

# **Slimme olievelden**

Rede uitgesproken door

**prof. dr. ir. Jan Dirk Jansen**

op 17 november 2006 ter gelegenheid van de  
aanvaarding van het ambt van hoogleraar in het vakgebied

**Reservoir Systems and Control**

aan de Technische Universiteit Delft,  
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

*Mijnheer de Rector Magnificus, leden van het College van Bestuur, Collegae hoogleraren en andere leden van de universitaire gemeenschap; Zeer gewaardeerde toehoorders;*

Dames en heren,

het doet me veel plezier om u hier vanmiddag iets te mogen vertellen over een onderwerp waar ik, ook met veel plezier, een groot deel van mijn tijd aan besteed. Bij het lezen van de titel van mijn rede, *Slimme olievelden*, hebt u zich wellicht afgevraagd of olievelden wel menselijke eigenschappen hebben. U hebt gelijk om daaraan te twijfelen; wat olievelden slim maakt zijn natuurlijk de mensen die ze vinden, ontwikkelen en beheersen, dat wil zeggen de slimme geologen, de slimme geofysici, en, natuurlijk, de slimme ingenieurs. U hebt zich wellicht ook afgevraagd of er dan ook domme olievelden bestaan. Dat is inderdaad het geval, en dat zou dus moeten betekenen dat er dan ook domme geologen, domme geofysici en zelfs domme ingenieurs zouden zijn, maar omdat dit een feestelijke middag is zal ik het daar verder niet over hebben.

In een tijd waarin alle kranten volstaan met artikelen over duurzame energiebronnen, zoals zon, wind en biomassa, vraagt u zich wellicht ook af waarom iemand zich nog bezighoudt met olievelden. Het antwoord daarop ligt in de snelheid waarmee de wereldenergiebehoefte toeneemt en de snelheid, of beter gezegd het gebrek daaraan, waarmee we alternatieve energiebronnen tot ontwikkeling kunnen brengen. Welvaart is onlosmakelijk verbonden met energieverbruik. Het grootste deel van de wereldbevolking leeft onder omstandigheden die veel, heel veel, slechter zijn dan die van u en mij, en probeert daar uiteraard verandering in te brengen. De grote stijging van de olieprijs over de afgelopen paar jaar, bijvoorbeeld, heeft veel te maken met de sterk toenemende ontwikkeling en de daarmee gepaard gaande vraag naar energie in China. Dat proces stopt voorlopig niet, en ook andere delen van de zich ontwikkelende wereld zullen zich laten gelden. Het antwoord op deze almaar stijgende vraag naar energie bevat verschillende componenten. Ten eerste de noodzaak om aanzienlijk veel minder energie te verbruiken per hoofd van de bevolking in onze geïndustrialiseerde wereld. Onze kinderen en hun kinderen zullen wellicht ons welvaartsniveau kunnen behouden, dankzij technologische vernieuwingen zoals energiezuinige auto's en verbeterde industriële processen. Maar wellicht ook zullen zij een deel van hun welvaart moeten inleveren: de verwarming een graadje lager, de airco een graadje hoger, en een stuk minder vakanties naar verre bestemmingen met de bijbehorende energieverblindende vliegereizen. Als energie duurder wordt zullen we ons ongetwijfeld aanpassen, en in die zin is energie voor persoonlijk gebruik eigenlijk nog steeds veel te goedkoop.

De tweede component van het antwoord op de groeiende vraag naar welvaart en energie is inderdaad het ontwikkelen van meer duurzame energiebronnen dan fossiele brandstoffen. Daarin spelen technologische ontwikkeling, economische noodzaak, en politieke visie belangrijke rollen. Het belang van zonne-energie zal hopelijk sterk toenemen door de ontwikkeling van een volgende generatie zonnecellen met verbeterde efficiëntie. Indirect gebruik van zonne-energie in de vorm van stromende lucht, windenergie dus, zal een kleine bijdrage leveren door de beperkte hoeveelheid stromende lucht rondom de aardbol die we met molens kunnen opvangen. Ook geothermische energie en waterkracht zullen een bescheiden bijdrage leveren. Een grotere vraag betreft het belang van biomassa. In theorie een prachtige oplossing waarbij we zonlicht als energiebron gebruiken, terwijl planten het werk doen om uit CO<sub>2</sub> de koolstofverbindingen te maken die wij vervolgens in onze biodiesel kunnen verwerken. De productie en verwerking van gewassen vergt echter ook energie – met name de productie van kunstmest – zodat het thermodynamische resultaat van de volledige productiecyclus vaak minder gunstig is dan het op het eerste gezicht lijkt. Naast deze schone energiebronnen hebben we natuurlijk ook de mogelijkheid voor energieproductie uit kernsplitsing en kernfusie. De terugkerende belangstelling voor kernsplitsing leidt op het moment weer tot discussies over de voor- en nadelen. Ik denk dat de risico's te beheersen zijn, maar zelfs bij een groeiende rol van kernsplitsing zal dat slechts voor een beperkt deel kunnen bijdragen aan onze energiebehoefte. Waarschijnlijk is dat in de verre toekomst anders voor kernfusie. Een experimentele reactor die, al is het maar af en toe, energie levert in plaats van energie verbruikt is op het moment in aanbouw in Zuid Frankrijk, maar een toepassing op commerciële schaal zal nog vele tientallen jaren op zich laten wachten. Hoewel er dus allerhande mogelijkheden in ontwikkeling zijn als alternatief voor het grootschalig gebruik van fossiele brandstoffen, is het aandeel van alternatieve bronnen nog steeds beperkt, minder dan 15% van de wereldenergiebehoefte\*, en zelfs de meest optimistische scenario's laten een groei zien die het tot zeker het eind van deze eeuw noodzakelijk maakt om ook fossiele brandstoffen te gebruiken. Uiteraard speelt ook hier de energieprijis een dominante rol – veel alternatieve bronnen worden pas commercieel aantrekkelijk bij een olieprijs die boven het huidige niveau ligt, en ook in die zin is de momentane energieprijis eigenlijk nog steeds erg laag.

---

\* 13.1 % of the 2004 world total primary energy supply, *Renewables in Global Energy Supply*, IEA fact sheet, IEA-OECD, September 2006.

Ik noemde twee componenten van het antwoord op de vraag naar stijgende welvaart voor het grootste, voornamelijk niet-westerse, deel van de wereldbevolking: energiebesparing in de westerse wereld, en de ontwikkeling van niet-fossiele bronnen. De derde component, dat mag inmiddels duidelijk zijn, bestaat voor de komende vele tientallen jaren nog steeds uit olie, gas en steenkool. Makkelijk vindbare en goedkoop te produceren fossiele bronnen beginnen zachtjesaan schaarser te worden, maar er is geen sprake van dat onze olie van de ene op de andere dag op is, zoals wel eens wordt gesuggereerd. We hebben inmiddels wel het punt bereikt waarop de jaarlijkse hoeveelheid nieuw gevonden economisch winbare olie- en gasvoorraden lager is dan de jaarlijks geproduceerde hoeveelheid. Economisch winbaar is echter een rekbaar begrip, want bij hogere energieprijzen neemt de hoeveelheid economisch winbare olie en gas ook toe. Bovendien gaat het bij schattingen doorgaans om zogenaamde conventionele olie- en gasvoorraden. Onconventionele olie bestaat uit zeer zware olie, met de consistentie van stroop, of uit teer, en van beide substanties is er voor zover we weten meer in de ondergrond aanwezig dan van de conventionele olie. Grote hoeveelheden onconventioneel gas bestaan in de vorm van hydraten, een soort ijskristallen van methaan, onder de bodem van de diepe oceanen. Ook van steenkool zijn nog geweldige hoeveelheden aanwezig.

