



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit



Geef me de ruimte

door Prof.dr.ir. Alfred Stein

Geef me de ruimte

Rede uitgesproken bij
het aanvaarden van het ambt
van hoogleraar

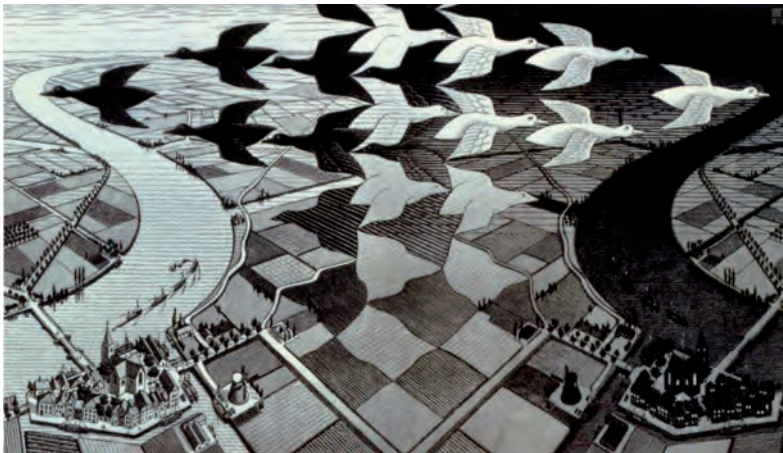
Stochastische Beeldanalyse

aan de Faculteit Elektrotechniek, Wiskunde
en Informatica van de Universiteit Twente
op donderdag 20 september 2007
door

Prof.dr.ir. Alfred Stein

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

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 geven. Graag laten we ons inspireren door de kunst, in mijn vakgebied is het niet vreemd om ons te richten op de sterk door wiskunde geïnspireerde kunstenaar Maurits Escher.



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

We zien hier het beroemde litho 'dag en nacht'. Links de dag en rechts de nacht en de vogel die het allemaal waarneemt. Maar waar het mij om gaat is de verticale lijn in deze litho: 'weiland wordt vogel'. Hiermee geeft de kun-

... et fortunae, qantum possumus, imperare conamur, nostrasque actiones certo rationis consilio dirigere.
Wij proberen zo veel mogelijk de baas over het toeval te worden en ons handelen op een redelijk plan te baseren.
Spinoza, Ethica

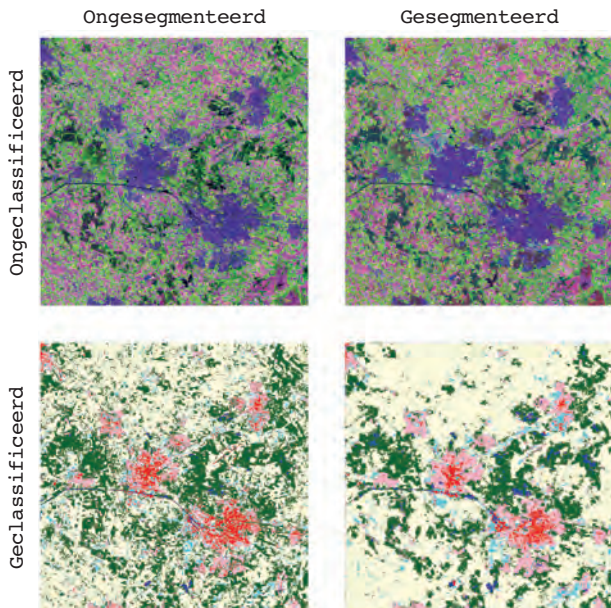
stenaar een impressie waar we in ons vakgebied mee bezig zijn. De vogel die over het land vliegt probeert zijn objecten te kennen, hij gebruikt zijn kennis van het land en ziet met een enkele oogopslag wat voor zijn overleven van belang is. Wat hij is en wat hij ziet worden één. Hij kiest de ruimte, de ruimte om te vliegen en de ruimte om zijn kennis te vergaren.

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

Na deze ouverture kijken we nu als eerste thema naar een satellietbeeld. En we beginnen in Twente [1]. Het is een landsat beeld waarbij we informatie in zes banden hebben. We mengen de kleuren en laten de kleuren rood, groen en blauw corresponderen met drie van de 6 banden. Het is dus niet zo dat de kleur op het beeld overeenkomt met de kleur op de grond. Wel is duidelijk dat we zo een aantal objecten waarnemen. We hebben daarnaast de beschikking over wat veldopnames.

We kunnen kijken naar Twente zoals het was, we kunnen een landschap, de kerk van Enschede en het Twentekanaal meenemen. Vaak zullen we de objecten (een stad, een kanaal, of andere objecten op andere schalen) op deze beelden automatisch 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 segmentatie en classificatie.



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

Iedere pixel correspondeert met een locatie in het terrein. Veel pixels hebben dezelfde waarde, en horen bij elkaar. Segmentatie betekent dat we pixels willen samenvatten in een segment. 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 een minimum en een maximum een segment te laten vormen. Ook kunnen we kijken naar een regelmatig patroon van waarden. Samen vormen ze een object. Zo'n object willen we vastleggen en een naam geven. Daarvoor is classificatie nodig. Laten we eens zien hoe dat met dit beeld in zijn werk gaat.

