

Landbouwwuniversiteit

grondgebonden
residuen

door prof.dr.ir. S.E.A.T.M. van der Zee

GRONDGEBONDEN RESIDUEN

Door prof.dr.ir. S.E.A.T.M. van der Zee



Inaugurele rede uitgesproken op 27 mei 1999
Landbouwniversiteit

GRONDGEBONDEN RESIDUEN

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

De bodem is een milieucompartiment waarmee de mens zeer intensief in contact komt. Dat dit milieucompartiment verontreinigd wordt met het door ons geproduceerde afval is niet nieuw. In de oudheid in het middenoosten nam dat bij woonkernen al dermate vormen aan dat heden ten dage nog hele heuvels (de zg. tels) te vinden zijn die archeologisch interessant zijn. Dichter bij huis werd al eeuwen geleden stadsvuil geproduceerd dat in het omliggende gebied werd afgezet als meststof en dat geleid heeft tot de zg. toemaakdekken¹⁾. Deze toemaakdekken blijken verhoogde zware-metalengehaltes te bevatten en staan nog steeds in de belangstelling van milieu-onderzoekers. Daarnaast vond bij woonkernen een concentrering van voedingsstoffen plaats die zich uitte in verhoogde fosfaatgehalten in de bodem. Dit werd wel gebruikt wordt als indicatie van menselijke activiteit in archeologisch onderzoek. Met de toegenomen menselijke activiteit en (vooral westerse) rijkdom nam echter ook de omvang van milieuproblemen veroorzaakt door afval toe. Terecht maken wij ons bezorgd over de vraag wat de keerzijde van de medaille is.

Onder andere aan universiteiten heeft deze bezorgdheid zich vertaald in het opzetten van op de milieuverontreiniging gerichte studierichtingen, leerstoelen, departementen en faculteiten en Wageningen was er wat dat betreft vroeg bij: in 1956 werd de milieuhygiëne (met name de waterzuivering) al ter hand genomen. De Bodemhygiëne en Bodemverontreiniging werd pas in 1979 op leerstoelniveau geïntroduceerd bij de aanstelling van professor De Haan. De bodemverontreiniging als

probleemveld heeft in meerdere opzichten achter dat van de water- en luchtverontreiniging aangelopen. Zo kwam ook de wetgeving voor dit compartiment pas later tot stand²⁾. De echte aftrap die met name de bodemverontreiniging in Nederland op de politieke en publieke agenda zette, nl. de Lekkerkerk affaire, volgde in 1980. Een turbulente tijd was het resultaat omdat Nederland plotseling wel erg dicht bij huis werd geconfronteerd met milieuverontreiniging.

In eerste instantie had de rijksoverheid, waarnaar gekeken werd om het probleem aan te pakken, nog weinig middelen en er was nauwelijks een beleidlijn waarop teruggevallen kon worden. Dit betekende dat langs verschillende sporen instrumenten, wetgeving, normstelling etc. ontwikkeld moest worden. Tegelijkertijd ontstond, of liever groeide, een infrastructuur die er onder andere op was gericht om kennis over de bodem die er al was explicieter op de verontreiniging toe te passen en om nieuwe kennis en expertise te ontwikkelen. Naast milieugroepen bij universiteiten en instituten telt Nederland nu een groot aantal adviesbureaus met milieuafdelingen, als die bureaus zich niet al geheel op de milieuproblematiek concentreren. Wageningse ingenieurs komen we hierbij op veel plaatsen tegen. Dat de Wageningse ingenieur een succesvol "product" is gebleken is volgens mij aan een aantal factoren te danken. Naast engagement van de Wageningers spelen het goede niveau van o.a. de studierichting Milieuhygiëne, de breedte daarvan die de inzetbaarheid van Wageningers zo groot maakt, en natuurlijk het vroege stadium dat afgestudeerden werden opgeleverd een grote rol. Dat het milieu zoveel aandacht kreeg van de media en tot

bezorgdheid leidde, speelt natuurlijk ook sterk mee.

Hoewel het milieuonderzoek en -onderwijs in Wageningen een breed bereik van disciplines omvat, is een groot deel daarvan natuurwetenschappelijk gericht. Ook ten aanzien van de bodemverontreinigingsproblematiek is dit het geval. In de praktijk betekent dit, dat ingrediënten van de wis-, natuur-, en scheikunde en de biologie worden geïntegreerd om vragen te beantwoorden van dit maatschappelijke thema. Het is vanzelfsprekend dat we een sterke inspiratie halen uit de actuele beleidsvragen. Een voorbeeld hiervan is dat de vraag wat verontreinigde grond nu eigenlijk is impliceert dat we weten wat niet-verontreinigde grond is. Enkele decennia geleden was die kennis niet voorhanden. Daarom zijn de referentiewaarden van grond, die beschouwd mogen worden als een voor Nederland natuurlijke achtergrond, voor zware metalen ontwikkeld³⁾. Met die referentiewaarden wordt nog steeds gewerkt. Sterker nog, vanuit de gehele wereld kwamen nadien vragen over die referentiewaarden, of we de lijst konden opsturen en bemoedigende commentaren dat Nederland toch maar mooi voorop liep. Gezien de onderliggende basis van de referentiewaarden (de zware-metalengehalten zijn deels afkomstig van het geologische moedermateriaal hetgeen leidde tot de "lutumfactor", deels van de belasting in het verleden; de gebruikte data hadden betrekking op de Nederlandse "onverdachte" natuurgebieden; correcties voor de dichtheid van de grond werden via een "humusfactor" ingebracht) doen immers vermoeden dat ze niet direct relevant zijn voor bijv. berggebieden of natuurgebieden in andere landen. In Nederland zijn de functies van Lexmond en Edelman gebruikt voor de interventiewaarden

(dit zijn criteria om vast te stellen of sanering vereist kan zijn) met aanpassing van de coëfficiënten gebruikt voor de interventiewaarden, alhoewel de bron van zware metalen dan juist betrekking heeft op een wel van verontreiniging verdachte situatie. Waar de buitenlandse interesse aangeeft dat kennis voortbouwt op oudere kennis en er een gevaar is dat de vooronderstellingen daarvan op de achtergrond raken (ik kom hierop terug), is de aanpassing tot interventiewaarden een voorbeeld van de hoge urgentie om de benodigde instrumenten te ontwikkelen en de noodzaak om besluiten te kunnen nemen. Met de kennis die aan LUW, DLO en andere instellingen gedurende de afgelopen jaren is ontwikkeld zouden de interventiewaarden voor zware metalen nu wel bijgesteld kunnen worden.

Bijstellingen zijn overigens gangbaar in ons werkveld. In de praktijk blijkt dat de optie om verontreinigingen tot de referentiewaarden te elimineren en zo tot multifunctionele grond te komen niet werkt. Een belangrijke reden hiervoor is dat de kosten van bodemsanering, bodembeheer en landgebruik in de weg staan⁴⁾, bijvoorbeeld omdat er te weinig saneringen haalbaar zijn met de beschikbare middelen maar ook omdat nieuw gebruik van terreinen niet altijd kan blijven wachten tot na de sanering. Om een indruk te geven: de milieubalans van 1998 komt op zo'n 175.000 ernstig verontreinigde locaties van vóór de inwerking-treding van de Wet Bodembescherming, waarvan er 60.000 urgent genoeg zijn om op korte termijn maatregelen te behoeven. De rijksbijdrage voor de betaling van bodemsanering was 3,6 miljard gulden voor de periode 1981-1997 (370 miljoen gulden in 1997).

Geschat wordt dat de huidige uitgave aan bodemsanering in totaal 1 miljard gulden per jaar bedraagt terwijl slechts 1-2% van het totaal aantal ernstig verontreinigde locaties gesaneerd is.

