

# Geef me de ruimte

Rede uitgesproken bij  
het aanvaarden van het ambt van  
hoogleraar

## Stochastic image analysis

aan de faculteit  
Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica  
van de  
Uniciteit Twente  
op donderdag 20 september 2007

door

Prof.dr.ir. Alfred Stein

# Introductie

**Mijnheer de rector magnificus**  
**Mijnheer de rector van het ITC**  
**Dames en heren**

... et fortunae, quantum possumus, imperare conamur,  
nostrasque actiones certo rationis consilio dirigere.<sup>a</sup>

*Spinoza, Ethica*

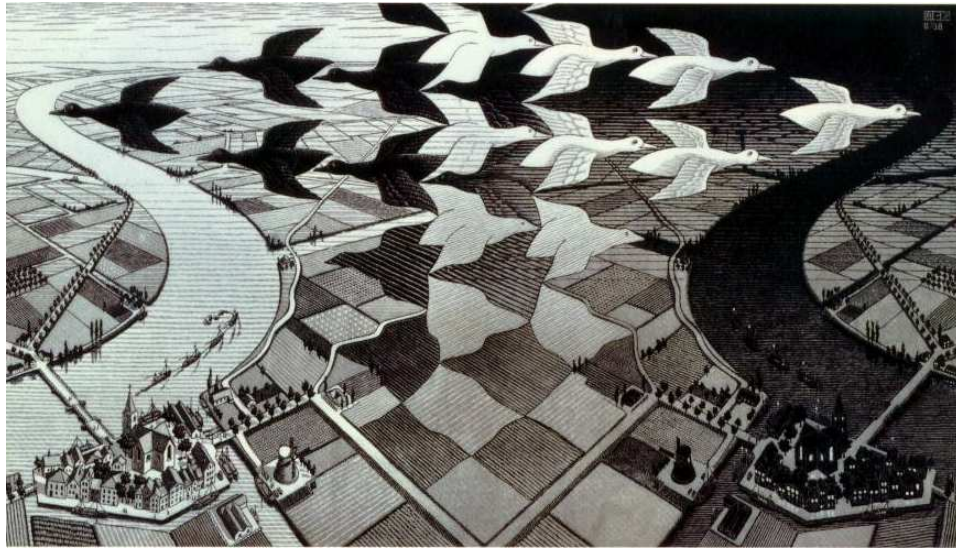
---

<sup>a</sup>Wij proberen zo veel mogelijk de baas over het toeval te worden en ons handelen op een redelijk plan te baseren.

Met veel genoegen ga ik in op het verzoek van het college van bestuur van de Universiteit Twente om een oratie uit te spreken ter gelegenheid van het aanvaarden van mijn aanstelling als hoogleraar in de stochastische beeldanalyse. Ik heb de rede de titel meegegeven: *Geef me de ruimte*. Ik hoop dat ik u kan laten zien hoe deze titel past bij de kern van de leerstoel en de manier waarop ik deze denk in te vullen. In de komende circa 45 minuten wil ik proberen om u een indruk te geven van dit fascinerende werkveld: de problemen, de oplossingen en de uitdagingen.

Voordat ik met de wetenschap begin is het goed om het woord aan de kunst te laten. In dit geval richten we ons op sterk door wiskunde geïnspireerde kunstenaar M.C. Escher, met zijn beroemde litho 'dag en nacht' (zie figuur 1). We zien links de dag en rechts de nacht en de vogel die het allemaal waarneemt. Maar waar het mij omgaat is de verticale lijn in deze litho: 'weiland wordt vogel'. Hiermee geeft de kunstenaar een impressie waar we in ons vakgebied mee bezig zijn. De vogel die over het land vliegt probeert zijn objecten te kennen, hij gebruikt zijn kennis van het land en ziet met een enkele oogopslag wat voor zijn overleven van belang is. Wat hij is en wat hij ziet worden één. Hij kiest de ruimte, de ruimte om te vliegen en de ruimte om zijn kennis te vergaren.

Laten we overstappen naar de wetenschap en als eerste de leerstoel bekijken: stochastische beeldanalyse. Deze term bevat een aantal verschillende begrippen. In de eerste plaats komen we het toch wat lastige woord 'stochastisch' tegen. Daarnaast gaat het over beelden en tenslotte over analyses.



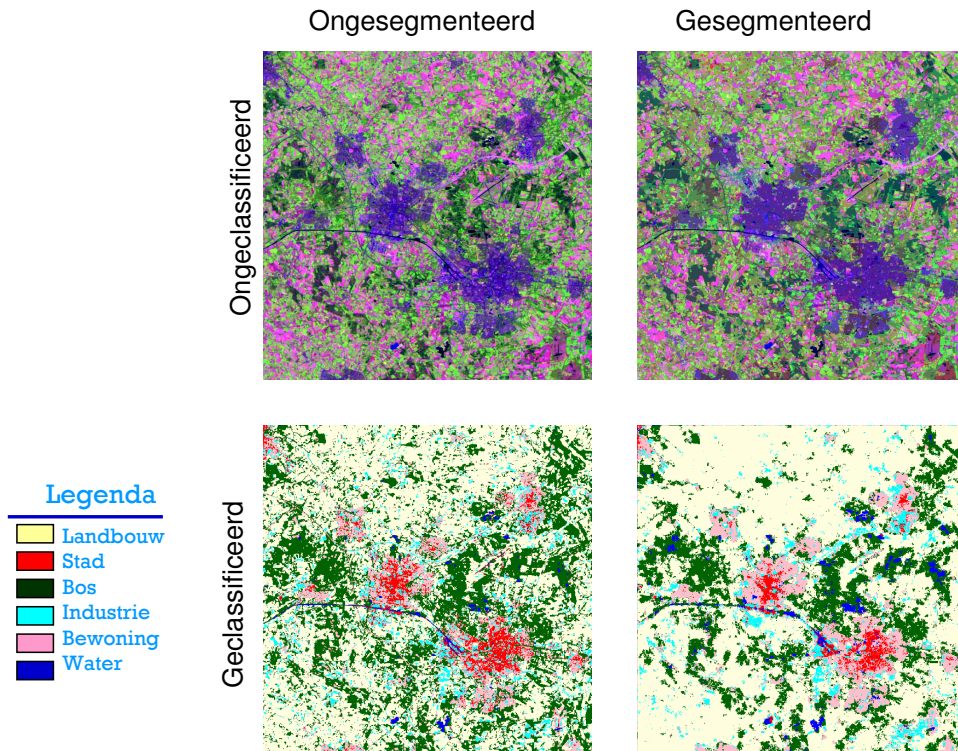
Figuur 1: De houtsnede 'Dag en nacht' van M.C. Escher uit 1938.

In de stochastische beeldanalyse richten we ons op het verkrijgen van maximale informatie uit beelden met behulp van stochastische methoden. De stochastiek (van het Griekse woord  $\sigma\tau\omicron\chi\alpha\zeta\omicron\mu\alpha\iota$  = gissen of mikken) houdt zich bezig met het modelleren van onzekerheden. Het woord 'GIS' is in dit verband veelbetekenend. Stochastiek komen we bijvoorbeeld tegen bij het gooien van een dobbelsteen, waarbij we de waarden 1 tot en met 6 kunnen krijgen, onder eerlijke condities allemaal met een kans  $1/6$ . En bij het voorspellen van uw aankomsttijd bij deze lezing. En bij de lengte ervan. De stochastiek kom je overal tegen!

## Deel 1: Beeldanalyse

Laten we, na deze ouverture, nu als eerste thema naar beelden kijken. Als voorbeeld nemen we een satellietbeeld van Twente als in figuur 2 dat eerder is geanalyseerd door Kirsten de Beurs [1]. We zien verschillende kleuren, die, voor alle duidelijkheid (al hoef ik dat in dit digitale tijdperk nauwelijks meer te vermelden), worden gegenereerd door getallen. De kleur groen correspondeert met een wat hoger getalletje dan de kleur rood, of andersom. Het is dus niet zo dat de grond of de stad er zo uitzien. Vaak zullen we objecten op deze beelden willen onderscheiden. Daarvoor zijn verschillende

methoden ter beschikking. Globaal kunnen we een onderscheid maken in 'segmentatiemethoden en classificatie', in 'filters' en in 'wiskundige morfologie' [2]. Ik zal me in deze voordracht concentreren op de eerste van deze methoden. Iedere pixel correspondeert met een locatie in het terrein. Segmentatie betekent dat we pixels willen samenvatten in segmenten. Zo kunnen we de pixels die allemaal de waarde 37 hebben een segment laten vormen. Deze segmenten kunnen groot of klein zijn en ze kunnen overal op het beeld voorkomen. Maar we kunnen ook wat variatie toestaan, door de pixels met waarden tussen 35 en 40 een segment laten vormen. Ook kunnen we kijken naar een regelmatig patroon van waarden. In figuur 2 zien we een segmentatie die met de 'split-and-merge' procedure is uitgevoerd. We zien dan dat er een ruis-arm beeld ontstaat. Hiermee hebben we segmenten, maar nog geen objecten met een betekenis.



