

## 1.1 Aardobservatie voor het monitoren van ecosystemen

### Prof.dr. Steven M. de Jong

Departement Fysische Geografie, Faculteit  
Geowetenschappen, Universiteit Utrecht  
[www.geo.uu.nl/dejong](http://www.geo.uu.nl/dejong)

- Lezing gehouden voor de Koninklijke Maatschappij voor Natuurkunde 'Diligentia' te 's-Gravenhage op 21 september 2015.
- Een video opname van de lezing is te zien op [www.natuurwetenschappen-diligentia.nl](http://www.natuurwetenschappen-diligentia.nl).
- Deze eerste lezing van het seizoen, onze KENNISMAKINGSLEZING, is vrij toegankelijk voor iedereen. De belangstelling was groot.

### Samenvatting van de lezing:

Veel van wat we weten over het functioneren van 'systeem aarde', het functioneren van ecosystemen of klimaatverandering, wordt afgeleid uit aardobservatiebeelden. Deze aardobservatietechnieken zijn in de afgelopen decennia razendsnel ontwikkeld. Binnen de aardwetenschappen maken we tegenwoordig gebruik van satellietbeelden, vliegtuigbeelden en van beelden opgenomen met drones (Unmanned Airborne Vehicles of UAVs). Sensoren aan boord van deze platformen maken opnamen in zichtbaar licht, in het nabij- en midden-infrarood-, thermisch infrarood- en het microgolfgebied. Elk spectrale gebied heeft zijn eigen voordelen en levert ons een specifiek type informatie over het landschap. Nabij- en midden-infrarood licht verschaft informatie over vegetatiebedekking, stress bij planten en de aanwezigheid van mineralen in de bodem. Het microgolfgebied levert informatie over bodemvocht en beelden in het zichtbaar licht, opgenomen met camera's in UAVs, leveren bijvoorbeeld informatie over ijsstromingen en het afsmelten van gletsjers in Nepal. Tijdens de lezing werd ingegaan op de werking van een aantal aardobservatietechnieken en zijn voorbeelden van het gebruik gepresenteerd.

### Inleiding

Met een almaar groeiende wereldbevolking en voor veel mensen een stijgend welvaartsniveau wordt de druk op onze leefomgeving groter en groter. De mens gebruikt steeds meer ruimte om te wonen, te reizen en te recreëren. De mens gebruikt ook steeds meer natuurlijke hulpbronnen (water, olie, gas, hout, metalen, mineralen). De Club van Rome beschreef al in 1972 de relatie tussen economische groei en de gevolgen voor het milieu op basis van prognoses van grondstof- en voedselgebruik (Meadows et al., 1972) en voorspelde het opraken van essentiële grondstoffen. In de jaren 90 kwam Rees met het idee om de druk die de mens uitoefent op zijn leefomgeving uit te drukken in de ecologische voetafdruk (Rees, 1992). Het uitgangspunt van deze ecologische voetafdruk is dat menselijke consumptie van water, hout, vis, vlees en/of fossiele brandstof kan worden uitgedrukt in een benodigd productie-oppervlak in hectares. Een dergelijke kwantificering maakt goed inzichtelijk dat onze consumptie veel hoger is dan de aarde aan kan en brengt tevens de spreiding van consumptie over de aarde in beeld, zoals bijvoorbeeld in tabel 1.

De gevolgen van de grote wereldbevolking en het hoge welvaartsniveau zijn onder andere een snelle ontbossing van sommige delen van de aarde, grootschalige exploratie-activiteiten van mineralen en fossiele grondstoffen, en verontreiniging van

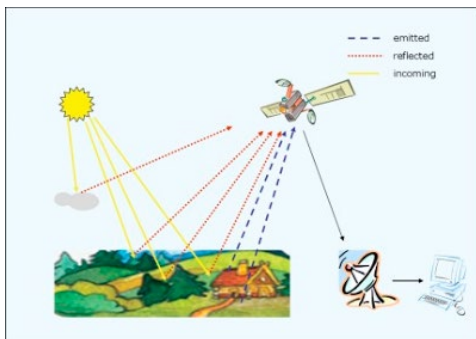
Land / continent	Ecologische voetafdruk ha
Wereld gemiddeld	2.7
Noord-Amerika	7.1
Europa	4.7
Afrika	1.4
Verenigde Staten	8.0
Nederland	6.2
India	0.9