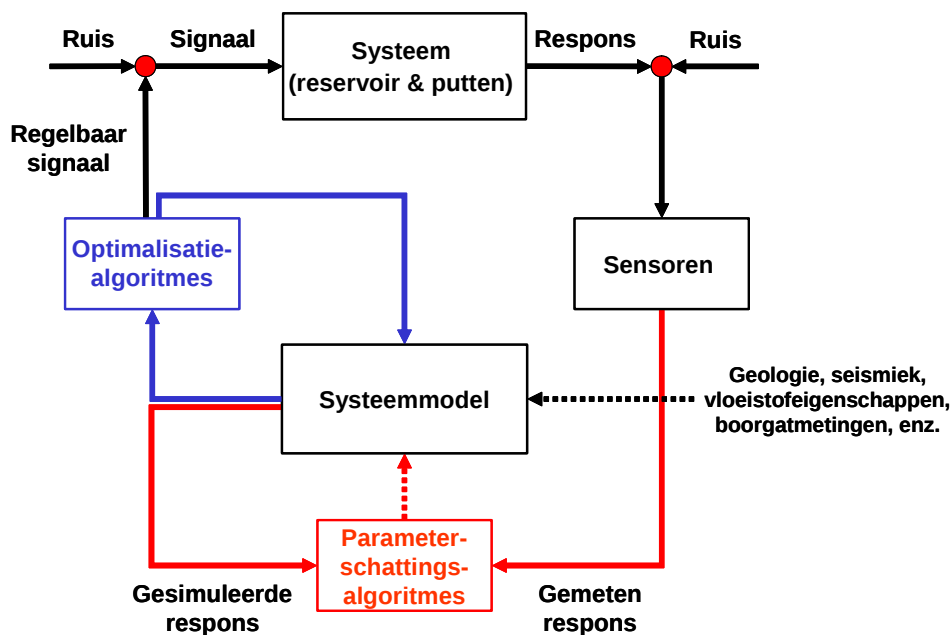
Het lijkt dus zeer waarschijnlijk dat we de komende eeuw te maken krijgen met een groeiend wereldenergiegebruik waarin steeds meer wordt voorzien door alternatieve bronnen, maar waarin fossiele brandstoffen voorlopig een enorm belangrijke rol spelen. Daarbij spelen verschillende aspecten mee waarvan ik er drie kort zal bespreken: geopolitiek, milieu en technologie. Ten eerste, geopolitiek: De toenemende politieke spanning in het Midden Oosten, de terugkeer van de voormalige Sovjet Unie op het wereldtoneel, de groeiende frictie tussen Venezuela en de VS; al deze ontwikkelingen hebben direct verband met de afnemende beschikbaarheid van goedkope bronnen binnen de Westerse wereld. Energie zal als machtsmiddel steeds belangrijker worden, en we kunnen alleen maar hopen dat de politieke ontwikkelingen onze kinderen, en die in de rest van de wereld, een leefbaar bestaan laten. Ten tweede, milieu: CO<sub>2</sub> noemde ik al eerder als bouwsteen voor de koolwaterstoffen die voor de energieopslag in biomassa zorgen. Onze fossiele brandstoffen bestaan uit fossiele biomassa waarin miljoenen jaren zonlicht zitten opgeslagen. Door ons energieverbruik verbranden wij daarom niet alleen in slechts een paar eeuwen wat in miljoenen jaren door de natuur tot stand is gebracht, we laten ook de bijbehorende CO<sub>2</sub> in hoog tempo weer in de atmosfeer terugkeren. Dat deze menselijke activiteit een effect heeft op de complexe processen die het klimaat op aarde bepalen lijdt geen twijfel meer. Hoeveel de aarde zal opwarmen, en wat daarvan de effecten zijn is minder zeker, maar hangende het onderzoek daarnaar neemt de roep toe om

ontwikkeling van technieken voor het aan de bron scheiden en vervolgens opslaan van CO<sub>2</sub>. Dat brengt me bij het derde aspect van de transitie naar duurzame energiebronnen: technologie. Het gaat daarbij om technologie waar ik al eerder over sprak: voor het reduceren van ons energieverbruik, voor het economisch produceren van grote hoeveelheden energie uit duurzame bronnen, en voor het beperken van de milieueffecten van ons fossiele en niet-fossiele energieverbruik. Het gaat ook over technologie voor energietransport: de toenemende veelsoortigheid aan energiebronnen waarmee we te maken krijgen vraagt om een energiedrager die de gebruiker min of meer onafhankelijk maakt van de bron. Waterstof lijkt daarvoor de grootste kansen te hebben, met name omdat de verbranding ervan alleen het schone bijproduct water oplevert. En tenslotte gaat het ook over nieuwe technologie voor het produceren van fossiele brandstoffen, en zo kom ik uiteindelijk toch nog terecht bij de slimme olievelden.

Zoals u waarschijnlijk allemaal wel weet zitten olie en gas niet in grote bellen in de ondergrond, maar in poreus gesteente in de vorm van doorgaans gebarsten en gebogen aardlagen op honderden tot duizenden meters diepte onder het aardoppervlak. Het vinden van zulke reservoirs is het werk van geologen en geofysici, die met behulp van seismische en andere exploratietechnieken ook een ruw idee van de vorm en structuur van een reservoir kunnen krijgen. Voor het produceren van de inhoud zorgen ingenieurs, maar zoals ik later zal toelichten kunnen ze dat niet zonder het geologisch en geofysisch inzicht van hun collega's. Het vinden van reservoirs wordt overigens steeds lastiger omdat de grote "makkelijk" vindbare olievelden inmiddels voor het merendeel gevonden zijn (tenminste dat denken we). Het produceren van olie gebeurt door het boren van kilometers diepe putten die tegenwoordig vaak onder een hoek, tot meer dan 10 kilometer lengte, en soms met meerdere horizontale vertakkingen kunnen worden geconstrueerd. Na het boren van zulke productieputten stroomt de olie aanvankelijk vaak op eigen kracht omhoog. Doorgaans is het echter al snel nodig om water of gas in het reservoir te injecteren, in speciale injectieputten, om de druk op peil te houden en om de olie, voor zover mogelijk, naar de productieputten te verdringen. Zelfs in deze secundaire productiefase blijft de meeste olie echter plakken in de poriën van het reservoir, zodat vaak slechts zo'n 10 tot 50 % van de aanwezige olie wordt geproduceerd. Het verhogen van dit percentage, ook bekend als de *winningsfactor*, is daarom een uitstekend alternatief voor het vinden van nieuwe velden, en het vormt het doel voor verschillende onderzoeksgroepen binnen de olie-industrie en de academische wereld.