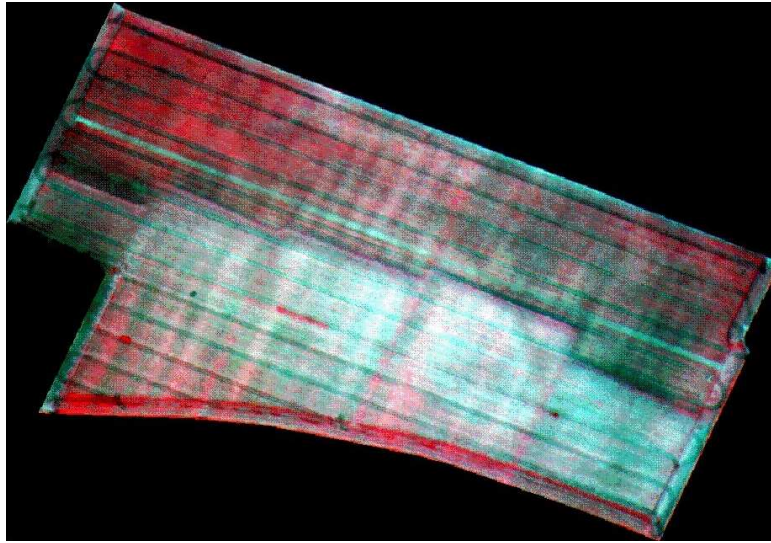
Figuur 2: Een satelliet beeld van Twente (linksboven), gesegmenteerd (rechtsboven), geclassificeerd (linksonder) en zowel geclassificeerd als gesegmenteerd (rechtsonder).

Deze objecten willen we graag identificeren uit al deze gegevens. Daartoe wordt als regel een classificatie uitgevoerd. Dat kan zowel op het oorspronkelijke beeld als op het gesegmenteerde beeld. De classificatie van het oorspronkelijke satellietbeeld laat grote en kleine objecten zien. De kleine objecten kunnen aan een bepaalde werkelijkheid voldoen, maar er is ook nogal wat misclassificatie, bijvoorbeeld veroorzaakt door pixels die sterk op elkaar lijken, of door atmosferische verstoring, etc. Classificatie van het gesegmenteerde beeld laat grotere objecten zien, met minder ruis. Maar dus ook met minder kleine objecten. Dit kan wat verder van de werkelijkheid afstaan, maar kan voor interpretatie en beleidsondersteuning nuttig en waardevol zijn.

Toch zijn we er hier niet mee. Zolang de objecten scherp en helder zijn, zijn er niet zoveel problemen. We weten wat een huis is, we weten, althans hier in Nederland, wat een bos en wat een weiland is. Maar er bestaan ook minder scherpe objecten, objecten die inherent onzeker zijn. Hier komen we terecht op een punt dat wel enige aandacht vergt. We willen vaak zoveel moois uit een beeld halen, maar: zit het er allemaal wel in? In wezen zijn hier twee wegen om verder te gaan: een stochastische benadering, waarbij we bijvoorbeeld uitgaan van 'random sets', of een fuzzy benadering.

Heel veel objecten, of het nu om een stad gaat, een weg, hebben een vage definitie. Soms kunnen we die natuurlijk wel scherp krijgen, maar soms ook niet. Het begrip 'bos' is bijvoorbeeld in heel veel landen totaal verschillend gedefinieerd. Een 'verontreinigde rivier' is een vaag concept met vaak een geleidelijke overgang naar een 'schone' rivier (ook een vaag concept), milieu-indicatoren zijn bij uitstek vage concepten - iedereen heeft wel een idee over 'global change', maar een uniforme definitie is lastig, misschien wel onmogelijk. In een fuzzy benadering proberen we de onzekerheid mee te nemen bij de inventarisatie en bij de behandeling. Dat geeft wel problemen, bijvoorbeeld bij de opslag van objecten in databases, bij het definiëren van operatoren ('de omvang van een vaag object'), maar daar zijn wel oplossingen voor te bedenken. Het heeft, ten opzichte van een stochastische benadering, het voordeel dat we in de taal van alledag kunnen blijven praten. Een stochastische benadering is echter beter gefundeerd en daarmee helderder en eenvoudiger.

Laten we overgaan naar het volgende voorbeeld. Figuur 3 laat een opname van een perceel met suikerbieten van een boerenbedrijf in Zuid-West Nederland. Het terrein is zo'n 7 ha groot en de opnames zijn gemaakt vanuit een onbemand vliegtuigje. De gegevens zijn enkele jaren geleden gepubliceerd in een artikel van Virginie Epinat [3].



Figuur 3: Een satelliet beeld van een suikerbietenperceel in Zuid-Holland.

De resolutie is hier in de orde van grootte van  $1 \text{ m}^2$ . Tegenwoordig is dat een resolutie die we ook met satellietopnames wel halen. Met de verschillende banden wordt gerekend, zodat de meest relevante informatie verschijnt. En hier wordt het interessant: *hoe komen we van de getallen naar de informatie*. Daarnaast is er veel detailinformatie zichtbaar: er zijn lichte en donkere strepen, er is een witkleuring, er is een patroon zichtbaar dat zijn oorzaak moet hebben, kortom we zien al zaken, maar we kunnen slechts speculeren over de oorzaken. Wat een boer belangrijke objecten vindt, misschien wel het voorkomen van gewas stress, is voor een historisch geograaf misschien niet zo interessant: die ziet de lijnen in de lengterichting van het veld en misschien nog wel een oude verdeling tussen vroegere percelen.

Er zijn hier veel ontwikkelingen gaande, zoals benaderingen met random fields, particle tracking en meer moois. Maar ik wil nu graag verdergaan met het tweede thema, namelijk: wat kunnen we doen met een betrekkelijk beperkte hoeveelheid ruimtelijke gegevens.

## Deel 2: de stochastiek van ruimtelijke gegevens

Ruimtelijke gegevens bestaan uit een variabele  $Z(\underline{s})$  en waarnemingen aan die variabele. Voor deze  $Z$  kunnen we de reflectie nemen zoals die wordt

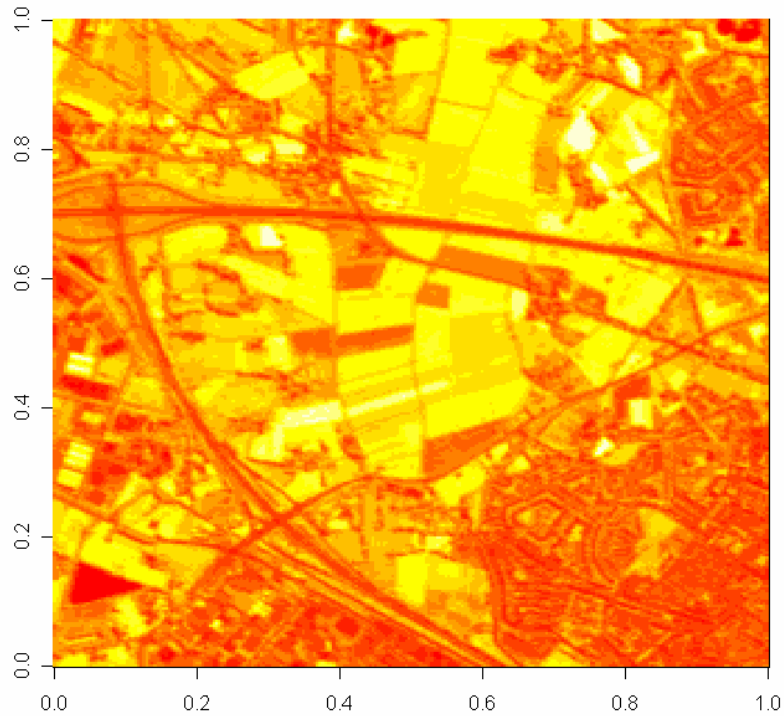
geregistreerd door een satellietsensor, maar ook een neerslaghoeveelheid, de grondwaterdiepte, etc. De  $\underline{s}$  geeft dan plaats aan, bijvoorbeeld in een coördinatenstelsel. We gaan ervan uit dat we deze variabele kunnen meten, althans in principe, op een eindig aantal locaties. Het is essentieel dat de variabele gekoppeld is aan de ruimte. Dat levert in eerste instantie problemen op bij de analyse, want statistici willen graag een gemiddelde bepalen, een spreidingsmaat, kansen kunnen berekenen, etc. Daartoe is het belangrijk dat we de gegevens kunnen randomiseren. Maar: een neerslagmeting op een punt is daar gemeten en niet elders. Ook is het niet zo eenvoudig om herhalingen te krijgen: de metingen zijn gedaan op een bepaald moment (of over een bepaald interval) in de tijd. Er zijn, kortom, verdere stappen nodig.

