

Weet wat je meet en meet wat je niet weet

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van  
bijzonder hoogleraar Methoden van Bodem en Grondwatermonitoring  
aan de Faculteit Geowetenschappen  
van de Universiteit Utrecht  
op dinsdag 9 maart 2010  
door  
Frans van Geer

**Universiteit Utrecht**



## COLOFON

### ISBN

978 90 6266 272 2

### Uitgave

Universiteit Utrecht, 2010

### Grafische verzorging

Geomedia – Faculteit Geowetenschappen – Universiteit Utrecht

### Foto voorzijde

Een grondwaterstijghoogte meetpunt in Drenthe, ingericht ter informatie aan het publiek. Foto C. J. van Geer-Plesman

### Druk

Bergdrukkerij, Amersfoort

Weet wat je meet en meet wat je niet weet.

*Meneer de rector magnificus, collega's, familie en vrienden, dames en heren,*

### Inleiding

Veel kinderen die op het strand spelen graven kuilen vlak bij de zee. Je hoeft daar maar een paar decimeter te graven en de kuil stroomt binnen een paar minuten vol water dat uit het zand naar buiten treedt; grondwater dus. Kijken we gedurende een tijdje naar het waterniveau in die kuil dan zien we dat het water zakt als het laagwater wordt en dat het stijgt als het zeewater opkomt. Het waterniveau is een dynamisch verschijnsel. Zo dicht bij zee zal het niemand verbazen dat het water in de kuil zout is. Lopen we een stukje de duinen in en we zouden daar een kuil graven, dan moeten we dieper gaan om bij het grondwater te komen dan op het strand. Het grondwaterniveau in de duinen is hoger dan op het strand. Opvallender is echter dat het water al op korte afstand van de zee niet zout is maar zoet. Dat komt omdat het grondwater in de duinen niet gevoed wordt door de zee, maar door regenwater. Ook zullen we zien dat het waterniveau in die kuil in een paar uur tijd nauwelijks verandert. Nog wat verder landinwaarts komen we misschien bij een ouderwetse vuilstortplaats, zonder bescherming van het grondwater. Een kuil die daar vlakbij gegraven wordt loopt ook vol met water, maar de chemische samenstelling is volledig anders dan in de duinen, terwijl het grondwater bij de vuilstort wordt gevoed met dezelfde regen als in de duinen. Op zijn reis door de ondergrond kan het water allerlei stoffen meenemen, afhankelijk van wat dat water op die reis tegenkomt. In het geval van de vuilstort zijn dat doorgaans stoffen die we als verontreiniging aanmerken.

Omgekeerd heeft het grondwater ook een effect op de bodem. De aan- of afwezigheid van water is belangrijk voor de draagkracht van de ondergrond en voor de stabiliteit van constructies. Denk bijvoorbeeld aan het afschuiven van de dijk bij Wilnis een paar jaar terug als gevolg van het tekort aan water. Ook kan een daling van het grondwaterpeil bij een ondergrond waar veen en klei in voorkomt, leiden tot flinke bodem daling, met alle mogelijke schadelijke gevolgen van dien. Het water is ook belangrijk als ondergronds transportmiddel. Het kan stoffen op de ene plaats mobiliseren en op de andere

plaats achterlaten. Bovendien kunnen chemische reacties tussen bodem en grondwater de eigenschappen van de ondergrond en de samenstelling van het grondwater ingrijpend veranderen. Een recent voorbeeld waar het grondwater als transportmiddel van verontreinigen een rol speelt, is de discussie rond het storten van baggerslib in diepe oppervlaktewaterplassen. Eén van de discussiepunten hierbij is in hoeverre verontreinigingen uit het slib door het grondwater verspreid kunnen worden.

We kunnen de transportcapaciteit van het grondwater ook gebruiken om verontreinigde bodem schoon te maken. Bij veel bodemsaneringoperaties wordt door middel van pompen een grondwaterstroming door een zone met verontreiniging gecreëerd, waarbij de grond als het ware wordt schoongespoeld. Daarbij kunnen stoffen worden toegevoegd bijvoorbeeld om verontreinigingen te mobiliseren of om verontreinigingen in de ondergrond af te breken.

Kortom, bodem en grondwater kunnen al op korte afstand heel verschillend zijn wat betreft het niveau, de chemische samenstelling en de dynamiek. Het ondergrondsysteem is een complex, dynamisch, driedimensionaal systeem, met een sterke wisselwerking tussen het grondwater en de bodem, zowel wat betreft de fysische als de chemische aspecten. Bepalend voor het gedrag van het ondergrondse systeem zijn enerzijds invloeden die als natuurlijk zijn aan te merken, zoals de geologische opbouw en de natuurlijke aanvulling van het grondwater, en anderzijds invloeden als gevolg van menselijk handelen zoals de waterhuishouding, het landgebruik, vuilstorten, waterwinning, enz. Dit menselijk handelen betreft ten dele een doelbewuste beïnvloeding, bijvoorbeeld om via ontwatering optimale condities te hebben voor de landbouw, of om voldoende schoon drinkwater te winnen. Ten dele is deze beïnvloeding een ongewenst bijproduct zoals bodem- en grondwaterverontreinigingen als gevolg van industriële activiteiten of de bodemdaling als gevolg van winning van grondwater of delfstoffen.

### **Grondwater, bodem en maatschappelijk belang**

Niet iedereen zal er bij stil staan, maar bodem en grondwater spelen een belangrijke rol in ons dagelijkse leven. Het grondwater is een belangrijke bron voor drinkwater, maar ook voor het produceren van ons voedsel is het water in de ondergrond van groot belang. Met een te hoge of te lage grondwaterstand

groeien gewassen niet optimaal. Bovendien kunnen veel landbouwmachines onder te natte condities het land niet op. In stedelijk gebied geeft een te hoge grondwaterstand wateroverlast in de vorm van water in de kruipruimte en schimmelvorming in huis. Het oude deel van de stad Delft kampt hier bijvoorbeeld mee. Maar ook een te lage grondwaterstand brengt problemen met zich mee doordat houten palen kunnen gaan rotten en constructies kunnen beschadigen als gevolg van verzakking. Verontreiniging van het grondwater leidt tot problemen voor de waterwinning en waar grondwater opkwelt, of uittreedt in het oppervlaktewater kan verontreiniging van het grondwater ongewenst, of zelf gevaarlijk zijn, voor mens of ecosysteem.

De bodem is letterlijk het fundament waarop onze samenleving is gebouwd. We willen dat gebouwen blijven staan, dat wegen en spoorwegen niet verzakken en dat het water achter de dijken blijft. Steeds vaker willen we de ondergrond ook gebruiken. Gebouwen en infrastructuur gaan steeds meer de diepte in. In sommige steden parkeert u de auto op tientallen meters beneden het maaiveld. De ondergrond is ontdekt als medium voor energieopslag in de vorm van koude en warmte en we onderzoeken de mogelijkheid om er afvalgassen zoals CO<sub>2</sub> in op te slaan. Dat benutten van de ondergrond roept maatschappelijke reacties op. Problemen bij het ondergronds aanleggen van metrotunnels halen het nieuws en ook de recente publiciteit rond het proefproject voor de opslag van CO<sub>2</sub> bij Barendrecht zal niemand zijn ontgaan.

