

Technische Hochschule Georg Agricola, Bochum

MULTISENSORALES GEOMONITORING – EIN BEITRAG ZUR DATENFUSION IM NACHBERGBAU

Bodo Bernsdorf, Tobias Rudolph, Marcin Pawlik, Stephan Bökelmann

Zusammenfassung: Für das Forschungszentrum Nachbergbau (FZN) der Technischen Hochschule Georg Agricola ist Geomonitoring ein mehrstufiger Ansatz des Umweltmonitorings. Mit Fokus auf nachbergbauliche Aktivitäten wird ein genaues Prozessverständnis naturräumlicher Abläufe hergestellt, um relevante Aspekte zu extrapolieren. Dies ist im Allgemeinen der Versuch, das Prozessverständnis in einen flächendeckenden Ansatz zu überführen. Vor der Analyse von Satellitendaten nutzt das FZN vergleichbare Drohnen-basierte Sensoren, um deren höhere geometrische Auflösung zu nutzen. Der vorliegende Beitrag greift einen Teilaspekt aus diesem Ansatz auf. Über Bodenanalysen und In-situ-Sensoren wurden Jahresgänge der Bodenfeuchte herausgearbeitet. Korrelationen zur Vegetation und deren Entwicklung wurden hergestellt, die mithilfe von Vegetationsindizes ermittelt wurden. Der Beitrag stellt einen Versuch vor, um in kleinräumig strukturierten Landschaften auf der Mikroebene (z. B. Feldschlag/Waldstück) mit preiswerten RFID-Sensoren eine Datenverdichtung zu leisten. Sensordaten werden über mobile GIS erfasst und liefern Daten, die sicher interpoliert und mit den Ergebnissen der Multispektralanalysen verglichen werden können. Es wird dargelegt, wie gut Korrelationen zwischen den interpolierten Kartierungsergebnissen und den resultierenden Vegetationsindizes gelingen.

Schlüsselwörter: Geomonitoring, Umweltmonitoring, Sensoren, Drohnen, mobile GIS, Nachbergbau, Messtechnik

MULTI-SENSORAL GEOMONITORING – A CONTRIBUTION ON DATA FUSION IN POST-MINING

Abstract: The Research Center of Post-Mining (FZN) at the Technische Hochschule Georg Agricola University considers geomonitoring a multi-level approach to environmental monitoring. With a focus on post-mining activities, a precise process understanding of natural processes is established in order to extrapolate relevant aspects. This is in general an attempt to translate process understanding into an area-wide approach. Prior to the analysis of satellite data, the FZN uses comparable drone-based sensors to take advantage of their higher geometric resolution. This article describes partial aspects of this approach. Soil analyses and in situ sensors were used to determine annual cycles of soil moisture. Correlations to vegetation and its development were established using vegetation indices. The article presents a test to perform data summarization in small-scale landscapes at the micro level (e. g. field or forest area) using low-cost RFID sensors. Sensor data are collected via mobile GIS and provide data that can be safely interpolated and compared with the results of multispectral analyses. It will be shown how correlation between the interpolated mapping results and calculated vegetation indices can be observed.

Keywords: Geomonitoring, environmental monitoring, sensors, drones, mobile GIS, post-mining, measurement technology

Autoren

Dr. Bodo Bernsdorf
Prof. Dr. Tobias Rudolph
M. Sc. Marcin Pawlik
M. Eng. Stephan Bökelmann
Forschungszentrum Nachbergbau (FZN)
Technische Hochschule Georg Agricola (THGA)
Herner Straße 45
D-44787 Bochum

E: bodo.bernsdorf@thga.de
tobias.rudolph@thga.de
marcin.pawlik@thga.de
stephan.boekelmann@thga.de

1 EINFÜHRUNG IN DIE ÜBERGEORDNETE THEMATIK

Im Rahmen des Projekts Climate Change – Management and Monitoring (C_2M_2), welches das Forschungszentrum Nachbergbau (FZN) in Zusammenarbeit mit der Emscher-genossenschaft – Lippeverband und mit dem Partner EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH (EFTAS) in den Jahren 2020 und 2021 durchführte, wurden seitens des FZN Fragen zur In-situ-Bodensensorik im Zusammenhang mit der Messung von Bodenfeuchte bewertet (Forschungszentrum Nachbergbau o. J.^a, Bernsdorf et al. 2022, Bernsdorf & Khaing Zin 2023). Im Einzugsgebiet der Boye, einem Nebenfluss der Emscher (Held 2007), wurde eine Studie in vier Arbeitsgebieten durchgeführt, in der mögliche Ansätze zur Bewertung der Wasserlieferung aus dem Emscher-Einzugsgebiet erarbeitet werden sollten. Das Projekt stand in einem größeren Zusammenhang. Über die drei Datenebenen Satellitendaten, Drohnendaten und In-situ-Messungen sollte im Projekt ein Prozessverständnis der Abläufe zur Wasserlieferung aus einem Einzugsgebiet gewonnen werden.

Mit dem Großprojekt des naturnahen Rückbaus der Emscher wurde eines der größten wasserbaulichen Projekte des letzten Jahrhunderts angegangen, das Ende 2022 vor der Fertigstellung stand (Emscher-genossenschaft o. J., Rautenberg 2022). Die Verhältnisse in der Emscherregion in den Trockenjahren 2018 – 2020, 2022 sowie dem Starkregenereignis im Juli 2021 haben gezeigt, dass sich der Klimawandel zunehmend auf nachbergbauliche Aspekte auswirkt. Vermutlich gefährdet der Klimawandel sogar solche Projekte, die im Rahmen des Mining Life Cycle und der Betreiberver-

antwortung eine Verbesserung der durch Rohstoffabbau bedingten Umweltveränderungen herbeiführen sollen (Goerke-Mallet et al. 2020).