Eén vernieuwing, die een aantal jaren geleden werd ingevoerd, was het toestaan van de IBC-optie, waarbij IBC staat voor Isoleren, Beheersen en Controleren. De IBC-aanpak bestaat er min of meer uit dat afgezien wordt van het voorheen heilige begrip van saneren met als doel om zogenaamde multifunctionaliteit van de bodem overal te restaureren. Dit, omdat bijvoorbeeld een parkeerplaats een minder goede bodemkwaliteit behoeft, althans met het oog op gezondheidsrisico's, dan een kinderspeelplaats (ingestie van verontreinigde grond door kinderen is een van de dominante humane blootstellingsroutes aan bodemverontreiniging). Recent (1997) is nog een duidelijke koerswijziging ingezet (BEVER), waarbij de hersteloptie en de IBC-optie volwaardige alternatieven zijn geworden binnen het functiegericht saneren. Naast functiegericht saneren is ook actief bodembeheer, waar de gehele keten van preventie, beheer, sanering en nazorg met als doel een duurzaam bodembeheer onder valt, een sleutelwoord van de beleidsvernieuwing. Het lijkt onwaarschijnlijk dat BEVER de laatste verandering is in het bodemverontreinigingsbeleid.

Deze ontwikkelingen maken duidelijk dat maatschappelijke randvoorwaarden het beleid wegsturen van het volledig verschonen van de bodem. Hierbij is het natuurlijk duidelijk dat deze meer genuanceerde benadering om met restricties enige bodemverontreiniging toe

te staan niet alleen een verandering in perceptie is. Deze bijstelling mag niet leiden tot ongewenste risico's voor de mens en het milieu. Evengoed is het duidelijk dat dit natuurlijk altijd verhoogde risico's met zich meebrengt ten opzichte van de situatie waarbij de verontreiniging geheel wordt verwijderd. Die risico's kunnen betrekking hebben op de biologische beschikbaarheid in situ voor planten, gewassen, bodemorganismen, vee of de mens, maar ook op de effecten na verspreiding door het milieu, via de waterfase of via de bodemlucht en de atmosfeer. Een vooraanstaand thema in bodemverontreinigingsonderzoek, zowel voor universiteiten, instituten als adviesbureaus, is dan ook de risico-analyse. Ook in de komende jaren zal dit het geval zijn, bijv. bij de beoordeling van "natuurlijke "afbraak" als saneringsoptie, het effect van veranderend landgebruik op reeds aanwezige verontreinigingen, de beïnvloeding van zg. waterkerende kleilagen door bevochtiging van organische vloeistoffen (de zg. NAPLs) en het intensievere gebruik van de ondergrond waardoor deze mogelijk onomkeerbaar wordt verstoord.

Kernbegrippen bij deze risico-analyse zijn de biologische beschikbaarheid en de mobiliteit van verontreinigingen, omdat deze voor het effect van bodemverontreiniging maatgevend zijn (of er nu sprake is van mogelijke toxische effecten of bijvoorbeeld veranderingen in de biotoop). Hoewel de mobiliteit rechtstreeks betrekking heeft op het gemak waarmee een verontreiniging zich kan verspreiden door de omgeving en dus ook op transportprocessen, spelen die processen ook vaak een rol bij de biologische beschikbaarheid. Weliswaar kunnen organismen rechtstreeks verontreinigingen uit de vaste bodemfase

opnemen, zoals bijvoorbeeld mogelijk is bij opname door wormen of planten(wortels), maar daarnaast treedt transport over korte afstanden naar organismen en plantewortels op. Voorzover dit transport optreedt in opgeloste vorm (in het bodemvocht of het bodemgas), is de concentratie in die fasen een cruciale grootheid. Eén van de grote complicaties bij het gedrag van stoffen in de bodem is dat de relatie tussen de concentraties in de bodemwater- of -gasfase en de vaste fase door verschillende processen gereguleerd kan worden, de kwantitatieve kennis van die processen beperkt is en we metingen soms niet eens goed kunnen interpreteren.

Een illustratie van het laatste is het onderzoek in de context van bestrijdingsmiddelenproblematiek⁵⁾. Boekhold richtte zich op grondgebonden residuen van bestrijdingsmiddelen, die overblijven nadat deze hun werk hebben gedaan. Het inzicht over deze residuen die gebonden worden door de grond bleek nogal beperkt te zijn zoals blijkt uit de beschikbare definities van dergelijke residuen: "Een grondgebonden residu is het niet extraheerbare en chemisch niet te identificeren residu van bestrijdingsmiddelen wat zich bevindt in fulvo-, humine-, en humuszuurfracties van de bodem na uitgebreide extractieseries met oplosmiddelen, varierend van apolaire organische oplosmiddelen tot polaire oplosmiddelen". Vergelijkbare definities zijn afkomstig van FAO/IAEA en IUPAC. Die definities geven wel aan wat grondgebonden residuen niet zijn, maar niet wat ze wel zijn. Boekhold signaleert deze vaagheid over dergelijke residuen waarvan zij concludeert dat het zowel het oorspronkelijke bestrijdingsmiddel als omzettingsproducten daarvan kunnen zijn, maar dat de chemische identiteit niet analytisch bepaald

kan worden. Bovendien kunnen de residuen biologisch beschikbaar zijn en kan accumulatie voor persistente middelen plaatsvinden in de bodem. Er is dus nogal wat onzekerheid over deze grondgebonden residuen: de slogan "meten is weten" gaat hier blijkbaar minder op. Wanneer we in aanmerking nemen dat dergelijke lacunes in kennis zich evengoed kunnen voordoen voor veel andere toxische (organische) stoffen, doet zich de vraag voor in hoeverre immobiliteit van een toxische stof een garantie is voor een geringe biologische beschikbaarheid daarvan en hoe de aan effect gerelateerde concentratie gemeten moet worden. De ingezette beleidsvernieuwing, gedictieerd als zij is door maatschappelijke randvoorwaarden, vereist dat dit soort inzichten worden verkregen.

Datzelfde geldt voor de invulling van het begrip biologische beschikbaarheid, bijvoorbeeld voor zware metalen. Wanneer opname altijd vanuit het bodemvocht zou optreden, is het voor de hand liggend dat de regulerende concentratie die in de oplossing is. Het effect van verontreiniging op organismen wordt dan ook regelmatig gerelateerd aan de concentratie in de bodemoplossing, met wisselend succes. Mogelijk dat dit wisselend succes komt doordat de chemische verschijningsvorm (speciatie) zeer uiteenlopend kan zijn. Hoewel het misschien wat somber overkomt, wil ik toch een aantal problemen kort noemen. Ik realiseer me daarbij dat ik me erg richt op een mechanistische benadering van het begrip biologische beschikbaarheid (van verontreinigingen), maar zie in die benadering dan ook veel potentieel voor een beter begrip.

De chemische speciatie in de bodemoplossing beïnvloedt en wordt beïnvloed door die aan de vaste fase. Waar

sommige chemische species (een term die hier gebruikt wordt voor een chemische verbinding) wel door een bepaald organisme kunnen worden opgenomen, is dat voor andere species (of andere organismen) mogelijk niet het geval. Wanneer een niet-opneembaar species in de oplossing domineert, of wanneer de speciatie door sterk niet-lineaire relaties gereguleerd wordt, wordt een chemische interpretatie van het begrip biologische beschikbaarheid moeilijk. Helaas komen beide situaties frequent voor⁶⁾. Niet eenvoudiger wordt het, indien (sommige) species adsorberen aan het organisme (bijvoorbeeld de plantenwortel of de celwand) als mogelijk eerste stap in het opnameproces. In dat geval hebben we te maken met twee concurrenten voor de opgeloste verontreiniging, nl. de vaste bodemfase en het organismeoppervlak. Wanneer de celwand van organismen niet goed van grond te scheiden is, zoals het geval is bij micro-organismen, kan alleen met geavanceerde bodemchemische experimentele en theoretische benaderingen een schatting van de daaraan geadsorbeerde concentratie gemaakt worden⁶⁾. De databehoeftte voor duidelijke interpretaties kan daarbij groot en dus duur zijn, maar leidt wel tot een beter begrip.

