het verminderen van verdamping, (overigens ten koste van de voedselproductie), danwel op het kunstmatig vergroten van de aanvulling van het grondwater.

Het laatste is naar mijn inschatting wereldwijd één van de grootste uitdagingen waar we de komende decennia voor staan, tezamen met de beheersing van de verzilting.

Grondwater in Nederland

Hoe staat het met het grondwater in Nederland?

Terugblikkend op honderdvijftig jaar grondwaterwinning in Nederland herkennen we veel van de problemen die we nu internationaal zien. Vanaf 1853 hebben we honderd jaar lang ons grondwater in de duinstrook uitgeput en verzilt. Vanaf de jaren vijftig lossen we dit op door kunstmatige aanvulling met voorbehandeld rivierwater. Buiten de duinen hebben grondwaterwinning en versterkte landbouwontwatering de natuur verdroogd, met name sinds de jaren vijftig. Sinds de jaren zeventig worden we geconfronteerd met ernstige verontreiniging van het grondwater. Het destijds instellen van grondwaterbeschermingszones kan niet verhinderen dat het beheersen van verontreinigingen voorlopig een belangrijk thema zal blijven. Het dwingende karakter van de Europese Kader Richtlijn Water (KRW) zal hierbij een belangrijke rol spelen. In de tachtiger jaren kreeg de ecologie prioriteit. Tenwoordig is dit verankerd in het antiverdrogingsbeleid en de Natura 2000 gebieden (van Hall, 2006). Door aanscherping van onttrekkingsvergunningen, industriële waterbesparing, inzet van waterbemetering, waterbesparingsacties gericht op consumenten en wat meer inzet van oppervlaktewater is de grondwaterwinning in ons land sinds 1995 niet meer toegenomen (Waterleidingstatistiek, 2005).

Met andere woorden, in Nederland hebben we inmiddels veel gedaan om het overbelaste grondwatersysteem weer in balans te krijgen. Kunstmatige infiltratie speelt hierbij een belangrijke, vaak essentiële rol.

Kunstmatige infiltratie

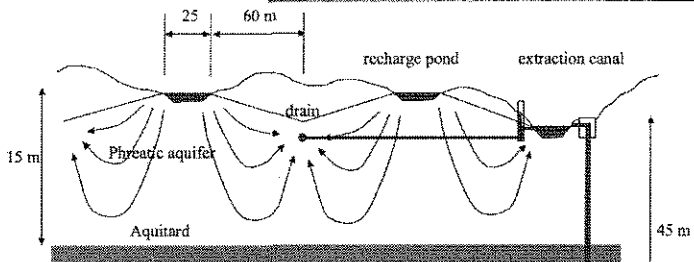
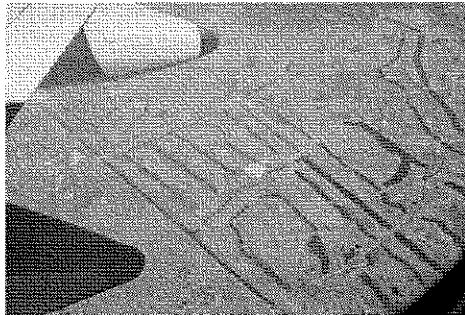
Wat is kunstmatige infiltratie?

Kunstmatige infiltratie omvat alle vormen van beheerst aanvullen van de grondwatervoorraad. De nieuwe Engelse naam is Managed Aquifer Recharge (MAR).

De gedachte achter de kunstmatige infiltratie is dat het ingeleide water door de daarop volgende bodempassage op grondwater gaat lijken, dat wil zeggen een constante kwaliteit en temperatuur aanneemt en hygiënisch betrouwbaar wordt, door de natuurlijke verwijdering van ziekmakende micro-organismen (Huisman & Olsthoorn, 1983).

Bij de terugwinning kan dan worden volstaan met een eenvoudige op grondwater afgestemde nazuivering van het water.

Kunstmatige infiltratie
in de Amsterdamse
Waterleidingduinen



Figuur 4: Kunstmatige infiltratie in de Amsterdamse Waterleidingduinen ten zuiden van Zandvoort. Het geïnfilteerde voorgezuiverde rivierwater stroomt in gemiddeld 3 maanden naar de "drains" en de onttrekkingskanalen.

De andere cruciale factor is dat water in de bodem praktisch niet verdampt. De bodem werkt als een groot reservoir waarmee periodes zonder aanvoer kunnen worden overbrugd.

