

Over grenzen

Citation for published version (APA):

Kerkhof, P. J. A. M. (2011). *Over grenzen*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2011

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Afscheidscollege
prof.dr.ir. Piet Kerkhof
18 februari 2011

A close-up portrait of a middle-aged man with light brown hair, wearing a white shirt and a blue tie. He is looking slightly to the right of the camera with a gentle smile. The background is a solid, bright blue.

/ Faculteit Scheikundige Technologie

TU / **e**

Technische Universiteit
Eindhoven
University of Technology

Over grenzen

Where innovation starts

Afscheidscollege prof.dr.ir. Piet Kerkhof

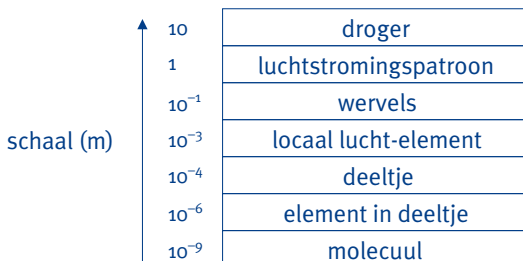
Over grenzen

Uitgesproken op 18 februari 2011
aan de Technische Universiteit Eindhoven

Inleiding

Op 12 mei 1989 heb ik in mijn oratie hier aan de TU/e aangegeven me te willen bezighouden met onderzoek in de fysische technologie, met toepassingsgebieden in de procesindustrie in de meest brede zin. Daartoe rekenen we de chemische industrie, de voedingsmiddelenindustrie, de grofkeramische industrie, de milieutechnologie en de biotechnologie. In dat tijdsgewricht was de communis opinio in het vakgebied dat we als scheikundig ingenieurs de grenzen van ons vakgebied moesten oversteken. Samen met mijn groep ging ik die uitdaging aan. Vandaag wil ik u graag iets vertellen over hoe het ons over die grenzen is vergaan.

Als belangrijkste aandachtsgebied heb ik gekozen voor scheidingsprocessen, waarbij we interessante excursies niet uit de weg gingen. In veel procesvoeringen in de industrie zien we een of meerdere reactiestappen waarin grondstoffen omgevormd worden tot producten, die vervolgens gescheiden worden. In andere processen vindt geen chemische reactie plaats, maar wordt een mengsel in een of meer stappen gescheiden. Hierbij wordt gebruikgemaakt van allerlei scheidingsstoestellen. Willen we processen verbeteren of vernieuwen, dan kunnen we een keten van schaalgroottes onderscheiden waarop we naar zoiets kijken: een hele fabriek, het toestel als zodanig, de verschijnselen binnen in het toestel, de schaal van enkele deeltjes, soms zelfs de schaal van moleculen (Figuur 1). Zowel bij het onderzoek op elk van die schaalniveaus als bij de integratie van klein tot groot, blijkt er een veelheid van disciplines nodig voor succes. We moeten dan de grenzen van onze eigen specialistische kennis over, door samenwerking met

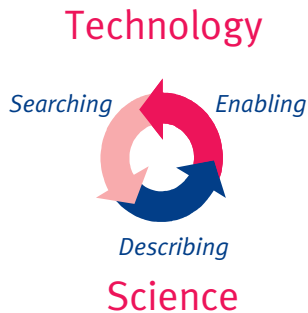


figuur 1

Schalen van beschouwing bij sproeidrogen

anderen of door onze eigen grenzen te verleggen. Ook hierover verhaal ik graag in dit college. Bij industriële producten kunnen samenstelling en zuiverheid specificaties zijn, bij vele andere zijn de functionele eigenschappen bepalend voor de waarde. Deze eigenschappen zijn het resultaat van de bewerkingsprocessen waaronder ook scheidingsstappen kunnen vallen. Het is een uitdaging om de grenzen tussen proces- en producttechnologie te laten vervagen. Naast ervaringen uit eigen onderzoek wil ik ook graag even stilstaan bij de ontwerpersopleiding Proces- en Productontwerp waar ik een aantal jaren leiding aan heb mogen geven. Het is mooi om onderzoek te doen in een academische omgeving, met als vruchten wetenschappelijke publicaties. Het is ook een uitdaging om dit werk in de industriële praktijk toe te passen. Het overschrijden van de universitaire grenzen in allerlei samenwerkingen met de industrie levert niet alleen bevredigende toepassingen op, maar ook een schat aan interessante probleemstellingen voor onderzoek.

De filosofie die we hanteerden bij veel van onze onderzoeksprojecten, is weergegeven in een cirkelbeweging (Figuur 2), sterk gelijkend op de technologiespiraal van collega Van Santen. We hebben hier een interessante set vraagstellingen en kansen in de technologie en we doen nieuwsgierig onderzoek naar wat er zoal fysisch gebeurt in het materiaal en de apparatuur. De volgende stap is dat we hiervoor mathematische beschrijvingen opstellen. In deze vergelijkingen komen tal van coëfficiënten voor die experimenteel bepaald moeten worden.



figuur 2

Activiteitencirkel bij technologisch onderzoek

Voor een bestaand of geconcipieerd proces kunnen we deze vergelijkingen met aanvullende bestaande kennis bundelen tot een simulatiemodel, dat als hulpmiddel kan dienen bij ontwerp of optimalisatie van het proces. We nemen dus kennis van de technologie, zoeken analytisch naar bepalende verschijnselen

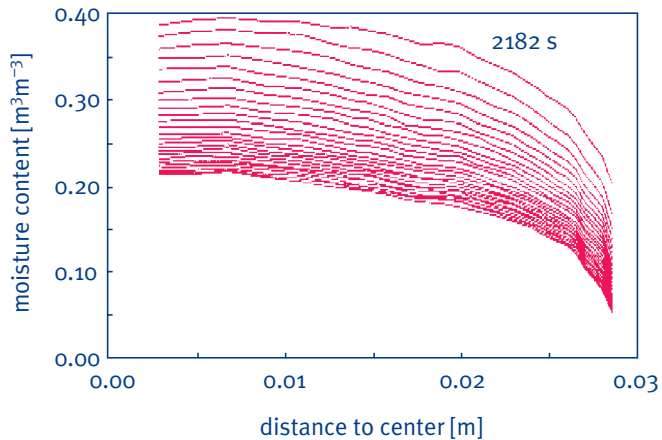
en de wiskundige beschrijving en synthetiseren dan naar procesontwerp en -optimalisatie. In andere woorden: we kijken naar lacunes in de beschrijving van processen, doen wetenschappelijk onderzoek en maken wetenschap tot gereedschap. Binnen het tijdsbestek van dit college is het helaas niet mogelijk om alle onderzoeken en ontwerpen voldoende recht te doen. Het samenstellen van een goed diner betekent niet dat de niet opgevoerde gerechten minder voortreffelijk zijn; er is slechts een overvloed aan goed materiaal in de keuken.

Ontwateren: 1. Het drogen van klei

In een groot aantal industriële activiteiten is het van belang om water te verwijderen uit een, vaak ingewikkeld, mengsel. Voorbeelden van dergelijke ontwateringsprocessen zijn het drogen van kleivormlingen, het maken van droog melkpoeder uit melk, het filtreren van slib uit de waterzuivering tot een koek en het uitpersen van de koek. Droogprocessen gebruiken 12 procent van de industriële energie, in Nederland 50-60 PJ/jaar. Hierop kan dus veel energie bespaard worden. Voor veel gedroogde producten hangt echter ook de kwaliteit af van de wijze waarop we drogen. Het ontrafelen van de deelprocessen die invloed hebben op de kwaliteit is een dankbare uitdaging en levert gereedschap op voor geïntegreerde optimalisatie van het hele proces. We bouwden met dit werk voort op de traditie van Hans Thijssen.