Het maatschappelijke belang van die complexe ondergrond en het grondwater is zeer groot. Er moeten vragen worden beantwoord als:

- wat is de draagkracht van de ondergrond,
- hoe groot is het zelfreinigend vermogen,
- wat gebeurt er als we de waterhuishouding veranderen,
- wat zijn de risico's van een ingreep in de ondergrond door ondergrondse constructies,
- wat is de invloed van de grondwatersamenstelling op het ecosysteem,
- en nog veel meer.

Een veel terugkerend dualisme hierbij is dat wij bepaalde eigenschappen van de ondergrond en het grondwater graag optimaal willen benutten, maar dat die benutting niet ten koste mag gaan van veiligheidsrisico's of onaanvaardbare veranderingen van het milieu. Het maatschappelijke belang vraagt om goede

informatie over het ondergrondse systeem, om in de ontwerpfase goede afwegingen te kunnen maken, het gevoerde beleid te toetsen en te evalueren en om te waarschuwen als er iets dreigt mis te gaan. Er is daarom alle reden om de ondergrond en het grondwater goed in de gaten te houden: kortom te monitoren.

Het belang van op goede informatie gebaseerd waterbeheer is ook onderkend door de Europese lidstaten. Dit heeft onder meer geleid tot de Europese Kader Richtlijn Water [1] en de Grondwater Richtlijn [2]. In deze richtlijnen worden, onder meer, grondwaterlichamen onderscheiden. Enigszins kort door de bocht geformuleerd, zijn de lidstaten gehouden te rapporteren of de grondwaterlichamen in een 'goede toestand' verkeren, en of er een trend is waar te nemen in die toestand. Onder de toestand van het grondwater wordt niet alleen het vóórkomen verstaan (is er genoeg), maar met name ook de chemische samenstelling. Dit laatste vooral met het oogmerk in hoeverre de waterkwaliteit bedreigend kan zijn voor grondwater afhankelijke ecosystemen en voor de kwaliteit van oppervlaktewateren waar het grondwater uittreedt. Als een grondwaterlichaam niet in goede toestand verkeert, dient een lidstaat maatregelen te nemen om een goede toestand op niet al te lange termijn te bereiken. Om op landelijke en Europese schaal enig overzicht te krijgen en om een beleid te kunnen formuleren, kunnen die grondwaterlichamen niet al te klein zijn. Door Europa heen varieert de grootte wel enigszins, maar om de gedachte te bepalen kunnen we denken aan de grootte van een provincie of een waterschap. De kaderrichtlijn is heel helder over de wijze waarop gerapporteerd moet worden. Is de toestand goed dan kleuren we het grondwaterlichaam groen, is de toestand niet goed, dan wordt het grondwaterlichaam rood. Dat mag vanuit het oogpunt van een geohydroloog of geoloog een onacceptabele versimpeling van de werkelijkheid zijn, vanuit het perspectief van een water- of milieu manager is het zeer begrijpelijk. Immers hij of zij moet een ja/nee beslissing nemen. Er zijn maatregelen noodzakelijk, of er zijn geen maatregelen noodzakelijk. De uitdaging voor degenen die zich met monitoring bezig houden is om de informatie uit de complexe dynamische driedimensionale werkelijkheid terug te brengen tot een simpel rood of groen.

De wijze waarop gerapporteerd moet worden mag dan heel helder zijn, veel onduidelijker zijn de Kaderrichtlijn Water en de Grondwater Richtlijn over de wijze hoe de toestand en de trend bepaald moeten worden en welke eisen er aan de betrouwbaarheid gesteld moeten worden. Bij het lezen van de richtlijnen kan men het idee krijgen dat de toestand van het grondwater instantaan gemeten kan worden, zoals een arts de temperatuur kan meten van een patiënt. Het volgende voorbeeld illustreert de complexiteit waarmee we te maken hebben.

De concentratie nitraat in het grondwater is in Nederland een probleemstof, vooral als gevolg van bemesting in landbouwgebieden. Het nitraat dat via het maaiveld infiltreert, wordt met de grondwaterstroming getransporteerd door de ondergrond en zal na verloop van tijd ergens anders opkwellen, in het oppervlaktewater terecht komen of door een grondwateronttrekking worden opgepompt. Dit stromingsproces kan, afhankelijk van de situatie, vele tientallen jaren in beslag nemen. De baan die een waterdeeltje door de ondergrond aflegt (de stroombaan) valt geheel binnen een grondwaterlichaam. Het nitraat volgt de stroombaan van het grondwater, maar onderweg gebeurt er van alles. Er kan dispersie optreden, waardoor de nitraatpluim wordt verspreid en verdunning optreedt. Er kan sprake zijn van adsorptie waardoor het nitraat al dan niet tijdelijk door de bodem wordt vastgehouden en er kan afbraak optreden waardoor het wordt omgezet in andere stoffen. Als gevolg hiervan is de concentratie in het grondwaterlichaam van plaats tot plaats langs de stroombaan heel verschillend. Ook in de tijd is de concentratie variabel, door verschillen in de bemesting en door variatie als gevolg van seizoensinvloeden en opeenvolgende natte en droge jaren. Rozemeijer et. al. [3] hebben met een simpel grondwatermodel aangetoond dat de nitraatconcentratie in de bovenste meters van het grondwater makkelijk met een factor twee kan variëren, alleen al als gevolg van de natuurlijke variatie in neerslag. De toestand van het systeem voor wat betreft de nitraatconcentratie is dus niet één enkel waarde, maar het is een driedimensionale variabele, die een natuurlijk dynamisch gedrag vertoont. Toch moet deze toestand in essentie worden teruggebracht tot de simpele classificatie 'goed' of 'niet-goed'; groen of rood.

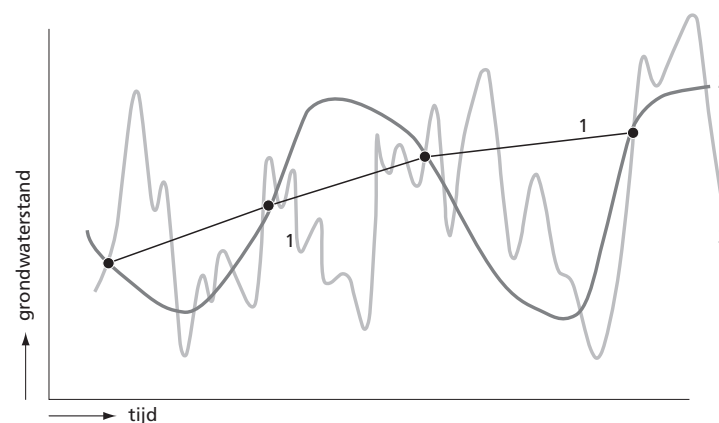
Nog lastiger is het om een trend te detecteren voor een grondwaterlichaam. Immers dat de ruimtelijke concentratieverdeling dit jaar anders is dan vorig jaar wil nog niet zeggen dat er sprake is van een trend. Er is pas sprake van een

trend als er een blijvende verandering van het patroon in de ruimte en/of de tijd optreedt. Als de veranderingen passen in het normale dynamische patroon van de concentratie is er geen sprake van een trend. Het toetsen of er sprake is van een trend, kan daarom alleen als we weten wat het normale patroon is. De Kader Richtlijn Water schrijft voor dat er maatregelen genomen moeten worden als de concentratie te hoog is, zodat er een trendomkering plaats vindt en op termijn lagere waarden van de concentratie bereikt zullen worden. Om te evalueren of de maatregelen effectief zijn, willen we de trend ook nog relateren aan die genomen maatregelen. Het zal duidelijk zijn dat het vaststellen van de relatie tussen de maatregelen en trend meestal een ingewikkelde zaak is, door de traagheid van het grondwatersysteem en door alle processen die onderweg plaats kunnen vinden. Bovendien is het niet mogelijk om, zoals bij oppervlaktewater, een visueel beeld te krijgen van de processen in de ondergrond. We kunnen de ondergrondprocessen niet zien.