Als regel gaan we nu verder met een stochastisch kader. Dat wil zeggen dat we een aanname maken over de onzekerheden in de waarnemingen. We maken dan bij voorkeur een onderscheid tussen wat we stochastisch noemen en wat we als vast beschouwen. Laten we eens enkele benaderingen nalopen.

**Geostatistiek.** Het eerste onderdeel heet met een mooi woord geostatistiek. Hierbij op de achtergrond speelt de theorie van stochastische toevalsfuncties. Er is daarbij sprake van een meting, van toeval in die meting, van een vaste positie in het land en van ruimtelijke samenhang. Deze benadering is gebaseerd op het baanbrekende werk van Georges Matheron in Fontainebleau in de jaren 70 en 80 [4] en voert terug op de kansmodellen van Kolmogoroff [5]. Wat we in deze ruimtelijke variatie steeds aantreffen is de variatie als functie van de afstand tussen plaatsen: waarnemingen dicht bij elkaar lijken sterker op elkaar dan waarnemingen verder van elkaar af. De mate waarin deze afhankelijkheid optreedt kan verschillen per variabele. Daarnaast zullen we een aanname moeten doen over de stationariteit. Er zijn bepaalde eigenschappen van de gegevens die niet veranderen als we alle locaties  $\underline{s}$  over een zelfde afstand  $\underline{h}$  en in dezelfde richting, verplaatsen. Zo zal de verwachte waarde op een niet-bezocht punt niet veranderen, als we tenminste ook de coördinaten van dat punt over dezelfde vector  $\underline{h}$  verschuiven. Onder bepaalde verdere aannames zal ook de kans dat een drempelwaarde wordt overschreden op dat punt niet veranderen. Er kan daarnaast sprake zijn van een globale trend, die we uiteraard in de analyses willen meenemen.

Als eerste kijken we naar een van de banden van een Spot5 beeld. Spot is een van oorsprong Franse satelliet. Het systeem is operationeel sinds 1986; inmiddels zijn we aangeland bij Spot5, die in mei 2002 is gelanceerd. De pixels

hebben een resolutie van ongeveer 10 m. Het beeld betreft een opname uit de om

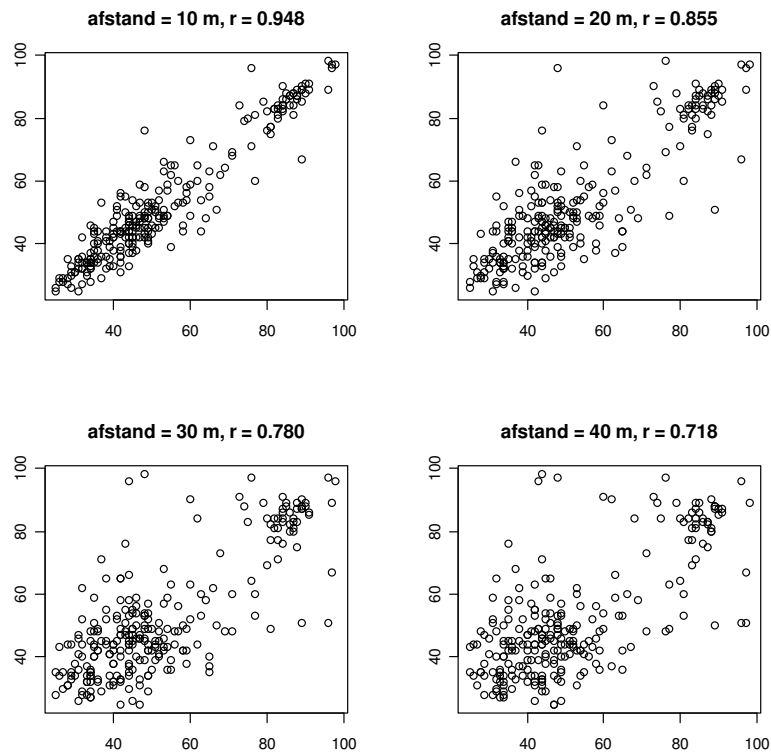


Figuur 4: Een uitsnede van een SPOT5 beeld uit de omgeving van Enschede.

Ik heb nu een willekeurige rij, de 37e, geselecteerd en laat vervolgens enkele correlatiecoëfficiënten zien. De correlatiecoëfficiënt is bekende maat die relaties tussen reeksen getallen aangeeft. Een correlatiecoëfficiënt ter grootte 1 betreft een perfecte positieve lineaire relatie (een identiteit), als deze 0 is, is er geen relatie, als deze -1 is is er een perfecte negatieve relatie. Door de waarden steeds één stapje op te laten schuiven, kan de correlatiecoëfficiënt bepaald worden als functie van de afstand tussen pixel lokaties. Ik laat het hier dus zien als een functie van de veelvouden van 2.5m (figuur 5).

Het moge duidelijk zijn dat de correlatie voor een zeer korte afstand erg hoog is (0.928). Deze neemt dan vervolgens snel af met toenemende afstand tussen de pixel locaties. Als we dit herhalen voor een andere rij of een andere kolom zien we steeds hetzelfde zich aftekenen.

Waar zit hier de stochastiek? Deze bevindt zich in de waarde van de



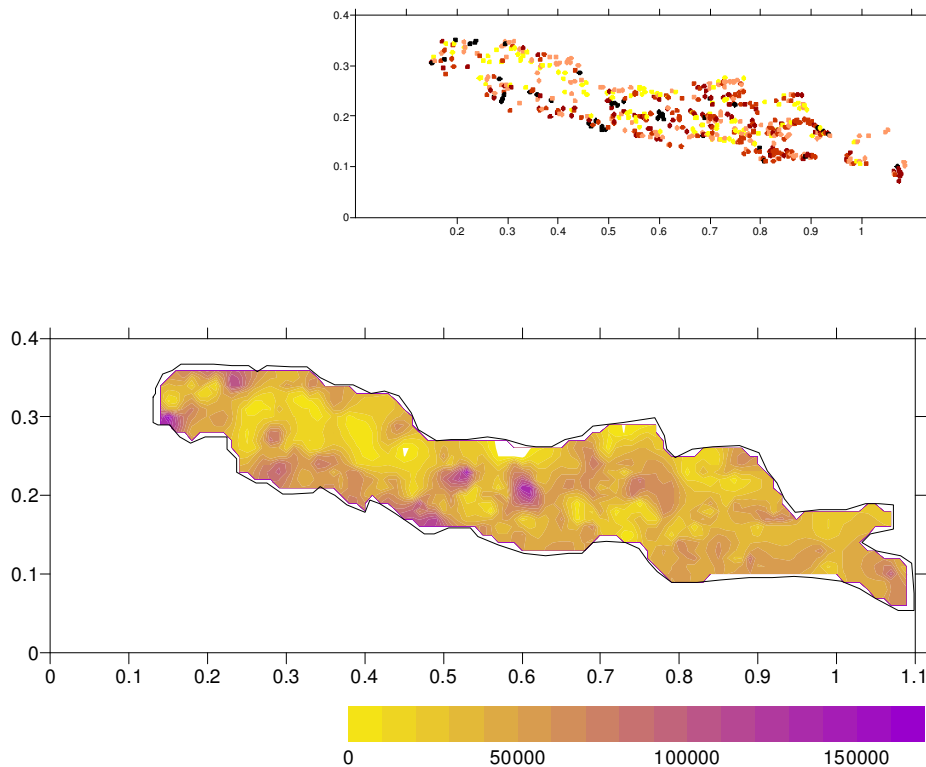
Figuur 5: Correlaties tussen pixelwaarden voor afstanden van 10 m (linksboven), 20 m (rechtsboven), 30 m (linksonder) en 40 m (rechtsonder) tussen locaties. Duidelijk is de afname te zien van de coorelaties bij toenemende afstand.

waarnemingen. De uitkomst van een meting wordt mede bepaald door de uitkomsten in de omgeving. De spreiding van de uitkomsten is altijd kleiner als er waarnemingen vlakbij zijn. Er is hier sprake van een voorwaardelijke verwachting. Stelt u zich voor dat rondom u, om wat voor reden dan ook, met een dobbelsteen steeds een drie of een vier wordt gegooid, dan is de kans dat uw worp ook 3 of 4 wordt groter dan wat je bij onafhankelijke waarnemingen zou verwachten en is de spreiding kleiner. Hoe dan ook, we gaan er van uit dat de waarnemingen onzeker zijn, maar dat de locatie exact bekend is.