In de baksteenindustrie worden blokken klei, zogenaamde vormlingen, eerst gedroogd in grote droogkamers en vervolgens gebakken in ovens. De industrie wenste energiebesparing en capaciteitsvergroting. Ook was de vraag hoe processen aan te passen bij verandering van grondstoffen, zoals andere kleisoorten en mengsels met vliegias en recent met gemalen oude baksteen. In een gezamenlijk onderzoek met TNO, toen afdeling grofkeramiek, en de faculteiten Bouwkunde en later ook Technische Natuurkunde, hebben wij ons gebogen over het droogproces. In het algemeen kan energie bespaard worden door hogere luchttemperaturen te gebruiken. Het droogproces verloopt dan sneller, waardoor ook hogere capaciteiten haalbaar zijn. Echter, als we een vormling te snel drogen, treden scheuren op door de ongelijkmatige krimp en hebben we meer productuitval bij het bakken. Promovendi Toine Ketelaars en Bas Kroes onderzochten de deelprocessen die optreden bij de enkele vormling. Aan het oppervlak verdampt water, dat van binnenuit wordt getransporteerd door een samenspel van capillaire vloeistofstroming, dampdiffusie en microporiediffusie in de kleideeltjes. Zolang het watergehalte boven de krimp grens ligt, krimpt de klei in gelijke mate met het volume aan verwijderd water; daaronder wordt de structuur poreus en star. Aan de buitenkant treedt meer krimp op, waardoor spanningen ontstaan. Bij het overschrijden van de kritische spanning zal scheurvorming optreden. Wetenschappelijk doel was de beschrijving van het samenspel van waterbeweging, vervorming en mechanische spanning in de vormling. Om de

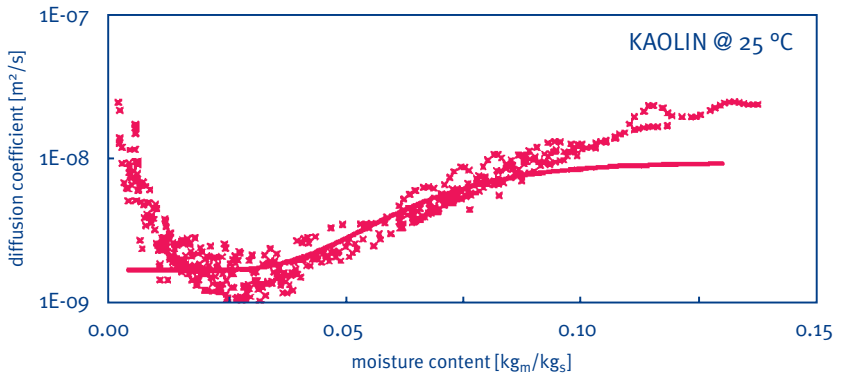
waterbeweging te kunnen observeren is Ketelaars de universitaire grenzen overstoken en heeft hij experimenten opgezet met het Interuniversitair Reactor Instituut in Delft, waarbij de verstrooiing van een neutronenbundel door een laagje drogende klei werd gemeten. Hierdoor konden we voor het eerst de concentratieprofielen van water in de klei zien op verschillende tijdstippen (Figuur 3).



figuur 3

Vochtprofielen in drogende klei, gemeten met MRI

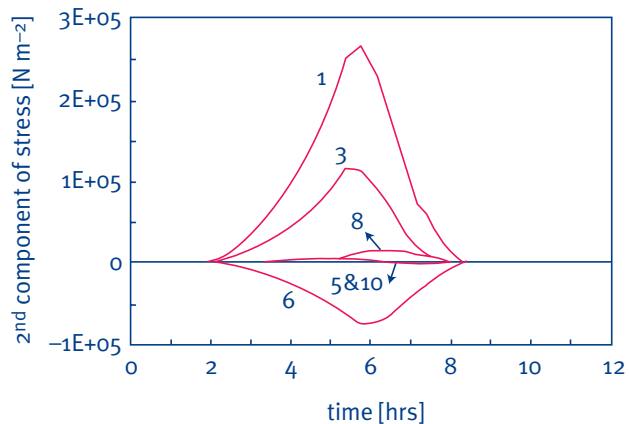
De genoemde transportmechanismen voor water kunnen ook samengevat worden in een effectieve diffusiecoëfficiënt, die afhangt van het watergehalte en die nu berekend kon worden uit de profielen. Er zijn grote verschillen tussen verschillende kleisoorten. Later hebben we een vruchtbare samenwerking opgestart met Klaas Kopinga en Leo Pel van de faculteit Technische Natuurkunde, die transport van water en ionen in bakstenen en cement onderzochten met behulp van MRI. Bas Kroes heeft bij deze twee onderzoekers vochtprofielen gemeten in drogende laagjes klei in de MRI (Figuur 4). We hadden goed overleg over de theorie met hen en met Jacob Wisse van de faculteit Bouwkunde. Kroes heeft ook meer in detail de verschillende mechanismen van watertransport experimenteel en theoretisch in kaart gebracht. Ook dit is weer gedaan voor verschillende kleisoorten en -mengsels. Later heeft Bram Ramakers in dezelfde samenwerking het drogen van hout onderzocht.



figuur 4

Waterdiffusiecoëfficiënt in klei, uit MRI-metingen

Ketelaars onderzocht de relatie tussen deformatie en spanning door trekproeven uit te voeren met staafjes klei met verschillend vochtgehalte. Vanuit het eerdere werk met Hans Thijssen hadden we modellen en rekenmethoden voor drogen in één dimensie. Het modelleren van twee- en driedimensionale diffusie, krimp en spanningen ging duidelijk over onze grenzen heen. We zijn blij dat Bob Mattheij en Rik Kaasschieter van de faculteit Wiskunde en Informatica en Cees Oomens en Jan Janssen van de faculteit Werktuigbouwkunde Ketelaars de benodigde theorie en computerprogramma's aanreikten om tot een volledig model te komen. Hiermee kon voor een drogend blok klei niet alleen de vochtverdeling en -verwijdering worden berekend, maar ook het verloop van de spanning met de tijd



figuur 5

Spanningen in een drogende kleistaaf

(Figuur 5). Nabij het oppervlak bouwt zich een trekspanning op, terwijl in het centrum compressie optreedt. Naarmate het droogproces vordert, neemt de spanning eerst toe; na zekere tijd wordt het hart van het monster droger, waardoor de spanning weer afneemt.

Hiermee hadden we de elementen voor mogelijk gereedschap voor de toekomst bij elkaar; parallel heeft TNO een rekenmodel voor de stroming van en het warmte- en stoftransport in de lucht voor diverse stapelingen opgezet. Het is er nog niet van gekomen om dit alles tot een instrument in de industrie te bundelen; wel hebben industriële deelnemers uit de begeidingscommissie gemeld zoveel geleerd te hebben dat zij hun proces aanzienlijk beter konden instellen en de capaciteit konden uitbreiden.

Door deelname aan internationale samenwerkingsverbanden zoals de Europese Working Party on Drying en de tweejaarlijkse International Drying Symposia hadden we ook goed contact met collega's over de landsgrenzen, waaronder Michel Roques en Jean-Rodolphe Puiggali uit Frankrijk en Stephen Whitaker uit de USA.

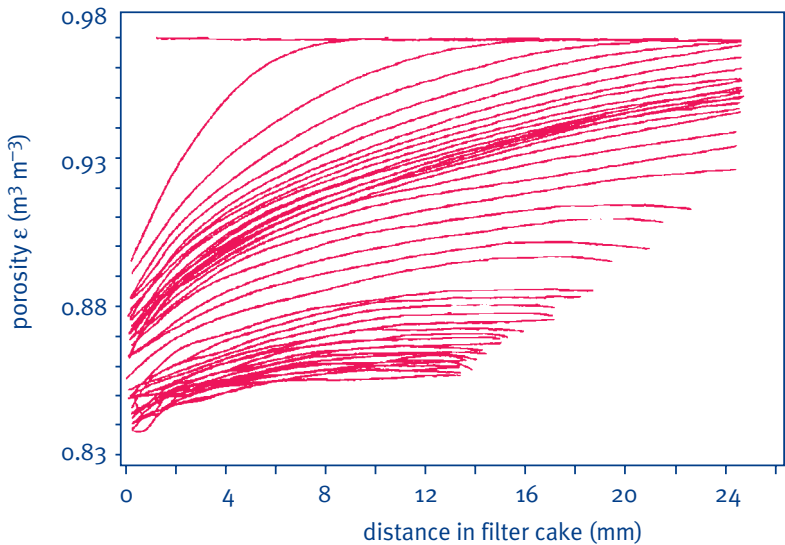
Ontwateren: 2. Filtratie en uitpersen van zuiverings-slib

In veel rioolwaterzuiveringsinstallaties worden biologisch afbreekbare stoffen uit ons rioolwater in beluchtingsbassins afgebroken door micro-organismen, het zogenaamde actief slib, met als producten koolzuurgas, water en biomassa. Vanuit de beluchtingsbassins wordt het troebele water naar bezinkbassins geleid. Daar bezinkt het slib, mede onder de invloed van toegevoegde vlokkingsmiddelen. Dit slib bevat enkele procenten droge stof en voor de rest water. Om het volume te verkleinen, wordt het vervolgens gefiltreerd, soms met napersen. Uit het filtratie-toestel komt dan een zogeheten filterkoek, met een drogestofgehalte van zo'n 20-32%. Voor allerlei toepassingen is het gewenst dat het drogestofgehalte aanzienlijk hoger is. Bij verbranding bijvoorbeeld is het niet wenselijk dat extra gas gestookt moet worden om een grote hoeveelheid water te verdampen. Als we de koek droger kunnen maken, levert de installatie energie op.