In dit voorbeeld speelt monitoring op drie manieren een rol. Eerst moet door monitoring de toestand worden vastgesteld, vervolgens moet – indien nodig – de trend en de trendomkering worden bepaald en ten slotte willen we het effect van de maatregelen kunnen evalueren.

### Monitoring en modellering

Een hoeveelheid metingen vormt nog niet zonder meer informatie. Stel we hebben op een bepaalde locatie vier metingen van de grondwaterstand op verschillende tijdstippen. Figuur 1. laat deze vier meetpunten zien. Nu is het menselijk brein slecht in staat om deze punten objectief als vier losse punten te beschouwen. Zonder enige verdere toelichting zullen de meeste mensen de meetwaarden relatief ten opzichte van elkaar interpreteren en onwillekeurig een verband aanbrengen. In feite zien we geen vier losse punten maar in ons hoofd verbinden we de punten, bijvoorbeeld met lineaire interpolatie (lijn 1). Heel veel grondwatermeetreeksen worden op deze wijze lineair geïnterpoleerd weergegeven, onafhankelijk van het meetinterval en onafhankelijk van de temporele variatie. Of de metingen nu afkomstig zijn van een automatische drukopnemer die elke dag een waarneming doet, of dat het meetinterval drie maanden bedraagt, elk willekeurig tekenprogramma kan een keurige continue grafiek maken. Lang niet iedereen vraagt zich af wat die geïnterpoleerde lijn



Figuur 1. Mogelijk verloop tussen waarnemingen van de grondwaterstand.

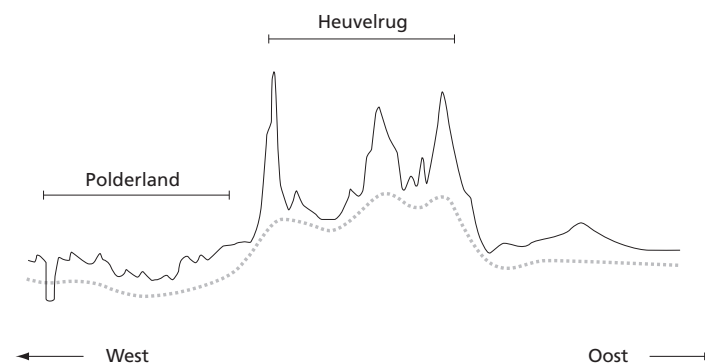
voorstelt, en òf die lijn eigenlijk wel wat voorstelt. De lineaire interpolatie in figuur 1 kan de suggestie wekken dat hier gaat om een stijgende trend zonder dat er verder veel variatie tussen de metingen optreedt. Maar de metingen kunnen best afkomstig zijn van een systeem dat een bepaald cyclisch patroon kent (lijn 2), of van een in de tijd sterk variabel systeem (lijn 3).

In principe zijn er oneindig veel mogelijkheden om individuele metingen aan elkaar te relateren. Hoe kunnen we nu onderscheid maken tussen al deze mogelijkheden? Hoe kunnen we weten of de rechte lijn die we tussen de punten trekken iets voorstelt of niet? En wat stelt die lijn dan voor? Deze vragen kunnen we alleen beantwoorden als we de metingen in een bepaalde context kunnen plaatsen. Zijn de metingen bijvoorbeeld afkomstig van de grondwaterstand ergens op de Veluwe, waar de grondwaterstand 20 meter onder maaiveld staat en een heel traag verloop kent, dan kan zo'n lineaire interpolatie de werkelijkheid best dicht benaderen. Zijn de metingen echter afkomstig van een gebied met een ondiepe grondwaterstand, dan is het waarschijnlijk dat individuele buien tussen de metingen in, direct doorwerken op het verloop van de grondwaterstand. In dat geval is een patroon zoals lijn 3 heel goed mogelijk.

We kunnen alleen zinvolle relaties tussen individuele metingen leggen als we een model hebben van het systeem waar de metingen vandaan komen. Dit kan een eenvoudig conceptueel model zijn, (kent de grondwaterstand een glad traag verloop zoals op de Veluwe, of kan de grondwaterstand van week tot week heel anders zijn), het kan een statistisch model zijn, waarbij aannames gedaan worden ten aanzien van kansverdelingen en samenhang in de ruimte en de tijd, maar ook een ingewikkeld numeriek model kan het verband beschrijven tussen de waarnemingen. Zonder enige voorkennis van het systeem, is het niet mogelijk om een doelgericht monitoringsysteem op te zetten. We moeten dus iets weten van het systeem dat we monitoren: WEET WAT JE MEET.

Beschouwen we de lijnen in figuur 1 die horen bij een traag en een snel reagerend systeem (lijn 1 en 3) dan kan gesteld worden dat niet alleen de aard van het grondwater regiem verschilt, maar ook de mate van onzekerheid. Van het traag reagerende diepe grondwater is bekend dat de veranderingen op een termijn van enkele maanden heel beperkt zijn. De grondwaterstand volgende week zal niet zoveel verschillen van de meting van vandaag. Daarom kan ook met redelijke zekerheid worden aangenomen dat het werkelijke verloop van de grondwaterstand niet zo ver van de lineair geïnterpoleerde lijn zal liggen en is de onzekerheid rondom de geïnterpoleerde lijn klein. Doen we nu extra metingen tussen de meetpunten in, dan geeft dit niet veel extra informatie. De informatie zit als het ware al besloten in het model waarmee we de samenhang in de tijd beschrijven. De schatting van het verloop van de grondwaterstand was al vrij goed en zal niet heel veel beter worden door het toevoegen van extra meetpunten. Bij de ondiepe grondwaterstand, zoals lijn 3, is het verloop in de tijd is veel grilliger. De meting van vandaag zegt weinig over de grondwaterstand van volgende week en de werkelijke grondwaterstand kan even goed heel anders zijn dan in de grafiek is aangegeven. In dit geval is de onzekerheid rond de geïnterpoleerde lijn dus veel groter. Hier voegen extra meetpunten tussen de bestaande metingen wel degelijk informatie toe waarmee de onzekerheid in het verloop van de grondwaterstand kan worden verkleind.