Er kan daarnaast een verband bestaan met andere variabelen[6]. In mijn voorbeeld waar ik het had over  $Z(\underline{s})$  kunnen we voor de  $Z$  ook een *aantal* variabelen noteren: maximum temperatuur, minimum temperatuur, neerslag, etc. We moeten dan wel gaan kijken hoe de relaties tussen deze variabelen

zijn. Vroeger, vóór de ontwikkelingen in ruimtelijke variabelen, gebruikten we de correlatie. Tegenwoordig modelleren we ook deze afhankelijkheid op basis van de afstand tussen waarnemingen. Het is het concept *afstand* dat de ruimtelijke stochastiek zijn specifieke eigenschappen geeft.

Laten nu eens kijken naar een belangrijk voorbeeld: methaan emissies op het eiland Java (zie figuur 6). Op Java wordt in grote hoeveelheden rijst verbouwd en een van de gassen die in rijstvelden ontsnappen is methaan ( $\text{CH}_4$ ). Methaan is een van de belangrijke actoren binnen global change. Het verdwijnt vanuit de bodem en de oceanen in de atmosfeer. Met de groei van de wereldbevolking is de uitstoot van methaan toegenomen. Het gedrag is complex, de bijdragen van verschillende bronnen is onzeker. De bijdrage van ruimtelijke stochastiek ligt erin om de effecten van methaan emissie kwantitatief vast te stellen, inclusief de onzekerheden.



Figuur 6: Methaan emissies in rijstvelden van Java met de waarnemingen (boven) en de (geinterpoleerde) kaart (onder).

Ik heb voor u een kaartje gemaakt, met daarop in verschillende kleuren de hoeveelheid methaan. Het betreft hier zo'n 500 waarnemingen en gemiddelde waarden op kleine veldjes. Ieder veldje meet zo'n 30 bij 30 meter, terwijl Java 132000 km<sup>2</sup> groot is. Een eenvoudig sommetje leert dat de oppervlakte van de waarnemingen dus een 140-miljoenste van de oppervlakte beslaat - het is alsof we op basis van zo'n 11 personen een uitspraak over de wereldpopulatie willen doen. En toch is het anders: we weten al vaak wat meer van ruimtelijke processen die de methaan concentraties verklaren. Op basis van ruimtelijke afhankelijkheid kunnen we dan een kaart maken, waarbij we deze afhankelijkheid essentieel gebruiken. Omdat de afhankelijkheid specifiek is voor iedere ruimtelijke variabele, is het karteren met het meenemen van de ruimtelijke variatie variabele-specifiek geworden. In de tachtiger en negentiger jaren van de 20<sup>e</sup> eeuw is hier al veel aan ontwikkeld, maar nieuwe uitdagingen zijn er voldoende.

Recent is de PhD student Iswar Das begonnen met het vervaardigen van risicokaarten. Op zich is dat niet zo heel nieuw, want we kunnen al lang kaarten produceren waarop een percentiel, of de voorwaardelijke verwachting wordt weergegeven dat een limiet wordt overschreden. Maar we realiseren ons steeds beter dat 'risico' een lastig concept is. Iswar richt zich op 'landslides': het risico betreft dan bijvoorbeeld de kans op voorkomen van zo'n modderstroom en de effecten daarvan op een gebouw, waar al dan niet mensen verblijven.

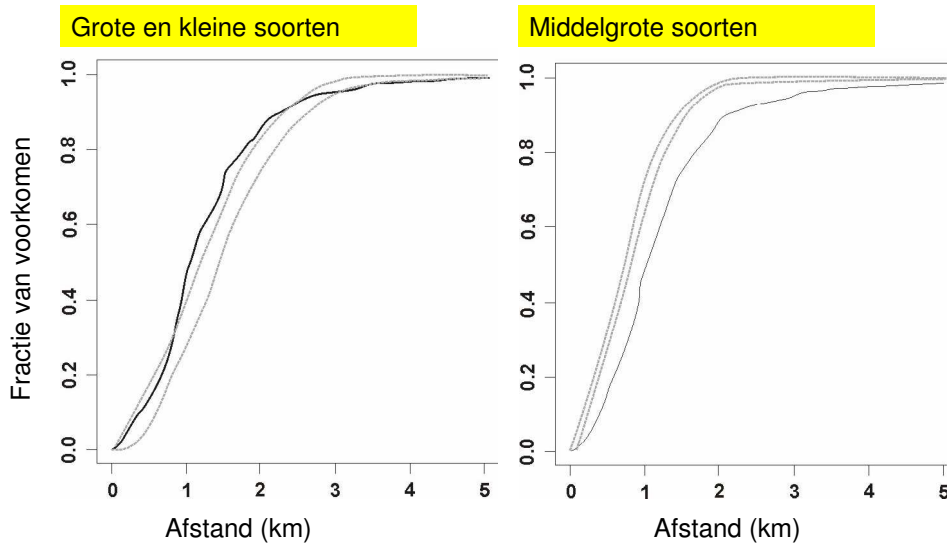
Een nieuwe uitdaging betreft de kwaliteit van gegevens. Alle gegevens zijn onzeker, het ene wat meer dan het andere. Zo kennen we onzekerheid in de meetlocaties - deze heeft als regel een betrekkelijk kleine bijdrage in vergelijking met andere onzekerheden, zoals het beperkte aantal meetpunten, onzekerheid bij het modelleren van de ruimtelijke samenhang en ons onvermogen om met deze onzekerheid om te gaan. In ons voorbeeld kunnen we de onzekerheid verkleinen door gebruik te maken van een koppeling tussen methaangehalte aan landgebruik, enkele bodemeigenschappen en ook aan de tijd van het jaar.

Een derde uitdaging betreft validatie. Van oudsher is een kaart zo goed als het de werkelijkheid weerspiegelt - 'the proof of the pudding is the eating'. We realiseren ons echter dat de gebruiker een belangrijke rol speelt. In een recente studie uitgevoerd samen met het Wageningse bedrijf Synoptics dat inmiddels door Vexcel is overgenomen, dat op zijn beurt weer door Microsoft is overgenomen, hebben we dat eens verder onderzocht door verschillende gebruikers van een hoogtekaart te definiëren [7]. We kwamen daarbij tot een

aantal verrassende inzichten. Maar fundamenteeler is wellicht een inherent onvermogen om te valideren - hoe kunnen we ooit onze global change modellen valideren? En ook is het laatste woord over het valideren van risicokaarten nog lang niet gesproken.

**Punt patronen.** In de tweede vorm van ruimtelijke analyse bekijken we punten, waarbij de eigenschap die willen analyseren, bekend is, maar de *locatie* aan toeval onderhevig is. De stochastische onderbouwing komen we tegen in de literatuur van met name Dietrich Stoyan [8] in Freiberg, Adrian Baddeley [9] in Perth, Australië en Peter Diggle [10] in Lancaster. We zullen vaak spreken over een ruimtelijk proces dat een patroon genereert. Een voorbeeld dat we recent geanalyseerd hebben betreft de verspreiding van kuddes herbivoren in een Afrikaans savannelandschap[11]. Opnieuw is hier sprake van een afstand, maar nu tussen puntobjecten, d.w.z. objecten die we als een punt beschouwen. In een regelmatig patroon, bijvoorbeeld met vaste afstanden tussen kuddes, komen sommige afstanden vaak voor, terwijl andere afstanden helemaal niet voorkomen. Anderzijds kan er sprake van zijn dat sommige kuddes in een geclusterd patroon voorkomen. Betrekkelijk korte afstanden komen dan veelvuldig voor, terwijl langere afstanden misschien wat minder vaak voorkomen. Dat modelleren we met een G-functie. In figuur 7 zien we links een G-functie gegenereerd door een patroon van herbivoren waarop niet door predatoren gejaagd wordt en rechts een die van een patroon van kuddes waarop predatoren wel jagen. De gejaagde soorten laten een regelmatig patroon zien, terwijl de niet-gejaagde soorten een clustering laten zien. De ecologische verklaring kan dan zijn dat de eerste groep preferentie van voedsel centraal stelt, terwijl de tweede groep een soort 'risicominimalisatie' laat zien.