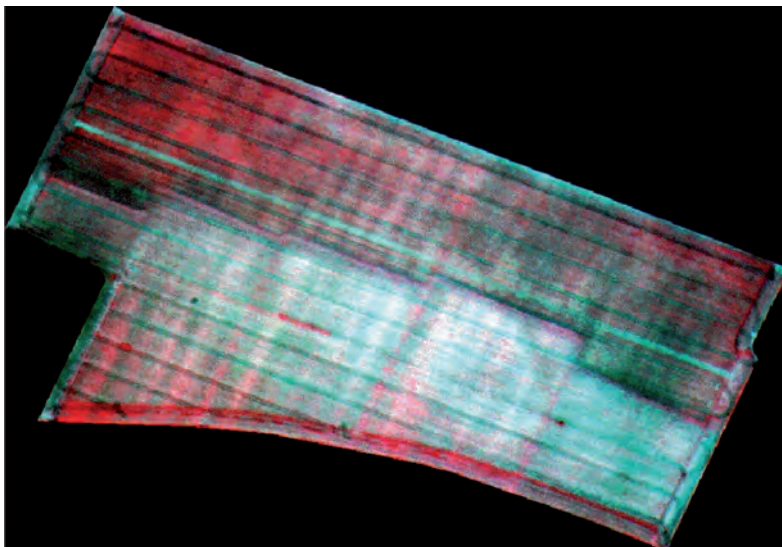
We zien nu een segmentatie die met de 'region merging' procedure is uitgevoerd. We zien dan dat er een beeld ontstaat met veel minder ruis. Hiermee hebben we veel duidelijker segmenten, maar nog geen objecten met een betekenis. Deze objecten willen we graag identificeren uit al deze gegevens. Daartoe 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 fuzzy benadering en een stochastische benadering. Heel veel objecten, of het nu om een stad gaat, een weg, hebben een vage definitie. Soms kunnen we die wel scherp krijgen, maar soms ook niet. Een 'verontreinigde rivier' is een vaag concept dat vaak geleidelijke overgaat in een 'schone' rivier (ook een vaag concept). Een bodemeenheid gaat gradueel over in een andere bodemeenheid. Milieu-indicatoren zijn 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 ('wat is de afstand van Wageningen naar Enschede'), maar er zijn wel oplossingen voor te bedenken. In een stochastische benadering benaderen we dergelijke objecten vanuit een kanstheoretische perspectief. Ik zie dit als complementaire mogelijkheden. De fuzzy benadering heeft het voordeel dat we in de taal van alledag kunnen blijven praten. Een stochastische benadering is echter beter gefundeerd en daarmee helderder en eenvoudiger.

We gaan nu over naar het volgende voorbeeld. We zien hier 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]. De resolutie is hier in de orde van grootte van



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

1 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 filter en super pixel resolutie. Maar ik wil nu graag verdergaan met het tweede thema.

Deel 2: De stochastiek van ruimtelijke gegevens

In een stochastisch kader maken we een aanname 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

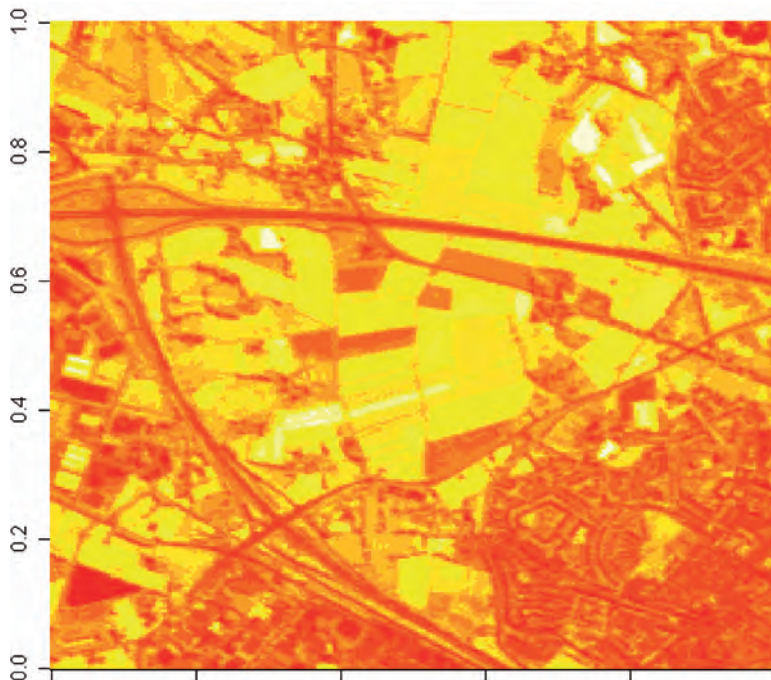
enkele benaderingen nalopen. Het eerste onderdeel heet met een mooi woord geostatistiek. Er is daarbij sprake van een meting, van toeval in die meting, van een vaste positie in het land en van ruimtelijke samenhang. Ruimtelijke gegevens bestaan uit een variabele $Z(s)$ en waarnemingen aan die variabele. Voor deze Z kunnen we de reflectie nemen zoals die wordt geregistreerd door een satellietensor, maar ook een neerslaghoeveelheid, de grondwaterdiepte, etc. De 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 kenmerkend 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. We maken daarvoor de stap naar ergodiciteit: de verwachting van het eerste en het tweede moment van $Z(s)$ kunnen worden verkregen door ruimtelijke gemiddeldes te nemen.

