

## **Communicerende vaten. Gevaren, risico's en effecten van verontreinigd sediment.**

### **Inleiding**

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

In de komende 45 minuten wil ik u een beeld geven van mijn visie op mijn vakgebied. Wat speelt er zoal, wat zijn de grootste problemen, en misschien belangrijker, waarom is het zo fascinerend. Dat is gebruikelijk bij inaugurele redes. Een reguliere hoogleraar aanvaardt zijn ambt met een bepaalde *leeropdracht*, een omschrijving van het hem of haar toegewezen wetenschapsdomein. Zorgvuldig gepositioneerd naast andere leeropdrachten binnen en buiten de eigen universiteit. Als je persoonlijk hoogleraar wordt is die opdracht misschien wat minder duidelijk. In essentie is de opdracht: *'ga zo door, joh'*. Je schrijft alleen een korte visie op je vakgebied. Maar dat wil nog niet zeggen dat zo'n leeropdracht niet zinvol is voor persoonlijk hoogleraren. Ik zie het als een voordeel en als een voorrecht dat ik vandaag mijn visie in relatief grote vrijheid zelf kan inkleuren. Mijn belangrijkste doel is dan ook om u te informeren over wat ik als die leeropdracht zie, om u te overtuigen van het nut, en om u een glimp te laten opvangen van terreinen waar op het gebied van water- en sedimentkwaliteit wellicht de spannendste vooruitgang te boeken is. Dat doe ik door u een korte schets te geven van het maatschappelijk en wetenschappelijk belang van water- en sediment kwaliteit en door een aantal recente onderzoeksthema's te belichten die mij op dit moment bezighouden.

### *Water- en sedimentkwaliteit*

Water- en sedimentkwaliteit, dat is het onderwerp waar ik mij mee bezig houd. In de familie heette ik al snel 'professor in de modder'. Dat dat soms ook letterlijk het geval is, moge duidelijk zijn uit sommige foto's die van mijn onderzoek genomen zijn. Waterkwaliteit, waar is dat nu belangrijk voor? Die vraag wordt vaak beantwoord met de gebruiksfuncties van water. En die kent iedereen: we gebruiken water om in te zwemmen, om te drinken, en om over te varen. Maar water betekent meer voor mensen. Het is geen zeldzaamheid dat mensen inspiratie halen uit oppervlaktewater zoals we dat kunnen waarnemen in onze directe omgeving. Maar in dichtbevolkte gebieden is de vervuiling van water soms heel ernstig, waardoor dat drinken of zwemmen vaak niet zo verstandig is. Door die vervuiling en door de toenemende omvang van de bevolking zal water van voldoende goede kwaliteit, in de komende eeuw een van de belangrijkste beperkende hulpbronnen zijn.

Als van oorsprong anorganisch chemicus, drong de volle betekenis van de ecologische functie van water wat later tot mij door. Pas de laatste 7 jaar is mijn aandacht vooral getrokken door de sturende rol die water voor aquatische organismen kan hebben, en in nog grotere mate door de bijzonder vervelende beperkingen die milieuverontreinigingen kunnen opleggen aan diezelfde organismen. Verontreiniging levert een grote druk op functies als visserij maar ook op de verscheidenheid aan organismen die we aan kunnen treffen, en op hun functies in het ecologische systeem. Wat daarbij wetenschappelijk gezien interessant is, zijn met name de interacties tussen gedrag en effecten van stoffen in het ecosysteem.

### *Water en sediment zijn communicerende vaten*

De kwaliteit van water heeft altijd een link met de kwaliteit van sediment. Sediment dat is de waterbodem. De modder waar u bij het oversteken van een beek in loopt, of waar u bij het vissen in staat. Sediment is belangrijk; er wonen organismen in die perfect op dat sediment zijn aangepast en die als voedselbron fungeren voor organismen die wij doorgaans nog wat belangrijker vinden: vissen en vogels. Vergeet die sedimentbewoners dus niet, en ook niet wat zij weer eten. De voedselketen heeft het fundament nodig. Sediment en het bovenstaande water zijn *communicerende vaten*: ze staan in direct contact en als je kijkt naar de stoffen die er in zitten is de één vaak een afspiegeling van de ander. Kleine korreltjes en blaadjes bezinken in het water, en vormen zo nieuw sediment. Zijn de korreltjes vervuild dan is ook het sediment vervuild. Als je dieper in het sediment kijkt, zie je dus vaak een afspiegeling van de watervervuiling in het verleden, soms tot decennia, eeuwen of millennia. Jammer genoeg blijven die stoffen daar niet altijd op dezelfde manier zitten. Ze kunnen uit elkaar vallen, of juist steeds harder aan die deeltjes gaan zitten. Ik kom daar later nog op terug.

### *Water- en sedimentkwaliteit. Een multidisciplinair probleem*

Alhoewel ook de kwaliteit van lucht en bodem hun invloed op de samenstelling van water hebben, is de link met sediment verreweg het belangrijkste. Daarom is het ook van cruciaal belang om in onderwijs en onderzoek deze compartimenten als 1 systeem te beschouwen, in hun onderlinge samenhang. We moeten vooral niet blijven hangen in de discipline waar we toevallig zelf zijn opgeleid. Het begrijpen van waterkwaliteit betekent dat je de interactie moet doorgronden van organismen en verontreinigende stoffen aan het sediment-water grensvlak. En die interactie is zeer complex. Het ecosysteem bestaat uit vele individuen en soorten die met elkaar concurreren om voedsel en andere hulpbronnen. Of ze goed gedijen hangt af van 'eten of gegeten worden', maar ook van fysische en chemische factoren zoals temperatuur, de zuurgraad of het zoutgehalte van het water. Of ze goed gedijen hangt er ook van af of het water of het sediment waar de organismen in leven niet giftig is door chemische stoffen. Organische chemische stoffen, schadelijke zowel als nuttige, zijn opgelost in water of geadsorbeerd aan allerlei deeltjes maar ook aan organismen. Vooral algen en bacteriën kunnen, omdat ze zo klein en talrijk zijn, een enorm oppervlak leveren waar organische stoffen aan vast gaan zitten. Voor anorganische chemische stoffen geldt dit ook, maar zij reageren ook nog eens zeer wisselend met elkaar. Het zal u niet verbazen dat als je iets van die complexiteit wilt doorgronden, een aantal traditioneel gescheiden disciplines elkaar dienen te ontmoeten. Als je iets wilt zeggen over toegepaste waterkwaliteitsvraagstukken, dan kom je vanzelf terecht bij concepten uit de aquatische ecologie, milieuchemie en geochemie, maar ook de systeemanalyse; de discipline die kwantitatief het verband probeert te leggen tussen de gedragingen van het systeem, het meer, de rivier, sloot of oceaan, en de eigenschappen en gedragingen van de bouwstenen van dat systeem; water, sediment, stoffen en biota. Typerend voor die benadering is het gebruik van modellen. Modellen zijn de taal van de systeem-analyse. Wiskundige formules die in de computer het gedrag van een systeem beschrijven. Simpele modellen als het kan, en ingewikkelde modellen als het absoluut noodzakelijk is.