Bij het modelleren van dergelijke processen zijn we steeds beter in staat om ook niet-stationariteit mee te nemen. Zo kan de aanwezigheid van dorpen aan een kant van het landschap invloed hebben op de verdeling van de afstanden, net zoals aanwezigheid van voldoende voedsel en water. Dit soort afhankelijkheden betrekken we dan graag in de analyses - het nieuwe element zit er dan in dat we de afstandsverdeling relateren aan de bekende co-variabelen. De stochastiek in dergelijke analyses bevindt zich in de verdeling van de afstanden tussen de objecten. Aspecten van gegevenskwaliteit zijn legio: de plaatsen van voorkomen zijn soms onzeker, met gerelateerde onzekere afstanden tussen de objecten. Daarnaast is het vaak maar de vraag



Figuur 7: G-functie voor grote en kleine dieren (links) en voor prooidieren (rechts) in het Laikipia park, Kenya.

of de objecten helder gedefinieerd zijn, of we alle objecten wel te pakken hebben, tellen we sommige objecten niet twee keer, er kan sprake zijn van een weinig uniforme waarneming, mogelijk veroorzaakt door een 'hangover' van de waarnemer, etc.

**Rooster data.** De derde vorm van ruimtelijke analyse betreft de kwantitatieve analyse van gebiedsdelen. Hier zijn we genteresseerd in verklarende kenmerken, we hebben te maken met vastliggende eenheden, zoals gemeentes, provincies, landen, biotopen of bodemeenheden. Het concept van een afstand is lastiger - immers: wat is de afstand tussen twee provincies die aan elkaar grenzen? We werken in dergelijke studies daarom liever met een 'buurt' relatie. Buurten grenzen aan elkaar, of niet. Dat kun je aangeven met een 1 of een 0, maar we kunnen dat ook aangeven met een fractie. Met dit laatste creëren we wel asymmetrie: de fractie van de grens van Nederland met Duitsland is veel groter dan de fractie van de grens van Duitsland met Nederland. Het gaat bij dergelijke analyses om het vinden van een goed verklarend model, zeg maar een regressiemodel in de aanwezigheid van ruimtelijke relaties. Autoregressieve processen spelen dan een rol. In de jaren 80 hebben we belangrijke bijdragen gezien, met name het beroemde artikel van Ge-

man en Geman [12] en een reeks publicaties van Julian Besag (o.a. [13]). Een voorbeeld van een dergelijke studie betreft de sterfte aan Buruli Ulcer, onderzocht door Alfred Duker in zijn PhD werk [14]. In een aantal dorpen ('settlements') in Ghana heeft hij de sterfte aan de zweren ziekte Buruli Ulcer gerelateerd aan het voorkomen van arsenicum in het milieu. Er was mogelijk een relatie met de afstand tot een mijn in de buurt, met de hoogte in het landschap en de kwaliteit van bodem en/of grondwater. In een bodemmodel vonden we significantie tussen de sterfte aan deze ziekte en het arsenicum in de bodem. In een watermodel vonden we significantie tussen de sterfte aan deze ziekte en de afstand tot de mijn en de relatieve hoogte.

De stochastiek bevindt zich op dezelfde plaats als in het geostatistische voorbeeld: in de waarneming zelf. De locatie ligt vast. Buurtrelaties worden in het voorbeeld uit Afrika geven door de grenzen van het settlement - andere administratieve grenzen zijn in deze landen vaak niet zo helder.

**Schaal.** Een belangrijk aspect binnen de ruimtelijke stochastiek betreft 'schaal'. In eerste instantie lijkt dat vrij triviaal - maar er zijn momenten dat het toch even anders wordt. Neerslaggegevens op de nationale schaal laten een totaal ander beeld zien dan op de schaal van een individueel perceel. Veranderingen in schaal hebben onze aandacht. Als we van de gemeentelijke schaal naar de provinciale schaal gaan dan kunnen we een gemiddelde nemen over de gemeentes. Maar de redenering de andere kant op is veel lastiger en leidt als regel tot een stochastische benadering.

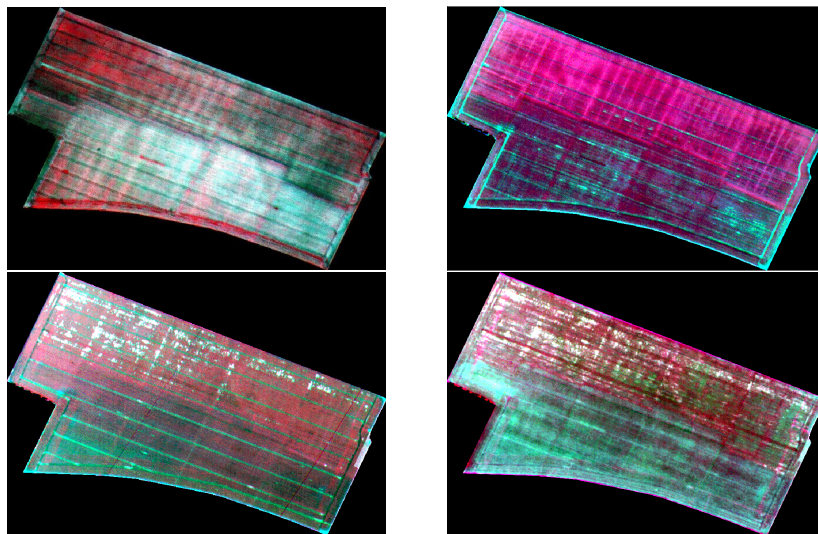
**Ruimte-tijd.** We zullen nu aandacht moeten gaan besteden aan de stochastiek in ruimte en tijd. We concentreren ons op een reeks van beelden. We zullen beelden vergelijken die allemaal hetzelfde proces of fenomeen laten zien op verschillende momenten. De beelden moeten precies over elkaar heen vallen en de beelden moeten onder vergelijkbare omstandigheden zijn opgenomen. Pas dan kunnen we een gerechtvaardigde manier maken.

In principe kunnen gegevens in de tijd als een extra dimensie worden toegevoegd. Maar er zijn veel en belangrijke verschillen tussen ruimtelijke en temporele gegevens. De Franse filosoof Bergson [15] gaf als het grote verschil aan dat de ruimte het toneel is waarop de processen zich in de tijd afspelen. Dat is wat mij betreft wat te simplistisch, maar er zit wel wat logica in. Gegevens in de tijd modelleren we het liefst als een proces, met een oorzaak en een gevolg. Dat hebben we in de ruimte niet. Daarnaast is

de afhankelijkheid in de tijd anders dan de afhankelijkheid in de ruimte - er is bijvoorbeeld geen natuurlijke manier om de eenheden (meter en dag) te verbinden. Ook hier zijn grote uitdagingen, zowel in de theorie als in de praktijk.

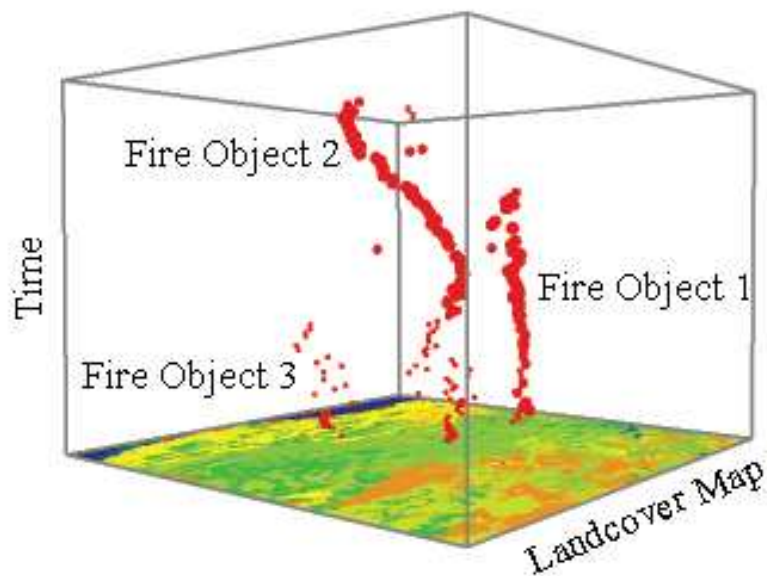
Er is, vooral in de afdeling stochastische systeem- en signaalanalyse van de universiteit Twente waar mijn leerstoel is ondergebracht, uitgebreide kennis voorhanden op het vlak van de temporele stochastiek - deze richt zich, althans voor een belangrijk gedeelte, op patronen in de tijd. De waarde van aandelen, prijsontwikkelingen, temperatuurschommelingen, etc. Uitgangspunt is dat wat morgen gebeurt vermoedelijk meer lijkt op wat vandaag gebeurt dan op wat gisteren gebeurde.