We zullen vervolgens aannames moeten doen over de stationariteit. Er zijn bepaalde eigenschappen van de gegevens die niet veranderen als we alle locaties s over een zelfde afstand 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 h verschuiven. We kennen drie vormen van stationariteit, in afnemende sterkte. Van strikte stationariteit, waar we een kanstheoretische aanname doen, via 2e orde stationariteit naar intrinsieke stationariteit - bij deze laatste kijken we alleen nog naar stationariteit van verschillen - van aangroeiingen. Nog zwakkere vormen van stationariteit komen voor.

Deze benadering voert terug op de kansmodellen van Kolmogoroff [4] en is mede gebaseerd op het baanbrekende werk van Georges Matheron in Fontainebleau in de jaren 70 en 80 [5].

Hierbij op de achtergrond speelt de theorie van stochastische toevalsfuncties. Stochastische simulaties van een toevalsveld tonen hoe ruimtelijke variaties eruit kunnen zien. Wat we steeds aantreffen is de variatie als functie van de afstand tussen plaatsen: waarnemingen dicht bij elkaar lijken sterker

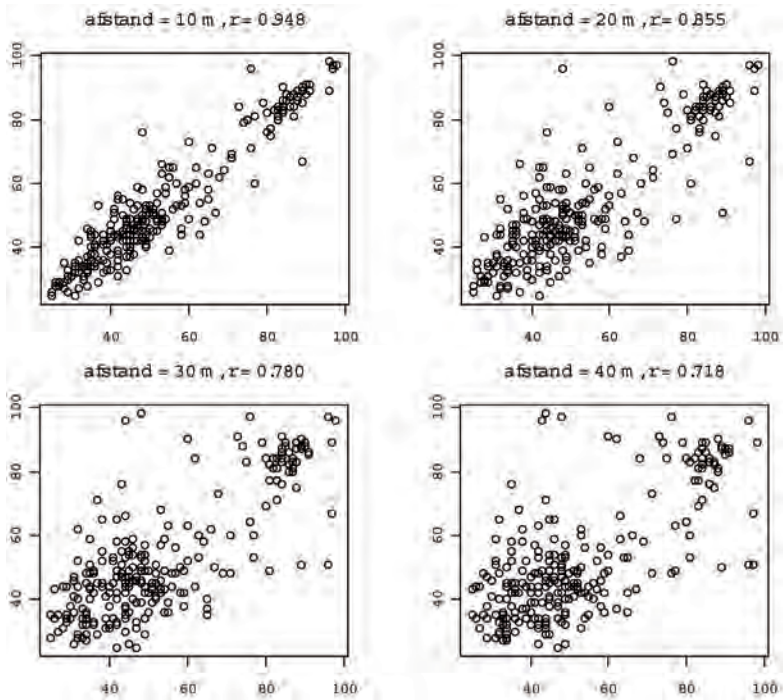
op elkaar dan waarnemingen verder van elkaar af. De mate waarin deze afhankelijkheid optreedt kan verschillen per variabele. Simulaties zijn gebaseerd op minimale specifieke statistische eigenschappen.



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

Ter illustratie kijken we naar een van de banden van een Spot5 beeld van een stukje Enschede. 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 omgeving van Enschede. Ik heb nu een willekeurige rij, de 37e, geselecteerd en laat vervolgens enkele correlatiecoëfficiënten zien. De correlatiecoëfficiënt is een bekende maat die relaties tussen reeksen getallen aangeeft. Een correlatiecoëfficiënt ter grootte 1 betreft een perfecte positieve lineaire relatie (Temperatuur gemeten in Celcius en Fahrenheit hebben een correlatie 1). Bij een zwakkere relatie wordt de correlatiecoëfficiënt kleiner.

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 10m.



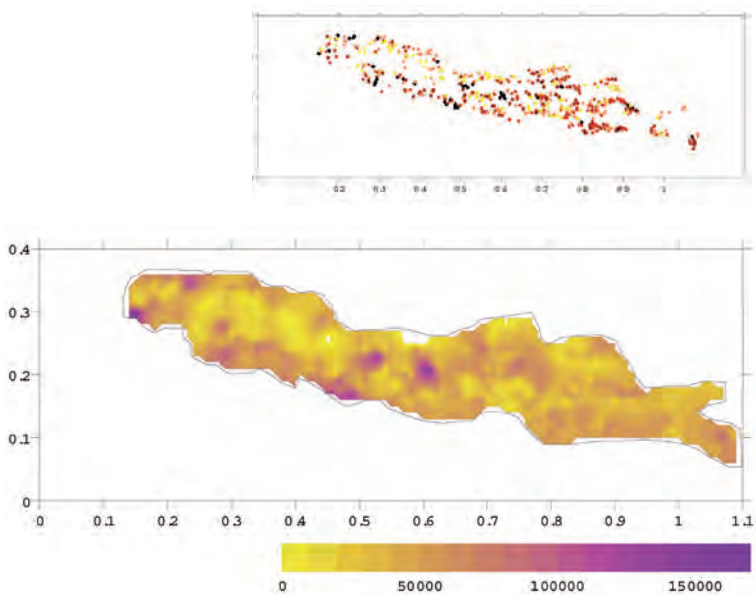
Figuur 5: Correlaties tussen pixelwaarden voor afstanden van 10 m (linksboven), 20 m (rechtsboven), 30 m (linksonder) en 40 m (rechtsonder) tussen locaties. Duidelijk is de afname te zien van de coorelaties bij toenemende afstand.

