

Satellitenfernerkundung von Landoberflächen – Beginn einer neuen Ära

Daniel Spengler, Robert Behling, Sabine Chabrillat, Hannes Diedrich, Doris Dransch, Saskia Förster, Mahmud H. Haghighi, André Hollstein, Sibylle Itzerott, Theres Kuester, Christian Mielke, Robert Milewski, Mahdi Motagh, Sigrid Roessner, Daniel Scheffler, Mike Sips, Karl Segl, Alexandra Wolanin, Luis Guanter
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Satellite remote sensing offers the possibility to continuously, globally collect information about Earth's surface properties, and thus possesses an enormous scientific and economic potential. The spatio-temporal recording of information opens up a wide range of possibilities for large-scale monitoring of changes and influencing factors, e.g. in atmospheric research, agriculture and forestry, geology, urban areas and the analysis of natural hazards. The European Union's Copernicus programme marks the beginning of a new era in satellite-based Earth observation by designing and launching the Sentinel series, an operational fleet of high-continuity, multi-combinable observation systems. This enables completely new objects of investigation, but also requires a new level of automated data processing in order to make the huge amounts of data available for analysis. This article provides an insight into current remote sensing research at the GFZ. First, it presents the activities related to the creation of preprocessing standards and interfaces for data evaluation, geo-data management and visualization. In the following, examples for multi-sensor analysis of land use potentials and natural hazards are shown, in order to finally discuss the role of the GFZ in the development of hyperspectral satellite missions and related data analysis.



Einführung in die satellitengestützte Erdbeobachtung

Die Landoberfläche der Erde ist Lebensraum von derzeit 7,5 Milliarden Menschen. Sie ist ständigen Veränderungen unterworfen, wobei die menschliche Nutzung den dynamischsten Faktor darstellt. Die nachhaltige Nutzung der Ressource Landoberfläche ist von zentraler Bedeutung für unsere Zukunft und erfordert detaillierte Kenntnisse über Zustand und Veränderungen des menschlichen Lebensraums. Die Satellitenfernerkundung bietet die Möglichkeit, Veränderungen der Erdoberfläche kontinuierlich und global zu erfassen und besitzt dadurch ein enormes wissenschaftliches und ökonomisches Potenzial.

Die zahlreichen zur Verfügung stehenden Systeme zur Erdbeobachtung aus dem All erlauben z. B. Anwendungen in den Bereichen Atmosphärenforschung, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Geowissenschaften, Naturgefahren und urbane Räume. Je nach Anwendungsgebiet werden Daten von unterschiedlichen Satellitensystemen genutzt, wobei die optischen Systeme und die Radarsysteme (SAR) die beiden Haupttechnologien der satellitengestützten Erdbeobachtung darstellen. Mit den optischen Multispektralsatelliten des EU/ESA-Copernicus-Programms und des USGS/NASA-Landsat-Programms stehen für die verschiedenen Anwendungsgebiete leistungsfähige Satellitensysteme zur Verfügung, deren Daten weltweit kostenfrei genutzt werden können. In Kombination mit einer Vielzahl weiterer Satellitensysteme ermöglichen sie eine kontinuierliche Erdbeobachtung in unterschiedlichen Maßstäben innerhalb der atmosphärischen Fenster. In diesen Fenstern wird die elektromagnetische Strahlung der Sonne durch die Atmosphäre kaum beeinflusst und kann daher für die optische Auswertung von Fernerkundungsdaten genutzt werden.

Am Anfang jeder fernerkundlichen Fragestellung steht die Auswahl von geeigneten Satellitendaten. Dabei ergeben sich unterschiedliche Optionen sowohl aus der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Systeme als auch aus den abbildbaren Eigenschaften der Erdoberfläche, wobei letztere durch das jeweils zum Einsatz kom-

mende fernerkundliche Messprinzip bestimmt werden. In der Regel stellt diese Auswahl einen Kompromiss zwischen räumlicher Auflösung (wenige Zentimeter bis mehrere Kilometer) und damit verbundener zeitlicher Wiederholrate (mehrmals täglich bis monatlich) dar. Im Bereich der optischen Fernerkundung verfügen räumlich sehr hoch auflösende Systeme (< 2 m) nur über wenige (< 10) spektral breite Kanäle (z. B. Quickbird, WorldView-2). Räumlich schlechter auflösende Systeme (> 10 m) besitzen hingegen deutlich mehr (> 10 bis rund 250) spektral höher auflösende Kanäle (z. B. Sentinel-2, EnMAP). Abbildung 1 verdeutlicht die Lage der Spektralkanäle wichtiger Aufnahmesysteme. Die zeitliche Auflösung der Systeme kann durch den Einsatz mehrerer baugleicher Satelliten erhöht werden. Beispiele dafür sind die Sentinel-1/2-Systeme mit jeweils zwei Satelliten (A/B), RapidEye mit fünf Satelliten und im Bereich der CubeSats die Planet-Labs-Konstellation mit mehr als einhundert Kleinsatelliten.

Entwicklungsgeschichte der Satellitenbeobachtung der Landoberfläche

Das Landsat-Programm des USGS (United States Geological Survey) ist das am längsten im kontinuierlichen operationellen Einsatz befindliche Erdbeobachtungsprogramm. Seit 1972 zeichnen die optischen Satelliten des Landsat-Programms multispektrale Daten der Erdoberfläche auf und ermöglichen damit globale Veränderungsanalysen über mehrere Jahrzehnte. Seit dieser Anfangszeit haben sich die technischen Möglichkeiten der Satelliten enorm weiterentwickelt. Die ersten Landsat-Satelliten (1 bis 3) besaßen vier Spektralkanäle (Grün, Rot, nahes Infrarot 1 und nahes Infrarot 2) bei einer räumlichen Auflösung von 79 x 79 m². Der aktuelle Landsat-8-Satellit besitzt hingegen eine räumliche Auflösung von 30 x 30 m² und elf Spektralkanäle. Ein weiteres vielgenutztes optisches Satellitensystem ist das Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), das 35 Spektralkanäle im Wellenlängenbereich von 0,4 bis 14,4 µm und eine räumliche Auflösung von bis zu 250 m hat. Die Daten und daraus abgeleitete Produkte dieses NASA-Satelliten ermöglichen seit 1999 eine zeitlich hochauflösende globale Erdbeobachtung.

Neben den optischen Satelliten können auch Radarsatellitensysteme, die mit Wellenlängen im Zentimeterbereich arbeiten (Abb. 1), auf eine fast 40-jährige Entwicklungsgeschichte zurückblicken. Sie begann 1978 mit Seasat zur Überwachung der Meere. Die Tandemkonstellation der ESA-Satelliten ERS-1 und ERS-2 ermöglichte erstmals die Aufnahme interferometrischer Daten und damit die Erfassung von Bewegungen (Hebungen und Senkungen) der Erdoberfläche im Zentimeterbereich. Eine Fortsetzung fand dieses System u. a. in den deutschen TerraSAR-X- und TanDEM-X-Missionen, wobei letztere die Datengrundlage zur Erzeugung eines hochgenauen weltweiten 3D-Modells der Erdoberfläche geschaffen hat.

Links: Potsdam und sein Umland aus dem All (Copernicus-Sentinel-2-Aufnahme vom 27. Mai 2017)

Left: Potsdam and its surrounding from space (Copernicus Sentinel-2 image from 27 May 2017)



Kontakt: D. Spengler
(daniel.spengler@gfz-potsdam.de)