**Tabel 1:** Enkele voorbeelden van de gemiddelde ecologische voetafdruk per inwoner.

bodem en water. Ook de mondiale opwarming met als gevolg het afsmelten van de ijskappen en het stijgen van de zeespiegel wordt deels geweten aan de grote menselijke consumptie. Het inventariseren en beheren van onze natuurlijke hulpbronnen voor de toekomstige generaties en het leefbaar houden van onze planeet vraagt dat wij het ecologische systeem van de aarde goed kunnen waarnemen en begrijpen: hoe functioneren verschillende ecosystemen op aarde? En wat zijn belangrijke variabelen met invloed op systeem aarde? Aardobservatie en ecologische procesmodellen spelen daarbij een cruciale rol. Aardobservatie omdat het met zijn brede scala aan technieken ons in staat stelt om Systeem Aarde nauwkeurig waar te nemen en ruimtelijke patronen en dynamiek van het aardoppervlak kwantitatief te karteren. Procesmodellen omdat deze behulpzaam zijn bij het voorspellen wat de gevolgen zullen zijn van menselijk handelen zoals ontbossing, of het verstoken van fossiele brandstoffen.

### Concept van Aardobservatie

Als startpunt voor de aardobservatie zouden we de lancering van de eerste weersatelliet TIROS-1 in 1960 kunnen nemen, of de lancering door de NASA van de eerste aardobservatiesatelliet ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) later aangeduid als het Landsat-programma. Aardobservatie verwijst naar een breed scala van methoden en



**Figuur 1:** de vier componenten van een aardobservatie systeem: bron van elektromagnetische straling, de objecten aan het aardoppervlak, de atmosfeer en de sensor.

technieken om het aardoppervlak waar te nemen en te bestuderen met sensoren aan boord van satellieten, vliegtuigen en UAVs (Unmanned Airborne Vehicles). We beperken ons hier tot sensoren, die reflectie of emissie van elektromagnetische straling (ems) waarnemen, radiometers vallen in de laatste categorie. Geschikte en veel gebruikte delen van het elektromagnetische spectrum zijn het zichtbare licht (400-700 nm), nabij en midden infrarood (700-2500 nm), thermisch infrarood (0.3-14  $\mu\text{m}$ ) en het microgolfgebied (0.1-0.75 cm). Een typisch aardobservatie- (of remote sensing) systeem onderscheidt vier componenten (figuur 1):

1. een bron van elektromagnetische straling: dit kan de zon zijn voor reflectie in het optische deel van het spectrum; het kan de aarde zijn in het thermisch infrarode deel en in het passieve microgolf gebied, of het kan een kunstmatige bron zijn in het actieve microgolf gebied,
2. de objecten aan het aardoppervlak en straling-object interactie,
3. de atmosfeer als het medium waar de straling zich door verplaatst en
4. de sensor met zijn specifieke eigenschappen.

De bron van straling is vaak de zon (400-2500 nm), maar ook de aarde zelf is een bron bij thermische waarnemingen. Aardobservatiebeelden dienen gecorrigeerd te worden voor geometrische verstoringen en geprojecteerd te worden in een cartografische projectie om ze te kunnen combineren met andere data zoals topografische kaarten of GPS punten uit een veldkartering. Een tweede correctie op aardobservatiebeelden is het converteren van de gemeten inkomende straling ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) naar reflectie. Reflectie is het percentage door de sensor gemeten straling ten opzichte van de inkomende straling (van meestal de zon). Het is de meest gebruikte grootheid in de literatuur voor aardobservatiebeelden en spectrale reflectiecurven.