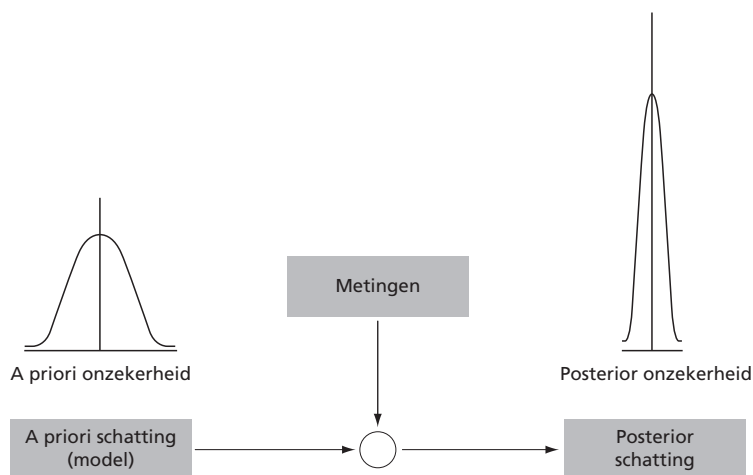
Modeleren en monitoring zijn in mijn optiek onlosmakelijk aan elkaar verbonden. Zonder een model kunnen metingen niet worden geïnterpreteerd en zonder metingen blijft een model een theoretische exercitie die niet



Figuur 2. Schematische weergave van het maaiveldsverloop (getrokken lijn) en het tijdsgemiddelde regionale patroon van de grondwaterstand (stippellijn) in de provincie Utrecht.

noodzakelijkerwijs de werkelijkheid beschrijft. Het geïntegreerde gebruik van een model en metingen in een monitoringsysteem is bijvoorbeeld gebruikt bij het optimaliseren van het primaire grondwatermeetnet van de provincie Utrecht. De grondwaterstand op de Utrechtse heuvelrug is hoger dan in het lager gelegen westelijke polderland (zie figuur 2).

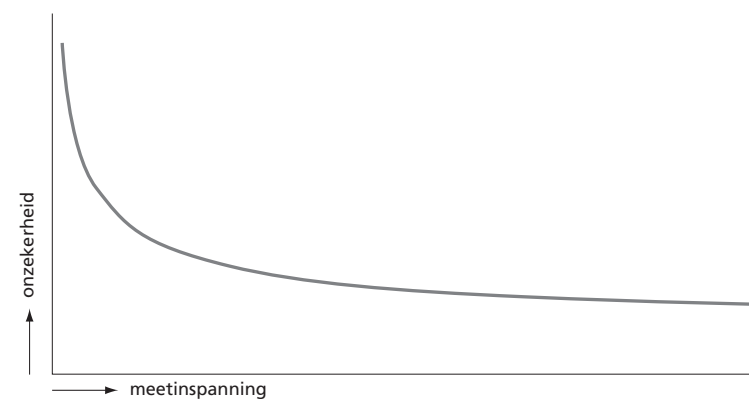
Het tijdgemiddelde regionale patroon van de grondwaterstand (stippellijn) is met een numeriek grondwatermodel beschreven. Om nu het actuele grondwaterstandsvlak te kennen, hoeven we uit de metingen alleen de afwijkingen van het gemiddelde patroon te schatten. Deze afwijkingen zijn namelijk niét vertegenwoordigd in het model. De gewenste informatie wordt verkregen door de combinatie van het model én de waarnemingen. Als we in dit geval het model niet zouden gebruiken, moet ook het regionale patroon uit de waarnemingen worden bepaald. Intuïtief zal duidelijk zijn dat, om dezelfde betrouwbaarheid te halen, aanzienlijk meer metingen nodig zijn dan als we het model wel gebruiken. Monitoring is bedoeld om datgene te meten wat we via het model nog niet weten: MEET WAT JE NIET WEET.



Figuur 3. *Principe van onzekerheidsreductie door combinatie van metingen en model*

Het principe van wederzijdse afhankelijkheid van meten en modelleren is terug te vinden in recente ontwikkelingen van data-model-integratie, waarbij metingen en modellen geïntegreerd gebruikt worden om de gewenste informatie te leveren. In figuur 3 is het principe hiervan weergegeven. Op voorhand hebben we een bepaald idee van de grootte waar we informatie over willen verzamelen: de a priori schatting. De onzekerheid in de a priori schatting kan gekarakteriseerd worden met een kansverdeling. Vervolgens worden waarnemingen gedaan en wordt de a priori schatting met deze waarnemingen bijgesteld; de posterior schatting. Het toevoegen van informatie uit de metingen levert een reductie van de onzekerheid op.

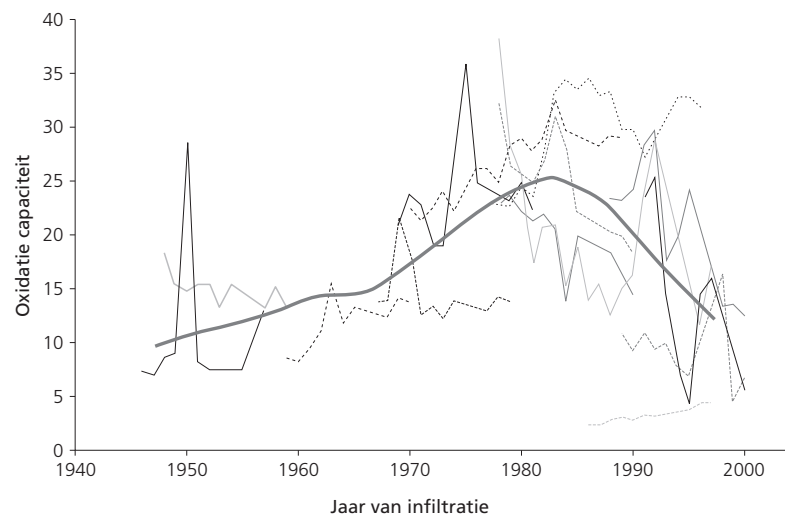
Er bestaat een relatie tussen de meetinspanning enerzijds en de betrouwbaarheid van de informatie die gewenst is anderzijds. Dit is het basisprincipe van monitoring dat we kunnen gebruiken voor het ontwerpen en optimaliseren van monitoringssystemen. In het schematische grafiekje van figuur 4 is de onzekerheid waarmee de gewenste variabele bepaald kan worden, uitgezet tegen de meetinspanning. Het grafiekje laat zien dat de onzekerheid afneemt als we informatie toevoegen met een grotere meetinspanning.



Figuur 4. *Relatie tussen de meetinspanning en de betrouwbaarheid*

Met zo'n grafiekje lijkt het ontwerp van een monitoringstelsel vrij simpel. Als we weten wat de gewenste betrouwbaarheid is, volgt uit de grafiek welke meetinspanning we moeten doen. De werkelijkheid is echter wat minder simpel.