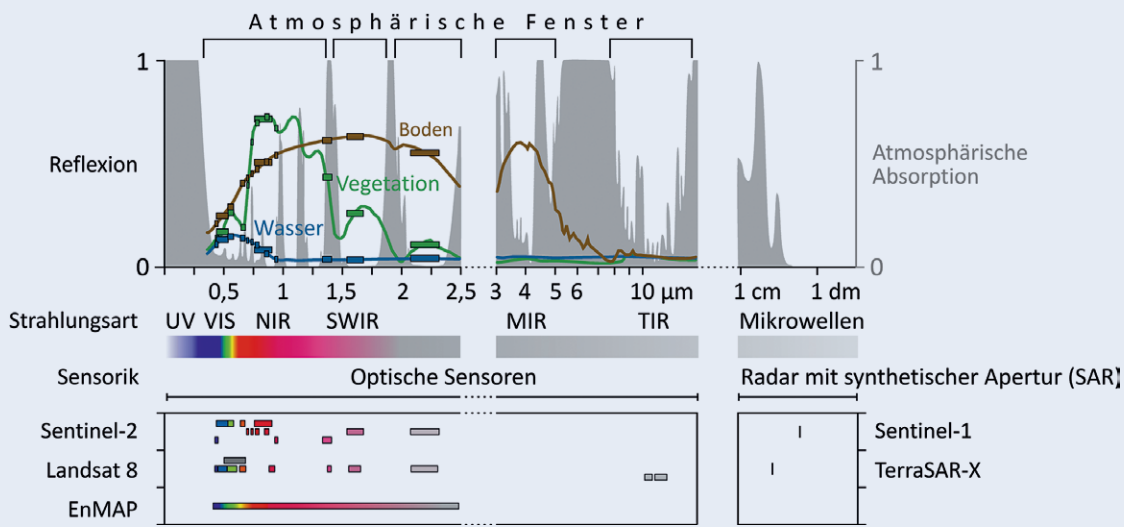


Abb. 1: Spektralsignatur von Boden, Vegetation und Wasser in hyperspektraler (Linie) und multispektraler (Balken) Auflösung in Bezug auf die Lage und spektrale Auflösung optischer (Sentinel-2, Landsat 8 und EnMAP) und SAR-Systeme (Sentinel-1 und TerraSAR-X). VIS – sichtbares Licht, NIR – nahes Infrarot, SWIR – kurzwelliges Infrarot, MIR – mittleres Infrarot, TIR – thermales Infrarot

Fig. 1: Spectral signature of soil, vegetation and water in hyper-(line) and multi-(boxes) spectral resolution in relation to the position and spectral resolution of optical (Sentinel-2, Landsat 8 and EnMAP) and SAR systems (Sentinel-1 and TerraSAR-X). VIS – visible light, NIR – near infrared, SWIR – shortwave infrared, MIR – midwave infrared, TIR – thermal infrared

Das Copernicus-Programm der EU – eine neue Dimension der Erdbeobachtung

Mit dem Copernicus-Programm der EU hat eine neue Ära in der satellitengestützten Erdbeobachtung begonnen. Das Programm wurde 1998 gemeinsam von der Europäischen Kommission und der ESA mit dem Ziel konzipiert, eine kostenfrei zugängliche und leistungsfähige Infrastruktur für die Erdbeobachtung zu schaffen. Das Programm umfasst eine Vielzahl von Satellitensystemen (Sentinel-Missionen) mit unterschiedlichen Schwerpunkten, die alle auf eine hohe zeitliche Wiederholrate ausgerichtet sind. Copernicus hat neben der Bereitstellung von Satellitendaten für umwelt- und sicherheitsrelevante Fragestellungen auch die Verknüpfung dieser Informationen mit anderen Erdbeobachtungen im Rahmen der Copernicus-Dienste zum Ziel, z. B. für die Überwachung der Atmosphäre, der Landoberfläche und der Meeresumwelt, zur Unterstützung des Katastrophen- und Krisenmanagements sowie für Sicherheitsanwendungen. Diese Dienste sollen in Zukunft die Behörden der EU-Mitgliedsstaaten maßgeblich in ihren Monitoring- und Planungsaufgaben sowie darauf aufbauenden Entscheidungsfindungen unterstützen.

Im Vergleich zu früheren Satellitenmissionen liegt ein großer Mehrwert der Sentinel-Daten in ihrer vergleichsweise hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung. So erfasst das Sentinel-1A/B-System (Radarmission) die Erdoberfläche in einer Auflösung von bis zu 5 x 20 m² mit einer Wiederholrate von bis zu sechs Tagen (Abb. 2a). Das optische Sentinel-2A/B-System erfasst die Erdoberfläche in 13 spektralen Kanälen mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 10 m und einer Wiederholrate von bis zu fünf Tagen (Abb. 2b, 2c). Allein die Sentinel-1-, Sentinel-2- und Sentinel-3-Missionen generieren ein tägliches Datenvolumen von mehr als 20 Terabyte. Für diese enormen Datenmengen sind neue Prozessierungs- und Auswerteverfahren erforderlich, um die Daten schnell aufzuberei-

ten und operationell für raumzeitliche Analysen in verschiedenen Anwendungsfeldern nutzbar zu machen.

Während inzwischen vier der sechs für die erste Projektphase konzipierten Systeme im All sind und die baugleichen Nachfolgersysteme auf ihren Einsatz warten, werden weitere Missionen mit neuen Aufnahmekonstellationen (Wellenlängen, Wiederholraten, Bildstreifenbreiten) geplant. Unter anderem soll mit Sentinel-10 eine Hyperspektralmission entwickelt werden, die anders als die Multispektralmissionen das gesamte Reflexionsspektrum im Wellenlängenbereich von 400 bis 2500 nm spektral hoch aufgelöst aufzeichnet und damit exzellente Möglichkeiten zur spektralen Objektidentifikation bietet. Bei der Realisierung dieses Vorhabens wird die deutsche Hyperspektralmission EnMAP (Abb. 1, weitere Informationen ab Seite 46) unter der wissenschaftlichen Leitung des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ einen grundlegenden Beitrag für das Systemdesign und die Implementierung von Datenvorprozessierungs- und Auswertelgorithmen leisten.

Ausgewählte Forschungsschwerpunkte am GFZ

Die wachsende Zahl an Satellitenmissionen zur Erdbeobachtung, die dichteren Wiederkehrzeiten und die Verwendung verschiedener Sensoren führt zu großen Datenmengen, die verarbeitet werden müssen. In den frühen Jahren der Fernerkundung wurden die Informationen aus einer einzigen Aufnahme gewonnen, heute verwendet man lange Zeitreihen und kombiniert die Daten unterschiedlicher Missionen. Das verbessert einerseits die Güte des Ergebnisses, andererseits vervielfacht sich der Aufwand für die Datenverarbeitung. Eine essenzielle Grundlage für die Auswertung von Fernerkundungsdaten ist die Datenvorprozessierung. Hierbei werden die am Satelliten gemessenen Signale hinsichtlich sensorbedingter und atmosphärischer Einflüsse korrigiert und räumlich verortet. Die Datenvorprozessierung, die noch vor fünf Jahren

die meisten Forschenden selbst durchgeführt haben, erfolgt heute meist automatisch. Dazu werden neue Algorithmen entwickelt, mit denen Informationen aus vielen sehr unterschiedlichen Daten gewonnen werden können. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der GFZ-Sektionen Fernerkundung und Geoinformatik entwickeln daher Lösungen sowohl für die Datenvorprozessierung als auch für die Informationsgewinnung. Im Folgenden werden zunächst zwei Verfahren zur Auswahl von Multisensordaten und homogenisierten Bereitstellung sowie zur sensorspezifischen (Sentinel-2) Datenprozessierung vorgestellt. Beide sollen Eingang in Datensuchportale finden, die Nutzern anwendungsorientierte Daten anbieten. Beispiele für die Extraktion von Zustands- und Prozessmerkmalen aus Satellitendaten werden anschließend für die Themenfelder Landwirtschaft, Naturgefahren und Ressourcenanalyse gezeigt. Abschließend wird die Beteiligung des GFZ bei der Definition und Entwicklung zukünftiger Sensorsysteme (EnMAP) und der dazugehörigen Datenauswertung skizziert.

GeoMultiSens – BigData-fähiges System zur Vorprozessierung von Multisensor-Satellitendaten

Die Nutzung verschiedener optischer Fernerkundungssysteme vergrößert die Anzahl von Satellitenaufnahmen, die für Analysen von raumzeitlichen Veränderungen zur Verfügung stehen. Dabei kann zum einen die Wiederholrate der Aufnahmen erhöht und zum anderen der Beobachtungszeitraum verlängert werden, wodurch aussagefähigere Untersuchungen möglich sind. Für solche Multisensoranalysen ist ein gemeinsames Referenzmodell wichtig, in das alle vorhandenen Erdbeobachtungsdaten überführt werden. Überdies ist für Multisensoranalysen eine Homogenisierung von räumlichen und spektralen Eigenschaften der Fernerkundungsdaten aus verschiedenen Satellitenmissionen mit unterschiedlichen Sensorparametern notwendig. Die aufgrund der neuen Satellitenmissionen immer schneller wachsenden Datenmengen stellen dabei eine besondere Herausforderung dar. Sie erfordern die Entwicklung sogenannter „BigData“-fähiger Ver-

fahren, die Prozessierung und Analyse von Satellitendaten in der Größenordnung von Petabytes ermöglichen.