Auch in anderen Projekten des FZN werden die in C_2M_2 erarbeiteten Ansätze aufgegriffen, weitergeführt oder ergänzt. Das Projekt MuSE – Multisensor-Geomonitoring zur Optimierung der nachbergbaulichen Wasserhaltung (Yin et al. 2022, Forschungszentrum Nachbergbau o. J.^b) befasst sich mit den Abläufen im Poldermanagement der Bergsenkungsgebiete und nutzt vergleichbare Methoden. Gleiches gilt für das Projekt DigitalTwin – Geomonitoring meets Industrie 4.0 (Forschungszentrum Nachbergbau o. J.^c, Pawlik et al. 2021, Pawlik et al. 2022^d), in dem der hier relevante Fokus auf den Vegetations- und Wasserindizes und dem diesbezüglichen Vergleich der Satelliten- mit der Drohnenebene liegt (Pawlik et al. 2022^b). Eine umfassende Darstellung zum Verständnis des nachbergbaulichen Geomonitorings findet sich bei Rudolph et al. (2022).

2 METHODISCHER ANSATZ

Der Ansatz ist jeweils ähnlich. Um aus Satellitendaten abgeleitete Informationen – beispielsweise Vegetations- oder Wasserindizes – verstehen und sicher interpretieren zu können, muss zunächst ein Prozessverständnis vor Ort erarbeitet werden. Untersuchungen im eigenen Hause zeigen, dass es Aspekte in den Satellitendaten gibt, die zu Fehlinterpretationen, beispielsweise verursacht durch eine geringe geometrische Auflösung, Mischpixel oder ungünstige

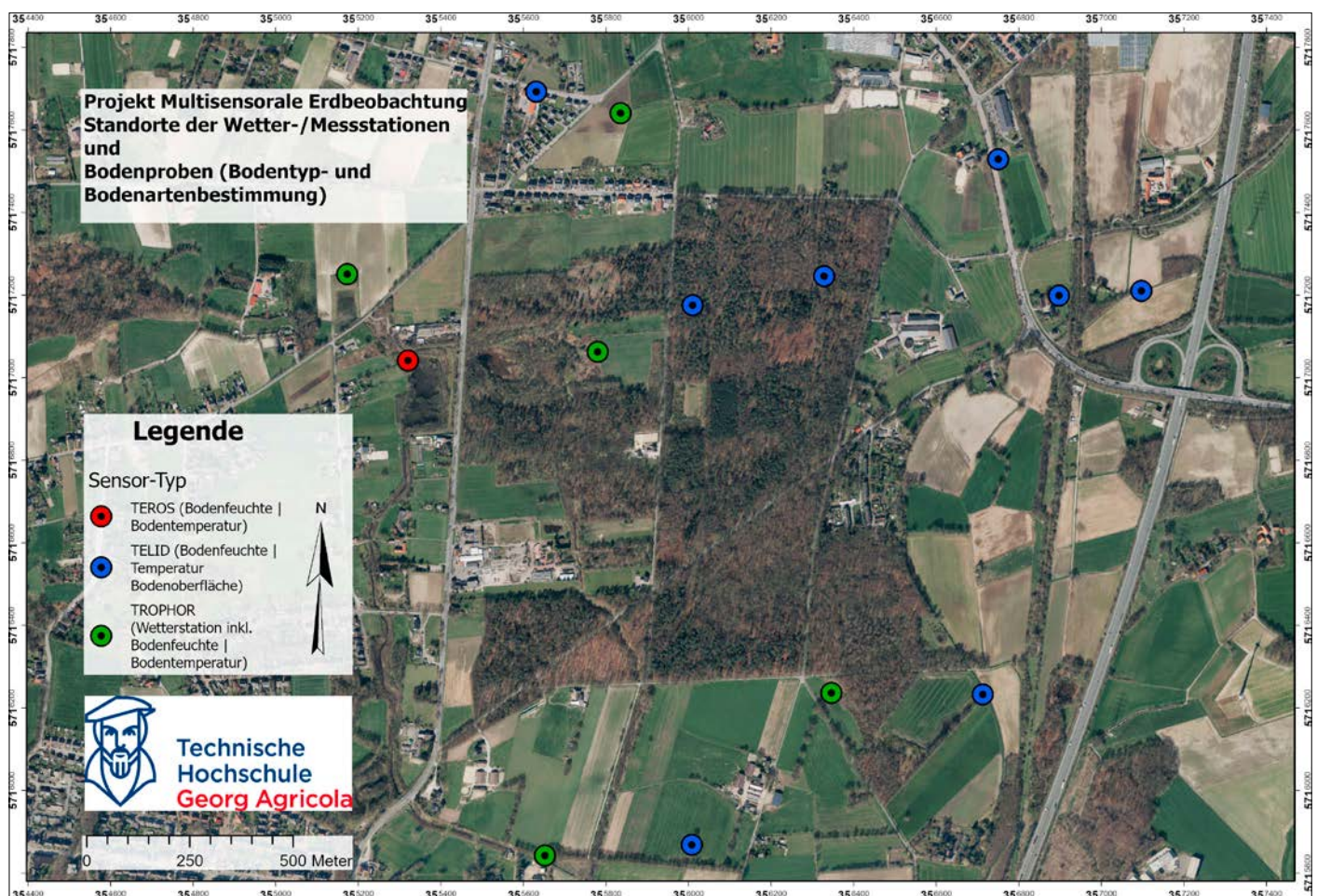


Abbildung 1: Standorte der Wetterstationen, installierter Bodenfeuchte- und Temperatursensorik und Bodenprobenahme

