



# FERNERKUNDUNG

DEFINITION, GRUNDLAGEN UND  
ANWENDUNGEN IM NATURSCHUTZ



## **Impressum**

<b>Herausgeber</b>	WWF Deutschland, Reinhardtstraße 18, 10117 Berlin
<b>Stand</b>	September 2020
<b>Fachliche Betreuung</b>	Jonathan Renkel, Universität Würzburg Alfred Schumm, WWF
<b>Autor</b>	Jonathan Renkel, Universität Würzburg
<b>Redaktion</b>	Thomas Köberich
<b>Kontakt</b>	Alfred Schumm, Leiter Innovation, Sciences, Technologies & Solutions WWF Deutschland, alfred.schumm@wwf.de
<b>Layout</b>	Silke Roßbach, mail@silke-rossbach.de
<b>Bildnachweise</b>	Titel: European Space Agency (ESA), S.5. © iStock / Getty Images

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2 Definition</b>	<b>6</b>
2.1 Fernerkundung	6
2.2 Weitere wichtige Begriffe	7
<b>3 Einführung in die Satellitenbild-Fernerkundung</b>	<b>9</b>
3.1 Grundlegende Funktionsweise der Fernerkundung	9
3.2 Fernerkundliche Sensoren	10
3.3 Aktive und passive Sensoren	12
3.3.1 Passive Sensoren	13
3.3.2 Aktive Sensoren	14
3.3.2.1 RADAR	14
3.3.2.2 LIDAR	19
3.4 Interaktionen der Strahlung	19
3.4.1 Interaktion der Strahlung mit der Erdoberfläche	19
3.4.2 Interaktion der Strahlung mit der Atmosphäre	21
3.5 Vegetationsindizes und Parameter aus Fernerkundungsdaten	22
3.5.1 Parameter aus Fernerkundungsdaten zur Analyse der Vegetation	22
<b>4 Plattformen und Sensoren der Fernerkundung</b>	<b>23</b>
4.1 Multispektrale Sensoren	23
4.1.2 Hyperspektrale Sensoren	25
4.2 Aktive Sensoren	25
<b>5 Fernerkundung zur Bewertung der Biodiversität</b>	<b>30</b>
5.1 Fernerkundung für die Kartierung von Habitaten und Ökosystemen	31
5.1.2 Fallbeispiele	34
5.2 Fernerkundung für das Monitoring von Habitaten und Ökosystemen	39
5.3 Bedrohungen für die Biodiversität	43
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>46</b>
Anhang 1	50
Anhang 2	52

# Vorwort



Fernerkundung (Remote-Sensing) ist zentraler Baustein für die Umwelt-erkundung mittels detektierbarer und qualitativ wie quantitativ messbarer primärer Indikatoren. Aus den Daten und deren intelligenter Auswertung können zudem sekundäre Hinweise zum sozialen, ökonomischen und ökologischen Status einer Region bis hin zum Impact einzelner Wirtschaftsbe-triebe gewonnen werden. Letztere sind wiederum hochrelevant für Trend-, Gefährdungs- und Entwicklungsanalysen oder Szenarien-Bildung und Plan-ung. In der vorliegenden Arbeit stellen wir die technischen Grundlagen und Methoden verschiedener Remote-Sensing-Verfahren dar und beschreiben Möglichkeiten und Optionen der Nutzung von fernerkundlichen Werkzeugen für die Umweltanalyse und die Naturschutzarbeit des WWF.

Diese Arbeit kann zudem auch als Grundlage für die weitere Planung der WWF Datenanalyse dienen. Aktuell sammeln wir Erfahrungen mit machine-learning unterstützter Datenanalyse. Demnächst wird aber auch KI und die Mustererkennung für die Analyse sozialer, ökonomischer und ökologischer Implikationen des Wirtschaftens eine Rolle spielen und deren Bezug zu den Planetaren Grenzen. Near-Real-Time Dashboards für die WWF Politik-, Öffentlichkeits- und Unternehmensarbeit sind heute vorstellbar.

Jonathan Renkel, Masterstudent an der Universität Würzburg, der über ein Symposium von Universität und DLR auf den WWF aufmerksam wurde, hat diese umfangreiche Arbeit verfasst und unter den schwierigen Bedingungen des Corona-Lock-Downs sehr erfolgreich abgeschlossen. Ich bin ihm sehr dankbar für die hochwertige Umsetzung.

Vor 20 Jahren war sinnvolles Remote-Sensing oft noch ein Traum, vor 10 Jahren gelang uns dann das Schiffstracking mittels Satelliten und heute haben wir eine noch weitaus bessere globale Satellitenabdeckung und ausgereifte Sensortechnik, sodass nun eine sehr gute Umwelt- und Impact-analyse möglich ist.

Die vorliegende Arbeit soll dabei helfen, zu begreifen wie Fernerkundung funktioniert, damit wir sinnvoll Daten erheben bzw. monitoren können. Was wir monitoren bzw. messen, können wir besser verstehen und was wir verstehen, können wir – wo nötig – dann auch verändern.



Alfred Schumm

Leiter Innovation, Sciences, Technologies & Solutions  
WWF Deutschland

# 1 Einleitung

Die Biodiversität auf unserem Globus befindet sich in einer dramatischer werdenden Krise (WWF Living Planet Report, 2016 & 2018). Die momentanen Aussterberaten von Tieren und Pflanzen liegen 100- bis 1000-mal höher als die natürliche Aussterberate (Hintergrundrate) (Proença & Pereira, 2017). Die Treiber hinter diesen außergewöhnlich hohen Artenverlusten sind der anhaltende Land- und Meeresnutzungswandel, die Exploration von natürlichen Ressourcen (Abholzung, Bergbau ...), der anthropogene Klimawandel, die Umweltverschmutzung und die biologische Invasion fremder Arten. Diesen direkten Treibern liegen anthropogene, indirekte Faktoren wie Produktions- und Konsummuster, Dynamiken und Trends der menschlichen Bevölkerung wie Bevölkerungszuwachs, Lebenserwartung, Bevölkerungspyramiden und wachsende Mittelschicht zugrunde (IPBES, 2019).

Um dieser Entwicklung begegnen zu können und die Natur mit ihren für den Menschen lebenswichtigen Funktionen zu schützen, werden Daten zum Ort und zur Stärke der Veränderungen benötigt. Dabei kann die Fernerkundung (engl. Remote sensing) helfen. Fernerkundung ist die einzig geeignete Methode, um Informationen über die gesamte Erdoberfläche (aller Ökosysteme und Habitats) in unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu ermitteln.

Die Struktur der hier vorliegenden Arbeit gliedert sich wie folgt: Im ersten Abschnitt werden grundlegende Definitionen erläutert (Kap. 2). Diesen folgt eine Einführung in die theoretischen Grundlagen der satellitengestützten aktiven und passiven Fernerkundung (Kap. 3). Kapitel 4 gibt eine Übersicht über die verfügbaren Daten-Plattformen und -Sensoren der Satellitenbild-Fernerkundung. Das fünfte Kapitel befasst sich mit den Potenzialen der Fernerkundung zur Bewertung der Biodiversität auf unterschiedlichen Maßstabsebenen. Abgeschlossen wird die vorliegende Arbeit mit einem Exkurs in die essenziellen Biodiversitätsvariablen.

# 2 Definition


## 2.1 Fernerkundung

Zunächst will sich die vorliegende Arbeit einer Definition des Begriffs Fernerkundung zuwenden. Der hier gewählten Definition liegt daran, Fernerkundung nicht ausschließlich auf die Satellitenbild-Fernerkundung zu reduzieren. Fernerkundung setzt sich aus allen Techniken zusammen, die Daten über ein Objekt oder ein Gebiet sammeln, ohne mit diesem in direktem Kontakt zu stehen. Dabei gibt Abbildung 1 eine Übersicht unterschiedlicher Techniken zur fernerkundlichen Datenakquisition.

**Es soll folgende Definition für den Begriff Fernerkundung verwendet werden:**

*„Fernerkundung gilt als die Bezeichnung für alle Techniken, die Informationen über ein bestimmtes Objekt oder ein Gebiet auf der Erdoberfläche oder im Weltall erheben, ohne in direktem Kontakt mit diesem zu stehen.“*

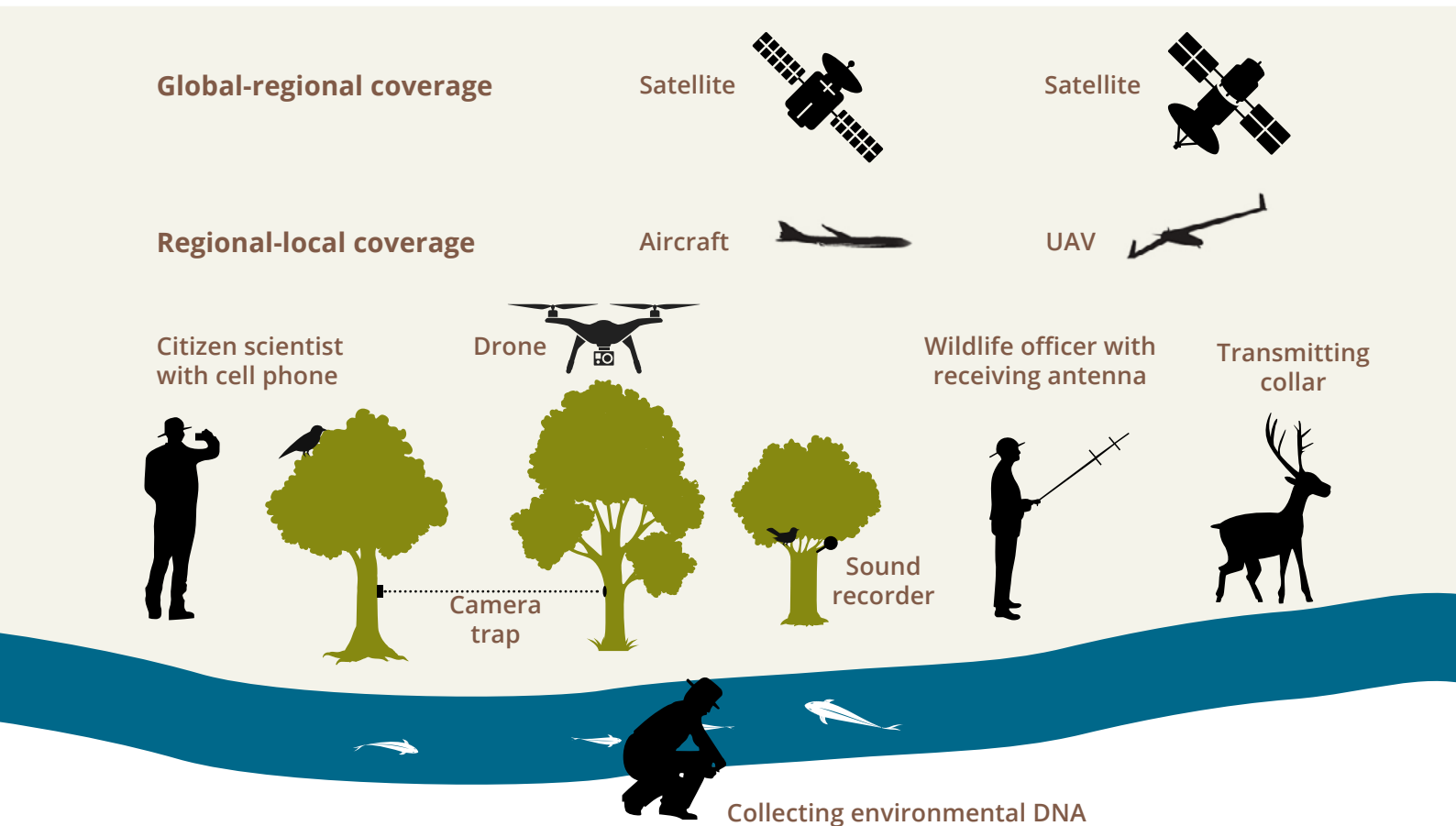
*(Mårtensson, 2011; Dubovyk, 2017)*



*„Man sieht die Strukturen der Landschaft in allen Einzelheiten. Der Horizont ist eine gekrümmte Linie, gesäumt von einer königsblauen dünnen Schicht, die grandios aussieht, sehr ästhetisch. Aber weil diese Schicht sehr dünn ist, wirkt sie auch sehr verletzlich und zerbrechlich.“*

*(Ulf Merbold)*

**Abbildung 1:** Zusammenstellung unterschiedlicher fernerkundlicher Plattformen für die Datenakquisition.



Quelle: Turner, 2014.

Das Hauptaugenmerk dieses Berichts liegt auf der Nutzbarmachung der satelliten- und flugzeuggestützten Fernerkundung im Naturschutz. Sogenannte „In situ Sensoren“ (Abbildung 1; alles unterhalb der Drohne) werden lediglich kurz vorgestellt und den Leser:innen durch die Bereitstellung weiterführender Literatur zugänglich gemacht.

## 2.2 Weitere wichtige Begriffe

In diesem Kapitel werden für das Verständnis des fortlaufenden Textes wichtige Begriffe zusammengefasst und erklärt.

**Tabelle 1:** Definitionen wichtiger Begriffe

Bezeichnung	Definition
<b>Absorption</b>	Lichtenergie, die vom Objekt weder reflektiert noch transmittiert wird.
<b>Hyperspektral</b>	Flugzeug- oder Satellitenbild, die das elektromagnetische (EM) Spektrum fast kontinuierlich abbildet und in der Regel Hunderte Bänder (ausgewählte Abschnitte) beinhaltet.
<b>Multispektral</b>	Flugzeug- oder Satellitenbild, die das EM-Spektrum lediglich in ausgewählten Abschnitten (Bändern) darstellt (4 – 10 Bänder), vor allem in den Wellenlängenabschnitten des sichtbaren, nahen Infrarots und kurzwelligen Infrarots.
<b>Nahes Infrarot (near-infrared; NIR)</b>	Wellenlängenabschnitt des EM-Spektrums, zwischen 0,7 – 1 µm. In diesem Wellenlängenbereich zeigt fotosynthetisch aktive Vegetation hohen Reflexionswert.
<b>Pixel</b>	Kleinste Einheit einer Satelliten-, Flugzeug- oder Drohnenaufnahme und wird als die Länge einer Quadratseite ausgedrückt (z. B. 30 m Pixel = 900 m <sup>2</sup> )
<b>Reflexion</b>	Jener Anteil der solaren Einstrahlung auf ein Objekt, der weder transmittiert noch absorbiert wird. Reflektiertes Licht strahlt von einem Objekt zurück und wird dann von fernerkundlichen Sensoren gemessen.
<b>Kurzwelliges Infrarot (short wavelength infrared; SWIR)</b>	Wellenlängenabschnitt des EM-Spektrums, zwischen 1 – 2,5 µm
<b>Spektral Band (Band)</b>	Diskreter Wellenlängenabschnitt, der von einem Sensor detektiert wird (z. B. MSI-Sensor „gemounted“ auf dem Sentinel-2A-Satelliten, Band/Blau: 459,4 – 525,3 nm)
<b>Sichtbares Licht</b>	Wellenlängenabschnitt des EM-Spektrums, zwischen 0,4 – 0,7. Für das menschliche Auge sichtbarer Teil des EM-Spektrums. Rot-Blau-Grün.
<b>Pansharpening</b>	Fusion des hochaufgelösten panchromatischen Bands (schwarz/weiß) eines Sensors mit den geringer aufgelösten multispektralen Bändern eines Sensors. Ergebnis ist die Kombination der höheren Auflösung und der Farbkombination.

Quelle: Bradley, 2013



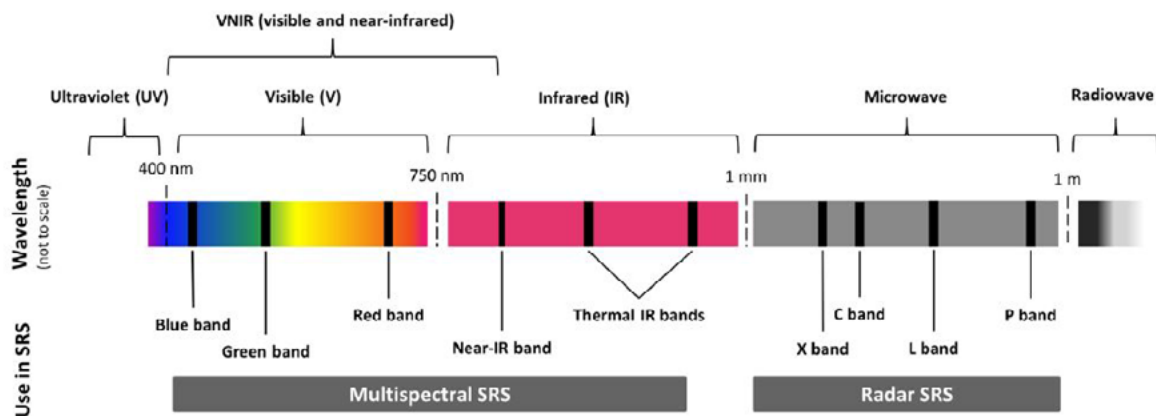
# 3 Einführung in die Satellitenbild-Fernerkundung

Das folgende Kapitel gibt eine theoretische Einführung in die Funktionsweise fernerkundlicher Sensoren.

## 3.1 Grundlegende Funktionsweise der Fernerkundung

Licht setzt sich aus elektromagnetischer (EM) Strahlung jedes Wellenlängenabschnitts zusammen. Dabei wird das EM-Spektrum in Abhängigkeit der Wellenlänge in Radiowellen ( $> 1\text{ m}$ ), Mikrowellen ( $1\text{ m} - 1\text{ mm}$ ), Infrarotstrahlen ( $1\text{ mm} - 750\text{ nm}$ ), Thermalstrahlung ( $3\text{ }\mu\text{m} - 1\text{ mm}$ ), das sichtbare Licht ( $750 - 400\text{ nm}$ ), ultraviolette Strahlung (UV;  $400 - 10\text{ nm}$ ), Röntgenstrahlen (X-rays;  $10 - 0,01\text{ nm}$ ) und Gammastrahlen ( $< 0,01\text{ nm}$ ) klassifiziert. Das EM-Spektrum fasst alle bekannten EM-Wellen zusammen und setzt diese nach ihrer Wellenlänge in Relation zueinander (Abb. 2).

**Abbildung 2:** das elektromagnetische Spektrum (nicht maßstabsgetreu) und die Nutzung der Wellenlängenbereiche in der Satellitenbild-Fernerkundung (SRS).