Het eerdere voorbeeld van het perceel met suikerbieten is verder uit te breiden met meerdere vervolgbeelden (figuur 8). In feite heb ik u het beeld laten zien van 1 april, het eerste beeld in de serie van vier. Binnen de stochastiek is het van belang objecten op deze beelden te koppelen en verschillen aan te geven en te interpreteren.



Figuur 8: Vier opnames van het perceel, op 1 april (linksboven), 30 mei (rechtsboven), 11 juli (linksonder) en 7 augustus (rechtsonder). Duidelijk is de verkleuring te zien, veroorzaakt door gewasgroei en door optredende stresscondities

In ruimte en tijd analyses proberen we stochastische beeldanalyse te kop-



Figuur 9: Ruimte-tijds kubus. De ruimte assen in het horizontale vlak tonen de vegetatie. De tijd, langs de verticale as, laat de ontwikkeling van bosbranden in de tijd zien.

pelen aan de dynamiek in de tijd. We hebben bij het ITC de beschikking over Meteosat beelden die iedere 15 minuten binnenkomen. Deze hoge temporele resolutie gaat ten koste van de ruimtelijke resolutie. We hebben deze beelden gebruikt bij het monitoren van bosbranden, hun bewegingen en het voorspellen ervan op een dag in Spanje[16]. In dit stuk van de wereld is de ruimtelijke resolutie ca. 3 km, d.w.z. iedere pixel is de gemiddelde reflectiewaarde over een eenheid van 9 km<sup>2</sup>. Figuur 9 laat een ruimte-tijd kubus zien van bosbranden. Horizontaal is de ruimte geprojecteerd, verticaal de tijd. Met een wolkenvrije lucht kun je dan een redelijk model vaststellen.

Op het epidemiologisch vlak bestuderen we de verspreiding van bijvoorbeeld ziektes in ruimte en tijd. Dames en heren, ik zou nog even door kunnen gaan, maar ik denk niet dat dat zo relevant is. Ik wil eigenlijk overgaan naar een wat meer prangende vraag: waar doen we het allemaal voor. Met andere woorden: hoe kunnen we op een verstandige en creatieve manier omgaan met deze onzekerheden en er misschien zelfs wel ons voordeel mee doen.

**Beslissingsondersteuning.** Een belangrijk element in al dit werk bestaat eruit om beslissingen te ondersteunen. Dat is vaak het speuren om het beste resultaat te halen. In het verleden, in het AIO werk van Jan Willem van Groenigen [17], hebben we aspecten van simulated annealing gebruikt om bijvoorbeeld optimale bemonsteringsschema's te vinden. Als je een beperkt aantal waarnemingen kunt doen, dan is het van belang om te weten waar (of tijdens het monitoren waar en wanneer) we dat het beste doen. Denkt u daarbij aan neerslagmetingen en laten we ons dan afvragen: zullen we een nieuwe variabele (bijvoorbeeld een luchtkwaliteitsvariabele) weer op deze punten meten of op andere, zullen we meer punten nemen of misschien ook minder? Van Groenigen's werk heeft geresulteerd in procedures die breed toepasbaar zijn en waar het neerkomt op het vaststellen van een goede doel-functie die vervolgens geoptimaliseerd wordt. Deze methoden hebben inmiddels hun plaats te hebben gevonden. Maar beslissingsondersteuning gaat verder. Recent heeft Daniel van de Vlag in zijn AIO werk aangetoond hoe vage eenheden (duinen en strand) en beslissingen voor zand suppletie gecombineerd kunnen worden [18]. Hij heeft aangetoond hoe dat tot beter onderbouwde beslissingen kan leiden, door beter om te gaan met de natuurlijke, onzekere, eigenschappen van systemen en daar een goed gefundeerde analyse aan te koppelen. Verder wegen op het gebied van Bayesiaanse netwerken proberen we op dit moment nog verder richting te geven.

## Recente ontwikkelingen

We keren nu naar recente ontwikkelingen. Het gaat tegenwoordig erg snel met de ontwikkelingen in het opnemen en verspreiden van digitale beelden. De snelle opmars van internet met een snelle en efficiënte toegang tot een veelheid van beelden en (ruimtelijke) informatie en de combinatie van digitale camera met de mobiele telefoon zijn de belangrijkste oorzaken. Het bekendste voorbeeld is wellicht Google Earth, waarbij we op verschillende niveaus kunnen inzoomen op - in principe - ieder stukje van de wereld. Wat zijn de gevolgen hiervan met name voor ons vakgebied?

- Een bijzonder aspect betreft de verandering van de vragen die we nu kunnen stellen. Vonden we het vroeger prachtig als we een enkel beeld hadden van een gebied, nu gaat het om meer dan alleen maar mooie plaatjes. De informatie die we weergeven moet een duidelijk doel dienen. En naarmate de informatie toeneemt wordt het doel specifieker.

- Een stochastisch element dat we telkens langs zien komen betreft de kwaliteit van gegevens. Kwaliteit is een breed begrip, maar is in de stochastische literatuur wel beschreven. Kwaliteit hangt nauw samen met het gebruik van de gegevens. In een studie bij de provincie Noord-Brabant enkele jaren geleden, had men de coördinaten afgerond tot op waarden van hele kilometers. Op mijn verbaasde vraag: 'waarom?' was het antwoord verrassend helder: meer had men niet nodig. Dat betekende wel dat vragen op meer verfijnde schaal niet konden worden beantwoord. Er is uitgebreid literatuur voorhanden, en recent hebben we bij het ITC een congres georganiseerd waar we aan deze aspecten uitvoerig aandacht hebben besteed.
- Het blijkt steeds vaker te lonen om voorinformatie te gebruiken. In tegenstelling tot financiële transacties is dat in de stochastiek een heel gangbare en geaccepteerde werkwijze. We noemen dat een Bayesiaanse analyse. Voorinformatie kan gebruikt worden om een eerste indruk te verkrijgen, om subjectieve kennis objectief te maken en te gebruiken, etc. Gemaakte waarnemingen passen dan deze voorinformatie aan.

## Visie

Na het presenteren van de twee thema's 'beeldanalyse' en 'ruimtelijke stochastiek' is het tijd voor het contrapunt: mijn visie op het vakgebied. In mijn visie komen de beelden, de vragen die we aan beelden stellen en de mogelijkheden die moderne stochastische methoden bieden om tot bevredigende antwoorden te komen steeds dichter tot elkaar. Onzekerheid is inherent en het is niet aan ons om dit in zekerheid te vertalen maar veeleer om, in de woorden van Spinoza: 'zo veel mogelijk de baas over het toeval te worden en ons handelen op een redelijk plan te baseren'.

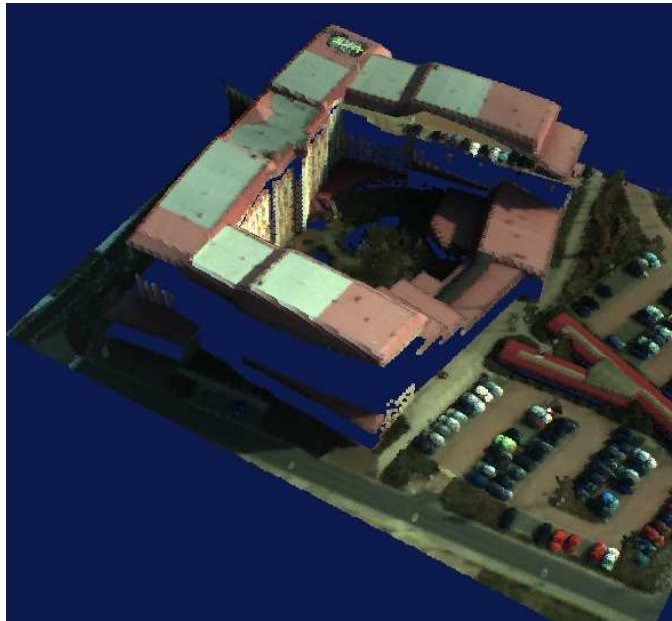
Als ik het heb over een visie, dan kom ik, hoe we het ook wenden en keren, toch telkens uit op de fundamentele vraag: hoe kunnen we niet alleen *waarnemen* in de ruimte en hoe kunnen we de ruimte met al haar fenomenen *begrijpen*. De kennistheorieën van Kant en Locke vormen daarbij een interessant startpunt. Hebben we 'a priori' informatie, is er zoiets als een 'vaag object an sich', en zo ja: hoe kunnen we daarmee omgaan. Er zijn geleerden die opmerken dat stochastiek alleen nodig is bij gebrek aan proceskennis. Dat is echter een lijn die ik niet wil volgen: waarom is het dan ook, in dit

simpele geval, nog niet gelukt? Liever zie ik stochastiek, naast bijvoorbeeld proceskennis en systematische inventarisatie, als een onafhankelijke richting in de wetenschap. Het is een veld met een eigen terminologie, maatschappelijke toepassingen en validatiemogelijkheden.