Een nieuw aspect hierbij zijn de relatief recent ontwikkelde mogelijkheden om op grote schaal, en zeer regelmatig, metingen te doen in olieputten met behulp van sensoren voor bijvoorbeeld druk, temperatuur of stroming. Daarnaast kan door het herhalen van seismische metingen, de zogenaamde 4D seismiek, ook een indruk worden verkregen van de positie van het olie-water verdringingsfront tussen de putten. Andere metingen betreffen passieve seismiek, dat wil zeggen het luisteren naar ondergrondse scheurvorming, en het meten van de vervorming van de ondergrond, zowel in de put met behulp van gevoelige hellingshoekmeters, als aan het aardoppervlak met behulp van satellieten. Niet alleen zijn de afgelopen jaren de mogelijkheden om te meten sterk toegenomen, ook de mogelijkheid om te regelen zijn gegroeid, met behulp van op afstand bestuurbare kleppen, zowel aan het oppervlak als in de ondergrond. Bovendien geeft de ontwikkeling van almaar krachtiger computers ons de mogelijkheid om steeds complexere stromingsmodellen van de ondergrond te maken. Slimme olievelden, of in het meer gebruikelijke Engels in onze industrie *smart fields* of *intelligent fields*, zijn olievelden waarbij de nieuwe mogelijkheden voor het meten, regelen en modelleren worden gebruikt voor het beter beheersen van de ondergrondse stroming dan tot nu toe mogelijk was. Terugkerend naar de meer conventionele technieken voor oliewinning heb ik nog niet gesproken over de tertiaire productiefase waarin sommige olievelden belanden. Daarbij worden bijvoorbeeld oplosmiddelen in het reservoir geïnjecteerd om de plakkerigheid van de olie te verminderen, of juist toevoegingen aan het injectiewater om daarvan de viscositeit te verhogen om zo dikke olie beter te kunnen verdringen. Andere, thermische, technieken bestaan uit hoge-druk stoominjectie of zelfs gedeeltelijke ondergrondse verbranding om zo zware olie vloeibaar te maken. Met de recente stijging van de olieprijs beginnen tertiaire winningstechnieken weer volop in de belangstelling te komen. Bovendien zijn ze onontbeerlijk om de grote hoeveelheden zware olie en teervoorraden op de wereld te ontwikkelen. Ook hierbij kunnen het toepassen van “slimme” meet- en regeltechniek voor het beheersen van de stromings-, thermische en chemische processen in de ondergrond een grote rol spelen.

Verscheidene oliemaatschappijen en grote aannemers in de olie-industrie doen onderzoeks- en ontwikkelingswerk op het gebied van slimme olievelden. Veel van dit onderzoek richt zich op het verhogen van de olieproductie op korte termijn, wat echter niet altijd in het belang is van het verhogen van de winningsfactor over de gehele levensduur van het reservoir. Veel industriële toepassing betreffen ook min of meer triviale wijzigingen van conventionele productiemethodes waarbij bijvoorbeeld het handmatig afsluiten van een put wordt vervangen door een druk op de knop, maar waarbij geen gebruik wordt gemaakt van de mogelijkheden om werkelijk nieuwe concepten te ontwikkelen.

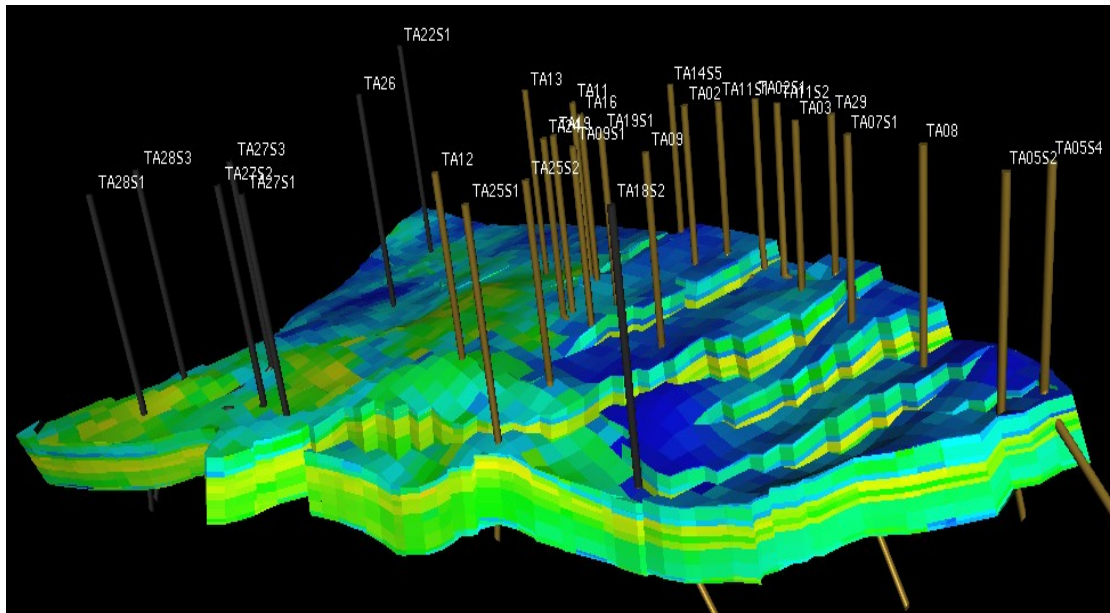


*Figuur 1: Reservoirbeheer weergegeven als een modelgebaseerd gesloten-lus regelproces.*

Ik zal u proberen uit te leggen hoe wij proberen dit probleem op een wat meer fundamentele manier te lijf te gaan. Daarvoor zal ik gebruik maken van een zogenaamd blokdiagram zoals dat wordt gebruikt in de meet- en regel techniek voor de weergave van systemen, de daarin optredende processen en hun samenhang. Figuur 1 toont een blokdiagram voor het olieproductieproces. De bovenste rechthoek geeft het reservoir weer met de bijbehorende putten. Tijdens de ontwerpfase van de ontwikkeling van een olieveld worden één of meerdere computermodellen gebouwd voor simulatie van stroming in het reservoir, die zijn weergegeven door de centrale rechthoek. De geometrie van het reservoir wordt afgeleid uit seismische metingen, waarbij door reflecties van akoestische signalen een beeld van de ondergrond wordt gevormd. De gesteente-eigenschappen die van belang zijn voor de stroming van olie, gas en water worden afgeleid uit geologische waarnemingen en een heel scala van fysische boorgatmetingen. Een probleem daarbij is de grote heterogeniteit van de ondergrond, dat wil zeggen de grote variatie van de gesteente-eigenschappen, die er voor zorgt dat metingen in een put een beperkte ruimtelijke geldigheid hebben. Onze ondergrondse stromingsmodellen kennen daarom een grote onzekerheid in de parameterwaarden. In het bijzonder betreft dat de porositeit, en de permeabiliteit, dat wil zeggen de doorlatendheid van het gesteente. In praktijk worden daarom vaak enige tot enige tientallen verschillende modellen gebouwd. Op grond van deze reservoirmodellen is het mogelijk om het productieproces te optimaliseren. Dit betreft bijvoorbeeld het bepalen van het aantal en de plaats van de putten, of het bepalen van de optimale waterinjectie- en olieproductie-