Na deze beeldcorrecties is er een groot aantal beeldverwerkingsalgoritmen beschikbaar om de informatie in het beeld, dat wil zeggen gereflecteerde of uitgezonden elektromagnetische straling, te vertalen in objectinformatie, zoals bijvoorbeeld

landgebruik, vegetatiebedekking, mineraalvoorkomen, bodemtype, gezondheidstoestand van een gewas. Deze algoritmen omvatten diverse methoden van beeldclassificatie waarbij referentiepixels in het beeld met bekende objecteigenschappen worden gebruikt om alle andere, onbekende pixels in het beeld te labelen. De referentiepixels bevatten dan bijvoorbeeld klassen zoals bos, grasland, water, wegen of stedelijk gebied, welke dan gebruikt worden om een landgebruikskaart te maken. Er bestaan ook contextuele of topologische algoritmen waarbij informatie uit de buurpixels wordt gebruikt om objecten te identificeren (De Jong & Van der Meer, 2004). En er is een groep van algoritmen waarbij een bandratio wordt berekend van combinaties van spectrale banden om bijvoorbeeld mineraal aanwezigheid of vegetatiebedekking te bepalen. De meest bekende bandratio is de NDVI (normalized difference vegetation index) die een indicatie geeft voor vegetatiebedekking. De NDVI gebruikt de rode zichtbare spectrale band (600-700 nm) waar pigmenten in het blad van de plant

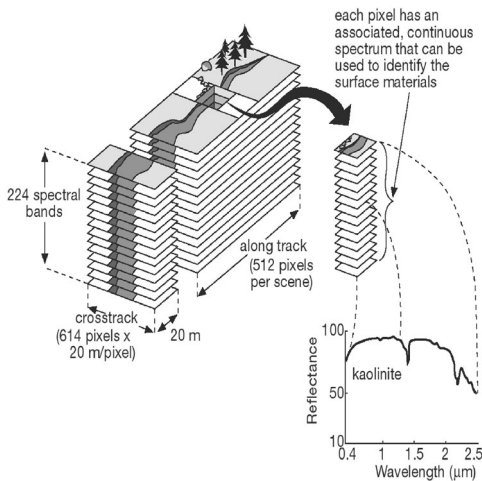
veel licht absorberen en de nabij-infrarode (700-900 nm) waar vegetatie veel zonlicht reflecteert. Deze ratio geeft optimaal contrast tussen bodems, water en spaarzaam of dicht begroeide plekken in de beelden. De uitvoer van deze algoritmen wordt gebruikt voor kaarten of als invoer in klimaatmodellen, gewasgroeimodellen, hydrologische modellen, erosiemodellen etc.

Tijdens de lezing zijn we ingegaan op twee voorbeelden van aardobservatie:

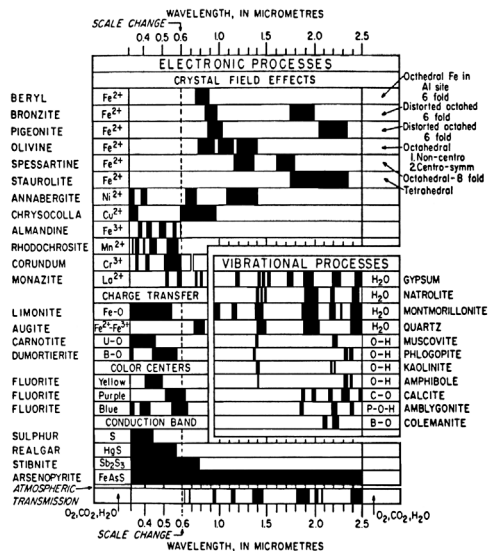
1. het karteren van mineraalvoorkomens met behulp van beeldvormende spectroscopie in de exploratiegeologie en
2. het gebruik van camera's aan boord van een UAV om de dynamiek van een gletsjer in de Himalaya te karteren. Beide voorbeelden worden hieronder beschreven.

### Mineraalvoorkomens en beeldvormende spectroscopie

Sinds de lancering van Landsat-1 in 1972 heeft de aardobservatietechniek een sterke ontwikkeling



**Figuur 2:** Het principe van beeldvormende spectroscopie. Het gereflecteerde zonlicht wordt door de sensor geregistreerd in 224 spectrale banden van ongeveer 10 nm breed. Absorptiebanden van mineralen zoals van kaolinitiet bij 2200 nm worden daardoor zichtbaar zodat we mineraalvoorkomens nauwkeurig in kaart kunnen brengen (Van der Meer & De Jong, 2004).