Aangezien er organismen bij betrokken zijn, is het verstandig om in rekening te brengen dat deze niet alleen reageren op de verontreiniging. In bijna alle gevallen zal stress door een geringe beschikbaarheid aan nutriënten en water, eventueel effecten van licht en de temperatuur, door de gezochte interpretatie van biologische beschikbaarheid heen spelen (en deze opsomming is niet uitputtend). Tenslotte is het uitgangspunt (opname alleen via bodemvocht) discutabel, althans voor sommige organismen. Zo

werd aangetoond dat de accumulatie van koper in regenwormen goed gerelateerd is aan de totale (inclusief de aan de vaste fase vastgelegde) concentratie koper⁷⁾. Dit suggereert dat de opname van koper door ingestie van de betreffende grond plaatsvindt. In ieder geval zou in dit geval de totale koperconcentratie voor voedselketen-effecten (consumptie van wormen door mollen en vogels) meer van belang zijn dan de concentratie in de oplossing. Uit proeven blijkt echter ook dat de mortaliteit gerelateerd is aan de fractie gemakkelijk oplosbaar koper, die sterk door o.a. de zuurgraad van de bodem wordt beïnvloed. Wellicht dat een andere blootstellingsroute, bijvoorbeeld de dermale, ook van belang is.

Toch is er geen reden om somber te zijn, want sommige zeer bruikbare inzichten zijn wel verworven. Zo blijkt voor veel verontreinigingen en nutriënten dat met de zg. 0.01 M CaCl₂-extractie van grond⁸⁾ een goede voorspelling kan worden gemaakt van de hoeveelheid die door landbouwgewassen wordt opgenomen ook al weten we niet precies hoe we de geëxtraheerde hoeveelheid kunnen voorspellen uit het totaalgehalte in de bodem. Ook voedselwebanalyses voor bodemlevensgemeenschappen kunnen een waardevolle en haalbare benadering zijn om de effecten van verontreiniging te beoordelen. Vooral wanneer op basis daarvan goede indicator-organismen kunnen worden gekozen voor een bepaald ecosysteem en type van effect⁹⁾, betaalt dit soort onderzoek zich op den duur ongetwijfeld terug. Datzelfde geldt in feite ook voor het bodemchemische zware-metalenonderzoek dat tot een hele reeks van proefschriften geleid heeft onder leiding van collega Van Riemsdijk. Dit fundamenteel getinte werk blijkt niet alleen een goede basis te zijn

voor meer toegepast onderzoek, zoals in het kader van bodemverontreiniging⁶⁾, maar met kleine en plausibele aanpassingen tot goede voorspellingen te leiden voor schud- en kolomproeven, voor de zware-metaalaccumulatie in de bodem *in situ* en voor de chemische vorm waarmee die metalen voorkomen in meren. Vandaar dat ik vertrouwen heb in een mechanistische benadering voor de zware-metalenbeschikbaarheid voor plant en dier.

Een voorbeeld zoals dat van de grondgebonden residuen illustreert dat we vaak te maken hebben met een gebrek aan kennis. Hierdoor is het moeilijk om rationeel om te gaan met bodemverontreiniging. Anderzijds is het in het kader van actief bodembeheer wel nodig om rationeel om te gaan met bescherming, beheer, sanering en nazorg. Aangezien beleidsbeslissingen onontkomelijk zijn, dienen ze dan maar gepaard te gaan met onzekerheid. In principe wordt een dergelijke onzekerheid ook niet onoverkomelijk geacht, want we weten al lang dat onzekerheid niet te vermijden is, terwijl we toch allerlei beslissingen nemen¹⁰⁾.

Niet alleen gebrek aan kennis over oorzaak/effect-relaties, maar ook de mate waarin verontreinigingen in de bodem worden aangetroffen en de omstandigheden, die beïnvloeden wat er mee gebeurt en die van plaats tot plaats verschillen, leiden tot onzekerheid. Voor de omgevingsfactoren, die bepaald worden door onder meer de bodemgesteldheid, de geohydrologie en het landgebruik, is dat iedereen ook wel bekend. Iedereen kent immers wel kaarten, die daarvan gemaakt worden. Ook dergelijke kaarten geven maar bij benadering een juist beeld. Vaak treden veranderingen in bodemgesteldheid geleidelijk

op, terwijl kaarten juist een scherpe grens tussen twee kaarteenheden suggereren. Bovendien zijn kaarteenheden gedefinieerd op basis van een typisch voorbeeld van die kaarteenheid. Door ruimtelijke variatie binnen een kaarteenheid, zullen er meer plekken zijn die niet precies overeenkomen met dat typische voorbeeld dan wel. Een dergelijke onzuiverheid van kaarteenheden kan overigens op zich ook weer gekarteerd worden. Toch lost dat het probleem van ruimtelijke variatie niet op omdat we kaarten, of dat nou de verontreinigingsgraad of een bodem- of grondwatereigenschap betreft, baseren op een paar boringen van elk pakweg 25 cm² horizontaal oppervlak. Aan elk van die boringen wordt naderhand echter wel opgehangen wat de eigenschappen zijn van horizontale oppervlakken van hectares of meer. Dat betekent dat onze feitelijke kennis van bodem en grondwaterpakketten nogal beperkt is. Bij gebruikmaking van andere technieken treden vergelijkbare problemen op van meetresolutie, resolutie van de database waarin meetwaarden worden opgeslagen, of de vertaling van meting naar eigenschap in die database.

Met het gebrek aan kennis dat net geschetst is, lijkt het onvermijdelijk dat verschillende onderzoekers het beschikbare feitenmateriaal verschillend zullen interpreteren. Soms zijn die verschillen klein, maar vaker nog zijn ze groot en kunnen ze gemakkelijk leiden tot verschillende oplossingen. Zeker waar het scenario's voor de toekomst betreft, kunnen verwachtingen dan flink uiteenlopen. Voorbeelden hiervan zijn er genoeg, zelfs voor korte termijn voorspellingen.

Er zijn talloze situaties te vinden en te verzinnen waar-

voor antwoorden gevonden moeten worden om goed met bodemverontreiniging om te gaan of om de bodem goed te beheren. Hoewel wetenschappelijk onderzoek niet alleen aan universiteiten wordt uitgevoerd, is het toch vooral het werkterrein van universiteiten om inzichten aan te leveren met een brede geldigheid. Dat betekent dat waarnemingen aan specifieke gevallen vertaald moeten worden in algemene principes en wetmatigheden. Bij die vertaalslag worden eigenaardigheden en niet-relevant geachte details verwaarloosd om de hoofdzaken of onderliggende processen te accentueren. Hierbij is het onontkomelijk dat vereenvoudigingen worden gemaakt. Het is de kunst om de juiste vereenvoudigingen te maken, in de gaten te houden welke er gemaakt zijn (zie mijn voorbeeld over de referentiewaarden) en waar nodig complicaties weer in acht te nemen. Welke vereenvoudigingen nog wel of niet meer acceptabel zijn hangt af van de mate van nauwkeurigheid die vereist en haalbaar is. Het reduceren van de complexiteit van de werkelijkheid tot iets dat we kunnen overzien is wat ik modelleren zou willen noemen.

