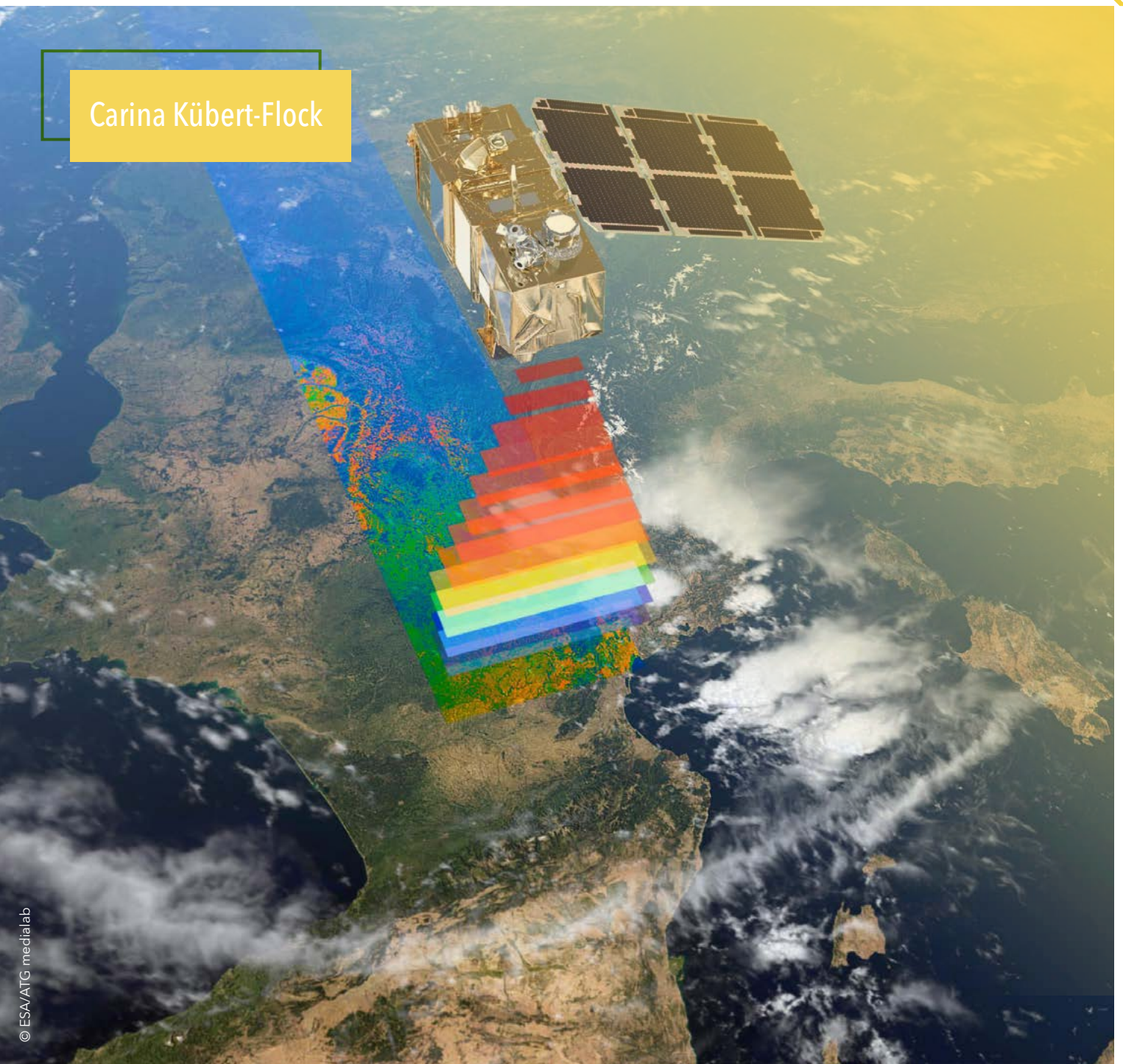


DEZERNAT INFORMATIONSTECHNIK

Hessen aus dem All: Fernerkundung für das Umweltmonitoring

Carina Kübert-Flock



▤ In diesem Beitrag begeben wir uns auf eine Höhe von etwa 800 km über der Erdoberfläche und richten unseren Blick aus dem All nach Hessen. Von hier oben können wir mit Sensoren auf zahlreichen Satelliten, die die Erde täglich umrunden, verschiedene Umweltmedien flächenhaft, kontinuierlich und objektiv messen und beobachten. Diese Technologie kam in den letzten beiden Jahren unter anderem durch die Arbeit der Kompetenzstelle Fernerkundung vermehrt für die Aufgaben des HLNUG zum Einsatz. Wie und was diese Sensoren messen, welche Routine-Arbeiten damit unterstützt werden und welche Informationsprodukte für verschiedenen Fachanwendungen erstellt wurden, stellt dieser Beitrag vor.



Fernerkundung:

Fernerkundung ist der Oberbegriff für alle Techniken, mit denen man Informationen über ein weit entferntes Objekt erheben kann, ohne mit diesem in Kontakt zu stehen. Die Messung findet aus der Ferne statt. Ähnlich wie mit Teleskopen auf der Erde astronomische Objekte, wie Sterne oder Schwarze Löcher, beobachtet werden, kann mit Hilfe von Sensoren auf Satelliten die Erdatmosphäre und -oberfläche erfasst werden. Man spricht dann von Satellitenfernerkundung oder Erdbeobachtung.

Was ist Fernerkundung?

Die Mehrzahl der rund 900 Fernerkundungssatelliten befindet sich auf einem niedrigen Erdumlauf (Orbit) in einer Entfernung von rund 700-800 km. Der Orbit führt dabei über die Polarregionen und ein Umlauf dauert etwa 90-100 Minuten, während sich die Erde im Tagesverlauf um ihre Achse dreht. Beginnt der Satellit dann mit dem nächsten Umlauf, überfliegt er einen räumlich versetzten Streifen der Erde, bis er nach einer bestimmten Zeit (zeitliche Auflösung) den gesamten Planeten erfasst hat (Abb. 1).

Dieser Umlauftyp ermöglicht es, je nach Sichtfeld der Sensoren unterschiedlich breite Streifen der Erdoberfläche aufzunehmen. Damit kann ein Sensor an einem Tag die gesamte Erdoberfläche mit grober geometrischer Auflösung aufnehmen (z. B. MODIS auf Terra) oder einzelne Streifen mit hoher geometrischer Auflösung (z.B. MSI auf Sentinel-2). Diese Streifen werden anschließend vom Herausgeber der Daten vertikal in mehrere Szenen aufgeteilt. Zur Abdeckung von Hessen mit Sentinel-2 benötigt man beispielsweise zwei Umläufe mit insgesamt sieben Szenen.



Abb. 1: Veranschaulichung des Low Earth Orbit mit polarer Umlaufbahn © DLR (CC BY 3.0)

Die Rolle der Auflösung

Die Auflösungsseigenschaften der Sensoren sind ein entscheidender Faktor, ob ein Sensor für eine bestimmte Fragestellung geeignet ist. Hier unterscheidet man geometrische, zeitliche, spektrale und radiometrische Auflösung.

Tab. 1: Auflösungsseigenschaften von Satellitendaten

Auflösung	Erläuterung
geometrisch (räumlich)	Größe des kleinsten Objekts, das vom Sensor dargestellt werden kann; entspricht der Größe eines einzelnen Pixels
temporal (zeitlich)	Zeitraum zwischen zwei identischen Aufnahmen eines Gebiets
spektral	Anzahl und Lage der Kanäle im elektromagnetischen Spektrum
radiometrisch	Detailschärfe des gemessenen Signals

Eine besondere Rolle spielt die geometrische Auflösung, die auch als Pixelgröße angegeben wird. Sie kennzeichnet, welcher Flächenabschnitt in einem Pixel dargestellt wird. Da der Sensor die physikalische Messung über diese Fläche erfasst, wirken Daten mit abnehmender geometrischer Auflösung zunehmend verpixelt (Abb. 2).