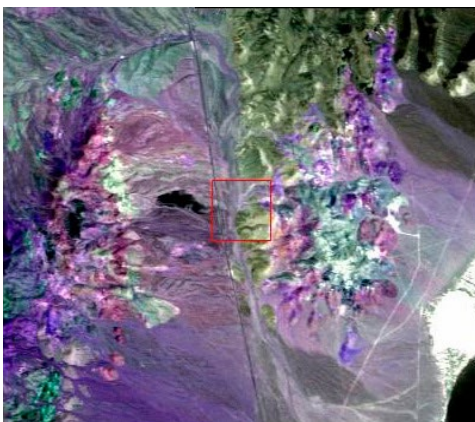


**Figuur 3:** De Steen van Rosetta voor mineraalkartering met beeldvormende spectroscopie. Voor de verschillende mineralen toont de figuur de spectrale positie van de absorptiebanden.

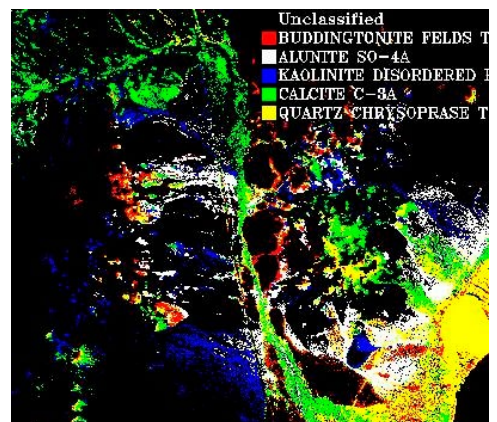
doorgemaakt. Een interessante technologische ontwikkeling is de beeldvormende spectrometer. Een beeldvormende spectrometer registreert voor ieder pixel het gehele zonnenspectrum van 400 tot 2500 nm in vele, smalle (~10 nm brede) spectrale banden, zie figuur 2. Deze spectrometers registreren per pixel de absorptiebanden van gesteenten, mineralen, plant-pigmenten e.d. vanuit de lucht op 5 km hoogte of vanuit de ruimte op 700 km hoogte. Spectrometers worden operationeel ingezet voor exploratiegeologie en bij het zoeken van (klei-)mineralen zoals Kaolinit, Aluniet en Hematiet en (edel)metalen zoals goud, zilver en koper. Goud en zilver ontstaan over het algemeen in hydrothermale systemen. Dit kunnen zowel nog actieve als fossiele systemen zijn. Vulkanen, geisers, fumarolen en magma-intrusies zijn hydrothermale systemen waar lange tijd water met opgeloste stoffen bij hoge temperaturen en onder hoge druk gecirculeerd heeft. Als functie van druk, temperatuur en zuurgraad worden op specifieke plaatsen en in specifieke volgorden de mineralen en metalen afgezet. Met spectrometers kunnen we met behulp van de mineraalabsorptiebanden die ruimtelijke patronen in beeld brengen en zo de meest waarschijnlijke locatie van zilver of goud bepalen. Een typerende opeenvolging van mineralen die in de richting leidt

van waarschijnlijke goudafzettingen is Kaolinit, Buddingtoniet en Aluniet met absorptiebanden bij respectievelijk 2200, 2116 en 2160 nm.

Figuur 4a toont een spectroscopisch beeld opgenomen door AVIRIS ([aviris.jpl.nasa.gov](http://aviris.jpl.nasa.gov)). AVIRIS is de spectrometer van NASA die vanaf 20 km hoogte in een ER-2 vliegtuig het spectrum meet zoals weergegeven in figuur 2. Het beeld toont de Cuprite woestijn in Nevada. Links en rechts van het rode vierkant zijn twee fossiele, acht miljoen jaar oude vulkanen te zien waar door hydrothermale processen diverse mineralen en metalen zijn afgezet. Deze afzettingen zijn door latere erosie aan het oppervlak komen te liggen. Figuur 4b toont de mineraalvoorkomens zoals die in kaart gebracht zijn op basis van de mineraal absorptiebanden. De rood-wit gekleurde banden rond de kernen van de fossiele vulkanen zijn voorkomens van de mineralen Buddingtoniet en Aluniet. Langs deze banden is het voorkomen van goud en zilver het meest waarschijnlijk. Het algoritme dat gebruikt is om deze kaart in figuur 4b te maken heet 'Spectral Angle Mapper: SAM' (Van der Meer & De Jong, 2002). Dit algoritme vergelijkt spectra in de beeldpixels met referentiespectra. Referentiespectra kunnen reflectiespectra van mineralen zijn die in