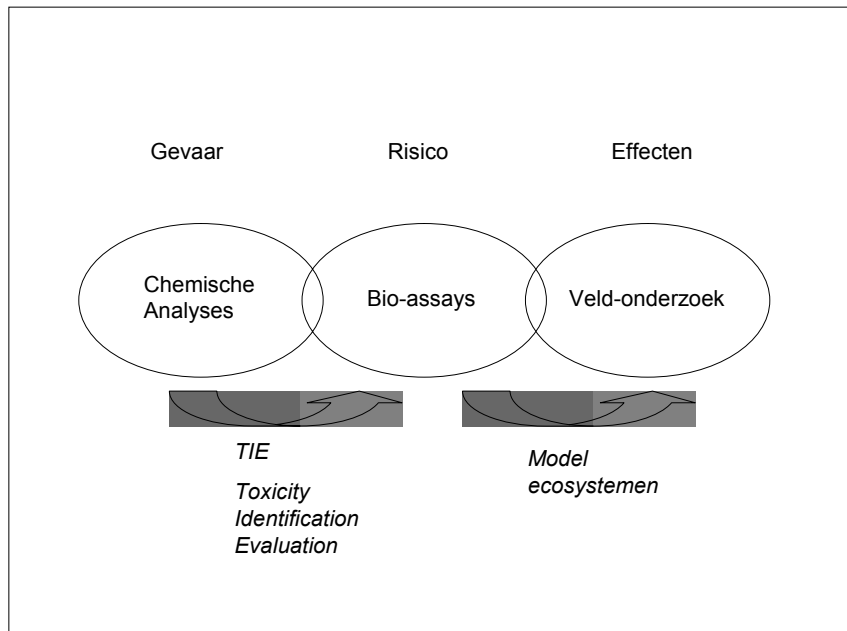
## Hebben stoffen effect?

### *Sedimentkwaliteit en de 'Goede Ecologische Toestand'*

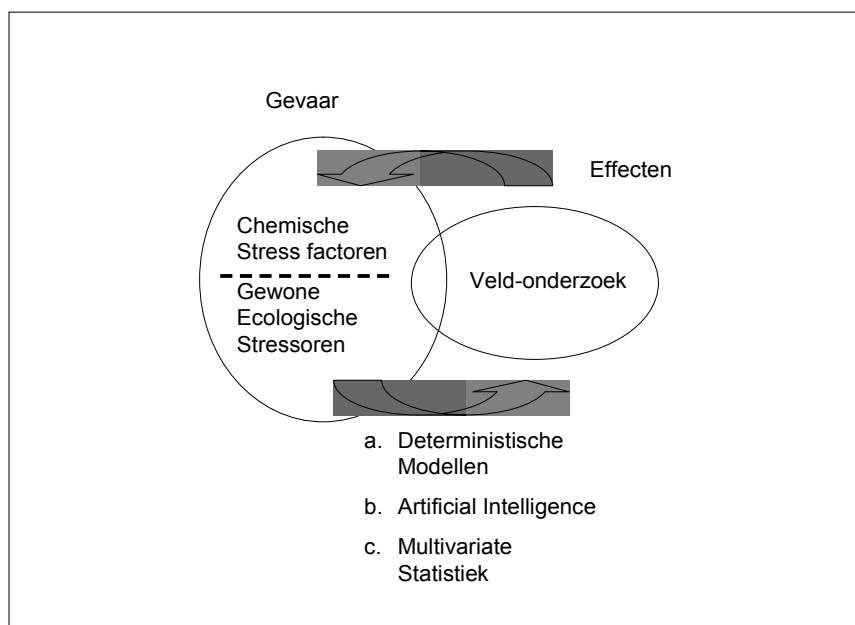
Hebben milieuverontreinigingen werkelijk een schadelijk effect op organismen in water? De Kaderrichtlijn Water zegt niets over het beheer van verontreinigd sediment, maar eist wel een 'Goede Ecologische Toestand' van oppervaktewater, die in ieder geval niet achteruit mag gaan. De vraag waar veel onderzoekers en waterbeheerders nu mee zitten is of verontreinigd sediment die Goede Ecologische Toestand beperkt of niet. Hoe kom je daar achter? Door gifstoffen in sediment, zouden aantallen en diversiteit van soorten in het sediment sterk kunnen afnemen. Die organismen dienen als voedselbron voor bijvoorbeeld vissen, die dus op hun beurt te lijden hebben. Als ze dan wat consumeren zit het ook nog eens vol gif, hetgeen kan leiden tot ophoping van stoffen in de voedselketen. Maar hoe bewijs je dat stoffen werkelijk effecten hebben op aantallen en diversiteit van soorten? Een netwerk van Europese wetenschappers en beheerders heeft, onder de naam SEDNET<sup>1</sup>, recentelijk de urgentie van die vraag onderbouwd. Zij adviseren letterlijk om 'het begrip te vergroten van de relatie tussen sediment-verontreiniging en de feitelijke impact op het functioneren en de ecologische toestand van ecosystemen'<sup>1</sup>. Zij onderscheiden achtereenvolgens *hazard*, *risk* en *impact*: oftewel het *gevaar*, het *risico* en de *effecten* van chemische stoffen. Je achterhaalt ze respectievelijk met chemische metingen, met bio-assays en met veld-onderzoek (Figuur 1). Hiermee bouwt het SEDNET advies voort op de bekende Triade benadering<sup>2</sup> uit de ecotoxicologie. Ik wil die drie categorieën nalopen, en kom daarmee ook op een historisch overzicht van de ontwikkeling van de ecotoxicologie.

### *Gevaar van stoffen*

Het mogelijke gevaar van stoffen in het milieu werd en wordt in eerste instantie vastgesteld door de concentraties te meten. De eerste alarmbellen gaan toch rinkelen zodra een nieuwe stof simpelweg gedetecteerd wordt. Het woord simpelweg is misschien niet op zijn plaats. De analytische milieuchemie heeft de afgelopen decennia een enorme technische ontwikkeling doorgemaakt. Twee maanden geleden werd dit op deze plaats op uitstekende wijze belicht door collega Jacob de Boer. Wil je weten of een stof er is, en of die stof een norm overschrijdt, dan is chemisch meten de methode. Zo'n normoverschrijding kan tot zeer dure beheersbeslissingen leiden, hetgeen meteen het belang van goede metingen, maar ook van goed onderbouwde normen aangeeft. Een te strenge norm leidt onnodig vaak tot een overschrijding en dus tot onnodige kosten. Een te soepele norm daarentegen, biedt misschien niet voldoende bescherming van het ecosysteem. In dit spanningsveld zullen politici, beleidsmakers en onderzoekers ongetwijfeld niet altijd dezelfde positie innemen. Voor veel onderzoekers op dit terrein is de belangrijkste vraag hoe je op basis van chemische concentraties iets kunt zeggen over werkelijke ecologisch relevante effecten in het veld. En dan komen de problemen. De eerste vraag is hoe giftig de stof is, en wat dat betekent voor de duizenden organismen die in het aquatisch milieu voorkomen. Het aantal stoffen in sediment is zo groot (honderdduizenden) dat je het nooit allemaal kunt meten. Je onderschat dus het gevaar. Verder zit een deel zo vast aan het sediment dat het er niet in een mensenleven uit kan, en dus ook niet bij organismen kan komen. Zo'n stof kun je nog steeds gevaarlijk noemen, maar het risico is dan klein.