Er is nogal wat spraakverwarring over de begrippen modelleren of model en daarom is het nodig dit onderwerp behoedzaam tegemoet te treden, immers: "filosofische problemen ontstaan, als de taal met vakantie gaat" (Wittgenstein). Het probleem is volgens mij dat iedereen wat anders onder een model verstaat. Waar de een denkt aan het poldermodel, of het model van een vliegtuigje, denkt de ander aan iets "waarin alle op dit moment aanwezige kennis is geïntegreerd en op heldere, reproduceerbare wijze toepasbaar wordt gemaakt"¹¹). Wat ik me voorstel bij een model heb ik zojuist aange-

geven. Wanneer een baby huilt en de ouders meteen denken dat de kleine honger heeft is dat een op ervaringsfeiten gebaseerd model: de baby kan immers ook ergens anders om huilen. Het lijkt me in ieder geval niet correct om onder een model alleen een rekenmodel te verstaan, dat liefst duizenden programmeerregels omvat en dermate complex is, dat de ontwikkelaars door de zorg, tijd en moeite die erin zijn gaan zitten er bijna automatisch van zijn gaan houden. De term rekenmodel geeft immers al aan dat het een speciaal type model is, anders dan bijvoorbeeld een conceptueel model. Met het voorbeeld van een huilende baby wil ik accentueren dat iedereen modelleert, of nu gebruik gemaakt wordt van rekenmodellen of van expert opinion, misschien met uitzondering van die gevallen waarbij inderdaad niet wordt nagedacht. Dit geldt dus ook voor statistici die menen zonder modellen tewerk te gaan, zelfs wanneer zij erin slagen inderdaad geen veronderstellingen te maken zoals dat variabelen normaal verdeeld zijn¹²⁾. Ik vermoed overigens, dat zij dachten aan complexe numerieke modellen bij hun uitlatingen. Evenzo denk ik dat uitlatingen zoals dat *het uitgaan van meningen van experts hetzelfde is als het raadplegen van een kristallen bol*¹¹⁾ uitstekend materiaal zou opleveren voor een stelling bij een proefschrift. Wellicht wat chargerend, stel ik dat het niet uitmaakt hoe je kennis formaliseert, wat onderzoekinstellingen verkopen is de mening van degene die het onderzoek uitgevoerd heeft.

Wanneer een model een vereenvoudiging van de werkelijkheid is, wordt de relatie met de werkelijkheid gelegd door waarnemingen *aan* de werkelijkheid in grootheden waar het model wat mee kan. Gangbare termen die voor

het leggen van die relatie wel gebruikt worden zijn: verificatie, validatie, falsificatie, en calibratie. Ook hier is de spraakverwarring weer groot, zoals blijkt uit een discussie daarover in Science¹³). Daar spreken Oreskes c.s. zich uit over modellen van systemen op een wijze die veel overeenkomsten heeft met het begrip groep in de wiskunde. Het begrip groep is misschien wat minder geladen dan systeem, omdat het duidelijker van de werkelijkheid afstaat, zodat ik er hier liever van gebruik maak. Van anecdotische interesse is misschien, dat het begrip groep in deze context voor het eerst gebruikt werd door de Franse wiskundige Evariste Galois (1811-1832). Op de vooravond van een voor hem noodlottig duel, waartoe hij door twee "patriotten" was uitgedaagd schreef hij een 60 pagina's dik manuscript hierover. Later werd zijn groepentheorie door anderen wiskundig nader uitgewerkt, en bewerkt voor toepassingen in de kristallografie, linguïstiek, etc. Hierbij wordt een groep gevormd door elementen. In principe kunnen elementen ook weer als groepen opgevat worden op een lager niveau indien zij op hun beurt weer elementen bevatten die voldoen aan de axioma's van de groep. Op het abstractieniveau van een groep zijn er betrekkingen of relaties die de verandering van elementen in nieuwe elementen beschrijven. Omdat ik slechts gebruik wil maken van de analogie, laat ik de details achterwege.

Oreskes e.a. stellen dat groepen (zij noemen het systemen) die bestaan uit zuiver door logica (of wiskunde) gevormde combinaties gesloten zijn, terwijl groepen waarvoor dit niet het geval is als "open" geklassificeerd moeten worden. Voor gesloten groepen kan de waarheid van een stelling (verificatie) worden bewezen, voor open

groepen niet. Een gesloten groep is bijvoorbeeld een numeriek algoritme of de wiskunde. Dat betekent voor Oreskes e.a. dat de verificatie van een numeriek algoritme gunstig uitvalt als de onderliggende vergelijkingen dezelfde resultaten opleveren als dit algoritme en convergentie tussen numerieke en analytische oplossingen optreedt. Dit doen we in onze eigen onderzoeksgroep om subroutines en andere stukken software te verifiëren dan wel om geattendeerd te worden op fouten daarin. Zo kwamen we er bijvoorbeeld achter dat de manier waarop het transport van een niet-lineair adsorberende stof behandeld werd door het commercieel verkrijgbare stoftransportpakket MT3D fout was¹⁴⁾ en collega Leijnse (LUW Waterhuishouding/RIVM), die dit probleem doorsluisde naar de software-ontwikkelaars mocht vaststellen dat dit na “correctie” nog steeds het geval was. Dit geeft te denken wanneer we ons beseffen dat MT3D een software-pakket is dat in brede kring als de standaard gezien wordt, te zamen met het waterstromingspakket MODFLOW.

Oreskes e.a. geven aan waarom numerieke modellen in de aardwetenschappen volgens hen “open groepen/systemen” vormen. Het komt er bijvoorbeeld op neer dat een logische deductie uit uitspraken die in fysische termen zijn vervat geen niet-fysische (bijv. biologische) wetten of verklaringen kan opleveren (hiervoor zijn extra premissen nodig die de relatie tussen fysische en in dit geval biologische kenmerken uitdrukken¹⁵⁾). Hoewel de bespreking van Oreskes e.a. een aantal zeer zinvolle voorbeelden bevat, verontrust het me dat ze in een voetnoot (no. 11) opmerken: “Godel questioned the possibility of verification even in closed systems”. Ik vermoed dat Gödel een

andere definitie hanteerde van verificatie. Daarnaast duidt deze voetnoot op het belang van hiërarchische niveaus. Wat ik hiermee bedoel kan geïllustreerd worden met een verwijzing naar de klassieke paradox van Epimenides de Kretenzer die zegt "Ik lieg". Het probleem hiermee is dat (i) als het waar is dat hij liegt hij dit juist niet doet, terwijl (ii) als hij inderdaad liegt, hij impliciet beweert de waarheid te spreken. De essentie is nu, dat deze bewering slaat op alle uitlatingen van Epimenides en op deze uitspraak. De theorie van logische typen (of vertakte typen) zegt nu dat bovenstaande uitspraak, omdat deze verwijst naar al diens uitspraken van een hoger niveau is¹⁶⁾. Een belangrijk axioma van de theorie van logische typen is dan ook dat alles wat betrekking heeft op het geheel van de verzameling/groep/klasse geen deel uit mag maken van die verzameling...; een verzameling... mag zichzelf niet als element bevatten¹⁷⁾. We moeten hiërarchisch gerangschikte niveau's van logische abstractie zorgvuldig blijven scheiden. Dit is de kern waarom het¹⁵⁾ gaat: de groepen in hetzij fysische hetzij biologische termen zijn van een lager niveau dan de groep waarin beide gecombineerd worden. De theorie van logische typen levert ons dus een kader om om te gaan met het opklimmen naar hogere niveau's.

Een dergelijke hiërarchie, die ook door Goudriaan in zijn inaugurele rede werd besproken¹⁸⁾, bestaat eruit dat elk hoger niveau dichter komt bij de ons onbekende werkelijkheid en derhalve meer complexiteit bevat dan lagere niveaus. Verschijnselen op hogere niveaus kunnen dus niet afgeleid worden uit verschijnselen of wetmatigheden op lagere niveaus omdat ze een nieuw element bevatten. Een voorbeeld hiervoor is de stroming van een

vloeistof door een capillair, die beschreven kan worden met de wet van Poisseuille. Voor netwerken van poriën (een ruimtelijke schaal groter) kan door integratie van de vergelijkingen die gelden voor een porie de wet van Darcy afgeleid worden¹⁹⁾, maar hiertoe moet een “closure” probleem opgelost worden. Op basis van intuïtie (fantasie dus) kan dit, maar dit betekent natuurlijk dat er een nieuw element, dat afwezig was in het capillairmodel, van bovenaf wordt toegevoegd. De wetmatigheid van de kleinere schaal geldt wel voor de grotere schaal (zie bijv. ook Fig.1 van Bosma e.a.¹⁴⁾), maar de voorspelling van de wetmatigheid die geldt op de grotere schaal is niet mogelijk. Waar de extra informatie hier¹⁹⁾ echter zeer transparant is en daardoor gemakkelijk te vervangen door even transparante alternatieven, is dit niet altijd het geval. Wanneer meetwaarden van grondwaterverontreiniging vertaald worden in een “met de hand getekend” kaartje dat de omvang van de verontreinigingspluim aangeeft, ook fantasie dus, dan is veel minder duidelijk waarop dit kaartje is gebaseerd. De suggestie die ervan uitgaat kan echter zeer sterk zijn en zowel terechte als onterechte beslissingen uitlokken. Dit lijkt me een goede reden om met deze wijze van “upscaling” voorzichtig om te gaan.