**Figuur 4a:** Spectroscopisch vliegtuigbeeld van de Cuprite woestijn, Nevada USA. Links en rechts van het rode vierkant zijn twee fossiele vulkanen te zien met typische mineraal volgorde.



**Figuur 4b:** Mineraalkaart op basis van absorptiebanden in het beeld in figuur 4a. De rood-witte banden (Buddingtoniet en Aluniet) geven de meest waarschijnlijke plaatsen voor goud en zilver afzettingen.

het laboratorium zijn gemeten. Een mineraalgesteente wordt naar het lab gebracht en onder gecontroleerde omstandigheden wordt met een spectrometer nauwkeurig de spectrale reflectie van het mineraal gemeten. Dit soort lab spectra zijn beschikbaar op internet in zogenaamde 'spectral libraries' bijvoorbeeld die van de USGS: United States Geological Survey (Clarke et al., 2015). Referentiespectra kunnen ook in het veld gemeten worden. De spectrometer gaat mee het veld in en in de buitenlucht wordt de spectrale reflectie van mineraalgesteente nauwkeurig gemeten. Het SAM algoritme vergelijkt vervolgens de vliegtuigbeeld spectra in ieder beeldpixel met deze referentie spectra. Beide spectra kunnen voorgesteld worden als vectoren in een multidimensionale ruimte met even veel assen als het aantal spectrale banden in het aardobservatiebeeld. De hoek tussen de twee vectoren, beeld spectrum en referentiespectrum, beschouwt SAM als een maat voor hoe goed het beeld spectrum op het mineraalspectrum lijkt. De beeldspectra worden met meerdere mineraalspectra vergeleken. Als de kleinste hoek gevonden is tussen beeldspectrum en referentiespectrum dan wordt het beeldpixel geclassificeerd als behorend tot het betreffende mineraal. Een voorbeeld van de uitkomst van het SAM algoritme voor het Cuprite gebied in Nevada is te zien in figuur 4b.

Mocht u uw geluk willen proberen en goud of zilver gaan zoeken in Cuprite, weet dan dat in dit gebied



**Figuur 5a:** de SenseFly Swinglet UAV in zijn koffer. Deze UAV is gebruikt om de foto's van de Langtang gletsjers te verzamelen.

al decennia lang volop goud en zilver is gewonnen dus de kans dat u nu nog rijke schatten vindt is extreem klein.