Daten mit einer hohen geometrischen Auflösung sind aber nicht immer denen mit geringerer Auflösung vorzuziehen, weil damit meist der zeitliche Abstand zwischen zwei Aufnahmen desselben Gebiets zunimmt. Diese zeitliche Auflösung ist jedoch beispielsweise für zeitlich variable Größen besonders relevant. Hier bieten sich multi-temporale Auswertungen, wie die Zeitreihenanalyse, an. Zur Verbesserung der zeitlichen Auflösung setzt die ESA mit ihren Sentinel-Satelliten zwei baugleiche Satellitensysteme (z. B. Sentinel-1A und Sentinel-1B) ein, die um 180° versetzt auf demselben Orbit fliegen. Damit kann die zeitliche Auflösung verdoppelt werden.

Unsichtbares sichtbar machen: Was und wie „sehen“ Sensoren?

Elektromagnetische Strahlung ist eine Form der Energie, die auch im Vakuum (Weltall) übertragen wird. Sie wird von einer Energiequelle (beispielsweise unserer Sonne oder einem RADAR-Satelliten) ausgesendet und von den Objekten der Erdoberfläche unterschiedlich absorbiert oder reflektiert. Der Anteil der reflektierten Strahlung wird dann als Signal am Sensor physikalisch gemessen. Für die Fernerkundung sind jedoch nicht alle Bereiche des elektromagnetischen Spektrums relevant, sondern nur ein Ausschnitt, beginnend bei kurzen Wellenlängen im

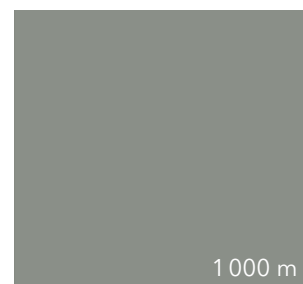
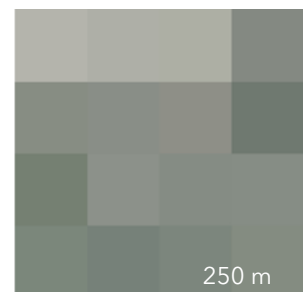
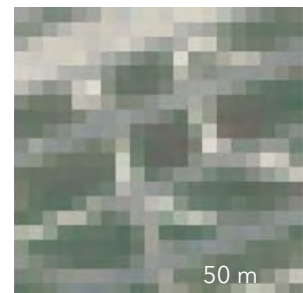
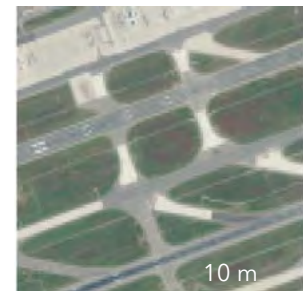
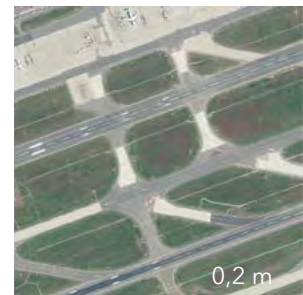


Abb. 2: Detailgehalt bei veränderter geometrischer Auflösung; Datenquelle: DOP HVBG, Bearbeitung HLNUG

violetten Bereich des sichtbaren Lichts über das nahe und ferne Infrarot über den thermalen Bereich bis hin zu Mikro- und Radiowellen.

Mit Hilfe der Spektralbereiche des elektromagnetischen Spektrums wird die Fernerkundung in drei große Bereiche unterteilt: optische (Sichtbares Licht und Infrarot), thermale und RADAR-Fernerkundung (Abb. 3).

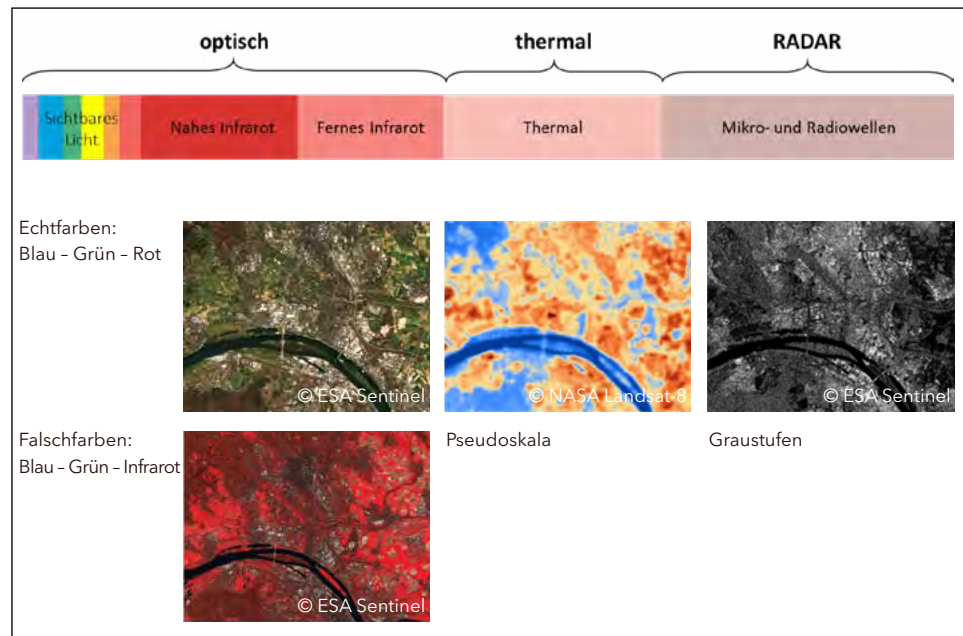


Abb. 3: Visualisierungen von Daten aus unterschiedlichen Spektralbereichen

Jede Wellenlänge erlaubt es, andere Eigenschaften von Objekten zu erkennen. Unsere Augen – auch das sind Sensoren – sehen elektromagnetische Strahlung, die von der Sonne oder künstlichen Lichtquellen ausgesendet und von Objekten reflektiert wird. Weil wir diese Strahlung sehen können, nennen wir sie „sichtbares Licht“. Ein Pflanzenblatt sieht für uns grün aus, weil es vor allem grünes Licht zurückstrahlt und ein rotes Fahrrad ist rot, weil es viel rotes Licht reflektiert. Gesunde Vegetation reflektiert aber vor allem Strahlung im nahen Infrarotbereich. Die Satelliten können in diesem Bereich „sehen“, ob die Vegetation z. B. unter Wassermangel leidet oder ob in einem See Algen wachsen. Diese Information stammt dann aus dem infraroten Kanal und kann in einer Falschfarbendarstellung (z. B. Blau - Grün - Infrarot) visualisiert werden.

Satelliten sind unsere Augen im All. Durch Visualisierungen der verschiedenen Wellenlängen können wir für uns Unsichtbares (z. B. Thermalstrahlung in Pseudofarben von blau (kalt) nach rot (warm)) sichtbar machen.

Energie in Informationen umwandeln: Mehr als bunte Bilder

Diese Visualisierungen beeindruckten ohne Zweifel, zeugen sie doch direkt oder indirekt von den Einflüssen des Menschen auf das System

Erde. Dadurch schafft die Fernerkundung ein Bewusstsein für die Einzigartigkeit unseres Planeten (DECH et al. 2008). Sie bot große Fortschritte beim Verständnis des Klimasystems und seiner Veränderungen durch die Quantifizierung von Prozessen und raum-zeitlichen Zuständen der Atmosphäre, des Landes und der Ozeane (YANG et al. 2013). Als eigenständige Forschungsdisziplin liefert sie eine umfassende Datenbasis, vielfältige Methoden der Datenverarbeitung zum Ableiten von Geoinformationen (z.B. Berechnung von Indizes, Modellierung (bio-) physikalischer Parameter, statistische Verfahren) und Validierung. Damit trägt sie evidenzbasiert zum Prozessverständnis bei (BALLARI et al. 2023; JETZ et al. 2019; PETTORELLI et al. 2016).