**Figuur 1.** Gevaar (hazard), risico (risk) en effecten (impact) van stoffen voor/op het aquatisch ecosysteem. Resultaten uit veld-onderzoek (effecten) kunnen gelinkt worden aan chemische analyse-resultaten via bio-assays. Chemische analyses en bio-assays kunnen gelinkt worden via Toxicity Identification Evaluation (TIE). Veld-onderzoek en bio-assays kunnen gelinkt worden via Model-ecosysteem-experimenten. Naar SEDNET<sup>1</sup>.



**Figuur 2.** Effecten (impact) van chemische stressoren (toxicanten) en gewone ecologische stressoren, kunnen aan elkaar gelinkt worden door middel van deterministische modellen, artificial intelligence technieken of multivariate statistiek.

### *Risico-schatting van stoffen*

Het risico kan beter geschat worden door bepaalde organismen in een laboratoriumproef bloot te stellen aan verontreinigd sediment uit het veld. In plaats van met hele organismen kun je ook werken met cellen die hun respons in de reageerbuis geven. Zo'n proef noemt men een bio-assay. Gaat het beestje dood of groeit het minder, dan is er een risico. Onbekende stoffen die je bij de meting over het hoofd ziet dragen bij aan die sterfte dus die mis je niet, en een stof die niet bij het organisme komt, die praktiseert zijn giftigheid niet. Wat dat betreft geen verkeerde inschattingen dus. Een probleem bij bio-assays met natuurlijk sediment is dat je niet weet welke stof de sterfte veroorzaakt. Er zijn slimme trucs waarmee je een groep van stoffen in een mengsel kunt uitschakelen. Overleeft het beestje dan ineens wel, dan weet je dat die stoffen de boosdoeners waren. Deze laatste benadering noemt men TIE, Toxicity Identification Evaluation. Je kunt er niet alles mee achterhalen, maar met TIE kun je oorzakelijke verbanden leggen tussen de gemeten chemische concentraties en de effecten in een laboratorium assay en dat is heel wat waard.

Bio-assays worden ook gebruikt om risico's van bekende stoffen te bepalen, die je dan zelf aan schoon sediment hebt toevoegd. Door de uitkomsten van bio-assays voor verschillende stoffen of organismen met elkaar te vergelijken, kun je achterhalen of de ene stof giftiger is dan de andere, of dat het ene organisme gevoeliger is dan het andere. Cruciale basis-informatie in de risico-beoordeling van stoffen. Door die gevoeligheden van een aantal belangrijke soorten voor een stof vervolgens op volgorde te zetten, bijvoorbeeld in een *Species Sensitivity Distribution* (SSD) kun je bepalen bij welke concentratie een bepaald percentage van de soorten nog overleeft. Omdat stoffen buiten in mengsels voorkomen, zijn er inventieve manieren gevonden om hun effecten bij elkaar op te tellen. Zo worden veilige normen voor sediment afgeleid die het ecosysteem beschermen. Een 'bottom-up' benadering dus; van stof naar organisme, vervolgens naar mengsels van stoffen en tenslotte een 'ecologische dimensie' door een percentage van soorten te beschermen.

Maar ook hier wil ik de beperkingen noemen. De laboratorium-assay blijft de basis van het hele bouwwerk. De omstandigheden in het laboratorium zijn heel anders dan in het veld. Sediment wordt vaak voorbehandeld of er wordt met 'standaard sediment' gewerkt, waardoor de blootstelling anders is. In het lab werk je vaak met standaard organismen die in het veld soms niet eens voorkomen<sup>3</sup>. Ze zijn 'schoon', dat wil zeggen, komen uit een kweek zonder verontreinigingen, terwijl ze in het veld juist vaak enigszins gewend zijn aan de verontreiniging. In het veld heb je factoren, zoals variaties in habitat- en voedselkwaliteit en aanwezigheid van predatoren, waar een organisme ook zeer gevoelig voor is. Sommige organismen hebben bij weinig of slecht voedsel aanmerkelijk meer last van een verontreiniging dan wanneer de voedselkwaliteit hoog is<sup>4</sup>. Organismen die een natuurlijke vijand alleen al ruiken groeien vaak slechter of gaan zelfs dood. Stress door een toxische stof komt daar dan nog eens boven op. Tot hier spreek ik over de directe effecten op een organisme, maar indirecte effecten in het voedselweb kunnen vervolgens extra effecten opleveren; zowel negatieve als positieve. Een organisme dat het zodoende wat slechter doet kan een probleem opleveren in ecosysteem A, maar hoeft dat helemaal niet te doen in ecosysteem B. Of het functioneren van een ecosysteem te lijden heeft door verontreiniging heeft voor een belangrijk deel met interacties in het

voedselweb te maken en die kun je niet afleiden uit laboratorium-proeven met enkelvoudige soorten. Water, sediment en organismen, gedragen zich in het lab dus heel anders dan buiten in het veld. Een SSD kan dus aangeven welk percentage soorten het zou redden onder die lab condities, wanneer die soorten onderling geen interacties zouden hebben, nog niet eerder een verontreiniging hebben gezien, en constante vaak optimale habitat kenmerken zouden hebben. Er zijn dus weinig redenen om aan te nemen dat de standaard laboratorium-assays tot accurate inschattingen van effecten in het veld kunnen leiden. Voor alle duidelijkheid, gebruikers van assays beogen dat vaak ook niet. Assays zijn uiterst nuttig (zelfs onvervangbaar) in het onderzoek, en voor screening van soorten en stoffen, en van sediment-of water monsters. Maar grenswaarden voor werkelijke effecten in het ecosysteem of grenswaarden voor afwezigheid van effecten zijn er erg lastig uit af te leiden.

#### *Werkelijke effecten in het veld*

Naast het meten van stoffen, en het uitvoeren van bio-assays wordt vaak veldonderzoek uitgevoerd om de werkelijke effecten van verontreinigingen te achterhalen. Je neemt een monster van het sediment en telt hoeveel soorten en hoeveel individuen per soort er in voorkomen. Als je ziet dat een erg verontreinigde locatie bepaalde soorten niet heeft, die op veel schonere locaties doorgaans wel voorkomen dan heb je een goede aanwijzing dat die verontreiniging dat effect veroorzaakte<sup>5</sup>. En ook hier twee vaak genoemde valkuilen. Ten eerste het idee dat wat je aan het tellen bent de situatie van dat moment is, en dat de stof die een tik op dat ecosysteem heeft uitgedeeld zelf allang weer weg zou kunnen zijn bijvoorbeeld door afbraak. Kun je de chemische en biologische informatie van hetzelfde monsternamen moment wel oorzakelijk met elkaar in verband brengen? Ik denk dat dit probleem bij verontreinigd sediment niet zo serieus is. In sediment vinden we vooral de persistente organische verbindingen en de conservatieve zware metalen. Hun concentratie in de toplaag van het sediment zal doorgaans niet of hooguit enkele procenten per jaar variëren. Met andere woorden: wat je nu meet is is een behoorlijk goed beeld van de feitelijke blootstelling, tot minimaal een jaar terug. De levenscycli van sedimentbewoners zijn veel korter zodat zij een min of meer constante blootstelling zullen zien. De tweede valkuil is dat wat je aan het tellen bent ook bepaald wordt door niet-chemische stressoren, zoals voedselkwaliteit, stroomsnelheid, zuurstofgehalte en nog veel meer van dat soort omgevingskarakteristieken. Hier is maar 1 antwoord op: die factoren zul je moeten meenemen.