De toegankelijkheid van beelden zal de komende jaren steeds verder toenemen. Tevens wordt de mate van detaillering alleen maar groter, evenals de frequentie van waarnemen. Daarmee groeien de mogelijkheden en worden de vragen die we kunnen stellen en beantwoorden steeds gevarieerder. Het zal niet lang meer duren of Google Earth is eenvoudig toegankelijk op de mobiele telefoon. Maar dit zijn gegevens, getalletjes. Hiermee hebben we nog niet de informatie waar we echt wat mee kunnen doen.

Er zal een steeds verdere integratie plaatsvinden tussen modellen en beeldinformatie. Met modellen bedoel ik dan transportmodellen, landbouwkundige modellen, milieumodellen en andere kwantitatieve redeneringen met, als het goed is, een solide wiskundige onderbouwing, die in principe van deze beelden gebruik kan maken. De verschillen tussen de beschikbaarheid van informatie en de vragen om het gebruik ervan liggen nog steeds ver uit lagen, maar komen stilaan wel dichter bij elkaar. Hier is echter nog steeds een lange weg te gaan. Dat brengt ons aan de vraagkant van deze methoden en technieken: wie zit er op ons te wachten? Voorbeelden te over, los van de voorbeelden die ik al heb laten zien. In de dagelijkse omgeving hebben we het fileprobleem, dat we vermoedelijk niet kunnen oplossen maar wel kunnen verlichten als real-time beelden kunnen worden gekoppeld aan actuele weginformatie. In de precisielandbouw speelt het al langer een grote rol, door vroegtijdig aan te geven waar gewasproblemen optreden en waar de boer moet ingrijpen. In het milieu kunnen we beter ingrijpen als we weten welk schip welke verontreiniging heeft veroorzaakt, hoe de kwaliteit van lucht zich ontwikkelt en via een intelligent systeem is wellicht ook informatie over de kwaliteit van bodem en grondwater te verkrijgen. Als het gaat om uitbreidingen van steden, over beleidsondersteuning om wetlands te redden, landbouwgrond toe te wijzen, stedelijke ontwikkelingen te monitoren: het is het wachten op een verstandig gebruik van de juiste beelden om substantieel verder te kunnen komen.

Maar overall is er sprake van onzekerheid. Recent heeft het ITC gegevens verzameld door een helikopter over Enschede te laten vliegen (zie figuur 10). Deze heeft uiterst precieze lasergegevens opgenomen, die kon worden vertaald in zeer gedetailleerde hoogte-informatie met een punt dichtheid van 12 tot 25 punten per m<sup>2</sup>. Je krijgt dus zeer nauwkeurige informatie over de hoogte van



Figuur 10: Een laser beeld van het ITC gebouw, opgenomen met een dichtheid van 12 tot 25 punten per  $m^2$ .

het terrein. De spoorrails kun je onderscheiden, maar de kiezeltjes nog net niet. Auto's kun je herkennen, maar slechts af en toe was het mogelijk om in de auto te kijken. Bomen konden we onderscheiden, maar de takken nog niet. Kortom: we kunnen weer zoveel meer, vooral vragen beantwoorden die vroeger niet te beantwoorden waren: het verval van dijken, waarbij iedere millimeter telt, het verzakken van de aardbodem bij het winnen van aardgas, maar ook storingen aan spoorrails en veranderingen in het niveau van het oppervlaktewater.

Uiteraard zijn er nog altijd talloze vragen die *niet* beantwoord kunnen worden. Zoals: vragen met een sterke tijdscomponent. Ook beginnen we nu voortgang te boeken bij het combineren met spectraalinformatie. Meer concreet: als we als boef in een auto wensen in te breken is de informatie gelukkig onvoldoende. Als we als stedelijke dienst de hoeveel hout aan een boom willen vaststellen dan is dat nog geen eenvoudig proces en blijft er een grote mate van onzekerheid. Het is in deze positie dat er de komende jaren een flinke vooruitgang te verwachten is.

Er zijn verschillende technieken om hier wat verder mee te gaan. Ik denk

daarbij aan wavelets, Bayesiaanse netwerken, maar ook aan het modernere 'boosting', kortom aan veel aspecten die we tegenkomen binnen het machine learnen.

## Het netwerk

Dames en heren,

De ruimte is waar we allemaal mee te maken hebben. De ruimte wordt schaars en een zorgvuldig omgaan met deze schaarse ruimte is een essentiële opgave voor ons allen. Waar vinden we de rust en de stilte, waar is voldoende voedsel, waar is schone lucht waar onze kinderen en kleinkinderen en vele generaties daarna recht op hebben. Niet alleen over tienduizend jaar, maar zoals de hooggeleerde Kwee het ooit formuleerde: ook nog over een miljoen jaar [19]. Het omgaan met onzekerheden zoals ik heb laten zien vanmiddag vraagt een kwantitatieve, stochastische benadering. Maar het vraagt ook een kwaliteit van onze bestuurders - om te kunnen gaan met kansen en met onzekerheden. Mede om die reden is dit werkveld zo de moeite waard.

Ca. 1 jaar geleden ben ik met veel enthousiasme begonnen aan mijn aanstelling bij de Universiteit Twente. Het is echter ook al weer bijna 12 jaar geleden dat ik voor het eerst een oratie hield. Toen formuleerde ik het als de grootste uitdaging om tot een integrale benadering van alle ruimtelijke statistiek te komen. Hoewel we een heel eind zijn, ben ik geneigd dat nu toch wat te classificeren onder de noemer 'jeugdige overmoed'. Mijn ambitie met de huidige leerstoel is wat bescheidener: graag wil ik proberen lopende problemen op het gebied van ruimtelijke stochastiek te aan te pakken en op basis daarvan de methoden te ontwikkelen en aan te scherpen. De theoretische kennis bestaat of ontwikkelen we bij de universiteit, de problemen en maatschappelijke uitdagingen vinden we in al hun variatie binnen het ITC en haar internationale netwerk.

Met de hooggeleerde Bagchi en met verschillende medewerkers van de leerstoelgroep stochastische systeem- en signaaltheorie en van de leerstoelgroep kansrekening statistiek en verschillende collega's binnen de onderzoekschool CTIT heb ik al een aantal inspirerende gesprekken kunnen voeren. Mijn eigen groep aan het ITC, de staf en de AIOs, de studenten en ook mijn collega's: zij allen dragen bij in meerdere of mindere mate aan de brug die nu weer

geslagen wordt. Contacten met het bedrijfsleven kunnen zere vruchtbaar en inspirerend zijn. Ook met Wageningen Universiteit waar ik jarenlang gewerkt heb onderhoud ik nog verschillende levendige contacten. Binnen Nederland is met name de vereniging voor statistiek en operationele research belangrijk en het netwerk van stochastici met hun inmiddels legendarische bijeenkomsten onder de vallende blaadjes in Lunteren.

Internationaal liggen er grote mogelijkheden. Europees, uiteraard met instellingen in vele landen en met mogelijkheden in oost-Europa. Interessante samenwerking hebben we al langer met India, waar de relaties met het Indian Institute of Remote Sensing erg vruchtbaar blijken. Naast het maken van een kwantitatieve risico's op aardbevingen kijken we ook naar de ontwikkeling van theeplantages, en naar het identificeren van bomen en bossen op verschillende schalen met fractale methoden. Samenwerking met China gaat steeds verder en wordt concreter. Binnenkort gaan met de universiteit in Wuhan aan de slag waar we op PhD niveau gaan kijken naar het monitoren van onzekere objecten. In Afrika gaan we een studie uitvoeren naar het monitoren van de droogte in Oost-Afrika, typisch een studie op een heel groot gebied. Daarnaast hebben we lopende contacten met instituten in Tanzania en Nigeria, terwijl samenwerking met Zuid-Afrika begint te lopen.

Het is en blijft fascinerend om met buitenlandse collega's en studenten samen te werken, de verschillende culturen en de wetenschappelijke benaderingen te ondergaan en gezamenlijk tot een mooi resultaat te komen. Wat mij hierin fascineert is toch vooral de specifieke vraagstelling, ingegeven door lokale ontwikkeling, lokale voorwaarden en lokale mogelijkheden. In West Europa is de milieuregelgeving al ver, terwijl we in Nigeria nog moeten proberen om de eerste milieueffecten van de oliepijpleidingen in kaart te krijgen.