Das Zitat von Peter Drucker lässt sich auf die Aufgaben des HLNUG übertragen: Fachleute verschiedener Disziplinen messen den Zustand und die Veränderung der wesentlichen Umweltmedien Wasser, Boden und Luft, das Klima sowie die naturschutzrelevanten Lebensräume und Arten in Hessen. Daten werden erfasst, gesammelt, in Informationen umgewandelt und schließlich in Form von Konzepten, Handlungsempfehlungen und Gutachten genutzt sowie in Fachinformationssystemen zugänglich gemacht.

Die jahrzehntelange Expertise im Aufbau, dem Betrieb und der Instandhaltung von Messsystemen und Messnetzen sowie in der Planung, Durchführung und Auswertung von Messkampagnen wird nun durch technologische Innovationen aus dem All unterstützt: Die Fernerkundung blickt seit dem Start des ersten Landsat-Satelliten im Jahr 1972 ebenfalls auf eine lange Tradition der Datenaufnahme zurück (CRACKNELL 2018). Die Weiterentwicklung der Raumfahrt, verbesserte Sensorensysteme, Fortschritte in der computergestützten Informationstechnologie und die freie sowie die kostenlose Verfügbarkeit von Satellitendaten und Auswertetools der amerikanischen und europäischen Raumfahrtorganisationen führten die Fernerkundung in ein „Goldenes Zeitalter“ (McCABE et al. 2017) und zu Daten mit einer noch nie dagewesenen räumlichen und zeitlichen Detailgenauigkeit (McCABE et al. 2019).

Die Kompetenzstelle Fernerkundung im HLNUG

Die Kompetenzstelle Fernerkundung im HLNUG ist zentraler Ansprechpartner für das Thema Fernerkundung und widmet sich der Synthese von fernerkundlichen Methoden und fachspezifischen und fachübergreifenden Fragestellungen. Sie ist dem Dezernat Z4 Informationstechnik zugeordnet und aufgrund der räumlich verorteten Datengrundlage im Fachbereich Geodateninfrastruktur und Fachanwendungen angesiedelt. Mit ihr wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Potenziale und



„Man kann nicht verwalten, was man nicht messen kann. Und man kann nicht verbessern, was man nicht verwalten kann“

– Peter Drucker



[hlnug.de/themen/
fernerkundung](https://hlnug.de/themen/fernerkundung)



Limitation der Fernerkundung für das Umweltmonitoring im Land Hessen zu eruieren.

Als zentraler Ansprechpartner für die Fernerkundung koordiniert sie die Aktivitäten in Zusammenarbeit mit allen Beteiligten im HLNUG, mit weiteren hessischen Landesbehörden, dem hessischen Raumfahrtkoordinator und anderen Landesumweltämtern sowie dem Bund. Als eine erste Maßnahme hat die Kompetenzstelle im Juli 2021 die hausinterne „Arbeitsgruppe Fernerkundung“ aufgebaut, in der zum aktuellen Stand 14 Kolleginnen und Kollegen der Fachabteilungen und -dezernate vertreten sind. Die aktive Mitgestaltung der Fachkolleginnen und Fachkollegen spielt dabei eine zentrale Rolle für den Einsatz der Fernerkundung als komplementäre Datenbasis. Die regelmäßigen Sitzungen fördern den Informationsaustausch hinsichtlich der Projektfortschritte, Fachwissen (z. B. durch Workshops und Weiterbildungen Dritter) sowie die Identifikation von Synergieeffekten.

Die Dynamik und stetig wechselnde Anforderungen erfordern eine kontinuierliche Weiterführung und Konkretisierung des Konzepts zur Nutzung von Copernicus- und anderen Erdbeobachtungsdaten in den Arbeitsprozessen des HLNUG. Die sehr heterogenen fachlichen Anforderungen und die immensen zur Verfügung stehenden Datenmengen setzen eine intensive (Literatur-)Recherche für die Identifikation relevanter Satelliten- und ergänzender Daten und anwendbarer Methoden voraus. Es werden Analysen der Chancen und Grenzen der Satellitenfernerkundung durchgeführt und Konzepte erarbeitet.

Die Kompetenzstelle unterstützt und begleitet die Fachabteilungen bei der Initiierung und Durchführung von Fernerkundungsprojekten, steuert den Wissensaufbau und -transfer im HLNUG, nimmt an Veranstaltungen des HLNUG (z.B. Stadtklimaveranstaltung, HLNUG-Kolloquium) und Dritter (z.B. Konferenz Hessen in Space, Runder Tisch Satellitendaten) teil und organisiert selbst Workshops oder Schulungen. Eine Veranstaltung zu Möglichkeiten und Limitationen der Fernerkundung im Umweltbereich für unterschiedliche Interessengruppen steht im Fokus der Arbeiten für das kommende Jahr.

Die Umsetzung von Projekten bedarf einer leistungsfähigen und effizienten IT-Infrastruktur mit zugehöriger Fachsoftware. Hierzu wurden und werden nicht nur hausintern Speicher- und Prozessierungsmöglichkeiten geschaffen, sondern es werden auch Synergien und Potenziale berücksichtigt, die sich aus der Zusammenarbeit mit anderen Behörden ergeben. Auch die niedrighschwellige Bereitstellung der fernerkundungsbasierten Informationen über Web-Services, die sowohl der europäischen INSPIRE-Richtlinie als auch dem hessischen Open-Data-Gesetz

(HODaG) entsprechen müssen, sind Aufgaben der Kompetenzstelle, die in enger Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Geodateninfrastruktur und Fachanwendungen realisiert werden.

Schließlich entwickelt die Kompetenzstelle auch eigene Projekte zur Verbesserung des Vollzugs des Umweltrechts, zur Ergänzung des Serviceangebots des HLNUG (z.B. Hitzeviewer) und zur effizienteren Erledigung bestehender Aufgaben. Dazu gehört auch die Einwerbung von Fremdmitteln zur Finanzierung von Projekten sowie die Beteiligung an der Durchführung institutions- oder länderübergreifender Projekte.

Fernerkundungsbasierte Fachanwendungen am HLNUG

Auch für lokale und regionale Fragestellungen ist die Fernerkundung heute zu einem wichtigen Werkzeug geworden – so auch für uns in Hessen und in besonderem Maß für das Umweltmonitoring. Für jede Fachabteilung werden nachfolgend Anwendungsbeispiele dargestellt, die mittels eigener oder assoziierter Projekte, Drittmittel oder durch Vergaben durchgeführt werden. Ergänzt werden sie durch studentische Abschlussarbeiten und Förderprojekte, die beispielsweise durch das Fachzentrum Klimawandel und Anpassung und den Hessischen Biodiversitätsfonds – zukünftig durch das Lore-Steubing-Institut – gefördert werden.

Thema Wasser

Mit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG, EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000)) geht die Verpflichtung zum regelmäßigen Reporting einer Reihe von Gewässerqualitätsmerkmalen einher, wobei das HLNUG für die Überwachung des Gewässerzustandes und die Datenverarbeitung zuständig ist. Die Überwachung der Wasserqualität ist traditionell arbeitsintensiv und kostspielig, was die Probenahme in zeitlicher und räumlicher Hinsicht einschränkt. Wenn Proben genommen werden, sind die Messungen oft lokal begrenzt und repräsentieren möglicherweise nicht die benachbarten Gewässerareale. Proben, die an einem bestimmten Tag entnommen werden, sind unter Umständen nicht repräsentativ für die Wasserqualität an diesem Ort über eine Woche, einen Monat oder eine Saison (PAPATHANASOPOULOU et al. 2019).