Op verzoek van Rijkswaterstaat is onze groep een onderzoek begonnen naar fundamentele kanten van slibontwatering. We hebben in het lab een filtratie-expressiecel gebouwd waarin het water uit een hoeveelheid geflocculeerd slib door een filtermedium in de bodem kan worden gedrukt. Dat gebeurt door middel van een op de vloeistof geplaatste zuiger. Hiermee kunnen we de snelheid van filtratie als functie van de tijd volgen, bij verschillende zuigerdrukken. Op het filtermedium bouwt zich een koek op, die we in de eindfase ook kunnen uitpersen. Zoals ook in andere onderzoeken gevonden, bleek uit ons onderzoek dat de koek compressibel is. De passerende vloeistof oefent kracht uit op slibdeeltjes, die weer overgebracht wordt op de lager gelegen deeltjes. Deze korreldruk zorgt ervoor dat de koek nabij het filtermedium meer of minder ingedrukt wordt. Er ontstaan porositeitsprofielen. Door de compressie wordt de filtratieweerstand hoger, wat ertoe kan leiden dat de koek dichtslaat, zodat er bijna geen water meer doorkomt. Belangrijke factoren zijn dus de permeabiliteit van de koek bij verschillende graden van compressie en de wijze van vervorming van de koek onder belasting.

Erik La Heij heeft in zijn studie modellen opgesteld voor de combinatie van filtratie en sedimentatie waarin hij vervormingsmodellen uit de grondmechanica heeft gecombineerd met een beschrijving van de vloeistofstroming en drukverdeling in een filterkoek. Hij vond dat bij filtratie de koekvervorming als elastisch beschreven

kan worden, maar bij verder uitpersen als visco-elastisch. Met deze modellen wordt de interne opbouw van de koek in vaste stof en water over de hoogte berekend en volgt ook de externe filtraatstroom als functie van de tijd. Wederom konden we bij collega's Kopinga en Pel van Technische Natuurkunde terecht om met behulp van MRI in een klein filtertje de vochtverdeling in zo'n koek te bekijken (Figuur 6). De vergelijking van deze vochtverdeling met de modelberekeningen was bemoedigend en de overeenkomst tussen drukprofielen volgens model en meting was goed.



figuur 6

Porositeitsprofielen in filterkoek van geflocculeerd slib, gemeten met MRI

Zowel de stevigheid als de permeabiliteit van de koek wordt bepaald door het soort slib, maar ook door het voorafgaande flocculatieproces. Hierin worden de primaire slibdeeltjes die van de grootteorde van 1 micrometer zijn, door middel van flocculanten aaneengeklonterd. Arend Herwijn heeft zijn licht opgestoken bij de colloidchemici Klaus Stein, Wies van Diemen en Wim Agterof. Met een scala aan apparatuur heeft hij de omslag van oppervlaktelading gemeten en deze gekoppeld aan de vlokvorming bij gebruik van ijzerchloride en kalk. Op een meer macroscopisch niveau zijn de afhankelijkheid van vloggrootte en koekparameters betreffende permeabiliteit en compressibiliteit gekoppeld aan de doseringen van flocculant en slibsoort. Voor de praktijk is het van belang om bij de waterzuivering een permeabiliteitsmeting te kunnen uitvoeren. Onze groep heeft hiervoor een

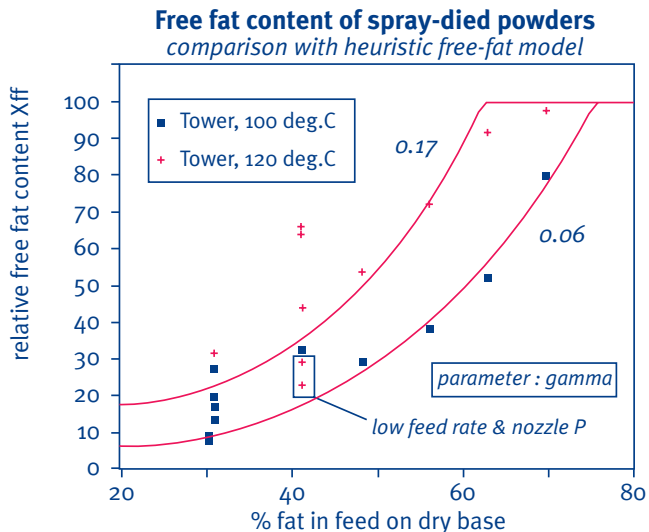
nieuw zogenaamd Capillary Suction Time-apparaat ontworpen. In het onderzoek is gebleken dat je door hoge uitpersdruk een koek kunt maken met zestig procent droge stof. Wij hebben voorgesteld om een vervolgonderzoek te doen naar de ontwikkeling van apparatuur hiervoor. Helaas liepen we daar tegen de grenzen van de opdrachtgevers aan: naast wetenschappelijke publicaties hadden wij tien rapporten geschreven, wat als een mooie afronding werd beschouwd. Arend Herwijn en Paul Janssen zagen brood in het vertalen van alles wat we geleerd hadden naar de praktijk en richtten daarom een eigen bedrijf op. Zij hebben een groot aantal waterzuiveringen bezocht met de filtratie-expressiecel om daar met name het flocculatieproces ter plekke te optimaliseren. Er is echter een begrensd aantal waterzuiveringen en door het grote succes waren zij slechts enkele jaren in business, waarna ze zich aan andere activiteiten wijdde.

Ontwateren: 3. Sproeidrogen

Veel dagelijkse producten, zoals instantkoffie en melkpoeder, worden gemaakt door middel van sproeidrogen. Hierbij wordt in een grote toren, meestal bovenin, een vloeistof verneveld tot kleine druppeltjes en wordt hete lucht door de toren geleid. De druppels verlaten de verstuiver met hoge snelheid: zo'n 50-100 m/s. Vaak is er een luchtbelletje ingeslagen zodat ze eigenlijk hol zijn. Ze remmen snel af en al dwarrelend door de toren drogen ze door het contact met de hete lucht, die daardoor zelf afkoelt. Onderin de toren vallen de poederdeeltjes op de conische bodem en wordt de poederlaag door trillingen naar de productafvoer geleid. De hele fijne deeltjes verdwijnen met de afgevoerde lucht door de uitlaat, waarna ze apart afgescheiden worden.