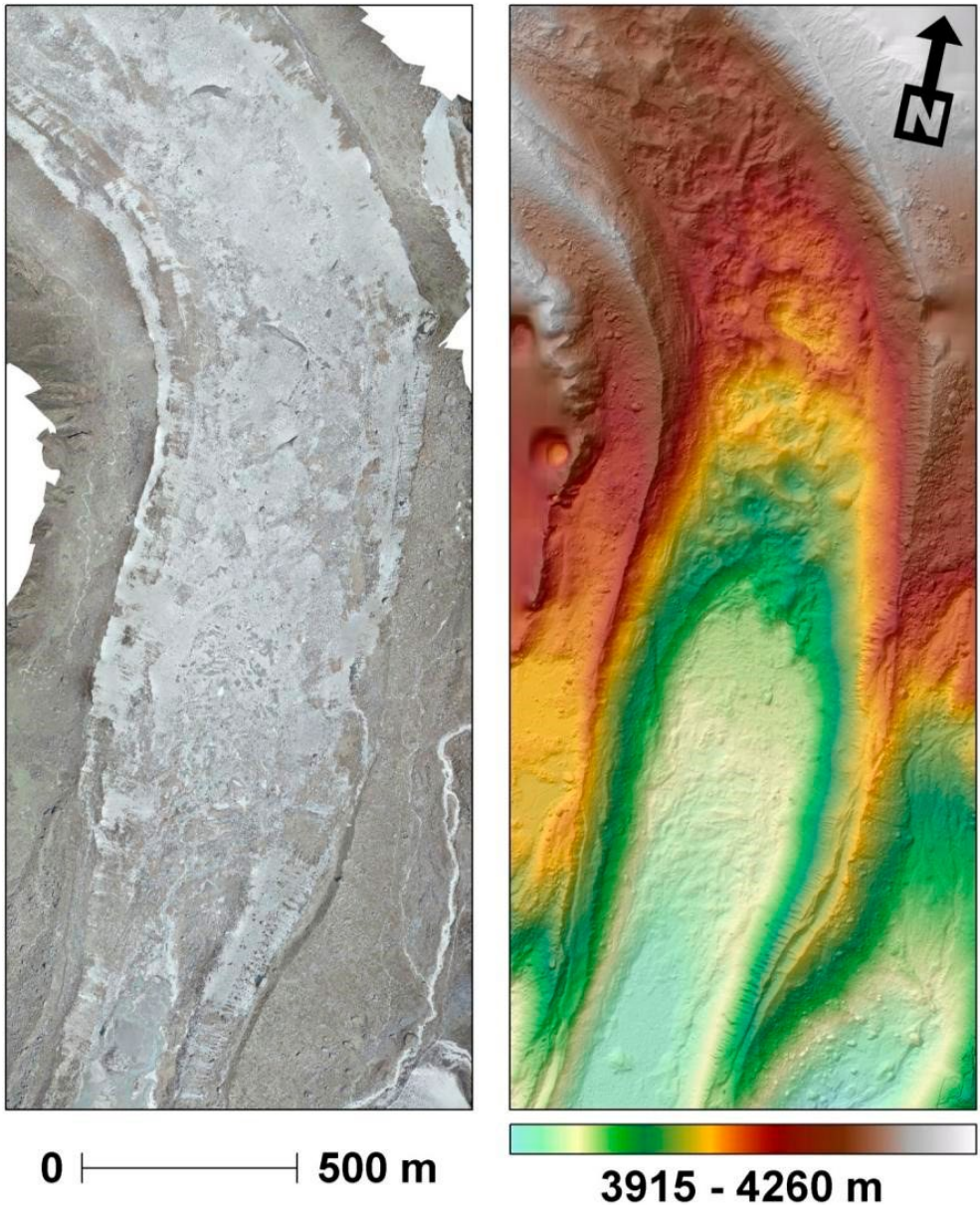
### Gletsjerbewegingen karteren met UAV opnamen

Vanuit het departement Fysische Geografie onderzoeken wij de gevolgen van opwarming van de aarde op de gletsjers en sneeuwvelden van de Himalaya en het Tibetaans plateau. Deze zogenaamde 'watertorens' voorzien de grote rivieren in zuidoost Azië van water. Ze spelen een cruciale rol in de drinkwatervoorziening en de voedselzekerheid (irrigatiewater) van anderhalf miljard mensen die benedenstrooms langs de rivieren Ganges, Indus, Yangtze en Brahmaputra wonen. Het klimaatstelsel in dit gebied is complex en wordt gedreven door de moesson. De moesson brengt grote hoeveelheden regen tussen eind mei en eind september. De winter in het Langtang gebergte is relatief droog. Binnen het project worden de hydrologische processen bestudeerd in het hooggebergte en hoe het afsmelten van de gletsjers en sneeuwvelden bijdraagt aan het afvoerregime van de rivieren. Aardobservatie en hydrologische modellen spelen een cruciale rol om beter te begrijpen hoe dit ecosysteem in de komende decennia zal veranderen.