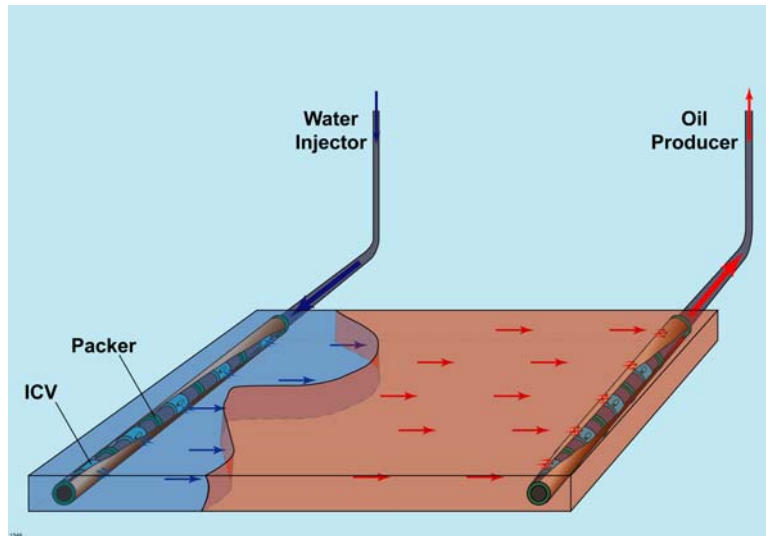
debieten in het verloop van de tijd. Het optimalisatieproces is in Figuur 1 weergegeven in blauw. Traditioneel worden gedurende de olieproductie periodiek een beperkt aantal metingen uitgevoerd om een indruk te krijgen van de drukken en debieten in de putten, doorgaans maandelijks of eens per kwartaal, en doorgaans met een beperkte nauwkeurigheid. Zoals ik al eerder aangaf voorzien we in onze slimme olievelden echter een grote hoeveelheid metingen die op regelmatige basis informatie verstrekken over de drukken en debieten in of zelf tussen de putten. Door het combineren van de gemeten respons van de sensoren en de gesimuleerde respons van de reservoirmodellen krijgen we een indruk van de mate waarin de modellen de werkelijkheid juist weergeven; of beter gezegd slecht weergeven, want meestal blijkt na de eerste metingen dat onze kennis van de ondergrond toch nog weer slechter is dan we aanvankelijk dachten. Met behulp van algoritmes voor *data-assimilatie* kunnen we vervolgens de parameters in onze modellen aanpassen om een betere weergave van de productiegeschiedenis te krijgen, en, belangrijker, hopelijk ook een betere voorspelling van de toekomstige productie. Het parameterschattingsproces is in Figuur 1 weergegeven in rood.

De belangrijkste thema's in ons onderzoek zijn dus optimalisatie van grote modellen onder onzekerheid, de blauwe lus, en het aanpassen van die modellen met behulp van data-assimilatie, de rode lus. Voor ik daar verder op in ga zal ik eerst wat zeggen over de belangrijkste fysische processen die een rol spelen bij reservoirstroming. De stroming van gas en vloeistoffen door een poreus medium kan worden beschreven door een stelsel niet-lineaire partiële differentiaalvergelijkingen. Voor het eenvoudige geval van een reservoir dat alleen olie en water bevat kan de toestand worden beschreven met twee toestandsgrootheden, bijvoorbeeld de oliedruk en de waterverzadiging. De belangrijkste parameters in de vergelijkingen zijn porositeit en de permeabiliteit van het gesteente, waarvan ik al eerder aangaf dat ze enorm kunnen variëren over het reservoir. De vergelijkingen zijn sterk niet-lineair omdat de stromingsweerstand voor de afzonderlijke fasen, dat wil zeggen olie en water, een functie zijn van de verzadigingen van die fasen. Onder een aantal milde aannames kan het stelsel vergelijkingen worden herschreven als twee afzonderlijke stelsels, één voor de oliedruk en één voor de waterverzadiging, gekoppeld door de coëfficiënten. De drukvergelijking blijkt dan een licht niet-lineaire parabolische (diffusie) vergelijking te zijn met coëfficiënten die een functie zijn van de waterverzadiging. De verzadigingsvergelijking is een sterk niet-lineaire parabolisch-hyperbolische (niet-lineaire convectie) vergelijking met een convectieterm die afhankelijk is van de drukgradiënten. (Dat was even voor de wiskundigen in de zaal.)

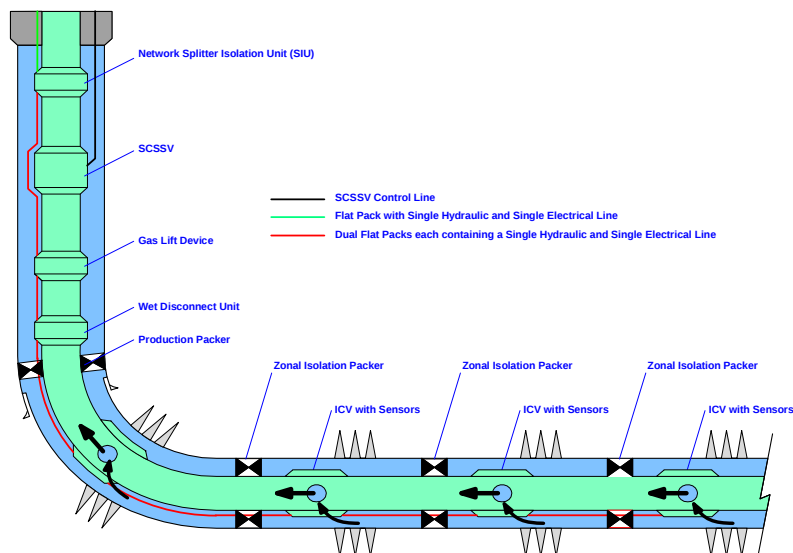


*Figuur 2: Driedimensionaal reservoirmodel met injectieputten (zwart) en productieputten (bruin). De kleuren van het reservoirmodel geven de doorlatendheid van de verschillende gesteentes aan.*

Voor het oplossen van de vergelijkingen voor realistische configuraties wordt altijd gebruik gemaakt van een numerieke benadering, doorgaans met behulp van zo'n tienduizend tot een miljoen roosterpunten, waarin de toestand wordt gesimuleerd voor enige honderden tot duizenden tijdstappen. Een typische reservoirsimulatie neemt dan ook uren tot dagen in beslag. Figuur 2 geeft een beeld van een realistisch reservoirmodel met zo'n 40.000 roosterpunten en een fors aantal injectie- en productieputten. In het verdere verloop van mijn verhaal zal ik gebruik maken van een aanzienlijk eenvoudiger, tweedimensionaal voorbeeld dat is weergegeven in Figuur 3. Aan de rechterkant van het reservoir wordt olie geproduceerd met behulp van een "slimme" horizontale productieput die is voorzien van een binnenbuis met een aantal van elkaar gescheiden segmenten waarvan de instroming uit het reservoir afzonderlijk kan worden gecontroleerd; zie ook Figuur 4. In werkelijkheid bestaan er op het moment enige honderden van dit soort slimme putten. Aan de linkerkant van het reservoir wordt water geïnjecteerd met een eveneens slimme horizontale put. We gaan er van uit dat het in beide putten bovendien mogelijk is om redelijk nauwkeurige metingen te doen van de drukken en debieten in elk segment. Figuur 5 geeft een indruk van de permeabiliteit van het model, en maakt duidelijk dat het reservoir een hoogdoorlatende zone bevat. Hierbij valt te denken aan een voormalige zanderige rivierbedding in een omgeving van fossiele klei. Het valt niet moeilijk voor te stellen hoe de stroming zou verlopen als het reservoir met twee conventionele horizontale putten zou worden geproduceerd, zonder kleppen om de stroming in afzonderlijke segmenten te regelen.