- Ten eerste is het voor ruimtelijk verdeelde dynamische processen een hele uitdaging om de relatie tussen de betrouwbaarheid van de gewenste informatie en de meetinspanning te kwantificeren. Het aantal mogelijkheden dat schuil gaat achter de term meetinspanning is de laatste jaren enorm toegenomen. Waar dit vroeger vrijwel uitsluitend handmatige waargenomen stijghoogte en labanalyses van een watermonster betrof, kan nu ook een veelheid van sensoren worden ingezet, zowel in-situ, als vanuit de lucht of de ruimte. Omdat deze sensoren meestal automatisch waarnemingen doen zijn ook hoogfrequente waarnemingen (bijvoorbeeld dagelijks) realistisch geworden.
- Een tweede punt waarom het ontwerp van het monitoringstelsel niet zo simpel is, ligt in het feit dat niet zomaar duidelijk is welke betrouwbaarheid nu feitelijk acceptabel, gewenst of noodzakelijk is. Dit is niet zozeer een technisch probleem, maar vereist een dialoog met water- en bodembeheerders over de economische en maatschappelijke waarde van informatie van het ondergrondstelsel.



Figuur 5. Metingen van de oxidatiecapaciteit van verschillende meetpunten, uitgezet tegen de infiltratie capaciteit met een trendlijn. (naar Broers [4]).

Voordat ik hierop verder in ga, wil ik aan de hand van een voorbeeld illustreren dat een incorrect model, ertoe kan leiden dat de gewenste informatie niet bepaald kan worden, of erger, dat verkeerde conclusies worden getrokken. Als indicatie voor vermesting wordt de oxidatiecapaciteit gemeten op een bepaald diepte-interval, zeg 12 tot 15 meter onder maaiveld. Per meetpunt vormen de metingen over een periode van een aantal jaren een tijdreeks. Op het ene meetpunt laat deze tijdreeks een stijging zien en op het andere meetpunt een daling. Beschouwen we nu de gemiddelde tijdreeks, dan is er geen conclusie te trekken of er in het gebied sprake is van een trend. Impliciet zijn we van een verkeerd model uitgegaan. Met het stomweg middelen van de tijdreeksen veronderstellen we dat het water van het maaiveld naar alle meetpunten even lang onderweg is geweest en dat daarom alle meetreeksen tegelijk reageren op een verandering van het mestbeleid. Broers [4] heeft in zijn proefschrift aangetoond, dat er wel een duidelijk patroon in de meetreeksen herkend kan worden, als er rekening wordt gehouden met het feit dat het water naar het ene meetpunt langer onderweg is dan naar het andere meetpunt.

Dit is te zien in de grafiek (figuur 5), waarbij de meetreeksen zijn uitgezet tegen het jaar van infiltratie in de ondergrond. Bij het gebruik van een goed conceptueel model leveren de meetreeksen wel degelijk informatie over het trendmatige verloop.

Nog extremer kan het worden als we proberen om het verloop van de oxidatiecapaciteit te relateren aan het gevoerde mestbeleid. Stel dat tien jaar geleden een forse reductie van de bemesting is gerealiseerd en we meten de oxidatiecapaciteit op een diepte van 15 meter onder maaiveld, dan is het best mogelijk dat het effect van de mestreductie pas na 10 tot 20 jaar zichtbaar wordt in het meetpunt. Als gevolg van de bemesting in eerdere jaren, kan de concentratie op 15 meter diepte nog best een stijging vertonen nadat er de reductie van de bemesting heeft plaatsgevonden. Als nu de reductie van de bemesting en de gemeten oxidatiecapaciteit aan elkaar worden gerelateerd (bv. door middel van regressie) zonder rekening te houden met de traagheid in de verplaatsing van stoffen in de ondergrond, dan zou men tot de conclusie kunnen komen dat de oxidatiecapaciteit stijgt als gevolg van de reductie in de bemesting. Dit is natuurlijk een gechargeerd voorbeeld, maar soortgelijke situaties zijn in de praktijk lang niet altijd makkelijk te doorzien.

#### Inbedding van monitoring in beheer en beleid

Modelleren en monitoren blijken in de praktijk van het bodem- en waterbeheer veelal gescheiden werelden te zijn. Dit blijkt onder meer uit het feit dat één van de belangrijkste conclusies van het kort geleden uitgevoerde EU-project Harmoni-CA was, dat de meerwaarde van dit gecombineerd gebruik beter benut zou moeten worden (Højberg et. al. [5]). Bij veel waterbeherende instanties bestaan gescheiden afdelingen enerzijds voor het – al dan niet modelmatig – onderbouwen van het beleid en anderzijds voor het verzamelen en beheren van data. Het uitgangspunt voor een monitoringsysteem is veelal het fenomeen dat gemonitord moet worden, in plaats van de functie waarvoor de monitoring noodzakelijk is. Dit leidt tot een grondwaterstandsmeetnet, een grondwaterkwaliteitsmeetnet, een oppervlaktewaterstandsmeetnet, enz.. Terwijl het uitgangspunt eigenlijk het doel van de monitoring zou moeten zijn, dus bijvoorbeeld een monitoringsysteem ter onderbouwing van het waterhuishoudingsplan. De scheiding tussen modelleren en monitoring is



het sterkst aanwezig bij algemene onderbouwende monitoringsystemen (referentiemeetnetten zoals de provinciale grondwatermeetnetten). Maar ook bij specifiek toegesneden monitoringsystemen laat de interactie tussen enerzijds degenen die bezig zijn met het opzetten van het monitoringsysteem en anderzijds degenen die verantwoordelijk zijn voor water- en bodembeheer te wensen over. Bij alarmeringsmonitoring zoals hoogwatervoorspelling of bij bodemsanering is de integratie van monitoring en het gebruik van de informatie meestal redelijk goed ontwikkeld. Daarentegen is bij beleidsevaluatie of de uitvoering van operationeel grondwaterbeheer lang niet altijd sprake van een optimale integratie van monitoring en het informatiegebruik.

Vrijwel alle grote programma's in water- en bodembeheer kennen een monitoringparagraaf. Dit komt voort uit de onzekerheid hoe het systeem zich gedraagt. We kennen het actuele grondwaterregiem voor het Plan Waterlood niet precies, we weten niet precies wat de effecten zijn van de gaswinning in de Waddenzee en we kunnen niet met zekerheid aangeven hoe groot de bodemdaling zal zijn als gevolg van zoutwinning in Friesland. Vaak is monitoring in zo'n geval de oplossing (de bekende kreet winnen met de hand aan de kraan), en wordt er een monitoringsysteem ontworpen. Echter, alleen met een monitoringsysteem worden problemen of ongewenste situaties niet opgelost. Het levert informatie en deze informatie is alleen zinvol, als er ook daadwerkelijk wat mee gedaan wordt. Daarom dient al in de ontwerpfasen van een monitoringsysteem expliciet gemaakt te worden op welke wijze de metingen zullen worden geanalyseerd om de gewenste informatie te krijgen. Bovendien dient duidelijk te zijn welke rol deze informatie speelt bij de uitvoering van de taak van de bodem- en watermanager. Vragen als hoe 'groot mag de posterior onzekerheid zijn?' kunnen alleen door de gebruikers van de informatie worden beantwoord. De ontwerpers van monitoringsystemen dienen zich goed te informeren welke rol de metingen spelen in de taak van de informatiegebruiker en omgekeerd dienen gebruikers van die informatie kennis te hebben van basale principes van het ontwerp van monitoringsystemen. De communicatie tussen beide groepen in een organisatie is daarom van het grootste belang.