Die Verwendung von Fernerkundungssatellitendaten bietet Methoden zur Ableitung von Wasserqualitätsmaßen und ermöglicht flächenhafte Messungen in verbessertem zeitlichem und räumlichem Umfang. Hier setzt das Verbundprojekt „BIGFE – Erfassung der Wasserqualität und Wasserflächenausdehnung von Binnengewässern durch Fernerkundung“

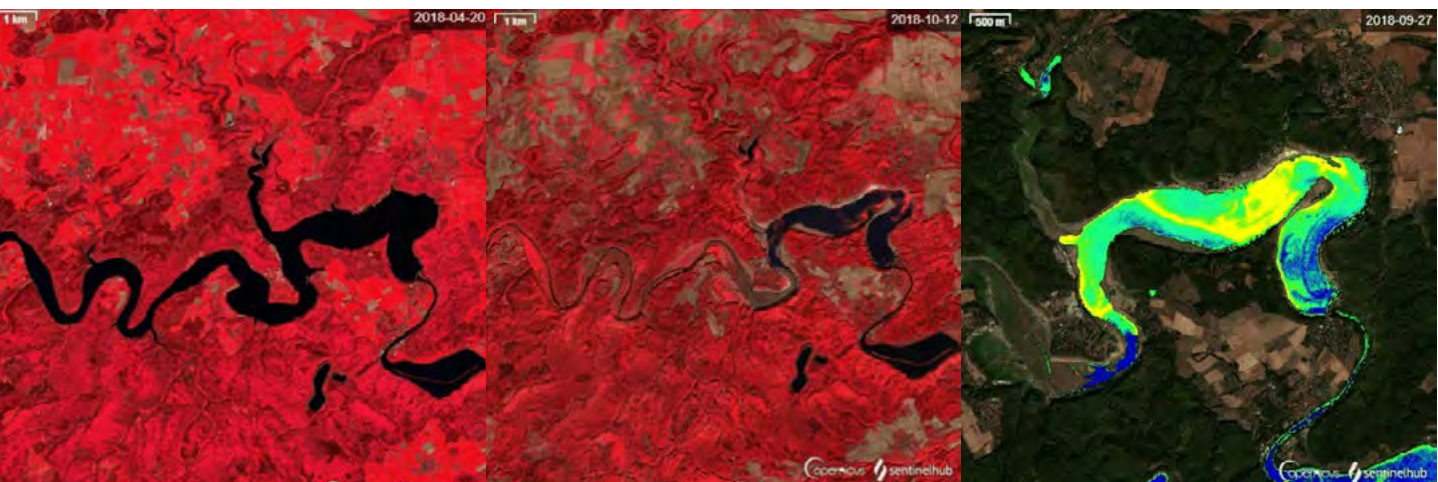


Abb. 4: Die Edertalsperre im Jahresverlauf links und mittig: Falschfarbendarstellungen der Wasserfläche am 20.04. und 12.10.2018, rechts: Vegetation und Algen im Wasser am 27.09.2018 (blau: klares Wasser, gelb: Algenblüte, enthält modifizierte Copernicus Sentinel-Daten [2018], die von Sentinel Hub verarbeitet wurden); Quelle: ESA Sentinel und Sentinel Hub EO Browser

(Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) 2023) an, bei dem das HLNUG als assoziierter Partner zu einer systematischen Untersuchung über die Eignung der Fernerkundung für das behördliche Wasserqualitätsmonitoring und die Wasserflächenausdehnung beiträgt.

Der entwickelte Water-Mask-Analyser ist ein Werkzeug, das die Ausdehnung und Dynamik von Gewässerflächen auf Basis von multitemporalen Sentinel-1-, Sentinel-2- und Landsat-8-Daten bestimmt (BUETTIG et al. 2022). Ein automatischer Schwellenwert-Algorithmus unterscheidet Wasser- von Nicht-Wasserflächen. Für ausgewählte Talsperren wurden Ganglinien der Wasseroberfläche für mehrere Jahre mit In-situ-Daten validiert. Hinsichtlich der Gewässergüte stehen für die Edertalsperre zwei (vorläufige) Steckbriefe mit Übersichten von Zeitreihen und Validierungsmaßen für Chlorophyll-a und Sichttiefe für die Jahre 2016–2020 zur Verfügung. Sie visualisieren den Vergleich von Satelliten- und in-situ-Analyseergebnissen und ordnen diese ein (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) 2023). Vor allem die Sentinel-2-Daten ergänzen und verdichten die in-situ-Messungen, was wiederum zu neuen Erkenntnissen in der Gewässerforschung führen wird.

Thema Geologie

Aktuelle Geoinformationen werden für Planungsprozesse und strategische Entscheidungen, z.B. bei der Verkehrswegeplanung, benötigt. Sie sind unverzichtbare Grundlage, um Gefährdungen von Gebäuden und Infrastruktur, etwa durch großflächige durch Setzungen und Hebungen, beurteilen zu können. Während die Absenkung des Grundwassers oder Bodens durch Bergbau, Industrie oder Baumaßnahmen regional leicht eingrenzbar ist, können klimawandelbe-

dingte Veränderungen nur schlecht vorhergesagt werden (IWASZCZUK et al. 2022). Aus regelmäßigen Befliegungen mit flugzeuggestützten Laserscannern werden räumlich hochaufgelöste digitale Gelände- und Oberflächenmodelle erstellt (Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG) 2023). Vorteile dieser Laserscan-Daten sind die hohe räumliche Auflösung und die Möglichkeit, auch kleinräumige Bewegungen unterhalb der Vegetationsbedeckung zu erkennen. Nachteilig ist die geringe zeitliche Auflösung von mehreren Jahren zwischen den Befliegungen (IWASZCZUK et al. 2022).

Satellitengestützte Interferometrische SAR-Messungen (InSAR) liefern eine sehr hohe zeitliche Auflösung von etwa sechs Tagen zwischen den Datenpunkten. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) betreibt den „Bodenbewegungsdienst Deutschland“, der auf bundesweiten Copernicus Sentinel-1 Daten beruht und an dessen Entwicklung auch das HLNUG beteiligt war (Abb. 5). Allerdings ist die räumliche Verteilung der InSAR-Punkte zufällig und stark heterogen, so ist in Städten die Punktdichte extrem hoch und in unbebauten Regionen quasi nicht vorhanden (IWASZCZUK et al. 2022).

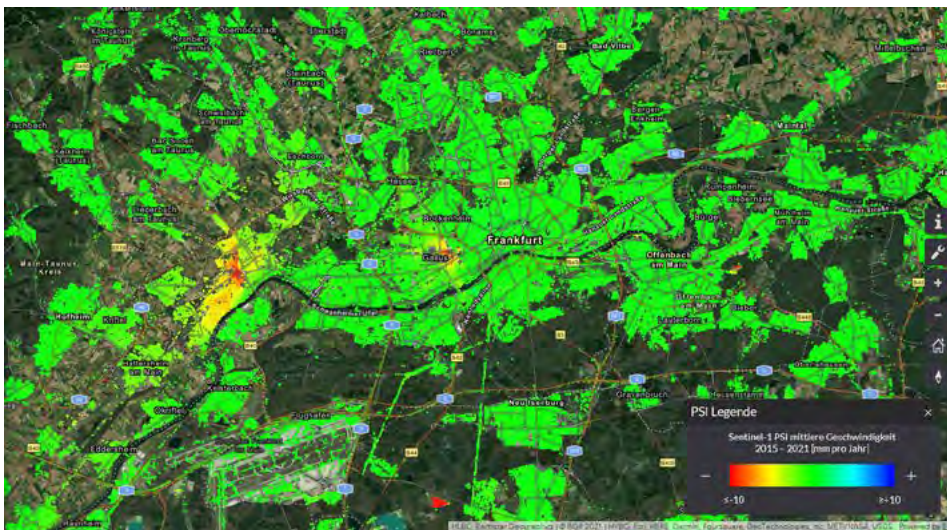


Abb. 5: Ausschnitt des Bodenbewegungsdienst für Frankfurt a.M.; Quelle: <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de>

Das vom Hessischen Digitalisierungsministerium geförderte Projekt „Umwelt 4.0 – Nutzung digitaler Geländemodelle und Copernicus-Daten“ kombiniert die flugzeug- und satellitengestützten Daten, um auftretende Bodenbewegungen und sogar Massenbewegungen frühzeitig zu erkennen und Maßnahmen einzuleiten.