Om het smelt- en stromingsgedrag van een aantal gletsjers waaronder de Langtanggletsjer in Nepal te bestuderen werken we met camera's aan boord



**Figuur 5b:** de lancering van de Swinglet UAV vanaf de zij-morene van de Langtang gletsjer in Nepal.



**Figuur 6:** Orthomosaïek (links) en Digitaal Terrein Model (rechts) gebaseerd op UAV opnamen van de Swinglet en berekend met het SFM (Structure From Motion) algoritme. De morenen van de gletsjers zijn duidelijk zichtbaar in beide opnamen. Het orthomosaïek toont dat de gletsjer geen mooi wit ijsoppervlak heeft maar aan het afsmelten is en dat er daardoor veel puin, grind en zand aan het oppervlak ligt wat de gletsjer donker maakt.

van UAVs. Figuur 5 toont de UAV die voor dit project gebruikt is, de SenseFly Swinglet met aan boord een digitale compact camera, een GPS en een auto-pilot systeem (SenseFly, 2015). De UAV opnamen worden gemaakt voor en na de moesson, dat wil zeggen in het voorjaar (mei) en in het najaar (oktober). De UAV opnamen worden verwerkt tot twee producten: orthomosaïeken en orthoDEMs. Orthomosaïeken zijn gemaakt door de individuele UAV foto's tot een geometrisch correcte beeldset van foto's te verwerken. OrthoDEMs zijn digitale terreinmodellen die precieze hoogte informatie geven. Het vergelijken van deze orthoDEMs en orthomosaïeken opgenomen op verschillende tijdstippen stelt ons in staat om het afsmelten en de stroming van de gletsjer, alsmede het ontstaan en bewegen van ijskliffen en gletsjermereen nauwkeurig te volgen.

Het algoritme dat we gebruiken om de honderden losse UAV foto's geometrisch aan elkaar te weven heet 'Structure From Motion: SFM' (Dellaert et al., 2000). SFM bestaat uit verschillende stappen. Het algoritme zoekt eerst automatisch in de honderden foto's naar gemeenschappelijke punten zoals rotsblokken, struiken, bouwsels, paaltjes. Deze stap heet 'scale invariant feature transform'. Miljoenen punten worden geselecteerd, vergeleken tussen de foto's, verwijderd of juist meegenomen voor de beeldcorrecties. Vervolgens wordt een correctie voor de UAV camerapositie en voor de kijkhoek berekend ('bundle adjustment'). Ten slotte wordt met de gemeenschappelijke punten een 3D puntenwolk gebouwd die steeds verder verfijnd wordt door punten toe te voegen met interpolatiemethoden. De eindproducten zijn dan een orthomosaïek en een orthoDEM zoals getoond in figuur 6. Referentiepunten verzameld in het veld met een DGPS (Differential Global Positioning System) naast de actieve gletsjers, stellen ons in staat de nauwkeurigheid van de orthomosaïeken en orthoDEMs te berekenen. De gemiddelde nauwkeurigheid in de XYZ richting varieert, oplopend tot ongeveer 20 cm.

Door de beelden van voor en na de moesson,

en van voor en na de winter te vergelijken door bijvoorbeeld DEMs van elkaar af te trekken, krijgen we een goed beeld van de stroming en oppervlakteveranderingen van de gletsjer. Visuele interpretatie van de orthomosaïeken op verschillende tijdstippen geeft informatie over de ijskliffen en de meren op de gletsjer. De stroomsnelheid van deze gletsjer is zoals verwacht, beperkt, omdat hij nauwelijks nog gevoed wordt met ijs van de hoge plateaus. De stroomsnelheid varieert tijdens de moessonperiode van praktisch nul aan de tong van de gletsjer tot ongeveer 2.5 m per 6 maanden (de tijdsperiode tussen de UAV opnamen) voor de hoogste delen. De lokale dynamiek van het oppervlak van deze gletsjers was echter groter dan verwacht. Ijskliffen ontstaan en roteren. Superglaciale meren ontstaan en verdwijnen weer. De bijdrage van de Langtang gletsjer aan smeltwater en afvoer van de grote rivieren is beperkt omdat het ijsmassaverlies van de Langtang gletsjer klein is. De UAV opnamen hebben ons een gedetailleerd beeld gegeven van de processen op deze gletsjer. De verkregen informatie met de UAV opnamen is veel nauwkeuriger dan wat de huidige satellietbeelden ons kunnen verschaffen.