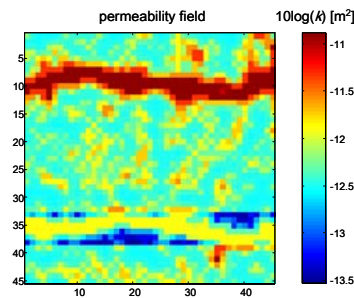


*Figuur 3: Eenvoudig tweedimensionaal reservoirmodel met een horizontale injectieput en een horizontale productieput.*

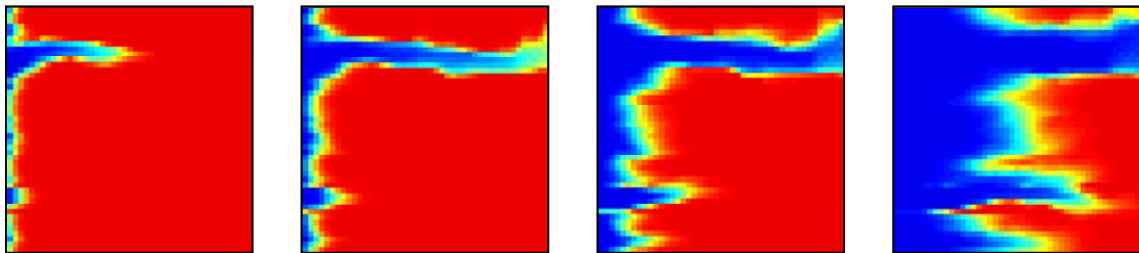


*Figuur 4: Schematische weergave van een “slimme” horizontale put voorzien van een binnenbuis (groen) en een buitenbuis, en kleppen om de instroom vanuit het reservoir in afzonderlijke segmenten van de put te kunnen controleren. De grijze driehoekjes stellen openingen voor die het reservoir verbinden met de (blauwe) ruimte tussen de binnen- en buitenbuis. De cirkeltjes stellen de op afstand bedienbare kleppen voor.*

Het water zou in dat geval de weg van de minste weerstand kiezen zoals weergegeven in de vier plaatjes in Figuur 6. In theorie zou, voor een homogeen reservoir en een stabiel verdringingsproces, na het injecteren van één porievolume water alle olie uit het reservoir verdwenen moeten zijn, corresponderend met een winningsfactor van één. Door de heterogene doorlatendheid blijft er echter een aanzienlijke deel van de olie achter.

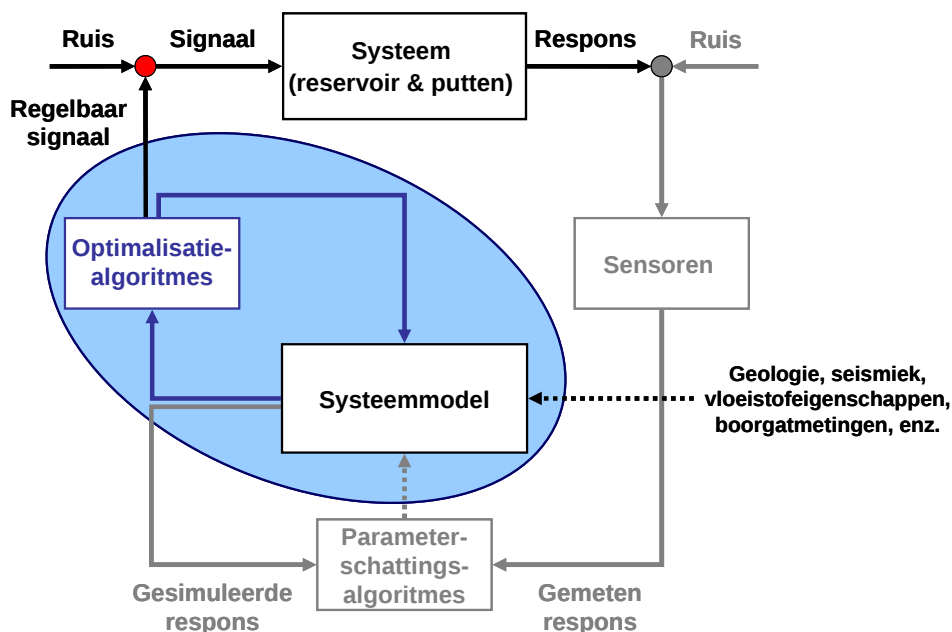


*Figuur 5: Doorlatendheid (permeabiliteit)  $k$  in de roosterpunten van het reservoirmodel van Figuur 3. De eenheden van  $k$  zijn  $m^2$  en zijn weergegeven op een logaritmische schaal.*



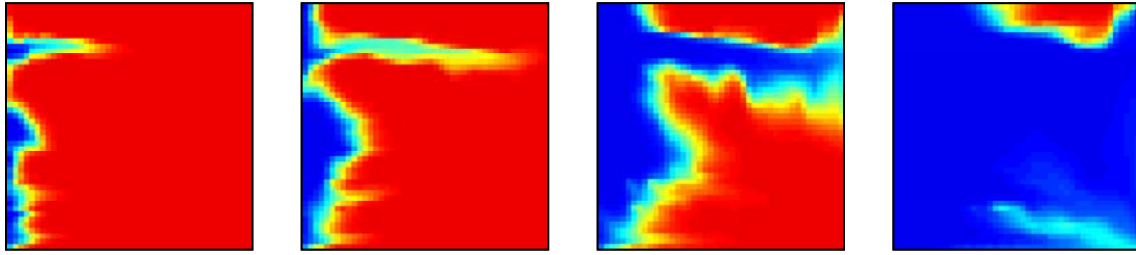
*Figuur 6: Waterverzadiging van het reservoir op vier verschillende tijdstippen voor een conventionele productiestrategie. De vier plaatjes corresponderen met vier geïnjecteerde porievolumes. Van links naar rechts: 0.1, 0.4, 0.7 en 1.0 porievolumes geïnjecteerd. Rood: olie; blauw: water.*

De vraag is nu of het mogelijk is om een betere verdeling van de debieten over de segmenten van de injectie- en productieputten te bepalen. Het doel is daarbij om een zo hoog mogelijke winningsfactor te bereiken over een van te voren gedefinieerd tijdsinterval. Als we ook de kosten van waterproductie meerekenen is een economische doelfunctie meer geschikt. Als eerste stap zullen we daarbij kijken naar wat mogelijk is als we de structuur en de eigenschappen van het reservoir werkelijk zouden kennen, met andere woorden als we het proces zouden uitvoeren als een *open-lus* optimalisatie, dus zonder terugkoppeling van metingen; zie Figuur 7. Daartoe maken we gebruik van een optimalisatietechniek die in de literatuur bekend staat als *optimal control*. Oorspronkelijk ontwikkeld voor het besturen van vliegtuigen en raketten, blijkt deze methode ook uitstekend geschikt voor het ontwerpen van een optimale aansturing van onze injectie- en productieputten. Het mooie van deze techniek is dat het mogelijk is om met een beperkt aantal extra computersimulaties een onbeperkt groot aantal stuurparameters te optimaliseren.