Om een goede inbedding van monitoring in beleid en beheer te krijgen, moet aan drie voorwaarden worden voldaan:

- het is zaak om voldoende informatie uit de metingen te halen
- de informatie moet geleverd worden binnen een tijdstermijn die relevant is voor het gebruik ervan
- de kosten moeten acceptabel (lees minimaal) zijn.

De basis voor het beoordelen of er voldoende informatie uit de metingen gehaald kan worden, is de relatie tussen het monitoringsysteem en de onzekerheid van de gewenste informatie. Deze relatie moet inzichtelijk worden gemaakt en gekwantificeerd. Er is al heel veel onderzoek gedaan naar het kwantificeren van onzekerheden van informatie bij een gegeven set metingen. De omgekeerde vraagstelling: 'hoe moet het monitoringsysteem er uitzien om een gewenste informatie-inhoud te garanderen' krijgt in de literatuur veel minder aandacht. Voor een deel is de oorzaak hiervan de factor tijd. Veel processen in bodem en grondwater beslaan jaren in tijd, waardoor het enige tijd zal duren voordat de gewenste informatie uit metingen bepaald kan worden. Met name bij het opzetten van een algemeen referentie monitoringsysteem geeft dit de moeilijkheid dat we moeten anticiperen op toekomstige vraagstellingen en analysemethoden.

Bij monitoring ten behoeve van de infrastructurele projecten speelt nog een ander probleem. Men begint niet zelden te laat met monitoring van grondwater, waardoor onvoldoende informatie bij aanvang van de bouw beschikbaar is. Een voorbeeld hiervan is de aanleg van een stuk snelweg, waarbij het weglichaam werd opgehoogd met licht verontreinigd materiaal. Op zich kan dat geen kwaad, zolang het verontreinigde materiaal maar niet in contact komt met het grondwater. Men had de maximale hoogte van het grondwater geschat uit een meetreeks van een meetfilter ergens in de omgeving. Tijdens de bouw van de weg bleek dat de grondwaterstand ter plekke van het tracé hoger kon komen dan was voorzien. Het werk werd hierdoor vertraagd, en omdat het verontreinigde materiaal al was aangebracht, moest een extra ontwateringsysteem verontreiniging van het grondwater voorkomen. Als er in de ontwerpfasen van het project meteen een paar grondwaterstandsm Meetpunten waren geïnstalleerd, hadden deze problemen voorkomen kunnen worden. Tussen het begin van het ontwerp en het begin van de feitelijke bouw van de weg ligt voldoende tijd om wel een betrouwbare karakteristiek van de grondwaterstand te bepalen.

Monitoring van het grondwater stond waarschijnlijk niet op het netvlies van degenen die bij het ontwerpproces van deze weg betrokken waren.

Metten is investeren en investeringen doe je alleen als je verwacht dat je die investering ook weer terugverdient. Hier ligt ook gelijk het grootste probleem bij monitoring van bodem- en grondwater. De investering in bodem- en grondwater monitoring moet leiden tot een vermindering van economische of maatschappelijke schade in de toekomst, of in elk geval een beheersing van het risico op maatschappelijke of economische schade. De kosten van het meetsysteem moeten opwegen tegen de verwachte vermindering van risico's en schade. Er is weinig literatuur waarin deze afweging wordt geadresseerd en in de praktijk worden er voor grondwater en bodem nauwelijks monitoringsysteem ontwerpen op basis van een echte kosten-baten analyse. Om deze afweging goed te kunnen maken moet er bij het opzetten van het monitoringsysteem inzicht zijn welke rol de informatie uit het ondergrondsysteem speelt bij de beslissingen in het beleid of beheer.

#### **Uitdagingen voor Bodem en grondwatermonitoring.**

Het sleutelwoord bij de uitdagingen ten aanzien van monitoring voor bodem en grondwater is integratie. Integratie van meten en modelleren; integratie van monitoring en het gebruik; maar ook integratie van ontwikkelingen op technologisch gebied. Zoals gezegd bestond tot voor kort grondwatermonitoring bijna uitsluitend uit het handmatig meten van de stijghoogte en het in het lab analyseren van de chemische samenstelling van een watermonster. Daarnaast werd op kleine schaal en incidenteel gebruik gemaakt van geofysische methoden zoals geo-electrische metingen en ondiepe systeem. Deze methoden kennen allemaal een hoeveelheid handwerk of behoeven de interpretatie van een expert, waardoor de informatie met een vertraging van minimaal een aantal dagen en vaak weken of zelfs maanden beschikbaar was. Dit heeft ertoe geleid dat actuele informatie van bodem en grondwater eigenlijk nauwelijks wordt gebruikt bij het operationeel water- en bodembeheer. Veelal wordt nu de informatie uit de monitoringsystemen gebruik voor de verkenning van de toestand (bijvoorbeeld in de planfase van infrastructurele werken) en bij periodieke beleidsevaluaties of bij de afhandeling van schadeclaims. Overigens blijkt niet zelden dat het monitoringsysteem dan net niet die informatie verschaft die gewenst is.

Recente ontwikkelingen op het gebied van de sensortechnologie, maar zeker ook met betrekking tot automatisch datatransport en data-analyse, hebben mogelijkheden geopend om bodem- en grondwaterinformatie veel beter in het operationeel beheer te integreren. Automatische drukopnemers hebben de afgelopen jaren in hoog tempo de plaats ingenomen van de handmatige waarnemingen van de stijghoogte en er is een enorme ontwikkeling gaande om fysische parameters en chemische componenten met sensoren te bepalen. Misschien nog belangrijker is het dat, dankzij de ontwikkelingen op het gebied van de datacommunicatie, de informatie automatisch en vrijwel instantaan bij een operationeel beheerder beschikbaar kan zijn. Voorzichtige eerste toepassingen van on-line grondwatermonitoring zijn van de provincies Gelderland en Noord-Brabant.

Waar de sensoren op en in de grond in principe puntinformatie leveren, daar geven remote sensing beelden vanuit de lucht of de ruimte vlakinformatie. Dit is weliswaar onzekere en indirecte informatie (er wordt licht, warmtestraling of zwaartekracht gemeten), maar het levert wel een ruimtelijke patroon op. De indirecte informatie, bijvoorbeeld over de gewasverdamping, levert alleen bruikbare informatie over het grondwater op als de waarnemingen worden geïnterpreteerd met een model en aangevuld met in-situ waarnemingen in de ondergrond. In verschillende AIO-onderzoeken wordt onderzocht in hoeverre verschillende sensoren en remote sensing kunnen bijdragen aan de informatie over de fysische en chemische toestand van het ondergrondse systeem. Hierbij is niet alleen sprake van integratie van de waarnemingen met een model, maar tevens van verschillende typen waarnemingen.