Überflugtermine, führen können (Pawlik et al. 2022^b). Zur Kalibrierung der Satellitendaten wird üblicherweise eine Vor-Ort-Validierung (Ground Truthing) genutzt. Dieses baut im Projekt auf Geländearbeiten und entsprechender Sensorik auf. Beides trägt zum Verständnis der Abläufe bei und unterstützt die Interpretation der Satellitendaten. Die ausgewählten Arbeitsgebiete sind nach Maßgabe einer Bewertung durch Spezialisten möglichst regionentypische Standorte – in der kleingekammerten und anthropogen stark überprägten Landschaft des Ruhrgebiets durchaus eine Herausforderung – und werden mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet (vgl. Bernsdorf et al. 2022, Bernsdorf & Khaing Zin 2023, Yin et al. 2022). In den zitierten Projekten wurden zusätzlich Bodenproben gewonnen, im Gelände angesprochen (Spohnagel et al. 2005) und im Labor verarbeitet (Wulf et al. 2018, DIN EN ISO 11461, 14688, 1789-4). Diese Daten wurden mit den Kartierungen des Geologischen Diensts NRW verglichen (Geologischer Dienst NRW o. J.) und die Darstellungen der Bodenkarte entsprechend der Laborresultate angepasst.

Als Zwischenebene zwischen In-situ-Sensorik und Satelliten werden in den Projekten mehrere Typen von Drohnen genutzt. Gezielt werden RGB-, thermale Infrarot- und Multispektraldaten eingesetzt.

Der vorliegende Beitrag greift aus diesen umfangreichen Untersuchungen einen wichtigen Aspekt heraus. Bodenproben, Vegetationskartierungen und der Einbau von Messtechnik sind naturgemäß durch Aufwand und Kosten nur begrenzt realisierbar. Im vorliegenden Projekt wurde dies an 14 repräsentativen Standorten (Abbildung 1), ausgesucht nach Lage im Senkungstrichter, geologischer und Bodenkarte sowie Geländesondierungen (z. B. Bohrstockproben), vorgenommen.

Es wurde nach einer Methode gesucht, um die Daten für Temperatur und Bodenfeuchte in Einzelfällen weiter verdichten zu können. Das Ziel dieses Ansatzes ist es, eine ausreichende Dichte von Messpunkten zu erreichen, um diese mit besseren Ergebnissen interpolieren zu können (Lehmann 1995, Rajkai & Rydén 1992). Ob die Dichte der Punkte ausreichend ist, wurde später mithilfe einer Variogrammanalyse bewertet (vgl. Kapitel 6.1). Erst dann lassen sie sich beispielsweise mit den hochauflösenden Drohnenkarten, hier beispielhaft Multispektraldaten zur Ableitung von Vegetations- und Wasserindizes, sicher vergleichen. Die diesbezügliche These (Forschungsfrage) lautet: *Die Bodenfeuchte, beeinflusst durch die Temperatur an der Bodenoberfläche, hat direkten Einfluss auf die Pflanzengesundheit, messbar durch gängige Vegetationsindizes.* Ziel ist es, über die Ableitung von Vegetationsindizes aus Satellitendaten für große Gebiete Aussagen zur potenziellen Wasserlieferung aus einem Einzugsgebiet ableiten zu können. Die Drohnenebene soll den „Sprung“ von den In-situ-Daten zur Satellitenebene nachvollziehbar gestalten. Lassen sich also Zusammenhänge zwischen den Vegetationsindizes auf hoch genau kartierten multispektralen Daten wiederfinden, kann ein Zusammenhang mit entsprechenden Werten der Satellitenebene angenommen werden.

Eine weitere, diesbezügliche Fragestellung in den Projekten zielt auf den Einsatz von (möglichst) preiswerten Sensoren ab. Die In-situ-Sensoren (Datenlogger, in das SigFox-Netz eingehängte Wetterstationen etc.; Abbildung 1) liefern im Rahmen ihrer technisch bedingten Messgenauigkeiten eine hohe Datenerfassungsfrequenz. Sie bilden damit die Verhältnisse vor Ort sehr exakt in enger zeitlicher Taktung an exakt einem Punkt ab. Nachteilig für eine flä-



Abbildung 2:

TELID 257.nfc Bodenfeuchtesensor

Abbildung 3:

TELID 212.nfc Temperatursensor



chenhafte Aussage ist, dass solche Daten kaum auf größere Untersuchungsgebiete zu extrapolieren sind, da sie von sehr vielen Aspekten des Naturraums beeinflusst werden. Zur Verdichtung der Daten werden im Projekt einfache RFID-Sensoren genutzt, die sich schnell auf die aktuelle Bodenfeuchte- und Temperaturverhältnisse einstellen. Mithilfe eines mobilen GIS-Ansatzes lassen sich diese Daten erfassen und verorten, sodass sie später im GIS verarbeitet und interpoliert werden können.