In deze figuren zien we steeds horizontaal de pixel waarde aan rij 37 en verticale als de pixelwaarden aan diezelfde rij, maar dan 1, 2, 3 of 4 pixels opgeschoven. De correlatiecoëfficiënt is aangegeven als 'r'. De correlatie voor een afstand van 10m is redelijk hoog (0.948). Deze neemt dan vervolgens snel af tot waarden van 0.855, 0.780 en 0.718 voor afstanden 20, 30 en 40 m tussen de pixel locaties. Er is sprake van een ruimtelijke samenhang, die we een

waarde kunnen geven. Overigens: als we dit herhalen voor een andere rij of een andere kolom zien we steeds hetzelfde patroon.

Waar zit hier de stochastiek? Deze bevindt zich in de waarden van de 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. Stelt u zich voor dat rondom u, om wat voor reden dan ook (een valse dobbelsteen, aardstralen, you name it), met een dobbelsteen steeds een 3 of een vier wordt gegooid. Dan nemen we aan dat de kans dat uw worp ook 3 of 4 wordt groter dan wat je bij onafhankelijke waarnemingen zou verwachten. Daarmee is de spreiding kleiner en kunnen we een betere verwachting uitvoeren van uw worp. Het is het concept afstand dat de ruimtelijke stochastiek zijn specifieke eigenschappen geeft.

Er kan daarnaast een verband bestaan met andere variabelen. In mijn voorbeeld waar ik het had over $Z(s)$ kunnen we voor de Z ook een aantal variabelen noteren: maximum temperatuur, minimum temperatuur, neerslag, etc.



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

[6]. We moeten dan wel gaan kijken hoe de relaties tussen deze variabelen zijn. Ook deze afhankelijkheid modelleren we op basis van de afstand tussen waarnemingen en wel via een afstandafhankelijke correlatie, maar nu tussen verschillende variabelen.

Laten nu eens kijken naar een ander belangrijk voorbeeld: methaan emissies op het eiland Java. Op Java wordt in grote hoeveelheden rijst verbouwd. Rijst is de motor van de groene revolutie geweest in de jaren 60 en vormt nog steeds het belangrijkste voedsel in veel ontwikkelingslanden. Een van de gassen die in rijstvelden ontsnappen is methaan (CH_4). Methaan is een belangrijk actor binnen global change. Het verdwijnt vanuit de bodem en het gewas in de atmosfeer. Met de groei van de wereldbevolking is de consumptie van rijst en daarmee de uitstoot van methaan toegenomen. Het gedrag is complex, de rol 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.

Ik heb voor u een kaartje gemaakt, met daarop in verschillende kleuren de hoeveelheid methaan. Het betreft hier zo'n 500 waarnemingen en gemodelleerde waarden op kleine veldjes. Ieder veldje meet zo'n 30 bij 30 meter, terwijl Java 126700 km^2 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 47 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 20e eeuw is hier al veel aan ontwikkeld, maar nieuwe uitdagingen zijn er voldoende.

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, een beperkt 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.

Recent is de PhD student Iswar Das begonnen met het vervaardigen van risicokaarten. Op zich is dat niet nieuw, want we kunnen al lang kaarten produceren waarop de kans op overschrijding van 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 derde uitdaging betreft validatie. Van oudsher is een kaart zo goed als het de werkelijkheid weerspiegelt - 'the proof of the pudding is the eating'. De gebruiker speelt hierbij een belangrijke rol. In een recente studie uitgevoerd samen met het Wageningse bedrijf Synoptics, inmiddels overgenomen door Vexcel, dat op zijn beurt weer door Microsoft is overgenomen, hebben we dat 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.

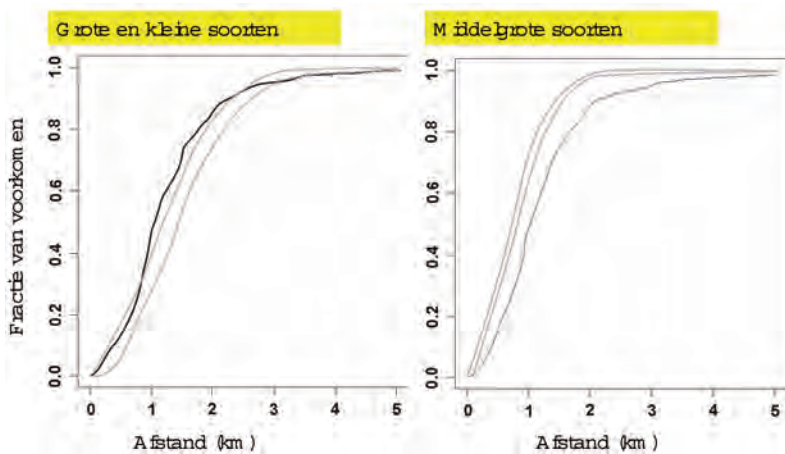
Punt patronen

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 in Freiberg [8], Adrian Baddeley in Perth [9], Australië en Peter Diggle in Lancaster [10]. We zullen vaak spreken over een ruimtelijk proces dat een patroon genereert.