#### *Modelecosysteem-experimenten*

SEDNET<sup>1</sup> suggereert dat de link tussen resultaten van bio-assays en waargenomen effecten in het veld gedicht kan worden met modelecosysteem-experimenten (Figuur 1). In het lab of in het veld wordt een ecosysteem nagemaakt op kleine schaal. Zo laat je indirecte effecten toe in het systeem dat je onderzoekt. Je maakt een aantal van die systemen en repliceert ze slim, zodat je systematisch de effecten van behandelingen kunt onderzoeken. Je kunt van alles variëren en netjes statistisch toetsen. Voor afgebakende vragen en geselecteerde stoffen en organismen werkt dit uitmuntend. Er is veel inzicht verkregen in de rol van indirecte effecten van toxische stoffen op het voedselweb, bijvoorbeeld voor niet al te complexe mengsels van bestrijdingsmiddelen, die vooral in de waterfase voorkomen en acute effecten

hebben<sup>6</sup>. Maar de ambitie was om ook voor sedimentgebonden verontreinigingen de causale link naar veld-realisme te maken. Wil je de echt realistische mengsels van bestrijdingsmiddelen, geneesmiddelen, zware metalen en hydrofobe stoffen in samenhang met de relevante ecologische factoren benaderen, dan wordt het bijzonder moeilijk. Het chemisch gedrag is zo ingewikkeld dat het volledig vatten van alleen al de blootstelling een bijzonder grote en vaak stofspecifieke meetinspanning vereist. Hoe meet je het allemaal in 1 of enkele kubieke meters zonder sediment of organismen daar voor te offeren? Dat mag namelijk niet omdat je dan het systeem verstoort. Zo'n experiment zou de complexiteit van het veld al dusdanig benaderen, dat het voordeel snel slinkt. En ook al zouden die praktische bezwaren wegvallen, dan nog benaderen ze niet de condities van het veld. De laboratorium cosm of de proefsloot heeft een andere schaal, heeft andere ecologische interacties, andere seizoensvariaties, en vaak onvoldoende draagkracht voor hogere organismen zoals vissen. Het zijn vaak karikaturen van de ecosystemen waar ze model voor staan. Tenslotte, modelecosysteem-experimenten leveren geen goede vertaling voor de eerder genoemde onnatuurlijke blootstelling in laboratorium bio-assays.

#### *Van veld-patronen naar mechanistisch inzicht*

Met andere woorden: er zitten veel onzekerheden in de causale keten tussen het complexe mengsel van chemische stoffen in sediment, en het ecologisch relevante eindpunt, bijvoorbeeld de natuurlijke samenstelling van de levensgemeenschap in het sediment of een bepaalde ecologische functie. Laboratorium -assays en op die assays gebaseerde SSDs zijn voor dit doel een omweg omdat ze niet de informatie geven die je zoekt. Modellecosystemen bieden onvoldoende mogelijkheden om de gewenste complexiteit te herbergen. Ik pleit daarom voor een 'top down' benadering bij de risico schatting van stoffen. Een benadering waarbij alleen veld informatie gebruikt wordt. De causale keten begint bij de chemische stoffen. Zij kunnen gemeten worden. Voor de belangrijkste stofgroepen zijn milde extractietechnieken ontwikkeld die alleen de stoffen meenemen die 'los' zitten en bij de organismen kunnen komen. Hier liggen geen controverses met betrekking tot juistheid of veldrelevantie. Het ligt voor de hand om deze stressoren vervolgens direct in verband te brengen met informatie over de levensgemeenschap. Doe vervolgens recht aan het feit dat niet alleen de verontreinigingen effect kunnen hebben, maar beschouw 'stressoren' als zodanig, dus inclusief andere abiotische factoren zoals voedselkwaliteit, macrochemie en andere relevante habitatkenmerken. Dit levert een variant van Figuur 1 (→ Figuur 2) waarin (a) de cirkels voor chemische metingen en veld inventarisaties rechtstreeks overlappen, en (b) de cirkel voor chemische metingen is veralgemeniseerd tot 'stress factoren', waaronder de eventuele toxische chemische stoffen. De vraag is nu hoe die stressoren zo direct mogelijk in verband te brengen met gegevens over de structuur van de levensgemeenschap. Daar zijn denk ik drie goede methoden voor: (a) deterministische modellen, (b) artificial intelligence technieken (zoals case based reasoning) en (c) statistische technieken.

#### *Deterministische modellen*

**(a)** Deterministische modellen, in essentie sets van wiskundige formules. Is je systeem complex, dan stop je er meer formules in. De grote meerwaarde is dat je volledig mechanistisch kunt nagaan wat de oorzakelijke verbanden zijn. Voor zware metalen zijn steeds betere voorspellingen te doen van de blootstelling van organismen in sediment door verfijning van speciatie- en opname modellen zoals

WHAM en Biotic Ligand Modellen (BLM). DiToro publiceerde enkele maanden geleden een interessante koppeling tussen de met mild zuur geëxtraheerde sulfides en zware metalen (AVS/SEM<sup>1</sup>) procedure en een Biotic Ligand Model benadering<sup>7</sup>. Ook voor organische stoffen worden begrip van processen en verfijning van modellen die biologische beschikbaarheid in sediment beschrijven steeds beter<sup>8</sup>. Maar alleen die blootstelling al is complex. Vervolgens moet die blootstelling doorvertaald worden naar effecten op individueel niveau van soorten, naar populaties, levensgemeenschappen en tenslotte naar ecosystemen. Daar aangekomen komt de terugkoppeling van de biologische processen naar de stofstromen in beeld. Op dit systeem-niveau beïnvloeden biologische en chemische processen elkaar, en is de scheiding tussen die processen, die wij ze door onze toevallige opleiding geneigd zijn op te leggen, feitelijk heel kunstmatig. Wil je dit modelleren dan zul je geochemische en ecologische modellen moeten integreren. Modellen als AQUATOX en sommige CATS-achtige modellen van het RIVM begeven zich op dit systeemniveau<sup>9</sup>. Fascinerende onderzoekinstrumenten om hypothesen op te baseren, om tegen-intuïtieve waarnemingen te kunnen verklaren en scenario-studies mee te kunnen doen. Maar de complexiteit is te groot. Onzekerheidsanalyse bij geochemische modellen is al niet erg niet gebruikelijk. Bij ecosysteemmodellen wordt het soms gedaan en is de berekende onzekerheid erg groot<sup>10</sup>. De ontwikkeling van een gegeven voedselweb over tijdschalen van jaren is al zeer lastig te modelleren<sup>11</sup>. Laat staan dat je effecten van een complex mengsel van stoffen kunt voorspellen. Wanneer wij dit ook allemaal zouden willen combineren kan er maar 1 conclusie zijn: dit is niet de goede weg voor deze link.