Es liegt dadurch eine flächenhafte Darstellung von Bodenbewegungen mit einer horizontalen Auflösung von wenigen Millimetern für ganz Hessen vor. Darüber hinaus wurden Bodenbewegungs-Hot Spots in Hessen automatisiert identifiziert. Für Fokus-Gebiete wurden die Bodenbewe-

gungen im Vergleich mit anderen Geodaten (z.B. Füllstände von Gasspeichern, Niederschläge und Pegelstände) verschnitten und analysiert. Perspektivisch werden die Daten im Geologie-Viewer (<https://geologie.hessen.de>) veröffentlicht, was auch die Weiternutzung fachübergreifender Fragestellungen (z.B. Hochwasserschutz, kritische Infrastruktur oder Erosion) ermöglichen wird.

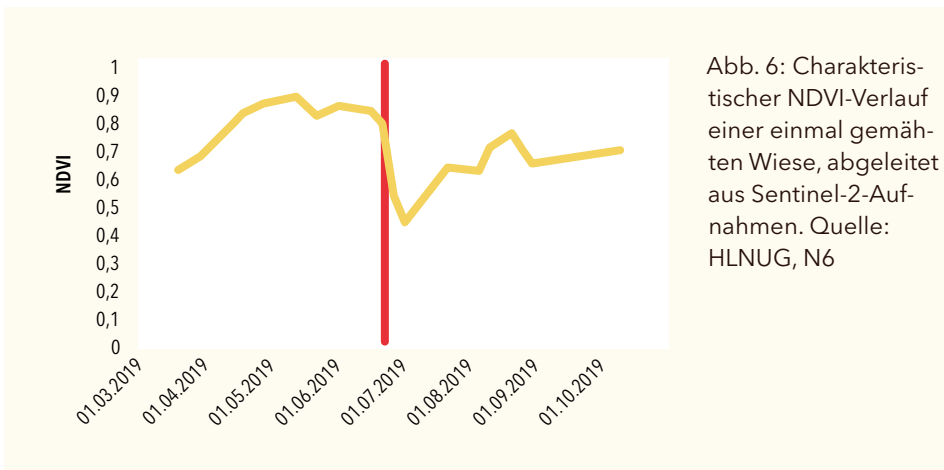
Thema Naturschutz

Die Überwachung und Berichterstattung über den Zustand der Natur hat in der Europäischen Union mit der Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie und der EG-Vogelschutzrichtlinie im Rahmen des Natura-2000-Netzes (SSYMANK et al. 1998) an Bedeutung gewonnen. Die Berichterstattung über den Erhaltungszustand von Lebensräumen erfordert detaillierte Kenntnisse über viele Aspekte von Lebensräumen auf verschiedenen räumlichen Ebenen. Darüber hinaus entfällt eine Fläche von 442 867 ha – also ein Fünftel Hessens – auf Natura 2000-Gebiete.

Die Flächenhaftigkeit und Wiederholbarkeit fernerkundlicher Messungen macht diese zu einem leistungsfähigen Instrument zur Erfassung synoptischer Daten (VANDEN BORRE et al. 2011). In der Abteilung Naturschutz wird die Fernerkundung für eine Vielzahl von Anwendungen geprüft und eingesetzt.

Für ökologische und den Naturschutz betreffende Fragen sind vor allem multi-temporale Zeitreihen optischer und RADAR-Daten eine geeignete Datengrundlage. Die nahezu wetterunabhängigen RADAR-Daten komplementieren dabei die wolkenbeeinflussten optischen Daten. Aus der am Sensor gemessenen Strahlung werden Indizes (einheitslose Größen, wie der normalisierte, differenzierte Vegetationsindex NDVI) oder Parameter ((bio-)physikalische Größen, wie der Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung) ermittelt, die dann statistisch ausgewertet werden.

Jährlich beauftragt das HLNUG Gutachterinnen und Gutachter, die die Lebensräume und Biotope im Gelände erfassen sowie auf einer Karte verzeichnen und darüber hinaus – nach hessenweit einheitlichen Vorgaben – biotoptypische Arten, Habitate und Strukturen sowie Beeinträchtigungen ermitteln. Diese zeit- und personalaufwändige terrestrische Kartierung wird im HLNUG aus dem All unterstützt: Optische Sentinel-2-Aufnahmen zusammen mit anderen GIS-Daten erlauben die Erstellung der „Suchraumkulisse Grünland“. Diese dient den Kartierenden als wertvolle Hilfe bei der Kartiervorbereitung. Hier wird auch deutlich, dass die Fernerkundung traditionelle Mess- und Kartierverfahren keineswegs ersetzen kann und soll, diese aber effizient ergänzt.

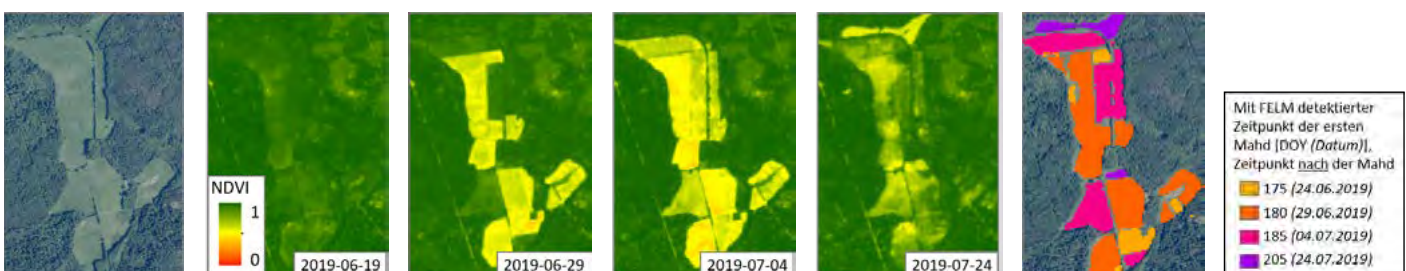


Auch die Überwachung von Management-Praktiken gemäß der Natura 2000-Bestimmungen kann aus dem All unterstützt werden. Hier war das HLNUG in Kooperation mit den Landesumweltämtern Sachsen (BfUL) und Rheinland-Pfalz (LfU) an der (Weiter-)Entwicklung der Software FELM (Fernerkundungsgestützte Erfassung von Lebensraumtypen für das Natura 2000-Monitoring) beteiligt, das von der Firma EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH entwickelt wird (BUCK et al. 2018). Mit dem ArcGIS-Add-in können der Mahdzeitpunkt und die Mahdhäufigkeit von Grünlandflächen detektiert werden: Der zeitliche NDVI-Verlauf spiegelt das Maß der Photosyntheseaktivität wider. Gemähte Flächen zeigen sich durch einen deutlichen Abfall des NDVI-Signals, weil nach der Mahd weniger grüne Vegetation vorhanden ist (Abb. 6 und 7).

Aus den jährlichen Ergebnissen wurde eine hessenweite Zusammenstellung von Mahdhäufigkeiten und erstem Mahdzeitpunkt des Jahres erstellt, die für unterschiedliche Monitoringfragen eingesetzt werden.