In Nederland wordt ca 200 miljoen m³ gezuiverd oppervlaktewater geïnfilteerd en na bodempassage weer teruggewonnen voor drinkwaterbereiding. Dit gebeurt voornamelijk in de duinen. Samen met nog 60 miljoen m³ oevergrondwater langs de rivieren, is de kunstmatige infiltratie

in Nederland goed voor 25% van de drinkwatervoorziening (Waterleidingstatistiek, 2005).

Door kunstmatige infiltratie wordt de natuurlijke leveringscapaciteit van grondwatersystemen met een factor 5 à 10 vergroot. Hierdoor kan aan de Amsterdamse Waterleidingduinen per jaar 70 miljoen m³ water worden onttrokken; dit is zeven keer de natuurlijke jaarlijkse aanvulling met regenwater.

Zou met diepinfiltratie een diepere watervoerende laag voor drinkwaterproductie kunnen worden gebruikt, dan neemt de capaciteit van de Amsterdamse Waterleidingduinen toe met 250 miljoen m³/a.

Er is dus veel capaciteit beschikbaar voor de toekomst. Om deze te kunnen benutten is verder onderzoek nodig. Dit betreft onder andere de doorontwikkeling van infiltratieputten die niet verstoppen. In het verleden is hier al veel werk voor verzet, zoals de putten waarvan de boorgatwand tevoren werd geschraapt.

Nu bij ons de vraag naar drinkwater stagneert, gaat het erom zulk onderzoek in een internationale context op te pakken.

Ik wil nu een aantal ander vormen van kunstmatige infiltratie langslopen.

ASR wells (Aquifer-Storage Recovery)

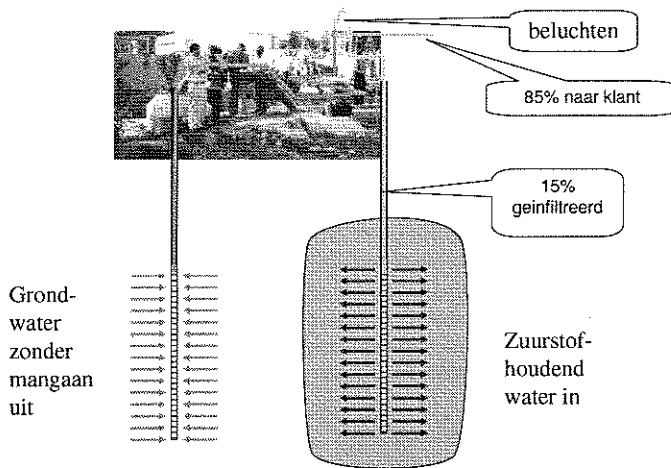
Een bijzondere vorm van kunstmatige infiltratie zijn de zogenoemde ASR-wells. Dit zijn putten waarmee water tijdelijk in de bodem wordt opgeslagen voor gebruik op een later moment. Toepassingen zien we vooral in de VS en Australië (Pyne, 1995).

Maar weinig mensen weten, dat we in Zuid-Holland sinds begin jaren tachtig zo'n 100 kleine ASR-installaties hebben, waarmee dakwater van kassen seizoenmatig wordt opgeslagen in de onderliggende licht-brakke laag van enkele tientallen meters dikte.

Deze installaties, waarvan ik zelf de eerste ontwierp, vormen een interessant Nederlands experiment, dat ik graag wil onderzoeken.

Ondergrondse ontmanging

Infiltreren doen we ook in Egypte, waar duizenden dorpen grondwater drinken dat mangaan bevat. Sinds 1999 assisteer ik met collega's van Waternet een waterleidingbedrijf met het ondergronds verwijderen van dit mangaan. Dit geschiedt op dorpsniveau, waar zuiveringsinstallaties te complex en te duur zijn. Met de lokale grondwaterputten infiltreren we een hoeveelheid zuurstofrijk water, waarna een veelvoud zonder mangaan kan worden onttrokken. Inmiddels krijgt een half miljoen mensen danzij deze techniek beter water. Deze uiterst eenvoudige, chemicaliënvrije methode, leent zich voor expansie, mits goed beheerst en onderweg lessen worden geleerd.



Figuur 5: Ondergrondse ontmanging in Egypte

Om Egypte verder te helpen is diepgaander onderzoek nodig door een promovendus, bij voorkeur in samenwerking met IHE en een Egyptische universiteit.