### Slot

Over de laatste decennia heeft de aardobservatie zich enorm snel ontwikkeld. Dit geldt voor zowel de techniek en het aantal aardobservatiesystemen dat we tegenwoordig beschikbaar hebben, als voor de interpretatie en verwerkingsalgoritmen van de opnamen. Aardobservatie stelt ons in staat om ons leefmilieu en de ecosystemen om ons heen nauwkeurig waar te nemen. Ruimtelijke patronen en dynamiek van en binnen ecosystemen worden zichtbaar. Dit geldt bijvoorbeeld voor ontbossing, afsmelten van het noordpoolijs en voor het bespreken voorbeeld van het afsmelten van de gletsjers in Nepal. Aardobservatie is niet meer weg te denken uit onze samenleving en zal een essentiële en groeiende rol spelen in het bewaken van ons leefmilieu.

Met dank aan: Walter Immerzeel, Philip Kraaijenbrink, Elisabeth Addink, zonder wie dit onderzoek niet tot stand was gekomen.

### Links:

- Korte film over de Himalaya expeditie:  
[www.youtube.com/watch?v=3XNs1pcMEes](http://www.youtube.com/watch?v=3XNs1pcMEes).
- NASA AVIRIS airborne spectrometer:  
[aviris.jpl.nasa.gov](http://aviris.jpl.nasa.gov).

### Referenties en aanvullende informatie:

1. Clark R.N., G.A. Swayze, R. Wise, E. Livo, T. Hoefen, R. Kokaly, S.J. Sutley, 2007, *USGS digital spectral library (splib06a): United States Geological Survey, Digital Data Series 231*. <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>.
2. De Jong S.M. & F.D. Van der Meer F.D. (Eds.), 2004, *Remote Sensing Image Analysis: Including the Spatial Domain*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. ISBN: 1-4020-2559-9.
3. Dellaert, F. S. Seitz, C. Thorpe & S. Thrun, 2000, *Structure from Motion without Correspondence*, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [www.ri.cmu.edu/pub\\_files/pub2/dellaert\\_frank\\_2000\\_1/dellaert\\_frank\\_2000\\_1.pdf](http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub2/dellaert_frank_2000_1/dellaert_frank_2000_1.pdf).
4. Kraaijenbrink P.D.A. & W.W. Immerzeel, 2015, *Geografen brengen acute situatie en risico's in kaart. De aardbeving van april in Nepal*. Geografie juni 2015, pp.10-13.
5. Kraaijenbrink P.D.A., S.W. Meijer, J.M. Shea, F. Pelllicciotti, S.M. de Jong, W.W. Immerzeel, 2016, *Seasonal surface velocities of a Himalayan glacier derived using unmanned aerial vehicles and automated cross-correlation*, *Annals of Glaciology* 57(71).
6. Immerzeel W.W., L.P.J. van Beek & M.F.P. Bierkens, 2010, *Smelten gletsjers bedreigt 67 miljoen mensen in Zuid-Oost Azië*, *Geografie* september 2010, pp. 7-9.
7. Immerzeel W.W., P.D.A. Kraaijenbrink, J. Shea, A.B. Shresta, F. Pelicaotte, M.F.P. Bierkens & S.M. de Jong, 2014, *High resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles*, *Remote Sensing of Environment* 150, 93-103.
8. Meadows D.H., D.L. Meadows, J. Randers and W.W. Behrens III, 1972, *Limits to Growth*, New York: New American Library.
9. Rees, W., 1992, *Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out*, *Environment and Urbanization* 4, 2, 121 -130.
10. SenseFly, 2015, *The Swingleet CAM drone*. <https://www.sensefly.com/drones/swingleet-cam.html>.
11. Van der Meer F.D. & S.M. de Jong (Eds.), 2002, *Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. ISBN: 1-4020-0194-0.
12. WWF, 2014, *Living Planet report*: [http://www.wnf.nl/nl/wat\\_wnf\\_doet/thema\\_s/voetafdruk/](http://www.wnf.nl/nl/wat_wnf_doet/thema_s/voetafdruk/).

- - -