In de groep van Hans Thijssen deden we onderzoek naar het sproeidrogen van aromahoudende voedingsmiddelen. We deden zowel experimenten aan een van de grootste laboratoriumdrogers in de universitaire wereld als rigoreuze modellering van wat er zich in de deeltjes afspeelde. Bijvoorbeeld diffusie van water en aromastoffen in deeltjes die krompen ten gevolge van waterverlies en weer opblazen ten gevolge van de opwarming. Unilever was geïnteresseerd in het drogen van voedingsmiddelen met een hoog vetgehalte, zoals kaas en mayonaise. Kon dat met sproeidrogen en hoe dan wel, en hoe hangen de producteigenschappen af van het proces? Weer de uitdaging vanuit de technologie die leidt tot het onderzoeken en identificeren van de wetenschappelijke basis, het beschrijven in mathematische modellen, het toetsen aan experimenten en het in synthese formuleren van regels voor praktische uitvoering. Uit het drooggedrag van laagjes met een verschillend oliegehalte in een laboratoriumopstelling vonden we de diffusiecoëfficiënt van water als functie van het drogestof- en oliegehalte, en temperatuur. Hiervoor gebruikten we de door Schoeber, Liou en Coumans ontwikkelde Regular Regime-methoden. Het diffusiegedrag werd ingebracht in het droogmodel voor druppels dat in de zeventiger jaren door Joost van der Lijn, Wim Rulkens en Willem Schoeber was opgezet en dat was gemoderniseerd door Gerben Mooiweer. Hiermee rekenden we de ontwikkeling van vochtprofielen tijdens het drogen door, evenals de temperatuurgeschiedenis en het opblazen en krimpen. Een van de kwaliteitsparameters is de hoeveelheid vet of olie die zich aan het oppervlak van de deeltjes bevindt, het vrije-vetgehalte. Dit is eerder

vatbaar voor oxydatie door lucht dan de ingekapselde vetdruppeltjes. Bij het modelleren van het vrije-vetgehalte hebben we weer eens een grens overgestoken, namelijk naar percolatieverschijnselen. Het zijn niet alleen de vetdruppels aan het oppervlak die makkelijk toegankelijk zijn, maar een ingekapseld druppeltje dat raakt aan een oppervlaktedruppel is eveneens toegankelijk. Bij toenemende volumefractie olie stijgt de toegankelijke fractie steil. Boven de percolatiegrens zijn de druppels allemaal met elkaar verbonden en is alle vet toegankelijk. Het verloop van deze curves hangt alleen af van de dikte van het drogende schilletje en van de diameter van de vetdruppels. Met behulp van de synthese van de verschillende modellen waren we in staat om de experimenteel gevonden resultaten te beschrijven (Figuur 7).



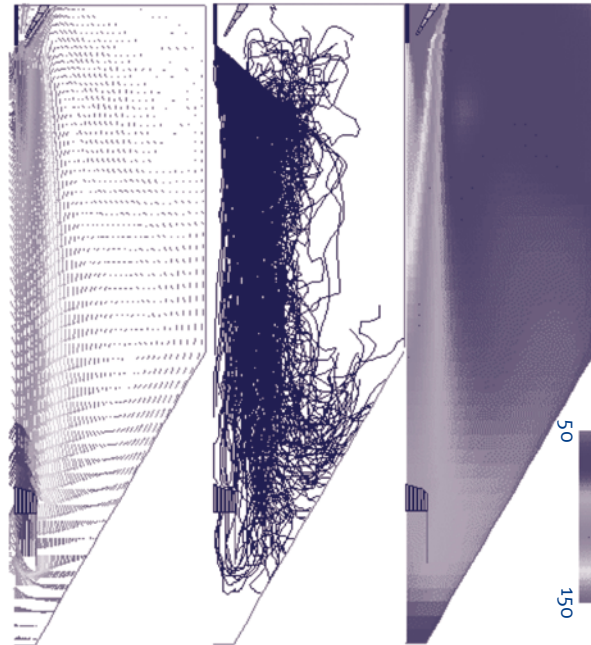
figuur 7

Vrij-vetgehalte van gesproeidroogde poeders

Als je voedingsmiddelen droogt in hete lucht loop je het risico dat temperatuur-gevoelige componenten afgebroken worden. Een van onze ambities was een groot veelomvattend model op te stellen voor het sproeidrogen. Bij het verstuiven komen druppels met hoge snelheid in de drooglucht terecht en remmen af, waardoor de beweging van de drooglucht beïnvloed wordt. Door de turbulentie in de luchtstroming worden de kleine deeltjes alle kanten opgestuurd. De lucht komt heet binnen en koelt af door de waterverdamping van de deeltjes. Er ontstaan dichtheidsverschillen die ook de luchtstroming beïnvloeden. Omdat ieder deeltje

een apart traject volgt, is het droogproces en ook de mogelijke hittebeschadiging voor ieder deeltje weer anders. Het product dat we verzamelen op de bodem is dan de resultante van een heel scala aan drooggeschiedenissen. Frank Kieviet heeft in een meesterwerk het tweefasenstromingsmodel opgesteld en geïmplementeerd, met inachtneming van het sterk niet-lineaire drooggedrag van vele deeltjes, wederom via de al eerder genoemde Regular Regime-methoden. In eerste instantie berekende hij de gemiddelde trajecten voor deeltjes van verschillende grootte aan de hand van de tijdgemiddelde luchtsnelheidsverdeling. Daarbovenop berekende hij de turbulente verspreiding van deeltjes door de fluctuaties in de luchtsnelheid. Hij putte daarbij graag uit de kennis van de groep van Anton van Steenhoven bij Werktuigbouwkunde. Alle deeltjesgeschiedenissen werden verzameld en hiervoor werden met een volledig diffusiemodel in detail de waterprofielen in de deeltjes berekend, evenals de inactivering van een enzym dat we als kwaliteitsparameter hadden gekozen. Dit model berustte op werk wat we eerder met de groep van Solke Bruin, indertijd aan de Wageningen Universiteit, hadden gedaan. Kieviet heeft ook temperatuur, vochtigheid en snelheid van de drooglucht gemeten in de toren en experimenteel de poederkwaliteit onderzocht. Om te voorkomen dat nat poeder de metingen van luchtgrootheden verstoort, heeft hij ook een kleine deeltjesafscheider ontworpen en gebouwd, die inmiddels in diverse laboratoria is nagebouwd. Model en metingen kwamen goed overeen, maar verrassend was dat we in de toren een stroom lucht vonden die direct van de inlaat boven naar de uitlaat beneden liep als een soort kortsluiting. Graag laat ik u enkele resultaten zien: het snelheidsprofiel van de lucht in de toren, de trajecten van drogende deeltjes en de temperatuurverdeling van de lucht (Figuur 8).

AKZO-Nobel had interesse in het sproeidrogen van katalysatoren, met name in de relatie tussen productkwaliteit, procesomstandigheden en samenstelling van de voeding. Een typische katalysatorsuspensie bestond uit een zeoliet, klei en alumina als drager, en silica als bindmiddel. Hier heeft Stefan van der Sanden zowel experimenteel als modelwerk aan verricht. Is het bij voedingsmiddelen zo dat de deeltjes tijdens het drogen min of meer momentaan van vorm veranderen, bij katalysatorsuspensies treedt krimp op tot weer een bepaalde krimpgrens, zoals bij het drogen van klei. In plaats van een homogene massa hebben we hier een poreuze matrix, waarin zich in eerste instantie de suspensie van veel kleinere silicadeeltjes beweegt. Aan het oppervlak ontstaat capillaire zuigkracht die de vaste stof in het deeltje tracht te comprimeren, veel lijkend op wat we met slib gevonden hadden. Uit het drooggedrag van enkelvoudige stoffen in laagjes in een laboratoriumopstelling hebben we succesvol het drooggedrag van mengsels, ook in de sproeidroger, weten af te leiden. Van belang voor de eigenschappen is hoe



figuur 8

Luchtsnelheid, deeltjesbeweging en luchttemperatuur in sproeidroger

de silica zich over de straal van de deeltjes verdeelt tijdens het droogproces. Hiervoor hebben we een multicomponent moleculair diffusiemodel geëxtrapoleerd waarin de wandwrijving van bewegende silicadeeltjes in de kleine poriën is meegenomen. Op dit model, dat we ontwikkelden in ons onderzoek naar membraanscheiding, kom ik later terug. Met het model konden we berekenen dat aan het oppervlak een hoge concentratie van dit bindermateriaal optreedt. In de laatste fase van het droogproces treedt polymerisatie van de silica op door de hoge concentratie en temperatuur; daardoor wordt de structuur vastgelegd. Sproeidrogen was en is een fascinerend onderwerp, maar we liepen tegen een paar praktische grenzen aan. We konden geen financiering vinden voor verdere sproeidroogprojecten en inmiddels was de oude FT-hal verbouwd tot Matrix en was er geen plaats meer voor de sproeidroger. Gelukkig heeft toen DMV-Campina zich het lot van de droger aangetrokken en heeft hij een mooi plaatsje in Veghel gekregen.

Elektrische velden

Mijn voorganger Tinus Tels had als aandachtsgebied milieutechnologie en hij nam deel aan vele samenwerkingsverbanden. Een ervan was met Frans Everaerts en Toon van Kemenade, die een proces wilden ontwikkelen om eiwitten uit varkensmest af te scheiden door middel van grootschalige elektroforese.