Quelle: Pettorelli et al., 2018

Die Hauptquelle des Lichts auf der Erde ist die Sonne, die UV-Strahlen, das sichtbare Licht und Infrarotstrahlung, gebündelt als weißes Licht emittiert. Die Fernerkundung nutzt nicht alle Wellenlängenbereiche, sondern nur den Teil des EM-Spektrums zwischen dem sichtbaren Licht und dem mittleren Infrarot und außerdem den Mikrowellenbereich (Albertz, 2007). Es existieren vier unterschiedliche Arten, wie Materialien mit einkommender Strahlung interagieren: **Absorption**, **Reflexion**, **Transmission** und **Streuung**.

Dabei ist **Absorption** definiert als die Transformation von Strahlungsenergie in eine andere Form von Energie, durch die Interaktion der Strahlung mit einem bestimmten Material.

**Reflexion** beschreibt den Prozess, in dem ein Teil der einkommenden Strahlung auf ein bestimmtes Material, von diesem wieder zurückgeworfen wird.

Die **Transmission** kann man in anderen Worten auch als Durchlässigkeit bezeichnen. Dabei findet die einkommende Strahlung, ganz oder teilweise, den Weg durch das gegebene Material.

**Streuung** beschreibt den physikalischen Prozess, bei dem Strahlung an kleinsten Teilchen nach allen Richtungen abgelenkt wird (z. B. Streuung von Strahlung an Aerosolen innerhalb der Atmosphäre) (Pettorelli, 2019).

Für die Aufnahme von Fernerkundungsdaten ist nun entscheidend, dass sich die Geländeoberfläche und die sich darauf befindenden Objekte (z. B. Vegetation, Straßen, Häuser, Gewässer) gegenüber der einfallenden EM-Strahlung sehr unterschiedlich verhalten. Dabei hängen die Reflexionseigenschaften der Objekte vor allem vom jeweiligen Material, dem physikalischen Zustand (etwa der Vegetation während Dürre vs. Vegetation in der Regenzeit), der Oberflächenrauigkeit und den geometrischen Verhältnissen (Einfallswinkel der EM Strahlung, Beobachtungsrichtung) ab. Lediglich aufgrund der Vielfalt dieser Faktoren ist es möglich, Gegenstände unmittelbar oder in der Bildwiedergabe zu sehen (Albertz, 2007).

## 3.2 Fernerkundliche Sensoren

Fernerkundliche Sensoren sind nach ihrer **geometrischen, temporalen, spektralen** und **radiometrischen Auflösung** charakterisiert.

- **Geometrische Auflösung** (räumliche Auflösung) eines fernerkundlichen Sensors verweist auf die Größe des kleinsten Objekts, das durch den Sensor darstellbar ist und entspricht der Größe eines einzelnen Pixels. Die European Space Agency klassifiziert Sensoren in Bezug auf ihre räumliche Auflösung in drei Gruppen: sehr hohe räumliche Auflösung < 3 m; hohe räumliche Auflösung 3 – 30 m; mittlere räumliche Auflösung 30 – 300 m; niedrige räumliche Auflösung > 300 m. (Corbane et al., 2015; Horning et al., 2010). Abbildung 3 stellt die Unterschiede differenter geometrischer Auflösungen dar.

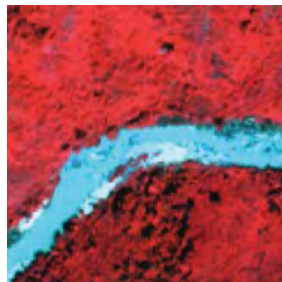
- **Temporale Auflösung** (zeitliche Auflösung) entspricht jenem Zeitraum, den ein Sensor benötigt, um ein und dasselbe Untersuchungsgebiet zweimal zu detektieren.
- **Spektrale Auflösung** („farbliche“ Auflösung) wird durch die Anzahl der Spektralkanäle und deren jeweilige Bandbreite bestimmt und dient dazu, Unterschiede in der Reflexionscharakteristik verschiedener Oberflächen zu erfassen (Albertz, 2007).
- **Radiometrische Auflösung** („Dynamik“, „Trennschärfe“) erklärt die Anzahl der möglichen Abstufungen, in welche die Intensität des am Sensor ankommenden Signals unterteilt werden kann z. B. Landsat TM 0 – 255 Graustufen; IKONOS 0 – 2048 Abstufungen (Grauwerte) (Pettorelli, 2019; Horning et al., 2010).

**Abbildung 3:** Unterschiede im Detailgehalt bei veränderter räumlicher Auflösung. Alle Ausschnitte zeigen ein 500 x 500 m<sup>2</sup> großes Gebiet in Zentral-Vietnam bei differenter räumlicher Auflösung. In den oberen Bildern sind einzelne Baumkronen und ein detaillierter Flussverlauf erkennbar. Innerhalb einer MODIS-Szene mit 500 m räumlicher Auflösung würde das dargestellte Gebiet durch einen einzelnen Pixel abgedeckt (nicht gezeigt).

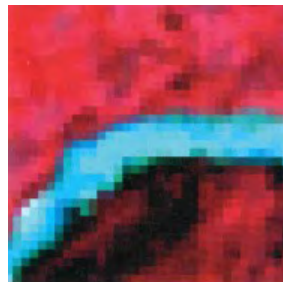
Ikonos,  
1 m panchromatic merge,  
1 m resolution



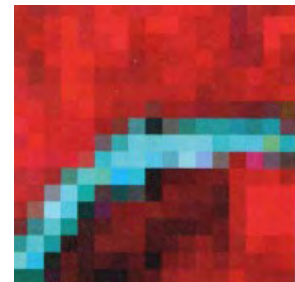
Ikonos,  
multispectral,  
4 m resolution



Aster,  
15 m resolution



Landsat,  
ETM+,  
30 m resolution



Quelle: Horning et al., 2010.

Hier muss allerdings noch angemerkt werden, dass innerhalb der ökologischen wie auch teilweise in der fernerkundlichen Community fälschlicherweise davon ausgegangen wird, dass Satellitenszenen mit der höchsten Auflösung immer vorzuziehen seien. Dabei weisen geometrische (räumliche) und temporale (zeitliche) Auflösung der Satelliten oft eine negative Korrelation auf. Satelliten mit einer hohen temporalen Auflösung umfliegen die Erde auf einem höheren Orbit (Umlaufbahn) und haben eine niedrige geometrische Auflösung, aber eine große räumliche Abdeckung. Hingegen weisen Satelliten mit hoher geometrischer Auflösung in den meisten Fällen eine niedrigere räumliche Abdeckung und temporale Auflösung auf (Pettorelli et al., 2018).



Je nach Anzahl der in die Analyse integrierten Satellitenbildszenen wird das Abspeichern der Daten zum Thema. Denn eine Satellitenbildszene mit einer räumlichen Auflösung von 1 m enthält im Vergleich zu einer Satellitenbildszene mit 10 m räumlicher Auflösung bei gleicher aufgenommener Flächengröße 100-mal mehr Pixel, was auch zu einem 100-mal größeren Datensatz führt (Horning et al. 2010).

Außerdem stellt die Klassifikation von räumlich sehr hoch und hoch aufgelösten Daten weitere Schwierigkeiten dar. Denn wie aus Abb. 3 ersichtlich wird, sind in den räumlich sehr hoch und hoch aufgelösten Daten (die oberen zwei Bilder) Schatten, Stämme und Blätter zu erkennen, welche die Genauigkeit der Klassifikation aufgrund einer aufwendigeren Bearbeitung verringern, wenn diese Fehler nicht durch die Wahl einer geeigneten Klassifikationsmethode eliminiert werden (vgl. Kap.: 6) (Corbane et al., 2015; Nagendra et al., 2012).

### 3.3 Aktive und passive Sensoren

Sensoren der Satellitenbild-Fernerkundung werden in passive und aktive Systeme unterteilt. Betrieben werden diese auf Plattformen (z. B. Satelliten, Flugzeuge oder Drohnen). Nicht unüblich ist es, mehrere Sensoren auf einer Plattform zu betreiben. Tabelle 2 zeigt unterschiedliche Plattformen und die Anzahl der auf ihnen betriebenen Sensoren.

**Tabelle 2:** Plattformen und die auf ihnen betriebenen Sensoren. Die Bezeichnungen in Klammern stellen die Namen der Sensoren dar.

Plattform	Sensor
Landsat-7	1 Sensor (ETM+)
Landsat-7	1 Sensor (ETM+)
ENVISAT	10 Sensoren
Terra	5 Sensoren

Quellen: Landsat-7 & -8: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-7/>; ENVISAT: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-eo-missions/envisat/mission-summary>; Terra: <https://terra.nasa.gov/about>

### 3.3.1 Passive Sensoren

Passive Fernerkundungssysteme messen/detektieren die Strahlung, die von einem Objekt an der Erdoberfläche emittiert, reflektiert oder gestreut wird. Dabei dient die solare Einstrahlung als Hauptenergiequelle (Abb. 2) (Jensen, 2016).

Ein passiver Sensor setzt sich aus mehreren Strahlungsdetektoren zusammen. Mit geeigneten optischen Bauteilen lässt sich die von einem Sensor empfangene Strahlung in verschiedene Wellenlängenabschnitte aufteilen. So entstehen mehrkanalige Systeme, die sog. Multispektralscanner. Diese dienen dazu, die Strahlung im sichtbaren Licht, im nahen Infrarot und im thermalen Bereich in mehreren Spektralbereichen (Kanäle/Bänder, siehe Abb. 2 & Abb. 4) aufzunehmen.

Für jeden vom Sensor detektierten Kanal innerhalb eines Pixels wird ein Messwert ermittelt, sodass mehrere Bilddatensätze entstehen, die geometrisch identisch sind, sich aber aufgrund der spektralen Zusammensetzung der Geländeoberfläche in den einzelnen Bilddatensätzen unterscheiden (Albertz, 2007; Lund 2011). Typischerweise nehmen multispektrale Sensoren das sichtbare Licht in den Bereichen (R) rot, (G) gelb und (B) blau auf. Die Detektion der Strahlung innerhalb der RGB-Bänder erlaubt die Konstruktion eines Echtfarben-Bildes. Dieses ist vergleichbar mit der Art und Weise, wie Menschen die Umwelt sehen. Allerdings variiert die Breite und Anzahl der detektierten spektralen Bänder von Sensor zu Sensor (Pettotelli, 2018; Lund, 2011).

Im Gegensatz zu **multispektralen** Sensoren, die spektrale Informationen lediglich durch 4 – 12 Bänder aufnehmen, detektieren **hyperspektrale** Sensoren spektrale Informationen mit einer Bänderanzahl von 100 – 1000 Bändern. Sensoren dieses Formats können das reflektierte Spektrum der Oberflächenobjekte nahezu kontinuierlich darstellen (Pettotelli, 2018; Lund, 2011).

### 3.3.2 Aktive Sensoren

Aktive Sensoren unterscheiden sich von passiven darin, dass aktive Sensoren Energie emittieren und die Rückstrahlung der emittierten Energie messen (Abb. 4). Grundsätzlich gibt es zwei Arten aktiver Sensoren: (1) Radar (Radio Detection and Ranging) und (2) LiDAR (Light Detection and Ranging). Aktive Systeme reagieren vor allem sensitiv gegenüber der Geländegeometrie, der dreidimensionalen Struktur (3D) und in manchen Fällen gegenüber dem Wassergehalt (Geller et al., 2017). Die Auswertung solcher Daten ist komplex und setzt ein detailliertes Verständnis der Technik voraus (Albertz, 2007; Wegmann 2010).

Der nachfolgende Abschnitt soll dabei helfen, Radar-Sensoren und deren Funktionsweise verstehen zu lernen, ohne ins Detail gehen zu können. Für weitergehendes, vertiefendes Wissen sei das EO-College (<https://eo-college.org>), ein Online-Kurs der ESA & NASA zum Thema Radar-Fernerkundung empfohlen.

#### 3.3.2.1 RADAR

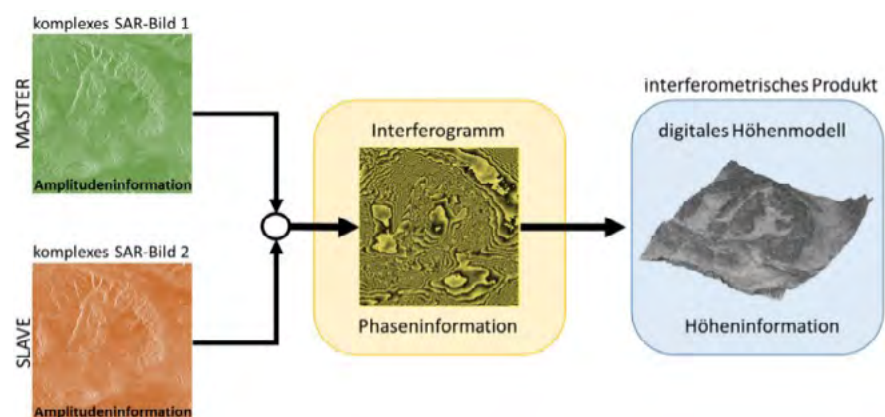
Satellitenbasierte Radar-Sensoren werden unter dem Begriff SAR (**S**ynthetic **A**perture **R**adar, **SAR**, dt. Radarsystem mit synthetischer Apertur) Sensoren zusammengefasst. Denn die Abstrahlcharakteristik der Antenne definiert sich über ihre Baulänge und wird bei der Anwendung auf einem Satelliten künstlich modelliert (Albertz, 2007). D. h., damit ein Radar-Satellit zwischen Objekten auf der Erdoberfläche mit einem Abstand von einem Meter unterscheiden kann, müsste die Antenne des Satelliten etwa 15 km lang sein. Tatsächlich aber ist die Antenne nur 5 m lang, da man sich eines technischen Tricks bedient: Dabei macht man sich Tatsache zunutze, dass die Antenne während des Satellitenflugs in regelmäßigen Abständen Impulse an die beobachteten Objekten sendet und deren Echo empfängt, also das betrachtete Objekt mehrmals misst. Nach der Übertragung der Daten an eine Bodenstation werden die „Einzelmessungen“ in einem komplexen Rechenprozess so behandelt, als würden diese von einer einzigen 15 km langen Antenne stammen ([https://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2440/3586\\_read-16692/](https://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2440/3586_read-16692/), Moreira et al. 2013). Auf diese Weise ist es möglich, dass Radar-Satelliten Datensätze mit einer räumlichen Auflösung bis in den Meterbereich erzeugen können.



SAR-Sensoren detektieren die Erdoberfläche unter Verwendung von Mikro- oder Radiowellenstrahlung, welche die längeren Wellenlängenabschnitte des EM-Spektrums zwischen 1 mm – 1 m abdecken (Abb. 2). Dabei emittiert die Radar-Antenne Mikrowellen-Impulse in Richtung der Erdoberfläche und empfängt das Echo (backscatter) bzw. die zurückgestrahlte Energie (Braun & Hochschild 2017). Deshalb ist die Datenakquisition unabhängig von den natürlichen Strahlungsverhältnissen (Tag und Nacht) möglich. Außerdem ist sie unabhängig von der jeweiligen Wetterlage, da Mikrowellen auch Wolken, Dunst und Rauch durchdringen (Mohan, 2013). Das wieder am Sensor ankommende Echo der emittierten Strahlung enthält zwei Informationen: zum einen die relative Phasenverschiebung (Interferometrie) und zum anderen die Intensität des zurückgestrahlten Signals (Horning et al., 2010, Pettorelli 2019).

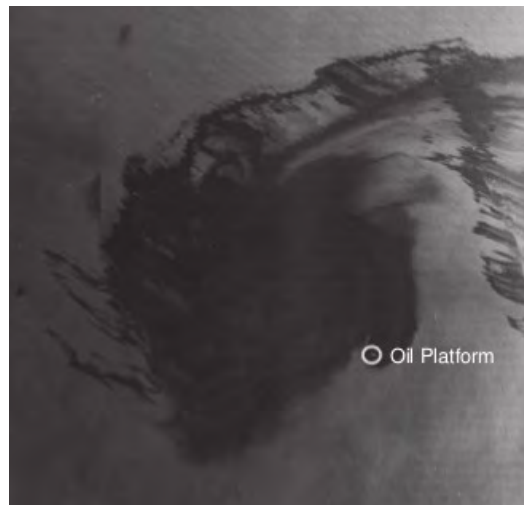
(1) Radar-Interferometrie: Durch Kombination von zwei Radar-Messungen des gleichen Gebietes auf der Erdoberfläche, die aus leicht unterschiedlichen Blickwinkeln (Abb. 4), aufgenommen werden, lassen sich durch Analyse der Phasendifferenz Gebiete gleicher Phasendifferenz identifizieren. Mit Auswertung der Phasenunterschiede lassen sich die Geländehöhe berechnen. So werden digitale Geländemodelle (DGM) mit nahezu globaler Abdeckung erstellt (Moreira et al. 2013; Eilers, 2015). Abbildung 4 stellt den Prozessablauf vereinfacht dar.

**Abbildung 4:** Vereinfachte Darstellung des Interferometrischen Prozesses mit zwei kohärenten SAR-Bildern (Master und Slave). Beide SAR-Bilder enthalten als Information die Phasen- und Amplitudenwerte. Über die Phaseninformation lässt sich ein Interferogramm erstellen und daraus ein Geländemodell ableiten.



Quelle: Eilers, 2015

(2) Die Intensität des zurückgestrahlten Signals beschreibt das Verhältnis von emittierter Strahlung zu der, die den Sensor wieder erreicht. Vor allem wird das Signal von der Oberflächenrauigkeit und der dielektrischen Konstante<sup>1</sup> der beobachteten Objekte beeinflusst (Mohan, 2013; Horning et al. 2010). Die Oberflächenrauigkeit hat großen Einfluss auf die Reflexionscharakteristik einer Fläche. Ist diese im Vergleich zur verwendeten Wellenlänge gering, dann werden die Mikrowellen gespiegelt. Da der Sensor nicht senkrecht über der zu untersuchenden Fläche abstrahlt, kehrt nur ein sehr geringer Anteil der Strahlung zum Sensor zurück, sodass solche Flächen im Radarbild dunkel erscheinen. Liegt die Rauigkeit allerdings im Bereich der verwendeten Wellenlänge, wird die Strahlung diffus gestreut, und ein größerer Teil der Strahlung wird zum Sensor zurückgestrahlt und erscheint im Radarbild heller (Albertz, 2007; Mohan 2013).