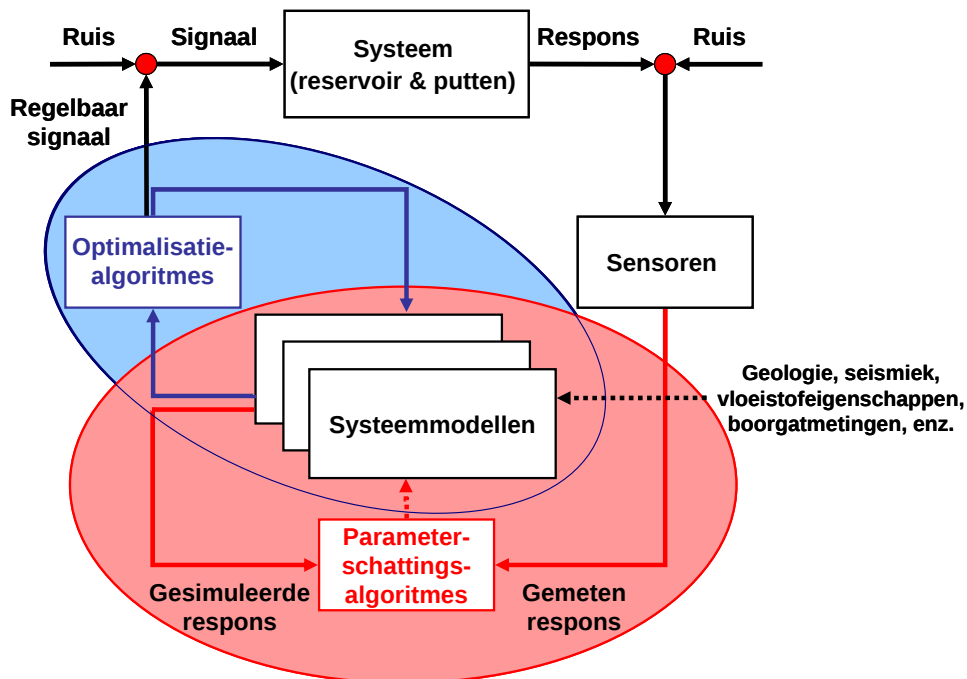


*Figuur 7: Open-lus reservoirbeheer, dat wil zeggen zonder gebruik te maken van metingen, onder de (onrealistische) aanname dat het model perfect is.*

De prijs die daarvoor moet worden betaald is het formuleren en programmeren van een zogenaamde *adjoint* of toegevoegde vergelijking – en mijn eerste promovendus, Roald Brouwer, heeft daar dan ook een harde dobber aan gehad, maar met succes, en veel van de plaatjes die ik u laat zien komen uit zijn proefschrift. Als voorbeeld beschouwen we de geoptimaliseerde injectie- en productiestrategie voor het eerder genoemde tweedimensionale reservoir. Figuur 8 toont de waterverzadiging in het reservoir voor het geoptimaliseerde geval. Uit vergelijking met Figuur 6 blijkt dat na injectie van één porievolume water een aanzienlijk grotere hoeveelheid olie uit het reservoir is verdrongen. Wat niet zichtbaar is in deze figuren, maar wat een essentieel aspect van onze aanpak vormt, is de variatie van de drukken en de injectie- en productiedebieten in de putsegmenten gedurende de tijd. Dit is anders dan voor de conventionele reactieve strategie waarbij de drukken en debieten niet proactief worden gewijzigd. Het is overigens niet zo dat we voorzien dat het openen en sluiten van de benodigde regelkleppen volledig automatisch zal gebeuren – er zal altijd menselijke inzicht nodig blijven om de computervoorspellingen te verifiëren. Uiterst aanvechtbaar in onze optimalisatie is verder de veronderstelling dat het reservoirmodel de werkelijkheid voldoende nauwkeurig weergeeft. We weten namelijk vrij zeker dat het model niet klopt. Een meer betrouwbare aanpak maakt daarom gebruik van een model, of, beter nog, een hele verzameling modellen, die regelmatig worden aangepast aan de hand van metingen.

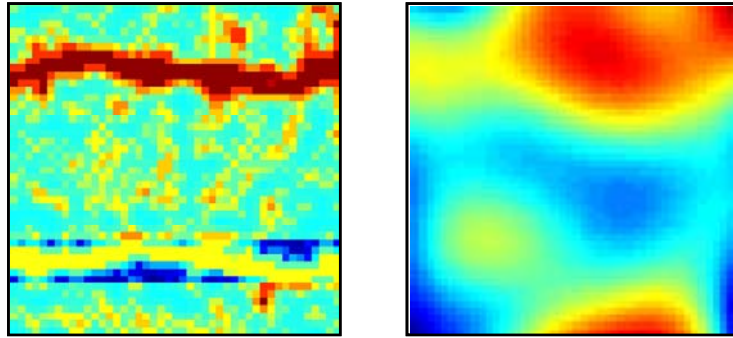


*Figuur 8: Waterverzadiging van het reservoir op vier verschillende tijdstippen voor een geoptimaliseerde productiestrategie. De vier plaatjes corresponderen met vier geïnjecteerde porievolumes. Van links naar rechts: 0.1, 0.4, 0.7 en 1.0 porievolumes geïnjecteerd. Rood: olie; blauw: water.*

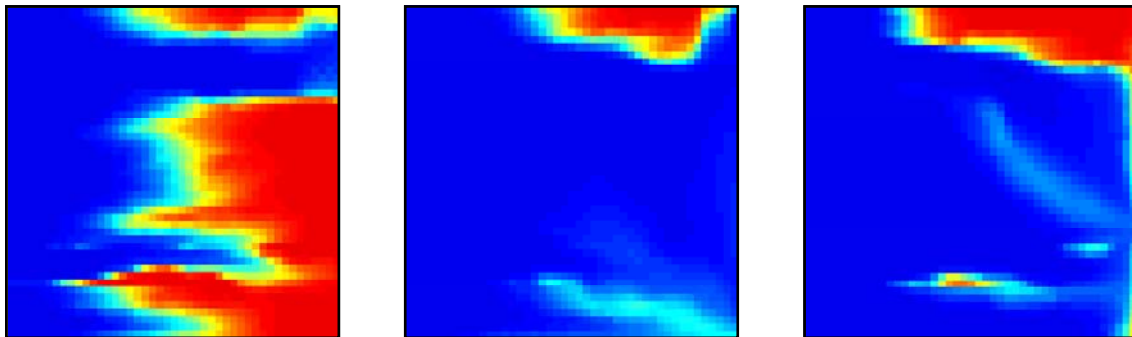


*Figuur 9: Gesloten-lus reservoirbeheer, met gebruikmaking van metingen en van meerdere modellen die verschillende voorstellingen van de werkelijkheid geven.*