Van belang bij upscaling (het verklaren van systeemgedrag bij schaalvergroting) is dat niet slechts de schaal toeneemt. Extra complicaties dienen toegevoegd te worden omdat anders het gedrag op verschillende ruimtelijke of temporele schalen identiek is. Zo stroomt water niet anders in een zandkolom van 10 m dan in een vergelijkbare zandkolom van 1 m lengte wanneer het enige verschil de afstand is.

Terugkerend naar de hiërarchie zoals besproken, kunnen we het punt van verificatie weer ter hand nemen. Strikt genomen betekent verificatie dat de waarheid ergens van wordt vastgesteld. Claims dat een model geverifieerd kan worden kunnen wellicht op aspecten van de wiskundige of numerieke uitwerking betrekking hebben, maar kunnen geen betrekking hebben op het waarheidsgehalte dat de werkelijkheid beschreven wordt. Immers, die is van hogere orde dan elk model (dat immers vereenvoudigingen in zich draagt, zoals de veronderstelling van een continuüm). Daarnaast zijn modellen afhankelijk van modelparameterwaarden, wier ruimtelijke en temporele verdeling niet precies bekend is of kan zijn (thermodynamische constanten voor bodem- of geochemie, doorlatendheid, porositeit, dispersiviteit, positie en leef-tijd van organismen binnen levensgemeenschappen, etc.). Zelfs het meten zelf is onderhevig aan een resolutie, die van veel meetapparatuur slechts bij benadering bekend is. Zo is bij het onttrekken van water uit de bodem of het grondwater onduidelijk waar dit water precies vandaan komt. Bij chemische analyse is dan ook niet duidelijk welk bodemvolume (qua grootte en vorm) nu precies bepaalt wat de chemische samenstelling is van het bodemvocht. De uitspraak "meten is weten" geeft daarom te denken, want elke interpretatie van een dergelijke meting en van metingen in het algemeen is in feite niets anders dan modelleren.

Modelvalidatie richt zich op de legitimiteit van een model. Sommigen gebruiken het als synoniem voor verificatie²⁰⁾ en daarnaast wordt ook wel gesuggereerd dat een gevalideerd model een accurate voorstelling van de fysische realiteit geeft en ons dus kan vertellen hoe

de wereld werkelijk is²¹⁾. Dit is alletwee onterecht: het is niet mogelijk vast te stellen dat een model waar is voor de realiteit. Op zijn best wordt een model als valide beschouwd wanneer het intern consistent is, geen bekende tekortkomingen heeft gezien het doel waarvoor het wordt toegepast en gecalibreerd is met data die verzameld zijn voor datzelfde doel. Wat men kan doen is vaststellen dat een model om bepaalde redenen plausibel is omdat het op overtuigende wijze het huidige begrip bevat en men kan vaststellen dat het niet of niet in ernstige mate in tegenspraak is met meetdata. Op dat moment is nog niet bekend wat precies de reikwijdte is van het model en voor welke gevallen andere hoofdlijnen erin gebracht moeten worden om de overeenkomst met data te verzekeren. Zoals al eerder is betoogd, is dit overigens maar een van de bronnen van onzekerheid van modellen.

De plaats van data is hiermee ook duidelijk. Ten eerste vormen data de inspiratiebron op basis waarvan een model ontwikkeld wordt. Daarnaast kan een model met data gecalibreerd worden. Hoe groter en hoe meer divers een dergelijke dataset is, hoe beter de calibratie kan slagen en hoe betrouwbaarder het resultaat is. Om de toepasbaarheid van het model vast te stellen zijn ook data nodig en in dit proces van validering is men in feite op zoek naar de grenzen waarbuiten een model niet meer toepasbaar is. Hoewel data dus cruciaal zijn, zijn ook hier beperkingen. Zeker in de context van bodemverontreinigings onderzoek kunnen sommige experimenten nauwelijks in situ uitgevoerd worden vanwege de negatieve milieu-effecten, bijvoorbeeld wanneer zeer toxische stoffen of radionucliden in het geding zijn. In andere gevallen zouden experimenten te lang duren. Uit eigen

ervaring puttend noem ik het transport van fosfaat naar het grondwater. Vanwege de kinetiek van vastlegging, zouden in situ experimenten met een hoge nauwkeurigheid jaren vereisen. Zowel ik als het beleid hadden niet zoveel geduld. Noemenswaard is ook het onderzoek van het RIVM dat de concentratieontwikkeling van dichloorpropan in het Drentse grondwater bestudeerde²²⁾. Hierbij werd met een model voorspeld dat de norm met meer dan twee ordegrottes zou worden overschreden en het nog een eeuw zou duren voor de concentratie weer beneden de norm zou uitkomen. Gelukkig werd deze stof als bijproduct van het bestrijdingsmiddel dichloorpropeen al rond 1980 verboden, en werd van "real time" experimentele toetsing van het model in Drenthe afgezien.

Het is echter onmiskenbaar dat met goede data een voorspelling betrouwbaarder wordt. Hierbij onderscheid ik twee soorten voorspellingen: interpolaties en extrapolaties. Van interpolatie is sprake wanneer uitspraken gedaan worden voor situaties waarvoor geen data beschikbaar zijn, maar binnen het gebied van parameters waarvoor het model als gevalideerd beschouwd wordt. Dit zou gezien kunnen worden als voorspelling binnen een hierboven omschreven groep. In feite wordt dan voorspeld of het resultaat bepaald wordt door hetzij het ene hetzij een ander proces of mechanisme dat in het model geïncorporeerd is en hoe het resultaat er dan uit ziet. Van extrapolatie is sprake wanneer een model gebruikt wordt voor de beoordeling van situaties waarvoor het model niet is gevalideerd. Omdat metingen meestal uitgevoerd worden aan intrinsiek "open" groepen, ben ik geneigd om er vanuit te gaan dat van interpolatie alleen sprake is wanneer wanneer externe invloeden goed onder controle te houden zijn: modelsystemen.

Per definitie, in ieder geval wanneer de door mij gehanteerde definitie wordt geaccepteerd, is extrapolatie een riskante zaak. Vaak is er een behoefte tot extrapolatie, bijvoorbeeld als voorspellingen over langere perioden of voor de toekomst vereist zijn. Maar een model dat gecalibreerd en gevalideerd is met een meetset van de afgelopen 5 dagen is daarmee niet gevalideerd voor de eerstvolgende periode van 5 dagen. Dit komt omdat situaties waaraan gemeten wordt zelden gesloten groepen vormen, waardoor randvoorwaarden die voor de calibratieperiode bekend waren kunnen veranderen in de tweede periode, zonder dat dit de validiteit van het onderliggende model als zodanig hoeft aan te tasten. Bovendien kunnen de onzekerheden, die inherent zijn aan een model, propageren in de tweede periode en tot discrepanties leiden. Vooral wanneer de periode in de toekomst waarvoor voorspeld wordt groter is, wordt de kans tot discrepanties ook groter. Zowel bij de weersvoorspelling als bij de olie-exploratie worden modellen met randvoorwaarden continu bijgesteld door de invoer van nieuwe meetdata om de discrepanties beperkt te houden.