We maken hierbij van oudsher een onderscheid tussen drie vormen. Een volledig toevallig patroon, een regelmatige patroon en een geclusterd patroon. Van te voren weten we vaak niet wat we aan zullen treffen. Inzicht in het type proces kan verhelderend zijn om de achterliggende fenomenen beter te begrijpen. Opnieuw is hier sprake van een afstands-verdeling, maar nu tussen puntobjecten. De stochastiek in dergelijke analyses bevindt zich in de verdeling van de afstanden tussen de objecten. In een volledig toevallig patroon volgen de afstanden een theoretische functie, in een regelmatig patroon komen sommige afstanden vaak voor, terwijl andere afstanden helemaal niet voorkomen, terwijl in een geclusterd patroon betrekkelijk korte afstanden veelvuldig voorkomen, en langere afstanden misschien wat

minder vaak voorkomen. Dat modelleren we bijvoorbeeld met een G-functie.

We bekijken een patroon X dat onder andere punten x en y zou kunnen bevatten. $G(r)$ is dan de verdelingsfunctie van de afstanden van een punt tot zijn dichtstbijzijnde buur, $G(r) = \Pr(\rho(x,y) \geq r)$ voor $r \geq 0$. Hierbij is $\rho(\cdot, \cdot)$ de Euclidische afstand tussen twee punten. $G(r)$ kunnen we interpreteren als de voorwaardelijke verwachting van de overige punten in X gegeven een punt op een willekeurige lokatie. Een heuristische interpretatie is $1-G(r)$ de kans is dat een schijf met straal r op een willekeurig punt geen ander punt van het patroon X bevat.



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

Een voorbeeld dat we recent geanalyseerd hebben betreft de verspreiding van kuddes grote grazers in een Afrikaans savannelandschap [11]. Het Laikipia park is een natuurlijk landschap dat niet de status van een nationaal park heeft. Doel van dit onderzoek was de vraag of we de patronen van verspreiding van kuddes wilde dieren konden begrijpen, bijvoorbeeld op basis van ecologische gronden. In de figuur 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 preda-

toren 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. Het nieuwe element zit er dan in dat we de afstandsverdeling koppelen aan co-variabelen.

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 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, etc.

Rasterdata.

De derde vorm van ruimtelijke stochastiek betreft de kwantitatieve analyse van gebiedsdelen. Hier zijn we geïnteresseerd in verklarende kenmerken, we hebben te maken met vastliggende eenheden, zoals gemeentes, provincies, landen, biotopen, catchments 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, 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 Geman 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]. Buruli Ulcer is een zwerenziekte die wereldwijd veel voorkomt. Het is een aan lepra gerelateerde ziekte die gekenmerkt wordt door de vorming van grote zweren op de huid

en het uitblijven van een immunologische reactie. Het komt vooral voor in tropische gebieden in de wereld, zoals in verschillende landen in West Africa. Het komt steeds meer voor en is na lepra en tbc inmiddels de derde oorzaak van mycobacteriele infecties bij gezonde mensen. De ziekte lijkt vooral voor te komen als er veranderingen in het milieu hebben plaatsgevonden, zoals de ontwikkeling van wateropslag, het winnen van zand of irrigatie.

In een aantal dorpen ('settlements') in Ghana hebben we de sterfte aan 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 situaties 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. Het model dat u hier ziet koppelt de resolutie op een schaal van waarnemen met die op een andere. Dat levert dan een stochastisch model op. Hiermee kunnen we van de gemeentelijke schaal naar de provinciale schaal gaan, maar ook uitspraken de andere kant uit doen: disaggregatie van de provinciale naar de gemeentelijke schaal.

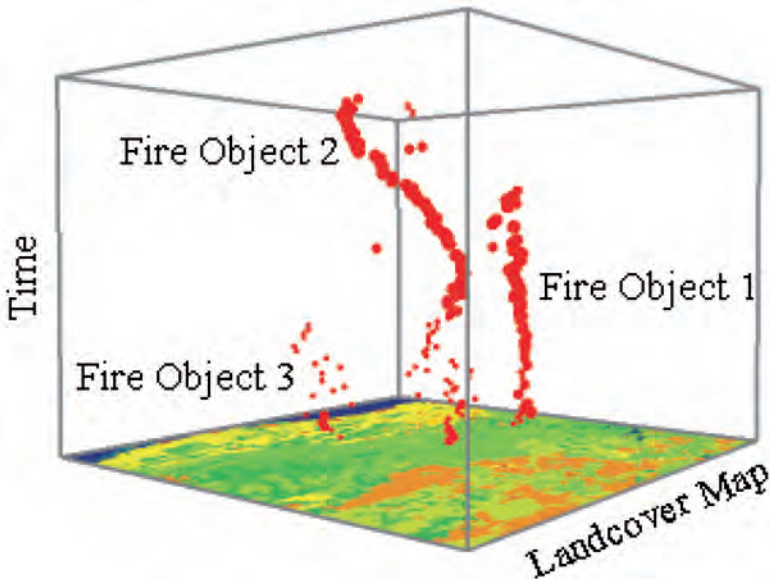
Ruimte-tijd.

