

# MILIEUTECHNOLOGIE: SNELWEG NAAR EEN DUURZAME ONTWIKKELING

Door Prof.dr.ir. Wim Rulkens



WAGENINGEN UNIVERSITEIT

WAGENINGEN **UR**

Afscheidsrede uitgesproken op 29 november 2007  
in de Aula van Wageningen Universiteit



# **Milieutechnologie: snelweg naar een duurzame ontwikkeling**

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

## **1. Inleiding**

De titel van mijn inaugurele rede, 18 jaar geleden uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van Hoogleraar in de Milieutechnologie aan deze universiteit luidde: “Milieu en technologie: een schijnbare tegenstelling”. Deze titel suggereerde dat er mogelijk een tegenstrijdigheid zou bestaan tussen enerzijds het milieu en anderzijds de technologische ontwikkeling en dat milieu en technologie in principe niet harmonieus samen kunnen gaan. De inspiratiebron van mijn inaugurele rede was, naast mijn ervaring met milieutechnologie bij TNO, in feite mijn opleiding als chemisch technoloog/procestechnoloog aan de Technische Universiteit Eindhoven. Een opleiding die leidde tot het besef dat technologie niet is weg te denken bij de ontwikkeling naar een duurzame maatschappij met meer welzijn en welvaart. Met die positieve benadering van de technologie ben ik mijn taak hier aan deze Universiteit begonnen. Nu, 18 jaar later, sta ik weer voor u en kijk terug naar wat er inmiddels is bereikt, hoever we zijn en waar we naar toe gaan.

Het vertrouwen en optimisme in de technologie en in het bijzonder de milieutechnologie is in die periode niet alleen gebleven, maar ook versterkt. Versterkt in die zin dat het nu algemeen aanvaard is dat de oplossing voor de wereldwijde klimaat- en milieuproblematiek voor een zeer belangrijk deel zal moeten komen van de technologie. Daarbij moet ik er direct aan toevoegen en ik heb dat ook gedaan bij het uitspreken van mijn inaugurele rede, dat technologieont-

wikkeling en toepassing door de mens wordt gestuurd. In feite is technologie alleen maar een hulpmiddel. De mens vervult hierbij een centrale rol.

U zult nu waarschijnlijk beter de titel van mijn afscheidsrede kunnen begrijpen: “Milieutechnologie: snelweg naar een duurzame ontwikkeling”. Wat de titel uitstraalt, althans wat ik heb beoogd dat die zou moeten uitstralen, is een groot optimisme over de rol van milieutechnologie. In feite zou de eerste reactie daarbij kunnen zijn dat we op dit moment genoeg milieutechnologie in huis hebben om bijna alle milieuproblemen op te kunnen lossen. Milieutechnologie kan in principe snel en overal worden ingezet. Maar er zijn, evenals bij het rijden op een autosnelweg, allerlei obstakels. Voor milieutechnologie veelal van niet-technologische aard. En dat geldt vooral voor ontwikkelingslanden en landen in economische transitie. Op de eerste plaats zijn dit natuurlijk de kosten. Kosten zijn vaak nog te hoog om de technologie overal toe te kunnen passen. Maar naast gebrek aan financiën zijn er ook nog andere niet-technologische belemmeringen. Genoemd kunnen worden het gebrek aan milieubeleid en benodigde expertise om een milieutechnologie operationeel te kunnen maken, gebrek aan acceptatie van een milieutechnologie en het ontbreken van een afzetmarkt voor waardevolle producten die voortkomen uit een milieutechnologische bewerking. We moeten ook beseffen dat de variatie in milieuproblematiek, de middelen en de noodzakelijke randvoorwaarden om deze problematiek technologisch te kunnen oplossen, wereldwijd zeer verschillend zijn. Terugkomend op mijn eerdere stellingname – we beschikken over genoeg milieutechnologie - moet ik eigenlijk toch onmiddellijk antwoorden met: nee. Er is, mede gezien de variatie in milieuproblematiek en de beschikbaarheid van financiële middelen om deze problematiek op te lossen, een

grote behoefte aan milieutechnologieën die goedkoper en efficiënter en meer op de lokale of regionale behoefte toegesneden is. Dus maakt u zich niet ongerust, er ligt nog een geweldige uitdaging voor u. En dat brengt me bij het Farewell symposium van vandaag met als titel: “Environmental Technology: Changing Challenges in a Changing World”. Dit is niet alleen kenmerkend voor de milieutechnologie maar ook voor vele andere daaraan verwante technologieën. De behoefte aan technologie verandert voortdurend evenals de technologie zelf.

Er valt, terugkijkend op de ontwikkeling van de milieutechnologie in de afgelopen twintig jaar, natuurlijk veel te vertellen. Het korte tijdsbestek van deze afscheidsrede noodzaakt mij tot het maken van een selectie. Ik wil me daarbij beperken tot de volgende onderwerpen:

- Ik ben als technoloog opgeleid en ben ook mijn hele leven als technoloog blijven denken en werken. Door die bril wil ik nogmaals stil staan bij de milieutechnologie.
- Vervolgens wil ik ingaan op de ontwikkelingen van de milieutechnologie binnen de Sectie Milieutechnologie. De Sectie waaraan ik met veel plezier gedurende een lange periode leiding heb mogen geven.
- Daarnaast zal ik ook stil staan bij de ontwikkelingen zoals die wereldwijd hebben plaatsgevonden op het gebied van de milieutechnologie en de betekenis hiervan. Met name ook voor ontwikkelingslanden. Dat zal meer in het algemeen en op een wat hoger abstractieniveau plaats vinden.
- Dit is een afscheidsrede, waarbij ik vooral terugkijk naar de ontwikkelingen in de afgelopen periode. Maar van het verleden leert men. Een korte focus op de toekomst, voor

een belangrijk deel geïntegreerd in de eerder genoemde onderwerpen, zal dus niet mogen ontbreken.

- Ik zal ook kort aandacht schenken aan de onderwijsontwikkelingen die hebben plaatsgevonden binnen de Sectie Milieutechnologie.
- En tenslotte zal ik afsluiten. Aan alles komt per slot van rekening een einde!

## **2. Fundamentele aspecten van de milieutechnologie**

Redenerend vanuit een procestechnologische achtergrond liggen er een viertal basisprocessen aan de milieutechnologie ten grondslag. Deze basisprocessen zijn:

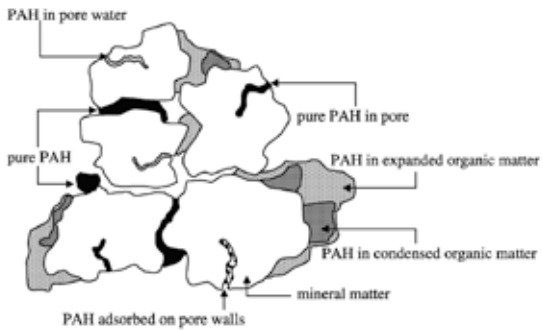
- Fasecontact- en fasescheidingsprocessen,
- Moleculaire overdrachts- en scheidingsprocessen,
- Chemische omzettingsprocessen, waaronder ook elektrochemische en thermische omzettingsprocessen,
- Microbiologische omzettingsprocessen.

In de procestechnologie worden deze basisprocessen gebruikt om productieprocessen te ontwerpen en te berekenen. In feite gebeurt dat ook in de milieutechnologie. Uitgangspunt daarbij is dat milieuproblemen worden veroorzaakt door afvalstromen. Een afvalstroom moet daarbij breed worden gezien: afvalwater, vervuilde lucht en afgassen, vervuilde bodems en sedimenten en vloeibare en vaste afvalstoffen. Het gemeenschappelijke kenmerk van een dergelijke afvalstroom is de aanwezigheid van stoffen, verontreinigingen, die een bedreiging vormen of kunnen vormen voor het milieu of de menselijke gezondheid. Dit hoeven niet altijd toxische stoffen te zijn zoals zware metalen, gechloreerde oplosmiddelen of bestrijdingsmiddelen. Ook de aanwezigheid van verbindingen die van nature in ecosystemen aanwezig kunnen zijn, zoals fosfaten en nitraten, kan er de oorzaak van zijn dat de

betreffende afvalstroom een bedreiging is voor het milieu. Dit is met name het geval indien de hoeveelheden van dergelijke componenten in de afvalstroom zo groot zijn dat deze niet meer via natuurlijke kringloopprocessen kunnen worden omgezet of verwijderd. Denk daarbij bijvoorbeeld aan dierlijke drijfmest. Lag in de beginfase van de milieutechnologie de nadruk vooral op de milieuverontreinigingen, geleidelijk aan is ook het energieaspect en het terugwinnen van waardevolle grondstoffen voor hergebruik een integraal onderdeel van de milieutechnologie gaan uitmaken.

Het doel van de milieutechnologie is nu, om gebruik makend van de eerder genoemde basisprocessen, behandelingsprocessen te ontwerpen die tegen aanvaardbare kosten op voldoende grote schaal in de praktijk kunnen worden toegepast. Een compleet behandelingsproces bestaat in het algemeen uit meerdere chemische en/of microbiologische omzettingprocessen die in combinatie met fasecontact- en fasescheidingsprocessen op een logische wijze aan elkaar gekoppeld zijn. Als zodanig lijken dergelijke procesroutes op die welke in de procesindustrie worden toegepast. Indien we te maken hebben met afvalwaterstromen laten deze zich meestal goed beschrijven en modelleren. Gecompliceerder is het ontwerp, het modelleren en de optimalisatie van processen voor de behandeling van vervuilde grond en sedimenten. De reden hiervoor is dat dergelijke afvalstromen in het algemeen zeer inhomogeen van samenstelling zijn. Dat geldt niet alleen voor de bulk van de afvalstroom maar ook voor de verontreinigingen. Deze kunnen in zeer veel fysisch/chemische hoedanigheden aanwezig zijn: als separate deeltjes bestaande uit pure verontreiniging, geadsorbeerd aan schone bodem- en sedimentdeeltjes, geabsorbeerd in het bulkmateriaal of opgelost in een vloeistoffase. In de navolgende figuur

(Figuur 1) is een schets gegeven van een vervuild sedimentdeeltje, eigenlijk een vervuild agglomeraat bestaande uit water en vast organisch en anorganisch materiaal waarin of waartussen de verontreinigingen, in dit geval polycyclische aromatische koolwaterstoffen, zich bevinden.



*Figuur 1.*

De figuur spreekt in feite voor zichzelf. En het zal duidelijk zijn dat voor een afvalstroom, bestaande uit dergelijke agglomeraten, het vaak moeilijk is om een behandelingsproces te ontwerpen, te berekenen en te optimaliseren. Zeer vaak zal moeten worden volstaan met een benadering op basis van een zeer gesimplificeerd model van de werkelijkheid. De uitkomst van een dergelijk model moet daarbij met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd. Een verdere verfijning is soms mogelijk, maar vereist een zeer grote databank van fundamentele gegevens. Gegevens, die uit experimenteel onderzoek zullen moeten worden verkregen. Een zeer tijdrovende zaak. En dat brengt onmiddellijk de vraag naar voren in hoeverre modellering van processen kan helpen bij het ontwerpen en verbeteren van milieutechnologische processen en systemen. Ik kom daar later nog op terug.



Het moge ook duidelijk zijn dat een succesvol basisprincipe voor afscheiding of omzetting van een verontreiniging, aanwezig in een afvalstroom, dat gedemonstreerd is op laboratoriumschaal, nog lang geen milieutechnologie is en dat de kosten van de toepassing van een dergelijk succesvol basisprincipe vaak worden bepaald door de noodzakelijke voor- en nabehandelingsschappen.

### **3. Ontwikkeling van de milieutechnologie binnen de Sectie Milieutechnologie**

Bij mijn benoeming in 1989 trof ik een vakgroep (Vakgroep Waterzuivering) aan die reeds een sterke positie had op het gebied van de biologische zuivering van afvalwater, waarbij anaerobe zuivering, onder leiding van Gatze Lettinga, stikstofverwijdering, Bram Klapwijk was daar de pionier, en fosfaatverwijdering, waarvan wijlen Henk Rensink de trekker was, de belangrijkste aandachtsgebieden waren. Deze lijnen werden voortgezet. Op het gebied van de anaerobe zuivering heeft de vakgroep wereldfaam verworven, blijkend uit de Shell-prijs en de Tyler-prijs die Gatze Lettinga heeft ontvangen voor zijn baanbrekend werk.

Met mijn komst in 1989 werd de focus van de vakgroep verbreed tot milieutechnologie en werd ook meer aandacht besteed aan fysisch/chemische processen en combinaties van microbiologische en fysisch/chemische processen. Tevens werd aandacht besteed aan processen waarmee vervuilde grond en sedimenten kunnen worden gereinigd. Wat betreft de ontwikkeling van specifieke fysisch/chemische technologieën, waaraan ik zelf actief heb kunnen bijdragen en waar-

mee we ook doorbraken hebben verkregen, kunnen worden genoemd:

- Geavanceerde oxidatietechnieken zoals toepassing van ozon, waterstofperoxide, UV, katalysatoren en combinaties hiervan. Primair gericht op de verwijdering van opgeloste toxische organische verontreinigingen uit een afvalwaterstroom. Ik ben er trots op dat een van mijn eerste promovendi op dit gebied, Dr. Jian Chen, met de bij ons opgedane kennis een zeer succesvolle onderneming heeft gestart in China. Het verheugt ons dat wij Dr. Jian Chen als een van onze keynote speakers vandaag op ons symposium konden beluisteren.
- Innovatieve flotatietechnieken voor het scheiden van de vervuilde deeltjes uit een grondfractie bestaande uit schone en vervuilde kleine deeltjes. Promotie-onderzoek van Huib Mulleneers.
- Extractieprocessen op basis van organische solvents waarmee organische verontreinigingen zoals PCB's, PAK's en pesticiden uit vervuilde sedimenten kunnen worden verwijderd. Promotieonderzoek van Erna Noordkamp.
- Selectieve precipitatieprocessen voor behandeling van grondwater vervuild met een mengsel van zware metalen. Reiniging van het grondwater tot ppb niveau in combinatie met de scheiding van de verschillende zware metalen blijkt hiermee mogelijk te zijn.
- Toepassing van membranen voor zuivering van afvalwater en het terugwinnen van waardevolle componenten ten behoeve van hergebruik.

Daarnaast kan ook nog de ontwikkeling worden genoemd van processen waarbij aquatische wormen worden toegepast om zuiveringsslib, een afvalproduct dat vrijkomt bij de zuivering van stedelijk afvalwater, te behandelen.