### *Artificial Intelligence*

**(b)** Een tweede en naar mijn mening kansrijkere mogelijkheid is gebruik van Artificial Intelligence technieken zoals bijvoorbeeld Case Based Reasoning<sup>12</sup>. U kent deze techniek heel goed want u gebruikt hem dagelijks. Ik leg hem als volgt uit. Stel u gaat naar de huisarts met 4 klachten. Die arts hoort ze aan, vraagt wat door, mijmert wat en komt binnen een paar minuten met een advies. De huisarts gaat niet eerst zitten rekenen. Hij of zij vergelijkt het verhaal met parate kennis over symptomen van mogelijke kwalen, maar even belangrijk; met heel vergelijkbare verhalen van mensen die recentelijk op spreekuur kwamen. De ervaring dus. Die mensen werden doorgaans na een week weer fietsend in het dorp gezien, en niet weer op het spreekuur. Conclusie, de diagnose klopte. Dit kan ook met effecten van stoffen. Er is heel veel literatuur over laboratorium proeven waarbij effecten van stoffen op model-ecosystemen zijn geïnventariseerd. Ook zijn er veel monitoring gegevens over de samenstelling van levensgemeenschappen in schone en vervuilde sedimenten. Vul nu een database met concentraties en chemische eigenschappen van al die stoffen, en koppel daar de waargenomen biologische informatie aan<sup>5</sup>. Het idee is ook hier dat bij een nieuwe situatie vergelijkbare effecten zullen optreden. Vervolgens bereken je niet wat de effecten zullen zijn, maar laat je in de database uitzoeken welke gevallen vergelijkbaar zijn, en vervolgens wordt daar een gemiddelde respons uit berekend die daarna als voorspelling wordt gepresenteerd. De database moet wel goed gevuld worden, natuurlijk, maar je hoeft geen aannames te doen over de causaliteit en over de juistheid van ingewikkelde kwantitatieve beschrijvingen. Het aantrekkelijke hiervan is dus dat het gegeven die eenvoud toch zo goed werkt.

---

<sup>1</sup> Acid Volatile Sulphide (AVS) / Simultaneously Extracted Metals (SEM)



### *Multivariate statistiek*

(c) Een derde heel bruikbare methode om de correlaties tussen stressoren en ecosysteem-effecten vast te stellen, is multivariate statistiek. Een tamelijk recente variant kan je vertellen hoeveel procent van de biologische variatie door elk van de genoemde stressfactoren verklaard wordt, dus inclusief de toxische stoffen en niet-toxische stressoren zoals ze in de aquatische ecologie onderscheiden worden. Alles wat niet verklaard kan worden, of wat niet goed te onderscheiden is van een verwante stressor, komt als zodanig uit de analyse en is dus zichtbaar. Doet er een stof of factor mee die je niet hebt gemeten, dan komt die veilig in de onverklaarde variantie. Het enige wat er uit komt is de correlatie die er ondubbelzinnig wel toe doet. Een kanttekening die men zou kunnen maken is de kwestie van de causaliteit. Een correlatie in deze zin zou niets bewijzen. Daar wil ik het volgende over zeggen. Zo'n correlatie is even robuust als de correlaties waar in het laboratorium de spectrofotometer mee wordt geijkt of een dosis-effect curve wordt vastgesteld. In het lab worden co-factoren uitgeschakeld door ze a-priori niet in het experiment te betrekken. In een analyse als deze worden co-factoren uitgeschakeld door ze a priori hun eigen, onafhankelijke correlatie te gunnen, of door gecorreleerde variabelen gezamenlijk mee te nemen in de analyse. Als een op deze wijze uit de multivariate data gefilterde, resterende univariante correlatie, laat zien dat een bepaalde soort significant minder voorkomt op sites met hogere cadmium concentraties, resten ons twee vragen: (1) wat veroorzaakt wat: is het cadmium giftig voor die organismen, of worden de organismen omgezet in cadmium, en (2) zijn er andere mechanismen dan toxiciteit, bijvoorbeeld een indirect effect wat de correlatie kan verklaren. Als we zien dat die soort in afzonderlijke labproeven tot de gevoeligste voor cadmium behoort is de twijfel met betrekking tot vraag 1 en 2 al snel minder. Ook als we zien dat de relaties steeds ongeveer hetzelfde zijn in verschillende ecotopen. Maar we kunnen ook zeggen dat vraag 2 eigenlijk niet relevant is: immers de afhankelijkheid van abundantie in relatie tot cadmium concentratie *dient* onderzocht te worden in de omgeving waar ook de andere processen spelen<sup>13</sup>. Dat is tenslotte ook de setting waar je de relatie voor wilt kennen, vanuit het oogpunt van risico schatting. Van deze laatste statistische methode wil ik u wat resultaten laten zien.

### *De hamvraag: Hebben stoffen effect?*

Gefinancierd door NWO en de ministeries van LNV, VROM en V&W heeft in Nederland vanaf 1999 een groot onderzoekprogramma plaatsgevonden; het Stimuleringsprogramma Systeemgericht Ecotoxicologisch Onderzoek. Daarnaast zijn verwante onderzoekprogramma's geïnitieerd door het RIZA en door TNO, in alle drie de gevallen geïnspireerd op de problematiek van de 'diffuse deken' van verontreinigingen, met name zware metalen, in het Nederlandse rivierengebied. Relevant vanwege de beleidsplannen 'Ruimte voor de rivier', en de Europese Kaderrichtlijn water. In al deze onderzoeken is de laatstgenoemde statistische methode toegepast om het relatieve aandeel van chemische vervuiling in de verklaring van de samenstelling van de aquatische levensgemeenschap te kwantificeren. Het blijkt dat er duidelijke aanwijzingen zijn dat toxische stoffen beperkend zijn voor de biodiversiteit en voor de abundantie van organismen. De percentages zoals ze uit de analyse komen zijn voor drie verschillende riviergebieden in Nederland:  $13.2 \pm 1.5$  % voor polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAKs) en  $14.1 \pm 1.2$  % ( $n=3$ ) voor zware metalen<sup>14</sup>. Als je bedenkt dat dit om hele verschillende gebieden gaat dan is dat toch opmerkelijk constant. Als

je alle verontreinigingen bij elkaar neemt, blijkt dat zo'n 30% van de variatie in de levensgemeenschap door chemische verontreinigingen wordt bepaald, zo'n 15% door de meer gebruikelijke ecologische factoren, zo'n 20% door factoren waar de statistische techniek de chemische verontreinigingen niet van de ecologische factoren kan scheiden, en zo'n 35% blijft onverklaard, dat wil zeggen correleert met geen van de factoren die aan de analyse zijn meegegeven. Die 30% door 'chemische verontreinigingen' is een groot percentage en blijkt alleen boven water te komen wanneer correcties op de data worden uitgevoerd die zorgen dat ze zo veel mogelijk zeggen over de biologisch beschikbare concentraties. Dat geeft aan hoe ecologisch relevant dat soort correcties zijn<sup>4</sup>. In dezelfde studie is ook gekeken naar de correlaties met resultaten uit drie bioassays. Ik wil hier niet teveel op details ingaan, maar als we de chemische stoffen als maat voor chemische stress vervangen door 'bioassay resultaten' als maat voor chemische stress, dan blijkt maar 5-10% van de variatie te verklaren, en stijgt het percentage onverklaarde variatie naar 40 – 70%. Dit suggereert dat chemische concentraties, mits gecorrigeerd voor biologische beschikbaarheid, veel betere voorspellers van effecten in het veld kunnen zijn, dan een aantal standaard bio-assays. De eerder genoemde nadelen van die laboratorium bio-assays zijn zeer vermoedelijk de verklaring voor het gebrek aan correlatie.