In de nabije toekomst zullen real-time monitoringsystemen steeds meer geïntegreerd worden in het operationeel water- en bodembeheer. Maar ook ter onderbouwing en evaluatie van het beleid zullen verschillende type waarnemingen en modellen steeds meer geïntegreerd worden. De grens tussen informatie uit monitoring en informatie uit modellering zal vervagen en er zal alleen sprake zijn van informatiesystemen. In dit licht zou het goed zijn om de provinciale primaire stijghoogteteenmetnetten weer eens tegen het licht te houden. In de jaren 80 van de vorige eeuw zijn de meeste van deze meetnetten ontworpen met een eenvoudig statistisch model, in een tijd waarin vrijwel alle stijghoogtewaarnemingen handmatig werden uitgevoerd. We hebben inmiddels

geohydrologische informatie van de ondergrond gedigitaliseerd in REGIS (REgionaal Geohydrologisch Informatie Systeem) en er is voor grote delen van Nederland een fijnmazig numeriek grondwatermodel beschikbaar (het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium NHI). Het lijkt logisch om de primaire grondwatermeetnetten hiermee te integreren. Dit betekent dat meetlocaties, meetfrequentie en ook het type metingen zodanig gekozen moeten worden dat in combinatie met het model de meest optimale informatie verkregen wordt. Het monitoringsysteem wordt hiermee toeleverend aan het model. De consequentie hiervan is wel dat actuele informatie, zoals bijvoorbeeld een regionaal beeld van de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG), alleen in combinatie met het model verkregen kan worden en niet meer 'stand alone' uit het meetnet. Dit model moet dus voor eindgebruikers eenvoudig aan te sturen zijn. Hier ligt een gezamenlijke uitdaging voor de ontwikkelaars van modellen, monitoringmensen en experts op het gebied van de Data-Model-Integratie. Ook andere meetnetten ter onderbouwing en evaluatie van beleid, zoals bijvoorbeeld voor de Europese Kader Richtlijn Water, zouden baat hebben bij een verdergaande integratie van monitoring en modellen.

Het geïntegreerde gebruik van een model en een monitoringsysteem geeft de mogelijkheid om verschillende typen waarnemingen (zoals stijghoogte, debieten, temperatuur, ouderdom, zowel in situ als via remote sensing) te combineren voor het verkrijgen van de gewenste ondergrondinformatie. Elk type meting heeft zijn eigen karakteristieken en zijn eigen prijs. De veelheid van mogelijkheden noopt tot het maken van keuzen waarbij ook verschillende type waarnemingen tegen elkaar afgewogen moeten worden. De afwegingsmechanismen hiervoor zullen in een binnenkort te starten AIO-project verder ontwikkeld worden. Parallel hieraan moet ook de mogelijkheid deze metingen in de ondergrondmodellen te integreren worden ontwikkeld, waarbij per type waarneming de bijdrage aan de onzekerheidsreductie in een objectieve en gekwantificeerde vorm beschreven moet worden. Het afwegingsmechanisme moet de basis zijn waarop kan worden besloten wat het meest rendabel is: investeren in geologisch onderzoek, investeren in modelverbetering, investeren in monitoring, of in een combinatie hiervan.

Een echte afweging betreft niet de relatie tussen de investering en de betrouwbaarheid van de informatie, maar relateert de investering aan de

maatschappelijke of economische impact van die informatie. Dit betekent dat de relatie tussen de betrouwbaarheid van de informatie en de investering moet worden doorgetrokken naar een kwantificering van de impact die de informatie heeft. Informatie is alleen zinvol als er iets mee gedaan wordt. Als er geen actie wordt ondernomen kost monitoring alleen maar geld en zal een kosten-baten analyse uitwijzen dat we maar beter kunnen stoppen met monitoren. Vaak is alleen een beperkt waardebereik van een variabele interessant voor een eindgebruiker. Er bestaan bijvoorbeeld drempelwaarden voor bodemsaneringen. Als de concentratie boven zo'n drempelwaarde ligt, dient actie te worden ondernomen. Als de concentratie ver onder de drempelwaarde is, weten we zeker dat er geen actie nodig is. De onzekerheid waarmee die concentratie bepaald kan worden mag dan best heel groot zijn, zolang de kans dat de concentratie in de buurt van de drempelwaarde komt maar heel klein is. Iets soortgelijks is er aan de hand als de concentratie de drempelwaarde ver overstijgt. Ook al is de onzekerheid groot, er zal hoe dan ook ingegrepen moeten worden. Zowel voor hele lage als voor hele hoge concentraties is geen grote betrouwbaarheid vereist, en zal een extra investering in monitoring niet leiden tot een ander besluit. Is de concentratie echter rond de drempelwaarde, dan kan een zeer betrouwbare vaststelling van de concentratie het verschil maken tussen een dure of goedkope variant van bodemsanering. In dit geval kan een afweging worden gemaakt in hoeverre het lonend is meer te investeren in betere informatie.

In verschillende vakgebieden zijn meetsystemen direct gekoppeld aan acties door eindgebruikers. Daar zijn ook optimalisatie methoden voor ontwikkeld. Monitoringsystemen voor bodem en grondwater worden echter nog nauwelijks opgezet vanuit een kosten-baten perspectief. Eén van de oorzaken hiervan is dat door veel instanties het monitoringontwerp als een zelfstandige actie wordt gezien. Hiermee zijn we dus weer terug bij de noodzaak om beheer, beleid, modellering en monitoring binnen organisaties te integreren.

Als we erin slagen om de integratie te realiseren van:

1. modellen en monitoring,
2. beleid/beheer en monitoring,
3. de maatschappelijke of economische impact en monitoring en
4. de verschillende observatie mogelijkheden van het ondergrondsysteem,

dan lopen we minder risico om onnodige kosten te maken voor overbodige metingen en dat we tegelijkertijd toch niet beschikken over de gewenste informatie op het moment dat we het nodig hebben. Dit is de richting waarin het onderzoek met betrekking tot bodem en grondwatermonitoring zich in de komende jaren zal ontwikkelen.

### **Methoden van Bodem- en grondwatermonitoring**

Meneer de rector, de leerstoel waaraan ik inhoud mag geven heet 'Methoden van Bodem- en Grondwatermonitoring'. Onder deze titel kan een breed scala van activiteiten verstaan worden, van het ontwikkelen van specifiek toegesneden sensoren tot aan het bouwen van websites voor het toegankelijk maken van de ondergrondinformatie voor eindgebruikers. Laat ik eerst aangeven wat in elk geval geen speerpunt van mijn activiteiten bij het departement Fysische Geografie zal zijn. Dit is in de eerste plaats het ontwikkelen van methoden voor de feitelijke observatie. Op andere plaatsen wordt met veel energie aan de ontwikkeling van allerlei sensoren gewerkt. Dat zelfde geldt voor het ontwikkelen en verbeteren van lab-analyses, onder meer in het nu in ontwikkeling zijnde geïntegreerde milieulaboratorium, waar naast de Universiteit Utrecht, ook RIVM, TNO en Deltares participeren. In het voorgaande heb ik de nadruk gelegd op de integratie van modellen en monitoring. Om dit te kunnen realiseren dienen er uiteraard adequate modellen beschikbaar te zijn. Aan het ontwikkelen van modellen van de ondergrond, bodemverontreiniging en grondwaterstroming en – transport wordt in Nederland en daarbuiten ook hard gewerkt. Zonder volledig te willen zijn, kan gesteld worden dat belangrijke ontwikkelingen, naast de universitaire groepen die zich met aardwetenschappen bezig houden, plaatsvinden in instituten als Deltares, Alterra, KWR, TNO en anderen.