Die Arbeiten werden in einem zweiten DLR-Leuchtturmprojekt „Cop-Grün“, an dem das HLNUG ebenfalls als assoziierter Partner beteiligt ist, fortgeführt. Es wird erwartet, dass die aufwendige behördliche Überwachung von geschütztem und schutzwürdigem Grünland, welches aufgrund von Flächenverbrauch und Nutzungsintensivierung unter hohem Druck steht, über ein niederschwelliges, nutzungsorientiertes und den Landesämtern kostenlos zur Verfügung gestelltes User-Interface unter-

Abb. 7: Ergebnis der FELM Mahdanalyse für eine Grünland-Fläche bei Darmstadt in Hessen (Scheffheimer Wiesen). Berechnet mit Sentinel-2-Aufnahmen von 2019.



stützt und erleichtert wird (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) 2021).

Im Januar 2023 startet ein zweijähriges Buchenwaldprojekt, bei dem hessenweit Buchenwaldsuchräume erfasst werden sollen und die Vitalität von Buchenwäldern betrachtet wird.

Thema Hitzebelastung

Der Klimawandel ist in Deutschland und Hessen angekommen. Das war im Sommer 2018 deutlich zu spüren: Die Jahresdurchschnittstemperatur lag 3 °C höher als im langjährigen Mittel (1961–1990). In Frankfurt am Main wurde deutschlandweit die höchste Jahresmitteltemperatur (12,9 °C) gemessen (Hessisches Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (HLNUG) 2022). Diese Informationen werden aus kontinuierlichen Wetteraufzeichnungen in 2 m Höhe über dem Boden an 37 DWD-Stationen, an denen die Temperatur gemessen wird, ermittelt. Um flächenhafte Aussagen für ganz Hessen machen zu können, müssen aufwändige Interpolationsverfahren eingesetzt werden.

Thermale Sensoren, wie MODIS auf dem Satelliten Terra oder TIRS auf dem Satelliten Landsat-8, messen die Landoberflächentemperatur direkt flächenhaft für ganz Hessen. Unter Mitwirkung des Fachzentrums Klimawandel und Anpassung (FZK) hat die Kompetenzstelle Fernerkundung für ganz Hessen zwei Produkte entwickelt, die auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Maßstäben Informationen zum Thema „Hitzebetroffenheit“ in Hessen liefern: Eine Informationsbroschüre mit Informationen zur entwickelten Methodik und den online verfügbaren Hitzeviewer Hessen. Im Hitzeviewer finden sich verschiedene, interaktive Karten auf zwei Maßstäben: Während MODIS tägliche Daten seit dem Jahr 2000 in einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km liefert, erlaubt TIRS eine detailliertere Auflösung von 100 m x 100 m. Die Auflösungsvorteile des jeweiligen Sensors wurden in den Karten mit unterschiedlichen Aspekten der Hitzebelastung im Hitzeviewer Hessen kombiniert.

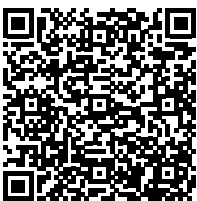
Insgesamt stehen 24 Karten auf einem landesweiten Maßstab zur Verfügung. Die Karte der maximalen Landoberflächentemperatur im Sommer 2018 (Abb. 8) zeigt eine hohe Hitzebelastung im Rhein-Main-Gebiet von Hanau bis Wiesbaden, in Darmstadt und vielen Kommunen im Hessischen Ried, in Limburg, Fulda, Gießen und Baunatal. Aber auch für viele andere Städte und Kommunen wurden hohe Temperaturen ermittelt, von Niestetal über Wabern, Bad Hersfeld, Schwalmstadt, Bad Nauheim, Babenhausen bis nach Michelstadt im Odenwald. Es sind also bei weitem nicht nur die Ballungsräume und großen Städte von Hitze



umweltdaten.hessen.de/hitzeviewer



hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Broschuere_Satellitenfernerkundung-Hessen_Hitzekarten.pdf



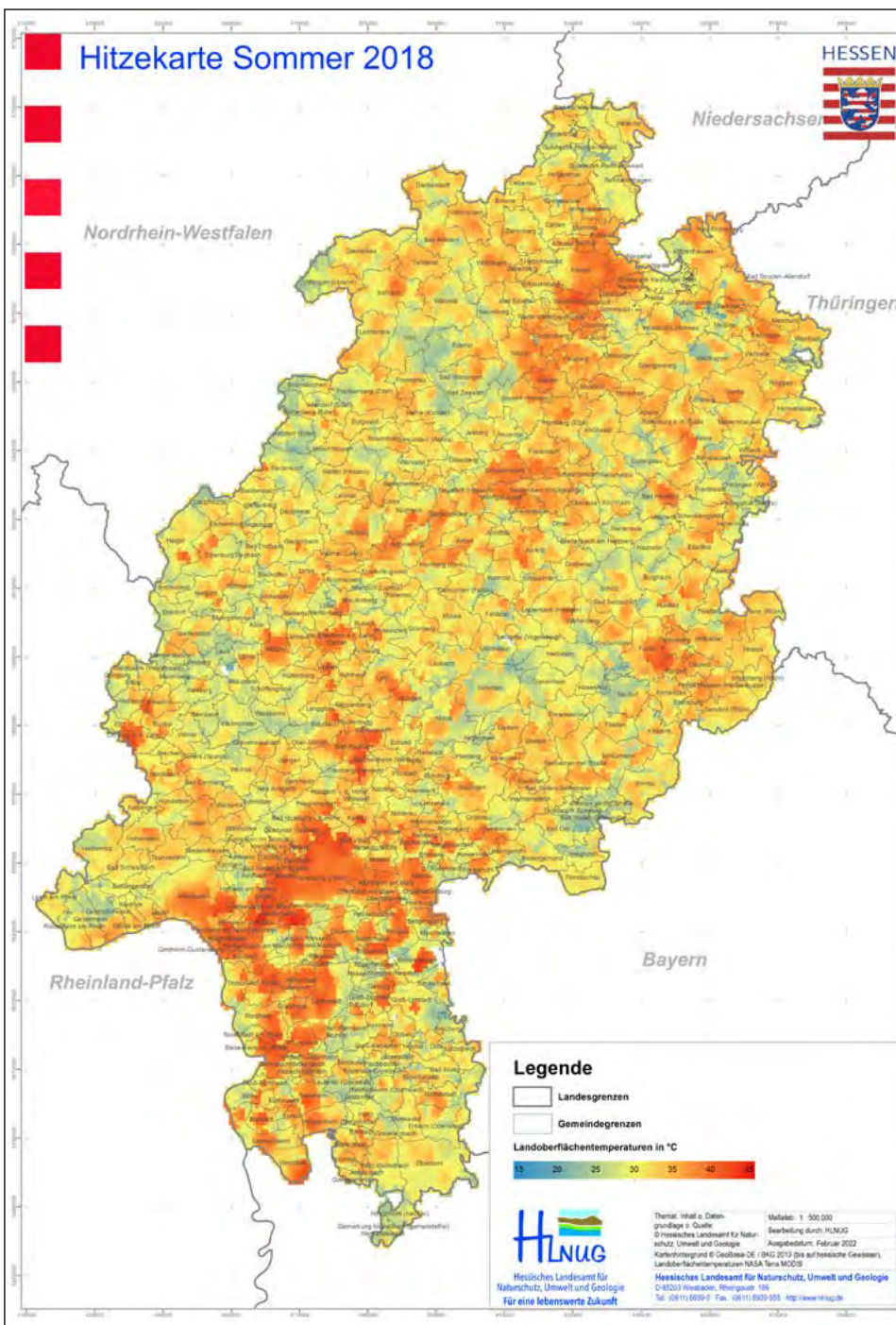
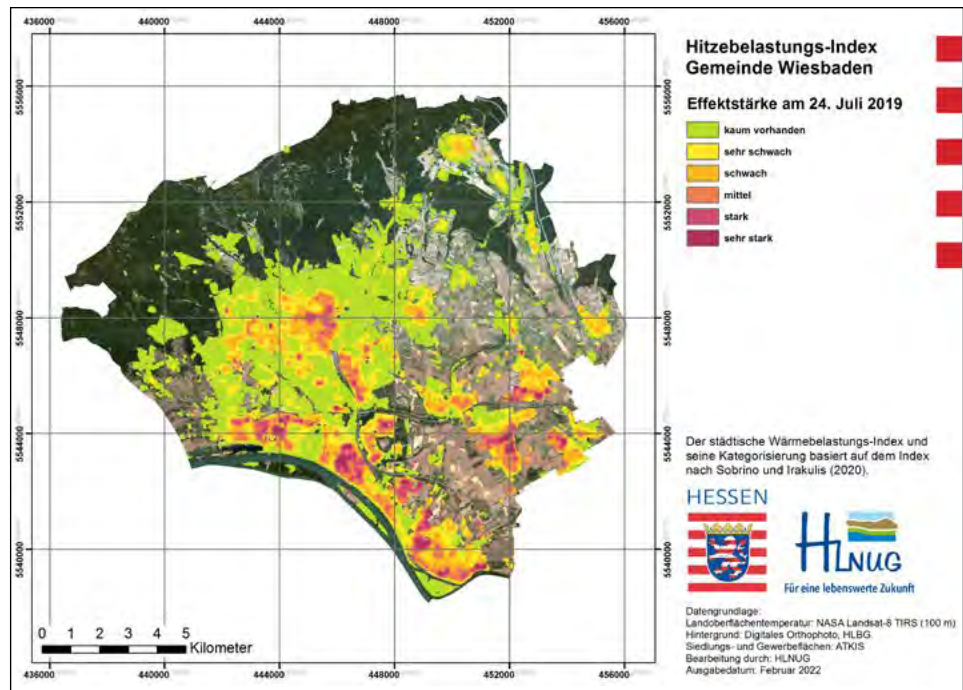