Een extra probleem van extrapolatie is dat er sprake kan zijn dat een hiërarchisch niveau omhoog gestapt wordt en daarvoor is immers een essentiële modelaanpassing vereist. Met name hier doet zich het schaalprobleem voor, dat ook op andere plaatsen in dit betoog al impliciet aan de orde kwam. De essentie daarvan is dat modelconcepten en metingen altijd gericht zijn op een bepaalde schaal en dat er dus gekeken wordt naar het gemiddeld gedrag op die schaal: variaties op kleinere schalen worden niet of in een vereenvoudigde vorm in rekening gebracht. Dit leidt tot fouten in het modelconcept, modelparameters,

en interpretatie van metingen, hetgeen weer leidt tot onzekerheid. Er zijn meerdere klassificaties ontwikkeld voor schalen. Om de gedachten te ordenen spreekt de me vooral de volgende onderverdeling in schaaltypen aan: de schaal/schalen van 1. de ruimtelijke variabiliteit van de natuur, 2. het model, 3. de observatie, en 4. beleids- en beheersbeslissingen. Vooral omdat de vierde schaal doorgaans groter is dan de drie andere, accumuleren fouten en onzekerheden. Daarnaast beweegt het beleid en beheer zich doorgaans op een hoog hiërarchisch groepsniveau, omdat natuurwetenschappelijke, sociale, economische en politieke aspecten bij elkaar komen. Het is dan ook wel begrijpelijk, dat het beleid zich soms afvraagt wat het met fundamenteel onderzoek aanmoet.

Fundamenteel onderzoek kan op detailniveau antwoorden geven voor modelsystemen. Dit kan waardevolle inzichten opleveren voor ander fundamenteel geïoriënteerd onderzoek, maar daar wil ik me nu even niet op richten. Wanneer de werkelijkheid waarover vragen gesteld worden niet al te veel van afwijkt van modelsystemen, kunnen dergelijke modelsystemen zeer betrouwbare informatie opleveren en antwoorden geven. Een voorbeeld hiervan zijn sommige ex situ reinigingstechnieken, bijvoorbeeld die welke gebruik maken van reactorvaten die goed gehomogeniseerd zijn. Voor dergelijke systemen kan met behulp van fundamenteel onderzoek en de technologische "spin off" daarvan een goede basis gegeven worden voor de dimensionering. Dit is ook het geval wanneer fundamenteel onderzoek direct gericht wordt op het schaalniveau waar ook de beleidsvragen gesteld worden. Een voorbeeld daarvan is de uitwerking van het zg. transferfunctiemodel voor hele stroomgebieden²³).

Dit model gaat uit van een eenvoudig te meten input (van regen en verontreinigingen) en van langzame veranderingen in de toestand van de bodem binnen het stroomgebied. Op basis daarvan voorspelt het de hydrologische (waterafvoer) en verontreinigingsrespons op een benedenstrooms stuk van de rivier. Na calibratie biedt het de mogelijkheid om enkel op basis van de neerslag te voorspellen wat de waterkwaliteit in de rivier is. Terwijl het concept op fundamentele wijze werd uitgewerkt, is het resultaat daarvan een instrument dat voor de waterbeheerder en het beleid zeer bruikbaar kan zijn.

Ook in veel andere gevallen worden vragen gesteld die betrekking hebben op de complexe systemen van buiten. In die gevallen kan fundamenteel onderzoek nodig zijn om graduele uitspraken te doen of om de vraagstelling te nuanceren. Dit vereist echter dat de onderzoekers op dat moment afstand kunnen nemen van het detailniveau van het onderzoek. Dit klinkt misschien wat vaag maar een voorbeeld uit de *in situ* bodemsanering kan misschien wat duidelijkheid brengen.

In zijn onderzoek over meerfasenstroming bestudeerde Van Dijke onder andere persluchtinjectie²⁴⁾. Dit is de injectie van lucht beneden het grondwaterpeil, met als doel om vluchtige verontreinigingen te strippen of om zuurstof in te brengen die voor de aërobe afbraak nodig is. Het lukte in dat onderzoek om een eenvoudige wiskundige uitdrukking te vinden voor de invloedsstraal, wat van belang is om persluchtinjectie te dimensioneren. Die uitdrukking geldt echter voor een homogene ondergrond en aan die vereiste wordt niet vaak voldaan. Berekeningen geven aan dat voor een gelaagde bodem, de

invloedsstraal snel toeneemt wanneer een minder doorlatende laag boven een doorlatende ligt. Hoewel ook dan een indruk verkregen kan worden voor de invloedsstraal (die van een paar meter voor de homogene situatie kan toenemen tot tientallen meters voor de gelaagde bodem), is het niet zo zinvol om hierop de dimensionering dan maar af te stemmen. De berekeningen laten namelijk zien dat de luchtstroom extreem gevoelig is voor een geringe mate van heterogeniteit. Dit is ook wel voorstelbaar, gezien de verschillen in dichtheid van water en lucht. Door enige afstand van de modeloefening te nemen wordt de implicatie van die gevoeligheid duidelijk: het is waarschijnlijk zinvoller om vast te stellen dat het meestal onmogelijk is om te garanderen dat persluchtinjectie leidt tot beluchting van een bepaalde plek. Een scheurtje in de bovenliggende laag kan immers al betekenen dat de luchtstroom zich daarin concentreert en de basis onder alle berekeningen wegvalt. Hoewel niet het oorspronkelijke doel van de modellering, kan deze conclusie voorkomen dat een onjuiste saneringsstrategie wordt gekozen. Overigens wil ik toch ook benadrukken dat andere problemen die door Van Dijke werden onderzocht, zoals de uitbreiding van drijfslagen en wat er gebeurt bij het wegpompen daarvan, een goede basis vormen voor zowel risicobeoordeling als de dimensionering van sanering (door pompen).

Op dezelfde wijze als het persluchtvoorbeeld kan worden omgegaan met bijvoorbeeld het onderzoek aan regenwormen van Marinussen⁷⁾. Hoewel het interessant kan zijn om een indruk te krijgen hoeveel zware metalen door regenwormen worden opgenomen, zullen de metalenconcentraties in de bodem, de type bodem en de

andere omstandigheden die hierop van invloed zijn veelal niet hetzelfde zijn als in zijn onderzoek. Eén van de belangrijker resultaten van dit onderzoek is niet de precieze grond/regenworm overdrachtsfactor maar de constatering dat onderzoeksresultaten die verkregen zijn in het laboratorium wel degelijk vergelijkbaar kunnen zijn met wat onder veldomstandigheden wordt waargenomen. Waar die lab-experimenten aan moeten voldoen en hoe complicaties in het veld (heterogeniteit, mobiliteit regenworm) de overeenkomst kunnen vertroebelen zijn evenzo van groter belang dan de getalsmatige resultaten. Wel kan de getalsmatige invulling een bouwsteentje zijn om de veiligheidsfactoren die vanwege onzekerheden moeten worden ingebouwd geleidelijk aan te verkleinen.

Wanneer men vertrouwen heeft in een model is het relatief eenvoudig, alhoewel vaak arbeids-, tijds- of rekenintensief, om het betrouwbaarheidsinterval van het antwoord te koppelen aan de modelinvoer of aan de modelbeschrijving. Dit kan inzicht geven over de processen of modelinvoer waar extra informatie het meest urgent is. Wanneer de bronnen van onzekerheid zoals heterogeniteit, veranderingen in de randvoorwaarden als functie van de tijd, etc., redelijk bekend zijn, kunnen beleidsmakers op basis van dergelijke betrouwbaarheidsintervallen ook een indicatie krijgen of een beslissing "een slag in de lucht" of goed onderbouwd is. Voor het beleid zou de bandbreedte van een antwoord dan ook minstens zo belangrijk moeten zijn als het antwoord zelf, ook al is het beleidsmatig en juridisch allesbehalve eenvoudig om met onzekerheid om te gaan¹⁰⁾.