Onbedoelde infiltratiesystemen

Er zijn ook tal van onbedoelde infiltratiesystemen die aandacht verdienen, zoals het 130 km lange Ismailya kanaal dat water transporteert van Cairo naar Suez, maar onderweg 13% verliest door lek. In het blad H₂O van enkele jaren geleden stond een plan om wanden en bodem van dit kanaal te dichten met een Nederlands product en Nederlandse subsidie. Geén woord over de honderdduizenden mensen die van dit lekwater leven. Zo bleek maar weer eens hoe weinig aandacht grondwater pleegt te krijgen. Ik heb er uiteraard in H₂O tegen geprotesteerd, evenals grondwaterdeskundigen in Egypte zelf.

Behoefte aan opslagcapaciteit

Gezien de alsmaar toenemende behoefte aan waterberging, ligt het voor de hand de watervoorraad achter stuwdammen doelbewust te gaan combineren met die in de bodem, vooral nu uitbreiding van grote dammen sociaal economisch nauwelijks meer mogelijk is (World Commission on Dams, 2000).

Oman laat dit zien door water dat achter dammen wordt opgevangen geleidelijk voor de dam te infiltreren, waarna het via putten beschikbaar is (Batashi & Ali, 1998).

Dit geïntegreerde gebruik van bovengrondse opslagcapaciteit met de bodem als secundaire meer permanente opslagfaciliteit en transportmedium heeft mijns inziens een grote toekomst (Olsthoorn, 2002).

Waar beschikbaar, kunnen bestaande irrigatiekanalen voor de wateraanvoer worden gebruikt, zoals bij een infiltratie-experiment in Egypte, waar ik via IWACO bij betrokken was (Fatma Attia et al., 1998, Darwish, 1998). Overigens infiltreren vele kanalen ook al vanzelf aanzienlijke hoeveelheden water.

De ervaring met kunstmatige infiltratie in ons land is groot; we dienen deze ook elders in te zetten (Peters et al. 1998). Het vak kunstmatige infiltratie zou daarom weer moeten worden ingevoerd (Huisman & Olsthoorn, 1983).

KWO

Een geheel andere vorm van ondergrondse opslag is die van energie, de zogenoemde Koude-Warmte Opslag, KWO, die een grote vlucht neemt in ons land (bijvoorbeeld Van Elswijk en Willemsen, 2002). Ik kan dit punt gezien de tijd nu niet uitwerken.

Wel ben ik van mening dat studie nodig naar de langetermijneffecten en geavanceerde monitoring en beheersing.

Leven met zout water

Nederland verzilt, hoe gaan we daarmee om?

Door de lage ligging van ons land, is zout water nooit ver weg. Noordzeewater stroomt ondergronds naar droogmakerijen zoals de Haarlemmermeer (Dufour, 1998).

Willen we de verzilting goed kunnen voorspellen, dan dienen we de ondergrond direct buiten onze kust te kennen. Tot nu toe ontbreken de gegevens. Hierdoor is de westelijke rand van onze modellen in hoge mate speculatief. Dit verhindert ontwikkeling van betrouwbare beheersmaatregelen, die de Europese Kader Richtlijn Water verlangt.

Wel hebben we sinds kort houvast aan de analytische oplossing voor naar zee stromend diep zoet grondwater, zoals afgeleid door Mark Bakker op basis van analytische oplossingen van Prof. Van Dam (Bakker 2006, Van Dam & Sikkema, 1982). We zullen de komende jaren echter met betrokken partijen een aanzienlijke meetinspanning moeten leveren om het grondwater buiten onze kust voldoende te leren kennen.

Zoet en zout water komen vaak samen in dezelfde laag voor. Daarbij treedt dichtheidsstroming op. Dit kan tot ingewikkelde zoutpatronen leiden, vooral in de instabiele situatie wanneer het zwaardere zoute water zich boven het lichtere zoete bevindt, bijvoorbeeld na overstroming van de kust, zoals in 2004 gebeurde bij de tsunami (Illangasekare et al, 2006).