Ook het modelleren van milieutechnologische processen heeft een belangrijke rol gespeeld. In dat verband zou ik willen noemen:

- Gedrag van toxische verbindingen bij de zuivering van stedelijk afvalwater. Promotieonderzoek van Hardy Temmink.
- Gedrag van stikstofverbindingen bij de zuivering van stedelijk afvalwater. Promotieonderzoek van Katarzyna Kujawa.
- Rijping van baggerspecie in een landfarm. Promotieonderzoek van Johan Vermeulen.
- Composteren van mest en ander organische afvalstromen. Promotieonderzoek van Adrie Veeken, Bert Hamelers en Dale Rudrum.
- Reactorsystemen voor selectieve oxidatie van verontreinigingen in een afvalwaterstroom. Promotieonderzoek van Marc Boncz.
- Transport, biobeschikbaarheid en afbraak van verontreinigingen in vervuilde bodems en sedimenten. Biobeschikbaarheid is een maat voor de hoeveelheid verontreiniging die via transport in het vervuilde bodemdeeltje uiteindelijk vrij komt in de omringende waterfase. De mate van biobeschikbaarheid kan van belang zijn voor verspreiding van de verontreiniging met het grondwater en voor de mogelijkheid tot microbiologische reiniging van vervuilde grond en sediment. Promotieonderzoek van Eric Mulder en Joop Harmsen.

Op twee van deze processen zal ik direct nog terugkomen.

Een gebied, waaraan we als sectie Milieutechnologie van oudsher ook veel aandacht hebben geschonken, is de toepassing van milieutechnologie in ontwikkelingslanden. Eerst vanuit de invalshoek anaerobe zuivering en hergebruik in

het kader van energiewinning, sanitatie en irrigatiedoeleinden. Gatzte Lettinga was hier de pionier, waarbij ik ook de bijdrage van Look Hulshoff Pol, Grietje Zeeman en Joost van Buuren wil noemen. Met de benoeming van Jules van Lier als hoogleraar is dit gebied verder uitgebreid.

Het adequaat toepassen van milieutechnologie in ontwikkelingslanden is in feite de voorwaarde om tot een duurzame ontwikkeling, welzijn en welvaart in die landen te komen. Samenwerking tussen zogenaamde bèta leerstoelgroepen en gamma leerstoelgroepen kan daarbij zeer vruchtbaar zijn en is vaak zelfs een essentiële voorwaarde om tot succes te komen. Ik wil een aantal onderwerpen noemen waarbij ik zelf als promotor betrokken ben of ben geweest:

- Duurzame ontwikkeling van de Tapioca industrie in Vietnam. Tezamen met Tuur Mol van de leerstoelgroep Milieubeleid. Tran Thi My Dieu is hierop gepromoveerd.
- Duurzame ontwikkeling van de Palmolie-industrie in Thailand. Tezamen met Tuur Mol. Orathai Chavalparit is hierop gepromoveerd. Ik kom hier later nog op terug.
- Duurzame ontwikkeling van de Textielindustrie in Vietnam. Eveneens tezamen met Tuur Mol.
- Ontwikkeling van een beslissingsmodel voor de juiste keuze van een verwerkingsproces voor stedelijk afval in Ho Chi Minh City, Vietnam. Tezamen met Jaques van der Vorst van de leerstoelgroep Operationele Research en Logistiek.
- Ontwikkeling van een methode om op huishoudniveau arseen te verwijderen uit vervuild grondwater, gericht op de productie van drinkwater. Tezamen met Anke Niehof van de leerstoelgroep Sociologie van Consumenten en Huishoudens.

Kenmerkend voor deze projecten is in het algemeen de breedte van het onderwerp en het sterk op toepassing

gerichte karakter. Innovatie, althans innovatie in puur technologische zin, speelt een minder grote rol. Innovatie moet hierbij vooral gezocht worden in de keuze van de juiste technologie of combinatie van technologieën, de aanpassing van deze technologie aan de lokale of regionale omstandigheden, de integratie van procestechnologie en milieutechnologie, en de betrokkenheid van relevante stakeholders. Zonder dit laatste is de implementatie van milieutechnologie gedoemd te mislukken.

Met het bovenstaande hebt u een kort overzicht gekregen van milieutechnologieën waar we ons in de afgelopen periode mee hebben bezig gehouden en waar ik zelf direct bij betrokken ben geweest. Het is een opsomming, die overigens niet compleet is. Het is ondoenlijk om elk onderwerp meer in detail te behandelen. Maar, ik heb u al verteld, mijn roots liggen in de procestechnologie. Een drietal onderwerpen wil ik daarom toch ook wat meer vanuit een procesmatige, fysisch/chemisch technologische invalshoek bespreken.

Het eerste onderzoek, dat ik wat meer in detail zou willen toelichten, is de selectieve oxidatie van toxische organische verbindingen in afvalwater. Zuivering van afvalwaterstromen die relatief hoge concentraties aan organische verontreinigingen bevatten, vindt in de praktijk vaak plaats met behulp van aerobe en anaerobe biologische processen, waarbij in het algemeen gekozen wordt voor een combinatie van anaerobe zuivering gevolgd door een aerobe nazuivering. Niet alle typen afvalwater kunnen echter op deze manier behandeld worden. Biologische waterzuiveringsprocessen zijn vaak kwetsbaar door de aanwezigheid van toxische organische verontreinigingen. Deze zijn vaak zelf niet biologisch afbreekbaar maar verhinderen vaak wel de afbraak van de

biologisch gemakkelijk afbreekbare verbindingen. Om deze afvalwaterstromen geschikt te maken voor biologische zuivering zullen eerst adequate voorbehandelingstechnieken, gericht op het reduceren van de concentratie van dergelijke toxische verbindingen, moeten worden toegepast. Een van de in aanmerking komende processen is oxidatie van toxische organische verbindingen met ozon. Een nadeel van ozonisatie is echter dat ozon ook de niet-toxische organische verontreinigingen oxideert. Bovendien vindt er altijd een spontane ontleding van ozon plaats. Om de kosten van ozon zoveel mogelijk te reduceren (ozon is duur!) is het gewenst om de reactor, waarin het oxidatieproces plaats vindt, zodanig in te richten dat ozon zo efficiënt mogelijk, dus in dit geval zo selectief mogelijk, wordt benut. Modelleren van de technologie is daarbij een aantrekkelijk hulpmiddel. Dit zou ik kort willen toelichten.

Stel dat de afvalwaterstroom een toxische component A bevat in een lage concentratie en een niet-toxische component B in hoge concentratie. We hebben nu te maken met drie reacties:

- Oxidatie van component A tot product  $P_A$ , schematisch weergegeven door de vergelijking:



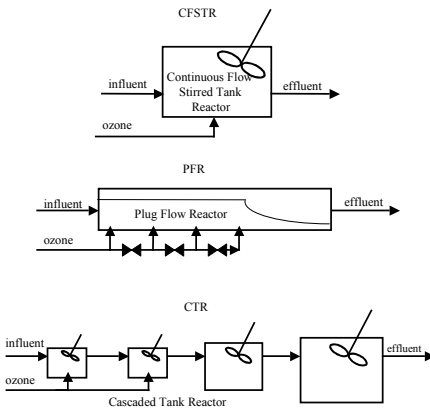
- Oxidatie van component B tot product  $P_B$ , schematisch weergegeven door de vergelijking:



- Ontleding (uit elkaar vallen van  $O_3$ ), weergegeven door de vergelijking:



In deze vergelijkingen stelt  $C$  de concentratie voor,  $k$  de reactiesnelheidsconstante,  $r$  de reactiesnelheid en zijn  $Z_A$   $Z_B$  (stoichiometrische) coëfficiënten. We kunnen nu verschillende reactortypen en reactorconfiguraties beschouwen: de continu doorstroomde geroerde tankreactor, de propstroomreactor en de cascade tank reactor. In Figuur 2 zijn deze drie typen reactoren weergegeven.

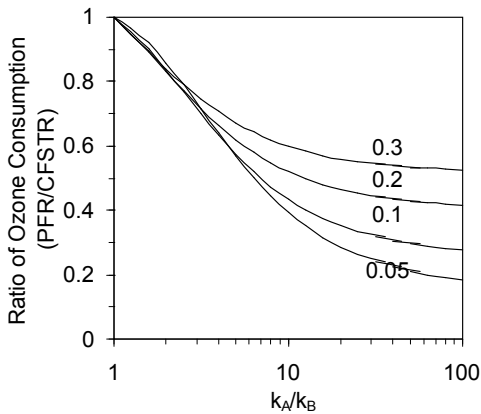


*Figuur 2*

Een andere variabele, met name bij de propstroomreactor en de cascade tankreactor, is de plaats waar ozon wordt toegevoegd. Randvoorwaarde bij elk reactorsysteem is dat de verhouding van de concentratie aan de toxische component A in de uitgaande en de ingaande afvalwaterstroom gedaald is tot een bepaalde waarde. De vraag is nu, welk systeem optimaal is voor wat betreft het efficiënt gebruik van ozon en op welke wijze dit afhangt van de relevante procesparameters, waaronder ook de plaats van de ozondosering. Met behulp van

massabalansen en reactiesnelheidsvergelijkingen kunnen we dit nu vaststellen.

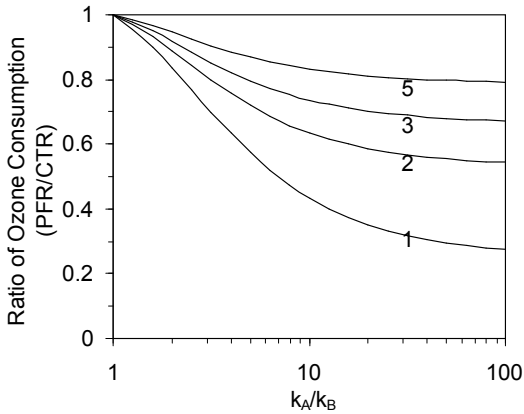
In Figuur 3 is de verhouding van de ozonconsumptie in een propstroomreactor en in een geroerde tankreactor weergegeven als functie van de verhouding van de reactiesnelheidsconstante van de toxische component A,  $k_A$ , en die van de niet-toxische component B,  $k_B$ . Parameter is de verhouding van de concentratie van de toxische component in de uitgaande en de ingaande waterstroom. De figuur toont duidelijk aan dat de propstroomreactor gunstiger is, hetgeen voor de gekozen procescondities en procesparameters overigens ook te verwachten viel.



*Figuur 3*

Figuur 4 geeft de relatieve ozonconsumptie weer als functie van de verhouding van de snelheidsconstanten  $k_A$  en  $k_B$  met als parameter het aantal tanks in de cascade tank reactor.





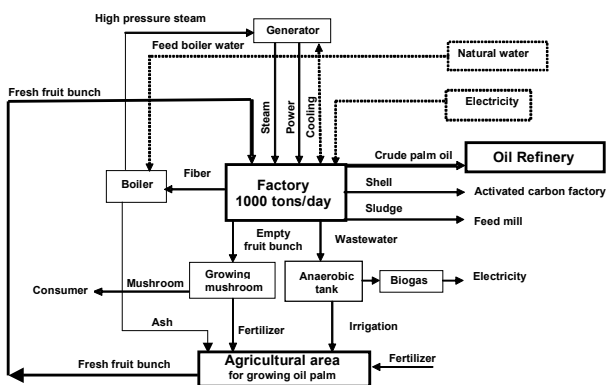
*Figuur 4*

Wat we hier dus zien is dat een redelijk precieze berekening van de verschillende reactorsystemen mogelijk is en resultaten oplevert die onderling kunnen worden vergeleken en die uiteindelijk gebruikt kunnen worden om het beste reactorstelsel en de toe te passen procescondities te identificeren. Uitbreiding en verbetering van het model is mogelijk door ook de versnelde overdracht van ozon naar de waterfase als gevolg van de chemische reactie in beschouwing te nemen.

Het tweede onderzoek waar ik iets over wil zeggen, is de toepassing van duurzame technologie in de palmolie-industrie in Thailand. Het betreft hier een promotieonderzoek dat begeleid werd door de sectie Milieutechnologie en de leerstoelgroep Milieubeleid. Orathai Chavalparit is in 2006 op dit onderwerp gepromoveerd.

De (ruwe) palmolie-industrie speelt een belangrijke rol in de economische ontwikkeling van Thailand. Naast de duidelijke

economische en maatschappelijke betekenis van deze industrietaak kleven er echter ook nadelen aan. Het betreft hier een aantal milieuproblemen zoals productie van afvalwater, vast afval, stank en het gebruik van energie. In principe zijn deze milieuproblemen echter volledig oplosbaar of te voorkómen. Dit is gebleken uit een nadere analyse van een aantal karakteristieke palmoliebedrijven. Daarbij is zowel het eigenlijke productieproces zelf bestudeerd alsmede de afvalstromen die normaliter bij dit productieproces ontstaan. Uit deze analyse en een nadere studie van de technologische mogelijkheden tot verbetering blijkt dat middels de toepassing van schone technologie, gebaseerd op hergebruik, recycling en productie van duurzame energie, een bedrijfsvoering te realiseren is, die geen afvalstromen produceert en nagenoeg geen milieuproblemen meer veroorzaakt. Dit alles tegen acceptabele kosten. Schematisch is een dergelijk duurzaam productieproces van palmolie weergegeven in Figuur 5. Ik zal hier verder geen toelichting op geven.



*Figuur 5*

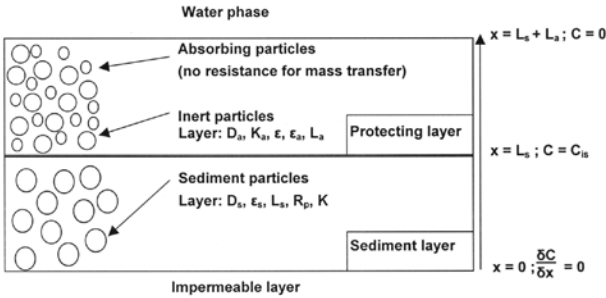
De palmolietros kan in feite volledig op een duurzame manier nuttig worden gebruikt. Daarbij zijn er zelfs meerdere opties mogelijk, waarvan ik er enkele wil noemen:

- Winning van biogas uit het afvalwater van de palmolieproductie. Dit biogas kan worden gebruikt in boilers of in gasturbines voor elektriciteitsproductie. De elektriciteit kan ook verkocht worden aan de beheerder van het elektriciteitsnet. Het gezuiverde palmolieproductiewater is bruikbaar als irrigatiewater en het sediment uit bezinkvijvers voor de nazuivering van het afvalwater kan worden gebruikt als bodemverbeteraar in de oliepalmlantages.
- Bij de productie van ruwe palmolie uit de palmolietrossen ontstaat een aantal vaste celluloseachtige reststoffen: palmnotendoppen, lege palmnoottrossen, vezels. Voor al deze producten kunnen nuttige bestemmingen worden gevonden. Palmnotendoppen zijn zeer geschikt voor de productie van actieve kool. Lege palmnoottrossen kunnen effectief worden hergebruikt als voedingsbodem voor champignonproductie en vervolgens als bemesting in de oliepalmlantages. Vezels kunnen worden gebruikt voor briketproductie. Andere producten die kunnen worden gemaakt uit deze afvalstromen zijn ruw basismateriaal voor de pulp- en papierfabricage en grondstof voor compostbereiding.