Ik besteed veel woorden aan deze methode omdat het gebruik van multivariate technieken bij veldgegevens naar mijn mening onderschat wordt. Het is de enige manier om vast te stellen of in het veld biodiversiteit en abundantie van soorten wordt aangetast. Een andere reden dat ik het bespreek is de vaststelling DAT er kennelijk invloeden van chemische stoffen zijn in het Nederlandse rivierengebied, en dat deze zo serieus zijn. Ik wil deze vaststelling van die effecten nadrukkelijk plaatsen naast een aantal andere belangrijke methoden die resultaten hebben opgeleverd die in dezelfde richting wijzen. Het op verontreinigde locaties vinden van kopafwijkingen bij muggelarven is zo'n resultaat<sup>15</sup>. Uit recent onderzoek is ook gebleken dat niet alleen diversiteit en abundantie, maar ook de productie en de groei van sedimentbewonende organismen in het veld geremd is door verontreinigingen<sup>16</sup>.

#### *Normen voor sediment*

Hiermee weten we dus dat er effecten zijn. De hamvraag is beantwoord. Hoe weten we nu wat veilige normen voor verontreinigd sediment zijn? Bijvoorbeeld: bij welke concentratie van een stof verwachten we net *geen* effect, of verwachten we net *wel* effecten op het aquatisch ecosysteem. Wat je daar voor nodig hebt is informatie over het verband tussen de concentratie van een stof in het sediment, en het effect van die stof. Ik sprak al over de beperkingen van laboratorium bio-assays bij het vaststellen van dergelijke veilige grenzen voor concentraties van stoffen onder veldomstandigheden. Nu hebben we echter ook de veld-gegevens uit die eerder genoemde onderzoeken. Zij kunnen ons dergelijke verbanden leveren onder natuurlijke veldomstandigheden. Het zou bijzonder interessant en wenselijk zijn om daar kwaliteitscriteria voor sediment uit af te leiden en die te vergelijken met de huidige sedimentkwaliteitscriteria in Nederland en Europa. Je zou kunnen verdedigen dat de veldrelevantie van zulke nieuwe criteria groter is. Dat SSDs uit veldgegevens kunnen worden afgeleid blijkt uit recent werk van collega-onderzoekers Leung *et al*<sup>13</sup>. Zij koppelden gegevens over 25 chemische stoffen en 2200 soorten (diversiteit en abundantie), op 4200 locaties langs de Noorse kust en leidden daar veld-gebaseerde

Species Sensitivity Distributions voor marien sediment uit af. Voor cadmium en PAKs werden concentraties uitgerekend, waarbij net geen, en waarbij net wel effect zou moeten optreden. Die concentraties werden vergeleken met internationale kwaliteitscriteria die uit laboratorium gegevens werden afgeleid. Daaruit bleek dat die laatste over het algemeen te weinig beschermend waren. Dat zegt natuurlijk helemaal niets over Nederlands zoetwater sediment, maar laat wel zien hoe verassend de uitkomsten kunnen zijn. Een reden te meer om zo'n analyse ook eens voor Nederlandse sedimenten uit te voeren.

### **Zijn sommige risico's kleiner dan gedacht?**

Zware metalen, PAKs, PCBs, gebromeerde vlamvertragers, chloorbenzenen, geneesmiddelen, het sediment en het water in Nederland zit er vol mee. Ik wil nog wat nader in gaan op de beperkte biologische beschikbaarheid van organische stoffen in sediment. Deels als erfenis uit het verleden (PCBs), deels door verkeer en industrie (PAKs) en deels door belasting vanuit de rioolwaterzuiveringsinstallaties (geneesmiddelen) zijn deze stoffen in het milieu terecht gekomen. Aan de basis van de genoemde oorzaak effect keten staat 'de chemische stof' die wellicht een schadelijke blootstelling kan opleveren voor het milieu, biota en dus ook de mens. U heeft misschien gelezen in de krant dat Nederland ook voor wat betreft de luchtkwaliteit, er niet zo florissant bij staat. De overheid is op dit moment bezig met roetfilters, overweegt hogere parkeertarieven voor auto's die wat meer vervuiling veroorzaken, en overweegt om de maximum snelheid op de snelwegen te beperken tot 80 kilometer per uur. Dit zijn belangrijke maatregelen die er hopelijk toe zullen leiden dat de luchtkwaliteit verbetert. Een teveel aan kleine deeltjes in de lucht is schadelijk voor de volksgezondheid. Ze kunnen uiteindelijk, en bij te hoge concentraties, gezondheidsproblemen veroorzaken. Een belangrijk deel van die deeltjes is roet, afkomstig van verbrandingsprocessen van benzine of diesel, maar ook van bosbranden en de barbecue. Kijken we naar de kaart van Europa dan is Nederland één van de 'zwartste' gebieden, en ligt Wageningen precies in het midden. Die gezondheidseffecten zijn goed gedocumenteerd en ook de negatieve effecten van roet op het klimaat hebben recentelijk veel aandacht gekregen. In hogere lagen van de atmosfeer helpen roetdeeltjes om bepaalde vervelende chemische reacties sneller te laten verlopen. Roetdeeltjes in de atmosfeer absorberen zonnestraling in plaats van het te reflecteren en dragen zo bij aan de opwarming van de aarde. Ook roetdeeltjes op sneeuw en ijs verminderen de reflectie van zonlicht en dragen zo bij aan diezelfde opwarming. Het moge duidelijk zijn, we moeten met roet niet al te blij zijn<sup>17</sup>. Omdat West-Europa dichtbevolkt en geïndustrialiseerd is, zal de uitstoot van roet nooit echt tot nul teruggedrongen kunnen worden. Net zoals in het verleden zullen die deeltjes aanwezig zijn en zich, zij het misschien in lagere hoeveelheden, blijven afzetten op land- en wateroppervlakken.

Ik zeg u dit, omdat die deeltjes ook invloed hebben op de water- en sedimentkwaliteit. Dat zal dan ook wel negatief zijn, zult u wellicht denken, maar dat is nu eens niet het geval. Recent onderzoek van met name Gustafsson & Cornelissen<sup>8</sup> in Stockholm, en Chiel Jonker<sup>18</sup> in onze groep, heeft laten zien dat roetdeeltjes zoals die zich in sediment bevinden, zich een beetje als Norit<sup>®</sup> gedragen. Er blijft veel aan

plakken, ook juist die organische stoffen die risico's met zich mee brengen, bijvoorbeeld door een giftige werking of door de neiging tot ophoping in de voedselketen. Om die reden worden Norit-achtige deeltjes, die dus qua adsorberend vermogen behoorlijk op roet deeltjes lijken, ook gebruikt voor de zuivering van drinkwater. Ongewenste verontreinigingen worden zo uit het water verwijderd. De medaille heeft dus twee kanten: in de lucht schadelijk, maar in allerlei technologieën en in het aquatisch milieu bindt het stoffen, en vermindert het dus vermoedelijk het risico.