We zullen nu aandacht 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 beel-

den 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 ruimte en tijd.

De Franse filosoof Bergson vroeg zich of ruimte en tijd aan elkaar gelijk gesteld kunnen worden [15]. Hij geeft echter aan de tijd niet zozeer te zien als een soort ruimte waarin zich de processen afspelen, maar het zich meer als een scheppende, dynamische kracht voor te stellen. Dat is wat mij betreft wat te simplistisch, want ik zie in de ruimte ook wel als een scheppende kracht. Maar het procesbegrip positioneren we toch liefste in de tijd, waar we duidelijk oorzaak en gevolg kunnen aangeven, in tegenstelling tot de ruimte. Bij het analyseren van processen modelleren we de afhankelijkheid in de tijd vaak anders dan in de ruimte en de combinatie ruimte-tijd levert daarmee toch wel wat lastige problemen op - er is bijvoorbeeld geen natuurlijke manier om de eenheden (meter en dag) te verbinden. Uitgangspunt is dat



Figuur 8: 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.

wat morgen gebeurt vermoedelijk meer lijkt op wat vandaag gebeurt dan op wat gisteren gebeurde.

In ruimte en tijd analyses proberen we stochastische beeldanalyse te koppelen 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]. De ruimtelijke resolutie is hier ca. 3 km, d.w.z. iedere pixel is de gemiddelde reflectiewaarde over een eenheid van 9 km². We zien een zogenaamde ruimte-tijd kubus van bosbranden. Horizontaal is de ruimte geprojecteerd met daarin een vegetatiekaart, verticaal de tijd. Met een wolkenvrije lucht kun je dan een redelijk model vaststellen. Dit model was goed in staat om de beweging van bosbranden te voorspellen.

Verdere voorbeelden zien we uiteraard op het epidemiologisch vlak waar we de verspreiding van ziektes in ruimte en tijd besuderen. 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.

Beslissingondersteuning.

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, hebben we aspecten van simulated annealing gebruikt om bijvoorbeeld optimale bemonsterings-schema's te vinden [17]. 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 Groenigens werk heeft geresulteerd in procedures die breed toepasbaar zijn en waar het neerkomt op het vaststellen van een goede doelfunctie die vervolgens geoptimaliseerd wordt. Deze methoden hebben inmiddels hun plaats te hebben gevonden. Maar beslissingondersteuning 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

Ontwikkelingen in het opnemen en verspreiden van digitale beelden gaan steeds sneller. Tevens wordt de mate van detaillering alleen maar groter, evenals de frequentie van waarnemen. 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, de mobiele telefoon en navigatiesystemen zijn de belangrijkste oorzaken. Daarmee groeien de mogelijkheden en worden de vragen die we kunnen stellen en beantwoorden steeds gevarieerder. Het bekendste voorbeeld is wellicht Google Earth, waarbij we op verschillende niveaus kunnen inzoomen op - in principe - ieder stukje van de wereld. 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.

- 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 toe neemt wordt het doel specifiek.
- 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 uit-

gebreed 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.

Deel 3: 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 dichterbij 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'.

- De belangrijkste vraag is wat mij betreft: hoe kunnen we niet alleen waarnemen in de ruimte, maar 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. Maar waarom is het dan ook, in dit simpele geval, nog niet gelukt? Liever zie ik stochastiek, naast bijvoorbeeld proceskennis en systematische inventaristiek, als een onafhankelijke richting in de wetenschap. Het is een veld met een eigen terminologie, maatschappelijke toepassingen en validatiemogelijkheden.
- Ik zie veel mogelijkheden bij een verdere integratie van beeldanalyse met stochastische methoden. Stochastische meetkunde, stereologie, multivariate analyses van heel veel banden, het ontdekken van extremen (vooral in vegetatie en ondergrondstudies van belang), waarbij we niet alleen de

onzekerheid vaststellen, maar het misschien ook wel als een groot goed zien en het kunnen gebruiken.

- Integratie tussen modellen en beeldinformatie gaat steeds verder. Met modellen bedoel ik dan bv. transportmodellen, landbouwkundige modellen en milieumodellen. Dergelijke wiskundige modellen kunnen in principe van beelden gebruik maken. De verschillen tussen de beschikbaarheid van informatie en de vragen bij het gebruik ervan liggen nog steeds ver uit maar komen stilaan wel tot 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 weg-informatie. 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 overal is er sprake van onzekerheid. Recent heeft het ITC gegevens verzameld door een helikopter over Enschede te laten vliegen. Deze heeft uiterst precieze lasergegevens opgenomen. Deze kunnen worden vertaald in zeer gedetailleerde hoogte-informatie met een punt dichtheid van 12 tot 25 punten per m². Bij elkaar zijn er misschien wel meer gegevens dan Mozart noten heeft geschreven (en die had daar geen helikopter bij nodig!). Je krijgt zeer nauwkeurige informatie over de hoogte van het terrein. De auto's kun je onderscheiden, maar de takken van de bomen op de binnenplaats nog net niet. Soms is het zelfs mogelijk om in de auto te kijken. 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. Overigens biedt deze ontwikkeling interessante mogelijkheden voor de juristen in het gehoor. Maar er zijn nog altijd zoveel vragen die niet beantwoord kunnen worden. Zoals: vragen met een sterke tijdscomponent of die een nog hogere resolutie nodig hebben. 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.