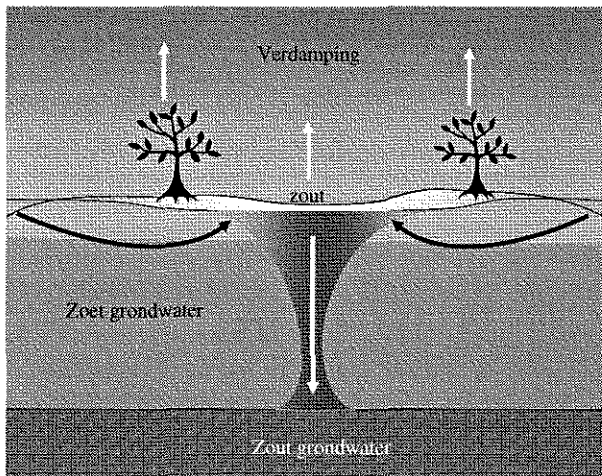
Maar deze situaties zijn niet beperkt tot kustzones. Zout boven zoet water vinden we ook beneden zoutmeren, die eindpunten zijn van het grondwatersysteem, waaruit het water alleen via verdamping ontsnapt, met achterlating van zijn zout.

Okavango

Wellicht het meest interessante voorbeeld hiervan is de Okavango in Botswana, aan de rand van de Kalahari. Deze 150 km² grote moerasdelta, is één van de gebieden met de grootste biodiversiteit ter wereld. Het is tegelijk een eindpunt van een zoetwatersysteem. Maar in tegenstelling tot andere systemen blijft het water zoet. Dit was tot voor kort een raadsel, maar blijkt te worden veroorzaakt door een bijzonder samenspel van grondwatermechanismen, zoals recentelijk is uitgezocht door de groep van Kinzelbach van de ETZH in Zürich (Bauer et al, 2006).

De zandige delta omvat duizenden eilandjes met in totaal ongeveer 7000 km oever. De verdamping vanaf de eilandjes brengt een voortdurende instroom van zoet water via de oevers teweeg. Stromend naar het centrum van de eilandjes wordt het steeds zouter. We zien dat de weelderige zoetminnende vegetatie langs de rand, die naar het midden toe overgaat in zoutminnende vegetatie en zelfs naar regelrechte zoutkorsten in het centrum.

Nabij het centrum is het soortelijk gewicht van het water zodanig toegenomen, dat het vanzelf naar de diepte wegzinkt. Daar accumuleert het op de bodem van de zandlaag.



Figuur 6: Schematische voorstelling dichtheidsstroming onder een klein eiland in de Okavango in stand gehouden door combinatie van verdamping en dichtheidsstroming

Dit natuurlijke mechanisme vormt kennelijk al duizenden jaren de motor achter de schoonheid van dit gebied. Het systeem werkt alleen maar omdat alle parameters onderling goed staan afgesteld. Zouden de eilandjes groter, kleiner of hoger zijn, dan zou het moeras in een troosteloos zoutmeer veranderen. Bij een andere doorlatendheid van het zand zou het mogelijk niet

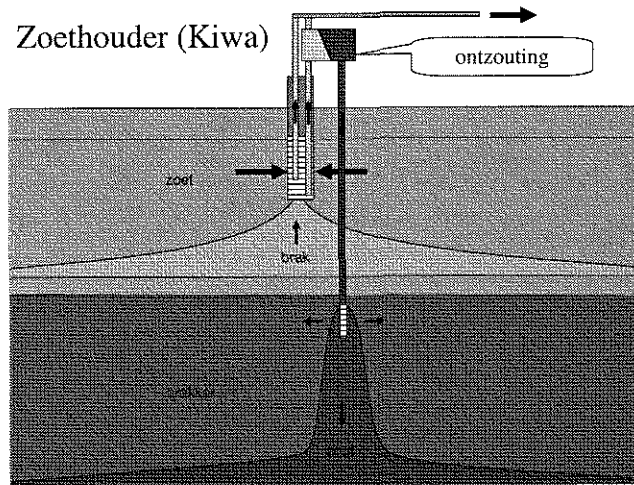
werken. Ook het klimaat moet passen. Hieruit blijkt wel hoe kwetsbaar dit systeem is als we er aan gaan sleutelen.

Zoethouder

Nu dan, van het Okavango systeem naar met de situatie bij ons, waar een stijgend aantal grondwaterpompstations brak en zout water aantrekt, een omstandigheid die in het buitenland vaak dramatische vormen aanneemt, zoals in grote kuststeden van Brazilië.

Als oplossing stelde Kiwa in 2001 de zogenoemde zoethouder voor. Het idee is om het onttrokken brakke water te ontzouten, en de deelstroom, waarin het zout met ongeveer een factor 2 is geconcentreerd, in een diepere bodemlaag terug te brengen die minstens net zo zout is. Zonder duidelijkheid over de gevolgen wordt dit niet toegestaan.