Dit is dan de *gesloten-lus* aanpak waarbij optimalisatie wordt gecombineerd met parameterschatting, zoals geschematiseerd in Figuur 9. Voor het aanpassen van de modellen kunnen we kiezen uit verschillende methodes, waarbij met name de zogenaamde data-assimilatietechnieken uit de meteorologie en de oceanografie veelbelovend zijn. Wij doen dan dus aan een soort ondergrondse weersvoorspelling. En, anders dan in de Bilt, proberen we in Delft dat ondergrondse weer vervolgens ook nog te beïnvloeden. In Figuur 10 ziet u een schatting van het reservoirmodel met behulp van de zogenaamde *ensemble Kalman filter* techniek, waarbij een groot aantal – in ons geval honderd – reservoirmodellen wordt gebruikt om de onzekerheid in onze kennis van de ondergrond weer te geven.



*Figuur 10: Links: “Werkelijke” doorlatendheid (identiek aan Figuur 5). Rechts: Geschatte doorlatendheid, verkregen door middeling van de honderd reservoirmodellen, die elk meerdere malen zijn aangepast aan de hand van metingen gedurende het productieve leven van het reservoir.*



*Figuur 11: Waterverzadiging van het reservoir na injectie van één porievolume water, met gebruik van drie verschillende productiestrategieën. Links: Conventionele productie (zoals in Figuur 6). Midden: geoptimaliseerd met behulp van een perfect reservoirmodel (zoals in Figuur 8). Rechts: Geoptimaliseerd met behulp van honderd uit metingen geschatte reservoirmodellen. Rood: olie; blauw: water.*

Figuur 10 geeft dan ook eigenlijk het gemiddelde van honderd aangepaste modellen weer, en met enige fantasie is daarin de hoogdoorlatende laag van het werkelijke reservoir terug te vinden. Erg veelbelovend lijken deze resultaten echter niet en het was voor ons daarom een grote verrassing om te zien hoe goed de optimalisatie op grond van deze slechte modellen uitpakt. Figuur 11 laat de resultaten zien van de drie productiestrategieën: 1) conventioneel, 2) op basis van een perfect model, en 3) op basis van honderd met behulp van metingen aangepaste modellen. Deze vroege resultaten van ons onderzoek hebben we inmiddels verscheidene malen kunnen reproduceren voor andere, meer complexe reservoirconfiguraties. De grote vraag is natuurlijk waarom zulke relatief simpele modellen zo'n relatief goed resultaat opleveren. Het voert te ver om daar in detail op in te gaan, maar het heeft te maken met de vraag in hoeverre het mogelijk is om ondergrondse stroming te beheersen, dat wil zeggen te observeren en te sturen, met behulp van een beperkt aantal putten. De combinatie van

diffusie- en niet-lineaire convectieprocessen die daarbij een rol spelen maken de systeemtheoretische analyse van dit probleem verre van trivaal, en voorlopig hebben we het precieze antwoord nog niet gevonden. We kunnen inmiddels wel aantonen dat de dynamica van ondergrondse stroming vaak heel nauwkeurig kan worden beschreven met een klein aantal, zeg honderd, vrijheidsgraden, of zoals wij dat zeggen dat de dynamica leeft in een laagdimensionale ruimte. We kunnen dat echter pas nadat we eerst die stroming in een hoogdimensionale ruimte hebben gesimuleerd. Als u gewend bent aan de driedimensionale ruimte om u heen, dan klinkt honderd misschien niet als heel weinig, maar ingenieurs leven met hun gedachten met gemak in een duizenden dimensies, terwijl wiskundigen zelfs van een oneindig aantal dimensies niet wakker liggen.

Het is u inmiddels hopelijk duidelijk geworden dat het beheersen van ondergrondse stroming de werkelijke opgave is die we proberen op te lossen in onze slimme olievelden. Als tegenspeler hebben we daarbij te maken met de natuur die, in een samenspel van zwaartekracht, viskeuze krachten en capillaire krachten, de vloeistoffen in een uiterst complexe, en voor ons merendeels onbekende, ondergrond gevangen probeert te houden. Voor de komende jaren hopen we onze technieken voor optimalisatie en data-assimilatie verder uit te breiden tot meer complexe reservoirs, bijvoorbeeld met breuken en scheuren, meer complexe winningstechnieken, bijvoorbeeld de injectie van polymeren of  $\text{CO}_2$ , en nieuwe meettechnieken waarover ik al eerder sprak. Het is overigens niet zo dat we aan alleen simpele modellen genoeg zouden hebben. De resultaten die ik u liet zien waren voor een vaste configuratie van injectie- en productiepunten in het reservoir. We zijn nu echter ook begonnen met het ontwikkelen van technieken om de locatie en het traject van putten te optimaliseren, en daarvoor zijn geologisch inzicht en geologische modellen onontbeerlijk. Daarbij moeten u bedenken dat het verband tussen geometrie en stroming complex is: hier geldt dat kleine verschillen in de ondergrond grote gevolgen kunnen hebben. Ter vergelijking: een badkuip met een klein gaatje ziet er op het eerste gezicht net zo uit als een badkuip zonder lek, maar dit kleine verschil in geometrie betekent wel het verschil tussen een leeg en een vol bad. Een moeilijkheid is ook dat veel geologische concepten eerder beschrijvend dan kwantitatief zijn. Aan de andere kant zijn geologen in staat om met één blik op de resultaten te zien of onze aanpassingen van een reservoirmodel al dan niet geologische onzin zijn. Een heel andere onderzoeksvraag waar we ons mee bezig houden is in hoeverre het loont om af en toe de waterinjectie in het reservoir te variëren, bijvoorbeeld in de vorm van een trage blokgolf of zelfs een aan-uit operatie. Dat heeft dan tijdelijk een lagere olieproductie tot gevolg, maar leidt wellicht tot meer informatie over het reservoir en daardoor op termijn toch tot een beter resultaat. Daaraan gerelateerd is de vraag waar we precies moeten meten, hoe vaak, en met welke