3 SENSORTECHNIK

Die in den flächenhaften Kartierungen verwendeten Sensoren stammen aus der Gewächshaustechnik. In intensiven Tests wurden die Sensoren in Bezug auf ihre Mess(un)genauigkeit mehrfach eingeschätzt und umfassend dokumentiert (Bernsdorf & Khaing Zin 2023, Bernsdorf et al. 2022, Flügge 2022). Neben der vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit und den in diesen Untersuchungen festgestellten Besonderheiten sind bei der Auswertung der Daten die klassischen Herausforderungen der Bodenfeuchtemessung wie etwa der formschlüssige Substratkontakt zu beachten (vgl. Lehmann 1995, Rajkai & Rydén 1992, Wulf et al. 2018). Eingesetzt wurden kapazitive Sensoren zur Erfassung der Bodenfeuchte im Oberboden (Abbildung 2; MICROSENSYS o. J.^a) und der Temperatur an der Bodenoberfläche (Abbildung 3; Microsensys o. J.^b). Beide Sensoren sind passive RFID-Transponder. Als drahtlose Sensoren lassen sie sich über Near Field Communication (NFC) aktivieren und übergeben einen Wert an die zugehörige Smartphone-App. Eine Datenspeicherung im Sensor ist nicht möglich (Flügge 2022, Microsensys o. J.^a). Demgegenüber handelt es sich beim Temperatursensor um einen Sensor, der eine einfache Temperaturerfassung ermöglicht (Abbildung 3). Der Sensor wird über eine zweite App ausgelesen.

3.1 MESSPRINZIP BODENFEUCHTESENSOR

Wird der Sensor per App aktiviert, erfasst er verschiedene Messgrößen. Nach Hersteller-Interview (zitiert in Flügge 2022) werden die Messgrößen Widerstand (R) und Kapazität (C) gemessen und

per Analog-Digitalwandler (ADC) in einen Spannungswert (U) umgewandelt, der an die App übergeben und umgerechnet wird. Die Sensoren sind für den hier vorgesehenen Anwendungszweck ungenügend kalibriert und im Herstellerlabor lediglich auf „trocken“ und „vollständig benetzt“ geprüft (telefonische Aussage des Unternehmens September 2020). Mit dem Auslesen des Spannungswerts werden die Daten in der App in einen Feuchtwert, angegeben in Volumetric Water Content (VWC in %, Messgenauigkeit $\pm 5\%$), umgewandelt (MICROSENSYS o. J.^[1], Flügge 2022). Die faktischen Fehler sind jedoch größer, wie Bernsdorf & Khaing Zin (2023) berichten.

Die Feuchtebestimmung basiert auf einer elektrischen Kapazitätsmessung. Die elektrische Kapazität ist das Maß der Eigenschaft eines Objekts, elektrische Ladungsträger aufzunehmen, die sich durch steigende Bodenfeuchte verbessert (Tippler & Mosca 2009).

3.2 MESSPRINZIP TEMPERATURSENSOR

Beim Temperatursensor handelt es sich gemäß Datenblatt (Microsensys o. J.^[2]) um einen CMOS-Temperatursensor. CMOS-Temperatursensoren können auf unterschiedliche Weise implementiert werden (Makinwa 2010). Die konkrete Realisierung des Sensors geht nicht aus dem zitierten Datenblatt hervor. Jedoch kann gesagt werden, dass sich CMOS-Temperaturfühler im Gegensatz zu Widerstandsthermometern durch einen geringeren Leistungsbedarf auszeichnen. Seine Erfassungsgenauigkeit wird zwischen 0 °C und +65 °C mit $\pm 0,5$ K angegeben. Anders als bei den Bodenfeuchtesensoren wurde dies durch die Arbeitsgruppe nicht verifiziert.

4 MOBILE GIS

Zur schnellen Erfassung raumbezogener Aspekte im Gelände hat sich die Anwendung mobiler GIS-Applikationen (engl. mobile GIS) etabliert. Im Feld lassen sich damit Daten erfassen, aber auch bearbeiten, aktualisieren, lokal und bei bestehender Internetverbindung remote speichern und analysieren. Dabei nutzt die Kombination aus Hard- und Software moderne technische Möglichkeiten, indem neben der Erfassung des eigentlichen Objekts oder Attributs die vom Smartphone oder Tablet bereitgestellten Daten integriert werden. Dies sind vor allem die über die GNSS-Nutzung bereitgestellte Position des erfassten Features. Stellt die Hardware eine Online-Verbindung zur Verfügung, lassen sich die Daten gleich remote auf einer entfernten Infrastruktur ablegen. So lassen sich schnell und sicher Positionen auffinden, Daten erheben und im Gelände überprüfen.