Indachtig het natuurlijke Okavango-voorbeeld zou de zoutconcentratie van het terug te brengen water juist moeten worden gemaximaliseerd. Dit beperkt de te infiltreren zoute retourstroom en maximaliseert zijn soortelijk gewicht. Hierdoor zinkt dit zoute water vanzelf naar de basis van de zandlaag, zonder milieugevolgen.



Figuur 7: Schematische voorstelling van de "zoethouder" waarbij echter gebruik wordt gemaakt van de hoge dichtheid om het te concentreren naar de basis van het watervoerend pakket te laten zinken.

Dit is mogelijk duizenden jaren vol te houden, en net als in het Okavango-systeem, waarschijnlijk zelfs in lagen met zoet water.

De zoethouder is feitelijk een algemeen concept voor duurzame brakwaterwinning en heeft op deze wijze veel exportpotentie, aangezien de wereld hier werkelijk behoefte aan heeft. Dit is daarom een belangrijke lijn voor onderzoek.

Zoals gezegd is verzilting een wereldwijd probleem met grote urgentie. Nederland heeft door zijn ligging hier altijd mee te maken en zoekt voortdurend naar nieuwe oplossingen. Vanuit ons land mag dan ook een aanzienlijk bijdrage worden verwacht aan het oplossen van deze internationale problematiek, c.q. het sturen van brak en zout water, het gericht afvangen en lozen ervan, het zorgvuldig afromen van zoet water, de modellering, de monitoring en het beheer, al dan niet in combinatie met ontzoutingstechnieken.

Horizontale winning

Bij dit alles moeten we ons afvragen of we met de beperkingen van onze verticale putten de toekomst voldoende aan kunnen. Horizontale putten met hoge capaciteit, geboord met horizontaal gestuurde boringen, zijn nog niet beschikbaar, maar zouden essentiële voordelen hebben ten opzichte van verticale.

Horizontale putten kunnen op elke gewenste diepte en plaats worden aangebracht, ongehinderd door obstakels, water en reliëf en precies in de juiste bodemlaag, waarbij zij zeer gelijkmatig onttrekken.

Deze putten maken het gericht sturen van grondwater en het nauwkeurig wegvangen van brak water mogelijk, bijvoorbeeld bij de bestrijding van verzilting.

Ik denk dat een grote rol is weggelegd voor zulke nog te ontwikkelen putten. We verwachten de komende jaren door onderzoek binnen een consortium daaraan bij te dragen.

Modellering

Ontwikkeling deterministische modellering

Modellen zijn standaardgereedschap voor kwantitatieve analyse en voorspelling van het gedrag van grondwatersystemen.

Modelvoorspellingen zijn inherent onzeker omdat we nimmer de opbouw van de heterogene ondergrond, zijn eigenschappen, de processen, noch de drijvende krachten en de terugkoppelingen volledig zullen kennen.

Er is daarom geen ontkomen aan dat we onze modellen ijken, ook al noemde mijn geëerde collega Marc Bierkens dit een vloek (Bierkens, 2002).

Ik ga ervan uit dat we in ons land, na de Werkgroep Modelcalibratie van de NHV en de twee lezingendagen die we daarover organiseerden (NHV 1997, 2001), onze grondwatermodellen alleen nog maar met statistisch verantwoorde programmatuur ijken (Konikow en Bredehoeft, 1992, zie ook de twijfel bij Carrera et al, 2005).

Echter, de daarmee geoptimaliseerde parameters compenseren deels de aanwezige tekortkomingen in de structuur van het model. Parameterwaarden en model mogen dus feitelijk nooit worden ontkoppeld, hoewel we dit vaak doen.

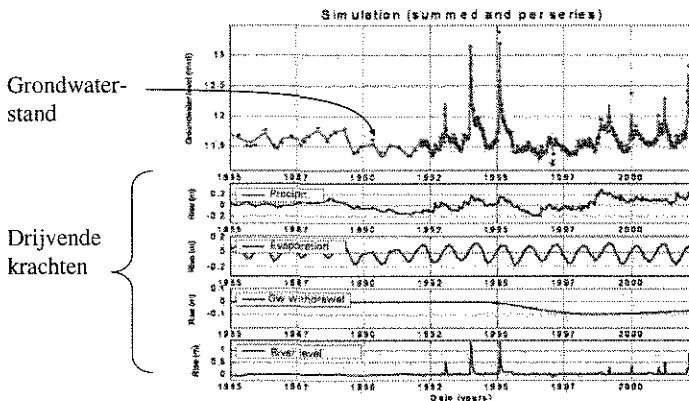
Grondwatermodellen en kalibratie dienen m.i. volledig geïntegreerd te zijn, in de praktijk zowel als in de opleiding.