Vanuit een procestechnologisch oogpunt beschouwd is een duurzame palmolie-industrie zeer wel haalbaar met technologie die in feite nu al gewoon beschikbaar is. Technologische hoogstandjes behoeven daarvoor niet te worden uitgevoerd. Wel is een complete integrale benadering nodig, inclusief de oliepalmlantages. Eigenlijk zijn de belangrijkste knelpunten om tot realisatie van een dergelijke benadering te komen van niet-technologische

aard. Ook daar is in het onderzoek veel aandacht aan besteed. Aangegeven is hoe deze belemmeringen zouden kunnen worden weggenomen. Door de Thaise overheid wordt momenteel nagegaan hoe de resultaten van dit onderzoek kunnen worden geïmplementeerd.

En tenslotte wil ik ook nog een voorbeeld geven van een proces dat technologisch moeilijk te beschrijven is, maar waarbij modelleren toch een indicatie kan geven hoe dit proces te ontwerpen en toe te passen is. Het gaat daarbij om sedimentlagen, waterbodems, die vervuild zijn met polycyclische aromaten (PAKs) of een ander type verontreiniging. Baggeren en daarna reinigingen van het sediment is om kostentechnische redenen vaak niet haalbaar. Management van een dergelijk probleem vindt dan ook vaak plaats op basis van het inschatten van toekomstige risico's voor mens en milieu. Als deze risico's te groot blijken te zijn, wordt gekeken of maatregelen mogelijk zijn om deze risico's te reduceren tot een aanvaardbaar niveau. Een van de mogelijkheden om de risico's van vervuilde sedimentlagen te reduceren is deze af te dekken met een beschermlaag bestaande uit granulair materiaal dat mechanisch op zijn plaats wordt gehouden. Dit granulair materiaal kan bestaan uit een zandlaag opgemengd met een kleine fractie koolstofdeeltjes of een ander absorbens. Mochten er vervuilende componenten uit de sedimentlaag diffunderen, dan kunnen deze verbindingen geadsorbeerd worden aan de kooldeeltjes in de beschermlaag. Schematisch is deze situatie weergegeven in Figuur 6.



*Figuur 6*

De dikte van de sedimentlaag is gegeven door  $L_s$ , de dikte van de beschermlaag door  $L_a$ . In beide lagen hebben we te maken met deeltjes die omringd zijn door een waterfase. In of aan de deeltjes in de sedimentlaag bevinden zich de verontreinigingen, in het algemeen in evenwicht met de waterfase tussen de deeltjes.

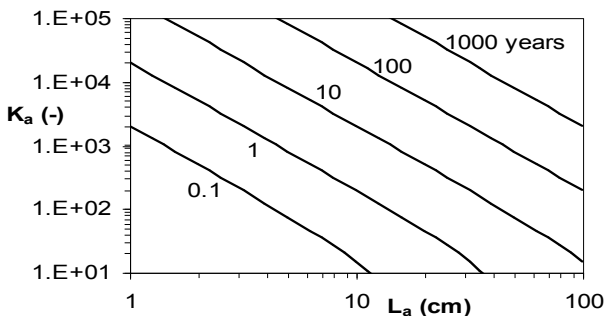
Transport van verontreinigingen in de sedimentlaag vindt plaats middels moleculaire diffusie, zowel in het deeltje als tussen de deeltjes. In het algemeen is de structuur van de sedimentlaag zeer inhomogeen. Dat geldt ook voor de concentratieverdeling van de verontreiniging die aanwezig is in de sedimentlaag. Een exacte numerieke berekening van het diffusietransport van verontreinigingen in de sedimentlaag vereist een groot aantal data die experimenteel moeten worden gemeten. Hetzelfde, maar dan in aanzienlijk mindere mate, geldt voor de beschermlaag die zich boven de sedimentlaag bevindt.

In principe kunnen we echter ook werken met effectieve diffusiecoëfficiënten en met evenwichtsconstanten. Voor de sedimentlaag moeten die gemeten worden. Voor de beschermende laag kan, op grond van de samenstelling van de laag

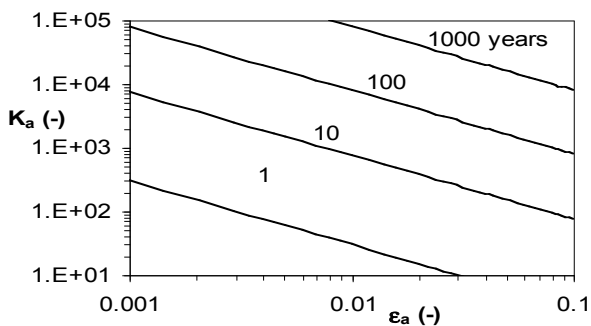
en de eigenschappen van het absorptiemiddel, een schatting van de effectieve diffusiecoëfficiënt worden gemaakt. Zijn deze effectieve diffusiecoëfficiënten en evenwichtsconstanten eenmaal bekend, dan kan het transport van de verontreiniging in sedimentlaag en beschermlaag worden berekend. Op deze manier kan worden vastgesteld wanneer er een doorslag van verontreinigingen naar het bovenstaande oppervlaktewater plaats zou kunnen vinden.

Vanuit de praktijk is de centrale vraag hoe dik de beschermlaag zou moeten zijn en hoeveel absorptiemateriaal de laag zou moeten bevatten om het bovenstaande oppervlaktewater in voldoende mate gedurende een bepaalde tijd te beschermen. Op basis van realistische aannames kan langs analytische weg deze vraag worden beantwoord, gebruikmakend van een analytisch diffusiemodel voor het transport van de verontreiniging. Een van de aannames daarbij is dat van een doorbraak van de verontreiniging sprake is als de flux van verontreinigingen aan het oppervlak van de beschermlaag bijvoorbeeld 1% is van de maximale flux door de beschermlaag. Die maximale flux wordt na een oneindig lange tijd bereikt.

Het elegante van het model is dat het simpel maar toch goed bruikbaar is om beschermlagen te ontwerpen. Het zal duidelijk zijn dat de beschermduur van de laag afhangt van de laagdikte  $L_a$ , van de volumefractie actieve kool in de laag  $\epsilon_a$ , alsmede van de absorptiecoëfficiënt  $K_a$  van dit absorbens. In Figuur 7 en Figuur 8 zijn de doorbraaktijden weergegeven, als functie van de laagdikte  $L_a$ , de absorptiecoëfficiënt  $K_a$  en de concentratie aan actieve kool  $\epsilon_a$ . Zo te zien een zeer bruikbare tool, verkregen op basis van een procestechnologische benadering.



Figuur 7



Figuur 8

Ik heb in dit overzicht geprobeerd u een indruk te geven van de breedte van het onderzoek op het gebied van de milieutechnologie waar we de afgelopen jaren mee bezig zijn geweest. Het gebied van de anaerobe zuivering van Gatzertinga heb ik daarbij buiten beschouwing moeten laten, evenals de nieuwe, sterk innovatieve onderzoeklijnen die Cees Buisman na zijn benoeming heeft geïntroduceerd bin-

nen de huidige Sectie Milieutechnologie. Onderzoeklijnen die o.a. gericht zijn op productie van duurzame energie uit water en afvalwaterstromen. Ook de werkgebieden van Jules van Lier en Albert Janssen, voortkomend uit het onderzoek van Gatze Lettinga, heb ik hier buiten beschouwing moeten laten.

De afgelopen jaren zijn we bezig geweest met een verdere integratie en combinatie van al deze werkgebieden. Dit heeft de samenwerking tussen de diverse werkgroepen van de Sectie Milieutechnologie sterk bevorderd maar ook die met andere leerstoelgroepen, niet alleen met de meer fundamenteel georiënteerde natuurwetenschappelijke leerstoelgroepen zoals Microbiologie en Fysische Chemie en Kolloïdkunde maar ook met de meer gamma georiënteerde leerstoelgroepen zoals Milieubeleid. Dit heeft de positie van onze Sectie Milieutechnologie versterkt, niet alleen binnen onze eigen universiteit maar ook nationaal en internationaal, waarbij ik zeer zeker ook de ontwikkelingslanden wil noemen en landen in economische transitie.

#### **4. Ontwikkeling van de milieutechnologie in breder perspectief**

Ik wil ook nog even stilstaan bij de algemene ontwikkelingen op het gebied van de milieutechnologie zoals die in Nederland en wereldwijd plaats hebben gevonden en plaatsvinden. De focus van de Sectie Milieutechnologie was in eerste instantie primair gericht op de ontwikkeling van processen die kunnen worden toegepast voor reiniging van afvalwater, vervuilde grondwater, vervuilde bodems en sedimenten, verontreinigde lucht en voor de verwerking van afvalstromen. In de benadering van de bestrijding van milieuverontreiniging is daarbij steeds meer nadruk komen te liggen op het aspect van



terugwinning van waardevolle componenten en energie. Dit aspect is in feite nu leidend geworden. En dat sluit naadloos aan bij de ontwikkelingen in de milieutechnologie zoals die ook wereldwijd worden geconstateerd. Daar wil ik nu wat nader op ingaan, waarbij ik tevens ook kort naar toekomstige ontwikkelingen wil kijken. Maar ook hier zal ik me moeten beperken tot enkele gebieden.

Ik wil beginnen met de hooggeïndustrialiseerde westerse landen. Wanneer we naar de industriële productieprocessen kijken, dan zien we de afgelopen jaren dat milieutechnologie en preventietechnologie in toenemende mate worden toegepast, niet alleen om emissies van milieuvervuiling te bestrijden maar ook om waardevolle componenten en energie weer terug te winnen voor hergebruik en zodoende de productiekosten te verlagen. Het is in het algemeen een geleidelijk verlopemd proces geweest, waarbij milieu- en preventietechnologie meer en meer geïntegreerd zijn in het eigenlijke productieproces. Een proces dat nog steeds voortduurt. Gemeten over een wat langer tijdsbestek zijn de resultaten met betrekking tot duurzaamheid spectaculair te noemen. Verdere verbeteringen zijn mogelijk door bewuster te selecteren op grondstoffen, bijvoorbeeld door afvalstoffen van derden te gebruiken als grondstoffen. Ook besparing op energiegebruik staat volop in de belangstelling. De huidige trend is ook sterk gericht op het produceren van producten die bij gebruik niet alleen minder energie en grondstoffen vereisen maar aan het einde van hun gebruiksperiode gemakkelijker weer kunnen worden hergebruikt als grondstof. Ecodesign in de brede betekenis van het woord is hierbij de benadering. Wat afvalwaterzuiveringstechnologie betreft moet worden geconstateerd dat er een groot scala aan fysisch/chemische maar ook aan biologische behandelings-

processen voorhanden is. Veel van deze processen kunnen ook worden ingezet om waardevolle componenten terug te winnen voor hergebruik of om energie te winnen, zoals bij anaerobe zuivering. Verbeteringen van deze processen en verdere optimalisatie is mogelijk maar dat zal waarschijnlijk toch in kleine stappen gaan. Omdat de focus bij waterzuivering meer en meer komt te liggen op hergebruik zal de rol van membraanprocessen en geavanceerde fysisch/chemische zuiveringsprocessen voor verwijdering van de laatste sporen toxische verontreinigingen steeds belangrijker worden. Daarnaast zullen naar verwachting ook nieuwe innovatieve technieken gebaseerd op elektrochemische, elektrofysische of microbiologische principes of processen die bij hoge temperaturen optimaal werken, worden ontwikkeld. Gezien het grote aantal beschikbare zuiveringsprocessen zal het steeds meer de kernvraag worden welke combinatie van fysisch/chemische en microbiologische processen voor een bepaald zuiveringsdoel de beste is. Waarbij de economie nagenoeg altijd de doorslag geeft.

Een specifiek milieuprobleem is het huishoudelijk en stedelijk afvalwater. Productie van dit water heeft een min of meer permanent karakter. De huidige zuiveringssystemen zijn gebaseerd op centrale zuivering. In de loop van de jaren is het zuiveringsproces geleidelijk aan verbeterd. Dit vond hoofdzakelijk plaats door het verbeteren van de bestaande zuiveringsstappen en het toevoegen van nieuwe zuiveringsstappen. Een verdere zuivering van het afvalwater zal in het kader van de Kader Richtlijn Water noodzakelijk zijn. Dat zal ook waarschijnlijk voornamelijk plaats vinden via toegevoegde technieken. In dat verband zijn membraanprocessen, geavanceerde deeltjesafscheidingsprocessen, geavanceerde oxidatieprocessen en ab- en adsorptieprocessen voorhan-

den. De vraag kan in dat verband worden gesteld of een geheel nieuwe benadering van het zuiveringsproces van stedelijk afvalwater, gericht op een sterke verbetering van de duurzaamheid, zou moeten plaatsvinden. De samenstelling van het afvalwater zou daarbij uitgangspunt moeten zijn. Wellicht dat dan hergebruik van het effluent, het efficiënt terugwinnen van waardevolle componenten, zoals fosfaat en ammoniak en een grotere mate van energiewinning uit de organische vervuiling, veel dichterbij komen te liggen. Bij de huidige zuivering van stedelijk afvalwater komt slib vrij, waarin naast organische en anorganische componenten en fosfaat, ook toxische componenten zijn geconcentreerd. Hergebruik van slib in de landbouw stuit in westerse landen steeds meer op weerstand. Dit is de reden dat de oplossing van het probleem zuiveringsslib meer en meer gezocht wordt in de productie van biogas uit slib en verbranding van zuiveringsslib in combinatie met energiewinning. Ook gebruik als brandstof en/of materiaalbron in kolencentrales en cementovens is een optie.