**Abbildung 5:** Ölverschmutzung im Golf von Mexiko, April 2010 (10 Tage nach der Explosion der Ölplattform Deepwater Horizon). Der Ölteppich erscheint schwarz, da die Verschmutzung die Oberfläche „glättet“ und so die Mikrowellenstrahlung vom Sensor weg spiegelt.

Quelle: Moreira et al. 2013.

Abbildung 5 verdeutlicht den Einfluss der Oberflächenrauigkeit am Beispiel der Havarie der Ölplattform Deepwater Horizon im Jahr 2010. Klar zu erkennen sind die schwarzen ölverschmutzten Flächen. Diese weisen (durch die Verschmutzung) eine „glatte“ Oberfläche auf, welche die einfallende Strahlung spiegelt, somit weg vom Sensor reflektiert. Demgegenüber sind die unkontaminierten Flächen, die durch den Wellengang eine „raue“ Oberfläche aufweisen, diffuse Streuer und reflektieren mehr Strahlung zum Sensor hin. Sie erscheinen deshalb heller (Moreira et al. 2013). Überdies existiert ein dritter Streuungstyp, die Volumenstreuung. Dabei tritt die Mikrowellenstrahlung in ein Medium ein und wird innerhalb des Mediums gestreut.

1 Die elektrische Konstante: Parameter zur Beschreibung der elektrischen Eigenschaften eines Mediums. Das Reflexionsvermögen einer Fläche und das Eindringungsvermögen von Mikrowellen (Radar) in das Material wird von diesem Parameter bestimmt.

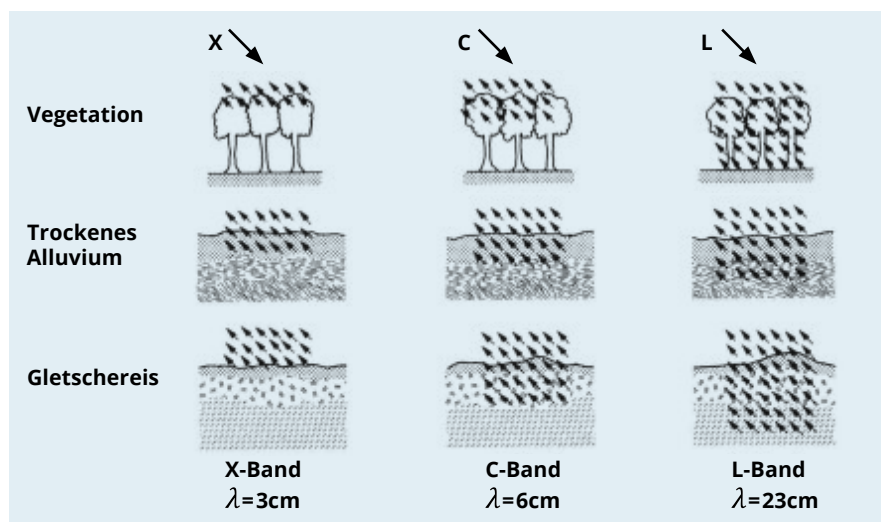
Volumenstreuung tritt vor allem auf vegetationsbedeckten Flächen, in Wäldern oder im Boden auf (Mohan, 2013). Die Art der Rückstreuung ist dabei stark von der verwendeten Wellenlänge und den Materialeigenschaften der beobachteten Objekte abhängig. Die Eindringtiefe der Mikrowellenstrahlung wird von ihrer Wellenlänge bestimmt. Tabelle 3 listet die gebräuchlichen Wellenlängenabschnitte und die dazugehörigen Bezeichnungen.

**Tabelle 3:** Auflistung der gängigen Radar-Wellenlängen. Bänder in grüner Schreibweise werden vor allem im Naturschutzkontext verwendet.

Name (Band)	Wellenlänge (cm)
P-Band	60 - 120
L-Band	15 - 30
S-Band	8 - 15
C-Band	4 - 8
X-Band	2,5 - 4
Ku-Band	1,7 - 2,5
Ka-Band	0,75 - 1,2

Eigene Darstellung nach <https://eo-college.org> & Moreira et al. 2013

**Abbildung 6:** Schematische Darstellung der Eindringtiefen von Mikrowellen. Je größer die Wellenlänge, desto tiefer dringen sie in das Medium ein.



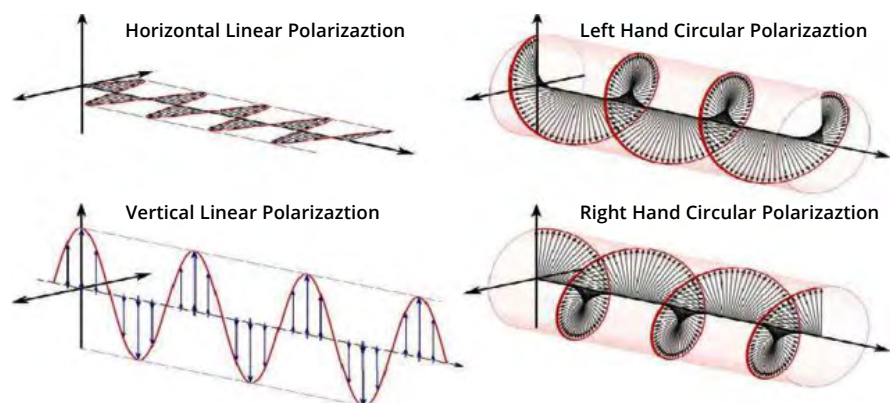
Quelle: Albertz, 2007.



Kürzere Wellenlängenbereiche werden bereits an kleinen Objekten (z. B. Blättern) gestreut und haben deshalb nur eine sehr geringe Eindringtiefe. Gegensätzlich wirken Sensoren, die längere Wellenlängenbereiche verwenden (L-Band). Mikrowellen in diesem Bereich dringen tiefer ein und werden an großen Objekten (z. B. Baumstämmen) gestreut. Außerdem weisen Objekte mit einem hohen Wassergehalt eine höhere Rückstreuung des Mikrowellensignals auf als Objekte mit einem niedrigeren Wassergehalt (Pettorelli, 2018).

Eine weitere Informationsquelle über die Erdoberfläche ist die Polarisation des Mikrowellensignals. Dabei kann EM-Energie als eine oszillierende Welle gedacht werden, die sich vorwärtsbewegt (Abb. 7).

**Abbildung 7:** Schematische Darstellung einer horizontal und vertikal polarisierten Strahlung.



Quelle: Sivasankar et al. 2018

Radar-Sensoren emittieren polarisierte EM-Strahlung, also Strahlung, die sich nur auf einer Ebene durch den Raum bewegt (horizontal H oder vertikal V, Abb. 7). Trifft diese Energie auf ein Objekt am Boden, kann sich die Polarisation in Abhängigkeit der Materialeigenschaften von vertikal in horizontal und umgekehrt ändern. Insgesamt existieren in der Radar-Fernerkundung vier unterschiedliche Polarisationsoptionen: HH, VV (gleich-polarisiert); HV, VH (kreuz-polarisiert). Allerdings kann nicht jeder Radarsensor alle Optionen anwenden. Werden nun unterschiedliche Polarisationsoptionen des gleichen Untersuchungsgebiets miteinander verglichen, lassen sich Oberflächen mit unterschiedlichen strukturellen Merkmalen unterscheiden (z. B. Agrarflächen mit unterschiedlichen Anbaukulturen) (Sivasankar et al. 2018).

### 3.3.2.2 LiDAR

LiDAR-Sensoren (Light Detection And Ranging) gehören zur Gruppe der aktiven Fernerkundungssysteme und werden zur Erstellung höchstauflösender Höhenmodelle genutzt. Außerdem ist es möglich, auch die Höhe der Vegetation sowie deren dreidimensionale Struktur zu detektieren und damit wichtige Parameter zur Charakterisierung von Ökosystemen zu liefern (Corbane et al., 2015).

Dabei messen LiDAR-Sensoren die Distanz zwischen dem beobachteten Objekt und dem Sensor durch den Zeitunterschied zwischen Aussendung und Empfang des Signals. Die meisten LiDAR-Sensoren nutzen zur Erfassung der Vegetationsstruktur Laser, die Wellenlängen des nahen Infrarots emittieren, da Vegetation in diesem Wellenlängenabschnitt die höchste Reflexionsrate besitzt. Bathymetrische (Messungen des Ozeanbodens) LiDAR-Sensoren hingegen verwenden den grünen Wellenlängenabschnitt, da sich dieser besonders gut eignet, um Wasserkörper zu durchdringen (Horning et al., 2010). LiDAR-Sensoren werden hauptsächlich flugzeuggestützt eingesetzt.

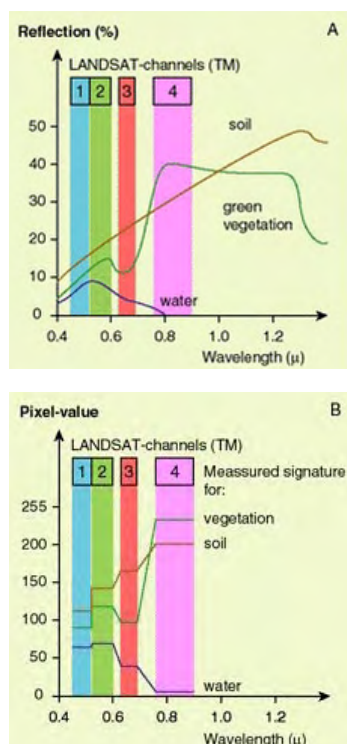
Eine eingehende Darstellung der LiDAR-Technologie und deren Anwendung im Naturschutz liefert Melin et al., 2017.

## 3.4 Interaktionen der Strahlung

### 3.4.1 Interaktion der Strahlung mit der Erdoberfläche

Satellitenbild-Fernerkundung basiert auf dem Prinzip, dass verschiedene Oberflächenbedeckungen durch unterschiedliche Reflexionen in den einzelnen Wellenlängenbereichen (spektrale Bänder des Sensors; Abb. 8) des EM-Spektrums differenzierbar sind (Horning et al. 2010; Mårtensson 2011). Die Messung der spektralen Signatur wird durch viele Faktoren, wie der Beleuchtung des Gebietes, der Oberflächenbeschaffenheit, dem Aufnahmewinkel und den Materialeigenschaften (z. B. Wassergehalt der Vegetation) der beobachteten Objekte beeinflusst.

**Abbildung 8:** (A) Diagramm der spektralen Signaturen von Wasser, trockenem Boden und gesunder Vegetation. Auf der x-Achse sind Wellenlängen in  $\mu$ - und auf der y-Achse die Reflexion in % aufgetragen, (B) die spektrale Signatur, wie sie durch den Sensor in Digitalwerten (y-Achse) aufgezeichnet wird. So wird ersichtlich, dass der Sensor die Strahlung nur in den definierten Bändern (1–4) misst. Hyperspektrale Sensoren hingegen messen die Strahlung kontinuierlich durch Verwendung von 100–1000 Bändern.



Quelle: [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_DE/SEMP4BF280G\\_2.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_DE/SEMP4BF280G_2.html)

Reflexion in diesen Bereichen ist, desto höher ist der Wassergehalt der Pflanze (wichtig zur Kartierung von Vegetation mit Wasserstress (Dürre))

### Boden

- spektrale Signatur abhängig von Korngröße (Bodentextur); Zustand des Bodens (trocken/feucht); Bodenfarbe und dem Anteil von organischem Material

### Wasser

- reflektiert Strahlung nur im visuellen Bereich des EM-Spektrums
- absorbiert die Strahlung in allen anderen Wellenlängenbereichen fast vollständig
- sehr gut von anderen Oberflächentypen zu differenzieren

Untersuchungsgegenstand ökologischer Fragestellungen sind vor allem Vegetation (Spezies, Bedeckungsgrad, Zustand etc.), Böden, Geologie (Boden- u. Gesteinstyp) und Wasser (Verfügbarkeit, Qualität etc.). Die spektralen Signaturen dieser Objekte sind in Abbildung 8 abgebildet. Dabei zeigt Teil a) die kontinuierliche spektrale Signatur, wie sie im Labor oder durch hyperspektrale Sensoren gemessen wird und Teil b) die spektrale Signatur, wie sie von einem multispektralen Sensor in diskreten Bändern gemessen wird.

### Vegetation

- kleiner Reflexionspeak im Grünen Band (0,49 – 0,57  $\mu$ ), so erscheint das Blatt Grün
- höchste Absorption von Strahlungsenergie im visuellen Spektrum 0,45 – 0,67  $\mu$ ; Absorption durch Chlorophyll zur Fotosynthese
- Wasserabsorptionsbanden bei 1,4  $\mu$ , 1,9  $\mu$  und 2,5  $\mu$ ; je geringer die

### 3.4.2 Interaktion der Strahlung mit der Atmosphäre

Die EM-Strahlung wird innerhalb der Atmosphäre durch Streuung und Absorption an kleinsten Teilchen beeinflusst. Somit wird auch das Signal, das lediglich die unterschiedlichen Reflexionen des Untersuchungsgebietes enthalten soll, gestört oder „verunreinigt“. Tabelle 4 stellt die drei Hauptstreuungen innerhalb der Atmosphäre dar.

Um präzise Informationen über die Erdoberfläche zu erhalten und Fernerkundungsdaten überhaupt erst vergleichbar zu machen, ist die Korrektur der atmosphärischen Störeinflüsse unabdingbar (Mårtensson, 2011).

**Tabelle 4:** Streuungsarten innerhalb der Atmosphäre.

Name	Anmerkung
<b>Rayleigh-Streuung</b>	beeinflusst kurze Wellenlängen; Interaktion der Strahlung mit Gasmolekülen (~ 0,1 nm); verantwortlich für blauen Himmel, da vor allem die kurzen, blauen Wellenlängen betroffen sind
<b>Mie-Streuung</b>	beeinflusst den sichtbaren Spektralbereich; Streuung an Aerosolen
<b>Nicht-Selektive-Streuung</b>	beeinflusst alle Wellenlängen gleichermaßen; Interaktion der Strahlung mit Wasser- und Eiskristallen im unteren Teil der Atmosphäre

Quelle: Mårtensson, 2011; Jensen 2016

Der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre zum Sensor wird durch nachfolgende Formel quantifiziert:

$$LS = LT + LP$$

(LT = target radiance, LS = gesamte am Sensor gemessene Strahlung, LP = path radiance)

Ziel der Atmosphärenkorrektur ist es, die Path radiance zu ermitteln und aus dem Signal zu entfernen, um ein reines Signal der Reflexion an der Erdoberfläche zu erhalten. Um dies umzusetzen, existieren standardisierte Algorithmen, wie zum Beispiel ATCOR (Atmospheric & Topographic Correction), das vom Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde.

## 3.5 Vegetationsindizes und Parameter aus Fernerkundungsdaten

Vegetationsindizes (VI) sind dimensionslose pseudo-quantitative Kenngrößen, die den Zustand eines Ökosystems beschreiben (Kuenzer et al., 2014). Grundsätzlich sind VI's optische Messungen der „Grünheit“ einer Pflanzendecke (engl. canopy), die stark mit Eigenschaften wie dem Chlorophyllgehalt der Blattfläche (Leaf Area Index; LAI), der Oberflächenbedeckung sowie der -struktur korreliert (Glenn et al., 2008). Es existieren mehr als 100 unterschiedliche VI's (Xue & Su, 2017). Der wohl bekannteste und am häufigsten verwendete VI ist der Normalised Vegetation Index (NDVI; Tucker, 1979). Die Berechnung und Anwendung des NDVI im Global Change und Ökologiekontext wird von Pettoirelli et al., 2005 beschrieben. In einem allgemeineren Review-Artikel von Xue & Su 2017 werden die Potenziale und Limitationen der bekanntesten VIs vorgestellt sowie eine Liste von 100 VIs und deren Berechnung bereitgestellt. Glenn et al., 2008 beschreiben die Potenziale und Limitationen der Extraktion von Parametern aus den Vegetationsindices (VIs), wie dem Blattflächenindex oder der Netto-Primär-Produktion.

### 3.5.1 Parameter aus Fernerkundungsdaten zur Analyse der Vegetation

Die Parameter zur Beschreibung der Biodiversität, die aus Fernerkundungsdaten gewonnen werden können, lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: zum einen in (1) indirekte Informationen zu naturräumlichen Variablen wie Landbedeckung, Temperatur, Niederschlag etc., die ein Habitat beschreiben (Kuenzer et al., 2014, He et al., 2015); und zum anderen in (2) direkte Informationen, die einzelne Arten oder Artensammensetzungen detektieren. Indirekte Variablen zur Beschreibung von Habitaten können nach Kuenzer et al. 2014 in fünf Gruppen unterteilt werden: geophysikalische-, Index- also dimensionslose-, thematische-, topografische- und Textur-Variablen. Der Anhang 1 enthält zwei Abbildungen, welche die Gruppen und die daraus resultierenden Variablen zusammenfassen und außerdem ihre Relevanz für Biodiversitätsanalysen darstellen. Hier muss hervorgehoben werden, dass der Informationsgewinn der multitemporalen Analyse (Integration z. B. aller Satellitenaufnahmen eines Monats, eines Jahres oder mehrerer Jahre) den einer monotemporalen Analyse bei Weitem übersteigt. Denn so kann die Veränderung zwischen zwei oder mehreren Zeitschritten dargestellt werden. Bei ausreichender Datengrundlage ist die Berechnung von Trends in der Veränderung einer Variable möglich.



Die Verwendung sehr hoch aufgelöster Satellitendaten (z. B. World-View 4) oder flugzeuggestützte hyperspektrale Sensoren (Turner 2014) ermöglichen die direkte Detektion biodiversitätsrelevanter Parameter, etwa die Artenzusammensetzung (z. B. Baumarten) eines Habitats oder die direkte Detektion sehr kleinskaliger Habitate (z. B. Pinguin-Populationen). Allerdings muss erwähnt werden, dass die meisten sehr hoch aufgelösten Satellitensensoren lediglich den sichtbaren Bereich des EM-Spektrums abbilden (IKONOS, QuickBird) und ihnen ein Band im nahen Infrarotbereich fehlt. Dieses ist aber hilfreich zur Differenziation unterschiedlicher Vegetationsarten (Immitzer et al. 2012).

## 4. Plattformen und Sensoren der Fernerkundung

Mit dem Start des ersten Erdbeobachtungssatelliten TIROS (Television Infrared Observation Satellite) im Jahr 1960, der Daten für meteorologische Studien lieferte, begann die kontinuierliche und flächendeckende Beobachtung der Erdoberfläche aus dem All ([nasa.de](http://nasa.de), 2016).