De onzekerheid van de voorspellingen hangt nauw samen met die van ons conceptuele model. We zullen daarom verschillende conceptuele modellen objectief moeten gaan beoordelen. Dit kan op basis van de Kullback-Leibler divergentie (relatieve entropie), die nauwkeurigheid en aantal vrijheidsgraden tegen elkaar afweegt (Poeter & Anderson, 2005).

Dit is duidelijk een volgende stap, die het almaar ingewikkelder maken van modellen in balans moet brengen met de beschikbare gegevens. Hiermee kan objectief worden beoordeeld in hoeverre een modelaanpassing ook echt een verbetering is. Op de huidige manier komen we niet veel verder.

Tijdreeksanalyse

Gezien de beperkingen van deterministische modellen, veroorzaakt door een fundamenteel tekort aan gegevens van de fysische parameters, werkt de grondwatergroep ook aan stochastische modellering van grondwatertijdreeksen. Deze modellering vereist geen a-priori fysische parameters. Doel is de invloed te bepalen van elk van de afzonderlijke krachten die het grondwatersysteem aandrijven.



Figuur 8: Analyse van grondwatertijdreeksen met Pearson III benadering van de impuls respons maakt het mogelijk om grote aantallen reeksen met ongelijkmatige tijdstappen in batch te analyseren. Handleiding Menyanthes, Von Asmuth, 2006.

Promovendus Jos von Asmuth en zijn begeleider Kees Maas hebben aangetoond dat de impuls respons van grondwatersystemen in de meeste situaties door maar drie momenten wordt vastgelegd en de vorm krijgt van een Pearson-III functie (Asmuth et al. 2002). Met dit als uitgangspunt blijkt het mogelijk grote aantallen tijdreeksen met onregelmatige meetintervallen tegelijk te analyseren. Hydrologen hebben hiermee voor het eerst een gereedschap in handen om miljoenen waterstandmetingen in een oogwenk te

ontleden in trends, verstoringen en de bijdrage van verschillende invoerreeksen.

De volgende stap is de tijdreeksanalyse vlakdekkend te maken. Dit onderzoek wordt binnen de grondwatergroep uitgevoerd door Kees Maas, Ed Veling en Mark Bakker.

Met de vlakdekkende tijdreeksanalyse kunnen dynamische systeemeigenschappen op elke locatie worden bepaald zonder fysisch grondwatermodel. Dit gebeurt op basis van analytische elementen, waarmee de interpolatie consistent wordt gemaakt met de randvoorwaarden van het grondwatersysteem.

Het volgende researchonderwerpen zijn integratie van deterministische en tijdreeksmodellen en het dynamisch maken van analytische modellen. Dit gebeurt op basis van de statistische momenten van de impuls responsen. Hiermee kan binnen een regionaal model op elk gewenst detail, zelfs binnen afzonderlijke percelen, een willekeurig gedetailleerd tijdsverloop worden gesimuleerd (Bakker et al. 2006).

Leerstoel

Ambitie leerstoel en onderwijs

Zoals aan het begin gezegd, richt de leerstoel zich op het ontwikkelen van kennis, technieken en methoden voor een duurzame en robuuste benutting van grondwater en ondergrond met het accent op watervoorziening, grondwaterbeheersing en -bescherming. Systeendenken en multidisciplinaire wisselwerking met aangrenzende vakgebieden staan centraal, zoals ecologie, landbouw, civiele technieken, geochemie en gezondheidstechniek.

We beogen ingenieurs en onderzoekers af te leveren die concurrerend zijn in een internationale arbeidsmarkt, in staat om op basis van de wetenschappelijke kennis en technologie nieuwe oplossingen aan te dragen en te implementeren, zich daarbij rekenschap gevend van de maatschappelijke implicaties.

Het afstuderen dient derhalve een duidelijk innovatief karakter te dragen in de vorm van een onderzoek of een ontwerp, bij voorkeur binnen een bedrijf. De student dient daarbij zijn zelfstandigheid en onafhankelijkheid te tonen.