In een ruimte tussen twee membranen stroomt de vloeistof met daarin de elektrisch geladen eiwitmoleculen. Aan de buitenzijde bevinden zich twee compartimenten, ieder met aan een zijde een vlakke elektrode. Door hier een elektrische spanning op te zetten, worden de eiwitmoleculen van baan veranderd en komen ze in een opvangcompartiment terecht. Het eiwit zou dan na droging verwerkt worden tot veevoer. Door EU-wetgeving werd deze toepassing onmogelijk. Het principe van de scheiding sprak ons aan, maar dan voor producten uit de biotechnologie en levensmiddelenindustrie. Ontwerper Erik van Nunen heeft met een module in ons lab de eerste mogelijkheden verkend en is daarna doorgeshaan met zijn promotie op proefontwerp. Tal van verschijnselen spelen hier weer een rol, zoals de beweging van geladen moleculen en ionen, dissociatie, diffusie in de membranen, stoftransport in grenslagen en doormenging in de stromingsrichting. Hij ontwikkelde een model waarin dit alles geïntegreerd werd en uit onderzoek aan diverse modules werden de parameters geïdentificeerd voor het model. Hiermee wist hij succesvol aanpassingen in de module te vinden. Hij wist lipase van lysozyme te scheiden en verrichtte een economische evaluatie van de toepassingsmogelijkheden van een dergelijk apparaat. Later zijn bij het NIZO in Ede praktijkexperimenten uitgevoerd voor een drietal industrieën.

Diffusie: vloeistoffen

Bij het werken aan scheidingsprocessen was diffusie een van de belangrijke verschijnselen. De vraag rees of we in staat zouden kunnen zijn om diffusiecoëfficiënten in waterige oplossingen te voorspellen op grond van moleculaire simulaties. Irma van der Ven heeft zich in haar promotie hieraan gewijd. Bij haar start was alleen het GROMOS-programma beschikbaar en waren de toenmalige computers als slakken zo traag vergeleken met nu. Zij heeft twee methoden gebruikt, de niet-evenwichts moleculaire dynamica en de evenwichts moleculaire dynamica met de zogeheten Green-Kubo-relaties. Waar het op neerkomt, is dat je een aantal moleculen plaatst in een ruimtelijke doos van de juiste afmeting en die deeltjes laat bewegen onder de invloed van de wederzijdse aantrekkings- en afstotingskrachten. Je observeert deze beweging door met de computer voortdurend de plaats en snelheid vast te leggen en later hieruit de diffusiecoëfficiënt te berekenen. Het probleem in kwestie was extra moeilijk omdat we met een vloeistof te maken hadden waar veel deeltjes dicht op elkaar zitten en waar elektrostatische krachten tussen de verschillende moleculen bestaan. Deze laatste krachten reiken verder dan de gebruikelijke van-der-Waalskrachten zodat je een groter stuk ruimte in beschouwing moet nemen. Het is op een uitstekende manier gelukt, mede dankzij de bijdrage van afstudeerder Thijs Vlugt. De diffusiecoëfficiënt van het systeem water-methanol bleek goed overeen te komen met gemeten waarden; ook volgde eruit dat de beschrijving van de krachtvelden tussen de moleculen verbetering behoefde. Naast dit theoretisch onderzoek heeft Van der Ven ook experimenteel onderzoek verricht aan binaire en ternaire vloeistofdiffusie met behulp van een Taylor-dispersieapparaat. Hiermee wisten we hoge precisie te bereiken. De zeer goede resultaten waren mede te danken aan Maartje Kemmere en Frank Kieviet, die toen nog student waren.

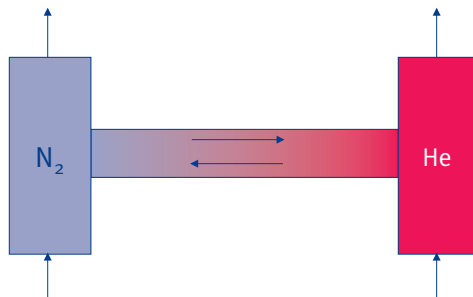
Membraanscheiding en wat eruit volgde

Bij mijn vorige werkgever, Gist-brocades, speelde een probleem bij de opwerking van waterige enzymoplossingen. Naast deze relatief grote eiwitmoleculen bevinden zich in de fermentatievloeistof tal van kleine moleculen zoals zouten en kleurstoffen. Een van de bewerkingsstappen is het concentreren door middel van ultrafiltratie. Hierbij wordt de vloeistof onder druk door een poreuze buis geleid, waarvan de toplaag op de wand openingen heeft van ongeveer 10 nm. De eiwitmoleculen kunnen hier niet doorheen, de kleine moleculen inclusief het water wel. Hierdoor treedt zowel concentratie van de enzymoplossing op als een gedeeltelijke verwijdering van de kleurstoffen. Het bleek dat de mate van verwijdering van kleurstof afhing van de procesvariabelen, zoals circulatiesnelheid van de oplossing en voordruk. Bij mijn aantreden aan de TU/e leek me dit een leuk probleem om te gaan onderzoeken.

Carien van Oers heeft dit probleem experimenteel en theoretisch onderzocht, aan zowel buismodules als aan geroerde batchcellen, met meer of minder grote koolhydraten en eiwitten als opgeloste stoffen, en ook met silicasols. Bij het onderdruk door het membraan heen persen treedt opstuwung van de grotere moleculen op: concentratiepolarisatie. Door de hoge concentratie nabij het membraan wordt de osmotische druk verhoogd, waardoor het effectieve drukverschil over het membraan vermindert; de flux gaat naar een maximum. Bij silica en eiwitten wordt een depositielaag op het membraan gevormd die eveneens de flux limiteert. Door de stroming in de buismodule wordt door turbulentie weer materiaal van de polarisatielaag weggehaald, zodat de dikte afhangt van de stroomsnelheid in de module. De concentratie nabij het membraan is direct van invloed op de fractie die door de smalle openingen gaat, en daarmee op de zogenaamde rejectie. Uit haar onderzoek kwam duidelijk naar voren dat verschillende componenten zoals dextran en poly-ethylene-glycol elkaar beïnvloeden; de drijvende kracht voor transport door het membraan is niet zozeer het concentratieverschil maar het verschil in chemische potentiaal. Deze thermodynamische factoren werden in rekening gebracht door middel van het UNIQUAC-model en voor het transport werden zowel voor de grenslaag als voor de beweging door het membraan Maxwell-Stefanvergelijkingen gehanteerd. Uit het onderzoek volgden ook mogelijkheden om de afscheiding van componenten te beïnvloeden door extra toevoegingen aan de voeding.

Na afloop van dit werk was het de vraag hoe nu verder te gaan. Een van de aandachtspunten was het nauwkeuriger formuleren van het stoftransport in de stromingsgrenslaag. Ten aanzien van het model voor het stoftransport in het membraan bleek het te gaan knagen. Het gebruikte Dusty Fluid Model, een voortzetting van het Dusty Gas Model, voorspelde dat je bij het doorpersen van water door het membraan twee soorten transport zou hebben, visceus en diffusief. Dit ging tegen mijn technologengevoel in, omdat je bij allerlei andere situaties de simpele vergelijking van D'Arcy gebruikt voor visceuze stroming. Ik ben toen de originele artikelen van Mason gaan bestuderen en heb daarmee de grens van mijn expertise behoorlijk overschreden. De artikelen bevatten grotendeels afleidingen op het gebied van statistische mechanica, een complex gebied. Het kostte veel tijd en hoofdpijn, maar het bleek dat de auteurs in hun afleidingen een paar onjuiste stappen hadden ingebouwd om op een gewenst resultaat uit te komen. Het is een ding om een model te verwerpen, het is iets anders om met een betere oplossing te komen.