Modelleren, meten, beslissen, in alle gevallen hebben

we te maken met fouten en onzekerheden die op de koop toe genomen (moeten) worden. Fundamenteel en toegepast bodemverontreinigingsonderzoek leveren een bijdrage aan het reduceren van dergelijke fouten en onzekerheden. Die bijdrage groeit geleidelijk zoals ook andere inzichten geleidelijk groeien. Doel van het onderzoek, voor de praktijk althans, is onder andere consensus over hoe de bodem beschermd moet worden en waartegen en hoe de bodem het beste kan worden gereinigd. Consensus moet men in het debat veroveren. Vooralsnog geldt voor modellen en voor wetenschappelijke inzichten in het algemeen, dat eenvoud, transparantie en overtuigingskracht de beste route naar consensus vormen. Immers, wanneer de geschilderde voorstelling van zaken helder is en de consequenties van handelingen overtuigend zijn is ook de acceptatie van daarop gebaseerde besluiten groot.

Ingewikkelde modellen, met de daarbij horende uitgebreide databehoeftes, geven doorgaans genuanceerde antwoorden die, naar de werkelijkheid vertaald, behept zijn met flinke onzekerheden. Ik zie met name dat soort modellen als een instrument voor de onderzoekswereld om inzichten op te doen, om te leren. In veel gevallen kunnen de inzichten die verkregen worden met dergelijke modellen vertaald worden in hoofdlijnen en trends, die voldoende gedetailleerd zijn voor het beleid en voor de praktijk en die voldoende robuust zijn voor acceptatie door de betrokkenen. Ook het bodemverontreinigingsonderzoek moet die stap zetten. Anderzijds heeft het beleid, dat natuurlijk ook door andere actoren gestuurd wordt, weinig alternatieven als het zich echt wil richten op duurzaamheid. De sanering van de bodem, het

grondwater en de veestapel is duur, extreem duur. Belangrijker nog dan het ontwikkelen van sanerings-technologie of optimalisatie daarvan, wat veel geld kan besparen, is het vroegtijdig vaststellen van dreigende problemen. Dit is ondankbaar werk, want je bent snel een roepende in de woestijn en wordt zelfs negatief afgerekend door de omgeving wanneer het roepen onverwachts succes heeft en de dreiging wordt afgewend. Toch heeft bodemverontreinigingsonderzoek op dit gebied een belangrijke missie. Om een laatste voorbeeld te noemen: de veestapel wordt nu ingekrompen. Wanneer in een veel vroeger stadium de groei was omgebogen in stabilisatie, dan was deze koude sanering met alle persoonlijk leed, kosten en kapitaalvernietiging niet nodig geweest. Waarschuwingen waren er al vroeg genoeg en zij waren in een simpel model vervat: de hoeveelheid fosfaat die je in de bodem kunt bergen is groot, maar eindig. Hier werd niet naar geluisterd, niet omdat het model niet eenvoudig, transparant of overtuigend was, maar om politieke redenen. Geleidelijk werd het signaal met nauwelijks ingewikkelder modellen echter wel overgebracht, waarbij de bijdragen in het vorige decennium van De Haan, Van Riemsdijk en Lexmond van onze sectie groot is geweest. De aard van die bijdrage is ook in een paar woorden te vatten: vasthoudend, robuust, overtuigend, en niet onderuit te halen zelfs door een overheid die er niet aanwilde. Bij een latere ombuiging van het mineralenbeleid zou de prijs nog hoger geweest zijn. Kortom, goed uitgevoerd onderzoek dat goed wordt doorgegeven aan de praktijk is geld waard. Wanneer beleidsvernieuwing niet in te grote stappen gaat, blijft bijsturing door de wetenschap en door andere actoren mogelijk en kan ook bij onzekerheid met zekerheid op de grotere lijn bestuurd en beslist worden.

Mijnheer de Rector Magnificus,

iedereen modelleert en dat zal voor de raad van bestuur niet anders zijn. Alleen modelleert deze raad eerder op bestuursmatig vlak. In deze turbulente tijden voor de LUW (of zijn we al WUR?) benijd ik u niet. Volgens sommigen kunt u het misschien niet goed doen. Er zijn zelfs promovend die stellingen erover opnemen. Een wil ik u niet onthouden:

“Besturen is als de warmtebeweging van moleculen in een afgesloten vat: naarmate de temperatuur toeneemt, stijgt de druk, alles beweegt in alle richtingen, en de nuttig verrichte arbeid is nul”.

Het is duidelijk dat die promovendus niet op de LUW doelt, want hier verandert van alles. Nu is commentaar geven gemakkelijk en ik laat mij deze kans dan ook niet ontglippen. Het in het leven roepen van Wageningen Universiteit en Research centre heeft als belangrijk doel om de samenwerking tussen DLO en LUW te versterken en biedt volgens mij mooie kansen. Huisvesting op een plek is volgens mij hierbij belangrijk. Huisvesting, binnen één universiteit, is ook van belang voor onderzoeks- en leerstoepgroepen in zowel de basis- als de toegepaste wetenschappen, want met onderwijs in de basiswetenschappen alleen komen we er niet: niet alleen studenten hebben een leeropdracht, maar ook de docenten.

Gelukkig heeft u zich laten bijsturen door de studierichting milieuhygiëne niet helemaal te beëindigen. Gezien de afzetkansen van Wageningers, de vraag van o.a. NWO en EU-programma's naar integrerend onderzoek en de bescheiden rol die natuurwetenschappen in het beleid innemen, hoop ik dat ook andere aspecten bij de nieuwe milieurichting worden ingebracht. Zeker voor

een universiteit die duurzaamheid zo hoog in het vaandel heeft is een goede milieu-studierichting bijna een premisse.

Ik hou u allen al te lang op, zeker wanneer u er later, bij nalezen van deze rede, achter komt dat het ook in tien minuten had kunnen worden gezegd. Toch wil ik nog dozijn mensen bedanken.

Hooggeleerde De Haan, beste Frans,

gedurende de tijd, die ik bij jouw leerstoelgroep heb doorgebracht, heb ik veel van je geleerd. Zoals hopelijk uit mijn rede gebleken is, heb ik veel waardering voor de nadruk die jij altijd gelegd hebt op wat ik maar even "de praktijk" noem, maar ook voor de vrijheid die je mij gegeven hebt, bijvoorbeeld op het wat fundamentele vlak. Belangrijker dan de inhoudelijke kanten van de zaak zijn voor mij je vriendschap, eerlijkheid, het nemen van je verantwoordelijkheden en je oog voor grote en vooral ook kleine dingen. Alsof dat niet genoeg was, heb je me voorgedragen voor het persoonlijk hooglerarschap. Wat kan ik nog zeggen dan: bedankt!

Hooggeleerde Van Riemsdijk, beste Willem,

wanneer de druk van de vele verantwoordelijkheden je te groot wordt wil je nog wel eens onderduiken bij die medewerkers, die zich met onderzoek bezighouden. Dat patroon was er al toen je mij begeleidde in mijn promotie-onderzoek en we heel wat afgediscussieerd hebben. Je bent dan ook een wetenschapper in hart en nieren, die anderen, waaronder ik mezelf tel, op een niveau opleidt waar niets op af te dingen is. Het is duidelijk, dat ik nog

steeds de vruchten pluk van jouw enthousiasme, kennis, en de manier waarop je onderzoek benadert en dat ik me gelukkig prijs jou als begeleider te hebben gehad. Ondanks een lichte divergentie de afgelopen jaren in de basisingredinten van ons onderzoek, jij de chemie en ik vooral fysisch, zijn er genoeg overlappende terreinen en dat belooft veel voor de toekomst. Daar kijk ik naar uit, maar eerst bedank ik je voor de goede opleiding die ik van je gekregen heb.