In deze periode dient de student zijn kennis op grondwatergebied tot internationaal niveau te verbreden en te verdiepen, onder andere door een gedegen inhoudelijk onderzoek van de literatuur vast onderdeel van de studie te laten zijn.

Colleges en modellering worden geïntegreerd, waarbij inzicht in het model en de analyse van de uitkomsten voorop staan.

Samenwerking

We werken intensief samen met collega universiteiten, kennisinstituten, waterleidingbedrijven, waterschappen en adviesbureaus. Er is een natuurlijke samenwerking met Waternet, dat de ambitie heeft voor de Amsterdamse

Waterleidingduinen een status als international hydrologisch-ecologisch onderzoeksgebied te verwerven voor onderzoek met derden.

Slot

Wereldwijd is het belang van grondwater de afgelopen 40 jaar enorm gestegen, maar op veel plaatsen begint grondwater op te raken en verzilt het. Door kennis en kunde op het gebied van modellering, beheersing van verzilting en de kunstmatige aanvulling van grondwatervoorraden, met tal van voorbeelden in eigen land, kan en hoort Nederland een substantiële bijdrage aan oplossingen te leveren voor de waterproblemen in de wereld. Van de TU mag worden geëist dat zij kennis en gereedschappen ontwikkelt die nodig zijn om zulke oplossingen ook te realiseren.

Dames en heren, het belang van grondwater en bodem neemt alleen maar toe. Tegelijkertijd wordt de beschikbaarheid van grondwater bedreigd door verontreiniging, verzilting en overmatige onttrekking. Op een toenemend aantal plaatsen in de wereld raakt het grondwater zelfs op. Door zijn voortdurende zoektocht naar oplossingen, beschikt Nederland over veel kennis en kunde op het gebied van modellering, beheersing van verzilting en de kunstmatige aanvulling van grondwatervoorraden. We kunnen bogen op tal van voorbeelden in eigen land. Vanuit die positie behoren wij een substantiële bijdrage te leveren aan het oplossen van de waterproblemen in de wereld. Van de TU mag worden geëist dat zij kennis en gereedschappen ontwikkelt die nodig zijn om deze ook te realiseren.

Ik heb gezegd.

Referenties

- Asmuth, J.R. von, M.F. Bierkens & K. Maas (2002) Transfer function-noise modeling in continuous time using predefined impulse response functions. *Water Resources Research*, Vol 35, 12:1287+, DOI:10.1029/2001WR001136
- Asmuth J.R. von (2006) Manual Menyanthes, Version 1.5. Kiwa, Nieuwegein. See also <http://www.menyanthes.nl/>
- Bakker, M. , K. Maas, F. Schaars & J.R. von Asmuth (2006) Analytic Modeling of Natural Groundwater Dynamics with an Approximate Impulse Response Function for Areal Recharge. *Advances in Water Resources* DOI 10.1016/j.advwatres.2006.04.08, 1-12.
- Bakker, M. (2006) Analytic Solutions for Interface Flow in combined Confined and Semi-confined Coastal Aquifers. *Advances in Water Resources* 29 (2006) 417-425
- Batashi, N.M., & S.R. Ali (1998) Artificial Recharge Schemes in Water Resources Development in Oman. In Peters, et al. (Eds). *Artificial Recharge of Groundwater*. Balkema, Rotterdam, ISBN 90-5809-017-5, 231-236
- Bauer, P., R. Supper, S. Zimmermann, W. Kinzelbach (2006) Geoelectrical imaging of groundwater salinization in the Okavango Delta, Botswana, *Journal of Applied Geosciences*, DOI: 10.1016/j.appgeo.2006.01.003 (in press)
- Bierkens, M.F. (2002) *Het water en de leer*. Inaugurele rede. Bergdrukkerij, Amersfoort.
- Carrera, J., A. Alcolea, A. Menian, J. Hidalgo, L.J. Slooten (2005) Inverse problem in Hydrology. *Hydrogeology Journal* 13:206-222
- Dam J.C. van & Sikkema (1982) Approximate Solution for the problem of the Shape of the Interface in a Semi-confined Aquifer, *Journal of Hydrology*, 56(3-4) 221-237.
- Darcy, H. (1856) *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Paris, 1986.
- Darwish, M.M. (1998) Artificial Recharge experiments in Bustan Extension Area, Egypt. In Peters et al. (Eds.) *Artificial Recharge of Groundwater*. Balkema, Rotterdam, ISBN 90-5809 017 5. 343-345.
- Dufour, F.C. (1998) *Grondwater in Nederland: onzichtbaar water waarop wij lopen*. NITG-TNO, Delft, ISBN 90-6743-536-8.
- Elswijk, R.C. van & A. Willemsen (2002) Well fields for Aquifer Thermal Storage; groundwater as a medium for renewable energy. In Dillon (Ed). *Management of Artificial Recharge for Sustainability*. Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 527 4: 375-378.
- Fornés, J.M., A. de la Hera, M. R. Llamas (2005) The silent revolution in groundwater intensive use and its influence in Spain. *Water Policy*, 7 (2005) 253-268
- Favler, T., P de Louw & R. Stuurman (2006) *De morfologie en werking van wellen*. H2O, 20, 40-42