Die Verbindung von Kartierungsmethoden, GNSS-Technologie und GIS-Anwendungen ermöglicht es, mobile GIS-Anwendungen einfach zu erstellen und zu nutzen. Tsou (2004) definierte mobile GIS zunächst als: „... ein integriertes Software- und Hardware-Framework für den Zugriff auf Geodaten und -dienste über mobile Geräte in drahtgebundenen oder drahtlosen Netzen.“ Nowak et al. (2020) weisen jedoch darauf hin, dass trotz der zunehmenden Nutzung mobiler Anwendungen diese in der Forschung nicht häufig eingesetzt werden. Bislang wurden mobile GIS in der Forschung in folgenden Bereichen eingesetzt:

- ▶ Militär (Krämer 2009, Nitsche & Wotzlaw 2008);
- ▶ Tourismus – Verzeichnisse der Radwege (Blachowski 2004) und der historischen Touristenrouten (Atrachimowicz, Jankowska & Pawlik 2018);

- ▶ Umweltbeobachtung – Waldinventur (Li & Jiang 2011), Erfassung von Bodendaten (Iskan & Guler 2021), Grundwasser (Kameswara & Chakravarthy 2016) und Überwachung der Luftverschmutzung (Raju et al. 2012, Hamraz et al. 2014);
- ▶ Gesundheitsfürsorge (Nhavoto & Grönlund 2014, Zain et al. 2019);
- ▶ kleines Architekturinventar (Blachowski 2019, Pawlik 2017). Rittenhouse & Aldrich (2017) weisen darauf hin, dass eine frühzeitige Anwendung von GIS bei Vermessungsprojekten menschliche Fehler erheblich minimieren oder die Dateneingabezeit reduzieren kann. Pawlik et al. (2022^{b)}) weisen demgegenüber auf den Aspekt der Datenübernahme bei mobilen Anwendungen hin, da von anderen Geräten gelesene Werte fehlerhaft in das Datenformular der mobilen Anwendung übertragen werden können. Dies ist im hier vorgestellten Ablauf ein Nachteil, da die oben beschriebenen NFC-Apps nicht mit dem mobilen GIS kommunizieren. Die gesammelten Daten können in Datenbankstrukturen (Blachowski & Koźma 2006) weiterentwickelt, analysiert und durch Diagramme visualisiert werden.

Im Rahmen der beschriebenen Fragestellungen wurde eine Applikation zur Erfassung der Bodenfeuchte- und Temperaturdaten erstellt (Esri o. J.^[3]) und Flächen mithilfe dieser App kartiert. Die aus den Sensoren ausgelesenen Daten wurden dabei auf einem Server zwischengespeichert, bevor sie in ein GIS übernommen und interpoliert wurden. In enger zeitlicher Nähe wurde während der Kartierung mithilfe einer Multispektraldrohne das Areal befliegen. Exemplarisch wurde die Anwendung als Case Study in Pawlik et al. (2023^{b)}) beschrieben.

4.1 DIE MOBILE GIS-ERFASSUNGSSOFTWARE

Auf dem Markt finden sich mobile Anwendungen kommerzieller Anbieter ebenso wie solche, die unter einer Open-Source-Lizenz genutzt werden können. Da das FZN über Lizenzen für kommerzielle Software verfügt, wird in Forschung und Lehre zu mobilen GIS eine Software eingesetzt, die sowohl auf dem Android- als auch auf dem iOS-Betriebssystem läuft. Die intuitive Schnittstelle für die Entwicklung einer mobilen App ermöglicht es, eine solche zu erstellen, indem eine Funktion in das Hauptmenü gezogen wird. Bevor mit der Entwicklung der App begonnen wird, ist es wichtig zu wissen, welche Art von Daten erfasst werden soll: beschreibende Attribute, Zahlenwerte, Bilder – die Auswahlmöglichkeiten sind umfassend und auf den Einsatzzweck angepasst. Die Funktionalität basiert auf vier Bereichen:

- ▶ beschreibende Felder (Hinzufügen von ein- oder mehrzeiligem Text, Verweise auf Webseiten oder E-Mails, Hinzufügen von Zahlen, Eingabe von Datum, Uhrzeit oder beidem);
- ▶ Auswahlfelder (sie sind äußerst hilfreich bei der Erstellung von Umfragen, bei denen der Benutzer zwischen mehreren Antwortmöglichkeiten wählen kann);
- ▶ Standort (Hinzufügen einer Basiskarte aus Ressourcen des Anbieters, aber auch aus selbst erstellten Karten im korrespondierenden Online-Produkt);
- ▶ Hinzufügen von Multimedia-Ressourcen, z.B. Fotos, Filmsequenzen.

Die über eine Web-App vorbereitete Anwendung kann veröffentlicht und in die mobile Anwendung für die weitere Arbeit heruntergeladen werden.



Abbildung 4: Stratified-Random-Sampling-Positionen der Datenerfassung für Bodenfeuchte und Bodentemperatur