Ik spreek over roet of Norit, maar in feite gaat het om een wat moeilijk definieerbare verzameling van deeltjes, die als kenmerk heeft dat die deeltjes een groot oppervlak hebben en dat ze voornamelijk uit koolstof bestaan. Roet, kool, steenkool, maar ook kerogeen, een afbraak product van planten, behoren tot de groep die we in sedimenten tegen kunnen komen en die allemaal een hoog bindend vermogen voor verontreinigingen hebben. Daarnaast zit er ook 'gewoon' organisch materiaal in sediment: humus genaamd, in feite een soort compost zoals u dat ook in de tuin heeft liggen, maar dan wat fijner verdeeld. Dat die humus de belangrijkste rol speelt bij het vasthouden van giftige stoffen wisten we al sinds de jaren 70 van de vorige eeuw. Pas recentelijk realiseren we ons in de milieuwetenschappen dat 'roetdeeltjes' meer dan een handje helpen bij het vasthouden van stoffen. In het lab kun je meten hoe hard stoffen aan die roetdeeltjes binden. Dan blijkt dat die binding al gauw 100 tot 1000 keer zo sterk is als die aan humus<sup>8,17,18</sup>. Door die veel sterkere binding heb je eigenlijk maar een klein beetje roet in sediment nodig om die humus weg te concurreren.

U kunt zich voorstellen dat als je veel schadelijke stoffen in het sediment hebt, de hoeveelheid in het water daarboven ook hoog zal zijn. Dat zijn die 'communicerende vaten'. Stel nu dat je een sediment hebt met veel roet, dan houdt dat roet de stoffen extra goed vast en komt er eigenlijk veel minder in het water. We zijn dus gaan inzien dat bij een bepaalde hoeveelheid verontreiniging in het sediment, een hoeveelheid in het water hoort, die veel lager is dan we eerst dachten. Dat is prettig voor aquatische organismen, want die leven in dat water. Dit zou belangrijke implicaties kunnen hebben voor de normstelling. In Nederland zijn de normen voor veilig sediment namelijk afgeleid op basis van gegevens die alleen uitgaan van die normale humus. We hebben altijd aangenomen dat dat genoeg was, simpelweg omdat we niet wisten dat dat roet aanwezig was en die binding kon veroorzaken. Maar zou je in je berekening, behalve compost, ook dat beetje roet meenemen, dan zou je zien dat bij die zelfde norm-concentratie in het sediment, de bijbehorende concentratie in het water een stuk lager is. Met andere woorden je norm zou dan te veilig zijn. We moeten natuurlijk nooit te snel zijn met het wegdeneren van een risico, maar hier ligt op zijn minst een mogelijkheid om het risico voor aquatische organismen dat we van organische verontreinigingen kunnen verwachten, wat beter in te schatten. Wellicht is dat risico lager.

De vraag of roet in Nederlandse sedimenten het risico voor aquatische organismen zou kunnen beperken is een typische vraag voor een modelstudie. Je kunt een formule bedenken die het effect van de hoeveelheid roet op de hoeveelheid die in zo'n organisme komt, berekent. Dan moet je ook nog weten hoeveel roet er in Nederlands sediment zit. In het rivierengebied is dat zo'n 10% van de hoeveelheid

gewone organische stof. Het blijkt dan dat die 10% roet de hoeveelheid van de sedimentverontreiniging die in sedimentbewonende organismen komt een factor 10 tot 100 kan verlagen<sup>17,19</sup>.

Ruim 10 jaar geleden kwam er voor zware metalen een vergelijkbare hypothese<sup>7</sup>. Zware metalen zouden onder zuurstofloze condities, en die heb je vaak in sediment, neerslaan in de vorm van metaalsulfides. In die vorm zouden ze veel beperkter kunnen worden opgenomen door organismen. Een decennium van internationaal onderzoek heeft laten zien dat de betreffende meetmethode, aangeduid als de AVS/SEM methode, de afwezigheid van risico's in het veld en in het laboratorium goed kan voorspellen. Ook in het Nederlandse rivierengebied bleek met name de AVS/SEM meetmethode de beste verklaring op te leveren voor metaal-gerelateerde effecten op de levensgemeenschap in sediment<sup>20</sup>. Op dit moment wordt deze methode werkelijk opgenomen in de tweede-lijns risico-beoordeling van zink in sediment<sup>21</sup>. Ik noem dit als een voorbeeld van de manier waarop inzichten uit onderzoek uiteindelijk hun weg vinden in regelgeving en beleid. Ik mag alleen maar hopen dat het de eerder genoemde inzichten, zoals die met betrekking tot roet en traag desorberende fracties van organische micro-verontreinigingen, net zo zal vergaan.

## **Tenslotte**

Mijnheer de Rector, zeer gewaardeerde toehoorders. Samenhang tussen milieucompartimenten, tussen stoffen en biota en tussen disciplines; dat waren de thema's van deze rede. We weten behoorlijk veel, maar toch vooral hoe ingewikkeld natuurlijke ecosystemen zijn. Dat oorzaak en gevolg vaak lastig te onderscheiden zijn. Dat de blootstelling aan stoffen heel variabel is, en soms heel anders dan we dachten, zoals met die roetdeeltjes. Maar dat als we die blootstelling goed in rekening brengen, we effecten van sediment-gebonden verontreinigingen op de biodiversiteit kunnen aantonen. 'Bridging the gaps', dat is ook het thema van het Milieuchemie & Toxicologie SETAC congres dat in Mei 2006 in Den Haag georganiseerd wordt, en waar ik hoop dat veel nieuwe en spannende ontwikkelingen binnen dit wetenschapsgebied gepresenteerd zullen worden. Rest mij nog iets te zeggen over de samenhang tussen personen; ik wil graag afsluiten met een dankwoord.

In de eerste plaats dank ik de Raad van Bestuur en de leden van de Toetsingscommissie Persoonlijk Hoogleraren voor de gelegenheid die zij mij bieden om het onderwerp water- en sedimentkwaliteit, via dit hoogleraarschap, een stimulans te geven. Ik realiseer mij welk voorrecht mij hiermee geboden wordt, maar ik realiseer mij ook welke personen daartoe hebben bijgedragen in verschillende stadia van mijn loopbaan.

Zeergeleerde Hermens, beste Joop, destijds bij het RITOX aan de Biltstraat werd via de ontwikkeling van een lipofiliteits-afhankelijke extractie-techniek, de inspiratie voor de milieuchemie gewekt. Uit die inspiratie put ik nog steeds; ik ben je daar blijvend dankbaar voor.

Hooggeleerde Lijklema, beste Bert, en collega's van de voormalige secties waterkwaliteitsbeheer en aquatische ecologie. Het lab uit, het veld in. Van het molecuul, naar het aquatische systeem. Dat was voor deze chemicus even wennen, zeker, maar vooral ook zeer plezierig, en daar kan ik jullie niet genoeg voor bedanken.