Deel 4: Het netwerk

Dames en heren,

Geef me de ruimte. 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 [19]: ook nog over een miljoen jaar. 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 - in de tussenliggende periode was ik hoogleraar in Wageningen. 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 te werken aan het uitbreiden van de mogelijkheden van een stochastische analyse van beelden. 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 onderzoeksschool CTIT heb ik al een aantal inspirerende gesprekken kunnen voeren. Er is veel kennis voorhanden op het vlak van de temporele stochastiek - deze richt zich vooral op patronen in de tijd. De waarde van aandelen, prijsontwikkelingen, temperatuurschommelingen, etc. De ruimte vormt daarbij een onmisbare component.

Mijn eigen groep aan het ITC, de staf en de PhD studenten, maar ook mijn collegae: zij allen dragen bij aan de verdere ontwikkeling van het vakgebied. Contacten met het bedrijfsleven zijn zeer vruchtbaar en inspirerend. Ook met Wageningen Universiteit onderhoud ik nog verschillende levendige contacten. Binnen Nederland is met name de vereniging voor statistiek en operationele research belangrijk. Daarnaast kennen we 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, met name met het Indian Institute of Remote Sensing. We bestuderen nu ook de ontwikkeling van theeplantages, en proberen patronen van bomen en bossen op verschillende schalen te modelleren met fractale methoden. Samenwerking met China gaat steeds verder en wordt concreter. Binnenkort gaan met de universiteit in Wuhan op PhD niveau aan de slag. We gaan kijken naar het monitoren van onzekere objecten. Verder gaan we stochastische beelden analyseren gekoppeld aan het monitoren van de droogte in Oost-Afrika. Daarnaast hebben we lopende onderwijscontacten met instituten in Tanzania en Nigeria, terwijl samenwerking met Zuid-Afrika begint te lopen.

Ik blijf het fascinerend vinden om met buitenlandse collega's en studenten samen te werken, verschillende culturen en wetenschappelijke benaderingen te ervaren en gezamenlijk tot een mooi resultaat te komen. De grootste fascinatie is dan vooral de specifieke vraagstelling, ingegeven door lokale

ontwikkeling, lokale voorwaarden en lokale mogelijkheden. Zo is in West Europa 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 waar ik daar mee op doel: mijn werk zal zich richten op een stochastische analyse van ruimtelijke gegevens in een brede zin. Satellietbeelden, en veldwaarnemingen, gemodelleerde gegevens, kortom in principe alle gegevens waarbij de ruimtelijke verankering van belang is. Dat wil ik dan graag uitbreiden met gegevens (beelden) met een essentiële temporele verankering.

Aan het einde van deze rede neem ik u nogmaals mee naar de kunst, naar een schilderij dat steeds erg tot mijn verbeelding heeft gesproken: 'La Primavera' van Botticelli.



Figuur 9: *Hermes wuift de laatste wolkjes weg in 'La Primavera' van Botticelli, waarmee hij de ruimte creëert.*

Het is een schilderij uit rond 1478. We keren ons hier naar een tijd waarin de wereld zich vrij maakte van de beknellingen van de middeleeuwen. We zien

links op het schilderij Hermes, die de laatste wolkjes wegwuift, waarmee hij het overzicht, en de ruimte krijgt. Drie vrouwfiguren staan in een bloementuin die in die tijd zijn gelijke niet kende, bevattende meer dan vijfhonderd verschillende soorten, in detail geschilderd. De vrouwen representeren misschien wel de wetenschap, de kennis en de schoonheid. Of zijn het zijn drie dochters? Zij kunnen vrijelijk bewegen en zich optimaal ontwikkelen. Hun wordt de ruimte gegeven. Mijn taak is het de wolken weg te houden of weg te wuiven - een belangrijke taak van een manager op vele niveaus. Alleen in dergelijke omgeving kunnen we vooruit.

Geef me de ruimte. 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 positief onthaal kunnen rekenen. Dat dit een voorwaardelijke vrijheid moet zijn is misschien maar goed ook, maar het kan niet zo zijn dat de voorwaarden de vrijheid overheersen. Nee, geef mij de ruimte, de voorwaarden vind ik wat minder boeiend. Binnen de huidige positie heb ik deze vrijheid uitstekend kunnen ervaren.

Mijnheer de rector magnificus,

Deze leerstoel is tot stand gekomen uit een samenwerking tussen het ITC en de universiteit Twente. 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 we misschien pas aan het begin staan van deze wederzijdse samenwerking. Er is in mijn ogen een 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.