De huidige centrale zuiveringsprocessen voor stedelijk afvalwater hebben het grote nadeel dat deze huishoudelijk en stedelijk afvalwater behandelen dat zeer sterk verdund is. Daardoor is het zuiveringsproces minder efficiënt en is terugwinnen van waardevolle componenten vaak problematisch. Een oplossing voor dit probleem kan decentrale sanitatie zijn, waarbij het terugwinnen van waardevolle componenten wel een optie is die op korte termijn haalbaar wordt geacht. Ook aan dit systeem wordt bij de Sectie Milieutechnologie onderzoek verricht. Onderzoek waar wereldwijd veel belangstelling voor bestaat. Grietje Zeeman is de trekker van dit onderzoek. Mogelijk is het systeem minder geschikt voor toepassing in bestaande stedelijke gebieden. Maar daar, waar

sprake is van nieuwe bebouwing of van landelijke gebieden, zijn de potenties van dit systeem zeer groot. In dat verband kan met nadruk ook aan ontwikkelingslanden worden gedacht. De algemene schaarste aan schoon water heeft ook de belangstelling voor de reiniging van vervuild grondwater doen toenemen. In principe is er vanuit de industriële afvalwaterzuiveringswereld en de drinkwaterwereld voldoende technologie aanwezig om grondwater te reinigen. De focus zal hierbij liggen op de juiste combinatie van zuiveringstechnieken en de verdere optimalisatie van zuiveringsprocessen.

Behandeling van vervuilde lucht en afgassen startte enkele tientallen jaren geleden. De focus lag in het begin op de verwijdering van deeltjes en stof. Ook voor verwijdering van emissies van specifieke componenten zoals koolwaterstoffen en chloorkoolwaterstoffen en andere organische oplosmiddelen werden technologieën ontwikkeld, voor een belangrijk deel gericht op terugwinning van deze oplosmiddelen voor hergebruik. Voor de bestrijding van stankcomponenten, vrijkomend bij industriële en agrarische productieprocessen, werden biofilters en biowassers ontwikkeld. Voor de verwijdering van zwaveldioxide werden in eerste instantie fysische/chemische/thermische technieken ontwikkeld welke ook op grote schaal worden toegepast. Door de Sectie Milieutechnologie is, in samenwerking met het bedrijfsleven, een biologisch verwijderingsproces voor zwaveldioxide ontwikkeld, gericht op de productie van zwavel voor hergebruik. Succesvolle technologieën zijn momenteel ook beschikbaar en worden toegepast voor de verwijdering van stikstofoxides, dioxines en furanen. Deze laatste componenten ontstaan bij de verbranding van o.a. stedelijk afval.

Nederland is koploper voor wat betreft de verwerking van industrieel, huishoudelijk en stedelijk afval tot nuttige producten die weer kunnen worden hergebruikt. De aard van dit afval is zeer divers en varieert van metaalhoudend afval en anorganisch bouwafval enerzijds tot organisch afval anderzijds. Ook de variatie in hoeveelheid is zeer groot. Vergeleken met afvalwater en vervuilde lucht of afgassen, maar zelfs ook vergeleken met vervuilde grond en baggerspecie is het afval vaak zeer inhomogeen. Elk afval vraagt om een eigen specifieke verwerkingsmethode. Vaak zijn deze verwerkingsmethoden niet eenvoudig te ontwerpen of te berekenen maar moeten proefondervindelijk worden ontwikkeld.

Interessant is om de ontwikkeling van mestverwerkingstechnologie in Nederland te bekijken, met name van drijfmest. Oorspronkelijk was de gedachte dat het mestprobleem door vergisting zou kunnen worden opgelost. Toen dit niet het geval bleek te zijn, brak er een periode aan dat verwerking van mest in grootschalige mestverwerkingsfabrieken tot waardevolle producten, die geëxporteerd zouden kunnen worden als een nuttige meststof, in de belangstelling kwam te staan. Dit heeft geleid tot de bouw van enkele grootschalige mestverwerkingsfabrieken. Het bleek echter al gauw dat het financiële draagvlak voor het bouwen en bedrijven van grootschalige mestverwerkingsinstallaties ontbrak. Voor een belangrijk deel was dit het gevolg van de geringe opbrengst van de producten uit de mestverwerkingsfabriek. Wel is tijdens deze periode zeer veel technologische kennis opgebouwd. Na deze periode van de grootschalig verwerkingsinstallaties is men weer teruggekeerd naar de kleinschalige aanpak op boerderijschaal. Daarbij is ook al snel gekeken naar de integratie van mestverwerking, diervoeding, dierwelzijn en de productie van nuttige producten. Een succesvol pro-

ject, waaraan o.a. de Sectie Milieutechnologie, het toenmalige IMAG, en het bedrijfsleven hebben samengewerkt, was Hercules. Dit project heeft geleid tot het concept van de duurzame varkensstal. Kijkend naar de huidige mogelijkheden voor verwerking van mest en met name drijfmest, kan worden geconstateerd dat er een groot scala van technologieën beschikbaar is om mest op een duurzame manier te verwerken tot waardevolle producten voor hergebruik.

In feite een vrij recent milieuprobleem, waarvan we ons ca. 25 jaar geleden bewust werden, is het probleem van vervuilde grond en sedimenten. Ooit had Nederland de illusie om alle verontreinigde grond vóór het jaar 2000 schoon te maken. Dit leidde tot de start van de ontwikkeling van specifieke reinigingstechnologieën zoals thermische reiniging, grondwassing en microbiologische behandeling van vervuilde grond in bioreactoren. Echter, het werd spoedig duidelijk dat de omvang van het probleem veel groter was dan men oorspronkelijk dacht en dat de kosten van reiniging veel hoger waren dan oorspronkelijk begroot. Het bleek bovendien dat het technisch ook niet altijd mogelijk was om de grond te reinigen. Dit leidde tot een andere benadering van het probleem. Deze benadering ging primair uit van de vraag hoe het probleem van vervuilde grond zodanig te managen dat deze geen direct probleem meer vormde voor mens en ecosysteem. In-situ behandeling, behandeling zonder de grond af te graven, werd een nieuwe aanpak. Deze benadering leidde weliswaar tot een minder vergaande reiniging, maar was wel aanzienlijk goedkoper dan afgraven en vervolgens reinigen. Veel modificaties van in-situ reiniging zijn in de loop der jaren ontwikkeld, ook in combinatie met het natuurlijke afbraakpotentieel van de bodem voor vele typen verontreinigingen. Omdat transport van verontreini-

gingen in grond gebeurt via de grondwaterstroming, werd ook meer en meer aandacht besteed aan het verminderen van de mobiliteit van de verontreinigingen die aanwezig zijn in de grond en het grondwater.

In het algemeen wordt het probleem van de vervuilde grond nu aangepakt op basis van een risicobenadering, in combinatie met een nuttig gebruik van de vervuilde locatie. Er is nu veel meer aandacht voor geclusterde sanerings- en beheersmaatregelen voor lokale grondwater- en bodemverontreiniging. Ook is er meer aandacht voor een risico-analytische benadering voor gebieden die gekenmerkt worden door de aanwezigheid van meerdere verontreinigingsbronnen. Een tendens die overal in de hooggeïndustrialiseerde westerse wereld waarneembaar is.

Ook vervuilde sedimenten bleken een ernstig milieuprobleem te vormen. Verwijdering van sedimenten uit waterwegen kan noodzakelijk zijn vanwege nautische redenen, belemmering van de waterstroming of vanwege milieuhygiënische redenen. Ook voor de reiniging van sedimenten zijn vele technieken ontwikkeld. In dat verband kunnen fysische scheidingstechnieken, zoals flotatie, afbraak van verontreinigingen in bioreactoren, thermische behandelingsprocessen en landfarming in combinatie met rijpen worden genoemd. Veel van deze technieken zijn gerelateerd aan de technieken die ook voor vervuilde grond en grondfracties zijn ontwikkeld. Een karakteristiek aspect van verontreinigde baggerspecie is het feit dat de vervuiling in het algemeen gebonden is aan de kleine kleideeltjes en de organische fractie. De zandfractie is in het algemeen minder vervuild en kan na afscheiding nuttig worden toegepast. Deze benadering is momenteel een van de belangrijkste. Technisch is het mogelijk de kleifractie en organische fractie te reinigen met

behelp van een intensieve fysische, chemische of thermische behandeling maar deze methoden worden nauwelijks of niet toegepast vanwege de hoge kosten. Deze fractie wordt daarom meestal gestort op een gecontroleerde stortlocatie.

Met betrekking tot de toekomstige ontwikkeling en toepassing van behandelingstechnieken voor vervuilde grond, is de verwachting dat in-situ technieken voor sterk vervuilde grond (hot spots) een steeds belangrijkere rol gaan spelen. Veel van deze in-situ technieken zijn nog lang niet uitontwikkeld. Er is een groot potentieel voor verbetering aanwezig. Combinatie met een natuurlijke microbiologische na-reiniging is daarbij een reële praktische mogelijkheid. Verdere verbetering van reinigingsprocessen die voor afgegraven grond worden toegepast, is weliswaar mogelijk, maar zal waarschijnlijk toch niet spectaculair zijn. Voor vervuilde gronden en voor sedimenten die een hoog percentage aan zand bevatten, zal winning van de zandfractie voor hergebruik meer aandacht krijgen. Technieken hiervoor zijn in voldoende mate voorhanden. Omdat de aanpak van het probleem van vervuilde grond en sedimenten meer en meer gebaseerd is op een risicogeorïenteerde managementbenadering, is het kunnen beschikken over eenvoudige en betrouwbare methodes om de biobeschikbaarheid van verontreinigingen te bepalen een kernpunt. Verdere ontwikkelingen op dit gebied worden verwacht.

Bij de zuivering van afvalwater, verwerking van mest en verwerking van organische afvalstromen van biologische oorsprong wordt momenteel in toenemende mate aandacht besteed aan de productie van duurzame energie. Voor waterige afvalstromen is de productie van biogas of een andere vloeibare of gasvormige energiedrager een interessante optie



die steeds meer wordt toegepast. Daarnaast wordt steeds meer onderzoek gericht op de directe productie van elektriciteit uit deze afvalstromen. Overigens bieden al deze processen, indien ze worden toegepast, in het algemeen geen volledige oplossing voor het milieuprobleem dat moet worden opgelost. Aanvullende milieutechnologieën zijn nodig. Vaste of semi-vaste afvalstoffen van organische oorsprong kunnen ook worden omgezet in energie middels thermische processen zoals verbranden met energierugwinning, vergassen of pyrolyseren, of kunnen als energie- en grondstofbron worden toegepast in industriële productieprocessen, zoals cementovens en kolengestookte energiecentrales. Kennis en ervaring die wordt opgedaan met de winning van energie uit afvalstromen is zeer goed bruikbaar voor de winning van energie uit biomassa. Het omgekeerde is natuurlijk ook het geval.

Op het einde van deze paragraaf zou ik een aantal statements willen formuleren:

- De hooggeïndustrialiseerde westerse wereld heeft in principe voldoende milieutechnologie in huis om de milieuproblematiek adequaat te kunnen aanpakken, ook in ontwikkelingslanden en landen in economische transitie.
- Technologieontwikkeling staat niet stil. De uitdaging in de westerse wereld is de ontwikkeling van innovatieve milieutechnologieën die goedkoper en/of efficiënter zijn. In dat verband moet ook worden gedacht aan een intensievere integratie van milieutechnologie in industriële en agrarische productieprocessen.
- Wereldwijd gezien is het grootste milieuprobleem een te kort aan voldoende water van voldoende kwaliteit en het ontbreken van voldoende bronnen voor de productie van duurzame energie. Daar ligt dan ook de grootste uitdaging.

- Het onderscheid tussen milieutechnologie en procestech-  
nologie/ productietechnologie is sterk aan het vervagen  
en bestaat alleen nog duidelijk daar waar we te maken  
hebben met permanente afvalwaterstromen, afgasstro-  
men en vaste of vloeibare afvalstromen.

## **5. Toepassing van milieutechnologie in ontwikke- lingslanden en landen in economische transitie**

Veel ontwikkelingslanden maar vooral landen in economi-  
sche transitie worden momenteel geconfronteerd met een  
snelle industriële groei. Deze groei gaat in het algemeen  
gepaard met ernstige milieuproblemen. De oplossing voor  
deze problematiek vraagt op korte termijn om toepassing  
van adequate milieutechnologie. Er is een tendens om voor  
de oplossing van deze milieuproblematiek westerse milieu-  
technologie te gebruiken. Ook vanuit de hooggeïndustriali-  
seerde westerse landen is er de neiging om milieutechnolo-  
gie, waarmee in het Westen ervaring is opgedaan, als export-  
artikel in ontwikkelingslanden in te zetten. Echter, de tech-  
nologische, ecologische, economische, sociale en politieke  
context in ontwikkelingslanden en landen in economische  
transitie is vaak sterk verschillend van die in de geïndustriali-  
seerde landen. Een van deze verschillen is het groeipotentieel  
in ontwikkelingslanden, vooral in landen in economische  
transitie. Dit groeipotentieel is aanzienlijk hoger dan dat in  
de hooggeïndustrialiseerde westerse landen. De potentiële  
behoefte aan milieutechnologie is derhalve in deze landen  
veel groter dan in de westerse landen. Maar de nadruk in  
ontwikkelingslanden ligt op dit moment echter heel sterk  
op groei van de industriële productie en veel minder op de  
aanpak van de milieuproblematiek die deze groei met zich

meebrengt. Er is daarom ook minder aandacht voor een integratie van milieutechnologie in agrarische en industriële productieprocessen. De bewustwording dat deze integratie uiteindelijk ook leidt tot goedkopere productieprocessen is nog slechts in zeer beperkte mate aanwezig. De aanpak van de milieuproblematiek bij industriële productieprocessen vindt in ontwikkelingslanden en landen in economische transitie vaak pas plaats als de vervuiling al een ernstig probleem vormt voor mens en ecosysteem.

Evenals in de hooggeïndustrialiseerde landen worden ontwikkelingslanden, die zich in een fase van intensieve industrialisering bevinden, geconfronteerd met een aanzienlijke energieconsumptie die gepaard gaat met een hoge CO<sub>2</sub> emissie. Echter, gemiddeld per inwoner, ligt deze CO<sub>2</sub> emissie nog aanzienlijk lager dan die in de hooggeïndustrialiseerde westerse landen. Dit betekent dat de noodzaak voor energiebesparing en de reductie van CO<sub>2</sub> emissie veelal alleen als een economisch probleem wordt ervaren en niet als een milieuprobleem.

Het mag duidelijk zijn dat ook in ontwikkelingslanden de milieutechnologie kan bijdragen aan de winning van duurzame energie. Denk daarbij aan anaerobe afvalwaterzuivering, anaerobe compostering en aan het verbranden van afvalstoffen in combinatie met energiewinning. Maar denk ook aan het winnen van grondstoffen uit afvalstromen voor hergebruik. Dit kost vaak minder energie dan het ontsluiten van maagdelijke grondstoffen.