Hooggeleerde Scheffer, beste Marten. Hartelijk dank voor de steun die jij altijd onvoorwaardelijk geeft. Vooral jij maakte het mogelijk dat deze hoogleraarspositie tot stand kwam. Ik zie uit naar blijvende samenwerking in de toekomst.

Edwin, Jeroen, Chiel, Corine, Ivo, Caroline, Anton, zeer gewaardeerde collega's & promovendi, in de diverse stadia van jullie promotie-traject. Wat was en is het leuk om met jullie samen te kunnen werken en wat dragen jullie veel bij aan het gezamenlijke succes van de groep. Ik mag mij daarmee gelukkig prijzen. Frits, eeuwige steun in het lab, en andere collega's van AEW, ik kan jullie niet allemaal noemen, maar dit geldt ook voor jullie. Veel dank en waardering is op zijn plaats.

Collega's bij andere instituten, commissies en projecten in binnen- en buitenland, Alterra, Rijkswaterstaat en TNO, maar ook de collega's bij de Wageningse leerstoelgroepen. Ik zie uit naar voortzetting van de plezierige samenwerking, in onderzoek, zowel als in het onderwijs.

Mijn ouders, die nog steeds het goede voorbeeld geven. Bedankt voor wat jullie voor mij doen en betekenen.

En dan degenen waar ik verreweg het meest van leer. De drie musketiers. Jongens, met wat een vanzelfsprekendheid, energie en humor ontdekken jullie de wereld. Lieve Bernadette, zonder jou had ik hier niet gestaan. Aan jou draag ik deze rede op.

Dames en heren, ik dank u voor uw aandacht,

Ik heb gezegd.

## Referenties

---

- <sup>1</sup> Salomons, W. and Brils, J. (Eds). 2004. Contaminated sediments in European River Basins
- <sup>2</sup> Chapman, P.M., B. Anderson, S. Carr, V. Engle, R. Green, J. Hameedi, M. Harmon, P. Haverland, J. Hyland, C. Ingersoll, E. Long, J. Rodgers Jr, M. Salazar, P.K. Sibley and H. Windom. 1997. General guidelines for using the sediment quality Triad. *Mar. Pollut. Bull.*, 34: 368-372.
- <sup>3</sup> Calow, P., V.E. Forbes. 2003. Does ecotoxicology inform ecological risk assessment? *Environ. Sci. Technol.* 147A-151A.
- <sup>4</sup> Van Straalen, N.M. 2003. Ecotoxicology becomes stress ecology. *Environ. Sci. Technol.* 325A-330A
- <sup>5</sup> Van den Brink, P.J., D.J. Baird, E.T.H.M. Peeters. 2005. Technical review of the potential use of benthic macroinvertebrate biomonitoring, using the reference condition approach in the setting, monitoring and assessment of agri-environmental performance standards. Alterra report 1207, ISSN 1566-7197.
- <sup>6</sup> Brock, T.C.M., Lahr J., Van den Brink P.J. 2000. Ecological risks of pesticides in freshwater ecosystems. Part 1: Herbicides. Alterra Green World Research, Wageningen The Netherlands
- <sup>7</sup> DiToro, D.M., J.A. McGrath, D.J. Hansen, W.J. Berry, P.R. Paquin, R. Mathew, K.B. Wu, R.C. Santore. 2005. Predicting sediment metal toxicity using a sediment biotic ligand model: Methodology and initial application. *Environ. Toxicol. Chem.* 24, 2410-2427.
- <sup>8</sup> Cornelissen G., Ö. Gustafsson, T.D. Bucheli, M.T.O. Jonker, A.A. Koelmans and P.C.M. van Noort. 2005. Critical Review. Extensive Sorption of Organic Compounds to Black Carbon, Coal, and Kerogen in Sediments and Soils: Mechanisms and Consequences for Distribution, Bioaccumulation and Biodegradation. *Environ. Sci. Technol.* 39, 6881-6895.
- <sup>9</sup> Koelmans A.A., A. Van der Heijde, L. Knijff and R.H. Aalderink. 2001. Modelling feedbacks between Eutrophication and Organic Contaminant Fate & Effects in Aquatic Ecosystems. A Review. *Water Research*, 35: 3517-3536.
- <sup>10</sup> Scheffer, M. and J. Beets. 1994. Ecological models and the pitfalls of causality. *Hydrobiologia*, 276, 115-124.
- <sup>11</sup> Van Nes, E.H. and M. Scheffer. A strategy to improve the contribution of complex simulation models. *Ecological Modeling*, 185: 153-164.
- <sup>12</sup> Van Den Brink, P.J., J. Roelsma, E.H. Van Nes, M. Scheffer and T.C.M. Brock. PERPEST model, A case-based reasoning approach to predict ecological risks of pesticides. *Environ. Toxicol. Chem.* 21, 1500-2506.
- <sup>13</sup> Leung, K.M.Y., A. Bjørgesæter, J.S. Gray, W.K. Li, G.S.C. Lui, Y. Wang, P.K.S. Lam. 2005. Deriving Sediment Quality Guidelines from field-based species sensitivity distributions. *Environ. Sci. Technol.* 39, 5148-5156.
- <sup>14</sup> Peeters E.T.H.M., A. Dewitte, A.A. Koelmans, J.A. van der Velden and P.J. den Besten. 2001. Evaluation of the potential of bioassays versus contaminant concentrations in explaining the in situ macroinvertebrate community structure in the Rhine-Meuse Delta. *Environ. Toxicol. Chem.* 20, 2883-2889.
- <sup>15</sup> De Haas, E.M. 2004. Persistence of benthic invertebrates in polluted sediments. Thesis, University of Amsterdam.
- <sup>16</sup> De Lange H.J., J. De Jonge, E.T.H.M. Peeters. 2005. Draagkracht in het rivierengebied voor vogels en vissen. Productie van macrofauna in relatie tot sedimentverontreiniging en voedsel. AKWA Rapport 05.004.
- <sup>17</sup> Koelmans A.A., M.T.O. Jonker, G. Cornelissen, T.D. Bucheli, P.C.M. Van Noort and Ö. Gustafsson. Black Carbon: The Reverse of its Dark Side. *Chemosphere*, *In press*.
- <sup>18</sup> Jonker M.T.O. and A.A. Koelmans. 2002. Sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls to soot and soot-like materials in the aqueous environment. Mechanistic Considerations *Environ. Sci. Technol.* 36, 3725-3734.
- <sup>19</sup> Moermond C.T.A., J.J.G. Zwolsman and A.A. Koelmans. 2005. Black Carbon and Ecological Factors affect *in situ* biota sediment accumulation factors for hydrophobic organic compounds in flood plain lakes. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 3101-3109.
- <sup>20</sup> Van Griethuysen C., J. Van Baren, E.T.H.M. Peeters and A.A. Koelmans. 2004. Trace metal availability and effects on benthic community structure in flood plain lakes. *Environ. Toxicol. Chem.*, 23, 668-681.
- <sup>21</sup> Bodar, C.W.M., M.E.J. Pronk, D.T.H.M. Sijm. 2005. The European Union risk assessment on Zinc and Zinc compounds: The process and the facts. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1, 301-319.