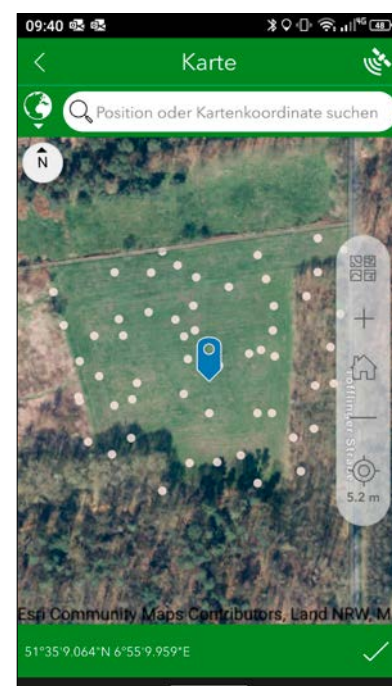


Abbildung 5: Das ins mobile GIS übernommene Shape der Probenpunkte

4.2 EINBRINGEN EINER FUNDIERTEN PROBENNAHMESTRATEGIE

Bevor im Gelände Probenpunkte besucht und Daten erfasst werden können, muss sichergestellt werden, dass die Punkte, die später in eine Interpolation eingehen, auch für ein solches Verfahren geeignet sind. Gewisse geostatistische Methoden setzen voraus, dass ein Datensatz keine systematischen Fehler enthält. Verbreitete Beprobungspläne, die auf die Ermittlung „typischer“ oder „durchschnittlicher“ Ausprägungen ausgerichtet sind, können nicht angewendet werden. Solche als *purposive sampling* bezeichneten Beprobungen verfolgen eine bestimmte Absicht, hängen vom Urteilsvermögen des Bearbeiters ab und sind subjektiv beeinflusst (Webster & Oliver 1990). Das Urteilsvermögen ist immer in irgendeiner Weise durch Voreingenommenheit geprägt, was z. B. dazu führt, dass bestimmte Standorte über- oder unterbeprobt, also systematisch bevorzugt oder benachteiligt werden. Insbesondere bei Bodenproben spielt etwa die „Bequemlichkeit“ eine Rolle, ob ein Standort also gut oder schlecht erreichbar ist: Liegt er auf einer mit Stieren bestandenen Weide, in einem schwer zugänglichen Waldstück oder ist er leicht zugänglich? Für Landschaftsstrukturen gibt es aus der Erfahrung heraus gute Gründe, die durchaus im Boden begründet sein können (Crepin & Johnson 1993). Ohne diesen Zusammenhang bei der Probennahme zu berücksichtigen, wird gegebenenfalls ein systematischer Fehler in das zu erwartende Ergebnis „eingebaut“. In der Folge liegen Interpolationspunkte zu weit auseinander, haben hochwertigen Boden bevorzugt, schlechtere Böden benachteiligt etc. In der Prognose wirkt sich dies verzerrend auf die Darstellung der natürlichen Variabilität im Prozess aus (Laurini & Thompson 1996, S. 262).

Der hier verwendete Beprobungsplan basiert in seinen Ursprüngen auf der Methode des sogenannten Stratified Systematic Unaligned Sampling (SSUS), das bereits 1977 bei Dixon & Leach (1977) und später bei Webster & Oliver (1990) beschrieben wur-

de: Eine Beprobung in einem regelhaften Gitter wird mit einer systematischen *Unregelmäßigkeit* respektive einer zufälligen Komponente kombiniert, die sicherstellt, dass sich die Kartierer nicht die Probenstandorte nach ihren Vorlieben aussuchen. In bekannten GIS-Software-Produkten ist diese Methode als Stratified Random Sampling integriert. Dabei wird zunächst ein regelmäßiges Gitter (Fishnet) über das Arbeitsgebiet gelegt, wonach innerhalb der Gitterzellen die Punkte zufällig verteilt werden (Esri o. J.^{b)}).

Im vorliegenden Falle wurde ein 20-Meter-Gitter über das Gebiet von Interesse gelegt und die Punkte berechnet. Die Auswahl einer Größenordnung für die Rasterweite ist immer eine Abwägung zwischen (Kartier-)Aufwand und zu erwartendem Ergebnis. Ziel ist im vorliegenden Anwendungsfall die Interpolation zwischen den Probenpunkten. Es konnte auf der vorgegebenen Fläche davon ausgegangen werden, dass sich die Bodenfeuchte auf einer Fläche dieser Größenordnung nicht extrem unterscheidet. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die angewendete Methode die Probenpunkte in jeder Rasterzelle verteilt. Im Extremfall können die Punkte daher auch 40 und mehr Meter (Diagonale der Rasterzelle) auseinanderliegen. Aus den 81 Rasterflächen wurden alle Probenpunkte außerhalb des Betrachtungsgebiets gefiltert, sodass 55 Probenpunkte für die Fläche verblieben (Abbildung 4). Das Shape der Probenpunkte lässt sich nun einfach in das mobile GIS übertragen, sodass die Punkte im Gelände mit der inhärenten GNSS-(Un-)Genauigkeit aufgesucht und beprobt werden können (Abbildung 5). Dabei können mehrere Meter Abweichung zwischen vorgeschlagenen und tatsächlichem Probenpunkt resultieren. Trotzdem verhindert die Methode eine subjektive Fehlbeprobung des Sachverhalts.

5 ERFASSUNG PER MULTISPEKTRALDROHNE

Nach mehreren negativen Erlebnissen (Abstürze mit Totalschäden) mit speziell für das Geomonitoring hergestellten Multikoptern setzt das FZN seit August 2021 auf semiprofessionelle Angebote des