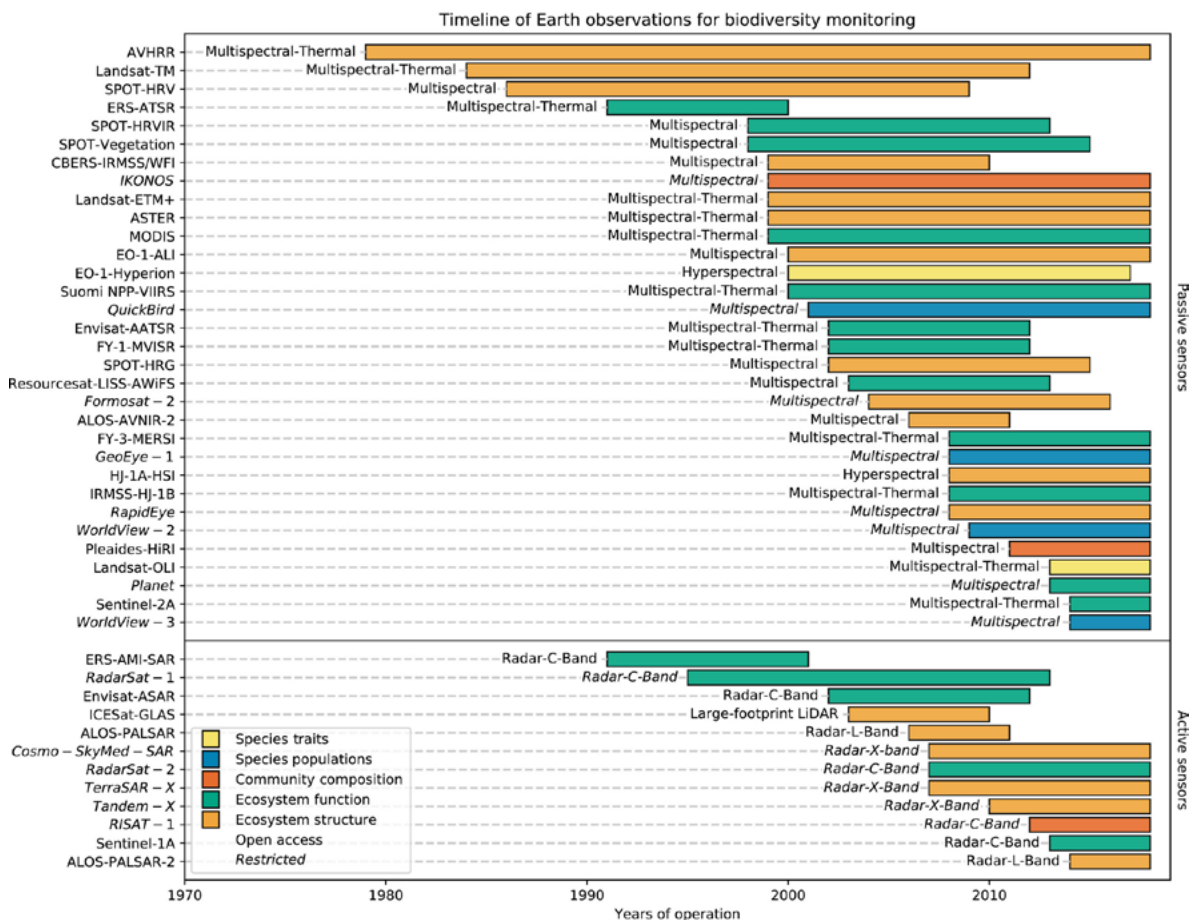
Abbildung 9 sowie Tabelle 5 geben einen Überblick über die wichtigsten Satellitenmissionen und ihrer Spezifikationen. Eine vollständige Liste aller Satellitenmissionen kann unter <http://database.eohandbook.com/database/missiontable.aspx> abgefragt werden.

### 4.1 Multispektrale Sensoren

Der erste Abschnitt aus Tab. 5 und auch in Abb. 9 zeigt multispektrale Sensoren. Es lässt sich erkennen, dass nur wenige multispektrale Sensoren das Langzeitmonitoring eines Gebietes zulassen. Der NOAA-AVHRR-Sensor (National Oceanic and Atmospheric Administration – Advanced Very High Resolution Radiometer) mit einer geometrischen Auflösung von 1 km und einer temporalen Auflösung von einem Tag (in vielen Gebieten bis zu zweimal täglich) macht das Monitoring der Erdoberfläche seit den späten 70er-Jahren möglich. Allerdings ist die geometrische Auflösung des Sensors lediglich zur Unterscheidung großräumiger Landschaftseinheiten (z. B. Wald vs. Nicht-Wald) geeignet (Kuenzer et al., 2014; Corbane et al, 2015).

Die Landsat-Satellitenflotte (LS) ermöglicht die Zeitreihenanalyse der Erdoberfläche zurück bis in das Jahr 1972 mit einer geometrischen Auflösung zwischen 30 m bis zu 10 m (ETM + & OLI, 10 m durch sogenanntes „pansharping“. Dabei werden mehrere leicht unterschiedliche Bilder mit niedriger Auflösung zu einem einzigen hochauflösenden Farbbild zusammengeführt. Landsat-Satellitenflotte (LS) heißt: MSS-Sensor (Multi Spectral Scanner) auf dem Landsat 1-Satelliten und weiter geführt durch den TM-Sensor (Thematic Mapper, ab LS 4) und ETM-Sensor (Enhanced Thematic Mapper, ab LS 6) auf den Landsat-Satelliten 4 & 5 und Landsat 6 sowie dem ETM+-Sensor auf Landsat 7 und dem OLI-Sensor (Operational Land Imager) auf Landsat 8 (Wulder et al., 2019).

**Abbildung 9:** Laufzeit historischer und gegenwärtiger Satellitensensoren, eingefärbt nach Biodiversitätsparameter. Sensor-Namen in Kursivschrift. Daten sind kostenpflichtig zu erwerben.



Quelle: Adams, 2018.

Geometrisch sehr hoch aufgelöste, multispektrale Sensoren wie RapideEye, WorldView, QuickBird und IKONOS bieten vielfältige Möglichkeiten für das Biodiversitätsmonitoring. Die sehr hohe räumliche Auflösung macht sogar die direkte Identifikation unterschiedlicher Arten möglich (Wang et al., 2010). Allerdings fehlt den sehr hoch aufgelösten Sensoren oft ein Band im nahen Infrarot und/oder im thermalen Bereich (außer WorldView 1 – 4). Diese Bänder können jedoch zur Unterscheidung von Vegetationstypen äußerst nützlich sein (Kuenzer et al., 2014). Einsatzbereiche der thermalen Fernerkundung (auch TIR; thermal infrared) liegen in der monotonalen Bestimmung der Landoberflächentemperatur (LST; Land Surface Temperature), der Meeresoberflächentemperatur (SST; Sea Surface Temperature), der Detektion von thermalen Anomalien und der von Bränden. Da die Ober- und Untergrenzen der LST oder SST für viele Tier- und Pflanzenarten einen bestimmenden Faktor darstellen, sollten Temperaturdaten in jede Biodiversitätsstudie integriert werden (Kuenzer et al. 2014).

Auch im Bereich der thermalen Fernerkundung liefern die Systeme AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) und Landsat die einzigen Quellen für Langzeitstudien der LST/SST (Abb. 9).

### 4.1.2 Hyperspektrale Sensoren

Zu den bekanntesten flugzeuggestützten Hyperspektral-Sensoren gehören das Airborn Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), der Compact Airborn Spectrographic Imager (CASI) sowie Hymap. Satellitengestützte hyperspektrale Sensoren wurden durch den Hyperion-Sensor auf dem EO-1 (Earth Observing-1) Satelliten verwirklicht (Pettorelli, 2019). Allerdings sind hyperspektrale Daten aus flugzeuggestützten Missionen sehr kostspielig.

## 4.2 Aktive Sensoren

RADAR-Daten eignen sich dazu, strukturelle Parameter (z. B. Baumhöhe, Oberflächenbedeckungsgrad) aus Ökosystemen sowie deren räumliche Ausbreitung abzuleiten (Anderson 2018, Nagendra et al., 2012). Bis 2005 wurde vor allem auf die Daten der C-Band-RADAR-Sensoren (RADAR-SAT-1, ERS-1 und ERS-2) oder auf flugzeuggestützte Systeme zurückgegriffen (Kuenzer et al., 2014, Joshi et al., 2015). Im Jahr 2014 wurden der

japanische L-Band RADAR Sensor ALOS-PALSAR-2 und der europäische C-Band-Sensor Sentinel-1A (Tab. 3 und 5) mit verbesserter geometrischer und temporaler Auflösung gestartet. Daten anderer Sensoren, wie die vom italienischen Cosmo SkyMed oder vom kanadischen Radarsat, sind kostspielig oder schwer zu erlangen (Kuenzer et al. 2014).

Durch die Verwendung von LiDAR-Sensoren, die auch zur Gruppe der aktiven Sensoren gehören, lassen sich ebenfalls strukturelle Parameter aus Ökosystemen ableiten. Dabei müssen satellitengestützte von flugzeuggestützten Sensoren unterschieden werden. Satellitengestützte LiDAR-Sensoren weisen eine geometrische Auflösung zwischen 50 m – 90 m auf und dienen vor allem der Beobachtung der Atmosphäre, werden aber auch zur Detektion der Vegetationshöhe auf dem gesamten Globus eingesetzt (Fouladinejad et al., 2019). Im Gegensatz dazu stehen die flugzeuggestützten Sensoren. Diese werden für lokale bis regionale Analysen herangezogen und zeigen je nach Sensor eine geometrische Auflösung bis in den Zentimeter-Bereich hinein (Eitel et al., 2016). Allerdings ist die flugzeuggestützte LiDAR-Datenakquisition mit hohen Kosten verbunden. Shapiro et al. 2017 liefern eine sehr gute Zusammenfassung der LiDAR-Sensoren. Darin enthalten ist auch eine Auflistung von freiverfügbaren hochaufgelösten LiDAR-Datensätzen.

**Tabelle 5:** Beispiele ziviler Fernerkundungsmissionen und ihre wichtigsten Spezifikationen (z. B. geometrische, temporale Auflösung, Swath width [Breite des Aufnahmestreifen eines Sensors] und die Missionslaufzeit]. Nach López, et al. 2017 & He, et al. 2015

Sensortyp	Plattform	geometrische Auflösung	temporale Auflösung (Tage)	geometrische Auflösung (thermal)	Swath width	Missionslaufzeit	frei verfügbar	Link
Passiv Multispektral	World-View-3	1,24 m	1 – 4		13 km	2014 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>
	Qickbird	2,4 m	1 – 3		17 km	2001 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>
	Pleiades	2 m	täglich		20 – 120 km	2000 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>
	Ikonos	3,2 m	1 – 3		11 km	1999 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>
	TopSAT	2,8 m	täglich		10 – 15 km	2005 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>
	RapidEye	6,5 m	5,5 Tage		77 km	2008 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>
	SPOT 5	5 – 20 m	2 – 3 Tage		80 km	2002 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>
	Sentinel-2 A & B	10 – 60 m	5 Tage		290 km	2015 – jetzt	ja	<a href="#">Link</a>
	ASTER	15 – 30 m	16 Tage	90 m	60 km	2000 – jetzt	ja	<a href="#">Link</a>
	Landsat TM 4/5	30 m	16 Tage		185 km	1982 – jetzt	ja	<a href="#">Link</a>
	Landsat 7/8	30 m	16 Tage	60/100 m	185 km	1999/2013 – jetzt	ja	<a href="#">Link</a>
	MODIS	250 – 1000 m	1 – 2 Tage	1000 m	2330 km	2000 – jetzt	ja	<a href="#">Link</a>
AVHRR	1090 m	täglich	1090 m	2600 km	1978 – jetzt	ja	<a href="#">Link</a>	
Hyper-spektral	Hyperion	30 m	nach Auftrag		30 km	2000 – jetzt	ja	<a href="#">Link</a>
	HyMap	Airborn, Geometrische Auflösung, abhängig von Flughöhe (3 – 20 m), Befliegung auf Nachfrage						
	EnMap	Spaceborn, ca. 30 m geometrische Auflösung, geplanter Start 2020						
	OMI	Spaceborn Mission zur detektion Atmosphärischerparameter geometrische Auflösung 13 – 24 km						



Sensortyp	Plattform	geometrische Auflösung	temporale Auflösung (Tage)	geometrische Auflösung (thermal)	Swath width	Missionslaufzeit	frei verfügbar	Link	
Aktive Sensoren	COSMO – Skymed	1 – 15 m	1 – 15 Tage			2007 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>	
	Terra-SAR-X	1 – 18 m	2,5 Tage			2007 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>	
	Tandem-X	1 – 18 m	2,5 Tage			2010 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>	
	RADAR-SAT 1 & 2	3 – 100 m	24 Tage			2007 – jetzt	nein	<a href="#">Link</a>	
	Sentinel 1 A & B	5 – 40 m	6 Tage			2014 – jetzt	ja	<a href="#">Link</a>	
	ERS 1 & 2	30 m – 50 km	35 Tage			1991–2000 ERS 1 1995–2011 ERS 2		<a href="#">Link</a>	
	Envisat	30 – 1000 m	35 Tage			2002 – 2012	ja	<a href="#">Link</a>	
	ALOS-PALSAR 2	3 – 100 m	14 Tage			2014 – jetzt	ja	<a href="#">Link</a>	
	SRTM	Globales DEM, 30 – 90 m räumliche Auflösung						ja	<a href="#">Link</a>
	ASTER-DEM	Globales DEM, 30 m räumliche Auflösung						ja	<a href="#">Link</a>
	Terra SAR-X/ Tandem-X	Globales DEM, 30 & 90 m räumliche Auflösung						ja	<a href="#">Link</a>
LiDAR	Airborn	In Abhängigkeit der Flughöhe						nein	
	ICESat	70 m				2003 – 2013	ja	<a href="#">Link</a>	

SPOT 5 Satellite Pour l’Observation de la Terre;  
ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer;

MODIS Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer;  
AVHRR Advanced very-high-resolution radiometer;  
EnMap Environmental Monitoring and Analysis Program;

OMI Ozone Monitoring Instrument Spektrometer;  
COSMO Skymed Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation; Envisat Environmental Satellite;

ALOS-PALSAR Advanced Land Observing Satellite (ALOS), Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR);  
SRTM Shuttle Radar Topography Mission;

**Table 6:** Die wichtigsten Download-Portale für kostenfreie Satellitendaten

Name	Verfügbare Sensoren	Website
<b>Earth Explorer</b>	Landsat 4–8, MODIS Daten und Produkte, ASTER, AVHRR sowie weitere Datensätze	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>
<b>Copernicus Open Access Hub</b>	Sentinel-1,2,3	<a href="https://scihub.copernicus.eu/">https://scihub.copernicus.eu/</a>
<b>NASA Earth Data</b>	Vielzahl unterschiedlicher Sensoren und Landbedeckungsklassifikationen	<a href="https://search.earthdata.nasa.gov">https://search.earthdata.nasa.gov</a>
<b>Google Earth Engine (Cloud-Processing Platform)</b>	Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat 4–8, MODIS Daten und Produkte	<a href="https://earthengine.google.com">https://earthengine.google.com</a>

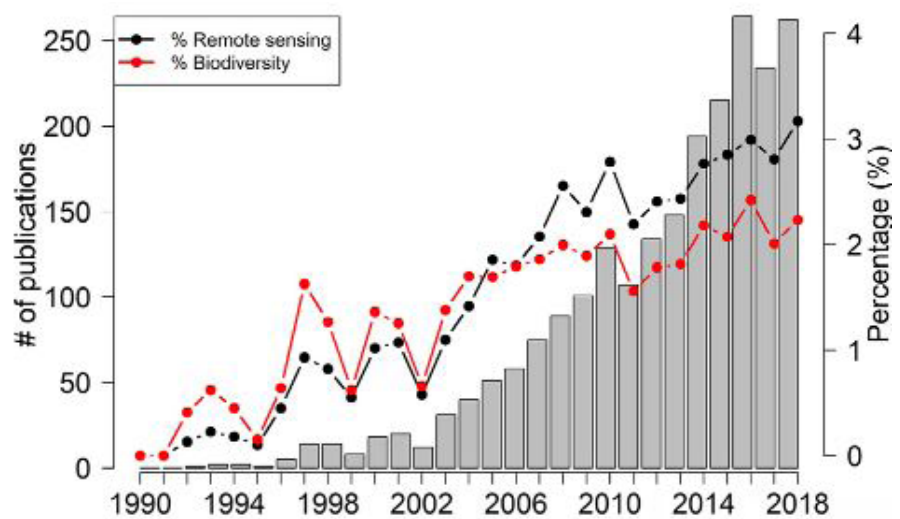
**Table 7:** Kostenpflichtige Satellitendaten

Name	Verfügbare Sensoren	Website
<b>Planet Labs Inc.</b>	RapidEye, Planetscope, Skysat	<a href="https://www.planet.com/">https://www.planet.com/</a>
<b>Airbus</b>	Pléiades, TerraSAR-X, SPOT	<a href="http://www.intelligence-airbusds.com/geostore/">http://www.intelligence-airbusds.com/geostore/</a>
<b>DigitalGlobe</b>	Quickbird, GeoEye-1, WorldView 1–3	<a href="http://www.digitalglobe.com/">http://www.digitalglobe.com/</a>
<b>Apollo Mapping</b>	WorldView, Pléiades, IKONOS, Geo-Eye 1, SPOT, RapidEye und weitere Datensätze	<a href="https://apollomapping.com/">https://apollomapping.com/</a>

# 5. Fernerkundung zur Bewertung der Biodiversität

Seit zwei Jahrzehnten bietet die Satellitenbild-Fernerkundung Datenquellen zur Bewertung von Biodiversität, von der Populations- bis hin zur Ökosystemebene (Pettorelli, 2018; Abb. 10). Dieses Kapitel soll die Potenziale und Limitationen der Fernerkundung zur Kartierung von Ökosystemen und Habitaten zusammenfassen (Kap. 5.1) sowie die Möglichkeiten der Zustandsbewertung von Ökosystemen darstellen (Kap. 5.2). Kapitel 5.3 beschäftigt sich schließlich mit den durch die Fernerkundung detektierbaren Bedrohungen für die Biodiversität.

**Abbildung 10:** Jährliche Anzahl der Publikationen „remote sensing“ und „biodiversity“ (Graue Balken) und Prozentangaben der für die Begriffe „Remote Sensing“ oder „Biodiversität“ (Linien) seit 1990 bis 2018 aus der Web of Science core collection.