Wat is dan wel het focus van de leerstoel? Dat is het beste te omschrijven met de 'strategie van data naar informatie'. De vertaling van de vraag naar informatie naar wat, waar en wanneer van het ondergrondse systeem waargenomen moet worden en hoe van deze data de gewenste informatie gemaakt kan worden, en dat binnen een acceptabele tijdsperiode en tegen acceptabel kosten.

Om dit te realiseren zal er op een aantal punten nauwe samenwerking moeten zijn, met de ontwikkelaars van sensoren en modellen, en met de vragers van de

informatie. En het in een acceptabel vorm presenteren van de informatie vereist een samenwerking met specialisten op het terrein van de ICT. Het zal duidelijk zijn, dat het onderzoek naar methoden van bodem en grondwatermonitoring een sterke band heeft met de praktijk. Bij het wetenschappelijk onderzoek naar monitoringsstrategieën zal de motivatie altijd ten dele voortkomen uit de mogelijkheden voor praktijktoepassingen in de toekomst. Omdat ik voor het grootste deel van de tijd werkzaam zal blijven bij TNO en nauw betrokken ben bij het toegepast onderzoek van Deltares, ben ik in de positie om een brug te vormen tussen het wetenschappelijk werk op de universiteit en het toegepast onderzoek bij de instituten. Ik ben ervan overtuigd dat het, samen met Marc Bierkens die een soortgelijke dubbelrol al enige tijd heeft bij Deltares, zal slagen die brug met wederzijds voordeel uit te bouwen. De samenwerking met TNO en andere instituten geeft de mogelijkheden om studenten kennis te laten maken met actuele ontwikkelingen voor praktische toepassingen en omgekeerd geeft de samenwerking inspiratie en motivatie voor het wetenschappelijk onderzoek.

Ik prijs mij gelukkig dat ik na ruim dertig jaar actief te zijn in het veld van monitoring en modellering de kans krijg om bij te dragen aan de basis van de integratie van enerzijds monitoring en anderzijds het water- en bodembeheer. Immers, de water- en bodembeheerders van de toekomst worden onder meer in de faculteit Geowetenschappen opgeleid. In de universitaire opleidingen is het onderwerp monitoring van bodem en grondwater tot dusver versleuteld in andere onderwerpen. Met het instellen van de leerstoel Methodes van bodem- en grondwatermonitoring, wordt het belang van het onderwerp onderstreept. Het geeft mij de mogelijkheid om de basisprincipes van monitoringsstrategieën mee te geven, ook aan diegenen die monitoring niet tot hun beroep maken. In de huidige tijd waarin er ongelofelijk veel mogelijk is met numerieke modellen en GIS-systemen, en met geavanceerde ICT technologie fantastische weergaven gemaakt kunnen worden, is het van het grootste belang om tijdens de studie inzicht te geven in waar dit alles uiteindelijk op is gebaseerd: de observatie van de aarde. Ik hoop door aan te geven wat mogelijk is en zeker ook wat niet mogelijk is met monitoringsstrategieën bij te kunnen dragen aan dit inzicht en een impuls te kunnen geven aan wetenschappelijke ontwikkeling op dit gebied.

## Dankwoord

Deze benoeming via de stichting Lorentz van Iterson Fonds TNO is niet zonder slag of stoot tot stand gekomen. Ik weet mij gesteund door velen zowel binnen als buiten TNO. Mede doordat de besluitvorming voor mij niet volledig transparant was, is het voor mij niet mogelijk om iedereen die erbij betrokken is geweest, te noemen. Ik wil Mart van Bracht bedanken voor zijn aandeel in het tot stand komen van deze benoeming, en met hem iedereen die zich daar binnen TNO voor heeft ingespannen.

Zonder dat ik in 1979 op het spoor van tijdreeksanalyse en grondwater monitoring was gezet door Piet van der Kloet, zou ik waarschijnlijk nooit zijn gaan promoveren, laat staan dat ik op een dag hoogleraar zou zijn geworden. Het kwam indertijd voor mij als een complete verrassing dat Piet in mij een geschikte kandidaat zag voor een onderwerp over grondwatermonitoring met Kalman Filtering.

Van 1985 af ben ik bij TNO in dienst geweest. De rode draad in dat werk is altijd monitoring en Data-model-integratie geweest. Bij TNO heb ik met vele collega's uitstekend samengewerkt. Het zijn er veel te veel om hier te noemen. Zij hebben mij met hun kennis over onder meer geologie en geochemie laten kennismaken met aspecten die ik van huis uit als civiel ingenieur niet direct tot mijn specialiteiten reken. Ik ben ervan overtuigd dat wij de samenwerking, ook in de nieuwe structuur waarbij veel collega's nu bij Deltares werkzaam zijn, kunnen continueren.

TNO heeft mij ook in staat gesteld, om de banden met de universitaire wereld te behouden en te verstevigen, niet in de laatste plaats door het financieren van verschillende AIO-projecten. Van het begeleiden van de promovendi heb ik veel geleerd; vakinhoudelijk, maar het is voor mij ook de belangrijkste drijfveer geweest om een parttime plek op de universiteit te ambiëren. Bovendien zijn verschillende promovendi in de loop van de tijd ook vrienden geworden. Ik zal niet alle promovendi bij naam noemen, maar ik wil een uitzondering maken voor de eerste twee: Chris te Stroet en Marc Bierkens. Ik ben blij dat ik met beiden vanaf hun afstuderen heb kunnen samenwerken. Wij zullen elkaar ook in de komende tijd tegenkomen, maar inmiddels in een heel andere relatie. Wellicht is daarmee voor mij de cirkel rond.

Tot slot ben ik veel dank verschuldigd aan mijn gezin en aan Ciska in het bijzonder, voor de inspiratie en de ondersteuning die ik al die jaren heb

ondervonden. Het heeft mij de rust gegeven om mij te kunnen concentreren op het werk, zonder het gevoel te hebben te kort te schieten. Met de geboorte van onze kleindochter breekt er voor ons ook privé een andere tijd aan. Als ik 's zomers met haar een kuil graaf op het strand, zal ik haar uitleggen waar het water vandaan komt.

Ik dank u voor uw aandacht.

## Referenties

- [1] EU (2000), Richtlijn 2000/60/EG, publicatieblad van de Europese Unie L 327, Luxemburg,
- [2] EU (2006), Richtlijn 2006/118/EG, Publicatieblad van de Europese Unie L 372/19, Luxemburg
- [3] Rozemeijer, J. C., Broers, H. P., van Geer, F.C., Bierkens, M. F.P., 2009. Weather-induced temporal variations in nitrate concentrations in shallow groundwater. *Journal of hydrology* 378 (1-2):119-127.
- [4] Broers, H. P. (2002), Strategies for regional groundwaterquality monitoring. PhD thesis. Fysische geografie. Universiteit Utrecht.
- [5] Højberg, A. L., J. C. Refsgaard, F. C. van Geer L. Flindt-Jørgensen, and I. Zsuffa. (2007) Use of Models to Support the Monitoring Requirements in the Water Framework Directive. *Water resour Manage* (2007) 21:1649-1672, DOI 10.1007/s11269-006-9119-y.