*Geef me de ruimte.* Ik neem aan dat u uit het voorafgaande heeft begrepen wat ik daar mee bedoel: mijn werk zal zich richten op een stochastische analyse van ruimtelijke gegevens in een brede zin. Satellietbeelden, maar ook veldwaarnemingen, gemodelleerde gegevens, kortom in principe alle gegevens waarbij het van belang is dat er een ruimtelijke verankering is. Daarnaast wil ik met name de sprong maken naar gegevens in ruimte en tijd. Aan het einde van deze rede neem ik u nogmaals mee naar de kunst, naar een schilderij dat door mij zeer geliefd is: 'La Primavera' van Botticelli. We zien hier Hermes, die de laatste wolkjes wegwuift, waarmee hij het overzicht, en de ruimte krijgt (zie figuur 11). De vrouwen op het schilderij, in een bloementuin die in die tijd zonder zijns gelijke was, representeren misschien wel de wetenschap,



Figuur 11: Hermes wuift de laatste wolkjes weg in *La Primavera* van Botticelli, waarmee hij de ruimte creëert.

de kennis en de schoonheid. Zij kunnen vrijelijk bewegen en zich optimaal ontwikkelen.

*Geef me de ruimte:* dat geldt uiteraard ook op een wezenlijk ander gebied. Wetenschap kan enkel gedijen bij voldoende vrijheid van denken. In die zin is ruimte gelijk aan vrijheid. De vrijheid om te kiezen, om te handelen, om nieuwe wegen te verkennen, nieuwe onderwerpen aan te snijden, weten dat interessante en veelbelovende gedachten op een positieve onthaal kunnen rekenen. Dat dit een voorwaardelijke vrijheid moet zijn is buiten kijf, maar het kan niet zo zijn dat de voorwaarden de vrijheid overheersen. Nee, geef *mij* de vrijheid, het formuleren en het handhaven van de voorwaarden vind ik wat minder boeiend.

Mijnheer de rector,

Deze leerstoel is tot stand gekomen uit een samenwerking tussen het ITC en de universiteit Twente. Mijn aanstelling betreft een zogenaamde 0-aanstelling aan deze universiteit, het eigenlijke werk wordt gedaan op het ITC, enkele kilometers verderop. Het is verleidelijk om nu een politieke uitspraak te doen over de samenwerking tussen de universiteit en het ITC die op bestuurlijk niveau steeds verder gaat. Dat zal ik niet doen. Ik wil volstaan

met de opmerking dat ik goede mogelijkheden voor een wederzijdse samenwerking zie: tussen de theoretische wetenschap aan de universiteit en de praktische wetenschap aan het ITC, met haar zo bijzondere focus op ontwikkelingslanden. Er is in mijn ogen duidelijk wetenschappelijke meerwaarde in het creëren van deze samenwerking. De technisch-wetenschappelijke kennis binnen de UT en de maatschappelijke-wetenschappelijke kennis binnen het ITC bieden vele vruchtbare mogelijkheden. Op het gebied van stochastiek, maar ook op gebieden waar deze methoden worden toegepast: transport en vervoer, ontwikkelingen in de informatica waar het 'geo' aspect verder kan worden ontwikkeld, global change, kwaliteit van het milieu, kortom in de richting van een duurzame samenleving.

## Dankwoord

Tenslotte, als coda bij deze rede, wil ik een aantal mensen bedanken die mede aan de basis staan van mijn nieuwe uitdaging aan Twente universiteit.

- Mijn leraren op het gebied van stochastiek, kansrekening en ruimtelijke statistiek. Op de middelbare school waren dat de heren Koken, Ferry Sluiter en Groeneveld, de docenten aan de technische universiteit Eindhoven, in het bijzonder de hooggeleerde Doornbos en Steutel en mijn begeleider destijds, Dr. Nico Linssen, en de docenten aan Wageningen Universiteit, met name de hooggeleerde Corsten en Bouma en Dr. Aad van Eijnsbergen.
- Zij die deze leerstoel mede hebben mogelijk gemaakt: de rectoren prof. Zijm van Twente Universiteit en professor Molenaar van het ITC, de benoemingsadviescommissie die een positief oordeel velde en het college van bestuur die dit oordeel overnam.
- Mijn ouders, die me altijd hebben gestimuleerd om verder te kijken, nieuwsgierig te zijn naar wetenschappelijke uitdagingen, een open mind te hebben naar ontwikkelingen in welk wetenschapsgebied dan ook en ook de rust te zoeken bij muziek en natuur.
- En uiteraard mijn drie dochters Judith, Olga en Fleur, en mijn vrouw Anita. De warmte bij het thuiskomen, het meeleven met elkaar en de wederzijdse inleving zijn onmisbaar en onbetaalbaar. Lieverds, zonder

jullie was ik niet wie ik ben en was het met mij nooit geworden zoals het nu is.

*Geef me de ruimte.* Het was de door mij zo gewaardeerde dichter en literator Fernando Pessoa die in zijn boek *Livro do Desassossego* wijst hij ons op onze mogelijkheden en verantwoordelijkheden:

As verdadeiras paisagens são as que nós mesmos criamos, porque assim, sendo deuses delas, as vemos como elas verdadeiramente são, que é como foram criadas. <sup>a</sup>

*F. Pessoa*

---

<sup>a</sup>De waarachtige landschappen zijn diegene die we zelf creëren, want zo, hun goden zijnde, zien we hen zoals ze werkelijk zijn, dat wil zeggen hoe ze geschapen zijn

We hebben de ruimte gekregen, we gaan er mee om naar eigen inzicht, verstand en creativiteit. Daarmee krijgen ze onze eigen betekenis, we 'herschep-  
pen' deze ruimte als het ware.

Ik heb gezegd.

## Referenties

- [1] A. Stein and K. De Beurs. Map indices to quantify semantic accuracy in segmented landsat images. *International Journal of Remote Sensing*, **26**, 2937–2951, 2005.
- [2] C.A. Glasbey and G.W. Horgan. *Image analysis for the biological sciences*. Wiley, Chichester, 1995.
- [3] V. Epinat, A. Stein, S.M. De Jong, and J. Bouma. A wavelet characterization of hgh-resolution ndvi patterns for precision agriculture. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **3**, 121–132, 2001.
- [4] G. Matheron. The intrinsic random functions and their applications. *Advances in applied probability*, **5**, 439 – 468, 1973.

- [5] A.N. Kolmogoroff. *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Ergebnisse der Mathematik, Springer-Verlag Berlin, 1933.
- [6] A. Stein. *Spatial interpolation*. PhD thesis, Wageningen University, 1991.
- [7] J.K. Kyaruzi. Quality assessment of dem from radargrammetry data: quality assessment from the user perspective. Master's thesis, ITC, 2005.
- [8] D. Stoyan, W.S. Kendall, and J. Mecke. *Stochastic geometry and its applications*. Wiley, New York, 1995.
- [9] A.J. Baddeley. Combinatorial foundations of stochastic geometry. *Proc. London Math. Soc.*, **42**, 154 – 177, 1981.
- [10] P.J. Diggle. *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns – 2nd edition*. Arnold publishers, London, 2003.
- [11] W.M. Kheamba. *Development and application of spatial and temporal statistical methods for improved sampling of wildlife*. PhD thesis, Wageningen University, ITC, 2000.
- [12] S. Geman and D. Geman. Stochastic relaxation, gibbs distributions and the bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **6**, 721 – 741, 1984.
- [13] J. Besag. On the statistical analysis of dirty pictures. *Journal of the Royal Statistical Society*, **B - 48**, 259 – 302, 1984.
- [14] A. Duker. *Spatial analysis of factors implicated in Micobacterium ulcerans infection in Ghana*. PhD thesis, Wageningen University, 2005.
- [15] H. Bergson. *Durée et simultanéité*. Presses Universitaires de France, 1921.
- [16] R. Umamaheshwaran, W. Bijker, and A. Stein. Image mining for modeling of forest fires from meteosat images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **45**, 246–253, 2006.
- [17] J.W. Van Groenigen. *Constrained optimisation of spatial sampling: a geostatistical approach*. PhD thesis, Wageningen University, 1999.

- [18] D.E. Van de Vlag. *Modeling and visualizing dynamic landscape objects and their qualities*. PhD thesis, Wageningen University, ITC, 2006.
- [19] S.L. Kwee. Mens, techniek en toekomst. *Wijsgerig perspectief op maatschappij en wetenschap* **22**, 46 – 53, 1981.