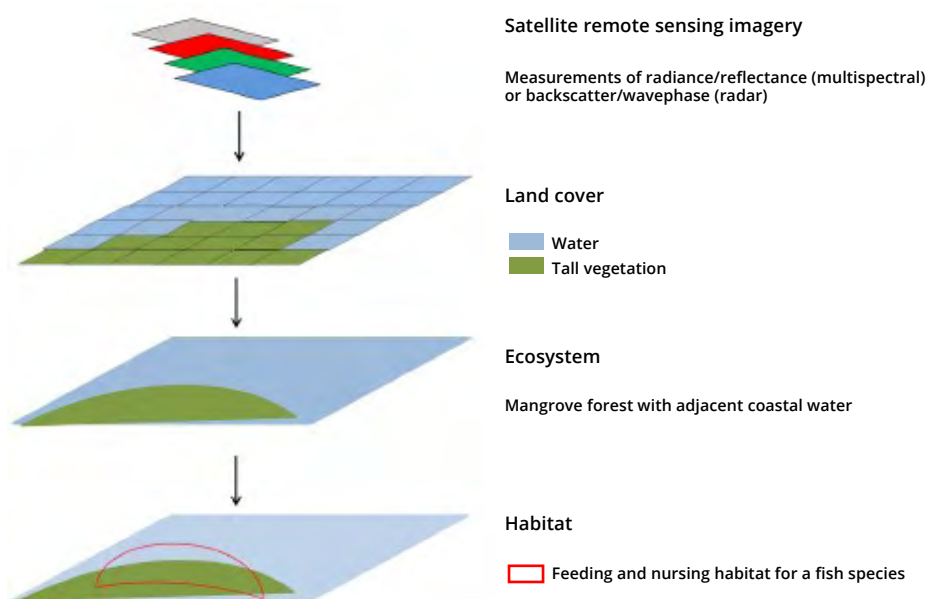
Quelle: Wang & Gamon, 2019

## 5.1 Fernerkundung für die Kartierung von Habitaten und Ökosystemen

Satellitensensoren detektieren die Landoberfläche in festgesetzten räumlichen, zeitlichen und spektralen (Kap. 3.2) Auflösungen. Allerdings unterscheiden sich diese Auflösungen von Sensor zu Sensor. Wichtig ist, dass wegen dieser Unterschiede in den Auflösungen differente Anwendungsmöglichkeiten der einzelnen Sensoren zur Kartierung und zum Monitoring der Biodiversität, entstehen.

Im Folgenden werden die Potenziale und Limitationen fernerkundlicher Sensoren zur Kartierung der physiognomischen Haupteinheiten Wald, Grasland und Heideland tabellarisch dargestellt und beispielhaft mit einem Fallbeispiel erläutert. Dabei werden die Sensoren nach der geometrischen (räumlichen) Auflösung in sehr hohe ( $> 3$  m), hohe (3 – 30 m), mittlere (30 – 300 m) und niedrige ( $< 300$  m) geometrische Auflösung klassifiziert (Tab. 8).

**Abbildung 11:** Schema zur Ableitung von Informationen aus FE-Daten. Aus fernerkundlichen Informationen (oberste Ebene) kann die Landbedeckung abgeleitet werden. Durch Hinzuziehen von Biotopkarten oder Artenverteilungskarten, kann die Ökosystemverteilung oder die Habitat- Nutzung einer Spezies dargestellt werden.

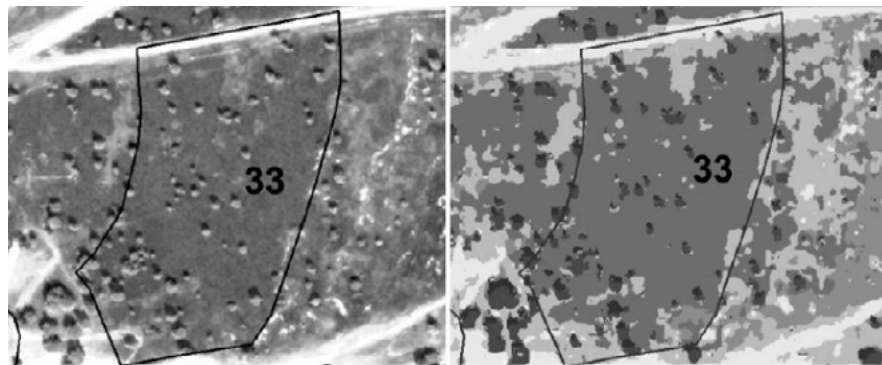


Quelle: Pettorelli, 2018.

**Abbildung 12:** Kartierung einer Heidefläche in Jüterbog (Brandenburg) und Berechnung der Bedeckungsgrade der einzelnen Klassen. Basierend auf einer Quickbird-Szene (pansharped; 0,61 m).

**Quickbird-Szene,  
pansharped**

**Klassifikationsergebnis  
mit Habitatgrenze**



■	percentage	Nr. 33
■	wood	5.5%
■	dry heath (calluna)	73.4% (G)
■	dry grassland (cryptogam rich)	2.2% (G)
■	open sand (incl. dry grassland, cryptogam poor)	4.1%
■	grassland	16.5% (G)
■	shadow	3.4%
■	area (m <sup>2</sup> )	15618.5

Quelle: Förster, 2008.



**Tabelle 8:** Zusammenstellung der fernerkundlichen Sensoren und ihre Nutzung zur Detektion der physiognomischen Haupteinheiten (Level 1) und zur Detektion von Habitaten innerhalb der physiognomischen Haupteinheiten Wald, Grasland u. Heide (Level 2). Das Bewertungsschema gliedert sich wie folgt: – = nicht geeignet; +/- = mehr oder weniger geeignet; + = geeignet; ++ = empfohlen.

	geringe räumliche, aber hohen temporalen Auflösung (MODIS, AVHRR)	mittlere bis hohe räumliche u. temporale Auflösung (Landsat, Spot)	sehr hohe räumliche Auflösung (Luftbilder, IKONOS, WorldView)	Hyperspektral (HyMap, CAIS, Hyperion)	Laserscanning (LiDAR)	Radar (Sentinel-1, TerraSAR-X)
<i>Level 1</i> Detektion der physiognomischen Haupteinheiten: <i>Wald, Grasland, Heide</i>	++ nur in Landschaften mit großräumig zusammenhängenden Vegetationseinheiten, oder unter Einbezug von Zusatzinformationen	++ multitemporale Analysen, sehr gute Informationsdichte unter Einbezug von Zusatzinformationen	++	++	++	+ außer Wasserflächen
<i>Level 2</i> Detektion von Habitaten innerhalb der physiognomischen Klasse <i>Wald</i>	+/- Differenzierung zw. Laub-, Nadel- u. Mischwald; Unterscheidung zw.: Immergrünen/Laubwäldern, Dichte/ fragmentierte Bestände; Unter Einbezug von Zusatzinformation 25 Baumarten klassifiziert	+ Differenzierung zw. Haupteinheiten innerhalb des Waldes; Multitemporale Analysen: Identifikation der Dominanten Arten	++ Baumarten Klassifikation; Unterscheidung zw. Struktur u. Altersklassen; Multitemporale Analysen	++	+/- nur in Kombination mit Multi- oder Hyperspektralen Daten zur Klassifikation von Baumarten geeignet. ++ Waldstrukturparameter	+/- nicht zur Identifikation von Baumarten geeignet, da Informationen aus Radardaten komplementär zu multispektralen Daten stehen
<i>Level 2</i> Detektion von Habitaten innerhalb der physiognomischen Klasse <i>Grasland</i>	-	++ multisaisonale Analyse: Unterscheidung verschiedener Managementpraktiken	+ multisaisonale Analyse: Graslandtypen mit unterschiedlichen landwirtschaftlichen Nutzungstypen	++ Detektion von floristischen Gradienten. Detektion von homogenen Bedeckungstypen	-/+	+ Unterscheidung von natürlichem u. genutztem Grasland; Intensität der Mahd
<i>Level 2</i> Detektion von Habitaten innerhalb der physiognomischen Klasse <i>Heide</i>	-	++ multitemporale Analyse: Differenzierung zw. Heidearten	++ unter Einbezug von phänologischen Informationen Unterscheidung zw. Immergrünen und laubabwerfenden Heideflächen	++ Unterscheidung von trockenen u. feuchten Heidehabitaten, Heideklassen u. Altersklassen	+/- Nur nützlich, wenn sich die Habitate in Struktur oder Bestandsdichte unterscheiden	

Erstellt nach CORBANE ET AL. 2015 (enthält Quellen der einzelnen Felder).

Tabelle 8 stellt die Nutzbarmachung unterschiedlicher fernerkundlicher Sensoren zur Kartierung von Habitaten in unterschiedlichen physiognomischen Haupteinheiten dar. Die hier abgebildete Tabelle ist an einen Review-Artikel von Corbane et al. 2015 angelehnt, aus dem auch die Quellen zur Tabelle entnommen werden können. An dieser Stelle soll auf Review-Artikel hingewiesen werden, die fernerkundliche Methoden zur Detektion der in Tab. 8 genannten physiognomischen Haupteinheiten vertiefen.

Fassnacht, et al. 2016 stellen in einem zusammenfassenden Artikel die Potenziale und Limitationen der Baumartenklassifikation innerhalb von Wäldern via Fernerkundung dar. Guo et al., 2017 zeigen in ihrem Review-Artikel die Möglichkeiten sieben unterschiedlicher Sensoren zur Detektion und zum Monitoring von Feuchtgebieten (Wetlands). Darüber hinaus stellen Ali et al., 2016 einen Review-Artikel zum Management und zur Bestimmung der biophysikalischen Parameter von Grasflächen zu Verfügung. Hedley et al., 2017 geben einen Überblick zur Kartierung und zum Monitoring benthischer Habitats (Habitats am Meeresboden) und Korallenriffen mittels Fernerkundungsdaten.

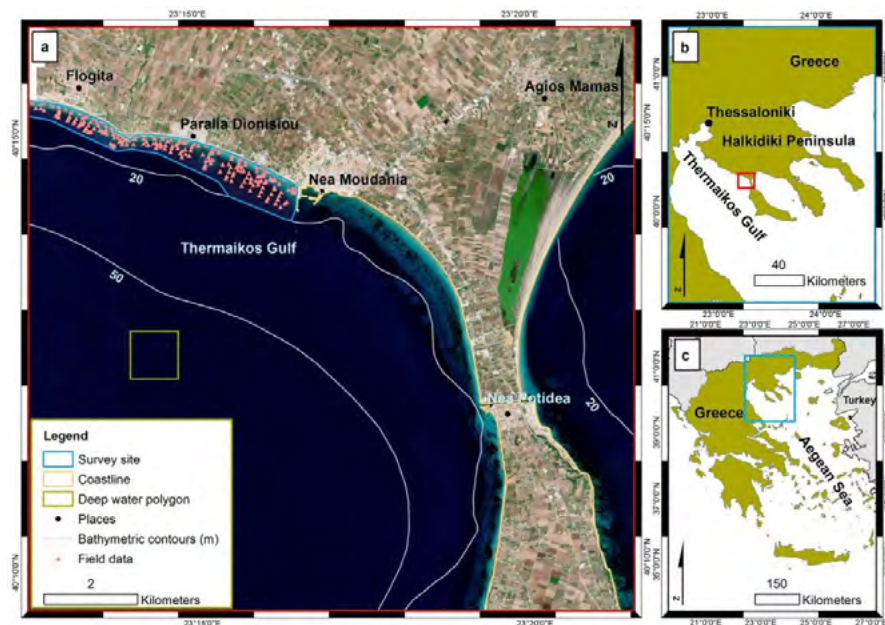
## 5.1.2 Fallbeispiele

### **Kartierung mediterraner Seegraswiesen unter Verwendung von Sentinel-2-Daten.**

Obwohl das Mittelmeer nur 0,82 % der gesamten Meeresoberfläche ausmacht, beheimatet es 18 % (17.000) aller bekannten marinen Arten (COLL ET AL., 2010). Dazu gehören auch *Seegraswiesen*, die wichtige Ökosystemfunktionen bereitstellen, wie zum Beispiel die Minderung der Küstenerosion (durch Dämpfung der Wellen) und die Speicherung von Kohlenstoff (sog. „blue carbon“). Zudem sind Seegraswiesen eine „Kinderstube“ (Schutzraum) für viele Meerestiere (CAMPAGNE ET AL., 2015). Als dominante Seegrasart innerhalb des Mittelmeers wurde die Art *Posidonia oceanica* identifiziert, die bis zu tausend Jahre alt werden kann (Traganos & Reinartz, 2017).

Das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Studie beschränkt sich auf den Süd-Osten des Golfs von Thermaikos (Abb., 13). Der Golf von Thermaikos weist an seinen Küsten eine hohe Wassertransparenz sowie einen sanften Uferabfall auf. Überdies wurde die Region als einer der größten Hot Spots der Biodiversität innerhalb des Mittelmeers identifiziert

**Abbildung 13:** Lage des Untersuchungsgebiets a) im Golf von Thermaikos, b) auf der Halkidiki Halbinsel und c) Ägäischen See. Das in a) dargestellte Satellitenbild ist eine Sentinel-2 atmosphären-korrigierte Echtfarbendarstellung. Im Nord-Nord-Osten der Szene befindet sich das Untersuchungsgebiet, abgebildet zusammen mit den Felddaten. Quelle: Traganos & Reinartz 2017



Quelle: Traganos & Reinartz 2017

(CAMPAGNE ET AL., 2015). Weitere Informationen zu dem Untersuchungsgebiet können aus TRAGANOS & REINARTZ, 2017 entnommen werden.

Als Datengrundlage der Studie diente eine Satellitenbildszene des Sentinel-2A-Satelliten, der den MSI (Multi Spectral Imager) mitführt. Die verwendete Szene wurde am 09.09.2016 detektiert (Abb., 13) und über den Sentinel Scientific Data Hub, der unlimitierten Zugang zu allen Sentinel-2A Level-1C (L1C) Daten bereitstellt, heruntergeladen. Jedes einzelne L1C-Produkt deckt eine Fläche von 100 km<sup>2</sup> ab und ist bereits ortho-rektifiziert (frei von geometrischen Verzerrungen) und georeferenziert (einem Koordinatensystem zugeordnet).

Des Weiteren wurden die atmosphärischen Störeinflüsse (Kap. 3.4.1) durch die Verwendung der ATCOR 9.1.0 Software korrigiert und so die „Bottom-of-the-atmosphere – water-surface-reflections“ berechnet (Abb. 14; B).

**Abbildung 14:** Ergebnisse der Vorprozessierung.

A) Sentinel-2A-Aufnahme ohne Korrektur.

B) S2A-Aufnahme mit Atmosphärenkorrektur.

C) S2A-Aufnahme mit Atmosphären- und Wassersäulenkorrektur.

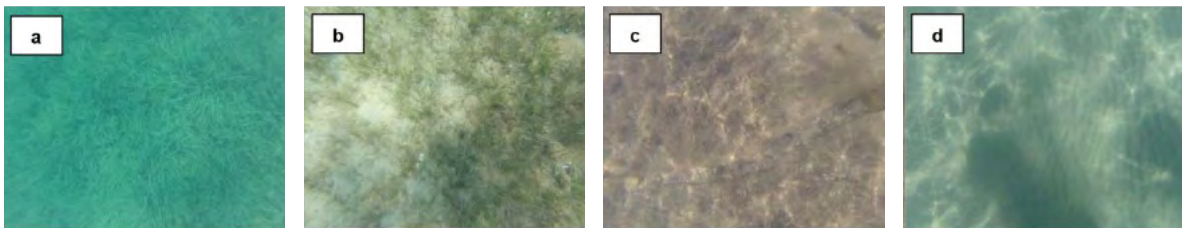


Quelle: Traganos & Reinartz 2017

Da hier allerdings Habitate kartiert werden sollen, die unterhalb der Wasseroberfläche liegen, müssen die Störeinflüsse der Wassersäule ebenfalls korrigiert werden. Die Störeinflüsse der Wassersäule korrelieren mit der Wassertiefe und der Wassertransparenz. Da das Untersuchungsgebiet eine hohe Wassertransparenz aufweist, können die Störeinflüsse der Wassersäule nach der Formel von Maritorena et al., 1994 korrigiert werden. Dabei müssen der Wassertiefeneffekt, eine Meeresbodensubstratkorrektur (heller Sand reflektiert mehr Strahlung als eine „dunklere“ Seegraswiese) und die Reflexion einer Wasserfläche, durch die die Strahlung den Meeresboden nicht erreicht, berechnet werden (Abb. 14 und 15; C).

Um die im Folgenden beschriebenen Klassifikationsverfahren zu validieren und zu trainieren, wurden insgesamt 228 Punkte innerhalb des Untersuchungsgebietes auf dem Boot angefahren, um an diesen Punkten jeweils Proben (Fotos der Habitatklasse und GPS-Koordinaten) zu entnehmen (Abb., 1a; Field Data). So konnten vier differente Habitate festgestellt werden: *Posidonia oceanica* Seegras, *Cymodocea nodosa* Seegras, photophile Algen auf Steinen und Sand (Abb. 15).

**Abbildung 15:** Fotos der Habitate im Untersuchungsgebiet.  
a) dichte *Posidonia oceanica*-Wiese, b) *Cymodocea nodosa*-Wiese, c) photophile Algen und d) Sand.



Quelle: Traganos & Reinartz 2017.

Zur Evaluation des besten Klassifikationsergebnisses wurden drei Klassifikationsverfahren getestet: i) die Maximum-likelihood-Methode (Mxl) und zwei Verfahren des maschinellen Lernens ii) Support Vector Machines (Svm) und iii) Random Forest (Rf). Als Trainingsdaten für die Klassifikationsverfahren wurden 85 der insgesamt 228 im Feld gesammelten Daten verwendet. Um das beste Klassifikationsergebnis zu bestimmen, wurde der Sentinel-Datensatz jeweils ohne jegliche Korrekturen klassifiziert, d. h.: nur atmosphärenkorrigiert, nur wassersäulenkorrigiert und unter Einbezug aller Korrekturen der drei oben genannten Klassifikationsalgorithmen.

Um die Güte der Klassifikationen zu testen, wurde ein sog. Accuracy Assessment (Genauigkeitsprüfung) durchgeführt. Dabei werden die in situ gesammelten Daten (203 Punktaufnahmen), mit jenen klassifizierten Daten überlagert und verglichen. Die Mxl-Klassifikation weist die schlechtesten Ergebnisse auf. Demgegenüber stehen die Ergebnisse der Rf- und Svm-Klassifikation. Hier erreichen beide Verfahren eine Overall-Accuracy von 94 %. Allerdings zeigt die Svm-Klassifikation bessere Ergebnisse in der Detektion der Seegraswiesen *C. nodosa* und *P. oceanica* (Abb. 15; iii). Die Error-Matrizen der Klassifikationen können aus Traganos & Reinartz 2017 entnommen werden.