Abb. 8: Hitze im Sommer 2018 - maximale Landoberflächentemperaturen

betroffen, sondern auch kleinere Städte und Kommunen wie Korbach oder Witzenhausen im Norden Hessens. Kühle Gebiete finden sich vor allem in den bewaldeten Höhenlagen Hessens oder dem Nationalpark Kellerwald-Edersee. Während Abb. 8 die maximale Landoberflächentemperatur für lediglich ein einzelnes Jahr wiedergibt, zeigt der Datensatz „Mittlere Hitzebelastung im Sommer der Jahre 2001–2020“ eine Einordnung des Mittelwerts (Perzentilzuordnung) im Zeitraum von 20 Jahren (2001–2020, hier nicht gezeigt). Die Hitzebelastung wurde in

Abb. 9: Hitzebelastungsindex von Wiesbaden am 24.07.2019



sieben Klassen quantifiziert und erlaubt gemeinsam mit den jährlichen Daten eine weitere - vor allem jährlich variable - Differenzierung der Hitzebelastung in Hessen.

Zur Unterstützung der hessischen Kommunen stellt das Fachzentrum Klimawandel und Anpassung vielfältige Handlungshilfen, Checklisten und Methodenbaukästen bereit. Diese werden mit dem Hitzeviewer durch kommunale Karten auf Basis von Landsat-8-Daten vom 24. Juli 2019 ergänzt: Sie zeigen zum einen Cold Spots und Hot Spots, also Gebiete, die kälter oder wärmer als der Mittelwert der Kommune sind. Zum anderen setzt der Hitzebelastungsindex (SOBRINO & IRAKULIS 2020) die Oberflächentemperatur einer versiegelten oder bebauten Fläche in Bezug zur mittleren Oberflächentemperatur an allen Punkten der Siedlungs- und Gewerbeflächen der Kommune. Der Hitzebelastungsindex kategorisiert den Wärmeinseleffekt in sechs Effektstärken (Abb. 9).

Für ganz
Hessen stehen
jährlich rund **492**
Sentinel-2-Szenen
mit weniger als 50 %
Wolkenbedeckung zur
Verfügung.



Thema Informationstechnologie

Fernerkundliche Daten und Anwendungen weisen eine große Heterogenität der Datenmodelle und -formate sowie eine große Komplexität der Verarbeitung auf. Besonders bei hoher Auflösung wächst die Datenmenge einer Szene in den Gigabyte-Bereich. Eine leistungsfähige IT-Infrastruktur und anwendungsfreundliche Software sind für die effiziente Prozessierung unabdingbar. Gemeinsam genutzte Speicher- und Rechenkapazitäten, auch im Verbund mit anderen hessischen Behörden, bieten einen ganzheitlichen Ansatz, der von Abfragesprachen und

Skalierbarkeit bis hin zu mobilem Zugang und Visualisierung reicht (BAUMANN et al. 2016).

Für fernerkundliche Auswertungen stehen in der zentralen IT im HLNUG skalierbare, hochperformante IT-Infrastruktursysteme bereit, auf denen Anwendungssoftware und Datenbanken zur Datenprozessierung und Programmierung betrieben werden.

Die Strategie „Digitales Hessen“ benennt den Technologiebereich „Geoinformationen“ als eines von vier Handlungsfeldern, die eine zentrale Grundlage für Aufbau und Betrieb der digitalen Verwaltung darstellen. Das von der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG) geleitete Projekt „GEO-HUB - Untersuchung neuer Bereitstellungsmöglichkeiten und Anwendungspotentiale von multidimensionalen Geodaten mit Raum-Zeit-Eigenschaften“ setzt sich zum Ziel, Fernerkundungsdaten des Copernicus-Programms (Sentinel-2) und weiterer Geobasisdaten performant und dienstbasiert bereitzustellen. Die Machbarkeitsstudie nutzt das Datenbankmanagementsystem „Rasdaman“, welches in der Verfahrenscloud Hessen der Hessischen Zentrale für Datenverarbeitung als Cloud-Technologie umgesetzt wird. Die Kompetenzstelle Fernerkundung ist in alle Projekttreffen eingebunden und wird die Umsetzung mittels Praxistests gemeinsam mit der HVBG bewerten.



Fazit

Als wichtige Informationsquelle spielt die Fernerkundung schon lange eine Rolle bei den Fragenstellungen des Globalen Wandels und Herausforderungen wie dem Klimawandel oder der Biodiversitätskrise. Auch auf kleineren Maßstäben, wie bei uns in Hessen und ganz besonders für das Umweltmonitoring, leistet sie einen wesentlichen Beitrag, vor allem aufgrund ihrer Flächenhaftigkeit und Wiederholbarkeit. Die physikalischen Messungen in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums werden in vielfältige Informationen umgewandelt und sind am HLNUG inzwischen in allen Fachabteilungen mit Anwendungen etabliert: vom Wasserqualitätsmonitoring mittels der optischen Sentinel-Satelliten und der Detektion von Bodenbewegungen mit SAR-Daten von Sentinel-1 über multitemporale Zeitreihenanalyse für das Zustands- und Veränderungsmonitoring von Grünland bis hin zur zwei Dekaden umfas-

senden Auswertung thermaler Daten für den Hitzeviewer. Die Kompetenzstelle Fernerkundung arbeitet dabei an Lösungen für die Speicherung und Prozessierung von Satellitendaten und ist zentraler Ansprechpartner zum Thema Fernerkundung.