Milieubeleid, milieuwetgeving en handhaving staat in ontwikkelingslanden vaak nog in de kinderschoenen. Dit heeft tot gevolg dat normen voor milieu-emissies vaak onvoldoende streng zijn, soms ook onnodig streng en vaak aan continue verandering onderhevig zijn. Dit veroorzaakt

onzekerheden in de wijze van aanpak van milieuproblemen. Een milieutechnologisch probleem kan vaak op verschillende manieren worden opgelost. Welk systeem het beste is in termen van efficiency, kosten en duurzaamheid is vaak moeilijk aan te geven. Overigens zal dit keuzeprobleem in de toekomst alsmear groter worden. Gebrek aan kennis en expertise op het gebied van de milieutechnologie leidt er toe dat niet altijd de juiste technologische keuzes worden gemaakt bij de aanpak van een milieuprobleem. We moeten verder bedenken dat we in veel ontwikkelingslanden nog te maken hebben met lage arbeidskosten. Dit aspect bepaalt vaak niet alleen de keuze van het productieproces maar ook de keuze van de milieutechnologie.

Voor de aanpak van ernstige milieuproblemen in ontwikkelingslanden en landen in economische transitie zal met de karakteristieke verschillen tussen deze landen en de hooggeïndustrialiseerde westerse landen rekening moet worden gehouden. In aanmerking nemend de enorme omvang van de milieuproblematiek, zoals die momenteel wordt ervaren in deze landen, zal op korte termijn de voorkeur moeten worden gegeven aan milieutechnologieën die:

- In voldoende mate de bulk van de verontreiniging kunnen verwijderen.
- Slechts beperkte kennis en ervaring vereisen bij toepassing.
- Relatief goedkoop zijn.
- Robuust en betrouwbaar zijn en zich al bewezen hebben.
- In de toekomst gemakkelijk uitgebreid kunnen worden met geavanceerde milieutechnologieën.

De huidige geavanceerde milieutechnologieën uit de geïndustrialiseerde westerse landen, die vaak geïntegreerd zijn in

het productieproces, zijn alleen interessant als ze efficiënter en goedkoper zijn en als er voldoende expertise en ondersteuning is bij implementatie en toepassing.

De voorafgaande beschouwing geldt voornamelijk voor ontwikkelingslanden die in een fase van sterke economische groei verkeren. Echter in nagenoeg alle ontwikkelingslanden geldt dat een van de grootste problemen het ontbreken van voldoende hoeveelheden water van voldoende kwaliteit voor de drinkwatervoorziening, voor irrigatie en voor industriële productie is. Ook gebrek aan sanitatie moet worden genoemd. Meer dan een miljard mensen is verstoken van veilig drinkwater. Meer dan twee miljard mensen, heeft geen toegang tot elementaire sanitaire voorzieningen. Technologisch en milieutechnologisch gezien zou dit probleem gemakkelijk op te lossen moeten zijn. Er zijn voldoende systemen voorhanden. Kennis, technologie en ervaring is in het Westen in voldoende mate aanwezig. Toepassing van deze kennis en ervaring, in combinatie met het beschikbaar stellen van financiële middelen, draagt bij aan de ontwikkeling van een duurzame samenleving. Duurzaam, in de betekenis van het beschermen en herstellen van het ecosysteem en het creëren en waarborgen van een leefbare wereld voor de huidige inwoners van ontwikkelingslanden. Over deze aspecten is waarschijnlijk iedereen het eens. Maar ik heb wel het gevoel dat we soms erg gemakkelijk voorbijgaan aan het armoede-probleem dat miljarden mensen nu ervaren. Een armoede-probleem dat gerelateerd is aan allerlei tekorten waarvan de voornaamste zijn, ik heb dat al genoemd, water van goede kwaliteit en sanitaire voorzieningen. Milieutechnologie, in de brede betekenis van het woord, kan een economische ontwikkeling in gang zetten en kan voor werkgelegenheid en inkomsten zorgen.

In het licht van dit probleem is de vraag wel actueel, hoeveel inspanning we op korte termijn moeten gaan steken in opslag van CO<sub>2</sub>. Ten behoeve van grootschalige toepassing voor over 15 of 20 jaar is dit misschien nuttig, maar wellicht zijn er dan weer nieuwe en slimmere ontwikkelingen om dit probleem op te lossen. De aanpak van de broeikasproblematiek middels het vastleggen van CO<sub>2</sub> levert op korte en middellange termijn nauwelijks een bijdrage aan de vermindering van het broeikasprobleem. We moeten bedenken dat een inspanning om CO<sub>2</sub> op te slaan ten koste gaat van de toepassing van milieutechnologie, met name in ontwikkelingslanden. Middelen die voor opslag van CO<sub>2</sub> worden ingezet zouden veel efficiënter kunnen worden gebruikt om op regionaal en lokaal niveau op korte termijn de directe milieuproblematiek in ontwikkelingslanden mee te helpen op lossen en zodoende ook bij te dragen aan de oplossing van het armoedeprobleem. In ontwikkelingslanden ligt er nog een geweldige uitdaging voor ons.

## **6. Slotbeschouwing**

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren. Ik ben nu bijna aan het slot van mijn afscheidsrede gekomen. Ik heb u in het voorafgaande een schets proberen te geven van de ontwikkeling en de betekenis van milieutechnologie voor een duurzame ontwikkeling van onze samenleving. Het beeld dat ik u heb willen voorhouden is een snelle ontwikkeling van deze technologie, breed inzetbaar en geïntegreerd in industriële en agrarische productieprocessen en maatschappelijke activiteiten. Ik heb ook kort genoemd dat implementatie van milieutechnologie, vaak stuit op niet-technologi-

sche knelpunten, vooral in ontwikkelingslanden en landen met een overgangseconomie.

Het accent van mijn beschouwing lag tot nu toe primair op het onderzoek en de betekenis van de verkregen onderzoeksresultaten. Echter, onderzoek aan een universitaire instelling is niet mogelijk zonder de intensieve betrokkenheid van studenten en promovendi. Sterker nog, studenten en promovendi vormen het bestaansrecht van een universiteit! Zij komen naar een universiteit om opgeleid te worden op academisch niveau, werkend aan het front van de wetenschap en de toepassing van deze wetenschap. Dat brengt me natuurlijk ook op de onderwijstaken die we vanuit de Sectie Milieutechnologie hebben verricht.

Toen ik in 1989 aantrad zijn we, naast een verbreding van de onderzoeksgebieden ook begonnen met de opzet van een aansluitend onderwijsprogramma. Dat was in de periode, waarin onderwijs veel minder dan nu gewaardeerd werd als universitaire taak, een moeilijke, maar wel zeer uitdagende opgave! Ik ben in de beginperiode een aantal jaren voorzitter geweest van de Richting Onderwijs Commissie (ROC). Komend vanuit TNO en toch wat onbekend met de Wageningse Universitaire setting, is dat een zeer goede leerervaring geweest. De Sectie Milieutechnologie heeft met veel enthousiasme en inzet nieuwe onderwijs-elementen ontwikkeld. Dat is in de loop der jaren zo gebleven. Ik ben ook zeer verheugd dat met de komst van Cees Buisman, als opvolger van Gatze Lettinga, de vernieuwing in zowel onderwijs als onderzoek verder is voortgezet.

Ik heb 18 jaar leiding mogen geven aan een enthousiaste groep van medewerkers. Ik ben er trots op dat we binnen

het ons ter beschikking staande speelveld toch een duidelijke eenheid zijn geworden met een vooraanstaande positie op het gebied van de milieutechnologie. Dit dankzij de inzet van alle medewerkers van de Sectie Milieutechnologie.

Ik ben ook zeer verheugd over de recente onderzoeksevaluatie door de Visitatiecommissie. De waardering voor ons onderzoek varieerde van zeer goed tot excellent. We zijn hier erg trots op. Er blijft ook nog een uitdaging over. Het is nog niet allemaal excellent. Een uitdaging die de leerstoelgroep onder leiding van Cees Buisman en mijn toekomstige opvolger, zeker zullen oppakken.

Ik heb het genoeg gehad om gedurende mijn loopbaan aan deze universiteit een 24-tal promovendi te begeleiden bij het behalen van hun doctorstitel. Begeleiden zou ik hierbij wel tussen aanhalingstekens willen plaatsen. Het gaat daarbij om begeleiding op hoofdlijnen, de dagelijkse begeleiding ligt daarbij vooral bij een van de wetenschappelijke medewerkers. Een goede constructie, die ook aan de hoogleraar, zeker als hoofd van een leerstoelgroep, ruimte laat voor personele en financiële zaken, maar ook de mogelijkheid biedt voor intensivering van de begeleiding, indien nodig.

In de navolgende tabel zijn de promotieonderwerpen alsmede de namen van de gepromoveerden weergegeven.

Tabel 1

Jan Bovendeur	1989	Fixed-Biofilm Reactors applied to Waste Water Treatment and Aquacultural Water Recirculating Systems
---------------	------	--



Frank Volkering	1996	Bioavailability and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons
Ricardo Silveira Bernardes	1996	Modelling Nutrient Removal in a Sequencing Batch Reactor with Respirometry
Jian Chen	1997	Advanced Oxidation Technologies; Photocatalytic Treatment of Wastewater
Adrie Veeken.	1998	Removal of heavy metals from biowaste
Richard Tichy	1998	Bioleaching of Metals from Soils or Sediments Using Microbial Sulfur Cycle
Eric Mulder	1999	Relation between Mass-Transfer and Biodegradation of Hydrophobic Pollutants in Soil
Erna Noordkamp	1999	Remediation of soils, sediments and sludges by extraction with organic solvents
Katarzyna Kujawa-Roeleveld	2000	Estimation of denitrification potential with respiration based techniques
Luc Bonten	2001	Improving Bioremediation of PAH Contaminated Soils by Thermal Pretreatment
Hardy Temmink	2001	Reliability of models that predict the fate of organic trace pollutants in municipal activated sludge plants
Adriaan Mels	2001	Physical-chemical pretreatment as an option for increased sustainability of municipal wastewater treatment plants

Bert Hamelers	2001	A mathematical model for composting kinetics
Chiel Cuypers	2001	Bioavailability of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils and Sediments
Huib Mulleneers	2001	Selective Separation of very small Particles by Flotation
Arjan van Nieuwenhuizen	2002	Scenario Studies into Advanced Particle Removal in the Physical-Chemical Pre-treatment of Wastewater (Delft Technical University)
Francesc X. Prenafeta Boldu	2002	Growth of fungi on volatile aromatic hydrocarbons
Marc A. Boncz	2002	Selective Oxidation of Organic Compounds in Waste Water
Tran Thi My Dieu	2003	Greening food processing industry in Vietnam, putting industrial ecology to work
Marina Maya Marchioretto	2003	Heavy metals removal from anaerobically digested sludge
Joop Harmsen	2004	Landfarming of polycyclic aromatic hydrocarbons and mineral oil contaminated sediments
Dale Rudrum	2005	Innovations in composting pig manure
Orathai Chavalparit	2006	Clean Technology for the crude palm oil industry in Thailand
Johan Vermeulen	2007	Ripening of PAH and TPH polluted sediments

Uit deze opsomming komt de breedte van het onderzoeksgebied, dat ik wat meer direct heb mogen begeleiden, naar voren. Elk onderzoekstraject was altijd interessant, maar soms ook inspannend, zeker op het einde van het onderzoekstraject. Ik kijk dan ook met voldoening terug op een mooi stuk wetenschappelijk onderzoek dat we hebben afgerond.

Zoals ik reeds benadrukt heb, is de milieutechnologie een brede discipline. De fundamentele basiskennis, nodig voor de ontwikkeling van de milieutechnologie, wordt voor een belangrijk deel ook ontleend aan de samenwerking met andere leerstoelgroepen aan Wageningen Universiteit. In dat verband zou ik de wat meer fundamenteel georiënteerde leerstoelgroepen willen noemen zoals Microbiologie, Fysische Chemie en Kolloïdkunde, Organische Chemie en Meet, Regel en Systeemkunde. Maar ook samenwerking met de meer op toepassing gerichte leerstoelgroepen, waarvan de discipline aanvullend is op die van de Sectie Milieutechnologie en die vaak ook het meer maatschappelijke karakter van de milieutechnologie onderbouwing geven, zou ik willen noemen. Ik denk daarbij vooral aan Milieubeleid, Sociologie van Consumenten en Huishoudens, Milieu-economie, Operationele Research en Logistiek en Irrigatiekunde en Waterbouwkunde. Met al deze groepen hebben we voldoende kritische massa in huis om Wageningen Universiteit op het gebied van de milieutechnologie wereldwijd een zeer sterke positie te geven en die positie ook te laten behouden. Een positie die zeker in de toekomst nog verder zal worden versterkt door de betrokkenheid van de Sectie Milieutechnologie bij Wetsus en het Technologisch Topinstituut Water Technologie in Leeuwarden.

Kijkend naar de ontwikkeling van de studentenaantallen, waar we als leerstoelgroep in directe zin mee te maken hebben, lijkt er enige reden tot bezorgdheid. Hadden we in de eerste helft van de jaren 90 nog ca. 50 à 70 afstudeerstudenten per jaar, dit aantal is de laatste jaren teruggelopen tot ca. 30. Het ziet er echter wel naar uit dat dit aantal in de toekomst zal kunnen worden gehandhaafd. De belangrijkste reden van de teruggang van het aantal afstudeerders is de sterke teruggang van het aantal VWO studenten dat kiest voor de opleiding Milieukunde aan Wageningen Universiteit, een opleiding waarvan Milieutechnologie een specialisatie is. Wel is het verheugend dat we meer afstudeerders krijgen vanuit andere opleidingsrichtingen aan onze universiteit. Het aantal promovendi is sterk toegenomen in de loop der jaren. Momenteel doen ca. 50 studenten een promotieonderzoek bij onze Sectie Milieutechnologie. Mede in acht nemend de toenemende belangstelling voor watertechnologie en duurzame energieproductie ziet de toekomst van de Sectie Milieutechnologie er dus toch zeer rooskleurig uit.