**Abbildung 16:** Die drei besten Klassifikationsergebnisse.

i) SMV; ohne Korekturen.

ii) Random-Forest; bottom-of-the-Atmosphere-reflectance.

iii) SVM; all corrections applied.



Quelle: Traganos & Reinartz 2017

## 5.2 Fernerkundung für das Monitoring von Habitaten und Ökosystemen

Der ökologische Zustand von Habitaten und Ökosystemen kann durch folgende Parameter bewertet werden: Struktur (horizontale und vertikale Struktur), Zusammensetzung (Anwesenheit von typischen Arten; hauptsächlich Flora), Funktion (z. B. Netto-Primärproduktion) (Noss, 1990). Diese Parameter können durch die Verwendung der Satellitenbildfernerkundung in Kombination mit Felddaten zum Training der Algorithmen und zur Validierung des Ergebnisses als kontinuierliche Variablen abgeleitet werden. So ist es zum Beispiel möglich, die Biomasse (struktureller Parameter), die Artenvielfalt (Parameter der Zusammensetzung) oder Veränderungen der Phänologie (Funktion) aus Satellitendaten zu berechnen (Corbane et al., 2015; Pettorelli et al., 2018).

### **Struktur**

Die Struktur eines Ökosystems (oder Habitats) weist zwei Komponenten auf: die horizontale und die vertikale Struktur. Dabei ist es wichtig, nicht zu vergessen, dass Ökosysteme selten als einzelne homogene Flächen auftreten (vertikale Struktur), sondern viel häufiger als Flickenteppiche (engl. Patches), die mit gleichen Ökosystemeigenschaften in der Landschaft verteilt sind. Die sind oft durch anthropogene Fragmentierung entstanden (Sayre & Hansen, 2017). Die horizontale Struktur eines Ökosystems beschreibt die flächenhafte Ausdehnung des Ökosystems innerhalb einer Landschaft.

Mit einer Veränderungsanalyse (Change Detection) zwischen zwei oder mehr klassifizierten Satellitensystemen kann die Veränderung der Ökosystemausdehnung beobachtet werden (Anhang 2; thematische Variablen).

Basierend auf zwei Landsat-TM-Szenen (1989 u. 2000) haben NAGENDRA ET AL., 2008 die Fragmentierung von Wäldern in einer nepalesischen Provinz in vier unterschiedlichen Managementsystemen (1. Nationalpark, 2. Parkpufferzone mit Nutzung durch die lokale Bevölkerung, 3. Gemeinschaftswald, 4. Privatbesitz unter landwirtschaftlicher Nutzung) untersucht. Ihre Analyse hat gezeigt, dass die Community-basierten Ansätze der Bewirtschaftung die Abholzung und Fragmentierung aufhalten und sogar zu rückläufigen Trends führen können.

**Abbildung 17:** Global Ecological Land Units. Beispiel: Afrika.



*Quelle: Sayre et al. 2014*

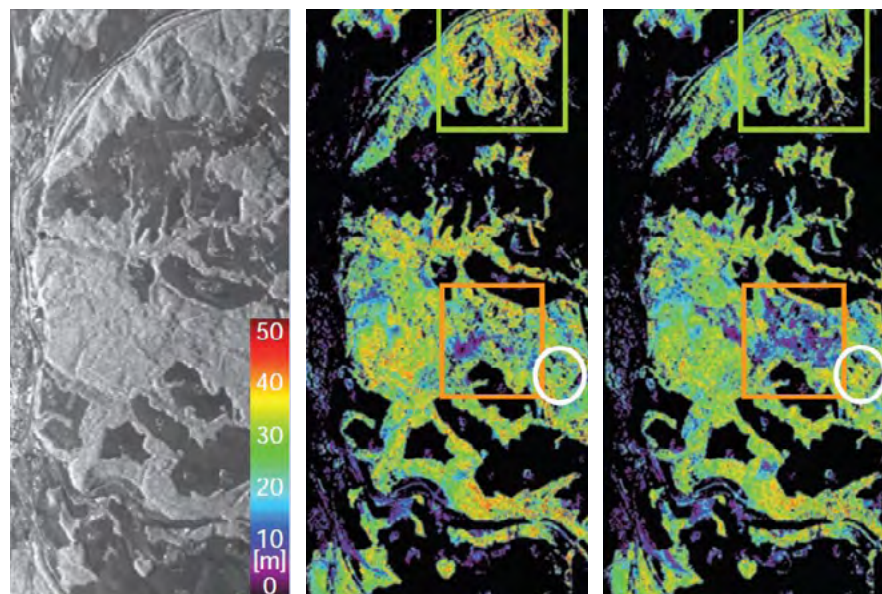
Die GEO (Group on Earth Observation) Global Mapping Initiative hat eine Karte der globalen terrestrischen Ökosysteme mit 3.639 Global Ecological Land Units und einer Auflösung von 250 m in einer standardisierten Form erstellt (Abb. 13). Die Karte soll im Turnus von 5 Jahren neu erstellt werden und so eine qualitative Aussage über die horizontale Veränderung der Ökosystemstruktur auf der gesamten Welt erlauben (Sayre et al., 2014).

Die vertikale Struktur von Ökosystemen (oder Habitaten) bezieht sich auf die Höhe der anwesenden Vegetation. Wie bereits in Kapitel 3.3.2 erwähnt, sind aktive Sensoren (Radar und LiDAR) sensitiv gegenüber der dreidimensionalen Oberflächenstruktur und werden oft zur Charakterisierung der Vegetationshöhe verwendet. Kurzwellige Radar-Systeme

(X- und C-Band; ~ 2 cm und ~ 6 cm Wellenlänge) durchdringen die Vegetation/die Baumkronen nur partiell und werden hauptsächlich an Blättern und Ästen gestreut, weshalb sich diese Wellenlängenbereiche nicht für die Bestimmung der Vegetationshöhe eignen. Demgegenüber stehen die längeren Wellenlängenbereiche (L- und P-Band; ~23 cm und ~60 cm Wellenlänge). Sie durchdringen die oberste Blattschicht, werden hauptsächlich an Baumstämmen gestreut und eignen sich zur Bestimmung der Ökosystemstruktur und Vegetationshöhe (Mücher et al., 2017; Moreira et al. 2013). Auch mit flugzeuggestützten und Unmanned Airborne Vehicle (UAV) LiDAR-Sensoren kann die Vegetationsstruktur hochaufgelöst gemessen werden.

EITEL ET AL. 2016 & MÜCHER ET AL. 2017 geben eine sehr gute Zusammenfassung von LiDAR-Sensoren und ihrer Anwendung in der Ökologie.

**Abbildung 18:** Pol-InSAR Baumhöhenkarte, Traunstein Deutschland. (Von links nach rechts) L-Band HV-Intensitäts-SAR-Aufnahme; berechnete Baumhöhe 2003; berechnete Baumhöhe 2008; Grüne-Box: Holzfällungen zwischen 2003–2008. Orange-Box: Windbruch durch Orkan Kyrill im Jahr 2007. Weißer-Kreis: Baumwachstum, zwischen 3–5 m.



Quelle: MOREIRA ET AL. 2013

### **Zusammensetzung**

Zur Charakterisierung der Artenzusammensetzung innerhalb von Ökosystemen (oder Habitaten) werden Artenverteilungsmodelle verwendet. Artenverteilungsmodelle umfassen die Analyse empirischer Zusammenhänge zwischen georeferenzierten Fundpunkten einer Art und Umweltvariablen mit dem Ziel, räumlich kontinuierliche Vorhersagen zur Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der jeweiligen Art zu treffen. Mittels Fernerkundung können Umweltvariablen mit Bezug zu den biophysikalischen Eigenschaften der Landoberfläche (Niederschlag, Temperatur, Höhe über Normal Null etc.) in hohen räumlichen Auflösungen abgeleitet werden (Cord, 2012). He et al., 2015 geben eine Übersicht zu den aus Fernerkundungsdaten ableitbaren Umweltvariablen. So konnten Saatchi et al., 2008 auf der Basis fernerkundlich ermittelter Umweltvariablen des MODIS Leaf Area Index (LAI), auf der QSCAT Rückstreuung (Oberflächenrauigkeit; Radar), auf dem SRTM Digitalen Höhenmodell (DEM) und auf den TRMM Niederschlagsdaten zusammen mit kartierten Feldpunkten von 5 Baumarten, die Verteilung dieser Baumarten im gesamten Amazonasbecken modellieren. Eine gute Zusammenfassung der Artenverteilungsmodelle und ihrer Anwendung in der Biodiversitätsforschung bietet Anderson et al., 2018.

### **Ökosystemfunktionen**

In der einschlägigen Literatur existieren eine Reihe von Definitionen für den Begriff der Ökosystemfunktion. Dabei fehlt es oft an einer klaren Abgrenzung zwischen ökologischen bzw. ökosystemaren Prozessen und Ökosystemdienstleistungen zum Begriff der Ökosystemfunktion (Pettorelli et al., 2017). Hier gilt folgende Definition der Ökosystemfunktion: „Ecosystem functions are attributes related to the performance of an ecosystem that is the consequence of one or of multiple ecosystem processes“ (Lovett et al., 2006).

Die Satellitenbildfernerkundung ist durch die hohe geometrische und temporale Auflösung sowie die globale Abdeckung ein geeignetes Tool, um die Veränderung von Ökosystemfunktionen zu detektieren. Pettoelli et al., 2017 erarbeiten zum einen eine Typologie der unterschiedlichen Ökosystemfunktionen und den zugehörigen verschiedenen ökologischen und ökosystemaren Prozessen. Zum anderen stellen sie eine Tabelle (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) bereit, die frei verfügbare Datenprodukte (prozessierte Satellitendatensätze) und deren Nutzen für das Monitoring von Ökosystemfunktionen listen (Anhang 3).



## 5.3 Bedrohungen für die Biodiversität

Eine Reihe von Studien zeigen die großen Potenziale von Fernerkundung zur Detektion anthropogener Bedrohungen für die Biodiversität. Tabelle 9 gibt eine beispielhafte Übersicht der mit fernerkundlichen Verfahren detektierbaren Bedrohungen von Biodiversität.

**Tabelle 9:** Fernerkundung zur Detektion der Bedrohungen für die Biodiversität.

Environmental challenge	Sensor	Reference
Species distribution mapping	ETM+ and Quickbird	Fretwell <i>et al.</i> (2012)
Invasive species detection	TM & ETM+	Bradley & Mustard (2006)
Invasive species detection	IKONOS	Fuller (2005)
Invasive species detection	Hyperion	Pengra, Johnston & Loveland (2007)
Migration route prediction	AVHRR	Boone, Thirgood & Hopcraft (2006)
Informing reintroductions	AVHRR	Freemantle <i>et al.</i> (2013)
Overgrazed areas mapping	AVHRR	Otterman <i>et al.</i> (2002)
Mangrove coastal retreat monitoring	PALSAR	Cornforth <i>et al.</i> (2013)
Fire monitoring	MODIS	Justice <i>et al.</i> (2002)
Assessing fire risk	AVHRR	Maselli <i>et al.</i> (2003)
Drought probability assessment	AVHRR	Rojas, Vrieling & Rembold (2011)
Flood monitoring, mapping and management	RADARSAT	Hoque <i>et al.</i> (2011)
Oil slick detection and monitoring	RADARSAT, MODIS, AVHRR	Klemas (2010)
Air quality assessment	GOME-2, MODIS & MOPITT	Hao <i>et al.</i> (2011)
Insect-induced defoliation mapping	MODIS	Eklundh, Johansson & Solberg (2009)
Land cover change monitoring	TM, ETM, ETM+	Hansen & Loveland (2012)
Deforestation	MODIS & ETM+	Briant, Gond & Laurance (2010)
Habitat fragmentation	TM	Heilman <i>et al.</i> (2002)
Land degradation	AVHRR	Prince, Becker-Reshef & Rishmawi (2009)
Forest degradation mapping	MODIS	Garonna <i>et al.</i> (2009)
Forest degradation mapping	HRG	Souza <i>et al.</i> 2003
Urbanization tracking	DMSP/OLS	Zhang & Seto (2011)
Urbanization tracking	SAR	Taubenbock <i>et al.</i> (2012)
Natural resource extraction detection	ETM+	Duncan <i>et al.</i> (2014)
Natural resource extraction detection	ATSR	Casadio, Arino & Serpe (2011)
Tracking the effect of climate change on ecosystem functioning	AVHRR	Pettorelli <i>et al.</i> (2012)
Carbon stock mapping	GLAS, MODIS, SRTM, QSCAT	Saatchi <i>et al.</i> (2011)
SRS-based platform for the global monitoring of protected areas	MODIS, HRG, Landsat	Dubois <i>et al.</i> (2011)

ATSR, Along Track Scanning Radiometer; AVHRR, Advanced Very High Resolution Radiometer; DMSP/OLS, U.S Air Force Defense Meteorological Satellites Program/Operational Linescan System; (E)TM, (Enhanced) Thematic Mapper; GLAS, Geoscience Laser Altimeter System; GOME-2, Global Ozone Monitoring Experiment 2; HRG, high-resolution geometrical; MODIS, Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer; MOPITT, Terra's Measurements of Pollutants in the Troposphere; PALSAR, Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar; QSCAT, Quick Scatterometer; SAR, Synthetic Aperture Radar; SRTM, Shuttle Radar Topography Mission.

Quelle: Pettorelli *et al.*, 2014.



### Exkurs: Essenzielle Biodiversitätsvariablen

Das internationale Forschungsnetzwerk der Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network (*GEO BON*) entwickelt die sog. „Essenziellen Biodiversitäts-Variablen“ (Essential biodiversity variables; EBV). Das ist eine Auswahl von Variablen, auf deren Basis Indikatoren berechnet werden sollen, mit denen sich der weltweite Zustand der Biodiversität bewerten lässt (Pereira et al. 2013, Abb. 19). Durch die Entwicklung der EBV wird versucht, die komplexe Natur der Biodiversität auf den unterschiedlichen biologischen Ebenen (Gene, Arten, Populationen, Ökosysteme) und deren Attribute (Zusammensetzung, Struktur, Funktion) zu erfassen und deren Veränderung zu bewerten (Pettorelli et al. 2016, Tab. 11). Das EBV-Konzept wurde von Pereira et al. 2013 vorgestellt und beinhaltet ein Kandidaten-Set von 25 EBV (Tab. 10).

**Table 10:** Essenzielle Biodiversitäts-Variablen (EBVs). Blau markiert fernerkundlich erfassbare EBV`s

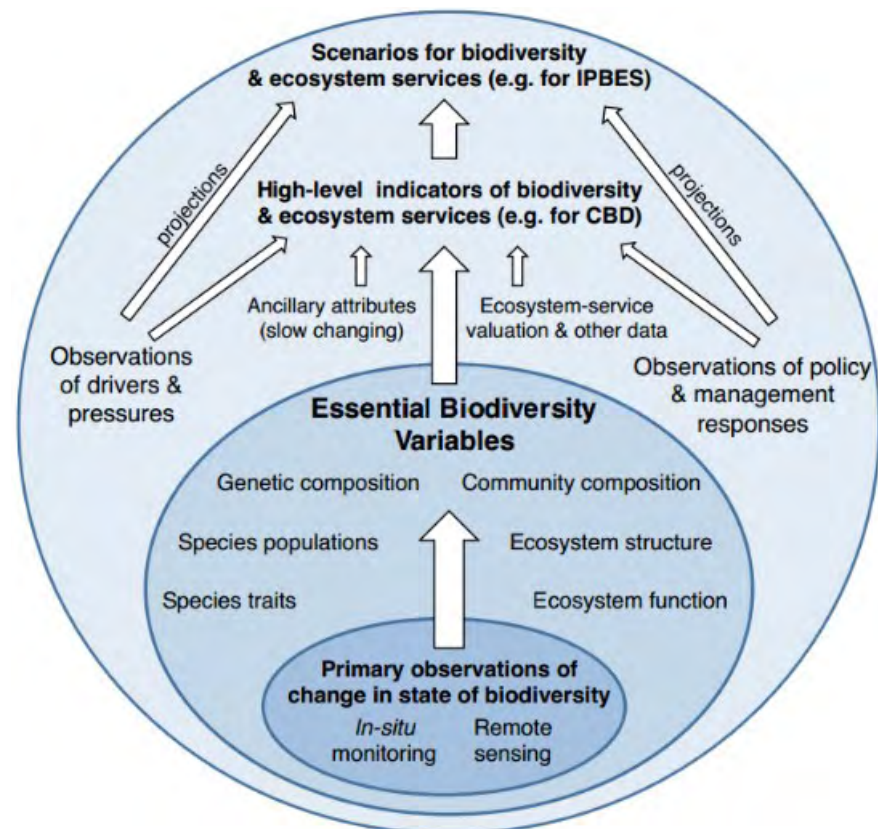
EBV-Hauptkategorie	Essenzielle Biodiversitäts-Variable
<b>Genetische Zusammensetzung</b>	Gemeinsame Abstammung, allelische Diversität, <b>genetische Differenzierung der Arten</b> , Vielfalt an Rassen und Sorten
<b>Populationen</b>	<b>Artenverbreitung</b> Populationsdichte Populationsstruktur nach Alters-/Größenklassen
<b>Arteneigenschaften</b>	<b>Phänologie</b> <b>Körpermaße</b> <b>Ausbreitungspotential</b> Migrationsverhalten demographische Eigenschaften <b>physiologische Merkmale</b>
<b>Artenzusammensetzung</b>	<b>taxonomische Diversität</b> <b>funktionale Diversität</b>
<b>Ökosystemfunktionen</b>	<b>Nettoprimärfunktion</b> <b>Sekundärproduktion</b> Nährstoffretention <b>Störungsregime</b>
<b>Ökosystemstruktur</b>	<b>Habitatstruktur</b> , <b>Fläche und Fragmentierung des Ökosystems</b> <b>Zusammensetzung des Ökosystems nach Funktionstypen</b>

Quelle: Pereira et al. 2013; <https://geobon.org/ebvs/what-are-ebvs/>

### Satellitengestützte EBV`s

Die in Tabelle 10 gelb markierten EBV lassen sich aus fernerkundlichen Daten ableiten. Hier bezieht sich der Terminus „fernerkundlich“ ausschließlich auf Daten, die von satellitengestützten Systemen aufgenommen werden und nicht von flugzeug- oder drohngestützte Systemen. Satellitengestützte Fernerkundungssysteme bieten zurzeit die einzige Möglichkeit, Daten in fester räumlicher und kontinuierlicher zeitlicher Auflösung zu erheben. Dies vereinfacht die operationelle Implementierung der satellitengestützten EBV. Außerdem kann zwischen „direkten“ und „indirekten“ satellitengestützten EBV unterschieden werden. Als indirekte EBV werden Variablen bezeichnet, zu deren Berechnung weitere abiotische oder In-situ Daten nötig sind (CBD 2017; Skidmor et al. 2015).