An dieser Stelle setzt das Verbundprojekt GeoMultiSens (www.geomultisens.de) im Rahmen der BMBF-High-Tech-Strategie „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ an. Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Open-Source-Softwaresystems zur Multisensoranalyse von optischen Fernerkundungsdaten. Dabei arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Bereichen Fernerkundung und Informatik am GFZ mit Partnern der Humboldt-Universität zu Berlin und des Zuse-Instituts Berlin gemeinsam an einem innovativen, BigData-fähigen System. Die darin integrierten und automatisierten Prozessierungs- und Analyseprozesse umfassen mehrere Teilschritte (Module).

Der erste Schritt ist die Satellitendatenauswahl, die mit Hilfe eines webbasierten Interfaces (Abb. 3) erfolgt. Unterstützt von Werkzeugen zur visuellen Exploration ermöglicht es, Satellitendaten aus den Archiven der verschiedenen Missionen anhand von Metadaten, wie z. B. Wolkenbedeckungsgrad oder räumliche und zeitliche Abdeckung, zu vergleichen, um dann für die weitere Prozessierung eine Auswahl zu treffen.

Das sich daran anschließende Modul zur Datenhomogenisierung umfasst eine Vielzahl von Prozessierungsschritten. Zunächst werden die Metadaten homogenisiert, danach die Bilddaten geometrisch an eine räumliche Referenz mit Hilfe des AROSICS-Algorithmus angepasst (Scheffler *et al.*, 2017) und abschließend mit Hilfe von Strahlungstransferberechnungen in Oberflächenreflektanzen transformiert. In diesem Prozess werden die ursprünglich heterogenen Bilddaten auf einen benutzerdefinierten, einheitlichen Sensor abgebildet. Das bedeutet, dass die Daten unterschiedlicher Satelliten nun eine einheitliche räumliche und spektrale Auflösung besitzen und damit für Zeitreihenanalysen miteinander kombiniert werden können. Da dies in der Regel nicht fehlerfrei erfolgen kann, werden zusätzlich zu den homogenisier-

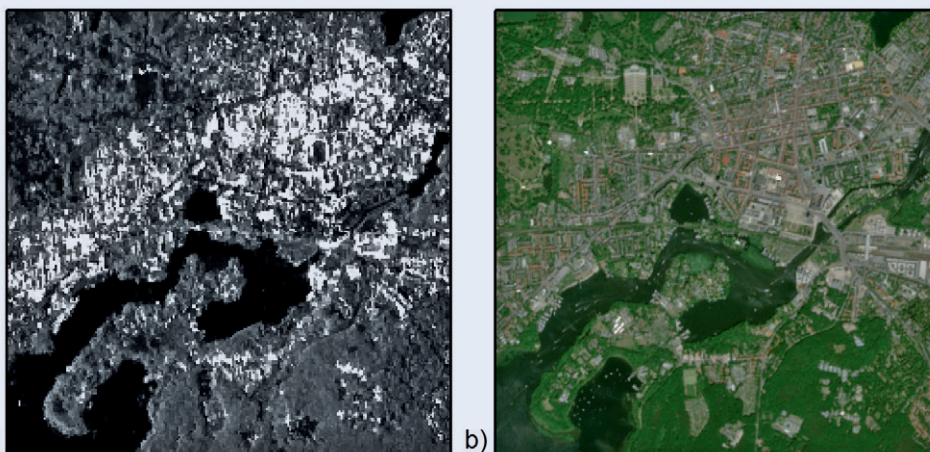


Abb. 2: Sentinel-1(S1)- und Sentinel-2(S2)-Daten von Potsdam: a) S1, multitemporal gefilterter Datensatz, b) S2, vom 27. Mai 2017, Echtfarbdarstellung

Fig. 2: Sentinel-1 and Sentinel-2 data of Potsdam: a) S1 multitemporal filtered data, b) S2, 27 May 2017 true colour image



Abb. 3: Webbasiertes Interface von GeoMultiSens zur Selektion von Multisensordaten

Fig. 3: Web-based interface of GeoMultiSens used for the selection of multi-sensor data

ten Multisensordaten Genauigkeitsinformationen erzeugt. Das sich daran anschließende Analysemodul stellt Operatoren bereit, die mit Hilfe von BigData-fähigen Verfahren aus der Informatik eine schnelle Analyse sehr großer Datenmengen ermöglichen. Mit Hilfe des Explorationsmoduls (QGIS-Plugin) können die Ergebnisse visualisiert und interaktiv analysiert werden, um sie weiterführend zu interpretieren und zu bewerten. Alle Module sind in einer integrierten Prozesskette miteinander verbunden und können über ein einheitliches, webbasiertes Interface bedient werden.

GTS2 – System zur Vorprozessierung und Speicherung von Sentinel-2-Daten

Speziell für die Vorprozessierung von Copernicus-Sentinel-2-Daten wurde von der GFZ-Sektion Fernerkundung das „GFZ Time Series System for Sentinel-2“ (GTS2) entwickelt. Das System prozessiert sämtliche für Deutschland zur Verfügung stehenden Sentinel-2-Daten und archiviert sie in einer Datenbank in Form von wolkenmaskierten, atmosphärisch korrigierten und geometrisch angepassten Level-2A-Datenprodukten. Der Datenzugriff auf die erzeugten Reflektanzdaten erfolgt über eine webbasierte Programmierschnittstelle (API), die sowohl eine räumlich und zeitlich flexible Auswahl der Datenprodukte als auch die Bereitstellung deutschlandweiter Informationen ermöglicht.

Abbildung 4 zeigt als beispielhafte Ergebnisse zwei wolkenfreie Mosaiken aus Sentinel-2-Daten von drei Monaten. Die hohe zeitliche Auflösung von Sentinel-2 ermöglicht die Erzeugung solcher multitemporaler Datenkomposite, auf deren Grundlage eine flächendeckende deutschlandweite Ableitung von Informationen erfolgen kann. Die zeitliche Zusammenfassung der Satellitenda-

ten über einen längeren Zeitraum (z. B. drei Monate) ist für Anwendungen geeignet, bei denen das Ergebnis nicht von jahreszeitlichen Veränderungen beeinflusst wird, wie beispielsweise die Analyse des Versiegelungsgrads von urbanen Räumen. Je nach Anwendung können die Zeiträume zu kombinierender Daten variieren. In Zukunft soll das Verfahren zur Erzeugung zeitlicher Komposite so weiterentwickelt werden, dass die Ergebnisse auch für jahreszeitlich sensitive Fragestellungen verwendet werden können, wie z. B. die deutschlandweite Analyse des Anbaus verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen. Die dabei ableitbaren Informationen sind sowohl agrarökonomisch als auch für den Naturschutz relevant und könnten über einen längeren Zeitraum (mehrere Jahre) erfasst werden.

Fernerkundliche Analyse von Naturgefahren

Weltweit nimmt die Bedrohung des menschlichen Lebensraums durch Naturgefahren wie z. B. Hangrutschungen und Erdbeben immer stärker zu, wobei die Ursachen sowohl in der zunehmenden Besiedlung als auch in den sich verändernden Umweltbedingungen liegen. Damit erhöht sich die Bedeutung eines nachhaltigen Gefahrenmanagements, das auf eine schnelle Reaktion im Katastrophenfall ebenso wie auf langfristige Vorbereitung und Vorsorge ausgerichtet ist. Satellitenfernerkundung trägt bereits auf vielfältige Weise zur Entwicklung von effektiven und weltweit einsetzbaren Strategien zur Risikominimierung bei, wobei sich mit dem europäischen Erdbeobachtungsprogramm Copernicus völlig neue Möglichkeiten eröffnet haben. Der global freie Zugang zu den zeitlich und räumlich hochauflösenden Sentinel-1/2-Daten schafft die Grundlage für ein großräumiges und kontinuierliches Monitoring von potenziell gefährlichen natürlichen Prozessen

und ihren Auswirkungen auf den menschlichen Lebensraum. Die Kombination dieser Daten mit den mehrere Jahrzehnte zurückreichenden, frei verfügbaren Landsat-Archiven und Daten anderer Satellitenmissionen (z. B. RapidEye, ALOS, TerraSAR-X) ermöglicht ein langfristiges Monitoring als Voraussetzung für eine differenzierte raumzeitliche Prozessanalyse, die wiederum die Grundlage für eine objektive und dynamische Gefährdungseinschätzung bildet.