Tot op dat moment hadden we ons met allerlei natte complexe systemen beziggehouden zoals slib, voedingsmiddelen en afvalwater. We zijn toen de grenzen van beschouwing gaan verleggen door ook de beweging van kleine gasmoleculen in poriën en buisjes te gaan bekijken. Het eenvoudigste voorbeeld hiervan is de tegendiffusie van twee gasen in capillairen zoals onderzocht door Remick en Geankoplis (Figuur 9). Het was verbijsterend dat hiervoor geen goede standaardtheorie bestond, op basis van simpele principes. We hebben ons hierin gestort en over een periode van meer dan tien jaar hebben we hier stapsgewijs voortgang geboekt. Kenmerkend voor de bestaande theorie van multicomponentdiffusie was dat de beweging van het gehele mengsel beschreven werd als stroming waarbij visceuze schuifkrachten balanceren tegen drukgradiënten. Binnen die stroming



figuur 9

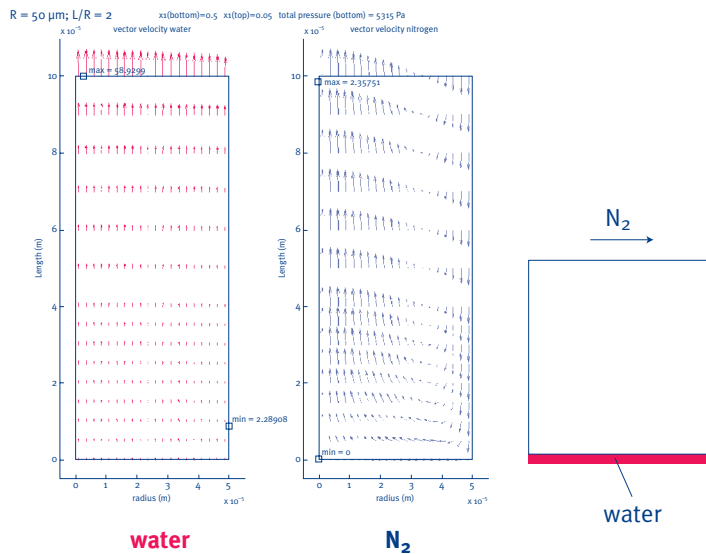
Tegendiffusie van twee eenvoudige gasen in een buisje

wordt dan de beweging van de individuele soorten beschreven als een diffusieproces, waarbij de botsings- of frictiekracht tussen soorten balanceert tegen krachten ten gevolge van concentratieverschillen. Onze aanpak was een meer democratische voorstelling: ieder component heeft een eigen bewegingsvergelijking. Deze vergelijkingen zijn wel gekoppeld door de botsingskrachten tussen de verschillende soorten. De beweging van het totaal is niets anders dan de som van de delen. Visceuze schuifkrachten en diffusieve frictiekrachten staan gebroederlijk naast elkaar.

Een eerste ruwe versie, het Binary Friction Model, verscheen in 1996; dit kon de gemiddelde snelheid van de componenten voor zowel het membraanprobleem als voor diffusie van gassen in buisjes en poreuze proppen goed beschrijven. Tijdens een half jaar sabbatical in Campinas, Brazilië ontwikkelde ik samen met Marcel Geboers in Eindhoven, met wie ik een constant e-mailcontact had, het Velocity Profile Model, weer voor beweging in buisjes en poriën en geïnspireerd door werk van Alexander Kronberg in Twente. Hiermee konden we stromingsprofielen in de buisjes voor de diverse soorten moleculen berekenen. De gemiddelde snelheden bleken goed te kloppen met het eerdere model. Toen ik terug was in Nederland, beleefden we het hoogtepunt van ons droogwerk in de realisatie van het International Drying Symposium in Noordwijkerhout. Niet lang daarna stelde een nieuw financieringssysteem in de faculteit sterke begrenzingsen aan onze activiteiten; onze groep werd aanzienlijk verkleind. Dit gaf aanleiding tot herbezinning over het werk en stelde me in staat om nog dieper te gaan zoeken. Hierbij ben ik ver over de grenzen van mijn eigen kennis heen moeten gaan.

De klassieke theorie van transportverschijnselen was afkomstig uit het werk van Chapman en Enskog begin vorige eeuw, die als eersten een benaderende oplossing voor de Boltzmannvergelijking afleidden. Aan het begin van hun uiterst ingewikkelde afleidingen blijkt de premisse te staan dat de beweging van het geheel van een andere aard is dan die van de aparte soorten. Als amateur ben ik toen aan een nieuwe oplossing begonnen, zonder deze premisse. Dit is gelukt en in 2005 zijn enkele mooie artikelen van ons hierover gepubliceerd. We hadden nu een driedimensionale theorie voor alles. Daaruit volgden onze eerdere modellen en daaruit was te formuleren wanneer de theorie overging in de klassieke theorie. Na het schrijven van het grootste deel hiervan keken we nog eens terug in het oude werk van Maxwell en Stefan en vonden daar dat zij reeds hetzelfde principe van beweging van iedere soort gehanteerd en uitgesproken hadden. Het was in de vergetelheid geraakt door het grote succes van de latere theorie. Door Frank Peters, Martijn Verbeek en Slava Savenko zijn fouten in deze eerste publicaties

gesignaleerd en recent hebben we die recht kunnen zetten in een aanvullende publicatie, waarbij de resultaten overeenind zijn gebleven en nog wat verfijnd zijn. Het is een plezierig gevoel dat we nu een theorie hebben waarmee we op de normale wijze van de fysische technologie de beweging van stoffen in allerlei geometrieën door kunnen rekenen. Het markeert de start van Multicomponent Computational Fluid Dynamics. Een eerste voorbeeld is de beweging van waterdamp en lucht in een zogenaamde Stefan-buis door Raquel Salcedo en Ruben Ruiz uit Alicante. Waar de eenvoudige theorie een eendimensionale simpele diffusie beschouwt, blijkt bij nadere beschouwing circulatie op te treden (Figuur 10).

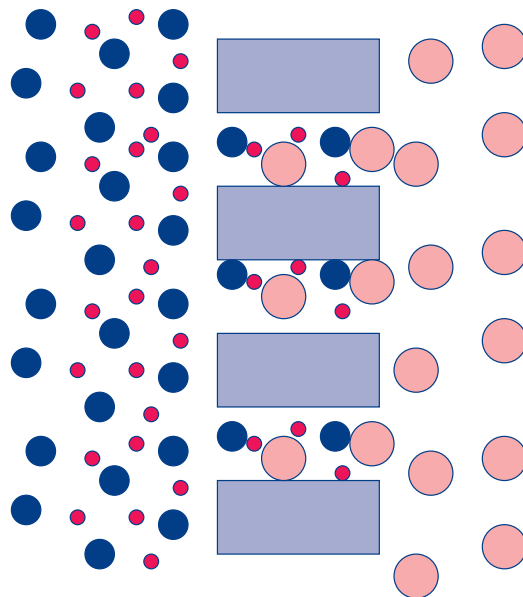


figuur 10

Circulatiepatroon bij Stefan-diffusie

Marcel Geboers was bezig met de ontwikkeling van analytische oplossingen voor ternaire diffusie in poreuze systemen, toen hij op een maandagochtend binnenkwam en vertelde dat hij uit zijn berekeningen zag dat er een nieuwe scheidingsmethode mogelijk was voor gas- of dampmengsels zoals de damp van water-alcohol. Als je aan een kant van een grofporeuze laag, zoals een gesinterde metalen buis, een dampmengsel plaatst, en aan de andere kant koolzuurgas, zullen de moleculen wederzijds naar de andere kant bewegen (Figuur 11). De grote koolzuurmoleculen botsen tegen de grote alcoholmoleculen waardoor deze trager door de wand gaan. Ook botsen de koolzuurmoleculen tegen de

kleine watermoleculen, maar die hebben daar minder last van. Gevolg is dat er relatief meer water dan alcohol uit het dampmengsel wegdiffundeert, zodat we een scheiding hebben. In een eerste proefproject bleek dit te werken en we begonnen een groot project samen met TU Delft en een aantal industrieën: het Fricdiffproject. Bianca Breure heeft een opstelling ontworpen en een serie modellen in een hiërarchie van precisie en complexiteit opgesteld en numeriek uitgewerkt. Een uitgebreide set experimenten bleek goed met deze modellen te beschrijven. Daarnaast heeft zij een exergie- en een procesontwikkelingsstudie uitgevoerd om de mogelijke toepassing te vergelijken met alternatieven. Eigenlijk ook een promotie op proefontwerp, die met lof bekroond is. Ook hier zien we weer de boeiende cirkelbeweging. We hebben het industriële proces van enzymconcentratie, gaan de diepte in om te begrijpen wat er op allerlei schaalniveaus gebeurt en zien dat we de theorie bij moeten stellen, in dit geval erg drastisch. Naast rekenmodellen voor het beoogde scheidingsproces komt er dan ook ruimte voor de ontwikkeling van de mogelijke nieuwe alcohol-water-scheiding; bij Shell en de TU Delft wordt bestudeerd of en wanneer scheidingen van gasmengsel met dit principe haalbaar zijn.



figuur 11

Schematische weergave van het Fricdiffproces

Meer boeiende onderwerpen

Zoals gezegd noopt het bestek van dit college tot begrenzingen in het aantal onderwerpen. Ik wil graag kort hier nog een aantal onderzoeken memoreren, vanwege het plezier en de inzet van de onderzoekers.