Abbildung 19: Das EBV Framework.



Quelle: Pereira et al. 2013.

## Literaturverzeichnis

- A Layman's Interpretation Guide to L-band and C-band Synthetic Aperture Radar data. (2018).
- Ali, I., Cawkwell, F., Dwyer, E., Barrett, B., & Green, S. (2016). Satellite remote sensing of grasslands: From observation to management. *Journal of Plant Ecology*, 9(6), 649–671. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw005>
- Anderson, K., Ryan, B., Sonntag, W., Kavvada, A., & Friedl, L. (2017). Earth observation in service of the 2030 Agenda for Sustainable Development. *Geo-Spatial Information Science*, 20(2), 77–96. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1333230>
- Braun, A., & Hochschild, V. (2017). Potential and Limitations of Radar Remote Sensing for Humanitarian Operations. *GI\_Forum*, 1, 228–243. [https://doi.org/10.1553/giscience2017\\_01\\_s228](https://doi.org/10.1553/giscience2017_01_s228)
- Coll, M., Piroddi, C., Steenbeek, J., Kaschner, K., Lasram, F. B. R., Aguzzi, J., Ballesteros, E., Bianchi, C. N., Corbera, J., Dailianis, T., Danovaro, R., Estrada, M., Frogliia, C., Galil, B. S., Gasol, J. M., Gertwage, R., Gil, J., Guilhaumon, F., Kesner-Reyes, K., ... Voultsiadou, E. (2010). The biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, patterns, and threats. In *PLoS ONE* (Vol. 5, Issue 8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011842>
- Corbane, C., Lang, S., Pipkins, K., Alleaume, S., Deshayes, M., García Millán, V. E., Strasser, T., Vanden Borre, J., Toon, S., & Michael, F. (2015a). Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 37, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.11.005>
- Corbane, C., Lang, S., Pipkins, K., Alleaume, S., Deshayes, M., García Millán, V. E., Strasser, T., Vanden Borre, J., Toon, S., & Michael, F. (2015b). Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 37(May), 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.11.005>
- Dubovyk, O. (2017a). The role of Remote Sensing in land degradation assessments: opportunities and challenges. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 601–613. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1378926>
- Dubovyk, O. (2017b). The role of Remote Sensing in land degradation assessments: opportunities and challenges. In *European Journal of Remote Sensing* (Vol. 50, Issue 1, pp. 601–613). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1378926>
- Fassnacht, F. E., Latifi, H., Stereńczak, K., Modzelewska, A., Lefsky, M., Waser, L. T., Straub, C., & Ghosh, A. (2016). Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. In *Remote Sensing of Environment* (Vol. 186, pp. 64–87). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.013>
- Genchev, S. (2018). REMOTE SENSING FOR NATURA 2000 HABITATS-MAPPING AND MONITORING. <https://www.researchgate.net/publication/328355894>
- Ghosh, A., Fassnacht, F. E., Joshi, P. K., & Kochb, B. (2014). A framework for mapping tree species combining hyperspectral and LiDAR data: Role of selected classifiers and sensor across three spatial scales. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26(1), 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.017>
- Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., & Nelson, S. G. (2008). Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. *Sensors*, 8, 2136–2160. [www.mdpi.org/sensors](http://www.mdpi.org/sensors)
- Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. (2017). A review of wetland remote sensing. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 17, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s17040777>
- Hansen, M. C., Krylov, A., Tyukavina, A., Potapov, P. V., Turubanova, S., Zutta, B., Ifo, S., Margono, B., Stolle, F., & Moore, R. (2016a). Humid tropical forest disturbance alerts using Landsat data. *Environmental Research Letters*, 11(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034008>
- Hansen, M. C., Krylov, A., Tyukavina, A., Potapov, P. V., Turubanova, S., Zutta, B., Ifo, S., Margono, B., Stolle, F., & Moore, R. (2016b). Humid tropical forest disturbance alerts using Landsat data. *Environmental Research Letters*, 11(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034008>
- He, K. S., Bradley, B. A., Cord, A. F., Rocchini, D., Tuanmu, M. N., Schmidtlein, S., Turner, W., Wegmann, M., & Pettorelli, N. (2015). Will remote sensing shape the next generation of species distribution models? *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 1(1), 4–18. <https://doi.org/10.1002/rse2.7>

- Hedley, J. D., Roelfsema, C., Brando, V., Giardino, C., Kutser, T., Phinn, S., Mumby, P. J., Barrilero, O., Laporte, J., & Koetz, B. (2018). Coral reef applications of Sentinel-2: Coverage, characteristics, bathymetry and benthic mapping with comparison to Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 216, 598–614. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.014>
- Hedley, J. D., Roelfsema, C. M., Chollett, I., Harborne, A. R., Heron, S. F., Weeks, S. J., Skirving, W. J., Strong, A. E., Mark Eakin, C., Christensen, T. R. L., Ticzon, V., Bejarano, S., & Mumby, P. J. (2016). Remote sensing of coral reefs for monitoring and management: A review. In *Remote Sensing* (Vol. 8, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs8020118>
- Immitzer, M., Atzberger, C., & Koukal, T. (2012). Tree species classification with Random forest using very high spatial resolution 8-band worldView-2 satellite data. *Remote Sensing*, 4(9), 2661–2693. <https://doi.org/10.3390/rs4092661>
- Jongman, R., & Szantoi, Z. (n.d.). Referencing GOF-GOLD (2017) A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring Essential Biodiversity Variables in Tropical Forests with Remote Sensing. Eds: GOF-GOLD & GEO BON. Report version UNCBD COP-13, GOF-GOLD Land Cover Core Editorial Team Mike Gill, Vice-Chair GEO BON / Polar Knowledge Canada. <http://geobon.org/>
- Kuenzer, C., Heimhuber, V., Huth, J., & Dech, S. (2019). Remote sensing for the quantification of land surface dynamics in large river delta regions-a review. *Remote Sensing*, 11(17), 1–43. <https://doi.org/10.3390/rs11171985>
- Kuenzer, C., Ottinger, M., Wegmann, M., Guo, H., Wang, C., Zhang, J., Dech, S., & Wikelski, M. (2014). Earth observation satellite sensors for biodiversity monitoring: potentials and bottlenecks. *International Journal of Remote Sensing*, 35(18), 6599–6647. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.964349>
- Le Toan, T. (2007). Introduction to SAR Remote Sensing Lecture D1La1.
- Lönnqvist, A., Rauste, Y., Molinier, M., & Häme, T. (2010). Polarimetric SAR data in land cover mapping in boreal zone. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(10), 3652–3662. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2048115>
- M.V.K. Sivakumar, P.S. Roy, K. Harmsen, S. K. S. (2004). Satellite Remote Sensing and GIS Applications in. 1–423. [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/publications/AGM8\\_en.php](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/publications/AGM8_en.php)
- Maritorena, S., Morel, A., & Gentili, B. (1994). Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: Influence of water depth and bottom albedo. In *Limnol. Oceanogr* (Vol. 39, Issue 7).
- Martensson, U. (2011). Introduction to Remote Sensing and Geographical Information Systems. Department of Physical Geography and Ecosystems Sciences, 55.
- Melin, M., Shapiro, A., Glover-Kapfer, P. 2007. LiDAR for ecology and conservation – WWF Conservation Technology Series (3)
- Mohan, S. (2013). Radar Remote Sensing for Earth and Planetary Science. In *International Journal Of Scientific & Engineering Research* (Vol. 4). <http://www.ijser.org>
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1), 6–43. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>
- Nagendra, H., Lucas, R., Honrado, J. P., Jongman, R. H. G., Tarantino, C., Adamo, M., & Mairota, P. (2013). Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators*, 33, 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.014>
- Paganini, M., Petiteville, I., Ward, S., Dyke, G., Steventon, M., & Harry, J. (2018). → SATELLITE EARTH OBSERVATIONS IN SUPPORT OF THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS Special 2018 Edition ESA-EOGB (Earth Observation Graphic Bureau) SATELLITE EARTH OBSERVATIONS IN SUPPORT OF THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS Part I: Satellite Data Supporting the SDGs.
- Palace, A. (2008). Remote sensing for Natura 2000. October.
- Pettorelli, N., Laurance, W. F., O'Brien, T. G., Wegmann, M., Nagendra, H., & Turner, W. (2014a). Satellite remote sensing for applied ecologists: Opportunities and challenges. In *Journal of Applied Ecology* (Vol. 51, Issue 4, pp. 839–848). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12261>

- Pettorelli, N., Laurance, W. F., O'Brien, T. G., Wegmann, M., Nagendra, H., & Turner, W. (2014b). Satellite remote sensing for applied ecologists: Opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, 51(4), 839–848. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12261>
- Pettorelli, N., Safi, K., & Turner, W. (2014a). Satellite remote sensing, biodiversity research and conservation of the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1643). <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0190>
- Pettorelli, N., Safi, K., & Turner, W. (2014b). Satellite remote sensing, biodiversity research and conservation of the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1643). <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0190>
- Pettorelli, N., Schulte to Buehne, H., Shapiro, A., & Glover-Kapfer, P. (2018). Satellite Remote Sensing Conservation Technology 4 Satellite Remote Sensing. *Conservation Technology Series WWF-UK*, 4.
- Pettorelli, N., Schulte to Bühne, H., Tulloch, A., Dubois, G., Macinnis-Ng, C., Queirós, A. M., Keith, D. A., Wegmann, M., Schrod, F., Stellmes, M., Sonnenschein, R., Geller, G. N., Roy, S., Somers, B., Murray, N., Bland, L., Geijzendorffer, I., Kerr, J. T., Broszeit, S., ... Nicholson, E. (2018). Satellite remote sensing of ecosystem functions: opportunities, challenges and way forward. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(2), 71–93. <https://doi.org/10.1002/rse2.59>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 20, Issue 9, pp. 503–510). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Pettorelli, N., Wegmann, M., Skidmore, A., Múcher, S., Dawson, T. P., Fernandez, M., Lucas, R., Schaepman, M. E., Wang, T., O'Connor, B., Jongman, R. H. G., Kempeneers, P., Sonnenschein, R., Leidner, A. K., Böhm, M., He, K. S., Nagendra, H., Dubois, G., Fatoyinbo, T., ... Geller, G. N. (2016a). Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2(3), 122–131. <https://doi.org/10.1002/rse2.15>
- Pettorelli, N., Wegmann, M., Skidmore, A., Múcher, S., Dawson, T. P., Fernandez, M., Lucas, R., Schaepman, M. E., Wang, T., O'Connor, B., Jongman, R. H. G., Kempeneers, P., Sonnenschein, R., Leidner, A. K., Böhm, M., He, K. S., Nagendra, H., Dubois, G., Fatoyinbo, T., ... Geller, G. N. (2016b). Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2(3), 122–131. <https://doi.org/10.1002/rse2.15>
- Potapov, P. V., Dempewolf, J., Talero, Y., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Vargas, C., Rojas, E. J., Castillo, D., Mendoza, E., Calderón, A., Giudice, R., Malaga, N., & Zutta, B. R. (2014a). National satellite-based humid tropical forest change assessment in Peru in support of REDD+ implementation. *Environmental Research Letters*, 9(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124012>
- Potapov, P. V., Dempewolf, J., Talero, Y., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Vargas, C., Rojas, E. J., Castillo, D., Mendoza, E., Calderón, A., Giudice, R., Malaga, N., & Zutta, B. R. (2014b). National satellite-based humid tropical forest change assessment in Peru in support of REDD+ implementation. *Environmental Research Letters*, 9(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124012>
- Proença, V., & Pereira, H. M. (2017). Comparing Extinction Rates: Past, Present, and Future. In *Reference Module in Life Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809633-8.02128-2>
- Randin, C. F., Ashcroft, M. B., Bolliger, J., Cavender-Bares, J., Coops, N. C., Dullinger, S., Dirnböck, T., Eckert, S., Ellis, E., Fernández, N., Giuliani, G., Guisan, A., Jetz, W., Joost, S., Karger, D., Lembrechts, J., Lenoir, J., Luoto, M., Morin, X., ... Payne, D. (2020). Monitoring biodiversity in the Anthropocene using remote sensing in species distribution models. *Remote Sensing of Environment*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111626>
- Reinermann, S., Gessner, U., Asam, S., Kuenzer, C., & Dech, S. (2019a). The Effect of Droughts on Vegetation Condition in Germany: An Analysis Based on Two Decades of Satellite Earth Observation Time Series and Crop Yield Statistics. *Remote Sensing*, 11(15), 1783. <https://doi.org/10.3390/rs11151783>
- Reinermann, S., Gessner, U., Asam, S., Kuenzer, C., & Dech, S. (2019b). The effect of droughts on vegetation condition in Germany: An analysis based on two decades of satellite earth observation time series and crop yield statistics. *Remote Sensing*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/rs11151783>
- Ristic, A., & Govedarica, M. (2010). Radar remote sensing technologies: The usage in agriculture EUropean POSitioning System Interreg IIIc View project MODELING THE STATE AND THE STRUCTURE OF SLOPE PROCESSES USING GNSS, LASER SCANNING TECHNOLOGY AND GROUND PENETRATING RADAR View project. <https://www.researchgate.net/publication/277110546>

Rose, R. A., Byler, D., Eastman, J. R., Fleishman, E., Geller, G., Goetz, S., Guild, L., Hamilton, H., Hansen, M., Headley, R., Hewson, J., Horning, N., Kaplin, B. A., Laporte, N., Leidner, A., Leimgruber, P., Morissette, J., Musinsky, J., Pintea, L., ... Wilson, C. (2015). Ten ways remote sensing can contribute to conservation. *Conservation Biology*, 29(2). <https://doi.org/10.1111/cobi.12397>

SATELLITE REMOTE SENSING 1 CONSERVATION TECHNOLOGY SATELLITE REMOTE SENSING 4. (n.d.).

Schmeller, D. S., Arvanitidis, C., Böhm, M., Brummitt, N., Chatzinikolaou, E., Costello, M. J., Ding, H., Gill, M. J., Haase, P., Julliard, R., García-Moreno, J., Pettorelli, N., Peng, C., Riginos, C., Schmiedel, U., Simaika, J. P., Waterman, C., Wu, J., Xu, H., & Belnap, J. (2017). Case studies of capacity building for biodiversity monitoring. In *The GEO Handbook on Biodiversity Observation Networks*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27288-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27288-7_13)

Schmidt, J., Fassnacht, F. E., Förster, M., & Schmidlein, S. (2018). Synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 for assessments of heathland conservation status. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(3), 225–239. <https://doi.org/10.1002/rse2.68>

SENTINEL-2 User Handbook Sentinel-2 User Handbook SENTINEL-2 User Handbook Title Sentinel-2 User Handbook Issue 1 Revision 1 SENTINEL-2 User Handbook. (2013).

The global assessment report on BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES SUMMARY FOR POLICYMAKERS SUMMARY FOR POLICYMAKERS OF THE IPBES GLOBAL ASSESSMENT REPORT ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES. (2019). [www.ipbes.net](http://www.ipbes.net)

Traganos, D., & Reinartz, P. (2018). Mapping Mediterranean seagrasses with Sentinel-2 imagery. *Marine Pollution Bulletin*, 134, 197–209. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.075>

Tucker Quelle NDVI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425779900130?via%3Dihub>

Tucker, C. J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. In *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* (Vol. 8).