Die Satellitenfernerkundung kann beispielsweise für eine großräumige Analyse der Hangrutschungsgefährdung eingesetzt werden. Dabei ist eine möglichst genaue raumzeitliche Rekonstruktion der Hangrutschungsaktivität wichtig. Die dafür am GFZ entwickelte automatische Methode (Behling et al., 2016) erlaubt die großräumige und langfristige Rekonstruktion einer Hangrutschung. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Anwendung dieser

Methodik auf ein mehr als 10 000 km² großes Gebiet in Südkirgisistan, das von starker Hangrutschungsaktivität betroffen ist. Räumlich und zeitlich hochauflösende RapidEye-Daten, die im Rahmen des vom DLR geförderten RESA-Programms zur Verfügung gestellt wurden, bildeten die Grundlage für eine automatische Zeitreihenanalyse, in deren Ergebnis flächengenaue Hangrutschungsobjekte abgeleitet wurden (Behling et al., 2016; Behling et al., 2017).

Die weiterführende Analyse der in Abb. 4 dargestellten großräumigen multitemporalen Hangrutschungsentwicklung zeigt, dass selbst der relativ kurze Zeitraum von nur sieben kompletten Beobachtungsjahren (2010 bis 2016) sowohl durch starke räumliche als auch zeitliche Unterschiede in der Hangrutschungsaktivität gekennzeichnet ist (Behling et al., 2017). Dabei hat das automatische Verfahren erstmals eine nahezu vollständige

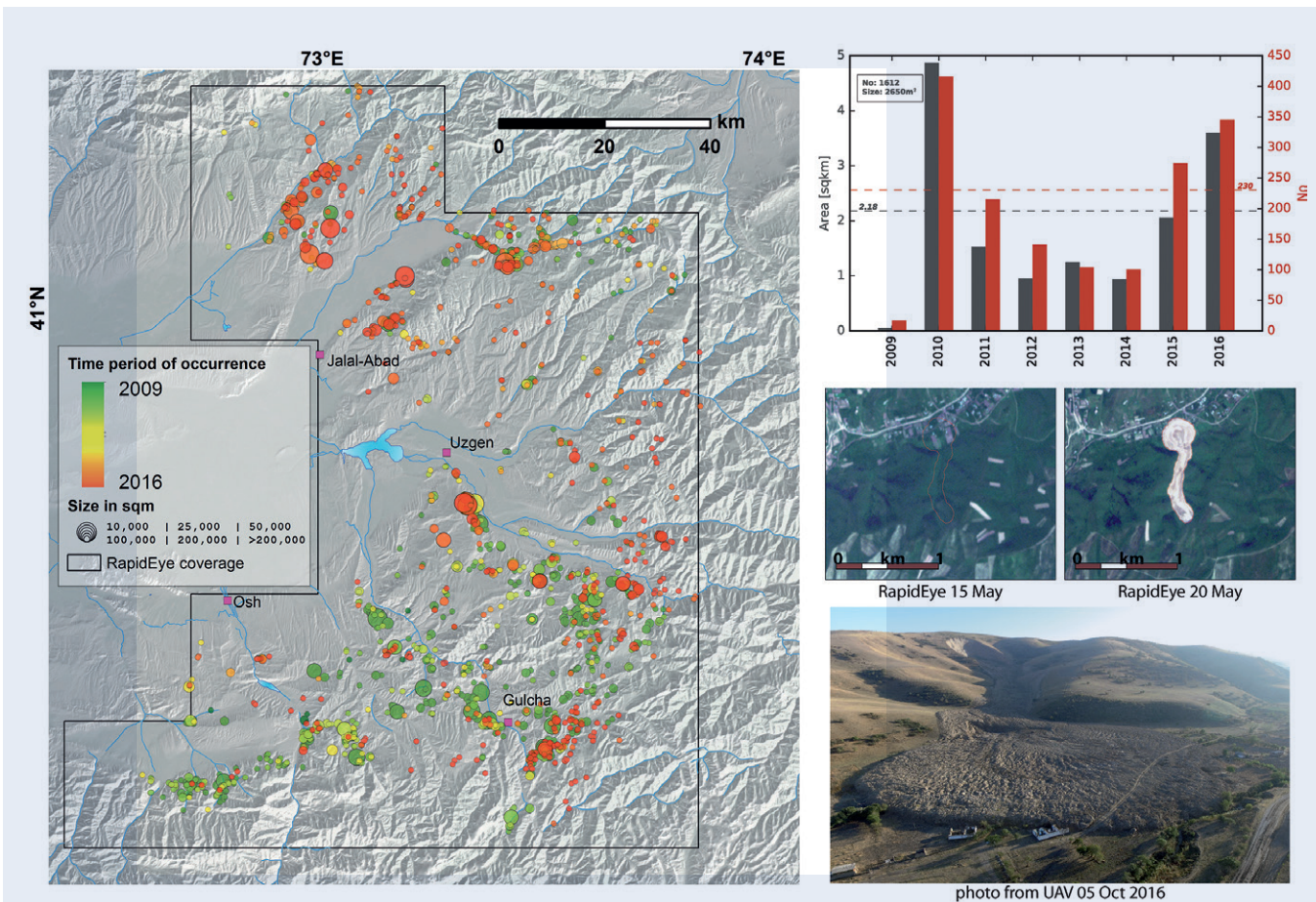


Abb. 4: Links: Automatische raumzeitliche Detektion von Hangrutschungsobjekten in Südkirgisistan im Zeitraum von 2009 bis 2016 auf der Basis von Datenzeitreihen der RapidEye-Satelliten. Oben rechts: Jährliche Summenstatistik nach Fläche (schwarz) und Anzahl (rot) der Hangrutschungen. Unten rechts: Beispiel für automatisch detektierte Hangrutschung (Foto: R. Behling, GFZ)

Fig. 4: Left: Automated spatio-temporal detection of landslide objects in southern Kyrgyzstan for the time period 2009 to 2016 based on time series of RapidEye satellite remote sensing data. Upper right: Annual cumulative statistics according to area (black) and number (red) of landslides. Lower right: Example of automatically detected landslide object

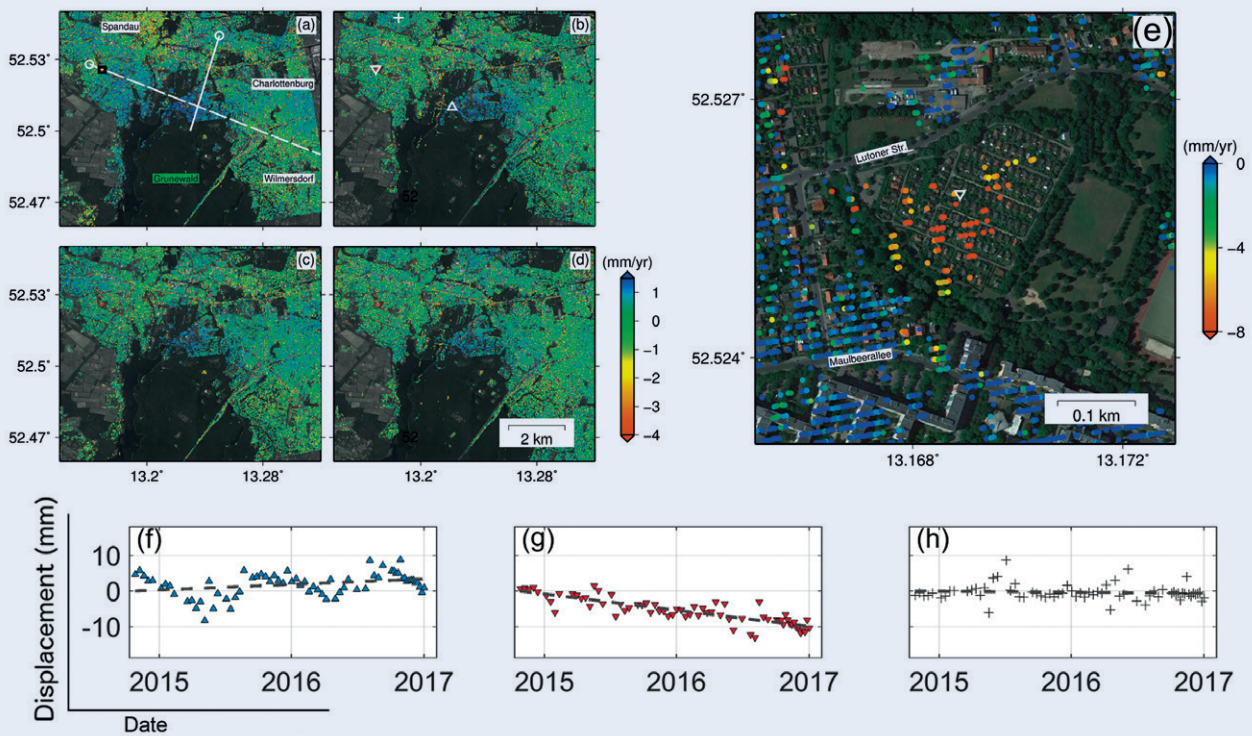


Abb. 5: Ergebnisse einer Persistent-Scatterer-InSAR-Analyse von Sentinel-1-Daten zu saisonalen Hebungen und Senkungen am Nordende des Grunewalds als Folge unterirdischer Gasspeicherung (oben links und Darstellungen unten), sowie Senkungsereignisse aufgrund von Kompaktierung und Setzung deponierter Massen im Bereich einer Kleingartenanlage (rechts)