Ik wil nu gaan afsluiten met enkele woorden van dank. Graag zou ik iedereen, waarmee ik heb samengewerkt, persoonlijk willen bedanken. In het kader van het korte tijdsbestek van deze rede is dat echter onmogelijk. Bovendien loop ik het risico dat ik iemand vergeet. Daarom, beste mensen, allemaal bedankt en vooral de huidige en voormalige medewerkers van de Sectie Milieutechnologie. We hebben als team veel bereikt. Ik heb al benadrukt dat zonder teamwork, zonder samenwerking, een positie aan het front van de wetenschap onmogelijk is. Ik wil toch enkele personen uit de wetenschappelijke staf, waarmee ik wat intensiever in de loop der jaren heb samengewerkt, vooral wat betreft

de ondersteuning bij de promotieonderzoeken persoonlijk noemen: Bram Klapwijk, Hardy Temmink, Bert Hamelers, Tim Grotenhuis, Harry Bruning en wijlen Henk Rensink. En dan wil ik ook gaarne het secretariaat bedanken. Op de eerste plaats natuurlijk Liesbeth Kesaulya, hoofd van het secretariaat. En Heleen Vos, die enkele jaren geleden met de VUT is gegaan, Anita van de Weerd en Gusta de Kaste. Jullie zijn mijn directe ondersteuning geweest voor administratieve zaken, voor mijn typewerk, op basis van wat slordig handgeschreven concepten, voor mijn PC, voor het regelen en maken van afspraken, ook als algemene vraagbaak en steun voor wat betreft het reilen en zeilen van de Sectie Milieutechnologie. Liesbeth, Heleen, Anita, Gusta, bedankt voor dit alles. En daarnaast wil ik ook Cees Buisman noemen. Sinds 2003 voeren we samen het management van deze leerstoelgroep. Cees, je hebt je sinds je benoeming zeer intensief op een creatieve manier bezig gehouden met de verdere profilering en het op de wereldkaart zetten van de Sectie Milieutechnologie. Je hebt mij ook de gelegenheid gegeven om de laatste jaren op een constructieve en prettige manier af te bouwen. Ik heb er alle vertrouwen in dat onder jouw leiding, tezamen met mijn toekomstige opvolger, de Sectie Milieutechnologie verder zal groeien en zich zal profileren. Cees, veel succes toegewenst.

Ik wil ook een dankwoord richten tot de leiding van deze universiteit. Toen ik in 1989 werd benoemd, heeft u mij alle vertrouwen gegeven. In veel vrijheid. Dat was een van de beweegredenen dat ik in 1989 deze functie aan de universiteit aanvaardde. Er waren er overigens meer, o.a. dat ik zelfstandig, natuurlijk tezamen met de toenmalige vakgroep, richting zou kunnen geven aan de ontwikkeling van het onderwijs en onderzoek op het gebied van de milieutechno-

logie. Die vrijheid heb ik gedurende mijn hele carrière aan deze Universiteit als bijzonder ervaren. Ik ben u daar zeer dankbaar voor.

Onze voormalige rector, Bert Speelman, heeft mij indertijd gevraagd om lid te worden van het College voor Promoties. Ik ben gaarne op zijn verzoek ingegaan. Het was voor mij een bijzondere ervaring om als niet-Wageninger en ook als iemand die een belangrijk deel van zijn loopbaan buiten de academische universitaire setting heeft gewerkt, deel te nemen aan dit adviescollege voor de Rector, eerst Bert Speelman, later Martin Kropff. Naast de inhoudelijk interessante discussies die er binnen het College voor Promoties werden gevoerd, was voor mij toch ook het voorzitten van promotieplechtigheden een zeer speciale ervaring. Ik kreeg inzicht in de breedte en de betekenis van het werkgebied van de Wageningen Universiteit.

En, tenslotte, maar niet in de laatste plaats, wil ik mijn gezin bedanken. Het was een hele overgang toen we verhuisden van Apeldoorn, waar ik werkzaam was bij TNO, naar Wageningen. We wisten dat het een baan was die veel meer dan 40 uur per week zou vergen. Riet, dank zij jouw toegewijde steun kon ik dit werk aan. Jij had ook speciaal oog voor onze buitenlandse gasten. Je gaf ze het gevoel hier thuis te zijn. Annerietje en Paul, later met jullie partners Peter en Francesca, ook jullie wil ik speciaal noemen. We zijn altijd een hecht gezin geweest waarbij we altijd op elkaar kunnen rekenen! Ik krijg nu wat meer vrije tijd. Ik hoop dat mama en ik nog vele jaren samen met jullie kunnen genieten van de kleinkinderen en dat we ook nog lang beschikbaar zijn als oppasgrootouders.

Meneer de Rector Magnificus, dames en heren, tenslotte zult u zich afvragen wat ik nog meer wil gaan doen tijdens mijn emeritaat. Op de eerste plaats heb ik nog een vijftiental promovendi die ik, uiteraard tezamen met de wetenschappelijke staf, de komende 4 jaar wil begeleiden. Op deze wijze kan ik geleidelijk afscheid nemen van het wetenschappelijk onderzoek. Zoals duidelijk moge zijn uit het voorafgaande, liggen mijn roots in de technologie en de milieutechnologie, maar vooral daar, waar milieutechnologie wordt toegepast. Met de meer fundamentele aspecten van de milieutechnologie heb ik ervaring opgedaan gedurende 18 jaar hier aan deze universiteit. De meer toepassingsgerichte en bedrijfsgerichte ervaring heb ik indertijd opgedaan bij TNO. Ik wil proberen deze twee ervaringsgebieden de komende jaren te combineren om mogelijk nog enkele nuttige werkzaamheden te kunnen verrichten op het gebied van de toepassing van de milieutechnologie, waarbij mijn interesse vooral uitgaat naar het integraal oplossen van concrete milieuproblemen.

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren, ik heb met heel veel plezier gewerkt aan deze universiteit en kijk met voldoening hierop terug. Ik dank u voor uw aandacht.

## 7 Referenties

Rulkens, W.H.; 2007. *Trends in the development and focus of environmental technology*. In: Environmental Protection into the Future, EPF 2007, June 25-27, 2007. Eds. J. Bien, W. Nowak. Czestochowa University of Technology, Poland. p. 18-27.

Rulkens, W.H.; 2007. *Assessment of opportunities for new innovative sewage sludge treatment systems*. In: IWA specialist conference "Facing sludge diversities: Challenges, risks and opportunities". 28-30 March 2007, Pine Beach Hotel, Belek – Antalya, Turkey. Paper and Presentation.

Rulkens, W.H.; 2007. *Sewage sludge as biomass resource for the production of energy: overview and assessment of the various options*. In: Bioenergy Outlook 2007. Issues, advances and Opportunities in Biomass Energy. Singapore, 26-27 April 2007. Paper and key note speaker.

Rulkens, W.H.; Bruning, H.; Grotenhuis, T; Smit, M; Harmsen, J. 2007. *Usefulness of Models to Predict Release of PAHs for Risk Assessment of Polluted Sediments*. In: The ninth international In situ and on-site bioremediation symposium, May 7-10, 2007. Baltimore, Maryland, Marriott Waterfront Hotel. Paper and presentation. Battelle.

Chavalparit, O.; Mol, A.P.J.; Rulkens, W.H.; 2006. *A Comparison of the Palm Oil Industry in Thailand and Malaysia*. In: The Greening of Agro-Industries and Networks in Asia: Challenges and Opportunities, Bangkok, Thailand, 27-28 October 2006.. - Bangkok : Chulalongkorn University, - p. 15.



Chavalparit, O.; Rulkens, W.H.; Mol, A.P.J.; Khaodhair, S.; 2006. *Options for Environmental Sustainability of the Crude Palm Oil Industry in Thailand through Enhancement of Industrial Ecosystems*. Environment, Development and Sustainability 8 (2). - p. 271 - 287.

Rulkens, W.H.; 2006. *Decision making in sustainable waste management: challenge for the future*. In: Challenges and Threats to the Environment, lessons from the Past to Shape the Future, Dubai, United Arab Emirates, 14-15 November 2006. - Dubai, UAE

Rulkens, W.H.; 2006. *Increasing the Environmental Sustainability of Sewage Treatment by Mitigating Pollutant Pathways*. Environmental Engineering Science 23 (4). - p. 650 - 665.

Rulkens, W.H.; 2006. *Sustainable sludge treatment: dilemmas in future research and development*. In: IWA Specialized Conference - Sustainable sludge management: state of the art, challenges and perspectives, Moscow, Russia, 29-31 May 2006. - Moscow, Russia : IWA, - p. 18 - 24.

Boncz, M.A.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; Zuilhof, H.; Sudhölter, E.J.R.; 2005. *The effect of salts on ozone oxidation processes*. Ozone-Science and Engineering 27 (2005)4. - ISSN 0191-9512 - p. 287 - 292.

Harmsen, J.; Rulkens, W.H.; Eijsackers, H.J.P.; 2005. *Bioavailability: concept for understanding or tool for predicting?*. Land Contamination and Reclamation 13 (2005)2. - ISSN 0967-0513 - p. 161 - 171.

Harmsen, J.; Rulkens, W.H.; Eijsackers, H.J.P.; Sims, R.C.; 2005. *Risk assessment for contaminated sediments treated on a landfarm*. In: Proceedings of the eighth international In situ and on-site bioremediation symposium. - Columbus OH (USA) : Battelle, 2005 - ISBN 1-57477-152-3 - p. F29.

Harmsen, J.; Rulkens, W.H.; Eijsackers, H.J.P.; Sims, R.C.; 2005. *From the concept of bioavailability to the application of standardised methods for management of bioremediation*. In: Proceedings of the eighth international In situ and on-site bioremediation symposium. - Columbus OH (USA) : Battelle, 2005 - ISBN 1-57477-152-3 - p. F12.

Harmsen, J.; Rulkens, W.H.; Zweers, A.J.; Toorn, A. van den; Sims, R.C.; 2005. *Biodegradation rate of PAHs and mineral oil in sediments on a landfarm*. In: Proceedings of the eighth international In situ and on-site bioremediation symposium. - Columbus OH (USA) : Battelle, 2005 - ISBN 1-57477-152-3 - p. F17.

Marchioretto, M.M.; Rulkens, W.H.; Bruning, H.; 2005. *Heavy metals precipitation in sewage sludge*. Separation Science and Technology 40 (2005). - ISSN 0149-6395 - p. 3393 - 3405.

Rulkens, W.H.; 2005. *Introduction to the treatment of polluted sediments*. Re-views in Environmental Science & Biotechnology 4 (2005). - ISSN 1569-1705 - p. 213 - 221.

Rulkens, W.H.; 2005. *Sustainable development in industry by closing water loops: technological aspects and expected future developments*. In: Chemistry for the protection of the environment / Environmental Science Research 4 /

Mournighan, R., Dudzinska, M. R., Barich, John, Auyong Gonzalez, Marjorie, Kealoha Black, Robin, . - New York : Springer, 2005 (Environmental science research 59) - ISBN 0-387-23020-3 - p. 223 - 254.

Rulkens, W.H.; Bruning, H.; 2005. *Clean-up Technologies for Dredged Fine Sediments Review and Future Challenge*. In: Proceedings of the Third International Conference on Remediation of Contaminated Sediments, New Orleans, January 24-27, 2005. - Columbus, OH : Batelle Press, 2005 - ISBN 1-57477-150-7 - p. 22.

Rulkens, W.H.; Buuren, J.C.L. van; 2005. *Sustainable Sludge Management in rapidly Industrializing Asian Countries, what are the Options*. In: Environmental Management of Urban and Industrial Infrastructure in Asia, International Conference in Ho Chi Minh City, Vietnam, 11-12 November 2005.

Rulkens, W.H.; Houten, R.T.; Futselaar, H.; Temmink, B.G.; Bruning, H.; Grolle, K.C.F.; Bisselink, R.; Brouwer, H.; 2005. *Innovative Concept for sustainable treatment of municipal wastewater*. In: proceedings of IWA Conference "Wastewater reclamation and reuse for sustainability", Korea, 8-11 November 2005.

Smit, M.P.J.; Lieten, S.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 2005. *Potential Bioavailability and Biodegradation of HCH*. In: Proceedings of the eighth International In Situ and On-site bioremediation Symposium, Baltimore, 2005. - Baltimore : 2005.

Vermeulen, J.; Dijk, S.G.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 2005. *Quantification of physical properties of dredged*

*sediments during physical ripening*. Geoderma 129 (2005).  
- ISSN 0016-7061 - p. 123 - 132.

Rulkens, W.H. (2004). Sustainable sludge management - what are the challenges for the future? *Water Science and Technology* 49 (10), 11-19.

Rulkens, W.H., Bruning, H., & Cuypers, C. (2004). Modeling bioavailability of PAH in soil. In Twardowska, Allen, Kettrup & Lacy (Eds.), *Solid Waste: Assessment, monitoring and Remediation* Elsevier B.V.

Rulkens, W.H. (2004). Overview of resource recovery technologies for biowastes. In: P.L.N. Dr.ir. Lens, H.V.M. Dr.ir. Hamelers, H. Hoitink & W. Bidlingmaier (Eds.), *Resource Recovery and Reuse in Organic Solid Waste Management* London: IWA Publishing.

Rulkens, W.H. (2004). Technology assessment in the Industrial Transformation towards Environmental Sustainability in Rapidly Industrialising Asian Countries. In (Ed.), *2nd Annual INREF-AGITS Working Conference "Environmental Governance in Asia: Regional Perspectives on Institutional and Industrial Transformations"*, Kuala Lumpur, Malaysia, 26-27 November 2004 Kuala Lumpur, Malaysia: Conference.

Boncz, M.A., Bruning, H. & Rulkens, W.H. (2003). Innovative reactor technology for selective oxidation of toxic organic pollutants in wastewater by ozone. *Water Science and Technology*, 47(10), 17-24.

Cuyppers, C., Grotenhuis, J.T.C., Nierop, K.G.J., Franco, E.M., Jager, de, A. & Rulkens, W.H. (2002). Amorphous and condensed organic domains: the effect of persulfate oxidation on the composition of soil/sediment organic matter. *Chemosphere*, 48(9), 919-931.

Marchioretto, M.M., Bruning, H., Hien, N.T.P. & Rulkens, W.H. (2003). Bioleaching and chemical leaching of heavy metals from anaerobically digested sludge. In Odegaard, Hallvard (Ed.), *Wastewater Sludge as a Resource*. (pp. 457-464). Trondheim, Norway: IWA.

Mulleneers, H.A.E., Mark, B. van der, Geraets, J., Gelder, B. van, Bruning, H., Rulkens, W.H. & Koopal, L.K. (2002). Remediation of fine fractions of dredged sediment by flotation. *Environmental Technology*, 23, 877-887.

Mulleneers, H.A.E., Koopal, L.K., Bruning, H. & Rulkens, W.H. (2002). Selective separation of fine particles by a new flotation approach. *Separation Science and Technology*, 37, 2097-2112.