nauwkeurigheid. We werken aan wiskundige technieken om hierop een systematisch antwoord te geven, evenals aan methodes om de onzekerheid in onze antwoorden te kwantificeren. Tegelijkertijd proberen we voor ogen te houden dat onze antwoorden uiteindelijk moeten leiden tot technieken waarmee petroleumingenieurs in de praktijk beslissingen kunnen nemen. Dat leidt dan automatisch tot de vraag hoe we onze strategie van gesloten-lus optimalisatie het beste in praktijk kunnen brengen. Daarbij hebben we te maken met een operationele organisatie van de olie-industrie die vaak meer gericht is op het vandaag produceren van zoveel mogelijk olie, dan op het maximaliseren van de winning over de levensduur van het reservoir. Ik heb het tot nu toe niet over geld gehad, maar om u een indruk te geven: het ontwikkelen van een olieveld kost vaak vele honderden miljoenen tot tientallen miljarden dollars. Zelfs het boren van een enkele put kost al gauw een miljoen, terwijl putten van tientallen miljoenen, in grote waterdieptes, geen uitzondering zijn. De benodigde meet- en regelinfrastructuur die nodig is om een olieveld “slim” te maken kost ook vele miljoenen, maar daar staat tegenover dat het verhogen van de winningsfactor met een paar procentpunten een aanzienlijk bedrag vertegenwoordigt. Zelfs kleine olievelden bevatten vaak nog tientallen miljoenen vaten aan olie, en met een olieprijs van tientallen dollars per vat lijken kleine percentages dan al gauw economisch aantrekkelijk. Voorlopig zijn er echter nog een heel aantal technische en operationele hordes te nemen voor we onze ideeën in praktijk kunnen brengen. Daarbij waren de voorbeelden die ik liet zien simplistisch, en zullen in realistische situaties de mogelijkheden voor optimalisatie beperkter zijn. Ik hoop u echter toch te hebben kunnen overtuigen dat onze gesloten-lus optimalisatie in slimme olievelden een veelbelovende aanpak is.

Voor zover ik weet waren wij in de afdeling Geotechnologie hier in Delft de eersten om dit onderzoek systematisch aan te pakken. Het initiatief daarvoor kwam van Cor van Kruijsdijk van de TU Delft, en Pieter Kapteijn van Shell, die rond 1999 de eerste promovendus aanstelden. Rond dezelfde tijd begon ik mijn onderzoek op dit gebied, half in dienst van mijn werkgever tot dan toe, Shell, en half in dienst van de TU. In de afgelopen zeven jaar is onze onderzoeksgroep aanzienlijk gegroeid en omvat nu 9 promovendi die zich bezighouden met het beheersen van ondergrondse stroming, terwijl nog eens 6 promovendi elders aan de TU andere aspecten van slimme olievelden onderzoeken. Ook het instellen van de leerstoel *Reservoir Systems and Control*, die ik nu sinds een jaar bezet, is een teken van de groei van ons onderzoek. Vanaf het eerste begin hebben we daarbij gezocht naar inspiratiebronnen voor ons werk buiten de klassieke petroleumwinning. In het bijzonder heb ik intensief contact met het *Delft Institute for Systems and Control*, waar mijn collega's Okko Bosgra en Paul van den Hof zich bezighouden met de meet- en

regeltechniek die door ingenieurs wordt gebruikt voor het beheersen van industriële processen, en met het *Delft Institute for Applied Mathematics* waar mijn collega Arnold Heemink onderzoekt hoe grote numerieke stromingsmodellen het best kunnen worden aangepast na het beschikbaar komen van metingen. Veel van onze promovendi hebben dan ook twee promotoren, en vaak ook twee werkplekken. Er zijn de afgelopen jaren ook verscheidene samenwerkingsverbanden ontstaan op het gebied van slimme olievelden. Het eerste, het *Virtual Asset Learning and Understanding* project, kortweg VALUE, is een door Shell gefinancierde samenwerking tussen de TU Delft, het Massachusetts Institute of Technology (MIT), Shell en TNO. Voor het Nederlandse gedeelte, met een waarde van rond de 4 miljoen Euro, ontvingen wij in 2003 een 50% subsidie van SenterNovem, waarbij het project als eerste uit een competitie van 50 deelnemers naar voren kwam. Geïnspireerd door het succes van VALUE werd in 2004 door TNO, Shell en de TU Delft een kenniscentrum op het gebied van slimme olievelden in het leven geroepen onder de naam *Integrated Systems Approach to Petroleum Production*, afgekort als ISAPP. Met een levensduur van tenminste 5 jaar en een voorlopig budget van boven de 20 miljoen Euro voor TNO en de TU Delft is het duidelijk ISAPP een belangrijke rol in ons onderzoek speelt. Daarbij richt ISAPP zich niet alleen op de reservoirtechnologie, maar ook op het beheersen van meer kortstondige dynamische processen in bijvoorbeeld putten en scheidingsvaten. Bovendien wordt in het kader van ISAPP onder leiding van mijn collega Joachim Gross van de *Process and Energy* groep ook het gebruik van de ondergrond als chemische reactor onderzocht, met het idee dat sommige scheidings- of omzettingsprocessen wellicht kunnen profiteren van ondergrondse condities zoals hoge druk en temperatuur. Als ideaalbeeld kunt u daarbij denken aan het ondergronds verwerken van olie of gas zodat de putten alleen waterstof produceren en verder alle afvalstoffen, inclusief CO<sub>2</sub> ondergronds blijven. Hoewel utopisch, en dus onrealistisch, geeft dit beeld wel aan wat de langetermijnvisie voor slimme olievelden is. Daarbij richt mijn eigen onderzoeksgroep zich dan vooral op het creëren van de ondergrondse infrastructuur. Verdere financiële ondersteuning ontvangen wij van het *Delphi* consortium voor geofysisch onderzoek, en het *Kuwait Institute for Scientific Research*. Afgezien van samenwerking binnen de TU Delft heeft onze groep ook regelmatig contact met de universiteiten van Stanford en Bergen, en met het Noorse Rogaland instituut in de vorm van uitwisseling van promovendi en medewerkers. Die buitenwereld heeft natuurlijk niet stil gezeten, en min of meer concurrerende onderzoeksgroepen hebben zich inmiddels gevormd in Stanford en meer recentelijk in Trondheim. Hoewel de hete adem van deze andere groepen goed voelbaar is, durf ik te stellen dat we nog steeds voorop lopen.

Dames en heren, ik nader het slot van mijn verhaal. Het protocol voor deze oratie stelt dat het niet de bedoeling is om een groot aantal mensen te bedanken. Gelukkig heeft het protocol met de geologie gemeen dat het eerbiedwaardig is maar niet kwantitatief, zodat ik gelukkig zelf mag uitmaken wat een groot aantal is. Ik dank in de eerste plaats Cor van Kruijsdijk en Pieter Kapteijn, ik noemde ze al eerder, die de visie hadden om dit onderzoek te beginnen en die me het vertrouwen gaven mijn eigen onderzoekslijn uit te zetten. Ben van den Brule, Michiel Groeneveld en Mark Anderson, allen van Shell, en Peter Currie van de TU Delft, hebben mij vrijheid, en waar nodig steun en advies gegeven om mijn gedeelde baan tot een succes te maken. Op het gebied van de reservoir engineering ben ik dank verschuldigd aan Hans Bruining, die altijd bereid was om zijn kennis met groot enthousiasme over te dragen. Mijn promovendi en afstudeerders van de afgelopen jaren wil ik bedanken voor hun inzet en hun inspiratie: Het is hard werken om jullie bij te houden maar het is erg de moeite waard. Tot slot mijn gezin: De kreet “Pappa maakt sommen” is iets waar jullie aan gewend zijn, de kreet “Mamma maakt sommen” trouwens ook, maar gelukkig weten jullie me er altijd weer aan te herinneren dat er nog zoveel meer is in het leven. Ik hoop van harte dat jullie dat nog vaak en langdurig blijven doen.

Ik heb gezegd.