Fig. 5: Results of a Sentinel-1 data Persistent Scatterer InSAR analysis of seasonal uplift and subsidence at the northern end of Grunewald, Berlin, due to subterranean gas storage (top, left and bottom) as well as subsidence events due to compaction of dumped masses in a small garden area (right)

Erfassung aller Hangrutschungsobjekte unabhängig von ihrer Größe und ihrem Auftretensort ermöglicht. Die daraus resultierende GIS-basierte Datenbank konnte erfolgreich sowohl für die weiterführende Analyse von Hangrutschungseigenschaften als auch für die Ableitung einer großräumigen Gefährdungseinschätzung eingesetzt werden (Golovko et al., 2017). Die inzwischen global verfügbaren Sentinel-2-Daten ermöglichen eine Übertragbarkeit der entwickelten Methodik auf andere gefährdete Regionen, wie bereits für Untersuchungsgebiete in Nepal und in Neuseeland gezeigt werden konnte (Behling et al., 2017).

Satellitengestützte Potenzialanalyse zur Ressourcennutzung

Sowohl optische als auch Radarsatellitendaten können auf vielfältige Weise für die Analyse von Nutzungspotenzialen und die Beobachtung von Umweltveränderungen, die durch menschliche Nutzung hervorgerufen werden, eingesetzt werden. Im Folgenden werden am GFZ durchgeführte Studien zur Detektion von Hebungs- und Senkungsprozessen in urbanen Räumen, zur Analyse von Boden- und Vegetationszuständen in landwirtschaftlich genutzten Gebieten und zur Erkundung von mineralischen Rohstoffen beispielhaft vorgestellt.

InSAR-basierte Analyse von Oberflächendehformationen im Stadtgebiet von Berlin

Mit InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ist es möglich, auf der Basis von Radarzeitreihendaten topographische

Veränderungen der Erdoberfläche im Zentimeterbereich zu detektieren. Durch die Verfügbarkeit der zeitlich hochauflösenden Daten der Sentinel-1-Radarmission ergeben sich neue Möglichkeiten für die Analyse von Positionsveränderungen von Objekten an der Erdoberfläche. Sie umfassen sowohl kurzfristig durch Einzelereignisse hervorgerufene Dislokationen als auch die Beobachtung von Langzeittrends und saisonalen Dynamiken. In einer Studie konnten mit InSAR für Teile des Stadtgebiets von Berlin Hebungs- bzw. Senkungsprozesse in der Zeit zwischen Oktober 2014 bis Januar 2017 nachgewiesen werden (Haghscheinas Haghighi und Motagh, 2017). Dafür wurden vier Zeitreihen von Sentinel-1-Daten mit der Persistent-Scatterer-InSAR-Methode analysiert. Bei den exemplarisch in Abb. 5 dargestellten Ergebnissen steht die grüne Einfärbung für eine unveränderte Höhenlage der Objekte während des Untersuchungszeitraums, blau bedeutet Hebung und rot Absenkung des Gebiets. In der Bildmitte am Nordende des Grunewalds wurden langfristige Hebungen von durchschnittlich 2 mm pro Jahr sowie saisonale Schwankungen von bis zu 2 cm festgestellt. Sie stehen im Zusammenhang mit dem Untergrundgasspeicher bei Spandau und werden durch die Gaseinspeicherung und -entnahme hervorgerufen. Im Nordwesten des dargestellten Stadtausschnitts konnten langfristige Senkungstendenzen nachgewiesen werden, die auf das Areal einer Kleingartenanlage beschränkt sind (Abb. 5 rechts). Hier befindet sich im Untergrund eine Schutt- und Mülldeponie, die nach dem Zweiten Weltkrieg angelegt wurde. Die ermittelten Absenkungsraten von etwa 8 mm pro Jahr stehen im Zusammenhang mit fortschreitender Kompaktion und Setzung der bis 1970

deponierten Massen. Aufgrund der Studie ist mit dem Berliner Senat für die kommenden Jahre die Fortsetzung des satellitengestützten Monitorings und die Kombination mit bodengestützten Beobachtung vereinbart worden.

Fernkundliche Analyse von Landwirtschaftsgebieten

Im Bereich der Landwirtschaft ermöglichen die aktuell verfügbaren Satellitensysteme thematisch breit gefächerte Anwendungen zur Analyse von Vegetation, Boden und hydrologischen Faktoren. Im Folgenden wird beispielhaft die fernerkundungsbasierte flächenhafte Bestimmung der organischen Oberbodensubstanz in Verbindung zur pflanzlichen Bruttoprimärproduktion (GPP) für das Untersuchungsgebiet DEMMIN (Durable Environmental Multidisciplinary Monitoring Information Network) vorgestellt. DEMMIN ist Bestandteil des am GFZ koordinierten Umweltobservatoriums „TERrestrial Environmental Observatories – NordOstdeutsches Tiefland“ (TERENO Nord-Ost) und offizielles deutsches Testgebiet des Joint Experiment of Crop Assessment and Monitoring (JECAM) und wird gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betrieben.

Die Studie nutzt sowohl multitemporale RapidEye-Satellitenbilddaten mit einer räumlichen Auflösung von $6,5 \times 6,5 \text{ m}^2$ als auch aktuelle Sentinel-2-Daten. Aus mehrjährigen Datenreihen der RapidEye-Satelliten wurden pro Feld alle Datensätze extrahiert, die keine oder nur eine sehr geringe Vegetationsbedeckung aufwiesen. Gleichzeitig wurde der Gehalt organischer Substanz an repräsentativen Bodenproben laboranalytisch ermittelt. Durch den Vergleich beider Ergebnisse konnte ein regressionsbasiertes Modell zur Quantifizierung organischer Substanz im Oberboden auf der Basis von Fernerkundungsdaten entwickelt werden (Abb. 6 links). Diese Methode der multitemporalen Bodenmusteranalyse wurde unter Verwendung fester Transformationsparameter für die Bildverarbeitung von einem schlagspezifischen Ansatz zu einem regionalen Ansatz für das gesamte Untersuchungsgebiet erweitert (Blasch *et al.*, 2015). Neben dem Gebiet DEMMIN wurde dieser Ansatz bereits erfolgreich auf ein weiteres Gebiet mit vergleichbarer glazialer Bodengenese (Quillow-Einzugsgebiet bei Prenzlau) übertragen.

Eng an die standortspezifische Bodenvoraussetzung ist die pflanzliche Bruttoprimärproduktion (GPP) gekoppelt, deren raumzeitliche Veränderungsanalyse bei Kulturpflanzen genutzt wird, um globale Kohlenstoffflüsse abzuschätzen, zu verstehen und vorherzusagen. Dies kann dazu beitragen, die Produktion von Lebensmitteln und Biorohstoffen an den Bedarf der wachsenden Weltbevölkerung anzupassen. Für das Untersuchungsgebiet DEMMIN wurde die GPP der Kulturpflanzen anhand von Sentinel-2-Daten vom 12. Juni 2016 geschätzt (Abb. 6). Die Daten ermöglichen Analysen auf Teilschlagebene und können in der Präzisionslandwirtschaft genutzt werden. Die GPP von Kulturpflanzen wird durch die Kombination von Beobachtungen der Photosyntheseleistung (Boden/Pflanze) und der Energieflüsse (SCOPE) berechnet, indem diese Funktionen mit Methoden des maschinellen Lernens analysiert werden. SCOPE ist ein komplexes pro-

zessbasiertes Modell, das den Strahlungstransfer in Blättern und Beständen, Enzymkinetik der Photosynthese und Mikrometeorologie der Oberflächenschicht kombiniert. Zahlreiche Eingabeparameter können aber nur unsicher bestimmt werden bzw. sind gar nicht verfügbar, was die Anwendbarkeit des Modells einschränkt. Anstatt die Eingangsparameter von Blatt, Bestand und Boden (z. B. Chlorophyllgehalt, Blattflächenindex, Blattwinkelverteilung) abzuschätzen, werden verschiedene Modellergebnisse (Reflexionen an Sentinel-2-Bändern und GPP) in einem neuronalen Netzwerk verknüpft. Auf diese Weise können die komplexen Prozesse des Modells berücksichtigt und dabei der Zwischenschritt zum Abrufen mehrerer Variablen ausgelassen werden.

Zunächst wird dazu eine große Anzahl von SCOPE-Simulationen (hier 136 000) durchgeführt, um ein künstliches neuronales Netzwerk (ANN) zu trainieren und die zugrundeliegenden Abhängigkeiten im Netzwerk abzubilden. Danach wird das ANN auf die realen Sentinel-2-Daten für das Gebiet um den Ort Demmin angewendet. Neben Reflexionsdaten der Sentinel-2-Mission werden Informationen über den Sonnenzenitwinkel und meteorologische Daten (aus GLDAS-1: Globales Landdatenassimilationssystem,

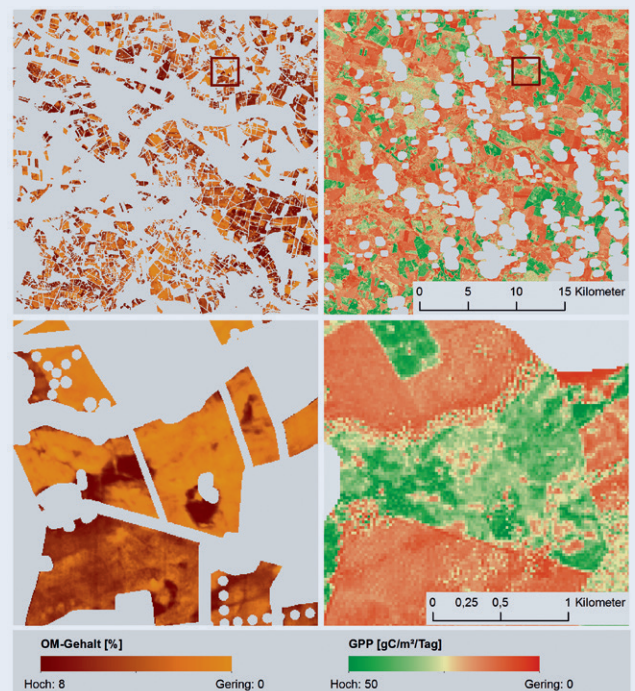


Abb. 6: Zusammenhang der Verteilung von organischer Oberbodensubstanz (OM, links) mit pflanzlicher Bruttoprimärproduktion (GPP, rechts) auf regionaler (oben) und lokaler Skala (unten) für den 12. Juni 2016

Fig. 6: Relationship between spatial distribution of soil organic matter (OM, left) and gross primary productivity (GPP, right) at regional (top) and local scale (bottom) for June 12, 2016

Rodell et al., 2004) genutzt. Das Ergebnis ist eine Karte der täglichen GPP der Kulturen in der Region (Abb. 6 rechts).

Spektral hochauflösende Analyse von mineralischen Ressourcen

In ariden und semiariden Gebieten, die keine bzw. nur eine geringe Vegetationsbedeckung aufweisen, ermöglicht die multispektrale und hyperspektrale Fernerkundung eine Analyse der Boden- und Gesteinsoberfläche im Zusammenhang mit der Exploration von mineralischen Rohstoffen. Hierzu werden die spektralen Eigenschaften (Fingerabdruck) an der Oberfläche vorkommender indikativer Minerale, wie z. B. Hämatit, Goethit und Jarosit analysiert, um oberflächlich oxidierte Zonen von Metallsulfiden (sogenannte Gossans) zu detektieren. Da der spektrale Fingerabdruck der oben genannten Minerale im Wellenlängenbereich von 900 nm spektral breit genug ist, kann dieser sogar mit multispektralen Systemen erfasst werden. Dazu wird die Tiefe des Eisenabsorptionsbands (IFD) als Indikator für die Exploration genutzt (Abb. 7; Mielke et al., 2016). Die auf diese Weise ermittelten Gossans können nun durch gezielte Feldbegehungen weiter erkundet werden. Hierbei ist zu beachten, dass für genauere Analysen der mineralogischen Zusammensetzung der Oberfläche hyperspektrale Satellitendaten, wie sie zukünftig vom EnMAP-System (242 Spektralkanäle) aufgezeichnet werden, notwendig sind.

Die gleichen spektralen Indikatoren können zur Überwachung alter Bergbauhalden verwendet werden (Mielke et al., 2014). Ziel ist dabei, den Materialaustrag in die Umwelt so weit wie möglich zu minimieren. In diesem Zusammenhang kann insbesondere die synergetische Nutzung von multispektralen Satellitensystemen (z. B. Sentinel-2), die eine hohe räumliche und zeitliche Abdeckung aufweisen, in Kombination mit zukünftigen hyperspektralen Systemen (z. B. EnMAP) zeitkritische Informationen (z. B. Moni-

toring von Bergbau- und Bergbaufolgelandschaften, Ölsande) zur Oberflächenzusammensetzung liefern.

Die Zukunft der optischen Satellitenfernerkundung ist hyperspektral

Noch besser als aus den bisher hauptsächlich zur Anwendung kommenden optischen Multispektraldaten lassen sich Materialeigenschaften aus Daten hyperspektraler Aufnahmesysteme bestimmen. Dabei erlaubt die Nutzung des gesamten optischen Wellenlängenspektrums in hoher spektraler Auflösung die detaillierte Abbildung von spektralen Reflexionseigenschaften einschließlich materialspezifischer Absorptions- und Reflexionsbanden. Dieses Messprinzip wird seit Jahren erfolgreich auf der Labor- und Geländeskala sowie auf flugzeuggetragenen Plattformen eingesetzt. Mit der Satellitenmission EnMAP (Abb. 8), an deren Entwicklung das GFZ maßgeblich beteiligt ist, sollen Hyperspektraldaten zukünftig auch von Satelliten aus erhoben werden. Das GFZ stellt den wissenschaftlichen Leiter der EnMAP-Mission (Guanter et al., 2015; Kaufmann et al., 2016) und ist im wissenschaftlichen Vorbereitungsteam verantwortlich für die Entwicklung von Analyseverfahren im Themenfeld von Boden und Geologie. Zusammen mit anderen derzeit in der Entwicklung befindlichen hyperspektralen Satellitenmissionen wird EnMap die Weiterentwicklung von Methoden zur Informationsgewinnung aus Hyperspektraldaten und die weltweite Erschließung neuer Anwendungsfelder ermöglichen.

Besonders relevante Parameter für die Analyse von Böden in ariden und semiariden Gebieten sind die Anteile an Tonen, Karbonaten und anderen Salzen, die mit Multispektralsensoren nicht oder nur sehr ungenau bestimmt werden können. Hyperspektrale Fernerkundung ermöglicht die genaue Quantifizierung von

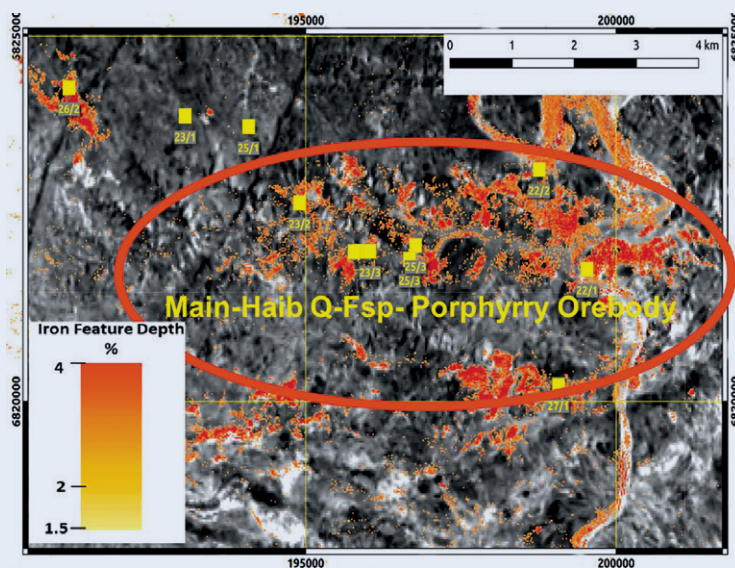


Abb. 7: Analyse der Kupfer-Molybdän-Lagerstätte Haib River im südwestlichen Namibia aus Sentinel-2-Daten, nach Mielke et al. 2016; enthält modifizierte Copernicus-Sentinel-Daten aus 2016

Fig. 7: Analysis of the Haib River Cu-Mo deposits in southwest Namibia using Sentinel-2 Data, based on Mielke et al. 2016, contains modified Copernicus Sentinel Data 2016

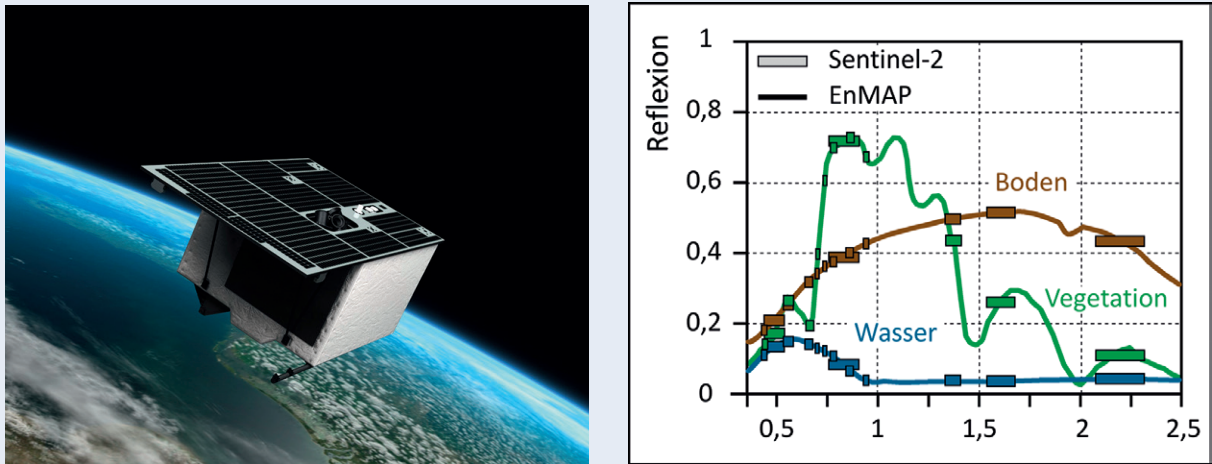


Abb. 8: Der Satellit EnMAP und die Unterschiede in der spektralen Auflösung zwischen EnMAP und Sentinel-2 (Quelle: OHB System AG und DLR)

Fig. 8: The EnMAP satellite and differences in spectral resolution between EnMAP and Sentinel-2

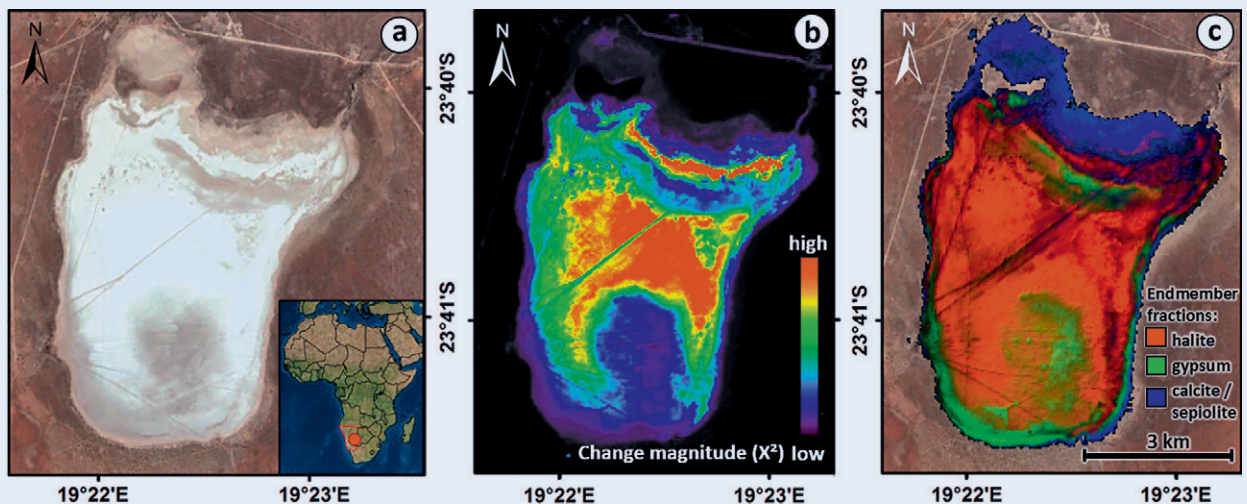


Abb. 9: (a) Omongwa-Salzpflanze, Namibia (Basemap Quelle: DigitalGlobe RGB Bild, September 2013, Google Inc. (Mountain View, CA, USA)); (b) Karte der Veränderungsmagnitude basierend auf dem Landsat-Archiv (1984 bis 2015); (c) mineralogische Kartierung der Salzkrusten basierend auf Hyperion (09/2014)

Fig. 9: (a) Omongwa salt pan, Namibia (Basemap source: DigitalGlobe RGB image, September 2013, Google Inc. (Mountain View, CA, USA)); (b) change magnitude map based on Landsat archive (1984 to 2015); (c) salt crust mineralogical mapping based on Hyperion (09/2014)

Oberflächeneigenschaften von Böden und Sedimenten (Chabrilat et al., 2013) und leistet durch deren Charakterisierung und Kartierung einen wichtigen Beitrag zur Interpretation von Paläoumweltarchiven und deren Oberflächenprozessen.

Im Rahmen des BMBF geförderten SPACES-GeoArchives-Projekts wurden die Dynamik und Mineralogie einer Salzpflanze in der südlichen Kalahari Namibias untersucht (Abb. 9 a, Milewski et

al., 2017). Die höhere spektrale Informationsdichte von hyperspektralen Satellitendaten ermöglicht, die verschiedenen Salze in der Bodenkruste zu identifizieren und deren Konzentration abzuschätzen (Abb. 9 c). Eine parallel hierzu durchgeführte Veränderungsanalyse basierend auf bestehenden multispektralen Satellitenbildarchiven zeigt Zonen unterschiedlicher Dynamik für den Zeitraum der letzten 30 Jahre (Abb. 9 b). Die Ergebnisse legen nahe, dass ein Zusammenhang zwischen der Langzeitdynamik

und der Mineralogie der Oberfläche besteht. Besonders leicht lösliche Salze, wie Halit, die schon bei geringen Niederschlagsmengen oder geringer Bodenfeuchte gelöst werden können, sind sehr dynamisch, während Gips- und Kalkkrusten stabiler sind. Sowohl die chemische Zusammensetzung der Kruste als auch deren mechanische Stabilität bestimmen, wie leicht Winderosion ansetzen kann und haben somit Einfluss auf die Freisetzung von klimawirksamen Staubpartikeln (Aerosole) in die Atmosphäre.

Die aus den hyperspektralen Daten abgeleiteten Informationen über den „Ist-Zustand“ der Mineralogie einer Salzpflanze können wiederum auf die multispektralen Satellitendaten der Sentinel- oder Landsat-Missionen übertragen werden. Durch ihre hohe zeitliche Wiederholrate ermöglichen diese Systeme ein dichtes Monitoring von zukünftigen Veränderungen der Salzkusten. Über das Zusammenspiel mit Hyperspektraldaten kann so Prozessgeschehen nachvollzogen werden und durch die Übertragung auf Zeitreihen werden Verknüpfungen zu Ereignissen von überregionaler Auswirkung wie die Freisetzung von Staubpartikeln und die Auswirkung von Niederschlagsveränderung ermöglicht. Darüber hinaus bietet die Auswertung langjähriger Satellitenbildarchive einen Blick in die jüngere Vergangenheit der Landoberfläche, der als Grundlage für die Interpretation von Paläoumweltarchiven dienen kann.

Tabelle 1 stellt die Vorteile einer synergetischen Nutzung von Daten aus der hyperspektralen Satellitenmission EnMAP in Kombination mit anderen Satellitenmissionen dar. Insbesondere die Kombination der multispektralen Systeme Sentinel-2 und Land-

sat – mit ihrer großen räumlichen Abdeckung und kurzen zeitlichen Wiederholrate – mit EnMAP, der eine hochauflösende spektrale Abtastung im gleichen Spektralbereich wie Sentinel-2 und Landsat vom sichtbaren Licht bis zum kurzwelligigen Infrarot vornimmt, bietet viele Anwendungsmöglichkeiten.

EnMAP ist vor allem als Technologiedemonstrator und wissenschaftliche Mission konzipiert worden. Darüber hinaus sollen auch die wirtschaftlichen Anwendungspotenziale und das Potenzial von Hyperspektralsatelliten für operationelle Dienste im Hinblick auf das Copernicus-Programm untersucht werden. Eine Voraussetzung für viele operationelle Anwendungen, z. B. zur kontinuierlichen Ökosystemüberwachung oder Ableitung von Informationen für landwirtschaftliche Dienste, ist unter anderem eine räumlich und zeitlich hochauflösende Abdeckung der Erdoberfläche.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit der schrittweisen Inbetriebnahme der Sentinel-Satelliten von EU und ESA hat eine neue Ära der Satellitenfernerkundung begonnen. Mit den unterschiedlichen Beobachtungseigenschaften der Satelliten können Informationen von regionaler bis globaler Ebene gewonnen werden. Die sich aus der wachsenden Zahl weltraumbasierter Fernerkundungssysteme ergebende erheblich verbesserte Datenverfügbarkeit ermöglicht den Übergang von Zustands- zu Prozessanalysen von natürlich ebenso wie von anthropogen getriebenen Vorgängen im globalen Maßstab. Die Bereitstellung von Fernerkundungsdaten, die anwendungsspezifische Datenselektion und eine automatisierte Vorprozessierung

Tab. 1: Potenzielle Synergien von EnMAP mit anderen Erdbeobachtungsmissionen und Satellitenmessansätzen
 Tab. 1: Potential synergies of EnMAP with other Earth Observation missions and satellite measurement approaches

Erdbeobachtungsmissionen	Synergiepotenzial	Anwendungsbeispiele
Optische Multispektralmissionen zur Landüberwachung wie Sentinel-2 und Landsat 8	Kombination von großer räumlicher Abdeckung und hoher zeitlicher Auflösung mit der hohen spektralen Auflösung von EnMAP zur Verbesserung des Prozessverständnisses	Vegetations- und Landbedeckungskartierung, verbesserte Charakterisierung von Störungsregimen, Artenverteilung, Phänologieanalysen
Optische multispektrale Missionen zur Wasserüberwachung wie Sentinel-3	Kombination von großer räumlicher Abdeckung und hoher zeitlicher Auflösung mit der hohen spektralen Auflösung von EnMAP	Verbesserte Überwachung von Wasserinhaltsstoffen und spezifischen Merkmalen wie Wirbel in Küstengebieten und Binnengewässern
Hyperspektralmissionen wie HypSIRI, Prisma, HISUI und andere	Erhöhung der zeitlichen Auflösung	Vegetationsdynamik, Katastrophenschutz
Radarmissionen wie Sentinel-1 und andere	Kombination der häufigen Radarabdeckung (durch relative Wetterunabhängigkeit) mit der hohen spektralen Auflösung von EnMAP	Charakterisierung von Feuchtgebieten, geologische Kartierung, Fruchtarten (Radar) und Pflanzenzustand (Hyperspektral)

gehören deshalb genauso zum Aufgabenspektrum am GFZ wie die Entwicklung von Auswerteverfahren mit modernen Methoden der digitalen Informationsverarbeitung.

Ein wichtiges zukünftiges fernerkundliches Forschungsfeld ist die synergetische Nutzung von Daten unterschiedlicher Sensorensysteme. So kann z. B. die gemeinsame Auswertung von optischen und Radardaten eine umfassendere Prozesscharakteristik ermöglichen. Dieses Prinzip lässt sich auf das gesamte Wellenlängenspektrum vom sichtbaren Licht über den thermalen Bereich bis hin zum Mikrowellensignal ausdehnen, um auf diese Weise effiziente Analyse- und Monitoringstrategien für Oberflächenparameter in der natürlichen und anthropogenen Umwelt zu entwickeln. Die Verknüpfung der auf diese Weise gewonnenen raumzeitlichen Informationen mit am Boden erhobenen Messdaten im Rahmen von Modellierungen wird neue Nutzungspotenziale erschließen und dazu beitragen, Risiken für unseren Lebensraum besser abzuschätzen zu können und damit helfen, Schäden zu minimieren oder zu vermeiden.

Literatur

- Behling, R., Roessner, S., Golovko, D., Kleinschmit, B. (2016): Derivation of long-term spatiotemporal landslide activity – A multi-sensor time series approach. - *Remote Sensing of Environment*, 186, pp. 88–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.017>
- Behling, R., Roessner, S. (2017): Spatiotemporal Landslide Mapper for Large Areas Using Optical Satellite Time Series Data. - In: Mikos, M., Tiwari, B., Yin, Y., Sassa, K. (Eds.), *Advances in Landslide Science*, (Advancing Culture of Living with Landslides ; 2), Cham : Springer, pp. 143–152. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5_17
- Blasch, G., Spengler, D., Itzerott, S., Wessolek, G. (2015): Organic Matter Modeling at the Landscape Scale Based on Multitemporal Soil Pattern Analysis Using RapidEye Data. - *Remote Sensing*, 7, 9, pp. 11125–11150. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70911125>
- Chabrilat, S., Ben-Dor, E., Viscarra Rossel, R. A., Demattê, J. A. M. (2013): Quantitative Soil Spectroscopy. - *Applied and Environmental Soil Science*, 13, 616578. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/616578>
- Guanter, L., Kaufmann, H., Segl, K., Förster, S., Rogaß, C., Chabrilat, S., Küster, T., Hollstein, A., Rossner, G., Chlebek, C., Straif, C., Fischer, S., Schrader, S., Storch, T., Heiden, U., Mueller, A., Bachmann, M., Mühle, H., Müller, R., Habermeyer, M., Ohndorf, A., Hill, J., Buddenbaum, H., Hostert, P., van der Linden, S., Leitão, P. J., Rabe, A., Doerffer, R., Krusemann, H., Xi, H., Mauser, W., Hank, T., Locherer, M., Rast, M., Staenz, K., Sang, B. (2015): The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission for Earth Observation. - *Remote Sensing*, 7, 7, pp. 8830–8857. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70708830>
- Golovko, D., Roessner, S., Behling, R., Wetzels, H.-U., Kleinschmit, B. (2017): Evaluation of Remote-Sensing-Based Landslide Inventories for Hazard Assessment in Southern Kyrgyzstan. - *Remote Sensing*, 9, 9, 943. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9090943>
- Haghshenas Haghighi, M., Motagh, M. (2017): Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-Scale Interferometry, Atmospheric Effects, and Ground Deformation Mapping. - *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 2017, 4, pp. 245–256. DOI: <https://doi.org/10.12902/zfv-0174-2017>
- Kaufmann, H., Sang, B., Storch, T., Segl, K., Förster, S., Guanter, L., Erhard, M., Heider, B., Hofer, S., Honold, H.-P., Penné, B., Bachmann, M., Habermeyer, M., Müller, A., Müller, R., Rast, M., Staenz, K., Straif, C., Chlebek, C. (2016): Environmental Mapping and Analysis Program – A German Hyperspectral Mission. - In: Qian, S.-E. (Ed.), *Optical Payloads for Space Missions*, Chichester : Wiley, pp. 161–182. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118945179.ch7>
- Mielke, C., Rogaß, C., Börsche, N., Segl, K., Altenberger, U. (2016): EnGeoMAP 2.0—Automated Hyperspectral Mineral Identification for the German EnMAP Space Mission. - *Remote Sensing*, 8, 2, 127. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8020127>
- Milewski, R., Chabrilat, S., Behling, R. (2017): Analyses of Recent Sediment Surface Dynamic of a Namibian Kalahari Salt Pan Based on Multitemporal Landsat and Hyperspectral Hyperion Data. - *Remote Sensing*, 9, 2, 170. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9020170>
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D., Toll, D. (2004): The Global Land Data Assimilation System. - *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85, 3, pp. 381–394. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
- Scheffler, D., Hollstein, A., Diedrich, H., Segl, K., Hostert, P. (2017): AROSICS: An Automated and Robust Open-Source Image Co-Registration Software for Multi-Sensor Satellite Data. - *Remote Sensing*, 9, 7, 676. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9070676>
- Segl, K., Guanter, L., Rogaß, C., Küster, T., Roessner, S., Kaufmann, H., Sang, B., Mogulsky, V., Hofer, S. (2012): EeteS - The EnMAP End-to-End Simulation Tool. - *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5, 2, pp. 522–530. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2188994>
- Tóth, G., Jones, A., Montanarella, L. (2013): The LUCAS topsoil database and derived information on the regional variability of cropland topsoil properties in the European Union. - *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 9, pp. 7409–7425. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3109-3>