Rulkens, W.H. (2003). Design and selection of closed water loop systems to abate industrial wastewater pollution. In - (Ed.), *Proceedings of INREF-AGITS conference 2003*. (pp. 194-215). Thailand: ChiangMai University Thailand.

Rulkens, W.H. & Hamelers, H.V.M. (2003). Design and Selection of Closed Water loop Systems to Abate Environmental Pollution in Industrial Production Processes. In Horst Fr. Schröder, (Ed.), *Ecobazard 2003 - Proceedings of the 4th IWA specialized conference on assessment and control of hazardous substances in water*. (pp. 31/1-31/8).

Aachen: Institute of Water and Waste Management, Aachen University.

Veeken, A.H.M. & Rulkens, W.H. (2003). Innovative developments in the selective removal and reuse of heavy metals from wastewaters. *Water Science and Technology*, 47(10), 9-16.

Vermeulen, J, Grotenhuis, J.T.C., Joziase, J. & Rulkens, W.H. (2003). Ripening of clayey dredged sediments during temporary upland disposal, A Bioremediation technique. *Journal of Soils and Sediments*, 3, 49-59.

Boncz, M.A.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; 2002. *Innovative Reactor Technology for Selective Oxidation of Toxic Organic Pollutants in Wastewater by Ozone*. In: Enviro 2002 & IWA 3rd World Water Congress, Melbourne, Australia, 2002. - p. 9.

Bruning, H.; Rulkens, W.H.; 2002. *New solvent extraction process for organic and heavy metal pollutants*. In: Proceedings of the First International Conference on Remediation of Contaminated Sediments - Remediation and Beneficial Reuse of Contaminated Sediments, Venice, Italy, 2001 / Hinchee, R.E., Porta, A., Pelli, M. (eds). - Columbus, Ohio, USA : Batelle Press, 2002 - ISBN 1-57477-129-9. - p. 283-289.

Cuypers, M.P.; Clemens, R.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 2001. *Prediction of Petroleum Hydrocarbon Bioavailability in Contaminated Soils and Sediments*. *Soil and Sediment Contamination* 10 (2001) 5. - p. 459-482.

Cuypers, M.P.; Pancras, T.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens,

W.H.; 2002. *The estimation of PAH bioavailability in contaminated sediments using hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin and Triton X-100 extraction techniques*. Chemosphere 46 (2002). - ISSN 0045-6535. - p. 1235-1245.

Malina, G.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 2002. *Vapor Extraction/Bioventing Sequential Treatment of Soil Contaminated with Volatile and SemiVolatile Hydrocarbon Mixtures*. Bioremediation Journal 6 (2002) 2. - ISSN 1088-9868. - p. 159-176.

Marchioretto, M.M.; Bruning, H.; Loan, N.T.P.; Rulkens, W.H.; 2002. *Heavy metals extraction from anaerobically digested sludge*. Water Science and Technology 46 (2002) 10. - p. 1-8.

Mulleneers, H.A.E.; Koopal, L.K.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; 2002. *Selective separation of fine particles by a new flotation approach*. Separation Science and Technology 37 (2002) 9. - ISSN 0149-6395. - p. 2097-2112.

Mulleneers, H.A.E.; Mark, B. van der; Geraets, J.; Gelder, B. van; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; Koopal, L.K.; 2002. *Remediation of fine fractions of dredged sediments by flotation*. Environmental Technology 23 (2002) 8. - ISSN 0959-3330. - p. 877-887.

Rudrum, D.; Rulkens, W.H.; et al., ; 2002. *The effect of bed structure on composting start-up*. In: Conference Composting & Compost Utilization, Columbus, Ohio, USA. - p. 8.

Rulkens, W.H.; 2000. *Sustainable development in industry by closed water loops*. In: Sustainable development - a European

view, Lublin 2000 / M.R. Dudzinska, A. Pawlowski. - Lublin  
- ISBN 83-88110-97-7. - p. 41-60.

Rulkens, W.H.; 2001. *An overview of soil and sediment treatment research in the Netherlands*. In: Treatment of contaminated soil - Fundamentals, Analysis, Applications / R. Stegmann, G. Brunner, W. Calmano, G. Matz (Eds.). - Berlin : Springer, 2001. - ISBN 3-540-41736-2. - p. 21-34.

Rulkens, W.H.; 2002. *Sustainable Centralised Municipal Wastewater Treatment Using Innovative Physical/Chemical Methods*. In: Enviro 2002 & IWA 3rd World Water Congress, Melbourne, Australia, 2002. - Paper e20876a. - p. 8.

Rulkens, W.H.; Cuypers, M.P.; Grotenhuis, J.T.C.; 2002. *Quantifying bioavailability of PAHs in sediments using physical-chemical methods*. In: Proceedings of the First International Conference on Remediation of Contaminated Sediments - Characterization of Contaminated Sediments, Venice, Italy, 2001 / Pelli, M., Porta, A., Hinchee, R.E. (eds). - Columbus, Ohio, USA : Batelle Press, 2002. - ISBN 1-57477-127-2. - p. 279-286.

Veeken, A.H.M.; Rulkens, W.H.; 2002. *Innovative Developments in the Selective Removal and Reuse of Heavy Metals from Wastewaters*. In: Enviro 2002 and IWA 3rd World Water Congress, Melbourne, Australia, 2002. - Paper e20879a. - p. 8.

Vermeulen, J.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 2002. *PAH and mineral oil biodegradation in aggregates with anoxic centres*. In: Proceedings of the First International Conference on Remediation of Contaminated Sediments, Venice, Italy, 2001. - p. 173-180.



Bruning, H.; Rulkens, W.H.; 2001. New Solvent Extraction Process for Organic and Heavy Metal Pollutants. In: International Conference on Remediation of Contaminated Sediments, Venice, Italy, 2001. - [S.l.] : [s.n.], 2001. - p. 1.

Cuyppers, M.P.; Clemens, R.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 2001. Prediction of Petroleum Hydrocarbon Bioavailability in Contaminated Soils and Sediments. *Soil and Sediment Contamination* 10 (2001) 5. - p. 459-482.

Lens, P.N.L.; Boncz, M.A.; Sipma, J.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; 2001. Catalytic oxidation of odorous compounds from waste treatment processes. *Odours in Wastewater Treatment 2001* (2001). - ISSN 1 900222 46 9. - p. 365-395.

Marchioretto, M.M.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; 2001. Pretreatment of anaerobically digested sludge aiming heavy metals removal by flotation. In: *Froth Flotation/Dissolved Air Flotation: Bridging the Gap*. - Tahoe City (USA) : United Engineering Foundation, 2001. - p. A.2.5.

Mels, A.R.; Nieuwenhuijzen, A.F.; Graaf, J.H.J.M. van der; Koning, J. de; Klapwijk, A.; Rulkens, W.H.; 2001. Fysisch/chemische voorzuivering van afvalwater-onderzoek naar fysisch/chemische voorzuiveringstechnieken. Utrecht : STOWA, 2001. - p. 164.

Mels, A.R.; Nieuwenhuijzen, A.F.; Graaf, J.H.J.M. van der; Koning, J. de; Klapwijk, A.; Rulkens, W.H.; 2001. Fysisch/chemische voorzuivering van afvalwater- Verkennend onderzoek naar afvalwaterfractionering en biologische nabehandelingstechnieken. Utrecht : STOWA, 2001. - p. 104.

Mels, A.R.; Nieuwenhuijzen, A.F.; Graaf, J.H.J.M. van der; Koning, J. de; Klapwijk, A.; Rulkens, W.H.; 2001. Fysisch/chemische voorzuivering van afvalwater- Résumé en definitieve scenario evaluatie met DEMAS+. Utrecht : STOWA, 2001. - p. 88.

Mels, A.R.; Rulkens, W.H.; Meer, A.K. van der; Nieuwenhuijzen, A.F. van; Klapwijk, A.; 2001. Flotation with polyelectrolytes as a first step of a more sustainable wastewater treatment system. *Water Science & Technology* 43 (2001) 11. - p. 83-90.

Mulder, H.; Breure, A.M.; Rulkens, W.H.; 2001. Application of a mechanistic desorption-biodegradation model to describe the behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in peat soil aggregates. *Chemosphere* 42 (2001). - p. 285-299.

Mulder, H.; Breure, A.M.; Rulkens, W.H.; 2001. Prediction of complete bioremediation periods for PAH soil pollutants in different physical states by mechanistic models. *Chemosphere* 43 (2001). - ISSN 0045-6535. - p. 1085-1094.

Rulkens, W.H.; 2001. An overview of soil and sediment treatment research in the Netherlands. In: *Treatment of contaminated soil - Fundamentals, Analysis, Applications / R. Stegmann, G. Brunner, W. Calmano, G. Matz (Eds.)*. - Berlin : Springer, 2001. - ISBN 3-540-41736-2. - p. 21-34.

Rulkens, W.H.; Bruning, H.; Cuypers, M.P.; Grotenhuis, J.T.C.; 2001. Modeling Bioavailability of PAH in soil. In: *Secotox World Congress and Sixth European Conference on Ecotoxicology and Environmental Safety*. *Ecotoxicology and*

Environmental Safety on the Verge of the Third Millennium: Trends, Threats and Challenges. Congress Proceedings, Krakow, Poland, 2001 / I. Twardowska, E. Kmieciak. - ISBN 83-88316-10-9. - p. 201-205.

Rulkens, W.H.; Cuypers, M.P.; Grotenhuis, J.T.C.; 2001. Quantifying bioavailability of PAHs in sediments using physical-chemical methods. In: International Conference on Remediation of Contaminated Sites, Venice, Italy, 2001. - p. 1.

Schipper, W.J.; Klapwijk, A.; Potjer, A.; Rulkens, W.H.; Temmink, B.G.; Kiestra, F.D.G.; Lijmbach, A.C.M.; 2001. Phosphate recycling in the phosphorus industry. *Environmental Technology* 22 (2001) 11. - ISSN 0959-3330. - p. 1337-1346.

Vermeulen, J.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 2001. PAH and Mineral Oil Biodegradation in Aggregates with Anoxic Centres. In: International Conference on Remediation of Contaminated Sediments, Venice, Italy, 2001. - p. 1.

Cuypers, M.P.; Grotenhuis, J.T.C.; Joziase, J.; Rulkens, W.H.; 2000. Rapid persulfate oxidation predicts PAH bioavailability in soils and sediments. *Environmental Science and Technology* 34 (2000) 10. - p. 2057-2063.

Mels, A.R.; Rulkens, W.H.; Meer, A.K. van der; Nieuwenhuijzen, A.F. van; Klapwijk, A.; 2000. Flotation with polyelectrolytes as a first step of a more sustainable wastewater treatment system. In: Conference Preprint Book 2 : Drinking Water Treatment : 1st World Water Congress

of the International Water Association (IWA) : Paris, France, 3-7 July. 2000. - p. 188-195.

Mulder, H.; Breure, A.M.; Andel, J.G. van; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 2000. Effect of mass-transfer limitations on the bioavailability of sorbed naphtalene in synthetic model soil matrices. *Environmental Toxicology and Chemistry* 19 (2000). - p. 2224-2234.

Mulleneers, H.; Roubroeks, S.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; Koopal, L.; 2000. Flotation of PAH contaminated dredged sludge. *American Chemical Society 2000* (2000). - p. 248-259.

Rulkens, W.H.; 2000. Sustainable Development in Industry by closing water loops. In: Seminar - Sustainable Development - an European View, Lublin - Polen 2000. - Lublin - Polen : Polish Academy of Science, 2000. - p. 2 03:B2.

Rulkens, W.H.; 2000. Physical/chemical treatment as basis for a more sustainable municipal wastewater treatment. In: CREST Workshop on Integrated Water Quality Management - The 4th Japan-Netherlands Workshop, Hokkaido Kiroro Resort, Japan, 2000. - p. 309-319 03:B2.

Rulkens, W.H.; Spanjers, H.; Copp, J.B.; Klapwijk, A.; 2000. Sustainable central treatment of municipal wastewater : future challenges and expected developments. In: Conference Preprint Book 8 : Wastewater, Reclamation, Recycling and Reuse : 1st World Water Congress of the International Water Association (IWA), Paris, France 3 - 7 July 2000. - Paris : IWA, 2000. - p. 229-232 03:B2.

Vermeulen, J.; Dijk, S. van; Grotenhuis, J.T.C.; Joziassse, J.; Rulkens, W.H.; 2000. Accelerated physical ripening of PAH and oil contaminated sediment to distinguish critical steps in remediation. In: Contaminated Soil 2000 - 7th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil 18-22, Leipzig 2000. - London: Thomas Telford, 2000. - p. 1184-1185 03:B2.

Mulleneers, H.A.E.; Koopal, L.K.; Swinkels, G.C.C.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; 1999. Flotation of soot particles from a sandy soil sludge. Colloids and Surfaces, A. Physicochemical and Engineering Aspects 151 (1999). - ISSN 0927-7757. - p. 293-301.

Nieuwenhuijzen, A.F. van; Graaf, J.H.J.M. van der; Koning, J. de; Mels, A.; Rulkens, W.H.; Klapwijk, A.; 1999. Research on physical-chemical pretreatment of wastewater in the Netherlands. Umwelt Technologie Aktuell - International Edition 2 (1999). - p. 73-79.

Mulleneers, H.A.E.; Roubroeks, S.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; Koopal, L.K.; 1999. Flotation of PAH-contaminated dredged sludge. In: Surfactant-Based Separations : Science and Technology / J.F. Scamehorn, J.H. Harwell (eds.). - New York, USA : Oxford University Press, 1999. - (ACS Symposium Series; 740) - ISBN 0-8412-3618-6. - p. 248-259.

Mulleneers, H.A.E.; Koopal, L.K.; Swinkels, G.C.C.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; 1999. Flotation of soot particles from a sandy soil sludge. Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects 151 (1999). - p. 293-301.

Mels, A.R.; Nieuwenhuizen, A.F. van; Graaf, H.J.H.M. van der; Klapwijk, A.; Koning, J. de; Rulkens, W.H.; 1999. Scenario for large scale wastewater treatment based on physical-chemical techniques. In: Proceedings of the 8 th IAWQ-conference on design : Operation and economics of large wastewater treatment plants, Budapest, Hongarije, 1999 / H. Boden (ed.). - Budapest: IAWQ, 1999. ISBN 963-420-606-9. - p. 183-190.