Fatma Attia, Madiha Moustafa, T. Olsthoorn, E. Smidt (1998) The role of Artificial Recharge in integrated Water Management in Egypt. In Peters et al. (Eds.) Artificial Recharge of Groundwater. Balkema, Rotterdam, ISBN 90-5809 017 5. 47-52.

Hall, Alfred van (2006) Terechte ambitie bij Aanpak Verdroging. Staatscourant, 138, 17-7-06, p4.

Huisman, L. & T.N. Olsthoorn (1983) Artificial Groundwater Recharge, Pitman, Boston etc. ISBN 0-273-08544-1, 320pp.

Illangasekare, T. et al (2006) Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka. Water Resources Research, 42(5) DOI 10.1029/2006WR004876

Kiwa (2001) Het brakwaterconcept als zoethouder. H2O.

KNAW (2005) Turning the Water Wheel Inside Out. Foresight Study on Hydrological Science in the Netherlands. Amsterdam, 2005, ISBN 90-6984-438-9.

King Hubbert, M. (1940) The Theory of Groundwater Motion. Journal of Geology. Nov.-Dec. 1940, Vol XLVIII, No. 8, Part 1, 785-944

King Hubbert, M. (1969) The Theory of Ground Water Motion and Related papers. Hafner Publishing Company, New York & London.

Konikow, L.F. & E. Kendy (2005) Groundwater Depletion: A global problem. Hydrogeology Journal, 13:317-320.

Konikow, L.F. & J.D. Bredeoeft (1993) Groundwater. Ground-water models: Validate or invalidate. Vol 31, 2, 178-179.

Louw, P de (2004). Nutriënten en chloridebelasting in Polder de Noordplias: Wellen verzilten oppervlaktewater. TNO Informatie 2004.

Muskat M. (1937) The flow of Homogeneous Fluids through Porous Media. McGraw Hill, New York.

NHV (1997) Modelkalibratie: Het automatisch ijken van grondwatermodellen. Nederlandse Hydrologisch Vereniging, NHV-special No. 2.

NHV (2001) Moderne Modelkalibratie in de Praktijk. Nederlandse Hydrologische Vereniging, NHV-special No. 4.

Olsthoorn, T.N. (2002) Climate Variability and the need for Recharge Enhancement and Subsurface Storage. Presentation on the IAHS symposium "Recharge Enhancement and Sub Surface Water Storage, A promising option to cope with Climate Variability. Wageningen, Dec 18, 2002.

Peters, J.H. et al. Eds (1998) Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the Third International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98. Amsterdam, 21-25 September 1998. Balkema, Rotterdam, ISBN 90-5809-017-5, 474pp.

Poeter, E. & D. Anderson, 2005, Multi-model Ranking And Inference In Ground-Water Modeling, Ground Water v. 43, no. 4: 597-605.

- Shah, T. & O.P. Sing, A. Mukherji (2006) Some Aspects of South Asia's groundwater irrigation economy: analysis from a survey in India, Pakistan, Nepal Terai and Bangladesh. *Hydrogeology Journal*, 14, 286-309.
- Pyne, R.D. (1995) *Groundwater Recharge and Wells. A Guide to Aquifer Storage Recovery*. CRC Press. ISBN 1-56670-097-3.
- VEWIN (2005) *Waterleidingstatistiek*. Zie ook andere jaren. VEWIN, Rijswijk.
- World Commission on Dams (2000) *Report of the World Commission on Dams*. Te downloaden van <http://www.dams.org/report/>.