Marcho Kouyoumdjiev heeft de competitieve adsorptie van sporencomponenten uit water aan actieve kool bestudeerd en hiervoor nieuwe Maxwell-Stefan-modellen opgesteld. Frans Aarden heeft een density-functionaaltheorie opgesteld die laat zien hoe moleculen in de microporiën zich kunnen nestelen. Kopinga en Pel hebben MRI-experimenten opgezet waarmee de diffusie van nitrobenzeen in kool kon worden gevolgd. Christine Wegmann is nu bezig met de terugwinning van acrylonitril uit proceswater door middel van Solvent Swing Adsorptie, een proces voorgesteld door André de Haan.

Erik van den Bosch heeft elektrostatistische coalescentie onderzocht; het naar elkaar drijven van kleine waterdruppels in olie onder invloed van een elektrisch veld. Hij heeft hierbij ook een vernieuwing geïntroduceerd in de geometrische optica voor de interpretatie van zijn metingen van druppelgrootte. Dit alles met steun van Alan Chesters van Technische Natuurkunde.

De modellering van ruimtelijke en in tijd verdeelde processen hebben we ook toegepast op de hittebehandeling van voedingsmiddelen voor sterilisatie of pasteurisatie. Jasper Kelder heeft in zijn promotie op proefontwerp de complexe stroming met reactie van verstijfselende zetmeeloplossingen in een gespiraliseerde warmtewisselaar gemodelleerd om optimale ontwerpregels vast te stellen. Bij ATO-DLO heeft Carina Ponne de behandeling van voedingsmiddelen met microgolven experimenteel en modelmatig onderzocht en de invloed op activiteit van enzymen en micro-organismen en het behoud van vitaminen bestudeerd. Dit onderzoek deed zij samen met Frans Rombouts uit Wageningen.

Industriële problemen en mogelijkheden

In het voorgaande heb ik een aantal malen gerefereerd aan industriële problemen en ontwikkelingen die interessante vragen voor wetenschappelijk onderzoek oproepen. In mijn oratie in 1989 heb ik reeds aangegeven dat er vele mogelijkheden zijn op het gebied van kennisoverdracht tussen industrie en universiteit. In de afgelopen jaren hebben wij allerlei vormen beoefend. Op grond van goede kennis van modellen voor vochttransport in poreuze materialen hebben afstudeerders en ontwerpers simulatiemodellen ontwikkeld voor papier- en textieldrogen. Kennis over diffusie in voedingsmiddelen is toegepast in optimalisatie van het drogen van medicijncapsules.

Bij sommige projecten is het team van universiteit en bedrijf niet voldoende en is er behoefte aan intermediaire expertise en werkracht, wat ik wel het hand-in-handmodel heb genoemd. Een mooi voorbeeld is de optimalisatie van rijstdrogers bij Masterfoods. In grote torens wordt bovenin vochtige rijst gevoed, die in twaalf uren door een aantal compartimenten stroomt, waarin met lucht van verschillende temperaturen gedroogd wordt. De lange droogtijd is nodig om te voorkomen dat er microbarstjes optreden waardoor de rijst bij het koken papperig zou worden. De vraag was de dimensionering van een nieuwe droger te bepalen. Wij hebben dit project uitgevoerd in samenwerking met Masterfoods en BODEC, een ingenieursbureau opgericht door TU/e-ingenieurs Frank de Boeff en Paul Deckers. Met onze laboratoriummethoden om sorptie-isothermen en diffusiecoëfficiënten te bepalen en met metingen van luchtstromen, temperaturen en vochtigheden in de fabriek, brachten we voldoende materiaal bijeen voor een fysisch model, gevolgd door een simulatiemodel. Hierin zat inbegrepen het doorrekenen van de waterdiffusie in de kleine rijstkorrels, en alle stof- en warmteuitwisselingen tot op de hele schaal van de droger. Hiermee kon de reactie van het droogproces op verschillen in instellingen en niet te vergeten het weer, berekend worden. Het nieuwe ontwerp met dit model was succesvol.

Een ander voorbeeld is het sproeidroogproces van een fijnchemicalie. De capaciteit moest verhoogd worden. Een deel van het probleem zat in een te hoge fractie van het product dat in de luchtuitlaat terecht kwam, waardoor te vaak het filter dichtsloeg. De combinatie van rigoureuze berekeningsmethoden onder aannamen

die juist voldoende precies waren en het bepalen van relevante fysische parameters in het lab van BODEC, gaven inzicht in hoe de deeltjes van verschillende grootte droogden en door de toren bewogen. De simulatie gaf inzicht in hoe het verstuiven beter kon, en gaf inzicht in wenselijke veranderingen aan de lucht-uitlaat. Aanpassing van de droger aan de hand hiervan gaf het gewenste resultaat. Dit alles kon alleen maar door een samenwerking van complementaire expertise vanuit de TU/e, de intermediair en het bedrijf. In andere gevallen heb ik direct als consultant kunnen bijdragen; door simulaties vanachter mijn bureau zijn bijvoorbeeld problemen bij het maken van koffiepoeder in India opgelost.

Het is uitermate plezierig om door dergelijke inspanningen de wetenschappelijke vruchten toe te kunnen passen in mooie ingenieursprojecten en daarmee succesvolle resultaten te behalen.

Onderwijs en ontwerpen

Graag blik ik hier even terug op mijn ervaringen met het onderwijs. Ik ben blij dat ik het vak Stofoverdrachtsprocessen in diverse vormen heb mogen geven, in de illustere voetsporen van Hans Thijssen, Solke Bruin en Tinus Tels. Bijzonder veel plezier heb ik beleefd aan het experiment om de studenten elke keer een stukje meer ontwerp te laten doen in het derdejaarscollege, waarbij allerlei kennis geïntegreerd moest worden om oplossingen voor praktische industriële situaties te vinden. Er was wel wat spanning tussen datgene wat nodig was aan kennis en vaardigheden en wat beschikbaar was. Het verzinnen van leuke probleemstellingen is een plezierige maar ook tijdrovende aangelegenheid. In vroeger tijden werd het collegemateriaal bij wijzigingen in het curriculum steeds aangepast. Gezien de lange traditie in Eindhoven en Wageningen met een uniek raamwerk om via verschillende modelbeschouwingen tot synthese te komen, heb ik de ambitie opgevat om een boek te schrijven dat deze elementen zou conserveren en dat bruikbaar zou zijn voor een groot scala aan onderwijsvormen, van eerstejaars tot promovendi. Ik ben erg gelukkig dat Solke Bruin dit karwei met mij samen wil verrichten. We zijn al een aardig eind gevorderd en we hopen het binnen afzienbare tijd af te ronden.

Ook werkte ik met veel plezier mee aan postacademische cursussen. In 1990 gaven we driemaal een cursus 'Drogen' voor in totaal honderd personen. Hierin kwamen onder meer allerlei fundamentele bod. Wellicht zou het tijd zijn om naast de praktijkgerichte cursussen deze aspecten weer eens voor het voetlicht te laten komen. Samen met Alirio Rodrigues uit Porto gaf ik cursussen Adsorptie, in Brazilië, Angola en hier in Nederland samen met Tom Reith en gewaardeerde gast-sprekers zoals Freek Kapteijn, Thijs Vlucht, Dieter Bathen en industriële collega's. Ik hoop de komende jaren ook ons schriftelijk cursusmateriaal af te ronden.