Mels, A.R.; Nieuwenhuijzen, A.F. van; Graaf, J.H.J.M. van der; Klapwijk, A.; Koning, J. de; Rulkens, W.H.; 1999. Sustainability criteria as a tool in the development of new sewage treatment methods. *Water Science and Technology* 39 (1999) 5. - p. 243-250.

Malina, G.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 1999. Cost-effective bioventing of kerosene contaminated soil. In: In situ bioremediation of petroleum hydrocarbon and other organic compounds : The fifth international in situ and on-site bioremediation symposium, San Diego, California, USA, 1999 / B.C. Alleman, A. Leeson (eds.). - Columbus, Ohio, USA : Battelle Press, 1999. - p. 195-200.

Malina, G.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 1999. The effect of temperature on the bioventing of soil contaminated with toluene and decane. *Journal of Soil Contamination* 8 (1999) 4. - p. 455-480.

Jian Chen, ; Ollis, D.F.; Rulkens, W.H.; Bruning, H.; 1999. Kinetic processes of photocatalytic mineralization of alcohols on metallized titanium dioxide. *Water Research* 33 (1999) 5. - p. 1173-1180.

Jian Chen, ; Ollis, D.F.; Rulkens, W.H.; Bruning, H.; 1999. Photocatalyzed deposition and concentration of soluble uranium (VI) from TiO<sub>2</sub> suspensions. *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects* 151 (1999). - p. 339-349.

Jian Chen, ; Ollis, D.F.; Rulkens, W.H.; Bruning, H.; 1999. Photocatalyzed oxidation of alcohols and organochlorides in the presence of native TiO<sub>2</sub> and metallized TiO<sub>2</sub> suspensions. Part(II): Photocatalytic mechanisms. *Water Research* 33 (1999) 3. - p. 669-676.

Jian Chen, ; Ollis, D.F.; Rulkens, W.H.; Bruning, H.; 1999. Photocatalyzed oxidation of alcohols and organochlorides in the presence of native TiO<sub>2</sub> and metallized TiO<sub>2</sub> suspensions. Part(I):Photocatalytic activity and pH influence. *Water Research* 33 (1999) 3. - p. 661-668.

Bonten, L.T.C.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 1999. Enhancement of PAH biodegradation in soil by physicochemical pretreatment. *Chemosphere* 38 (1999) 15. - p. 3627-3636.

Boncz, M.A.; Zuilhof, H.; Bruning, H.; Sudhölter, E.J.R.; Rulkens, W.H.; 1999. Linear structure-reactivity relations in the advanced oxidation of organic compounds. In: *The 14th Ozone World Congress, Dearborn, USA, 1999 / P. Huck, L.J. Bollyky (eds.). - Stamford, USA : International Ozone Association, 1999. - p. 151-161.*

Mels, A.R.; van Nieuwenhuijzen, A.F.; van der Graaf, J.H.J.M.; Klapwijk, A.; Rulkens, W.H.; 1998. Fysisch-chemische voorzuivering van afvalwater: identificatie en evaluatie van zuiveringsscenario's gebaseerd op fysisch-chemische

voorzuiivering.. STOWA-rapport, i.o.v. STOWA, Utrecht 98-29 (1998).

Mulleneers, H.A.E.; Koopal, L.K.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; 1998. Flotation of Harbor sludge. 215th American Chemical Society Meeting Dallas, TX, USA (1998).

Mulleneers, H.A.E.; Bruning, H.; Koopal, L.K.; Rulkens, W.H.; 1998. Treatment of Contaminated soil and dredged sludge by an new flotation approach. Proceedings of the 6th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, Edinburgh, UK (1998) 1075-1076.

Rulkens, W.H.; de Jager, H.; 1998. Education in environmental technology at Wageningen Agricultural University. IAWQ 19th Biennial International Conference: Water Quality International, Vancouver, Canada (1998) 269-276.

Van Nieuwenhuijzen, A.F.; Mels, A.R.; van der Graaf, J.H.J.M.; Klapwijk, A.; Rulkens, W.H.; 1998. Identification and evaluation of wastewater treatment scenarios based on physical-chemical pretreatment.. Proc. 8th International Gothenburg Symposium, Prague, Czechoslovak Republic. H.H. Hahn, E. Hoffmann, H. Odegaard (eds.) (1998) 351-362.

Mulder, H.; Breure, A.M.; Rulkens, W.H.; 1998. Bioremediation potential as influenced by physical states of PAH pollutants.. Proceedings of the 6th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, Edinburgh, UK. W. Harder, F. Arendt, I. Hart (eds.) (1998) 133-142.



Van Hasselt, H.J.; Costerus, A.; Rulkens, W.H.; 1998. Developments and operating experience in soil cleaning: thermal treatment of soils contaminated with HCH's and solvent extraction of soil contaminated with HCH's. 5th International HCH and Pesticides Forum, Bilbao, Spain (1998) 131-139.

Boncz, M.A.; Zuilhof, H.; Bruning, H.; Sudholter, E.J.R.; Rulkens, W.H.; 1998. Substituent effects in the advanced oxidation of aromatic compounds.. Proc. of the International Regional Conference of the Int. Ozone Association, Poitiers, France. M. Dore (ed.) (1998) 55/1-55/4.

Volkering, F.; Breure, A.M.; Rulkens, W.H.; 1998. Microbiological aspects of surfactants use for biological soil remediation.. Biodegradation 8 (1998) 401-417.

Tichy, R.; Rulkens, W.H.; Grotenhuis, J.T.C.; Nydl, V.; Cuypers, C.; Fajtl, J.; 1998. Bioleaching of metals from soils or sediments.. Wat. Sci. Tech. 37 (1998) 119-127.

Rulkens, W.H.; Tichy, R.; Grotenhuis, J.T.C.; 1998. Remediation of polluted soil and sediment: perspectives and failures.. Wat. Sci. Tech. 37 (1998) 27-35.

Rulkens, W.H.; Klapwijk, A.; Willers, H.C.; 1998. Recovery of valuable nitrogen compounds from agricultural liquid wastes: potential possibilities, bottlenecks and future technological challenges. Environmental Pollution 102 (1998) 727-735.

Rulkens, W.H.; Bruning, H.; van Hasselt, H.J.; Rienks, J.; van Veen, H.J.; Terlingen, J.P.M.; 1998. Design of a solvent

extraction process for PAH-contaminated sediments: the WAU-acetone process.. *Wat. Sci. Tech.* 37 (1998) 411-418.

Mulder, H.; Wassink, G.R.; Breure, A.M.; van Anandel, J.G.; Rulkens, W.H.; 1998. Effect of nonionic surfactants on naphthalene dissolution and biodegradation. *Biotechnology an Bioengineering* 60 (1998) 397-407.

Mulder, H.; Breure, A.M.; van Honschooten, D.; Grotenhuis, J.T.C.; van Anandel, J.G.; Rulkens, W.H.; 1998. Effect of bio-film formation by *Pseudomonas* 8909N on the bioavailability of solid naphthalene. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 50 (1998) 277-283.

Mulder, H.; Breure, A.M.; van Anandel, J.G.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 1998. Influence of hydrodynamic conditions on naphthalene dissolution and subsequent biodegradation. *Biotechnology and Bioengineering* 57 (1998) 145-154.

Malina, G.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; Mous, S.L.J.; de Wit, J.C.M.; 1998. Soil Vapour extraction versus bioventing of toluene and decane in bench-scale soil columns. *Environmental Technology* 19 (1998) 977-991.

Tichy, R.; Rulkens, W.H.; Grotenhuis, J.T.C.; Nydl, V.; Cuyper, C.; Fajtl, J.; 1997. Bioleaching of metals from soils or sediments. *Proc. First int. conf. on env. restoration*, Ed. M. Ros. IAWQ and Slovenian Water Poll. Contr. Ass. (SCDZV) Ljubljana (1997) 124-131.

Rulkens, W.H.; Bruning, H.; van Hasselt, H.J.; Rienks, J.; van Veen, H.J.; Terlingen, J.P.M.; 1997. Clean-up of PAH-

polluted clayey sediments: the WAU-acetone process.. Int. Conf. on Contaminated Sediments, Rotterdam, Preprints, Vol. 1, Eds. W. Calmano & P. Roeters. POSW, Port of Rotterdam, IAWQ, Rotterdam (1997) 412-419.

Roeleveld, P.J.; Klapwijk, A.; Eggels, P.G.; Rulkens, W.H.; van Starckenburg, W.; 1997. Sustainability of municipal wastewater treatment. *Water Science and Technology* 35 (10) (1997) 221-228.

Rensink, J.H.; Rulkens, W.H.; 1997. Using metazoa to reduce sludge production.. *Water Science and Technology* 36(11) (1997) 171-179.

Noordkamp, E.R.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 1997. Selection of an efficient extraction method for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in contaminated soil and sediment. *Chemosphere* 35(9) (1997) 1907-1917.

Malina, G.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 1996. Simulation of bioventing in soil column contaminated with model hydrocarbons.. *Procc. 3rd Int. Symp. and Exhibition on Env. Contamination in Central and Eastern Europe, Warsaw '96*, Ed. A. Roark, Publ. Florida State Univ., USA (1996) 365-367.

Cuypers, M.P.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 1997. Characterisation of PAH contaminated dredged sediments in a remediation perspective. Int. Conf. on Contaminated Sediments, Rotterdam, Preprints, Vol 2, Eds. W. Calmano & P. Roeters. POSW, Port of Rotterdam, IAWQ, Rotterdam (1997) 743-750.

Chen, J.; Rulkens, W.H.; Bruning, H.; 1997. Photochemical elimination of phenols and COD in industrial wastewaters. *Water Science and Technology* 35(4) (1997) 231-238.

Chen, J.; Ollis, D.F.; Rulkens, W.H.; Bruning, H.; 1997. Kinetics of the photocatalytic oxidation of alcohols. The 3rd Int. Conf. on TiO<sub>2</sub> Photocatalytic Purification and Treatment of Water and air. Orlando, USA. Science and Tech. Integr. Inc., London, Ontario, Canada (1997) 133-135.

Boncz, M.A.; Rulkens, W.H.; Bruning, H.; Sudhölter, E.J.R.; 1997. The effect of Hydrogenperoxide on the oxidation of chlorophenols with ozone. 4th Int. Conf. on Adv. Oxidation Techn. for Water and Air Remediation, Orlando, Florida, USA, Science and Tech. Integr. Inc., London, Ontario, Canada (1997) 90-91.

Boncz, M.A.; Bruning, H.; Rulkens, W.H.; Sudhölter, E.J.R.; Harmsen, G.H.; Bijsterbosch, J.W.; 1997. Kinetic and mechanistic aspects of the oxidation of chlorophenols by ozone. *Water Science and Technology* 35(4) (1997) 65-72.

Field, J.A.; Baten, H.; Boelsma, F.; Rulkens, W.H.; 1996. Biological elimination of polycyclic aromatic hydrocarbons in solvent extracts of polluted soil by the white rot fungus, *Bjerkandera* sp strain BOS55.. *Environmental Technology* 17 (1996) 317-323.

Chen, J.; Rulkens, W.H.; Bruning, H.; 1996. The elimination of phenols and COD in industrial wastewater using photochemical methods.. *Proc. Int. Conf. on Oxidation technologies for water and wastewater treatment*, Goslar.

CUTEC-Schriftenreihe Vol. 23, Clausthal (1996) sec. 10, 59-67.

Boncz, M.A.; Rulkens, W.H.; Sudhölter, E.J.R.; Bruning, H.; Harmsen, G.H.; Bijsterbosch, J.W.; 1996. Kinetic and mechanistic aspects of the oxidation of chlorophenols by ozone. Proc. Int. Conf. on Oxidation technologies for water and wastewater treatment, Goslar. CUTEC-Schriftenreihe Vol. 23, Clausthal (1996) sec. 8, 21-28.

Rulkens, W.H.; van Vree, H.B.R.J.; Urlings, L.G.C.M.; 1996. Overview state of the art of cleaning technologies for soils contaminated with HCH. Proc. 4th Forum on HCH and unwanted pesticides. Poznan. PPI, Poland & TAUW Milieu, The Netherlands (1996) 13 pp.

Tichy, R.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; Nydl, V.; 1996. Strategy for leaching zinc from artificially contaminated soil.. *Environmental Technology* 17 (1996) 1181-1192.

Rulkens, W.H.; Honders, A.; 1996. Clean-up of contaminated sites: experiences in the Netherlands. *Water Sci. Technol.* 34 (1996) 293-301.

Volkering, F.; Breure, A.M.; van Andel, J.G.; Rulkens, W.H.; 1995. Influence of non-ionic surfactants on the bioavailability and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Appl. Environ. Microbiol.* 61 (1995) 1699-1705.

Malina, G.; Grotenhuis, T.; Cuypers, C.; Rulkens, W.; 1995. Measurement of toluene bioconversion during ventilation in a bench-scale soil column.. In: *In situ aeration: airsparging*,

bioventing and related remediation processes, *Bioremediation* 3 (2), R.E. Hinchee et al. (eds.). Battelle Press, Columbus (1995) 377-382.

Noordkamp, E.R.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; Joziase, J.; 1994. Grondreiniging door middel van solvent extractie. *NPT Procestechologie* (1994) 11-18.

Tichy, R.; Grotenhuis, J.T.C.; Rulkens, W.H.; 1993. Bioleaching of zinc contaminated soils with *Thiobacilli*. In: *Integrated soil and sediment research: a basis for proper protection*, H. Eijsackers, T. Hamers (eds.). Kluwer Acad. Publ., Dordrecht (1993) 686-687.

Tichy, R.; Grotenhuis, J.T.C.; Janssen, A.; van Houten, R.; Rulkens, W.H.; Lettinga, G.; 1993. Application of the sulphur cycle for bioremediation of soils polluted with heavy metals. In: *Contaminated Soil '93*, F. Arendt et al. (eds.). Kluwer Acad. Publ., Dordrecht (1993) 1459-1462.

Rulkens, W.H.; 1992. Environmental biotechnology versus chemical/physical environmental technology. Proc. 6th Forum Applied Biotechnology. Prov. Court Bruges. Part 2. Med. Fac. Landbouwwet. Univ. Gent 57,4b (1992) 1437-1449.

Marsman, E.H.; Donker, H.J.; Reitsma, B.A.H.; Rensink, J.H.; Rulkens, W.H.; Urlings, L.G.C.M.; Vlekke, G.J.F.M. ; 1992. A three sludge sewage treatment plant for far reaching removal of COD, nitrogen and phosphate. Proc. Int. Conf. Sewage into 2000. Developments and upgrading in sewerage and wastewater treatment. Part 2. IAWPRC, EWPCA, NVA, Amsterdam (1992) 343-346.