Deel 5: 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. De docenten aan de technische universiteit Eindhoven, in het bijzonder de hooggeleerde Doornbos en Steutel en mijn begeleider destijds, Dr. Nico Linssen. De docenten aan Wageningen Universiteit, met name de begeleiders van mijn promotieonderzoek, de hooggeleerde Corsten en Bouma en Dr. Aad van Eijnsbergen.
- Zij die deze leerstoel mede hebben mogelijk gemaakt: de benoemingsadviescommissie die een positief oordeel velde en het college van bestuur die dit oordeel overnam. De rectoren prof. Zijm van Twente Universiteit en professor Molenaar van het ITC. Van prof. Zijm bleek ik in zowel zijn als mijn jonge jaren nog enkele beginselen uit de stochastiek te hebben geleerd. Graag had ik ook zoiets van prof. Molenaar laten zien, maar de historische waarde van de notulen van de GGG uit de jaren tachtig zijn nog te gering dat iemand zich de moeite heeft getroost ze te digitaliseren.
- 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, literatuur, filosofie en natuur. Ik vind het ontzettend leuk dat mijn vader hier in het cortège is gaan zitten. Normaliter draag ik zijn toga, die ik vandaag even voor een echte Twentse heb ingeruild. Mijn moeder die steeds de randvoorwaarden geschapen heeft waarbinnen ik me in alle vrijheid kon ontwikkelen.
- En tenslotte mijn drie dochters Judith, Olga en Fleur, en mijn vrouw Anita. De warmte thuis, het meeleven met elkaar en het wederzijds begrip zijn onmisbaar en onbetaalbaar. Ik kan u verzekeren dat drie opgroeiende meiden om je heen je wakker en bij de tijd houden. We hebben met elkaar geen gemakkelijk jaar gehad. De verhuizing naar Enschede bracht heel wat beweging met zich mee en dat ging zeker niet vanzelf. Daarnaast heeft het overlijden van een zeer dierbare vriendin ons allen erg aangegrepen. Met elkaar hebben we dit opgelost. Ik vertrouw erop dat we nu in een wat rustiger ruimte belanden en dat het allemaal niet voor niets is

geweest. Lieverds, zonder jullie was ik niet wie ik ben, was het met mij nooit geworden zoals het nu is en zal het ook nooit zijn zoals het moet zijn.

Geef me de ruimte. Het is de door mij zo gewaardeerde dichter en literator Fernando Pessoa die in zijn boek der rusteloosheid wijst op onze mogelijkheden en verantwoordelijkheden:

De waarachtige landschappen zijn diegene die we zelf creëren, want zo [...] zien we hen zoals ze werkelijk zijn, dat wil zeggen hoe ze geschapen zijn.

Ik heb gezegd.

Referenties

- [1] Stein, A., and De Beurs, K., Map indices to quantify semantic accuracy in segmented Landsat images, *International Journal of Remote Sensing*, 26, 2937-2951, 2005
- [2] Glasbey, C.A., and Horgan, G.W., *Image analysis for the biological sciences*, Wiley, Chichester, 1995
- [3] Epinat, V., and Stein, A., and De Jong, S.M., and Bouma, J., A wavelet characterization of high-resolution NDVI patterns for precision agriculture, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3, 121 - 132, 2001
- [4] Kolmogoroff, A.N., *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung, Ergebnisse der Mathematik*, Springer-Verlag Berlin, 1933
- [5] Matheron, G., The intrinsic random functions and their applications, *Advances in applied probability*, 5, 439 - 468, 1973.
- [6] Stein, A., *Spatial interpolation*, Wageningen University, 1991
- [7] Kyaruzi, J.K., Quality assessment of DEM from radargrammetry data: quality assessment from the user perspective, ITC, 2005
- [8] Stoyan, D., and Kendall, W.S., and Mecke, J., *Stochastic geometry and its applications*, Wiley, New York, 1995
- [9] Baddeley, A.J., Combinatorial foundations of stochastic geometry, *Proc. London Math. Soc.*, 42, 154 -177, 1981
- [10] Diggle, P.J., *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns* -2nd edition, Arnold publishers, London, 2003
- [11] Kheamba, W.M., *Development and application of spatial and temporal statistical methods for improved sampling of wildlife*, Wageningen University, ITC, 2000
- [12] Geman, S., and Geman, D., Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6, 721 -741, 1984.
- [13] Besag, J., On the statistical analysis of dirty pictures, *Journal of the Royal Statistical Society, B* - 48, 259 - 302, 1984
- [14] Duker, A., *Spatial analysis of factors implicated in Micobacterium ulcerans infection in Ghana*, Wageningen University, 2005
- [15] Bergson, H., *Time and free will*. Dover Publications, 2001
- [16] Umamaheshwaran, R., and Bijker, W., and Stein, A., Image mining for modeling of forest fires from Meteosat images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 246-253, 2006
- [17] Van Groenigen, J.W., *Constrained optimisation of spatial sampling: a geostatistical approach*, Wageningen University, 1999
- [18] Van de Vlag, D.E., *Modeling and visualizing dynamic landscape objects and their qualities*, Wageningen University, ITC, 2006
- [19] Kwee, S.L., *Mens, techniek en toekomst, Wijsgerig perspectief op maatschappij en wetenschap* 22, 46 -53, 1981



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit