

Environmental Mapping and Analysis Program

# Missionsübersicht und Anwendungsfelder



# DIE ENMAP SATELLITENMISSION

## Was ist EnMAP?

### ZIELE DER SATELLITENMISSION

*EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) ist ein deutscher Erdbbeobachtungssatellit, der im April 2022 ins All gestartet ist und mittels abbildender Spektroskopie die Erdoberfläche diagnostisch charakterisiert und Umweltveränderungen aufzeichnet.*

Die abbildende Spektroskopie ist eine innovative Fernerkundungstechnologie, mit deren Hilfe ein größerer, weit über das sichtbare Licht hinausgehender Wellenlängenbereich mit vielen, aneinandergereihten, schmalen Kanälen bildlich aufgezeichnet wird. Diese vielkanaligen Bilder (sogenannte Hyperspektralbilder) beinhalten somit für jedes einzelne Bildelement kontinu-

ierliche Spektren, die bei entsprechender Weiterverarbeitung die direkte Identifikation der aufgezeichneten Materialien und auch deren Quantifizierung erlauben. Diese Eigenschaften ermöglichen es, Minerale in Gesteinen und Böden zu identifizieren, Vegetationsbestandteile und -zustände zu erfassen und Wasserinhaltsstoffe zu bestimmen (Abb. 1). So liefert EnMAP wertvolle Informationen über die Erdoberfläche, um wichtige wissenschaftliche Fragestellungen in einer Reihe von Anwendungsbereichen wie Land- und Forstwirtschaft, Ökosystemzusammensetzung und -dynamik, Geologie und Böden, Küsten- und Binnengewässer sowie Kryosphäre zu beantworten.

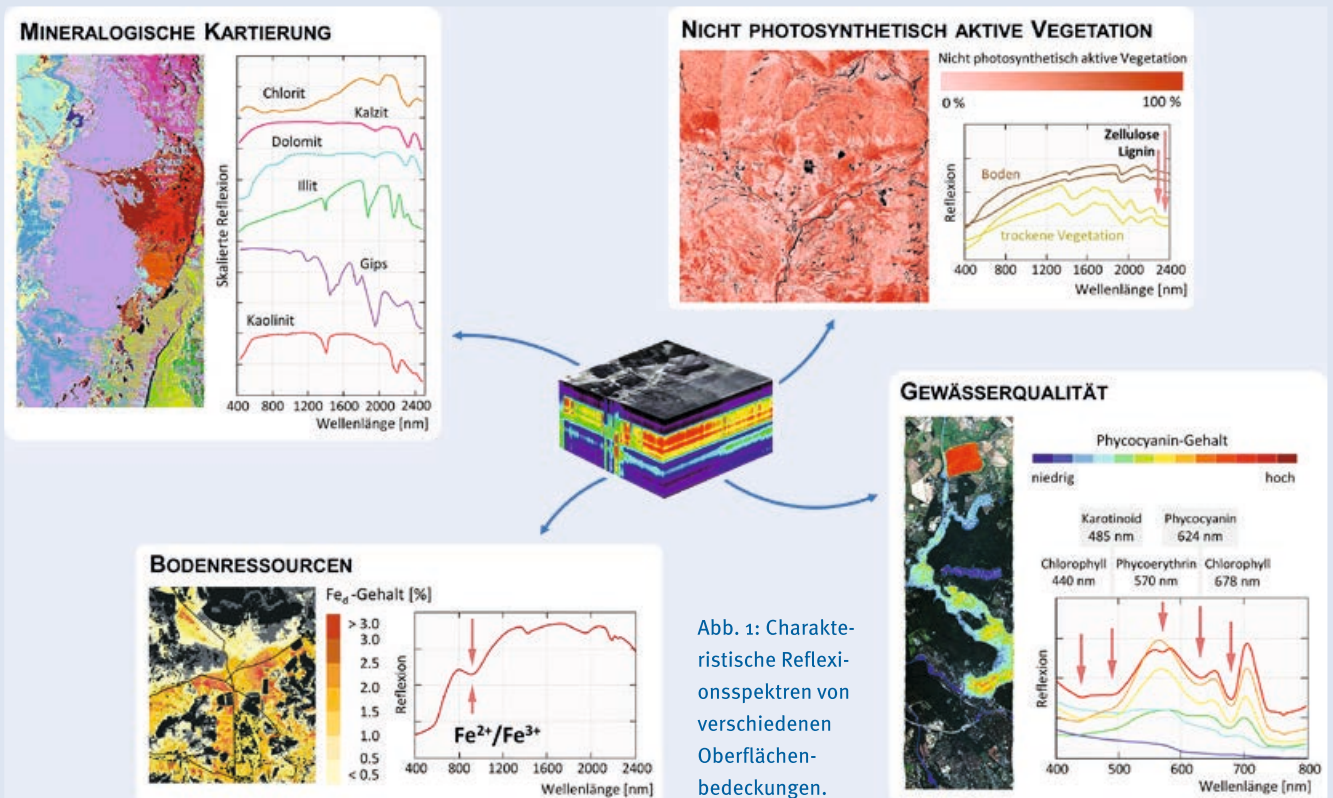


Abb. 1: Charakteristische Reflexionsspektren von verschiedenen Oberflächenbedeckungen.



Wesentliche Systemparameter von EnMAP		
<b>Umlaufbahn</b>		
Umlaufbahn / Inklination	sonnensynchron / 97,96°	
Wiederholrate	27 Tage (Zenitblickwinkel $\leq 5^\circ$ ) / 4 Tage (Zenitblickwinkel $\leq 30^\circ$ )	
Äquatorüberquerung	11:00 h $\pm$ 18 min (Ortszeit)	
<b>Instrument</b>	<i>VNIR (visible / near infrared)</i>	<i>SWIR (shortwave infrared)</i>
Spektralbereich	420 - 1000 nm	900 - 2450 nm
Spektrale Abtastrate	6.5 nm	10 nm
Spektrale Bandbreite (FWHM)	8.1 $\pm$ 1.0 nm	12.5 $\pm$ 1.5 nm
Signal-Rausch-Verhältnis	> 400:1 @495 nm	> 170:1 @2200 nm
Spektrale-Kalibrationsgenauigkeit	0.5 nm	1 nm
Bodenauflösung	30 m x 30 m (Nadir; Meereshöhe)	
Breite des Aufnahmestreifens	30 km (Sichtfenster = 2.63° quer zur Flugbahn)	
Aufnahmekapazität	1000 km/Umlaufbahn - 5000 km/Tag	



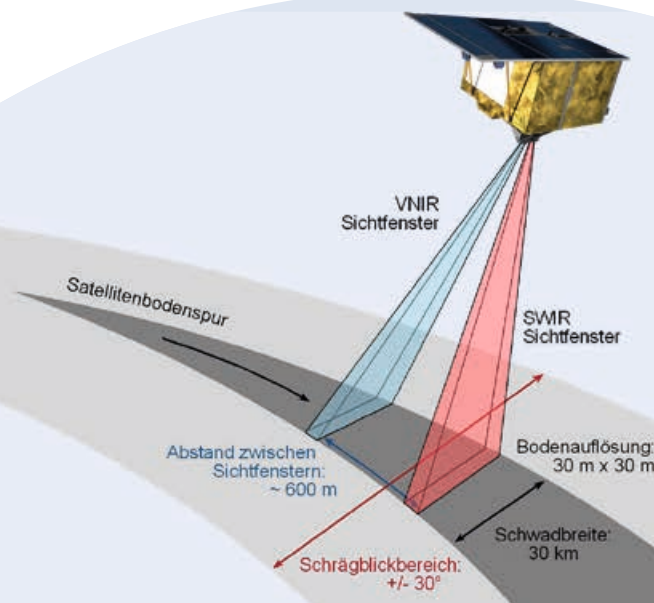
Abb. 2: Schematische Übersicht der Projektorganisation.

Die Satellitenmission wird durch die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR in Bonn mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) in Deutschland geleitet. Das GeoForschungsZentrum GFZ in Potsdam hat die wissenschaftliche Leitung der Mission und wird durch eine Science Advisory Group (EnSAG) unterstützt. Die Firma OHB System AG in Bremen und Oberpfaffenhofen war für die Entwicklung des EnMAP-Instruments und den Bau der dazugehörigen Satellitenplattform verantwortlich. Der Betrieb des Bodensegments erfolgt am DLR, konkret der Satellitenbetrieb durch das Deutsche Raumfahrtkontrollzentrum und die Prozessierung sowie Bereitstellung der Daten durch das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum und das DLR Institut für Methodik der Fernerkundung (Abb. 2).

### KENNDATEN DER ENMAP-MISSION

Das Herzstück des EnMAP-Satelliten ist ein Hyperspektralinstrument, das von der Erde reflektiertes Sonnenlicht im Wellenlängenbereich zwischen 420 nm und 2450 nm in 246 aneinandergereihten schmalen Spektralbändern aufzeichnet. EnMAP hat eine Bodenauflösung von 30 m und kann jeden Punkt der Erde bis auf die Polregionen mit einer Wiederholrate von 27 Tagen im Senkrechtblick aufnehmen, die durch Schwenken auf vier Tage verkürzt werden kann (Abb. 3).

Abb. 3: Darstellung eines EnMAP-Überfluges



## WISSENSCHAFTLICHE VORBEREITUNG UND BEGLEITUNG DER ENMAP-MISSION

Eine Besonderheit von EnMAP stellt die intensive wissenschaftliche Nutzungsvorbereitung und Begleitung der Satellitenmission dar, welche unter anderem die Entwicklung von Software für die hyperspektrale Datenauswertung, den Aufbau einer Online-Lehrplattform für die hyperspektrale Fernerkundung und die Durchführung von Workshops und Schulungen umfasst. Sie hat zum Ziel, dass die Nutzergemeinschaft die Daten bestmöglich in Wert setzen kann, um sie für ein breites Spektrum von Fragestellungen auszuwerten und thematische Produkte abzuleiten. So werden Auswertelgorithmen in der EnMAP-Box, einer speziell für die Verarbeitung von Hyperspektraldaten erstellten Software, für die freie Verwendung zugänglich gemacht. Bevor EnMAP ins All gestartet ist, wurden

die Auswertelgorithmen an Aufnahmen von flugzeuggetragenen Plattformen, die in einem eigenen Befliegungsprogramm erhoben werden, entwickelt und getestet. In der Online-Lehrplattform HYPERedu werden Lehrmaterialien und Kurse für Studierende und Lehrende sowie Fachleute in Wissenschaft, Behörden und Firmen angeboten. Darüber hinaus werden Sommerschulen und Workshops organisiert, die dem Training und der Vernetzung der Nutzergemeinschaft dienen (Abb. 4). Entsprechend der offenen Datenpolitik von EnMAP, werden nicht nur die EnMAP-Satellitendaten, sondern auch die quelloffene Software, Daten aus Befliegungskampagnen und Online-Schulungsmaterialien kostenfrei bereitgestellt.



Abb. 4: Eindrücke von vergangenen EnMAP-Schulen mit Vernetzungsaktivitäten (oben rechts), Feldmessungen (oben links) und Gruppenbild während einer Demonstration des abbildenden Spektrometers AVIS-3, das in Flugkampagnen im Rahmen der EnMAP-Nutzungsvorbereitung eingesetzt wurde (unten).



# Warum brauchen wir EnMAP?

## Globale Herausforderungen durch Veränderungen in unserer Umwelt

*Die Menschheit ist im 21. Jahrhundert mit fundamentalen Herausforderungen konfrontiert. Die wichtigsten Aufgaben sind es, die globale Landnutzung nachhaltig zu gestalten, sich auf die vielseitigen Folgen des Klimawandels einzustellen, der fortschreitenden Umweltzerstörung entgegenzuwirken und den nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen sicherzustellen. Um den wachsenden Druck auf Gesellschaft und Umwelt bewältigen zu können, müssen diese vielschichtigen, eng miteinander verknüpften Aspekte raum-zeitlich erfasst, quantifiziert und verstanden werden.*

Für ein besseres Verständnis der Risiken und Konsequenzen dieser Umweltveränderungen spielt die abbildende Spektroskopie als diagnostische Monitoringtechnologie eine entscheidende Rolle. In den vergangenen Jahrzehnten hat sich dieser Wissenschaftszweig zu einer tragenden Säule bei der Erfassung, Quantifizierung und Modellierung von Oberflächenprozessen sowie der Analyse von Vegetationsbeständen entwickelt. Die zukünftig zunehmende Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen Hyperspektralaufnahmen wird signifikant zum besseren Verständnis von komplexen Prozessen und Rückkopplungsmechanismen über verschiedene Erdsphären (d.h. Atmosphäre, Biosphäre, Pedosphäre und Hydrosphäre) beitragen. Die Fähigkeit von EnMAP, in kurzen zeitlichen Abständen verschiedene Regionen der Erdoberfläche in hoher räumlicher und herausragender spektraler Auflösung abzubilden, eröffnet neue Möglichkeiten, den Zustand von Ökosystemen (d.h. Eigenschaften und Zusammensetzung von Vegetation, Böden und Wasser) zu untersuchen und Entwicklungsprognosen abzugeben. Daher kommt EnMAP eine zentrale Bedeutung bei der Bewältigung von Umweltproblemen zu, was zu verbesserten nachhaltigen Konzepten in der Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen beitragen wird.

### ENMAP – EIN MEILENSTEIN DER ABBILDENDEN SPEKTROSKOPIE

Die Entwicklung und intensive Nutzung abbildender Spektrometer in der Fernerkundung wird seit fast drei Jahrzehnten kontinuierlich vorangetrieben. Im Satellitenbetrieb bislang eingesetzte Instrumente decken aber entweder nicht die gesamten erforderlichen Wellenlängenbereiche ab, liefern nur eine geringe Bodenauflösung oder sind zu unempfindlich gegenüber dem zu messenden Bodensignal. So werden bislang Spektrometer vorwiegend für wissenschaftliche, experimentelle und kommerzielle Zwecke auf flugzeuggetragenen Plattformen verwendet. Flugzeuggestützte Einsätze weisen jedoch gegenüber Satellitenaufnahmen den erheblichen Nachteil auf, dass sie nur begrenzt regional aufzeichnen und nicht die dringend erforderlichen, langfristig regelmäßigen Messungen von Oberflächenprozessen auf globalem Maßstab liefern können. Zudem müssen Flugzeugdaten aufwen-

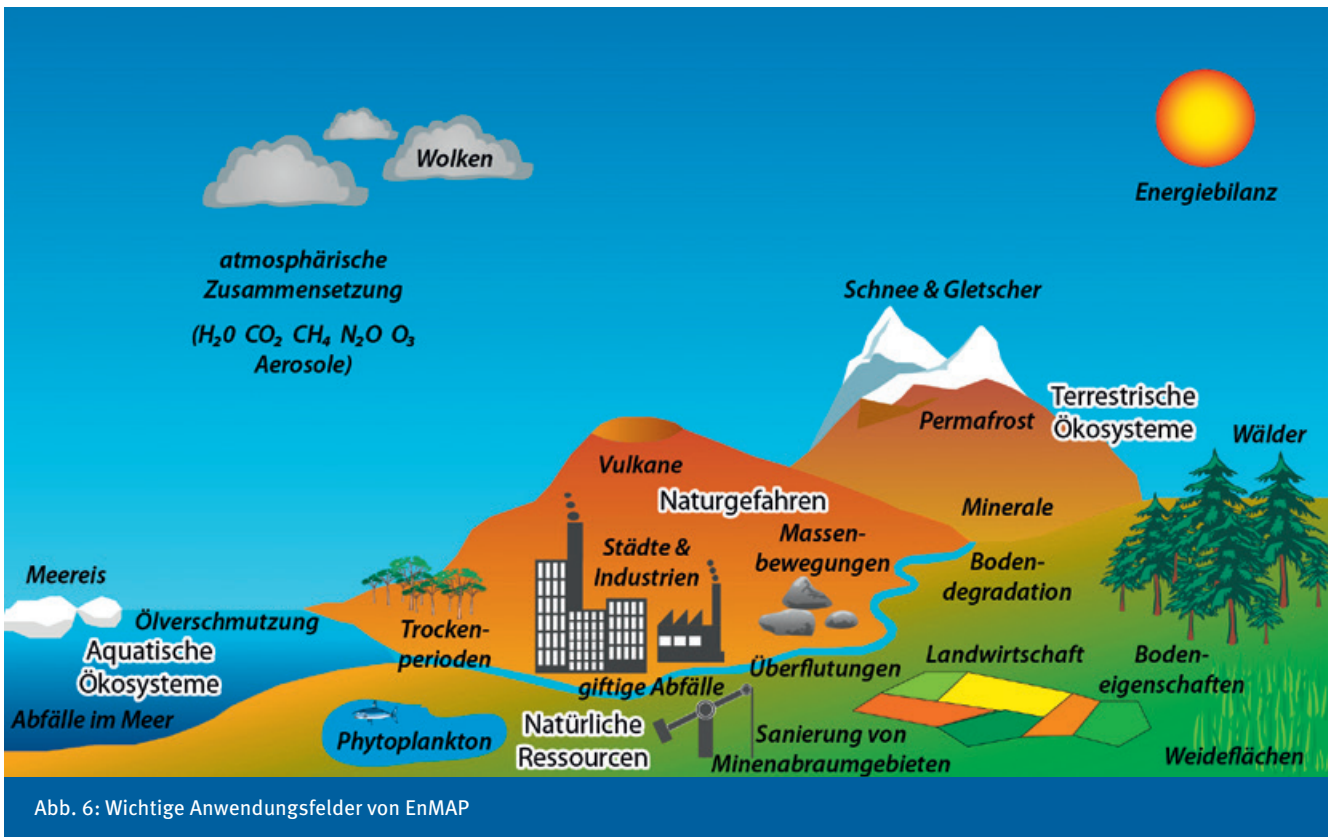
dig korrigiert werden und wiederholte Aufnahmen gleicher Gebiete sind sehr kostenintensiv (Abb. 5).

Die gegenwärtigen optischen Satellitensensoren sind überwiegend multispektrale Instrumente, die in einzelnen, vergleichsweise breiten Wellenlängenbereichen messen und somit vorrangig nur qualitative Informationen zur Zusammensetzung der Erdoberfläche liefern. Abbildende Spektrometer ermöglichen hingegen durch den hohen spektralen Informationsgehalt die diagnostische quantitative Analyse von Oberflächenmaterialien mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. Vor diesem Hintergrund stellt der Start der EnMAP-Mission 2022 einen Meilenstein optischer Fernerkundungstechnologie und im Speziellen der abbildenden Spektroskopie dar, der den Weg zu einem besseren Verständnis der in unserem Lebensraum stattfindenden Prozesse weist.



Abb. 5: Simuliertes EnMAP-Bild der Region Potsdam, Deutschland, das verschiedene urbane, landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche und aquatische Ökosysteme zeigt. Die Simulation beruht auf einem hyperspektralen Bild aus einer Flugzeugbefliegung (HyMap). Mit EnMAP können in Zukunft größere Landschaftsausschnitte gleichzeitig aufgezeichnet werden als derzeit mit Flugzeugbefliegungen möglich.

# Welche Anwendungen ermöglicht EnMAP?



## NEUE HORIZONTE IN DER ÖKOLOGIEFORSCHUNG UND IM RESSOURCEN- UND KATASTROPHENMANAGEMENT

*Die wiederholten Aufnahmen von EnMAP und die erweiterte spektrale Abdeckung und Auflösung eröffnen neue Horizonte in der Ökosystemforschung, der Erkundung von Ressourcen und im Katastrophenmanagement. EnMAP wird dabei wichtige Beiträge zu folgenden wissenschaftlichen Fragen leisten können.*

### KLIMAWANDELEINFLÜSSE UND -MASSNAHMEN

- Wie beeinflusst der Klimawandel Zustand, Zusammensetzung und saisonale Zyklen terrestrischer und aquatischer Ökosysteme?
- Welche Maßnahmen dienen dem Klimaschutz und wie kann ihre Umsetzung überwacht werden?

### LANDBEDECKUNGSWANDEL UND OBERFLÄCHENPROZESSE

- Wo und in welchem Ausmaß finden Landdegradation und Landnutzungswandel statt?
- Welche Prozesse treiben die Landdegradation an und wie erfolgreich sind Gegenmaßnahmen?

- Was sind die Auswirkungen von Landdegradation und Landnutzungswandel im Hinblick auf Ernährungssicherung und ökologische Nachhaltigkeit?

### BIODIVERSITÄT UND ÖKOLOGIEPROZESSE

- Wie ändern sich Ökosysteme in ihrer Zusammensetzung, räumlichen Verteilung und Zustand?
- In welchem Maße wirkt sich der Ökosystemwandel auf den Verlust von Biodiversität und die Migration von Arten aus?
- Welchen Erfolg haben Maßnahmen zur Ökosystemstabilität und zur Bekämpfung von Biodiversitätsverlusten?



### WASSERVERFÜGBARKEIT UND WASSERGÜTE

- Welche Gebiete sind von Wassermangel und Wassergüteproblemen betroffen?
- Wie verstärken Klimawandel und menschliche Aktivitäten diese Probleme?

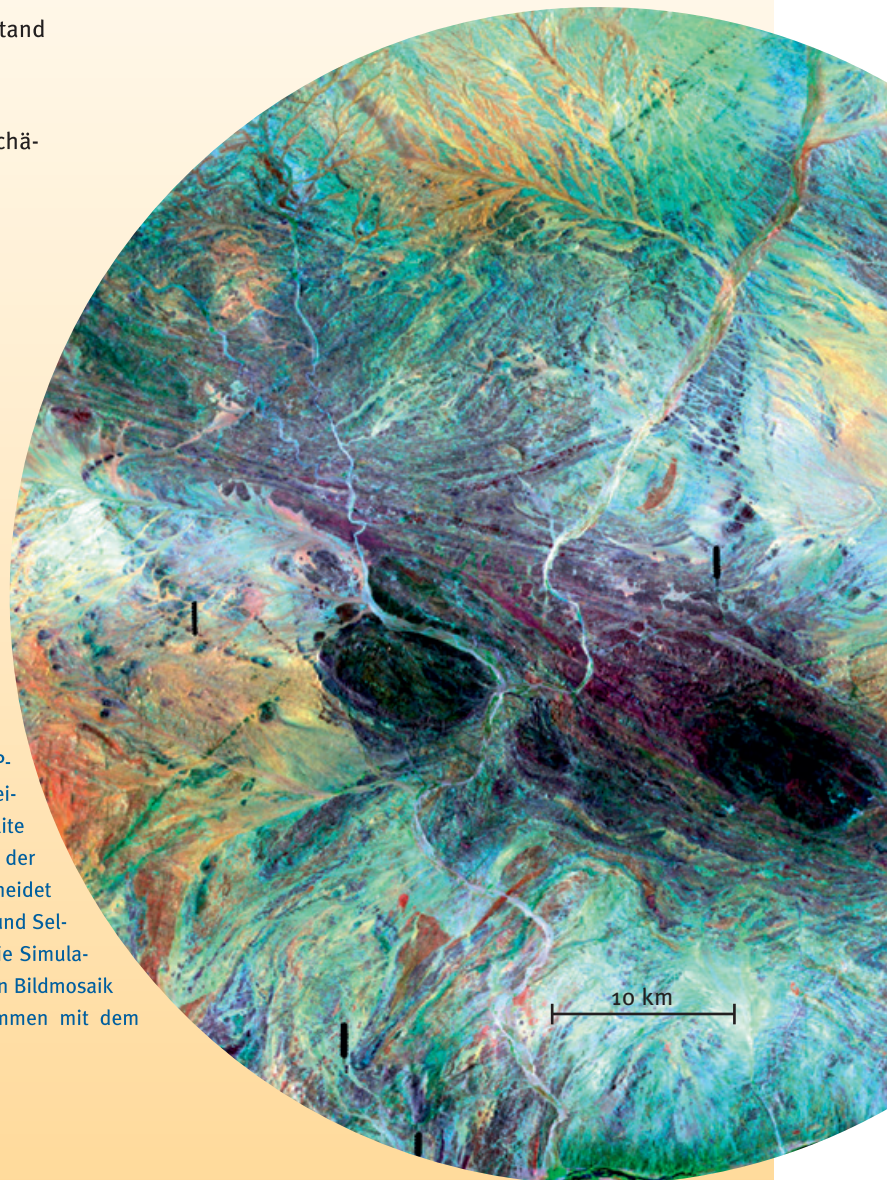
### NATÜRLICHE RESSOURCEN

- Wie können natürliche Ressourcen, wie Lagerstätten, Energie, Boden und Grundwasser, erkundet, überwacht und nachhaltig genutzt werden?
- Welchen Einfluss haben menschliche Aktivitäten, wie Industrie, Bergbau und Landwirtschaft, auf den Zustand natürlicher Ressourcen?
- Wie groß ist der Grad und der Umfang von Umweltschäden und wie verläuft die Sanierung der Schäden?

### GEFÄHRDUNGEN UND RISIKEN

- Wie anfällig sind bestimmte Regionen für natürliche und anthropogene Gefahren?
- Welche Gebiete sind im Schadenfall wie stark betroffen?

Abb. 7: Ausschnitt simulierter EnMAP-Daten (Falschfarbendarstellung) eines Teilbereichs der Pofadder Tantalite Valley Scherzone, Südnamibia, wo der Hom River die Scherzone durchschneidet (Mitte links im Bild) und wo Lithium und Seltenerdelemente auftreten können. Die Simulation beruht auf einem hyperspektralen Bildmosaik aus Flugzeugbefliegungen aufgenommen mit dem HyMap-Sensor.



# EnMAP als wertvoller Erntehelfer

## AUF DEM WEG ZU EINER NACHHALTIGEN LANDWIRTSCHAFT

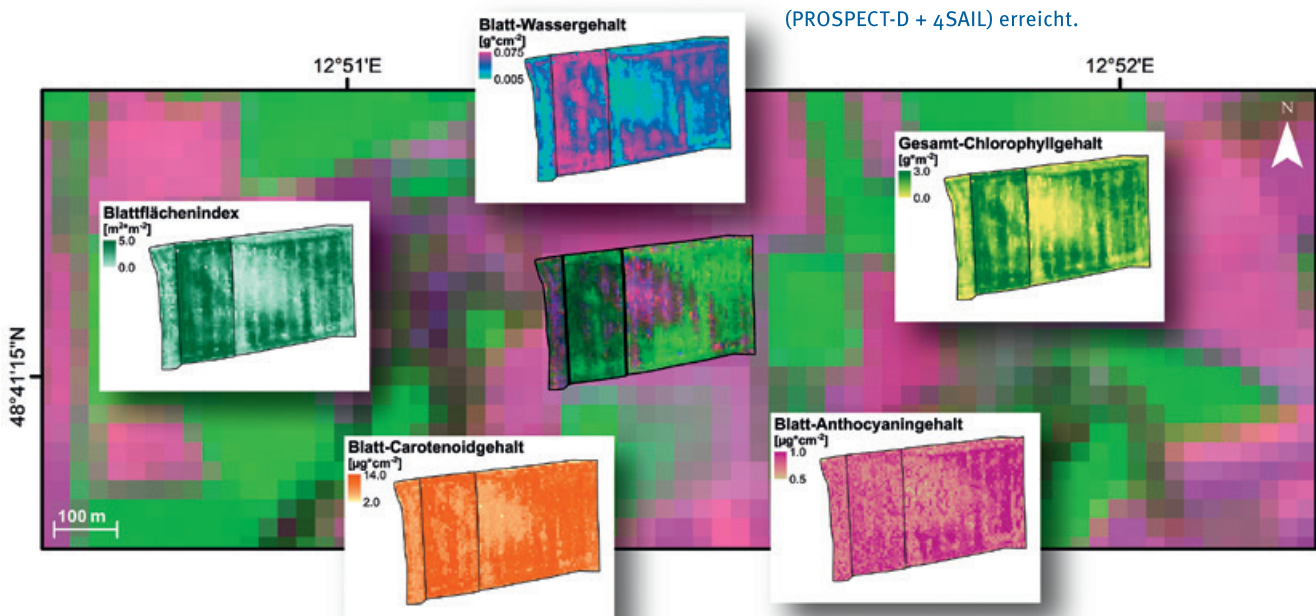
Vor dem Hintergrund einer kontinuierlich anwachsenden Weltbevölkerung kommt der landwirtschaftlichen Produktion als Quelle für Nahrungsmittel und Biomasse eine hohe Bedeutung zu. Aktuelle Hochrechnungen der Vereinten Nationen zufolge werden im Jahr 2100 mehr als 11 Mrd. Menschen auf die Versorgung mit landwirtschaftlichen Gütern angewiesen sein. Bioproduktive Fläche steht jedoch nur sehr begrenzt zur Verfügung, da nur ca. 1,5 Mrd. ha der Kontinentalfläche die klimatischen, topographischen und bodenbildenden Kriterien erfüllen, die Ackerbau überhaupt ermöglichen. Ein möglicher Ansatz zur Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion liegt in der Optimierung der Bewirtschaftungsverfahren, da die auf den aktuell bereits landwirtschaftlich genutzten Flächen erzielten Erträge starke regionale Unterschiede aufweisen. Diese Steigerung der Flächeneffizienz kann dabei in erster Linie durch ein verbessertes Management erreicht werden. So ermöglicht eine Optimierung der Anbau-, Dünge- und Pflanzenschutz- sowie Bewässerungsstrategie eine Steigerung der Produktion bei gleichzeitiger Reduktion der aufzuwendenden Betriebsmittel.

Angeregt durch zahlreiche wissenschaftliche Studien beginnt sich diese Effizienzsteigerung in Form des sog. Präzisionsackerbaus, bei dem landwirtschaftliche Nutzflächen kleinräu-

mig differenziert (Fachbegriff: teilflächenspezifisch) gemanagt werden, in der landwirtschaftlichen Praxis durchzusetzen. Das Erarbeiten teilflächenspezifischer Managementstrategien ist dabei auf räumliche Informationen über den aktuellen Wachstumszustand der Pflanzen angewiesen. Fernerkundung stellt das einzige Messverfahren dar, das in der Lage ist, räumliche Informationen über den Pflanzenzustand flächendeckend und nicht-destruktiv bereitzustellen. Durch die Kombination von Fernerkundungsdaten mit computergestützten Rechenmodellen können landwirtschaftliche Informationssysteme geschaffen werden, die durch kontinuierliche, räumlich differenzierte Informationsbereitstellung Landwirte bei Managemententscheidungen unterstützen. Mit Hilfe solcher sog. Entscheidungsunterstützungssysteme können, z. B. durch das frühzeitige Erkennen von Nährstoffmangel, Wasserstress oder Schädlingsbefall, Managementstrategien zeitnah und teilflächenspezifisch angepasst und damit Erntemängel verhindert oder reduziert werden.

Eine große Herausforderung stellt dabei die Gewinnung der gewünschten Information aus den Fernerkundungsdaten dar. Die bisher zur Verfügung stehenden multispektralen Erdbeobachtungssensoren können bereits dazu genutzt werden, um strukturelle Messungen z.B. der photosynthetisch aktiven

Abb. 8: Ergebnis der räumlichen Bestimmung verschiedener landwirtschaftlich relevanter Variablen für drei benachbarte Felder in der Gegend um Neusling, Süddeutschland, mit Hilfe simulierter EnMAP-Daten. Die Schätzungen wurden durch Invertierung eines Bestandes-Reflexionsmodells (PROSPECT-D + 4SAIL) erreicht.





Blattfläche aus dem All vorzunehmen. Die mit diesen herkömmlichen Sensoren erzielten Ergebnisse sind aber dahingehend limitiert, dass die vergleichsweise grobe spektrale Abtastung eine Differenzierung feiner und nahe aneinander liegender Absorptionen unmöglich macht, weshalb (1) die Anzahl der bestimmbar Variablen eingeschränkt ist und (2) eine isolierte Ableitung der jeweiligen Landoberflächenvariablen mit größeren Unsicherheiten verknüpft ist.

Eine in vielerlei Hinsicht überlegene Alternative stellt die Verwendung von sog. hyperspektralen Bilddaten dar. An der LMU München wird im Rahmen der wissenschaftlichen Vorbereitung der EnMAP-Mission besonders die Eignung physikalisch basierter Methoden zur Gewinnung von landwirtschaftlich relevanten Informationen aus hyperspektralen Satellitendaten untersucht. Dabei werden zunächst mit Hilfe von flugzeuggestützten Sensoren hyperspektrale Bilddaten aufgenommen, um diese dann mit Hilfe von Computermodellen so umzuwandeln, dass sie in ihren Eigenschaften den Daten des zukünftigen EnMAP Sensors entsprechen. Gleichzeitig simulieren Reflexionsmodelle die spektrale Reflexion des Sonnenlichts von landwirtschaftlichen Beständen in Abhängigkeit der Bestandseigenschaften. Wenn die verwendeten Satellitendaten in Bezug auf spektrale Auflösung und Rauschverhalten eine

gute Qualität aufweisen, können durch den Vergleich der modellierten Reflexion mit den gemessenen Spektralverläufen die Reflexionsmodelle invertiert (d. h. umgekehrt) werden, sodass auf die Eingangsparameter zurückgeschlossen werden kann (z. B. siehe Abb. 8).

Die Wissenschaftsmission EnMAP wird Zeitreihen von hyperspektralen Satellitendaten in einer Qualität bereitstellen, welche die anspruchsvollen Kriterien für eine physikalisch basierte übertragbare Variablenmessung im Hinblick auf spektrale Auflösung und Sensorrauschen erfüllen. So können mit Hilfe von EnMAP verbesserte räumlich-zeitliche Informationsprodukte als Entscheidungsgrundlage für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung erstellt werden (z. B. Abb. 9). EnMAP als Wissenschaftsmission stellt damit einen Wegbereiter für eine globale Abdeckung mit hyperspektralen Erdbeobachtungsdaten dar, mit deren Hilfe in Zukunft ein wertvoller Beitrag zu einer effizienteren Landwirtschaft und damit zu einer ökologisch und ökonomisch nachhaltigeren Nutzung der bioproduktiven Landoberfläche geleistet werden kann.

### EnMAP & LANDWIRTSCHAFT

EnMAP ermöglicht die Ableitung spezieller Informationsprodukte, die als Entscheidungsgrundlage für Managementmaßnahmen des teilflächenspezifischen Pflanzenbaus Verwendung finden.

Der Einsatz dieser Techniken kann zu einer ökologisch und ökonomisch nachhaltigeren Nutzung der bioproduktiven Landoberfläche beitragen.

Gegenüber herkömmlichen multispektralen Erdbeobachtungssystemen garantieren hyperspektrale Aufnahmesysteme wie EnMAP dabei (1) eine größere Vielfalt an beobachtbaren Variablen, (2) eine höhere Genauigkeit der Informationsprodukte durch die Vermeidung von Fehlinterpretationen und (3) die globale Übertragung von Verfahren zur Variablen-schätzung, die nicht auf Kalibrierinformationen aus Feldmessungen angewiesen sind.

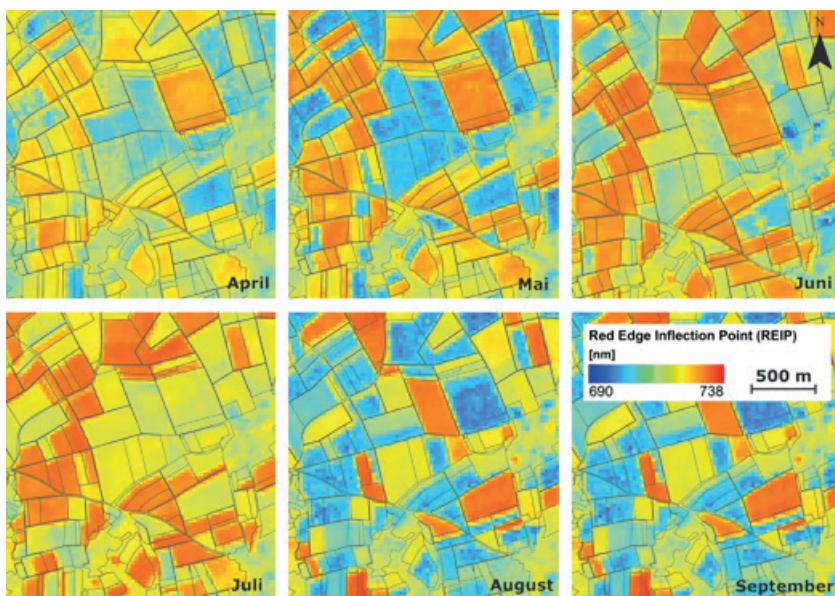


Abb. 9: Simulierte EnMAP-Zeitreihe über die Wachstumsperiode von April bis September für eine landwirtschaftliche Anbaufläche in der Nähe von Neusling, Süddeutschland. Gezeigt wird die zeitliche Entwicklung des Red Edge Inflection Point (REIP), der u.a. ein Indikator für die aktuelle Nährstoffversorgung sein kann.

# EnMAP als fachkundiger Waldbeobachter

## WALDÖKOSYSTEME IN ZEITEN DES KLIMAWANDELS ÜBERWACHEN

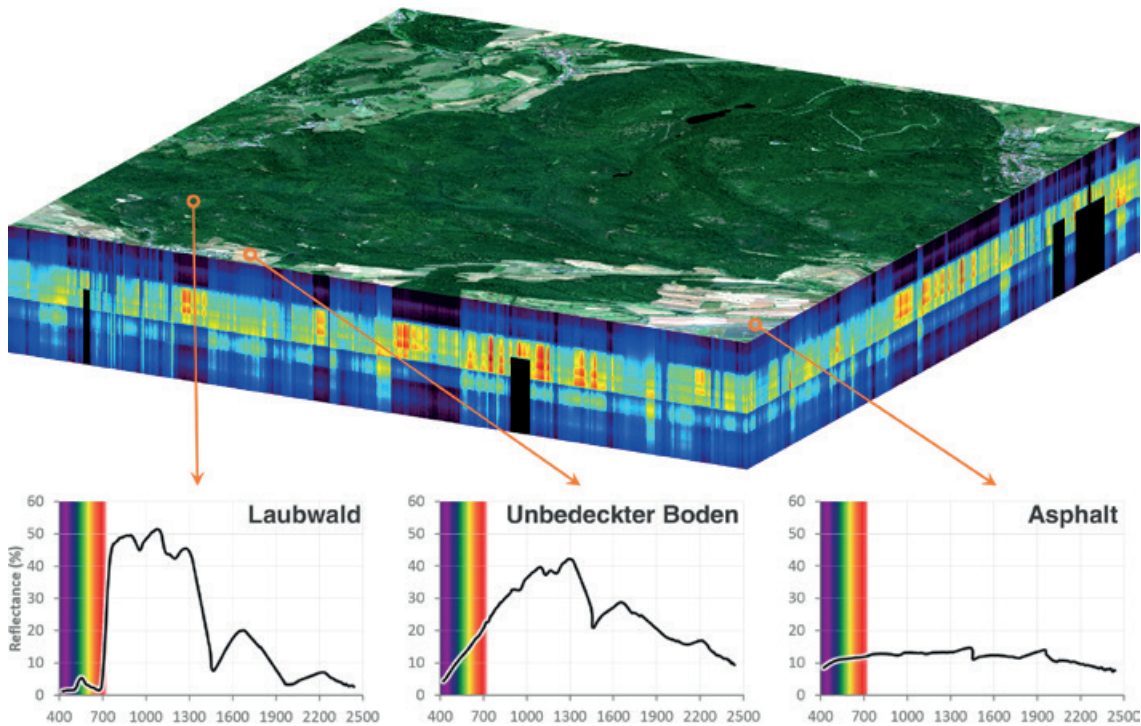


Abb. 10: Hyperspektralwürfel eines Waldgebiets: Jedes Pixel enthält ein detailliertes Reflexionsspektrum.

Waldökosysteme bedecken signifikante Anteile der Landoberfläche und gehören zu den wichtigsten Garanten zentraler Ökosystemdienstleistungen. Mit dem weltweit größten Speichervolumen von Biomasse dienen sie als bedeutendste terrestrische Senke für Kohlendioxid und übernehmen neben ihrer Funktion als Produktionsstätte von Holz insbesondere im Bereich des Biodiversitäts- und Klimaschutzes wichtige Nutz- und Schutzfunktionen. Zugleich geraten Wälder und Waldökosysteme einerseits durch die globale Erwärmung, andererseits durch eine stark expandierende Weltbevölkerung und Wirtschaft unter zunehmendem Druck. Waldzerstörung, Umwandlung von Wäldern in landwirtschaftliche Nutzflächen, legale und illegale Holzentnahme und wiederkehrende Waldbrände sind nur einige der Prozesse, die in unterschiedlichster Ausprägung zur Bedrohung von Waldlandschaften und -ökosystemen beitragen.

Bei der wissenschaftlichen Begleitung dieser Prozesse stehen Schutz und Erhalt von Waldökosystemen und die ökonomischen Interessen des operativen Forstmanagements gleichberechtigt nebeneinander. Die Bewältigung der daraus resultierenden gesellschaftlichen Herausforderungen ist komplex und stellt immer größere Anforderungen an die Datengrundlagen

für Entscheidungsfindungen. Insbesondere ist der Informationsbedarf einer auf den Ausgleich zwischen wirtschaftlichen und ökologischen Interessen ausgerichteten, nachhaltigen Waldbewirtschaftung ohne Einsatz von Fernerkundungssystemen nicht mehr zu erfüllen.

Die hyperspektrale Satellitenmission EnMAP kann dabei entscheidende Beiträge leisten. Sie ist nicht in erster Linie für eine Erfassung der globalen Waldverbreitung geeignet, sondern zielt primär auf das Monitoring eines repräsentativen, global orientierten Netzwerks von Waldstandorten ab. Dabei spielt die Mission eine Schlüsselrolle in der Entwicklung und Optimierung von Methoden zur Kartierung von Baumarten und Altersstufen, der flächendifferenzierten Bewertung von Waldstrukturen und forstlicher Ressourcen. Die spezifische Kapazität hyperspektral auflösender optischer Systeme (Abb. 10) kommt jedoch ganz besonders bei der Erfassung physiologischer Zustandsgrößen von Waldökosystemen zum Tragen und ermöglicht beispielsweise anhand einer Charakterisierung von Wasser- und Pigmentgehalt die frühzeitige Erkennung von Stressphänomenen (Abb. 11). Auf dieser Grundlage eröffnet die regelmäßige Beobachtung über mehrere Wachstumszyklen neue Perspektiven zur Integration hyperspektral abgeleiteter



Vitalitätsindikatoren mit Modellrechnungen zur pflanzlichen Produktion und des Waldwachstums. In Ergänzung zu experimentellen Untersuchungen werden solche fernerkundungs-gestützten Simulationsrechnungen entscheidende Beiträge zur Bewertung von Forstmanagementkonzepten, die an künftige regional-klimatische Bedingungen angepasst sind, leisten können.

Bei den Arbeiten zur Vorbereitung der Mission standen insbesondere solche Teilaspekte im Vordergrund, die zur optimalen Ausschöpfung des Potenzials von EnMAP erforderlich sind. So wurden an der Universität Trier unter anderem modellbasierte und fortgeschrittene empirische Verfahren zur Erfassung öko-physiologischer Zustandsgrößen untersucht und weiterent-

wickelt. Parallel dazu wurde die Entwicklung leistungsfähiger Algorithmen (z. B. die Integration atmosphärischer Strahlungstransfermodelle mit geometrisch-optischen Modellen der Bestandsreflexion) vorangetrieben.

Zentral für die Beobachtung von dynamischen, auf phänologische Zyklen, Stressfaktoren und Standortunterschiede sensitiv reagierenden Waldökosystemen ist die Erhebung von Zeitreihen über den jahreszeitlichen Verlauf, wie sie mit EnMAP im Vergleich zu Flugzeugbefliegungen für großflächige Waldgebiete regelmäßig möglich sein werden.

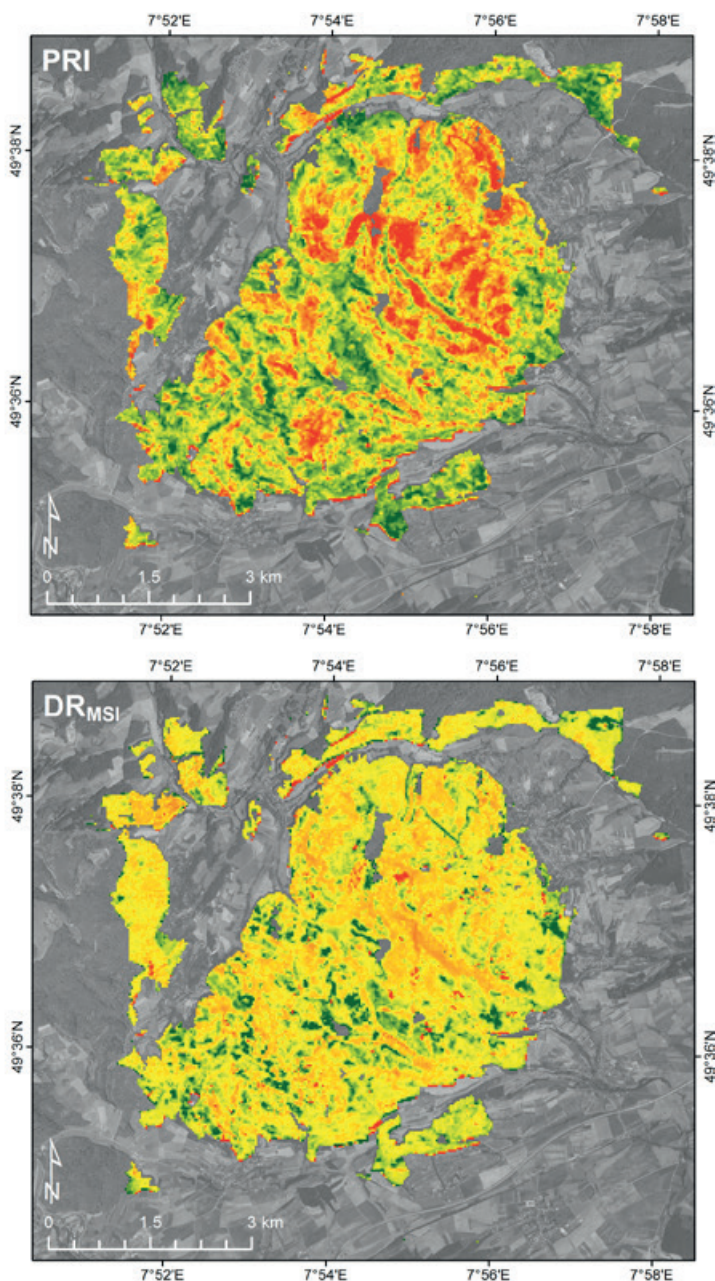


Abb. 11: Erfassung von Trockenstress in dem rheinland-pfälzischen Waldgebiet Donnersberg, Deutschland. Der hyperspektrale „Photochemical Reflectance Index“ (PRI), (oben) zeigt räumlich-differenziert bereits frühe Stressanzeichen, während der „Double Ratio Moisture Stress Index (DR<sub>MSI</sub>)“, der auch aus multispektralen Daten berechnet werden kann, dies noch nicht tut.

### ENMAP & WALDÖKOSYSTEME

Waldökosysteme gehören zu den wichtigsten Garanten zentraler Ökosystemdienstleistungen, die EnMAP erforschen wird.

Für die nachhaltige wirtschaftliche und ökologische Bewirtschaftung von Waldökosystemen wird EnMAP entscheidende Informationen zu Waldstrukturen und forstlichen Ressourcen liefern.

Die frühzeitige Erkennung von klimatisch bedingten Stressphänomenen durch EnMAP ist von großer Bedeutung für angepasste Forstmanagementkonzepte und für Modellrechnungen zu Ökosystemdienstleistungen.

# EnMAP als objektiver Ökosystemanalytiker

## DEN GRADUELLEN WANDEL VON ÖKOSYSTEMEN IN RAUM UND ZEIT UNTERSUCHEN



Abb. 12: Spektrale Geländemessungen zur Validierung von fernerkundlichen Bildanalysen.

Terrestrische Ökosysteme unterliegen aufgrund des globalen Wandels und dessen lokaler und regionaler Folgen beispiellosen Veränderungen in Raum und Zeit. Die Abholzung von Wäldern, extensivierte Landwirtschaft oder das Wachstum von Städten als Resultat direkter Eingriffe des Menschen, oder die Zunahme von Dürre- und Hochwasserereignissen als Ergebnis des menschgemachten Klimawandels, haben erhebliche Auswirkungen auf Zustand, Funktion und Biodiversität von Ökosystemen. Ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen menschlichem Handeln und den umgebenden Landökosystemen bzw. deren ökosystemaren Dienstleistungen ist dringend notwendig und kann nur durch flächendeckende Überwachung ganzer Regionen über längere Zeiträume erfolgen.

Die Erdbeobachtung mit Fernerkundungssensoren liefert einen wichtigen Beitrag, ganze Ökosysteme zu charakterisieren und einen anhaltenden Ökosystemwandel flächenhaft aufzuzeigen. Um globale Standards für die Überwachung von Ökosystemen einzuhalten, bieten die Konzepte der essentiellen Biodiversitäts- (EBV) und Klimavariablen (ECV) einen geeigneten Umsetzungsrahmen. In diesem Zusammenhang können EnMAP-Daten einen wichtigen und in Teilen essentiellen Beitrag für die Ableitung mehrerer EBVs und ECVs wie Blattflächenindex, Biomasse oder Zusammensetzung von Pflanzengesellschaften leisten.

Mit der Verfügbarkeit von EnMAP-Daten werden Informationen von multispektralen Sensoren wie Landsat-8 OLI und Sentinel-2 MSI mit hoher zeitlicher Dichte um regelmäßige, spektral

sehr hochaufgelöste Daten an beliebigen Orten weltweit ergänzt. Somit wird es in Zukunft möglich sein, detailliertere Parameter bzgl. der Art, Struktur oder des Zustands von Vegetationsbeständen abzuleiten, z.B. die Artenzusammensetzung, Biomasse, Blattstickstoff- oder Blattwassergehalt. Durch die Möglichkeit, zusammenhängende Gebiete über längere Zeiträume regelmäßig aufzunehmen, kann auch ein gradueller Wandel, d.h. eine langsam stattfindende, kontinuierliche Veränderung, erfasst und beschrieben werden. So wird es z.B. möglich sein, die Wirksamkeit der Ausweisung eines Schutzgebietes im Hinblick auf Biomassezunahme oder Artenreichtum zu bewerten oder auch die Auswirkungen von Störungsereignissen wie Dürreperioden oder Feuer auf den Vegetationszustand zu erfassen.

Die Forschungen der Humboldt-Universität zu Berlin im Rahmen der EnMAP-Aktivitäten beschäftigen sich gezielt mit dem graduellen raum-zeitlichen Wandel innerhalb einzelner Ökosysteme sowie den Übergängen zwischen verschiedenen Ökosystemtypen. Insbesondere die folgenden Aspekte stehen im Mittelpunkt der Betrachtungen: (1) Quantifizierung von Vegetationsarten und Bedeckungsanteile bzw. Biomasse in unterschiedlichen Ökosystemen, (2) Erfassung des graduellen Wandels ehemals landwirtschaftlich genutzter Flächen und (3) Beschreibung des Nutzungsgradienten in Stadt-Umland-Regionen. Klassische Verfahren der Bildverarbeitung von Multispektraldaten können zusätzliche spektrale Information häufig nicht effektiv nutzen. Um das Potenzial der Daten moderner abbildender Spektrometer wie EnMAP bestmöglich in Wert zu setzen, werden im Rahmen der Arbeiten verschiedene Verfahren des Maschinellen Lernens für spektrale Analysen angepasst und insbesondere für quantitative Auswertungen nutzbar gemacht. Auf Konzepten zur Verknüpfung zwischen empirischen und physikalisch basierten Verfahren sowie zur verbesserten Übertragbarkeit empirischer Modelle liegt hierbei ein besonderes Augenmerk, um die räumlich und zeitlich verbesserte Datenverfügbarkeit ideal zu nutzen.

In der Region Castro Verde im Süden Portugals wurde ein umfassendes Monitoring des raum-zeitlich graduellen Ökosystemwandels durchgeführt. Die Region ist vor allem durch die Aufgabe degradierter landwirtschaftlicher Flächen und nachfolgende Sukzession natürlicher Vegetation gekennzeichnet. Neben fernerkundlichen Befliegungen und zugehörigen Feldaufnahmen (Abb. 12) fanden im Rahmen des Monitorings auch wiederholte Habitatkartierungen statt.



Die Region Castro Verde war zum Zeitpunkt der Untersuchung durch vollständiges Brachfallen landwirtschaftlicher Flächen gekennzeichnet. Hierdurch kam es zu vermehrter Verbuschung auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Flächen (Abb. 13). Zudem gehören Teile des Untersuchungsgebietes einem Natura-2000-Vogelschutzgebiet an. Die Analyse eines Ökosystems mit offensichtlich entgegenwirkenden Ökosystemdienstleistungen (z. B. Kohlenstoffspeicherung durch Verbuschung und Förderung von Artenreichtum), zeigt die Komplexität solcher Naturräume.

Im Mittelpunkt der hyperspektralen Fernerkundungsanalyse stand die Kartierung der fortschreitenden Verbuschung als gradueller raum-zeitlicher Prozess. Die differenzierte Beschreibung verschiedener Buschvegetationstypen und Steppengräser, z. B. zur anschließenden Modellierung biotischer Prozesse, stellte insbesondere mit Blick auf die verschiedenen phänologischen Stadien von Trockenvegetation eine besondere Herausforderung dar. Zu diesem Zweck wurden neue Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens auf ihre Genauigkeit und Robustheit zur Beschreibung gradueller spektraler Unterschiede hin untersucht. Die entwickelten Ansätze erlauben die Erstellung quantitativer Karten zum Anteil der Buschvegetation, deren Informationsgehalt klar über herkömmliche, diskrete Landbedeckungsklassifikationen hinausgeht (Abb. 14). Insbesondere die Quantifizierung niedriger Buschanteile ist für verschiedene Fragestellungen und Entscheidungsprozesse, bzw. zur Früherkennung relevant. Die Verfahren zur quantitativen Kartierung sind über die EnMAP-Box frei verfügbar. Die Arbeit mit simulierten EnMAP-Daten hat gezeigt, dass Daten der



Abb. 13: Landschaft mit fortschreitender Verbuschung nach Landaufgabe.

räumlichen und spektralen Auflösung von EnMAP einen relevanten Beitrag im Hinblick auf quantitative ökologische Untersuchungen zu Vegetationsbedeckung in subhumiden bis ariden Gebieten liefern können.

#### EnMAP & ÖKOSYSTEMVERÄNDERUNGEN

Übergänge zwischen Ökosystemen bzw. graduelle Veränderungen innerhalb von Ökosystemen sind oft wenig erforscht, und eine umfassende Beschreibung dieses Wandels in Raum und Zeit war bisher schwierig. EnMAP wird hier grundlegende, innovative Analysen ermöglichen und zu einem besseren Verständnis des globalen Wandels und der Mensch-Umwelt-Interaktion beitragen.

Die Erfassung von Ökosystemdienstleistungen mit kombinierten quantitativen Ansätzen ist ein wichtiger Schwerpunkt der EnMAP-Forschung.

Die Analysen simulierter EnMAP-Daten zeigen, welche einem Ökosystemwandel zu Grunde liegenden Prozesse zukünftig besser beschrieben werden können.

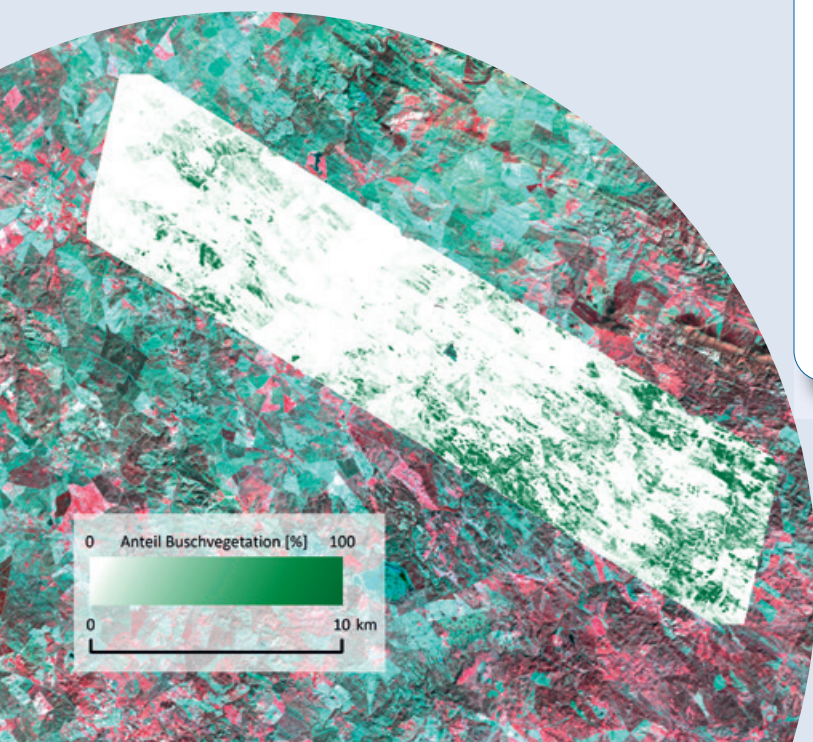


Abb. 14: Karte zum Bedeckungsgrad ausgewählter Buschvegetationstypen basierend auf Support Vector Machine-Analyse simulierter EnMAP-Daten der Region Castro Verde, Portugal. Falschfarbendarstellung eines Landsat-5 TM Satellitenbild im Hintergrund.



# EnMAP als moderner Bodenkundler

## BÖDEN UND DEGRADATIONSPROZESSE WELTWEIT ANALYSIEREN

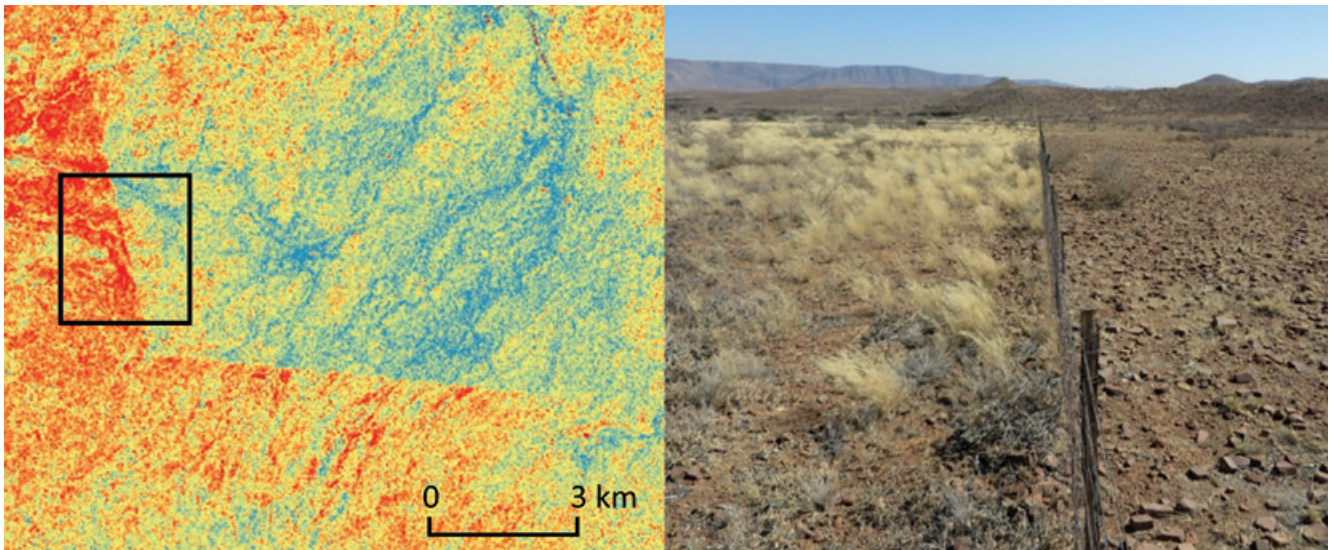


Abb. 15: Folgen der Überweidung (rechts des Zaunes) in Tsauchab Valley (Naukluft, Namibia), zu sehen in der Änderungskarte basierend auf Satellitenbildern (1984-2015) mit 30 m Pixelgröße (links) und vor Ort im Oktober 2014 (rechts).

Der Boden ist eine, auf die menschliche Lebenszeit gesehen, nicht erneuerbare Ressource, die es wegen ihrer vielfältigen und wichtigen Funktionen zu schützen gilt. Er dient unter anderem der Lebensmittelproduktion, der Regulierung des Wasserhaushaltes, der Schadstofffilterung und der Kohlenstoffspeicherung. Diese vielfältigen Ökosystemdienstleistungen des Bodens werden weltweit durch den Klimawandel, Naturgefahren und menschliche Aktivitäten bedroht. Infolgedessen kommt es einerseits vermehrt zu Bodenverlagerungen durch Wind- und Wassererosion oder Hangrutschungen und andererseits zu einer Verminderung der Bodenqualität durch Abbau organischer Substanz, Kontaminationen, Versalzung oder Verdichtung. Angesichts der herausragenden Bedeutung des Bodens wurde 2006 durch die Europäische Kommission eine Richtlinie für den Schutz und Erhalt der europäischen Böden erarbeitet. Diese hat die nachhaltige Nutzung des Bodens, den Erhalt der Bodenqualität und dessen Funktionen sowie die Wiederherstellung von Böden zum Ziel.

Eine wesentliche Ursache der weltweiten Bodendegradation liegt in der oftmals unangepassten Landnutzung. Diese führt durch Abholzung oder Überweidung (Abb. 15) zum Verlust der Vegetationsdecke bzw. durch nicht geeignete Landnutzung (Anbau von Monokulturen oder mangelhafte Bewässerungssysteme) zu Oberflächenabtrag (Abb. 16) und Auslaugung der Böden bis hin zur Verlandung von Flüssen und Stauseen. Dies trifft insbesondere für die Trockenregionen der Erde zu, in

denen bereits 70% der Landoberfläche von Degradationserrscheinungen betroffen sind. Besonders problematisch ist die Bodendegradation, wenn sie langsam voranschreitet und erst in einem späten Stadium erkannt wird. Voraussetzung für ihre Bekämpfung ist die genaue Kenntnis über das Ausmaß potenziell gefährdeter Gebiete sowie über deren zeitliche Entwicklung, um entsprechende Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Die Notwendigkeit der Beobachtung, Analyse und Bewertung weltweiter Bodendegradationsprozesse wird besonders deutlich durch die Konvention der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Desertifikation (UNCCD) herausgestellt, die von annähernd 200 Staaten unterzeichnet wurde.

Über die Erfassung von Degradationsprozessen hinaus gibt es weltweit einen großen Bedarf an einer systematischen, flächendeckenden Bodenkartierung, welche relevante Eigenschaften des Oberbodens in hoher räumlicher Auflösung und Genauigkeit abbildet. Bisher beruhen solche Bodenkarten zumeist auf punkthaft im Gelände erhobenen Daten. Diese Kartierungen werden für vielfältige Anwendungen wie die Landwirtschaft, die Entwicklung von Bodenschutzstrategien oder als Grundlagen für Klimamodelle benötigt.

EnMAP eröffnet gegenüber herkömmlichen Satellitensystemen neue Möglichkeiten zur quantitativen räumlich verteilten Erhebung von Schlüsselparametern, die weltweit der Charakterisierung des Bodenzustandes und zur Ableitung





Abb. 16: Bodendegradation und Erosion auf landwirtschaftlichen Flächen in Camarena bei Madrid, Spanien.

von Degradationsindikatoren dienen. Durch ein regelmäßiges Monitoring können so auch frühe Degradationsstadien erfasst werden, wodurch wiederum rechtzeitig geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Wichtige durch EnMAP ableitbare Parameter umfassen zum Beispiel den Anteil von Vegetation und offenem Boden, den Wasser- und Pigmentgehalt der Pflanzen, den Gehalt von organischer Substanz, Ton, Karbonaten und Salz im Oberboden sowie die Bodenfeuchte (Abb. 17), die bisher aus dem All nicht mit der gleichen Güte messbar waren, die nun von EnMAP erwartet wird. Besonders in Trockengebieten besteht die Vegetationsbedeckung neben grünen Pflanzenbestandteilen auch aus einem hohen nicht-grünen, verdorrten Anteil. Dieser für den Erosionsschutz sehr bedeutsame Anteil kann nicht mit herkömmlichen Multispektralsatelliten, aber mit einem abbildenden Spektrometer wie EnMAP erfasst und quantifiziert werden.

Ein Schwerpunkt in der EnMAP-Forschung am GFZ in Potsdam liegt in der Entwicklung von Methoden zur Detektion und Charakterisierung von Bodeneigenschaften sowie in der Erhebung und Analyse raum-zeitlicher Veränderungen von Vegetations- und Bodenmustern für die Erosions- und Bodendegradationsmodellierung. Dazu wurde ein Algorithmenpaket für die EnMAP-Box zur quantitativen Ableitung erosionsrelevanter Bodenparameter entwickelt (EnSoMAP, EnMAP soil mapper). Die Untersuchungen finden in verschiedenen Klimazonen der Erde mit Testgebieten in Südafrika, Australien, Spanien und Deutschland statt, die wegen ihrer Repräsentativität für die beobachteten Prozesse ausgewählt wurden.

### ENMAP & BÖDEN

EnMAP wird eine wiederholte, quantitativ-diagnostische Ableitung wichtiger Bodenparameter ermöglichen.

Damit wird EnMAP einen entscheidenden Beitrag zur weltweiten Erstellung von Bodenkarten leisten.

Mit EnMAP wird zunehmende Bodendegradation großflächig in einem frühen Stadium erkannt werden. Das ermöglicht, rechtzeitig Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

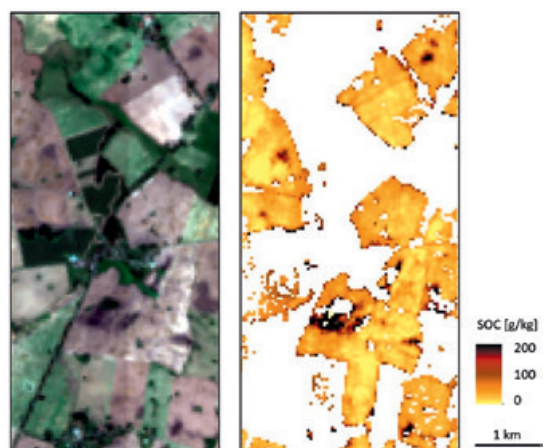


Abb. 17: Kartierung des organischen Kohlenstoffgehaltes im Oberboden mit EnSoMAP und simulierten EnMAP-Daten im Untersuchungsgebiet Demmin in Nordost-Deutschland.

# EnMAP als versierter Lagerstättengeologe

## GEORESSOURCEN DETEKTIEREN UND NACHHALTIG NUTZEN



Abb. 18: Nickel-Lateritmine nahe Agios Ioannis, Griechenland.

Der starke Anstieg der Rohstoffpreise auf dem Weltmarkt, getrieben durch Bevölkerungswachstum und Konsum, rückt viele ehemals nicht abbauwürdige Lagerstätten in den Fokus der Industrie. Dies betrifft vorrangig die Erze metallischer Rohstoffe, die Energierohstoffe (Erdöl, Erdgas und Kohle) sowie Salze und Industrierohstoffe. Dabei wird zunehmend auf eine umweltverträgliche und nachhaltige Nutzung geologischer Ressourcen geachtet, was die Geowissenschaften vor neue wissenschaftlich-technologische Herausforderungen stellt. Hierbei ist es besonders wichtig, eine Minimierung des Flächenverbrauchs durch den Bergbau zu betreiben (Abb. 18), um die benötigten Rohstoffe umweltschonend und kostengünstig zu fördern. Insbesondere hier leisten innovative Methoden der Fernerkundung, vor allem die abbildende Spektroskopie, signifikante Beiträge zur mineralogisch/geologischen Kartierung für die Erkundung, Erschließung und Bewirtschaftung von Lagerstätten im globalen Kontext.

Ein einzigartiger Vorteil bei der Charakterisierung von Mineralen in Gesteinen und z. T. auch in Böden begründet sich auf deren charakteristischen Absorptionsbanden, dem „spektralen Fingerabdruck“, die weder mit bloßem Auge, noch mit bisheriger Satellitentechnik erfasst werden können (Abb. 19). Diese Absorptionsbanden sind nur durch eine detaillierte spektroskopische Aufzeichnungstechnik eindeutig identifizierbar und je nach Oberflächenausbildung auch quantifizierbar. Hierzu wird mit dem abbildenden Spektrometer EnMAP eine technische Innovation realisiert, die mit einer Vielzahl schmalbandiger Kanäle

die zuvor genannten Spektralcharakteristika aufzeichnen kann. Dabei sind alle Systemparameter so ausgelegt worden, dass die charakteristischen Absorptions- und Reflexionsbanden der am häufigsten an der Erdoberfläche vorkommenden Minerale detektiert werden können. Diese umfassen neben Oxiden und Hydroxiden, Phyllosilikaten, Sulfaten und Karbonaten auch die wirtschaftlich besonders relevanten Seltenen Erden.

Die Position und Form der Absorptionsbanden im Spektrum identifizieren das Mineral, wobei die Tiefe der entsprechenden Banden mit dem Flächenanteil des jeweiligen Materials korreliert ist. Dieser physikalische Zusammenhang erlaubt neue Analyseansätze, die mit Multispektraldaten bislang nicht möglich sind (Abb. 20). So können mit Hilfe von Algorithmen durch spektral-analytische Vergleiche mit Datenbanken die unterschiedlichen Minerale und Materialien bis in den Subpixelbereich identifiziert, prozentual getrennt und auch quantifiziert werden. Durch ein solches „Spektrallabor“ im Weltraum ergibt sich ein breites Anwendungsfeld, das weit über die derzeit gehandhabte, klassisch-qualitative Klassifizierung von Gesteinen und Böden hinausreicht und weitaus detailliertere, diagnostische Aussagen auch zu Oberflächenprozessen ermöglicht.

In diesem Rahmen war es eine der Aufgaben des GFZ, ein innovatives Expertensystem (EnGeoMAP) als Teil der EnMAP-Box zur automatischen Identifizierung von Mineralen in Gesteinen und Böden zu entwickeln. In der Vorbereitung der

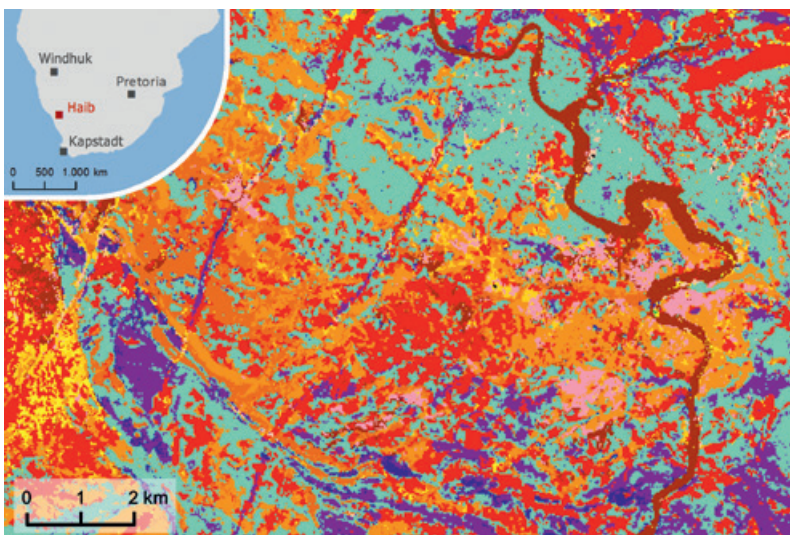




Abb. 19: Spektroskopische Messung von Malachit (Kupfercarbonat, grünes Gestein) am Haib River, Namibia.

Mission wurden dazu EnMAP-Szenen simuliert, um die Übertragbarkeit und Robustheit des EnGeoMAP-Programmpaketes während der Entwicklung zu testen. Zudem werden Konzepte und zugehörige Software entwickelt, die neben der generellen Gesteinskartierung und Mineralexploration auch auf die Charakterisierung von Abraummaterialien und Prozesse der Renaturierung optimiert sind.

Der Eingriff in das Landschaftsbild und die Ökosysteme durch den Abbau von Rohstoffen und deren industrielle Weiterverarbeitung hat weltweit ein erhebliches Ausmaß erreicht. Besonders im Bereich des Abbaus von metallischen Ressourcen und den damit verbundenen Haldenflächen und Tagebauen haben jene Veränderungen der Landschaft einen erheblichen Einfluss auf die umgebende Natur und Biodiversität, die auch als Folgekosten in modernen Bergbauoperationen berücksichtigt werden (Abb. 19). Hierbei stellt eine Verringerung des Flächenverbrauchs durch eine Effizienzsteigerung im Bergbau auch eine direkte Kostenersparnis dar: Es muss nicht mehr Material als nötig bewegt werden.



## ENMAP & GEOLOGIE

EnMAP ermöglicht eine einzigartige Ansprache von Mineralen und Gesteinen mittels abbildender Spektroskopie.

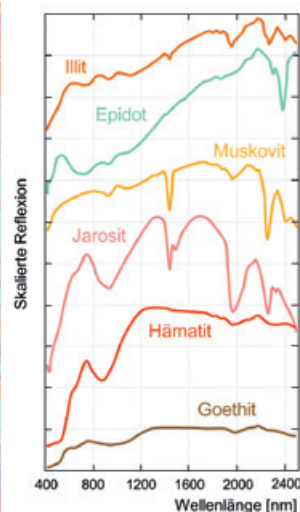
EnMAP liefert signifikante Beiträge zur mineralogisch/geologischen Kartierung und zur Erkundung und Erschließung von Erzlagerstätten.

EnMAP ermöglicht eine weiträumige Beurteilung von Bergbauregionen hinsichtlich ihrer zeitlichen Entwicklung, der Zukunftsperspektiven und der möglichen Sanierungs- und Renaturierungsansätze.

Hierzu wurden im Rahmen der EnMAP-Vorbereitungsphase Wirkungskreisläufe untersucht, die sich über Indikatoren, treibende Faktoren, deren Auswirkungen auf das Ökosystem und deren Folgen identifizieren lassen. So können Bergbauregionen hinsichtlich ihrer zeitlichen Entwicklung, der Zukunftsperspektiven und der möglichen Sanierungsansätze und Renaturierung großräumig beurteilt werden.

Um die gesteckten Ziele zu erreichen, wurden in ausgewählten Bergbauregionen in Namibia, Südafrika und Griechenland gemeinsam mit kooperierenden Wissenschaftlern Probenentnahmen und Untersuchungen vor Ort durchgeführt, durch Laborexperimente ergänzt und mit flugzeuggetragenen Spektralmessungen in Kontext gesetzt. Dieses Vorgehen erlaubte es, einen mehrskaligen und großräumigen zeitlichen Abgleich zur Charakterisierung der Bergbauaktivitäten zu etablieren, der dann im operationellen Einsatz von EnMAP Anwendung findet.

Abb. 20: Mineralkartierung für die Kupfer-Molybdän-Lagerstätte am Haib River, Namibia, erstellt mit EnGeoMAP auf Basis von simulierten EnMAP-Daten.





# EnMAP als vielseitiger Gewässerexperte ...

## VERÄNDERUNGEN IM WATTENMEER AUFDECKEN



Abb. 21: Satellitenbild vom Wattenmeer mit geringer spektraler Auflösung (Landsat), und einem Streifen hyperspektraler Flugzeugbefliegungsdaten (AISA). Diese Abbildung zeigt exemplarisch die unterschiedliche räumliche Abdeckung lokaler Flugzeugdaten und regionaler Satellitendaten wie beispielsweise EnMAP-Daten, die weiträumige, die weiträumige Landschaften wie das Wattenmeer erfassen können.

Die räumliche Ausdehnung des Wattenmeeres, seine dynamischen Veränderungen durch Strömung und Gezeitengang und die damit verbundene Unzugänglichkeit des Gebietes, machen die Fernerkundung zu einem wichtigen Instrumentarium zur Beobachtung und Beurteilung dieses sensiblen und einzigartigen Naturraumes.

Die prägenden Elemente des Wattenmeeres sind Priele, offene Wattflächen mit sandigen bis schlickigen Sedimenten, ausgedehnten Muschelfeldern und wieder wachsenden Seegrasbeständen (Abb. 21). Insbesondere für diese meist kontrastarmen Wattflächen, deren Oberflächen keine scharfen Grenzen und Nutzungsunterschiede wie auf dem Land aufweisen, ist es von entscheidender Bedeutung, die vom Watt reflektierte Strahlung in möglichst hoher spektraler Auflösung zu erhalten. Im Rahmen der EnMAP-Nutzungsvorbereitung wurden Geländemessungen zur spektralen Erfassung der unterschiedlichen Wattoberflächen durchgeführt. Hinzu kamen Laboranalysen der Sedimente zur Berechnung von Kenngrößen wie beispielsweise dem Chlorophyllgehalt. Flugzeugbefliegungen mit einem hyperspektralen Scanner (AISA) lieferten die entsprechenden Fernerkundungsdaten (Abb. 22). Das Potenzial eines hyperspektralen Fernerkundungssatelliten wie EnMAP

zeigt sich hier deutlich in der verbesserten Trennbarkeit der verschiedenen Oberflächen und der Möglichkeit des Einsatzes von schmalbandigen Indizes und Algorithmen. Die Berechnung von Parametern wie der Intensität der Besiedlung durch Mikroalgen (Phytobenthos-Index) und des Chlorophyllgehaltes liefert dabei wichtige Informationen über die Primärproduktion (Produktion von Biomasse) der Wattflächen.

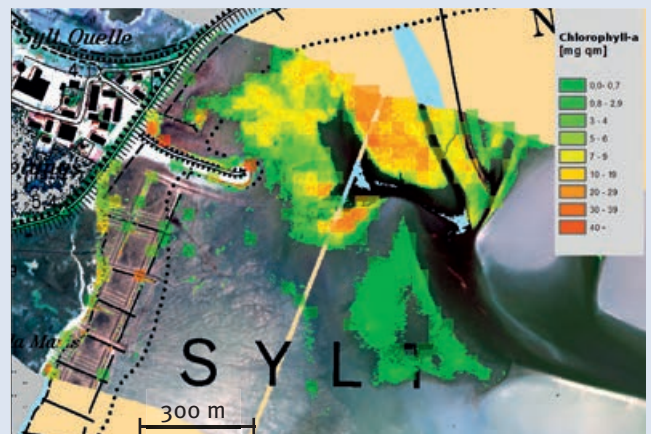


Abb. 22: Chlorophyllkarte ermittelt aus einer hyperspektralen Flugzeugbefliegung mit dem AISA-Sensor. Die größere räumliche Auflösung von EnMAP ist durch die halbtransparente Überlagerung mit EnMAP-Pixeln angedeutet.



## ... und zuverlässiger Küstenforscher

DIE SCHWER ZUGÄNLICHEN ARKTISCHEN KÜSTENREGIONEN ERFORSCHEN

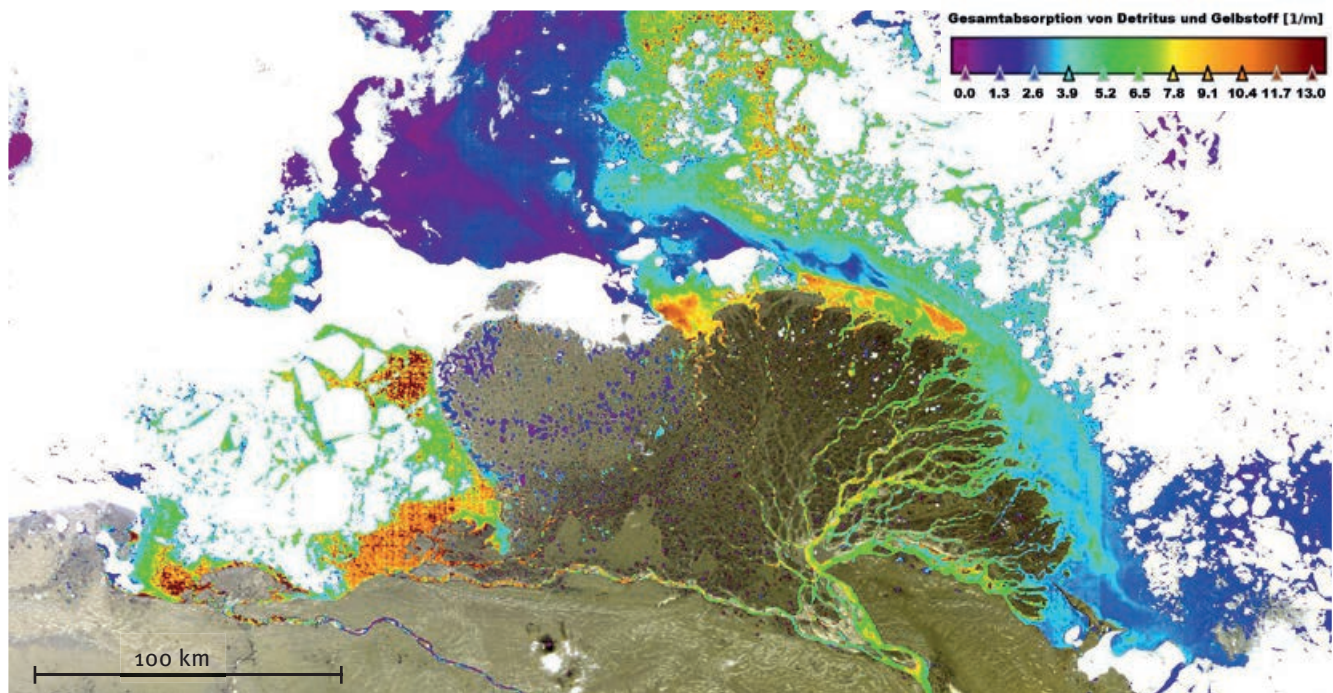


Abb. 23: Satellitenbild vom Lena-Delta, Ostsibirien, aufgenommen am 04.07.2011 mit dem MERIS-Sensor. EnMAP-Daten werden eine weitaus feinere spektrale als auch räumliche Auflösung haben.

Das Auftauen des Permafrostbodens und das fortschreitende Schmelzen des Meereises als Folge der globalen Erwärmung sind in die weltweite Aufmerksamkeit gerückt. Der Auftauprozess führt zu einem stark ansteigenden Zufluss von stoffreichem Süßwasser und zu einer erheblichen Erosion der weichen Küsten besonders im östlichen Sibirien. Nur wenig ist über den Zustand und die Verteilung des Permafrostbodens und dessen Erosion in den fein strukturierten küstennahen Gewässern bekannt.

Das Satellitenbild in Abb. 23 zeigt eine extrem hohe Konzentration von Huminstoffen (hochmolekulare Stoffe des Humusbodens) im Lena-Delta (Ostsibirien), deren Absorptionswerte bis über  $8 \text{ m}^{-1}$  erreichen können, was in diesen Gewässern einer Sichttiefe von weniger als  $0,5 \text{ m}$  entspricht. Die Lena transportiert damit eine sehr große Menge an Kohlenstoff in das arktische Meer, hier in die flache Laptev See, und ist somit eine riesige Kohlenstoffquelle. Auch im Küstenwasser (im Bild z.T. unter dem Eis) sind die Huminstoffkonzentrationen immer noch sehr hoch mit Werten um  $3\text{-}6 \text{ m}^{-1}$ . Der Vergleich mit in-situ Messungen, die am gleichen Tag vorgenommen wurden, zeigt eine gute Übereinstimmung mit Abweichungen von weniger als 10%. EnMAP wird in der Lage sein, derartige Untersuchungen mit einer

wesentlich verbesserten räumlichen und spektralen Auflösung durchzuführen und damit die Entwicklung an feinstrukturierten und optisch komplexen Küsten exemplarisch zu untersuchen.

### ENMAP & GEWÄSSER

EnMAP wird mit seiner hohen räumlichen Auflösung umfassende Informationen zur Wasserqualität von Inlands- und Küstengewässern liefern, die detaillierte Einblicke in die lokalen Ökosysteme geben.

Die hohe spektrale Auflösung von EnMAP wird es ermöglichen, Wasserinhaltsstoffe wie Schwebstoff, gelöstes organisches Material sowie Phytoplankton und dominante Arten zu bestimmen.

EnMAP-Daten werden helfen, die regionale und globale Rolle von Küsten- und Inlandsgewässern im Kohlenstoffkreislauf besser zu verstehen.

# EnMAP als weitsichtiger Stadtplaner

## DIE BESCHAFFENHEIT VON STADTGEBIETEN ABLEITEN

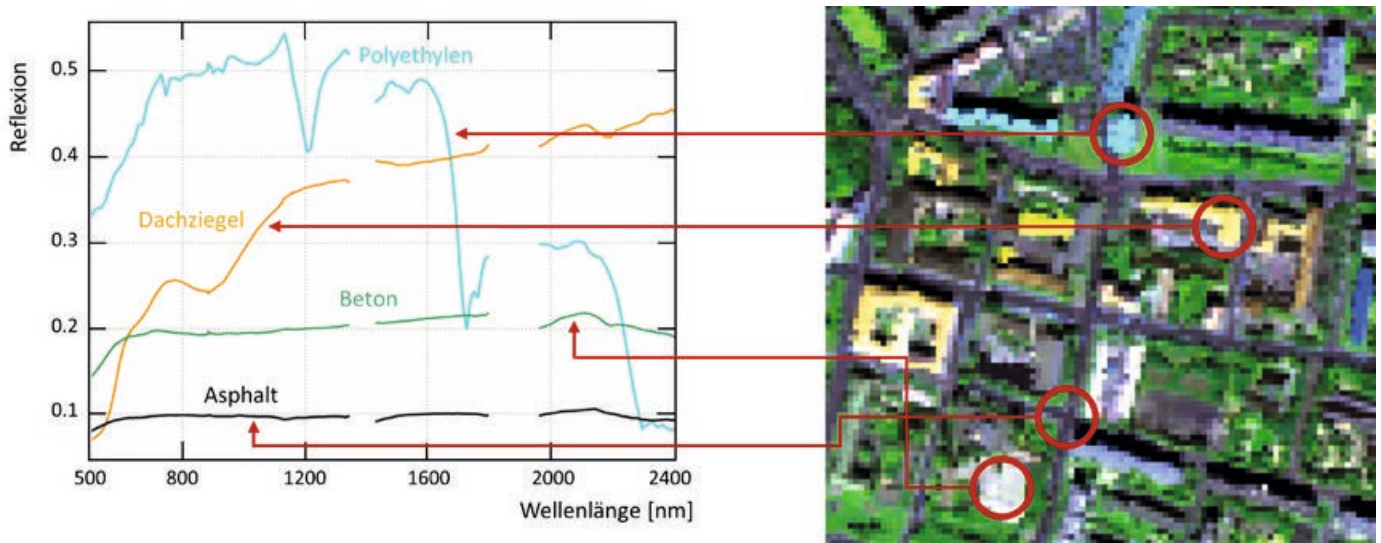


Abb. 24: Städtische Oberflächenmaterialien können anhand ihres materialspezifischen spektralen Reflexionssignals identifiziert werden.

Besonders rasche und oftmals drastische Wandlungsprozesse spielen sich weltweit in urbanen Ballungszentren ab. Schon heute lebt mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten, und der globale Trend der Urbanisierung schreitet mit zunehmender Dynamik voran. Diese Entwicklung bringt zahlreiche Folgeerscheinungen mit sich, die gewaltige Anforderungen an das Management von Stadtregionen stellen. Zu den drängenden Problemen zählen u.a. anhaltendes Flächenwachstum, hohes Verkehrsaufkommen und stadtklimatologische Belastungen. Auch die Anfälligkeit von Städten gegenüber Naturgefahren wie z.B. Unwetter oder Überschwemmungen stellt besondere Herausforderungen an die Planung.

Diese Probleme wirken sich besonders stark in Megacities aus. Es ist daher notwendig, trotz Bevölkerungszuwachs und stetiger Raumknappheit, den Spagat zwischen ökologisch durchdachter, ökonomisch erfolgreicher und sozial verträglicher Entwicklung zu gewährleisten und zugleich den Charakter der Stadt und ihres Umlands dauerhaft zu wahren.

Kernelement einer solchen nachhaltigen Siedlungsentwicklung ist ein profundes Wissen über die Abläufe in bzw. die Wechselwirkungen zwischen natürlicher, bebauter und sozio-ökonomischer Umwelt. Zentraler Baustein für den Aufbau dieses Wissens ist wiederum eine umfangreiche Basis an aktuellen Geoinformationen zum Status der räumlich-zeitlichen Entwicklung des Siedlungsraums sowie der ihn umgebenden Natur- und Kulturlandschaft. Hier kann die Erdbeobachtung mit dem abbildenden Spektrometer EnMAP einen wertvollen Beitrag leisten. Die kontinuierliche Beobachtung der Erdoberfläche

aus dem All verschafft uns einen einmaligen und stets aktuellen Überblick über das räumliche Gefüge und die Entwicklung des Siedlungs- und Kulturrums. Aufgrund seines hohen spektralen Informationsgehalts können darüber hinaus detaillierte qualitative und quantitative Informationen zur Beschaffenheit und Verteilung der städtischen Oberflächen und deren Auswirkungen auf das lokale Klima abgeleitet werden.

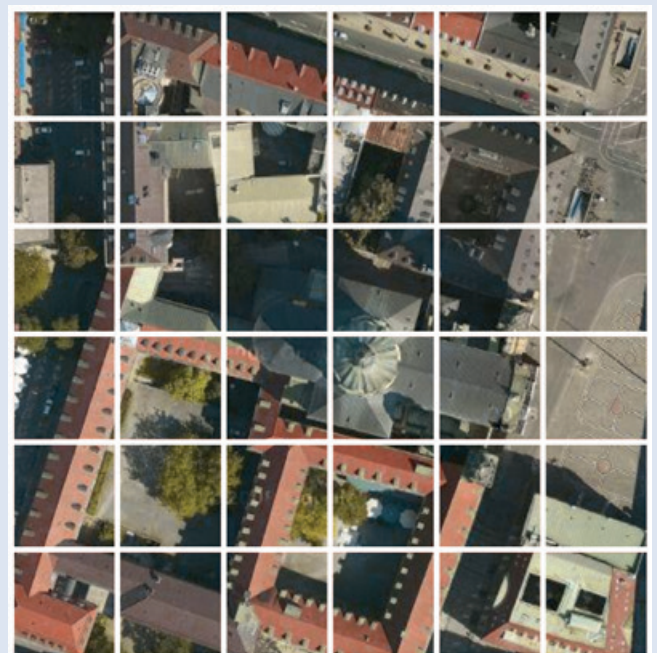


Abb. 25: Die Bodenauflösung des EnMAP-Sensors beträgt 30 m. Damit enthält ein EnMAP-Pixel Informationen zu mehreren städtischen Oberflächenmaterialien, die mit dem Verfahren des spektralen Entmischens quantifiziert werden können.



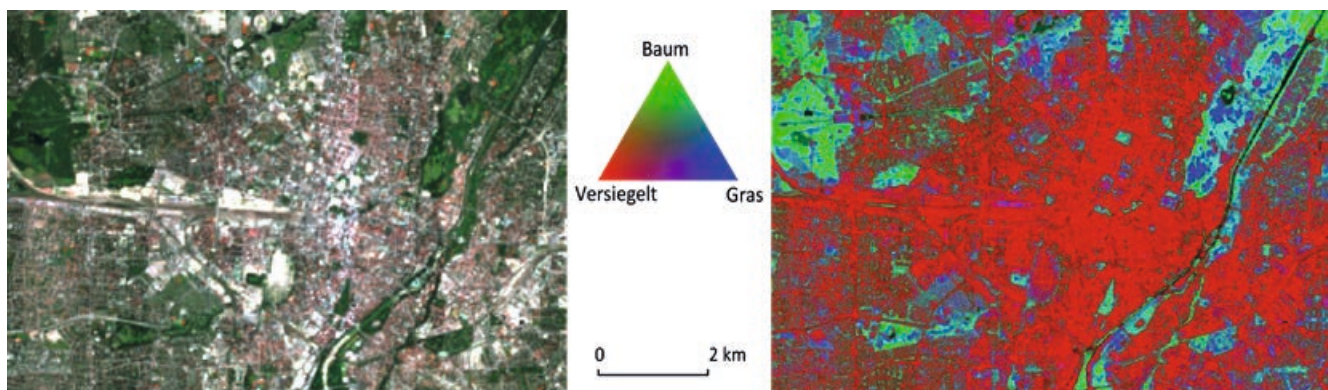


Abb. 26: Simulierte EnMAP-Daten der Stadt München, dargestellt als (links) Echtfarbenbild und (rechts) abgeleitete prozentuale Anteile an versiegelten Oberflächen (rot), Bäumen (grün) und Gras (blau).

In Städten findet sich eine Vielzahl an natürlichen und künstlichen Oberflächen mit unterschiedlichen stadtplanerisch relevanten Eigenschaften. Besonders vielfältig sind Dachmaterialien, deren Art und Anordnung Rückschlüsse auf die städtische Struktur erlauben. Freiflächenmaterialien variieren im Hinblick auf ihre Versiegelungseigenschaften. Asphalt- und Betonflächen beispielsweise gelten aus stadtplanerischer Sicht als vollversiegelt, da Regenwasser oder auch umweltbelastende Flüssigkeiten fast vollständig in die Kanalisation abfließen. Dagegen kann über teilversiegelte Oberflächen Regenwasser zum Teil vom Boden aufgenommen werden. Vegetationsbestandene städtische Oberflächen haben vielfältige positive Auswirkungen auf die klimatische Situation in der Stadt und damit auf unsere Lebensqualität.

Das Wissen um die Art und Verteilung der Oberflächenmaterialien in Siedlungen ist daher äußerst wichtig für die Planung und Entwicklung von Stadtgebieten. Sie können mit abbildenden Spektrometern wie EnMAP erfasst werden. Studien mit flugzeuggetragenen hyperspektralen Sensoren haben gezeigt, dass jedes Oberflächenmaterial über ein charakteristisches spektrales Reflexionssignal verfügt, welches in ausreichendem Detailgrad nur mit abbildenden Spektrometern gemessen werden kann (Abb. 24). Auch umweltbedenkliche Werkstoffe wie Asbest oder besondere Komponenten wie Solarpaneele lassen sich identifizieren. Multispektrale Systeme mit ihren wenigen Kanälen sind dagegen für die Erfassung städtischer Oberflächen auf Materialniveau nicht geeignet. Die Herausforderung bei der Nutzung von EnMAP-Daten zur Materialidentifizierung liegt in der Größe der Pixel, mit der EnMAP die Erdoberfläche abtastet. In Abb. 28 wird deutlich, dass in einem EnMAP-Pixel

spektrale Informationen von mehreren Oberflächen enthalten sind. Aus den sogenannten spektralen Mischungen lassen sich aufgrund des hohen spektralen Informationsgehalts von EnMAP die Informationen zur Zusammensetzung von versiegelten Oberflächen und Vegetation sehr gut rekonstruieren. Zum Beispiel lässt sich der prozentuale Anteil der Einzelflächen mit dem Verfahren der spektralen Entmischung ermitteln (Abb. 25).

Die gewonnene Information über städtischen Oberflächenmaterialien auf Subpixelniveau ermöglicht die Ableitung von stadtplanerisch relevanten Indikatoren. Die Quantifizierung des Versiegelungsgrades ist eine essentielle Information bei der Beobachtung der Entwicklung von städtischen Gebieten, insbesondere von Megacities, die sich in den letzten Jahren rasant erweitert haben. Mit Hilfe von EnMAP-Daten können solche Informationen automatisiert quantifiziert werden (Abb. 26).

Detaillierte Informationen zur Lage und Verteilung städtischer Oberflächenmaterialien sind wichtige Eingangsdaten für Stadtklimamodelle. Diese Modelle berücksichtigen u.a. die physikalischen Eigenschaften der Oberflächenmaterialien und können damit die klimatische Wirkung des Stadtgefüges auf den Menschen simulieren. Aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwands für die Kartierung der städtischen Oberflächenmaterialien wurden diese Erkenntnisse bisher jedoch nur selten in stadtplanerische Maßnahmen integriert. Die Ableitung solcher Information stellt eine wichtige Datengrundlage für die aktive Gestaltung der Zukunft unserer Städte und damit auch des Wohlbefindens seiner Bewohner dar.

# EnMAP als Chemielaborant im Weltall

VERSCHMUTZUNGEN DURCH ABFÄLLE, UMWELTGEFÄHRDENDE SCHADSTOFFE UND STÄUBE BEOBACHTEN



Abb. 27: Abraumhalde aus dem Goldbergbau in der Nähe von Klerksdorp, Südafrika

Anthropogene Verschmutzungen werden durch menschliches Tun absichtlich oder durch Unfälle hervorgerufen. Sie können durch Aktivitäten wie die Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen, industrielle Verarbeitung, Landwirtschaft, Stadtentwicklung, Transport und Schifffahrt entstehen. Sie haben das Potenzial, sich auf alle Aspekte der Gesellschaft auszuwirken, einschließlich ihrer Wirtschaft, ihrer Lebensräume, ihrer Gesundheit, ihres Wohlbefindens und der Umwelt.

Diagnostische Daten, die zur Entscheidungsfindung beitragen, sind essentiell für das anthropogene Gefahrenmanagement, sei es als Notfallmaßnahme, zur routinemäßigen Überwachung oder zur Beurteilung potenzieller Risiken. Die abbildende Spektroskopie leistet durch die Bereitstellung einiger dieser wichtigen quantitativen Diagnoseinformationen entscheidende Beiträge. Zahlreiche Fallbeispiele, von der Charakterisierung und Überwachung der Gewinnung nicht erneuerbarer Ressourcen bis hin zur Bereitstellung von Leitlinien für Notfallmaßnahmen, zeigen den Wert der abbildenden Spektroskopie.

Eine der bekanntesten Anwendung der abbildenden Spektroskopie in diesem Bereich ist die mineralogische Erkundung und Überwachung von Lagerstätten. Mineralien sind wertvolle Ressourcen, die in der heutigen Gesellschaft verbreitet Einsatz finden und deren Nachfrage weiter steigen wird. Die Gewinnung und Verarbeitung von Mineralien ist jedoch mit einer Reihe von wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Herausforderungen verbunden (Abb. 27). Daher ist der Nachweis einer verantwortungsvollen Erkundung und Förderung entscheidend für die Erlangung der Betriebsgenehmigung, um die Kontinui-

tät des laufenden Betriebs sicher zu stellen und der erwarteten Expansion gerecht zu werden. In den letzten drei Jahrzehnten hat sich der Einsatz hyperspektraler Bilddaten zur Unterstützung der nachhaltigen Ressourcengewinnung als eine der bedeutendsten Einsatzmöglichkeiten der abbildenden Spektroskopie erwiesen. Das liegt daran, dass diese Technologie in der Lage ist, (1) wichtige mineralogische Informationen zu liefern, die anderweitig nicht erhoben werden können und damit zu einer verbesserten Ressourcencharakterisierung beitragen, wodurch die Umweltbelastung verringert und zu effizienteren und sichereren Abbaupraktiken beigetragen wird; und (2) direkte Umweltinformationen für die Entscheidungsfindung und die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen zu liefern. Abbildung 28 zeigt als Einsatzmöglichkeit die Überwachung von sauren Mienenentwässerungen mittels abbildender Spektroskopie.

Neben der Überwachung von Grubenabfällen wurde die abbildende Spektroskopie auch erfolgreich zur Kartierung anderer anthropogener Gefahren wie umweltgefährdender Stäube und Ölverschmutzungen eingesetzt. Häufig können durch versehentliches Austreten oder menschliches Fehlverhalten große Mengen an möglicherweise gefährlichen Staubablagerungen entstehen. Der Einsatz der abbildenden Spektroskopie für die Ferndetektion und schnelle Ortung der Staubablagerungen stellt daher ein wichtiges Werkzeug für die Einsatzkräfte und die an der Sanierung Beteiligten dar. Dies war während des Angriffs auf das World Trade Center am 11. September 2001 der Fall. Die abbildende Spektroskopie wurde eingesetzt, um die Zusammensetzung und Verteilung potenziell gefährlicher Stäube abzubilden, und so den Reinigungsprozess zu unterstützen.



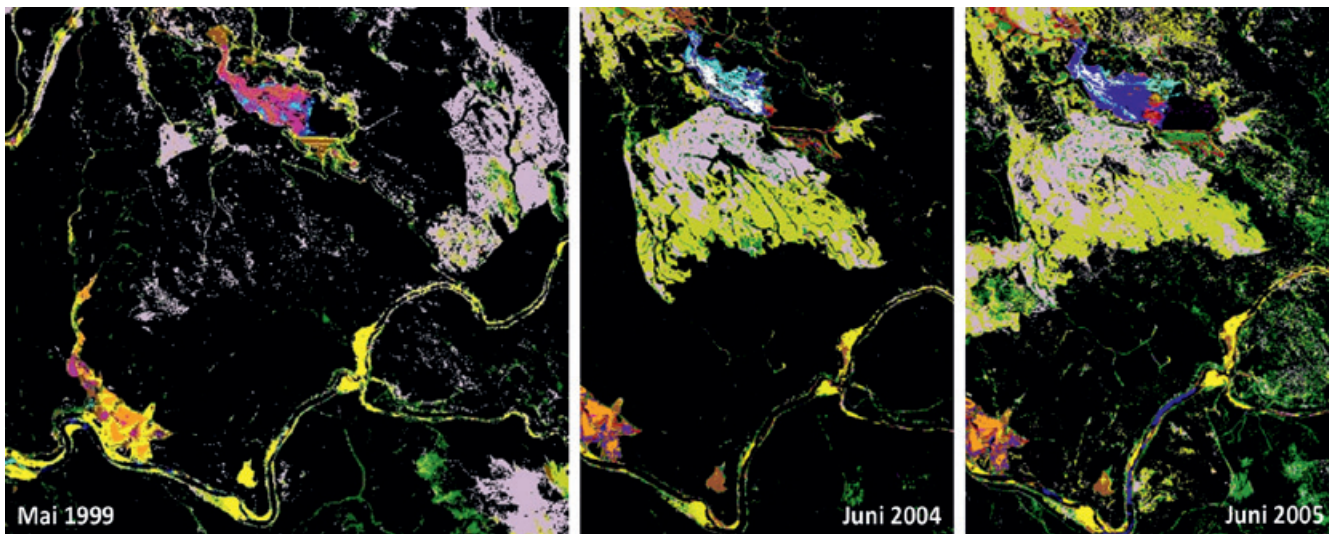


Abb.28: Karten von sekundären Mineralien (Gelb-, Orange-, Rot- und Brauntöne) und Salzen (Blau- und Cyantöne) aus saurer Bergwerksentwässerung, die mit Hilfe von Hyperspektraldaten verschiedener Zeitpunkte in der Lagerstätte Sotil Migollas, Andalusien, Spanien, erstellt wurden. Veränderungen im Absetzteich (Fächerform in der Mitte des Bildes) sind von 1999 bis 2005 durch die Entwicklung von Salzausblühungen zu erkennen, da der Teich im Zuge der Trockenheit in den Jahren 2004 und 2005 ausgetrocknet ist. Die Analyse basiert auf hyperspektralen Bildern, die mit dem HyMap-Sensor mit einer räumlichen Auflösung von 5 m aufgenommen wurden.

Im Fall von versehentlicher oder absichtlicher Ölverschmutzung schwimmt Öl als diskrete Masse auf der Oberfläche von Gewässern und wird von Wind, Strömungen und Gezeiten verteilt. Ölverschmutzungen können nachteilige Auswirkungen auf Mensch, Tierwelt und die natürliche und bebauten Umwelt haben und den Seetransport mit potenziell weitreichenden wirtschaftlichen Auswirkungen beeinträchtigen. Die größte Ölverschmutzung in der Geschichte der USA ereignete sich am 20. April 2010 im Golf von Mexiko, als durch eine Explosion auf der Offshore-Bohranlage Deepwater Horizon (DWH) ~780.000 m<sup>3</sup> Rohöl in den Golf gelangten. Mit Hilfe der Flugzeuggestützten abbildenden Spektroskopie konnte die Verteilung und das Volumen des Ölteppichs auf der Meeresoberfläche abgeschätzt

### ENMAP UND ANTHROPOGENE VERSCHMUTZUNGEN

EnMAP wird bei der Charakterisierung, Überwachung und Sanierung von Gebieten helfen, die von verschiedenen Arten anthropogener Verunreinigungen betroffen sind.

EnMAP wird eine zeitnahe Beurteilung der räumlichen Verteilung von potenziell gefährlichen Stäuben, Ölverschmutzungen, Schadstoffen und Grubenabfällen ermöglichen und somit wertvolle Informationen für Notfallmaßnahmen liefern.

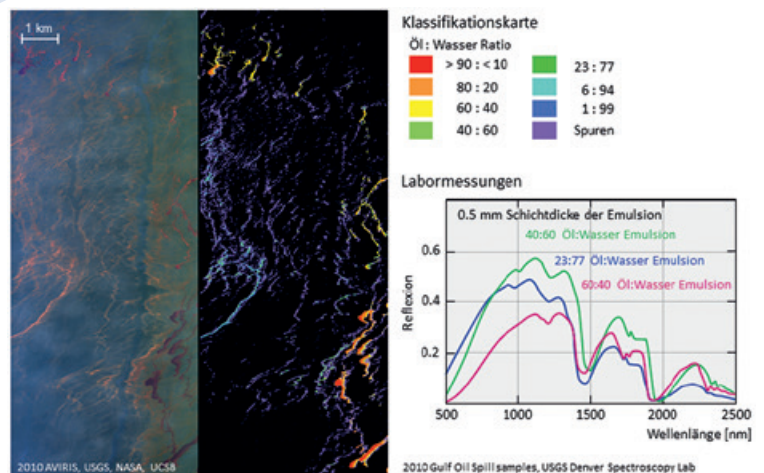


Abb. 29: Karte der Ölverschmutzung im Golf von Mexiko im Jahr 2010 nach einer Explosion auf der Offshore-Bohranlage Deepwater Horizon (links) und spektrale Labormessungen von ölverschmutzten Wasserproben aus dem Golf von Mexiko (rechts).

und so die Erstreinigung unterstützt werden (Abb. 29). Zusätzlich wurden Flugzeuggestützte Hyperspektraldaten verwendet, um den Einfluss des Öls auf das terrestrische Ökosystem zu erfassen. Mit Hilfe von multitemporalen Daten konnte der Fortschritt der Regenerierung der betroffenen Ökosysteme überwacht werden.

# EnMAP sieht die Erde aus verschiedenen Blickwinkeln

## DIE SIGNALVARIANZ MULTITEMPORALER SCHRÄGBLICKBEOBACHTUNGEN

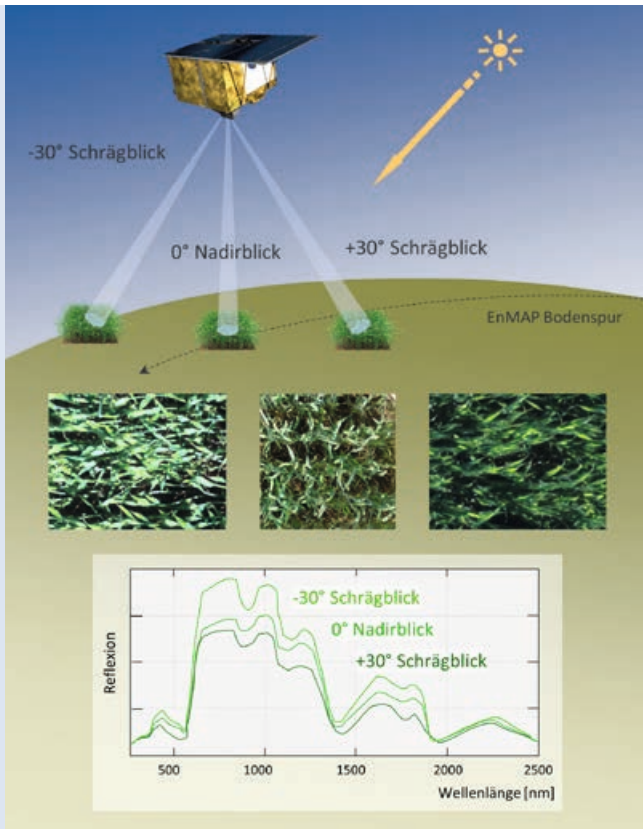


Abb. 30: Schematische Darstellung der Signalvarianz von EnMAP bei verschiedenen Blickwinkeln.

Ein Satellitensystem wie EnMAP ist prinzipiell dazu konzipiert, Prozesse der Landoberfläche global aufzuzeichnen. Aufgrund einer Streifenbreite von 30 km besitzt der Sensor in Nadir-Ausrichtung (Senkrechtlblick) eine Wiederkehrzeit von nur 27 Tagen. Allerdings kann durch seitliches Schwenken des Satelliten um bis zu  $\pm 30^\circ$  jeder Punkt der Erde bis auf die Polregionen innerhalb von auch innerhalb von 4 Tagen wiederholt aufgezeichnet werden. Diese wesentlich höhere Repetitionsrate wird jedoch mit der Einschränkung erkauft, dass das aufgezeichnete spektrale Signal derselben Fläche durch Beobachtung aus unterschiedlichen Richtungen signifikant verändert wird. Besonders betroffen sind Vegetationsflächen, da hier das Verhältnis zwischen Boden- und

Pflanzensignal sowie beschatteten und beleuchteten Flächen besonders stark vom Blickwinkel abhängt (Abb. 30).

Zur Erfassung und Korrektur dieser Effekte wurde am Deutschen GeoForschungsZentrum ein spektrales, räumliches und zeitliches Simulationssystem entwickelt, mit dem das Reflexionsvermögen beliebiger Vegetationsbestände modelliert werden kann. Kern der Simulation sind 4D-(3D-Geometrie+zeitliche Entwicklung) Pflanzenmodelle, deren einzelne Geometrien mit entsprechender spektraler Information überlagert und anschließend mittels Strahlenverfolgung (Raytracing) unter Berücksichtigung jeder möglichen Beobachtungsposition gekoppelt werden (Abb. 31).

Unter Nutzung simulierter Reflexionsdaten wurden die winkelabhängigen Variationen des Reflexionsvermögens von Getreidebeständen untersucht. Darüber hinaus wurde analysiert, inwiefern sich diese Variationen auch auf die quantitative Erfassung biophysikalischer (z. B. Blattflächenindex) und biochemischer (z. B. Chlorophyllgehalt) Vegetationsparameter auswirken. Solche Vegetationsparameter ermöglichen Rückschlüsse über den Zustand und im zeitlichen Verlauf über die Entwicklung des beobachteten Bestands und werden auch für verschiedene Ökosystemmodellierungen genutzt. Die Untersuchungen mittels Maschinellen Lernen ergaben, dass die Vorhersage der Vegetationsparameter für einzelne Winkelbeobachtungen gut möglich ist, selbst bei sehr starkem Schwenken ( $\pm 30^\circ$ ). Die Vorhersagequalität verschlechtert sich allerdings erheblich wenn sich die Beobachtungsgeometrien zwischen Trainings- und Vorhersagedatensatz unterscheiden. Die Einbeziehung aller untersuchten Beobachtungsgeometrien in das Training der Daten ergab wiederum eine gute Vorhersagequalität. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Vorhersage biophysikalischer und biochemischer Vegetationsparameter auch mit Schrägblickbeobachtungen gut möglich ist, aber dass immer alle möglichen bzw. für den Datensatz repräsentativen Beobachtungsgeometrien in die Analyse einbezogen werden müssen.

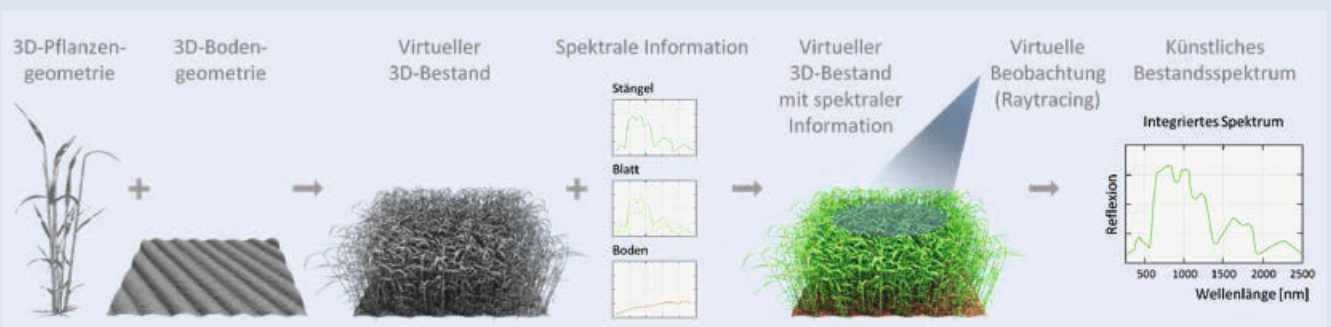


Abb. 31: Darstellung des spektralen, räumlichen und zeitlichen Simulationssystems für ein Wachstumstadium eines Getreidebestands.



# HYPERedu: Grundlagen, Methoden und Anwendungen zu EnMAP-Daten lernen

DAS ONLINE-SCHULUNGSPROGRAMM FÜR DIE HYPERSPEKTRALE FERNERKUNDUNG



Abb. 32: Ausschnitt aus dem Online-Kurs zur hyperspektralen Fernerkundung auf der Lehr-Plattform EO-College

Mit EnMAP und weiteren zukünftigen hyperspektralen Satellitenmission wird in den nächsten Jahren ein zunehmendes Interesse an der Auswertung von Hyperspektraldaten erwartet. Allerdings gibt es bisher nur wenige Schulungsmöglichkeiten und Lehrmaterialien. Um diese Lücke zu füllen, wurde begleitend mit der EnMAP-Satellitenmission das Online-Schulungsprogramm HYPERedu unter der Leitung des GeoForschungsZentrum in Potsdam in Zusammenarbeit mit einer Reihe von Partnerinstitutionen in Deutschland und im Ausland entwickelt.

HYPERedu umfasst Lehrmaterialien und Übungen (basierend auf der Software EnMAP-Box) zu den Grundlagen, Methoden und Anwendungen der Hyperspektralf Fernerkundung. Das Programm richtet sich sowohl an Studierende und Lehrenden an den Universitäten als auch an Fachleute in Forschung, Wirtschaft und öffentlichen Einrichtungen auf der ganzen Welt. Ein erster Kurs zu den Grundlagen der abbildenden Spektroskopie mit dem Titel „Beyond the Visible: Einführung in die hyperspektrale Fernerkundung“ wurde im November 2021 gestartet. Darin werden die Grundlagen der abbildenden Spektroskopie, Sensortech-

nologien und Datenerfassungstechniken sowie Datenquellen und Software mit Hilfe moderner eLearning-Ansätze vermittelt. Der Kurs enthält neben Kurztexten und Videos auch zahlreiche Möglichkeiten zur Aktivität und Interaktion wie z. B. interaktive Grafiken, Quizfragen und Diskussionsforen und kann im eigenen Tempo absolviert werden. Der Grundlagenkurs wird durch weitere kürzere Kurse zu spezifischen Anwendungsbereichen wie der Landwirtschaft, Böden und urbanen Gebieten ergänzt.

Alle Lehrmaterialien und Kurse werden auf der Lehrplattform EO-College gehostet und kostenfrei zur Verfügung gestellt. Mehr Informationen zum HYPERedu-Programm gibt es unter: [www.enmap.org](http://www.enmap.org)

# Die EnMAP-Box: Arbeiten mit EnMAP-Daten leichtgemacht

„FREE AND OPEN SOURCE“ BEARBEITUNG VON ENMAP-DATEN MIT NEUESTEN METHODEN

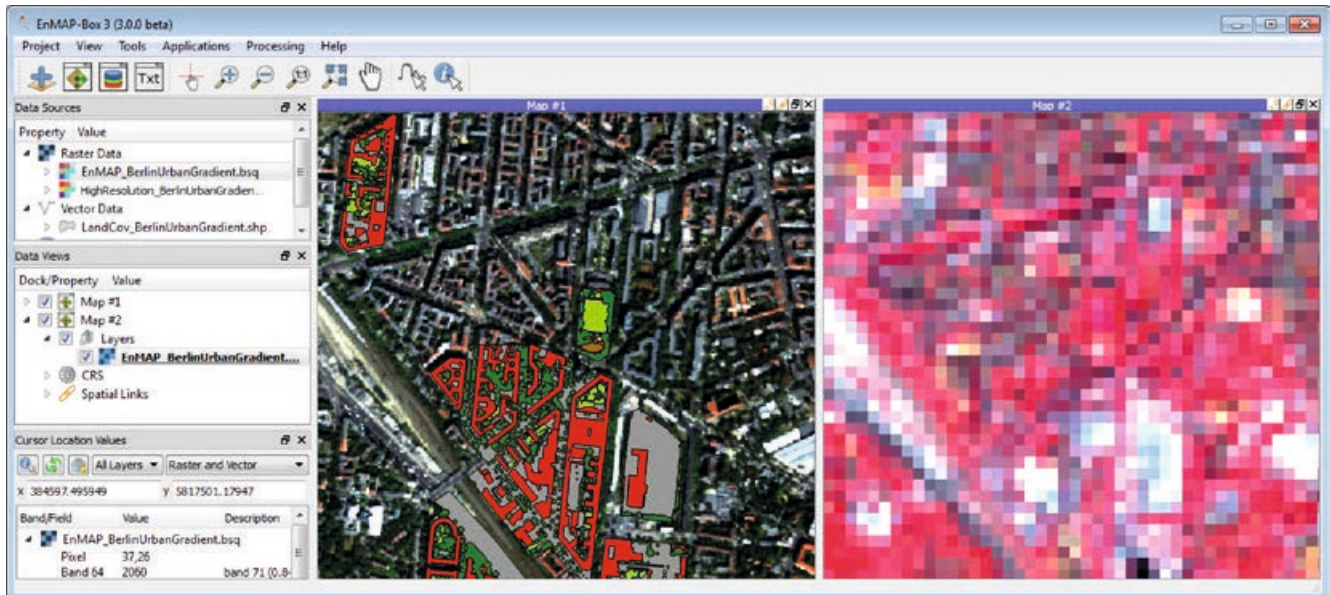


Abb. 33: Vektordatenlayer über Bilddaten aus einer hyperspektralen Befliegung (links) sowie simulierte EnMAP-Daten des gleichen Ausschnitts von Berlin, Deutschland, in der EnMAP-Box Version 3.0.

Die Verfügbarkeit von EnMAP-Daten führt in der Hyperspektralfernerkundung zu einer grundlegenden Verlagerung weg von lokalen Studien mit Befliegungsdaten einzelner Zeitpunkte hin zu mehr operationeller Datenverarbeitung größerer Gebiete und mehrerer Zeitpunkte. Gängige Verfahren der Hyperspektralfernerkundung müssen an dieses Szenario größerer Datenvolumen und höherer zeitlicher Dimensionen ebenso angepasst werden, wie Prozessierungsketten für multispektrale Satellitendaten, in denen die Nutzung des erhöhten spektralen Informationsgehalts sichergestellt werden muss. Gleichzeitig werden die Arbeit mit Spektraldatenbanken aus global verfügbaren EnMAP-Daten oder die Nutzung von Strahlungstransfermodellen häufiger Eingang in angewandte Studien finden. Im Zuge der EnMAP-Nutzungsvorbereitungen wurden vor diesem Hintergrund bereits verschiedene Algorithmen angepasst bzw. erweitert. Die dabei entstandenen Umsetzungen sind gesammelt in einer Toolbox, der so genannten EnMAP-Box, verfügbar.

Die EnMAP-Box beinhaltet Verfahren zum Prozessieren und Analysieren von EnMAP-Daten. So werden für Anwendungsgebiete wie Geologie, Forst- oder Landwirtschaft fortgeschrittene Anwendungen bereitgestellt, die eine effektive Nutzung der Daten gewährleisten. Zudem werden eine Vielzahl von Verfahren des Maschinellen Lernens zur Bildklassifikation und -regression sowie Methoden zur Integration von Spektralbibliotheken bereitgestellt, die in allen Anwendungsgebieten häufig genutzt werden. Die EnMAP-Box wurde für eine Vielzahl von Nutzerinnen und Nutzer unterschiedlicher

Disziplinen und Erfahrungsstufen erstellt und wird beständig weiterentwickelt.

Die EnMAP-Box wird als Plugin für das geographische Informationssystem QGIS bereitgestellt. Die Programmierung erfolgt in Python und nutzt verschiedene etablierte Pakete, z. B. GDAL, NumPy, scikit-learn oder PyQt, und wird mit einem eigenen Application Programming Interface (API) ausgeliefert. Die EnMAP-Box erlaubt die Nutzung einer eigenen grafischen Oberfläche, welche das Beste aus der Welt des GIS und der Hyperspektraldatenverarbeitung zusammenbringen soll. Gleichzeitig sind die meisten in der EnMAP-Box verfügbaren Algorithmen auch direkt über das Geoalgorithm-Framework in QGIS oder den QGIS Model Builder nutzbar.

Als „free and open source“ Software erlaubt die EnMAP-Box eine einfache Nutzung Pythons und der damit verknüpften Ressourcen, so dass sich viele Möglichkeiten für externe Entwicklungen ergeben. Eine Integration zusätzlicher Verfahren, die sich in der Arbeit mit EnMAP-Daten bewährt haben, ist immer erwünscht. Die Rahmenbedingungen für solche externen Entwicklungen werden ständig verbessert und hin zu Standardisierung weiterentwickelt. Somit soll der Austausch von Verfahren stark befördert werden.

Die EnMAP-Box ist zusammen mit Beispieldaten und umfangreicher Dokumentation online verfügbar über: [www.enmap.org](http://www.enmap.org)



## ENMAP SCIENCE ADVISORY GROUP (ENSAG)

### EnMAP Wissenschaftliche Leiterin

**Sabine Chabrilat**

Helmholtz-Zentrum Potsdam –  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Leibniz Universität Hannover (LUH)

### EnMAP Missionsleiter

**Sebastian Fischer**

Deutsche Raumfahrtagentur im DLR in Bonn

### EnMAP Anwendungsleitung

**Anke Schickling**

Deutsche Raumfahrtagentur im DLR in Bonn

## ENSAG VALIDATION WORKING GROUP

**Martin Bachmann** (Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum im DLR; DLR-DFD) / **Rob Green** (Jet Propulsion Laboratory; JPL–NASA) / **Cindy Ong** (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation; CSIRO) / **Jose Moreno** (Uni Valencia) / **Luis Guanter** (Technical University of Valencia) / **Ferran Gascon** (European Space Agency; ESA) / **Raymond Kokaly** (U.S. Geological Survey; USGS - Geology, Geophysics, and Geochemistry Science Center)

## ENSAG APPLICATION WORKING GROUP

**Astrid Bracher** (Alfred-Wegener-Institut – Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung; AWI) / **Vittorio Brando** (Italian National Research Council - Institute of Marine Science; CNR - ISMAR) / **Fabrizia Buongiorno** (National Institute of Geophysics and Volcanology) / **Hannes Feilhauer** (Universität Leipzig) / **Tobias Hank** (LMU München) / **Uta Heiden** (Institut für Methodik der Fernerkundung im DLR; DLR-IMF) / **Patrick Hostert** (Humboldt Universität Berlin) / **Matti Möttus** (VTT Technical Research Centre of Finland; VTT) / **Thomas Painter** (Joint Institute for Regional Earth System Science and Engineering, University of California) / **Martin Schodlok** (Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe; BGR) / **Sebastian van der Linden** (Universität Greifswald)

## IMPRESSUM

### Verleger

EnMAP Konsortium

### Herausgeber

Saskia Förster, Theres Küster, Kathrin Ward, Alison Beamish, Sabine Chabrilat, GFZ Potsdam

### Autoren

Alison Beamish, Katja Berger, Henning Buddenbaum, Sabine Chabrilat, Sam Cooper, Martin Danner, Roland Doerffer, Sandra Dotzler, Saskia Förster, Luis Guanter, Tobias Hank, Uta Heiden, Wieke Heldens, Martin Hieronymi, Joachim Hill, Patrick Hostert, Sibylle Itzerott, Benjamin Jakimow, Marianne Jilge, Hermann Kaufmann, Ulrike Kleeberg, Hajo Krasemann, Theres Küster, Pedro J. Leitão, Sebastian van der Linden, Wolfram Mauser, Christian Mielke, Andreas Müller, Akpona Okujeni, Cindy Ong, Andreas Rabe, Daniel Scheffler, Karl Segl, Karl Staenz, Stefan Suess, Kathrin Ward, Matthias Woche, Hendrik Wulf

### Förderung

Die Grundfinanzierung der Mission erfolgt durch die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz und mit Beiträgen des DLR, der OHB System AG und des GFZ.

### Druck

DLR Druckerei, Bonn

### Bildnachweis

*Titelseite: GFZ, Universität Trier, OHB System AG/DLR*

*Abb. 1-3, 5-7, 15-20, 27, 30-32: GFZ (1 und 15 mit USGS, 30 und 32 mit OHB System AG/DLR)*

*Abb. 4: LMU München, HZG*

*Abb. 8, 9: LMU München*

*Abb. 10, 11: Universität Trier*

*Abb. 12, 13, 14, 26, 33: HU Berlin (Abb. 14 mit USGS)*

*Abb. 21, 22, 23: HZG (Abb. 21 mit USGS, Abb. 23 mit ESA)*

*Abb. 24, 25: DLR, GFZ*

*Abb. 28: CSIRO*

*Abb. 29: GFZ mit USGS, NASA, UCSB*

*Rückseite: OHB System AG/DLR, GFZ*

*Alle EnMAP Abbildungen: OHB System AG/DLR*

[www.enmap.org](http://www.enmap.org)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