Turner, W., Rondinini, C., Pettorelli, N., Mora, B., Leidner, A. K., Szantoi, Z., Buchanan, G., Dech, S., Dwyer, J., Herold, M., Koh, L. P., Leimgruber, P., Taubenboeck, H., Wegmann, M., Wikelski, M., & Woodcock, C. (2015). Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation. In *Biological Conservation* (Vol. 182, pp. 173–176). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.11.048>

Wang, K., Franklin, S. E., Guo, X., & Cattet, M. (2010). Remote sensing of ecology, biodiversity and conservation: A review from the perspective of remote sensing specialists. In *Sensors* (Vol. 10, Issue 11, pp. 9647–9667). <https://doi.org/10.3390/s101109647>

Wang, R., & Gamon, J. A. (2019a). Remote sensing of terrestrial plant biodiversity. *Remote Sensing of Environment*, 231(December 2018), 111218. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111218>

Wang, R., & Gamon, J. A. (2019b). Remote sensing of terrestrial plant biodiversity. *Remote Sensing of Environment*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111218>

Wicaksono, P., Fauzan, M. A., & Asta, S. G. W. (2020). Assessment of Sentinel-2A multispectral image for benthic habitat composition mapping. *IET Image Processing*, 14(2), 279–288. <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2018.6044>

Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., ... Zhu, Z. (2019a). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>

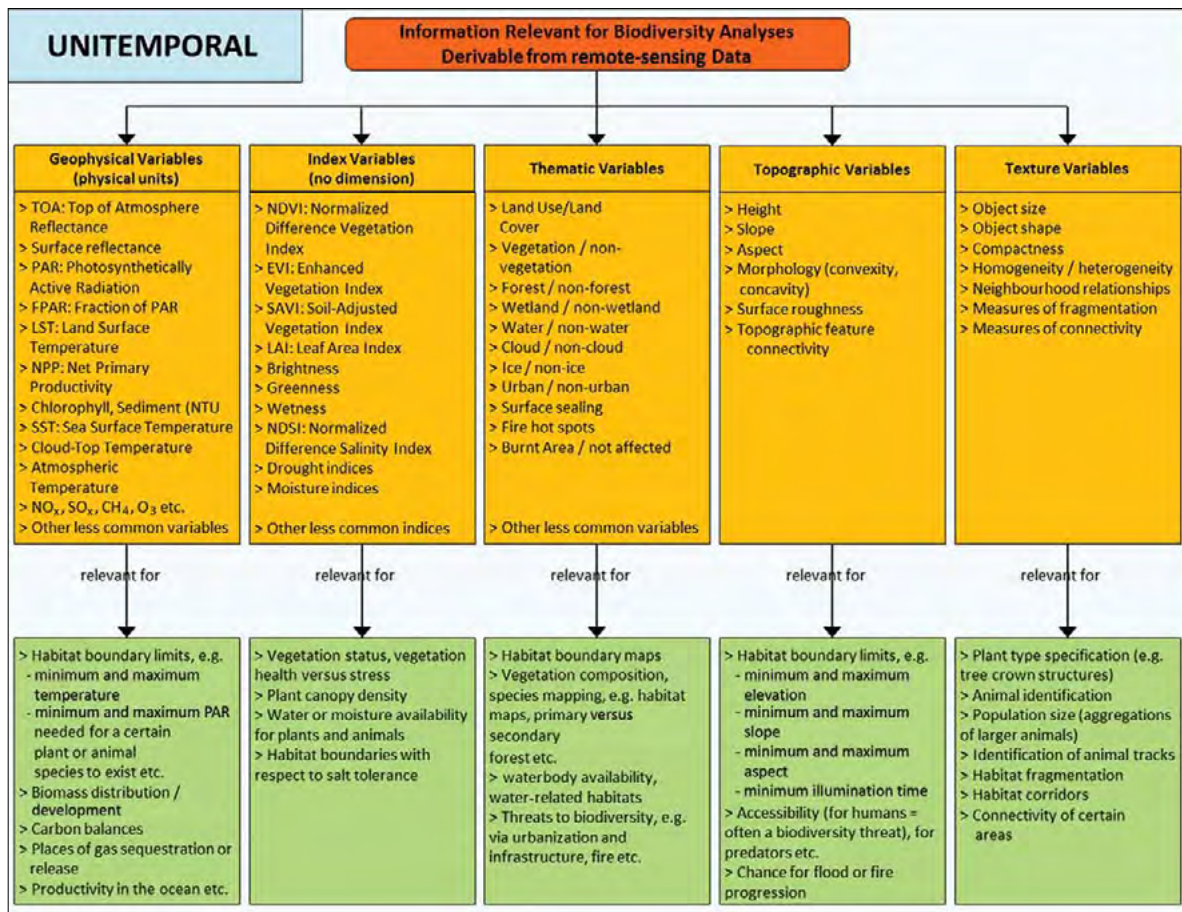
Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., ... Zhu, Z. (2019b). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>

Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. In *Journal of Sensors* (Vol. 2017). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>



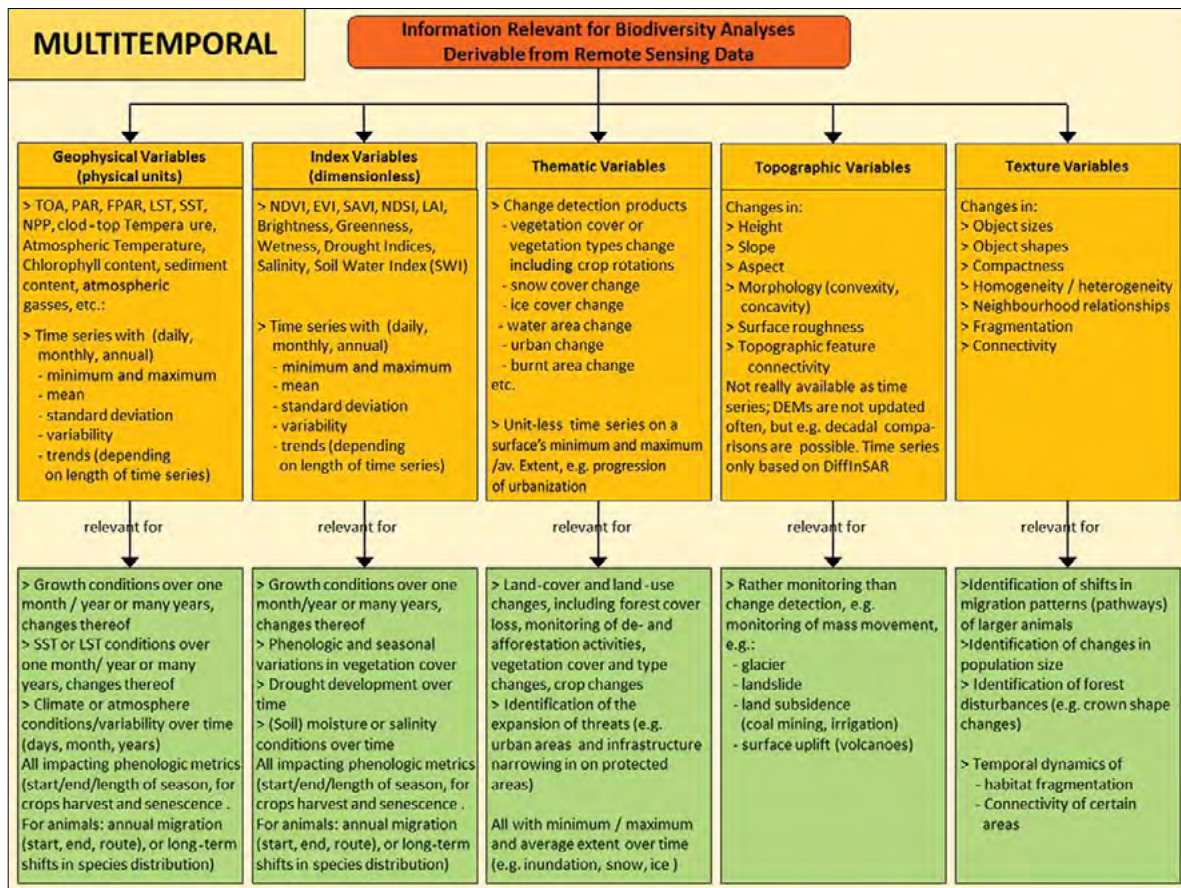
# Anhang

## Anhang 1:



Informationen, die aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden können und relevant für Biodiversitätsanalysen sind. Hier wird der monotemporale Fall präsentiert, unter der Annahme, dass für das Untersuchungsgebiet keine multitemporalen oder Zeitreihen-Daten vorliegen.

Quelle: Kuenzer et al. 2014.



Informationen, die aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden können und relevant für Biodiversitätsanalysen sind. Multitemporale Datensätze ermöglichen das Monitoring von Objekten und Habitaten über die Zeit. Außerdem können bei einer ausreichenden Datengrundlage Trends innerhalb des Untersuchungsgebietes abgeleitet werden.

Quelle: Kuenzer et al., 2014.

## Anhang 2

Function	Indicator	Proxy	Satellite (sensor)	SRS data product
Gas regulation	Emissions of gases by ecosystems	Emissions from fire	HyspIRI (VSWIR/TIR)	HyspIRI fire emissions
			HyspIRI (VSWIR/TIR)	HyspIRI volcano eruptions and emissions
Climate regulation	Precipitation regulation	Evapotranspiration	HyspIRI (VSWIR/TIR)	HyspIRI evapotranspiration
	Ocean carbon cycle regulation	piration	Aqua (MODIS)	Potential future product
		Oceanic biological carbon stock	ESA-CCI	Potential future product
		Ocean acidification	NOAA	Potential future product
Disturbance regulation	Fire occurrence	Fire hotspots	HyspIRI (VSWIR/TIR)	HyspIRI fuel status
		Fire temperature	Sentinel 3 (SLSTR)	Sentinel 3 Fire temperature
	Extent of fire damages	Extent of burned area	Proba V (Vegetation)	Proba V Burned Area
			HyspIRI (VSWIR/TIR)	HyspIRI biomass burning
			Sentinel 2 (MSI), Sentinel 3 (OLCI, SLSTR)	Sentinel 2 and 3 Burnt Area
	Flood occurrence	Standing water	Terra/Aqua (MODIS)	MODIS daily surface water extent (using the Open Water Likelihood algorithm)
			Sentinel 1 (SAR)	Sentinel 1 Floods (Standing water)
	Defoliator outbreaks	Changes in maximum NDVI	Proba V (Vegetation)	Proba V NDVI
Coral bleaching	Status of coral reefs	HyspIRI (VSWIR/TIR)	HyspIRI global composition and status of coral reefs and coastal habitats	
Eutrophication of water bodies	Cholorophyll- $\alpha$ concentration	Sentinel 3 (OLCI)	Ocean chlorophyll	
Water regulation	Inland water dynamic	Change in surface water extent	Terra/Aqua (MODIS)	MODIS daily surface water extent (using the Open Water Likelihood algorithm)
		Change in water stage	TRMM (PR, TMI, VIRS, CERES)	Water stage (Puri et al. <i>2011</i> )
Nutrient regulation	Nutrient availability	Chlorophyll concentration	Sentinel 3 (OLCI)	Ocean chlorophyll

Function	Indicator	Proxy	Satellite (sensor)	SRS data product
Waste treatment and assimilation	Presence of waste products in the soil	Soil nitrogen/ presence of heavy metals	Landsat (TM)	Soil nitrogen/heavy metals derived from surface reflectance (Peng et al. <a href="#">2016</a> )
Pollination	Vegetation phenology	Timing and magnitude of seasonal changes in Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	Proba V (Vegetation)	Proba V NDVI
			Landsat (TM, ETM+, OLI) Terra/Aqua (MODIS)	NDVI derived from Landsat surface reflectance product alone or derived from MODIS-Landsat fused time series (Hilker et al. <a href="#">2009</a> ; Walker et al. <a href="#">2012</a> )
			Sentinel 2 (MSI)	NDVI derived from Sentinel 2
		Timing and magnitude of other vegetation indices	Terra/Aqua (MODIS)	MODIS Visible atmospherically resistant index (VARI)
			EnMAP (VNIR/SWIR)	EnMAP terrestrial phenology
			FLEX (FLORIS)	FLEX photosynthetic activity
	Production of biomass	SRS-based estimates of primary productivity	FLEX (FLORIS)	FLEX primary productivity
			Proba V (Vegetation)	Proba V vegetation productivity index
			Proba V (Vegetation) SPOT (HRV, HRVIR, HRG)	SPOT VGT or Proba V Dry Matter Productivity product
Biological control	Defoliator control	Changes in maximum NDVI	Proba V (Vegetation)	Proba V NDVI
			Landsat (TM, ETM+, OLI) Terra/Aqua (MODIS)	NDVI derived from Landsat surface reflectance product alone or derived from MODIS-Landsat fused time series (Hilker et al. <a href="#">2009</a> ; Walker et al. <a href="#">2012</a> )
			Sentinel 2 (MSI)	NDVI derived from Sentinel 2
			EnMAP (VNIR/SWIR) HyspIRI (VSWIR/TIR)	EnMAP or HyspIRI Infestation Identification
	Harmful algal bloom control	Harmful algal bloom extent	ENVISAT (MERIS) Terra/Aqua (MODIS) Orb-View-2 (SeaWiFS)	Harmful algal blooms derived from ocean colour (total suspended matter) data from MERIS, MODIS and SeaWiFS (Kurekin et al. <a href="#">2014</a> )
Barrier effect of vegetation	Vegetation barriers	Tree cover	Proba V (Vegetation)	Proba V Fraction of green vegetation Cover
	Air quality	Aerosol particles	HyspIRI (VSWIR/TIR)	HyspIRI carbon and dust on snow/ice



Function	Indicator	Proxy	Satellite (sensor)	SRS data product
Supporting habitats	Habitat extent	Land cover	Sentinel 1 (SAR), Sentinel 2 (MSI), Sentinel 3 (OLCI & SLSTR)	Sentinel Land cover
		Tree Cover	Proba V (Vegetation)	Proba V Fraction of green vegetation Cover
		Vertical vegetation structure	ICESat-2 (ATLAS) or GEDI (HOMER)	LiDAR vertical structure
		Water body distribution	Proba V (Vegetation)	Proba V Water Bodies product
		Sea ice	ENVISAT (ASAR)	ENVISAT ice thickness
			ICESat-2 (ATLAS)	IceSat-2 ice thickness
		Glaciers	Sentinel 2 (MSI)	Sentinel-2 Glacier area, LSSIA and snowline
	Sentinel 1 (SAR)		Sentinel-1 glacier surface topography	
	Snow cover	Sentinel 3 (SLSTR, OLCI)	Snow Cover Area Global	
	Habitat quality	Albedo	Sentinel 3 (SLSTR, OLCI)	Surface albedo
			Sentinel 2 (MSI)	Surface albedo
			Proba V (Vegetation)	Surface albedo
		Primary productivity	EnMAP (VNIR/SWIR)	EnMAP terrestrial and aquatic phenology
Vegetation condition	Proba V (Vegetation)	Proba V vegetation condition index		
Food	Production of vegetal biomass	Vegetation indices	Proba V (Vegetation)	Proba V FPAR
			Sentinel 2 (MSI), Sentinel 3 (OLCI, SLSTR)	Sentinel 2 and 3 fPAR
			Proba V (Vegetation)	Proba V LAI
			Sentinel 2 (MSI), Sentinel 3 (OLCI, SLSTR)	Sentinel 2 and 3 Chlorophyll and Leaf Area Index (LAI)
		Biomass	Sentinel 1 (SAR)	Sentinel 1 biomass
Raw materials	Wood and NTFP	Tree cover	Proba V (Vegetation)	Proba V Fraction of green vegetation cover
	Mineral resources	Mineral resources	HypSIRI (VSWIR/TIR)	HypSIRI surface mineral resources

Function	Indicator	Proxy	Satellite (sensor)	SRS data product
Water supply	Water provision	Evapotranspiration	HyspIRI (VSWIR/TIR)	HyspIRI evapotranspiration
		SRS-based estimates of water quality	Proba V (Vegetation)	Proba V Water Bodies product
	Water quality	SRS-based estimates of water quality	EnMAP (VNIR/SWIR)	EnMAP water quality and availability
Provision of shade and shelter	Extent to which vegetation shades the ground	Tree cover	Proba V (Vegetation)	Proba V Fraction of green vegetation Cover
		Plant canopy	Sentinel 2 (MSI)	Sentinel 2 Leaf Area Index

Ökosystemfunktionen und fernerkundliche Datenprodukte, die das Monitoring dieser unterstützen.

Quelle: *PETTORELLI ET AL., 2017*

Function	Indicator	Proxy	Satellite (sensor)	SRS data product	Examples
Provision of shade and shelter	Extent to which vegetation shades the ground	Tree cover	Terra/Aqua (MODIS)	MODIS Vegetation Continuous Fields (2000-2013)	Huang et al. (2016) produced a MODIS snow cover product to estimate spatio-temporal changes in snow cover across China
			Landat (TM, ETM+, OLI)	Landat Tree Cover Continuous Fields (2000 & 2005)	Guzy et al. (2015) use LiDAR to estimate the effect of riparian vegetation cover on urban stream shade and stream restoration potential
		Plant canopy SRS-based primary productivity estimates	Terra/Aqua (MODIS)	MODIS Leaf Area Index MODIS Gross Primary Production/Net Primary Production	No example found for this particular function
Pharmacological resources	Availability of plants				

Most are currently routinely produced; discontinued products (based on existing sensors) were included too, when they could conceivably contribute to elaborating a monitoring scheme for a given function (since routine production could be resumed). In such cases, the time period for which they are available was stated.

ARS, Atmospheric Infrared Sounder; ADMRL, Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory; ASTER SWIR and TIR, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Short Wave Infrared and Thermal Infrared; AVHRR, Advanced Very High Resolution Radiometer; AVISO, Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data; CALIOP, Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization; CALIPSO, Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation; CCI, Climate Change Initiative; CERES, Clouds and the Earth's Radiant Energy System; CHIRPS, Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data; CZCS, Coastal Zone Color Scanner; DMSP, Defense Meteorological Satellite Platform; ENVISAT, Environmental Satellite; ERS, European Remote Sensing Satellite; ESA, European Space Agency; ETM+, Enhanced Thematic Mapper Plus; EVI, Enhanced vegetation index; FAPAR, Fraction of absorbed Photosynthetic Active Radiation; FIRMS, Fire Information for Resource Management System; GRIMM, Global Inventory Modeling and Mapping Studies; GLIMS, Global Land Ice Measurements from Space; GOCI, Geostationary Ocean Color Imager; GOME, Global Ozone Monitoring Experiment; GPCP, Global Precipitation Climatology Project; GRACE, Gravity Recovery And Climate Experiment; GSFC, Goddard Space Flight Center; HRG, High Resolution Geometric; HRV, High Resolution Visible; HRVIR, High Resolution Visible and Infrared; IR, Infrared Imaging Radiometer; KBR, K-Band Ranging System; LAI, Leaf Area Index; MIRS, Medium Resolution Imaging Spectrometer; MRRAS, Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis; MODIS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; NASA, National Aeronautics and Space Administration; NDVI, Normalized Difference Vegetation Index; NFTP, Non-Timber Forest Product; NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration; NRT, Near Real Time; OLCI, Ocean and Land Colour Instrument; OLI, Operational Land Imager; POES, Polar Operational Environmental Satellites; PR, Precipitation Radar; SAC-D, Satélite de Aplicaciones Científicas; SCIAMACY, Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography; SeaWiFS, Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor; SRAI, Synthetic Aperture Interferometric Radar Altimeter; SMAP, Soil Moisture Active Passive; SMMR, Scanning Multichannel Microwave Radiometer; SMOS, Soil Moisture and Ocean Salinity; SPOT, Satellite Pour l'Observation de la Terre; SSMA, Special Sensor Microwave Imager; SSMS, Special Sensor Microwave Imager Sounder; TIRS, Thermal Infrared Sensor; TM, Thematic Mapper; TMI/TRMM Microwave Imager; TROPOMI, Tropospheric Monitoring Instrument; OMI, Ozone Monitoring Instrument; TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission; VGT, Vegetation; VIRS, Visible Infrared Imaging Radiometer Suite; VIS, Visible and Infrared Scanner; WJA, WU University Amsterdam; WFC, Wide Field Camera.





Mehr WWF-Wissen  
in unserer App.



Jetzt herunterladen!

Unterstützen Sie den WWF  
IBAN: DE06 5502 0500 0222 2222 22



## WWF ist die beste Umwelt- und Naturschutzorganisation im Transparenzranking

4,4 ★★★★★

Spiegel Online und Phineo 11/2016  
[wwf.de/wirkungstransparenz](http://wwf.de/wirkungstransparenz)



**BEST /2020  
BRANDS**

Beste Nachhaltigkeitsorganisation



### Unser Ziel

Wir wollen die weltweite Zerstörung der Natur und Umwelt stoppen und eine Zukunft gestalten, in der Mensch und Natur in Einklang miteinander leben.

### WWF Deutschland

Reinhardtstraße 18 | 10117 Berlin  
Tel.: +49 30 311 777-700  
[info@wwf.de](mailto:info@wwf.de) | [wwf.de](http://wwf.de)