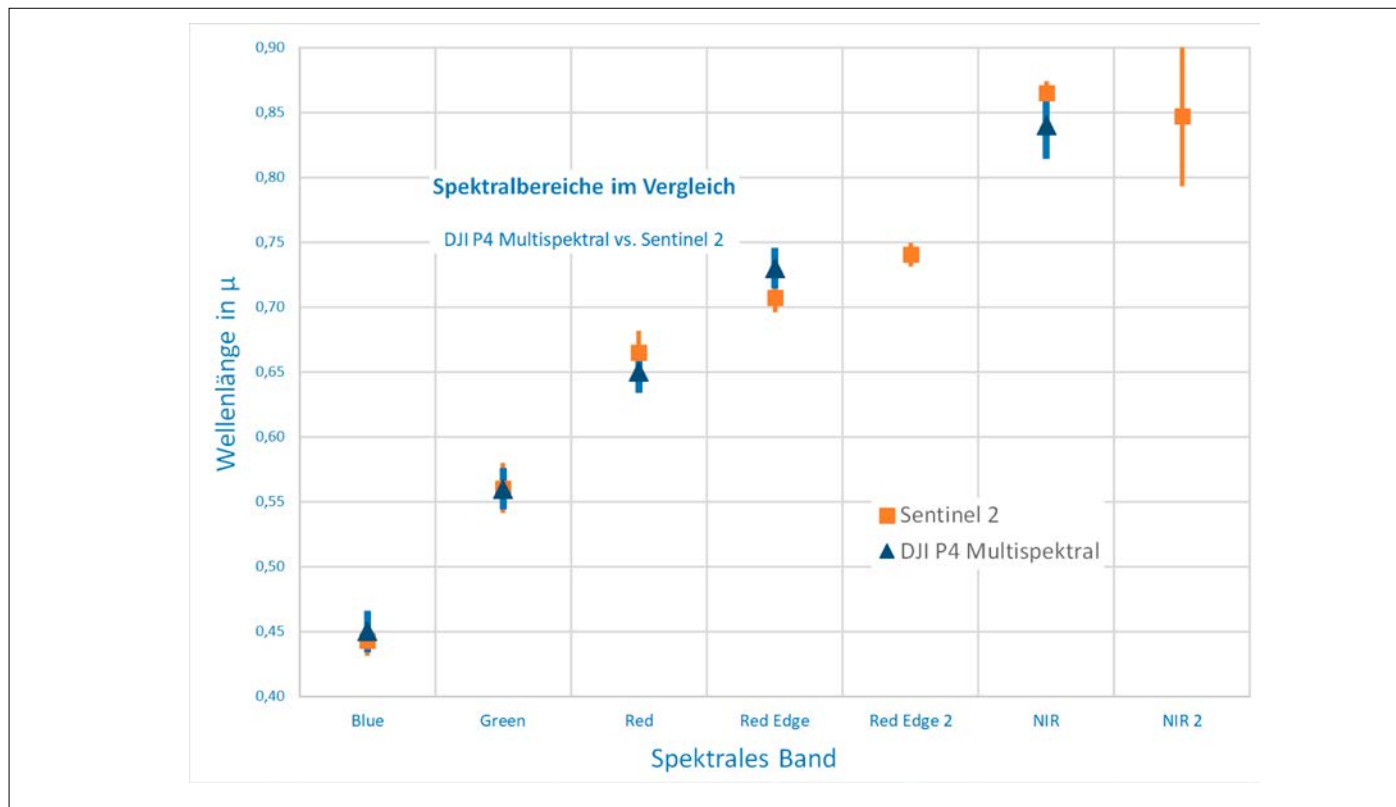


Abbildung 6: Vergleich der Charakteristik relevanter Spektralbereiche für Vegetationsindizes von DJI P4MS und ESA Sentinel-2-Satellitenpaar (Quelle: Pawlik et al. 2022^{b)}, S. 38)

Consumermarkts. Neben dem Kostenaspekt ergaben sich dadurch diverse Vorteile beispielsweise in der Rüstzeit der Drohnen. Alle Drohnenpiloten verfügen über Lizenzen der Kategorien A1, A2 und A3, sodass das FZN zur Ausübung seiner Forschungsaufgaben eine weitreichende Ausnahmeerlaubnis von Straftatbeständen durch die Bezirksregierung Münster erwirken konnte. Die zu betrachtenden Flächen sind damit in 90 % der Fälle ohne weitere Abstimmung mit Behörden oder Betreibern zu erfassen. Im Rahmen des Projekts ist aktuell eine Phantom 4 Multispectral (P4MS) der Firma DJI im Einsatz. Die für die Fragestellung wesentlichen Vorteile sind:

- ▶ Die nutzbaren Kanäle der Multispektraldrohne sind bezüglich ihrer detektierbaren Wellenlängen nahezu identisch mit denen des Sentinel-2-Satellitenpaars. Bandbreiten und Vergleichbarkeit der Kanäle sind in Abbildung 6 dargestellt.
- ▶ Die P4MS verfügt über die inhärente Nutzung des SAPOS-Signals für eine Erfassung mit Real Time Kinematic (RTK) und damit einer erheblich verbesserten Positionsgenauigkeit (im Optimalfall ± 2 cm im 3D-Raum; gewöhnlich ± 3 cm bis maximal ± 4 cm und damit innerhalb der geometrischen Bodenauflösung!)

Folglich sind die mit klassischer Software zu berechnenden Vegetationsindizes prinzipiell sehr vergleichbar mit den Sentinel-2-Daten, sieht man von der Problematik der unterschiedlichen geometrischen Auflösung und der resultierenden Mischpixel-Thematik einmal ab. Die Drohne liefert dabei hochauflösende Bilder, da sie bei 100 Metern Flughöhe eine Bodenauflösung von lediglich ca. $5,3 \text{ cm} \times 5,3 \text{ cm}$ aufweist ($6,3 \text{ cm}$ in 120 Metern Flughöhe; Höhe in Metern / $18,9 = \text{cm} / \text{Pixel}$; DJI o. J.).