Aan ons onderzoek is op grote schaal deelgenomen door afstudeerders; sommigen hadden een onderwerp direct uit de praktijk. Het was een voorrecht om hen te begeleiden en te zien hoe zij zich met grote inzet ontwikkelden in de laatste fase van hun ingenieursopleiding.

Twee termijnen gaf ik leiding aan de ontwerpersopleiding Proces- en Productontwerp. Ik nam het van Dick Thoenes over, ben afgewisseld door Bart Drinkenburg en nu ben ik opgevolgd door Jan Meuldijk. Ik heb mijn steentje bijgedragen aan de samenwerking met de opleidingen in Delft en Twente. Ik ontwikkelde een formule om een cursuspakket op te zetten voor het eerste jaar, gebaseerd op kennis en vaardigheden zoals die in het bedrijfsleven nodig zijn. Ik denk dat dit goed gewerkt heeft, mede dankzij de vele docenten uit het bedrijfsleven die cursussen verzorgden. Het aantal plaatsen binnen de faculteit voor ontwerpprojecten is sterk afgenomen; Bart Drinkenburg heeft gezorgd voor het realiseren van betaalde projecten in de industrie. Ik ben er niet in geslaagd om een capaciteitsgroep Ontwerpen te laten vormen en een aantal jaren heeft de ontwerpersopleiding wat los gestaan van de rest van de faculteit, maar wel met betrokkenheid van diverse technologen. Het is een goede zaak dat de ontwerpersopleiding nu ingebed wordt in de Graduate School, zodat ook weer de verbinding met de promotie op proefontwerp gemaakt wordt. De integratie zal veel inspanning kosten, maar biedt ook grote perspectieven. Graag wens ik Jan Meuldijk en Piet Lemstra veel succes hiermee.

Dankwoord

Ik wil deze gelegenheid graag gebruiken om een woord van dank uit te spreken. Allereerst ben ik mijn leermeesters en voorgangers, Hans Thijssen, Kees Rietema en Tinus Tels, dankbaar voor alles wat ik van hen geleerd heb, zowel op het menselijk vlak als over het vak.

Het werk heb ik samen mogen doen met Jan Coumans, Krzysztof Ptasinski, Marius Vorstman, Simon Ottengraf, Ton van der Zanden en Frank Peters als wetenschappelijke stafleden. Voor jullie onvermoeibare inbreng in onderzoek en onderwijs, voor jullie inspirerende begeleiding van promovendi, ontwerpers en afstudeerders en voor jullie collegialiteit ben ik oprecht dankbaar. Ook Gerben Mooiweer dank ik graag van harte voor zijn steeds enthousiaste bijdrage aan tal van computerprogramma's van studenten en promovendi. Ook dank ik oud-FT'ers Jan Meuldijk, Hub Piepers en Johan Wijers voor de vele collegiale contacten. Dank ook aan de promovendi, die eerder al de revue passeerden. Ik heb jullie uitgedaagd om zelf je weg te kiezen. Dit maakte het niet eenvoudig maar jullie hebben hier op een geweldige manier gebruik van gemaakt. Ook van jullie heb ik veel geleerd.

We hebben veel experimenteel werk kunnen doen; dit was alleen mogelijk door de kundigheid, inventiviteit en inzet van onze laboratoriummedewerkers. Graag dank ik Baukje Osinga, Martin Otten, Ton Staring, Paul Jansen en Peter Lipman. Opstellingen met tal van aanpassingen waren alleen mogelijk dankzij inzet en vernuft van Piet Hoskens, Toon van der Stappen, Henk de Goeij, Chris Luijk, Frank Grootveld, Jo Roozen, Piet van Eeten, Karel Janssen, Jovita Moerel en Anton Bombeeck. Ook jullie bedankt!

Met veel plezier kijk ik terug op het werken met ontwerpers en afstudeerders; jullie hebben een grote bijdrage aan het werk geleverd en jullie hielden me jong. Anniek van Bemmelen en Denise Tjallema-Dekker dank ik voor hun niet aflatende zorg voor de hele groep en voor mij; jullie vormden het sociale cement. Willy van Someren en Wil Heugen hebben iedereen lange tijd van materialen voorzien, waarvoor ook dank.

De ondersteuning door de vele professionals van personeelszaken, administratie, organisatie en communicatie was onontbeerlijk voor ons werk; ook hiervoor mijn oprechte dank.

Graag spreek ik ook mijn dank uit aan de collega's binnen en buiten de faculteit met wie ik heb mogen samenwerken, in het bijzonder die in de procestechnologie: Dick Thoenes, Wim Herman de Groot, Solke Bruin, Kees van der Wiele, Bart Drinkenburg, Guy Marin, Jos Keurentjes, Jaap Schouten en André de Haan. Het was een voorrecht met jullie te werken. De kennismaking met de nieuwe collega's Volker Hessel, Hans Kuipers, Martin van Sint Annaland en Maaïke Kroon was plezierig en ik wens hen graag veel succes.

Met plezier zal ik terugdenken aan de groep SCR waar ik tien jaar geleden geadopteerd ben en aan de samenwerking met de landelijke collega's in de OSPT. Dank ook aan het grote aantal collega's uit de industrie met wie ik heb mogen samenwerken.

Voor steun in moeilijke tijden wil ik speciaal dank zeggen aan Paul Deckers, André de Haan en Solke Bruin.

Geacht College van Bestuur, ik ben de TU/e intens dankbaar voor de mogelijkheden die mij geboden zijn, de inspiratie op tal van terreinen en het behouden van de menselijke maat, ook in tijden van grote veranderingen.

Familie en vrienden, heel veel dank aan jullie voor het meebeleven van hoogtepunten, begrip voor mijn vaak onbegrijpelijke werk en steun als ik het nodig had. Ik hoop dat we elkaar vaker en nog lang zullen zien.

Lieve Rosa, Peter en Barbara, Dick, Jem en Maite,
Jullie hebben me voor een groot deel van het leven moeten delen met mijn werk, waar ik te vaak te veel energie en tijd aan besteedde. Dank voor alles, de grens van dit deel is bereikt, we gaan nu een nieuw leven tegemoet.

Ik heb gezegd.

Curriculum vitae

Prof.dr.ir. Piet Kerkhof was van 1 januari 1988 tot 1 december 2010 voltijdhoogleraar Fysische Technologie bij de faculteit Scheikundige Technologie van de Technische Universiteit Eindhoven.

Piet Kerkhof studeerde Scheikundige Technologie aan de TU/e van 1963-1970. Daarna werd Kerkhof wetenschappelijk medewerker bij de vakgroep Fysische Technologie, waar hij in 1975 promoveerde op het drogen van aromahoudende levensmiddelen. Van 1977 tot 1988 werkte hij bij het Nederlands Instituut voor Zuivelonderzoek in Ede, aan de hts in Breda, bij de vakgroep Levensmiddelen- en Bioproceskunde van de Wageningen Universiteit en bij Gist-brocades in Delft. Zijn onderzoeksinteresses als hoogleraar aan de TU/e lagen op het gebied van scheidingsprocessen en de onderliggende transportverschijnselen, vaak voor complexe poreuze systemen. Kern van zijn onderzoek was het zoeken naar integratie van kennis op verschillende schalen om hierdoor processen te kunnen optimaliseren of te vernieuwen. De laatste jaren ging zijn belangstelling uit naar de herformulering van de beschrijving van transportverschijnselen. Aan de TU/e gaf Kerkhof twaalf jaar leiding aan de ontwerpersopleiding Proces- en Product-ontwerp.

Kerkhof ontving de Neways Award voor kennisuitwisseling tussen de TU/e en de industrie. Ook kreeg hij tweemaal de NIRO Award toegekend voor de beste publicatie op het gebied van sproei- en fluid-bed drogen.

Colofon**Productie**

Communicatie Expertise
Centrum TU/e
Communicatiebureau
Corine Legdeur

Fotografie cover

Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp

Grefo Prepress,
Sint-Oedenrode

Druk

Drukkerij Snep, Eindhoven

ISBN 978-90-386-2440-2
NUR 913

Digitale versie:
www.tue.nl/bib/

Bezoekadres

Den Dolech 2
5612 AZ Eindhoven

Postadres

Postbus 513
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11
www.tue.nl