Literatur

- BALLARI, D., VILCHES-BLÁZQUEZ, L.M., ORELLANA-SAMANIEGO, M.L., SALGADO-CASTILLO, F., OCHOA-SÁNCHEZ, A.E., GRAW, V., TURINI, N. & BENDIX, J. (2023): Satellite Earth Observation for Essential Climate Variables Supporting Sustainable Development Goals: A Review on Applications. – *Remote Sens.* 15 (11): 2715–2740; Basel.
- BAUMANN, P., MAZZETTI, P., UNGAR, J., BARBERA, R., BARBONI, D., BECCATI, A., BIGAGLI, L., BOLDRINI, E., BRUNO, R., CALANDUCCI, A., CAMPALANI, P., CLEMENTS, O., DUMITRU, A., GRANT, M., HERZIG, P., KAKALETRIS, G., LAXTON, J., KOLTSIDA, P., LIPSKOCH, K., MAHDIRAJI, A. R., MANTOVANI, S., MERTICARIU, V., MESSINA, A., MISEV, D., NATALI, S., NATIVI, S., OOSTHOEK, J., PAPPALARDO, M., PASSMORE, J., ROSSI, A.P., RUNDO, F., SEN, M., SORBERA, V., SULLIVAN, D., TORRISI, M., TROVATO, L., VERATELLI, M.G. & WAGNER, S. (2016): Big Data Analytics for Earth Sciences: the EarthServer approach. – *Int. J. Digit. Earth* 9 (1): 3–29; Milton Park.
- BUCK, O., RÜHL, J., SCHROIFF, A., MÜNCH, D., WIEDE, S., BICSAN, A., MÜLLER, S., KLINK, A., HINTERLANG, D. & MÜTERTHIES, A. (2018): Der Einsatz von Fernerkundung im FFH-Monitoring am Beispiel der Anwendung FELM. – *Natur u. Landschaft* 93 (5): 215–233; Stuttgart.
- BUETTIG, S., LINS, M. & S. GOIHL (2022): WaterMaskAnalyzer (WMA) – A User-Friendly Tool to Analyze and Visualize Temporal Dynamics of Inland Water Body Extents. – *Remote Sens.* 14 (18): 1–12; Basel.
- CRACKNELL, A.P. (2018): The development of remote sensing in the last 40 years. – *Int. J. Remote Sens.* 39 (23): 8387–8427; Milton Park.
- DECH, S.W., GLASER, R., MEISNER, R. (2008): *Globaler Wandel. Die Erde aus dem All* – 259 S.; München (Frederking & Thaler).
- DLR (2021): Copernicus leuchtet Grün. Integration und Praxistransfer von Copernicus-Aktivitäten für ein umfassendes behördliches Monitoring von Grünland. [<https://d-copernicus.de/daten/beispiele-und-anwendungen/umwelt-und-naturschutz/copernicus-leuchtet-gruen/>; Stand: 02.10.2023].

- EU Wasserrahmenrichtlinie (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (EU WRRL), vom 23.10.2000. [<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2000L0060:20090625:DE:PDF>, Stand: 02.10.2023].
- HVBG (2023): 3D-Daten. [<https://hvbg.hessen.de/landesvermessung/geotopographie/3d-daten>, Stand: 02.10.2023].
- HLNUG (2022): Satellitenfernerkundung in Hessen - Mit Hitzekarten Hot Spots erkennen. [https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Broschuere_SatellitenfernerkundungHessen_Hitzekarten.pdf, Stand: 02.10.2023].
- IWASZCZUK, D., HENK, A., HOMUTH, B., RUDOLF, M., TREFFEISEN, T. & KRZEPEK, K. (2022): Zwischenbericht Umwelt 4.0 - Cluster I. Nutzung digitaler Geländemodelle und Copernicus-Daten.
- JETZ, W., MCGEOCH, M.A., GURALNICK, R., FERRIER, S., BECK, J., COSTELLO, M.J., FERNANDEZ, M., GELLER, G.N., KEIL, P., MEROW, C., MEYER, C., MULLER-KARGER, F.E., PEREIRA, H.M., REGAN, E.C., SCHMELLER, D.S. & E. TURAK (2019): Essential biodiversity variables for mapping and monitoring species populations. - Nat. Ecol. Evol. 3 (4): 539-551; London.
- MCCABE, M.F., MIRALLES, D., HOLMES, T.R.H. & FISHER, J.B. (2019): Advances in the Remote Sensing of Terrestrial Evaporation. - Remote Sens. 11 (9): 1138; Basel.
- MCCABE, M.F., RODELL, M., ALSDORF, D.E., MIRALLES, D.G., UIJLENHOET, R., WAGNER, W., LUCIEER, A., HOUBORG, R., VERHOEST, N.E.C., FRANZ, T.E., SHI, J., GAO, H. & WOOD, E.F. (2017): The Future of Earth Observation in Hydrology. - Hydrol. Earth Syst. Sci. 21 (7): 3879-3914; Göttingen.
- PAPATHANASOPOULOU, E., SIMIS, S., ALIKAS, K., ANSPER, A., ANTTILA, S., ATILA, J., BARILLÉ, A.-L., BARILLÉ, L., BRANDO, V., BRESCIANI, M., BUČAS, M., GERNEZ, P., GIARDINO, C., HARIN, N., HOMMERSOM, A., KANGRO, K., KAUPPILA, P., KOPONEN, S., LAANEN, M., NEIL, C., PAPADAKIS, D., PETERS, S., POIKANE, S., POSER, K., PIRES, M.D., RIDDICK, C., SPYRAKOS, E., TYLER, A., VAIČIŪTĖ, D., WARREN, M. & ZOFFOLI, M.L. (2019): Satellite-assisted monitoring of water quality to support the implementation of the Water Framework Directive. EOMORES white paper. [<https://zenodo.org/records/3903776>; Stand: 02.10.2023].

- PETTORELLI, N., WEGMANN, M., SKIDMORE, A., MÜCHER, S., DAWSON, T.P., FERNANDEZ, M., LUCAS, R., SCHAEPMAN, M.E., WANG, T., O'CONNOR, B., JONGMAN, R.H., KEMPENEERS, P., SONNENSCHNEIN, R., LEIDNER, A.K., BÖHM, M., HE, K.S., NAGENDRA, H., DUBOIS, G., FATOYINBO, T., HANSEN, M.C., PAGANINI, M., DE KLERK, H.M., ASNER, G.P., KERR, J.T., ESTES, A.B., SCHMELLER, D.S., HEIDEN, U., ROCCHINI, D., PEREIRA, H.M., TURAK, E., FERNANDEZ, N., LAUSCH, A., CHO, M.A., ALCARAZ-SEGURA, D., MCGEOCH, M.A., TURNER, W., MUELLER, A., ST-LOUIS, V., PENNER, J., VIHERVAARA, P., BELWARD, A., REYERS, B. & GELLER, G.N. (2016): Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. - *Remote Sens Ecol Conserv* 2 (3): 122-131; New Jersey.
- SOBRINO, J.A. & IRAKULIS, I. (2020): A Methodology for Comparing the Surface Urban Heat Island in Selected Urban Agglomerations Around the World from Sentinel-3 SLSTR Data. - *Remote Sens.* 12 (12): 2052; Basel.
- SYMANK, A.; HAUKE, U.; RÜCKRIEM, C.; SCHRÖDER, E.; MESSER, D. (1998): BfN-Handbuch zur Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (92/43/EWG) und der Vogelschutzrichtlinie (79/409/EWG). - 560 S., Bonn.
- UFZ (2023): Leuchtturm-Projekt „BIGFE - Erfassung der Wasserqualität und Wasserflächenausdehnung von Binnengewässern durch Fernerkundung“. [<https://www.ufz.de/bigfe/index.php?de=48596>, Stand: 02.10.2023].
- VANDEN BORRE, J., PAELINCKX, D., MÜCHER, C.A., KOOISTRA, L., HAEST, B., DE BLUST, G. & SCHMIDT, A.M. (2011): Integrating remote sensing in Natura 2000 habitat monitoring: Prospects on the way forward. - *J Nat Conserv* 19 (2): 116-125; Amsterdam.
- YANG, J., GONG, P., FU, R., ZHANG, M., CHEN, J., LIANG, S., XU, B., SHI, J. & DICKINSON, R. (2013): The role of satellite remote sensing in climate change studies. - *Nature Clim Change* 3 (10): 875-883; London.