Hooggeleerde Van Duijn, beste Hans,

bij mijn eerste baan bij het toenmalige Laboratorium voor Grondmechanica in Delft werd ik aan jou toegevoegd, ook al had jij geen idee waar een bodemkundige goed voor kon zijn. Ook met jou heb ik enorm geluk gehad en ik denk dat dat komt door jouw analytische manier om problemen te lijf te gaan, wat een openbaring voor me was, en doordat ik voldoende wiskunde oppikte om gaandeweg verder te groeien. Al jaren komen mijn AIO's bij jou langs om te leren wat ik ze niet kan vertellen en daar doen we ons voordeel mee. Bedankt voor de inspiratie en de bijscholing!

Hooggeleerde Bolt, beste Gerard,

Al in mijn studie heb jij me de liefde voor de transportverschijnselen en de exacte benadering van bodemkunde meegegeven. Ik kan er nog steeds niet genoeg van krijgen, bedankt!

Beste AIO's en ex-AIO's,

onderzoek is leuk en nuttig. Toch hebben jullie allemaal wel een "dip" gehad, of komt die nog. De resultaten mogen er echter zijn, in de vorm van mooie proefschriften en artikelen. Hoewel het jullie werk is en ik slechts begeleid, leer ik er veel van, want jullie allen hebben je eigen sterke kanten waar ik mijn voordeel mee kan doen. Van de samenwerking geniet ik bovendien. De waardering die ik vandaag voor mijn werk mag ontvangen strekt zich duidelijk uit tot jullie bijdrage, zowel op wetenschappelijk vlak als daarbuiten en daar ben ik jullie dankbaar voor.

Beste sectieleden,

het werk dat ik uitvoer of diegenen die ik begeleid heeft zich in de loop der jaren over alle verdiepingen van ons gebouw bewogen, want er werd gemeten, gemodelleerd, projecten werden geschreven, en zelfs de kassen werden wel gebruikt. Mijn werk kon ik alleen doen omdat jullie ander werk deden of bepaalde werkzaamheden voor mij of in mijn plaats deden. Zonder die steun waren mijn mogelijkheden veel kleiner geweest, dus: bedankt voor alle samenwerking en steun.

Dames en Heren Studenten,

Het milieu staat niet meer boven in de politieke agenda, mogelijk omdat de bevolking het niet meer als de grootste zorg ziet. En zo hoort dat eigenlijk ook. Toch blijft het milieu onze aandacht eisen. Zowel voor de Europese milieuproblemen als voor ons werk daarbuiten, bijv. in

het kader van de zoute gronden, blijkt dat een goede natuurwetenschappelijke basis, alhoewel misschien minder aantrekkelijk dan andere onderwerpen, een voorsprong geeft. Dat biedt perspectieven op de arbeidsmarkt. Bij uw zoektocht naar de beste studie-invulling en de verwezenlijking daarvan zelf, zullen ik en mijn collega's u zo goed mogelijk ondersteunen. Wel hoop ik dat uw keuzes beïnvloed worden door m.n. uw affiniteit en interesses, want studie en werk moeten ook leuk zijn.

Dan besluit ik ermee, mijnheer de Rector Magnificus, u en de leden van de Raad van Bestuur te bedanken voor uw waardering en uw vertrouwen in mij. Ik zal me met enthousiasme verder voor deze behartenswaardige zaak blijven inzetten.

Dank u voor uw aandacht, ik heb gezegd.

Literatuur

1. Lexmond, Th.M., A.H. Dijkhuis, J.J.M.B. Heuer, en M.F. Heuer, Zware metalen in toemaakdekken: Sporen van bemesting met stadsvuil, Milieu, Tijdschrift voor Milieukunde, 165-170, 1987
2. Lexmond, Th.M., S.E.A.T.M. van der Zee, M.G. Keizer, en F.A.M. de Haan, Wet Bodembescherming: De kwaliteit van een beleidsinstrument, Bodem 7, 26-29, 1997
3. Lexmond, Th.M., en Th. Edelman, Huidige achtergrondwaarden van het gehalte aan een aantal zware metalen en arseen in grond, Handboek voor Milieubeheer, Bodembescherming, Samson, Alphen aan de Rijn, 1987
4. Technische Commissie Bodembescherming, Advies nieuw afwegingsproces saneringsdoelstelling, 34 pp., 1998
5. Boekhold, A.E., Grondgebonden residuen van bestrijdingsmiddelen: Een analyse van milieuhygiënische risico's, Technische Commissie Bodembescherming, 38 pp., 1989
6. Temminghoff, E.J.M., Chemical speciation of heavy metals in sandy soils in relation to availability and mobility, dissertatie LUW, 183 pp., 1998, en Temminghoff, E.J.M., A.C.C. Plette, S.E.A.T.M. van der Zee, & W.H. van Riemsdijk, Speciation of heavy metals in soil in relation to availability and mobility, Rec. Res. Devel. in Soil Science, 1, 55-65, 1997
7. Marinussen, M.P.J.C., Heavy metal accumulation in earthworms exposed to spatially variable soil contamination, dissertatie LUW, 136 pp., 1997

8. Novozamsky, I., Th.M. Lexmond, V.J.G. Houba, Single extraction of soil with 0.01 M CaCl₂ for evaluation of uptake of some heavy metals by plants, *J. Environ. Chem.*, 51, 47-58, 1993
9. De Ruiter, P.C., A.-M. Neutel, J.C. Moore, Energetics, patterns of interaction strengths, and stability in real ecosystems, *Science* 269, 1257-1260, 1995
10. De Haan, F.A.M., Leven met risico's, Rede bij gelegenheid van de 74e Dies Natalis van de Landbouwniversiteit, 9 maart 1992
11. Volkskrant, 29 januari 1999, Rekenmodel is altijd beter dan een kristallen bol
12. Volkskrant, 10 april 1999, Kijk, zonder modellen
13. Oreskes, N., K. Shrader-Frechette, K. Belitz, Verification, validation and confirmation of numerical models in the earth sciences, *Science*, 263, 641-646, 1994
14. Bosma, W.J.P., S.E.A.T.M. van der Zee, and C.J. van Duijn, Plume development of a nonlinearly adsorbing solute in heterogeneous porous formation, *Water Resour. Res.*, 32, 1569-1584, 1996
15. Hempel, C.G., *Filosofie van de natuurwetenschappen*, Aula, 453, Het Spectrum, Utrecht, 1977
16. Combès, M., *Grondslagen van de wiskunde*, Aula, 502, Het Spectrum, Utrecht, 1973
17. Whitehead, A.N., and B. Russell, *Principia Mathematica*, 2e druk, Univ. Press, Cambridge, 1910-1913, deel 1, p. 37
18. Goudriaan, J., Model, schaal en aggregatieniveau, Inaug. rede Landbouwniversiteit, 30 september 1993

19. Quintard, M., and S. Whitaker, Two-phase flow in heterogeneous porous media: The method of large scale averaging, *Transp. Porous Media*, 3, 357-413, 1988
20. U.S. Department of Energy DOE/RW-0073, Environmental assessment: yucca Mountain Site, Nevada Research and Development Area, Nevada, Vol.2, Office Civ. Radioactive Waste Management, Wash. DC, 1986
21. International Atomic Energy Agency IAEA-TEC DOC-264, Radioactive waste management glossary, Vienna, 1982
22. Beugelink, G.P., Toekomstige concentraties van dichloropropane in het ruwe water van Noordbargeres (Dr.) pompstation, RIVM rapport 728618001, Bilthoven
23. Rinaldo, A., and A. Marani, Basin scale model of solute transport, *Water Resour. Res.*, 23, 2107-2118, 1987
24. Van Dijke, M.I.J., Multi-phase flow modeling of soil contamination and soil remediation, Dissertatie LUW, 149 pp., 1997