Die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Einsatzes multisensoraler Drohrendaten belegen z. B. Beyer et al. (2019). Daher wurde mithilfe des beschriebenen Sensors parallel oder in enger zeitlicher Nähe zur Kartierung der Bodenfeuchte und Temperatur der Bodenoberfläche Drohnenaufnahmen des Gebiets von Interesse erstellt. So ist sichergestellt, dass Zusammenhänge, wenn sie denn bestehen, auch gefunden werden können und nicht etwa durch eine Entwicklung überdeckt werden, die durch zeitlich auseinanderklaffende Erfassungen bedingt sind. Insbesondere bei der Bodenfeuchte im Oberboden kann dies etwa im Rahmen von wenigen Stunden der Besonnung angenommen werden.

6 DATENFUSION

Die Datenfusion erfolgt im GIS. Vorgeschaltet ist die Erstellung des multispektralen Orthobildverbands in der entsprechenden Software. Das FZN nutzt sowohl Open Source als auch kommerzielle Varianten. Die insgesamt fünf Kanäle der Multispektralbilder müssen im Modell räumlich möglichst exakt abgebildet werden, damit die Verrechnung der Kanäle in der nachfolgenden Indexbildung korrekt ist. Auf das Verfahren soll an dieser Stelle nicht detaillierter eingegangen werden. Letztlich werden das resultierende Orthophoto (Multikanalbild mit R, G, B, NIR und Red Edge) sowie die im Gelände erfassten Punktdaten (Temperatur, Bodenfeuchte) ins GIS übernommen. Hiernach können nun weitere Bearbeitungsschritte erfolgen, auf die kurz eingegangen wird.

6.1 INTERPOLATIONSMETHODE

Um aus den Punktdaten eine gut interpretierbare Oberfläche abzuleiten, musste ein geeignetes Interpolationsverfahren angewendet

werden. Die Entscheidung geht von den Annahmen der jeweiligen Interpolationsmethoden aus. Betrachtet man klassische deterministische Interpolationen, wie die inverse Distanzgewichtung (Inverse Distance Weighting, kurz: IDW) oder andere, wie etwa Spline, fällt auf, dass diese im Wesentlichen auf dem 1. Geographiegesetz nach Tobler basieren. Sinngemäß sagt das Gesetz: Das, was räumlich näher beieinanderliegt, ist sich ähnlicher, als das, was räumlich weiter voneinander entfernt ist (Tobler 1970). Insofern nutzt eine Interpolationsmethode wie IDW zur Schätzung eines unbekannten Werts die bekannten Werte der Umgebung und berücksichtigt dabei – vereinfacht dargestellt – den Abstand zwischen den umliegenden bekannten Werten und der Position des zu schätzenden Werts mithilfe eines Faktors (gewichtetes Mittel). Näher gelegene bekannte Messwerte werden stärker gewichtet als weiter voneinander entfernt liegende (Cluster-Sensitivität; Kupke 2002, Malla et al. 2014, Naoum & Tsanis 2004).

Da das Ergebnis des auf der SUSS-Methode basierenden Messwerterasters dazu führt, dass es systematisch zu einer bewusst unregelmäßigen Punktverteilung kommt, würde eine Methode wie das IDW zufällig näher beieinanderliegende Messwerte lediglich aufgrund ihrer Nähe überbewerten und zufällig weiter entfernt liegende Messwerte systematisch geringer in die Betrachtung einbeziehen.

Zur Lösung des Problems können geostatistische Methoden genutzt werden. Ansätze zur Nutzung geostatistischer Methoden, insbesondere das Kriging, wurden in der Analyse von Klimaparametern im Zusammenhang mit Fernerkundungsmethoden schon früh in die GIS-Welt eingeführt (z.B. Aspinall & Miller 1990). Auch in Bezug auf die Interpolation der Bodenfeuchte wurde Kriging beschrieben (z.B. Zhang et al. 2016). Die Idee des Tobler'schen Gesetzes gilt auch für die Methode des Krigings. Allerdings umgehen

Probenanzahl	52
Mittelwert	-0,03
RMS (Root Mean Square)	1,76
Mittelwert standardisiert	-0,005
RMSE (Root Mean Square Error)	1,08

Tabelle 1: Charakteristik der Ergebnisse für die Interpolation der kartierten Temperaturwerte

Kriging-Ansätze das beschriebene Problem durch die Tatsache, dass die räumliche Varianz im gesamten Probenumfeld einbezogen wird und mithilfe von Semivariogrammen die Schätzfehler minimiert werden. Letztlich geht der Kriging-Ansatz davon aus, dass es bezüglich der vorherzusagenden Aspekte eine räumliche Korrelation gibt, die sich durch die Entfernung und die Richtung manifestiert. In einem mehrstufigen Prozess wird mithilfe eines Semivariogramms letztlich auch die Varianz der Schätzung überprüft (Isaak & Srivastava 1989, Laurini & Thompson 1996).

Da im vorliegenden Fall eine solche räumliche Entfernungskorrelation angenommen wird, wurde das Kriging als Interpolationsmethode gewählt. Die Annahme der Korrelation ergibt sich daraus, dass die näher am Wald gelegenen Vorhersagepunkte vermutlich durch Bestandsklima und Beschattung kühler und damit der Boden feuchter sein sollten, was sich wiederum auf die Pflanzengesundheit auswirken würde und mit der Multispektraldrohne erfasst werden kann (vgl. Forschungsfrage). Die Daten sind unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten zuverlässig. Im zentralen Teil des Testgebiets befindet sich Grünland, auf dem höhere Temperaturen der Bodenoberfläche beobachtet wurden. Die höchsten Wer-

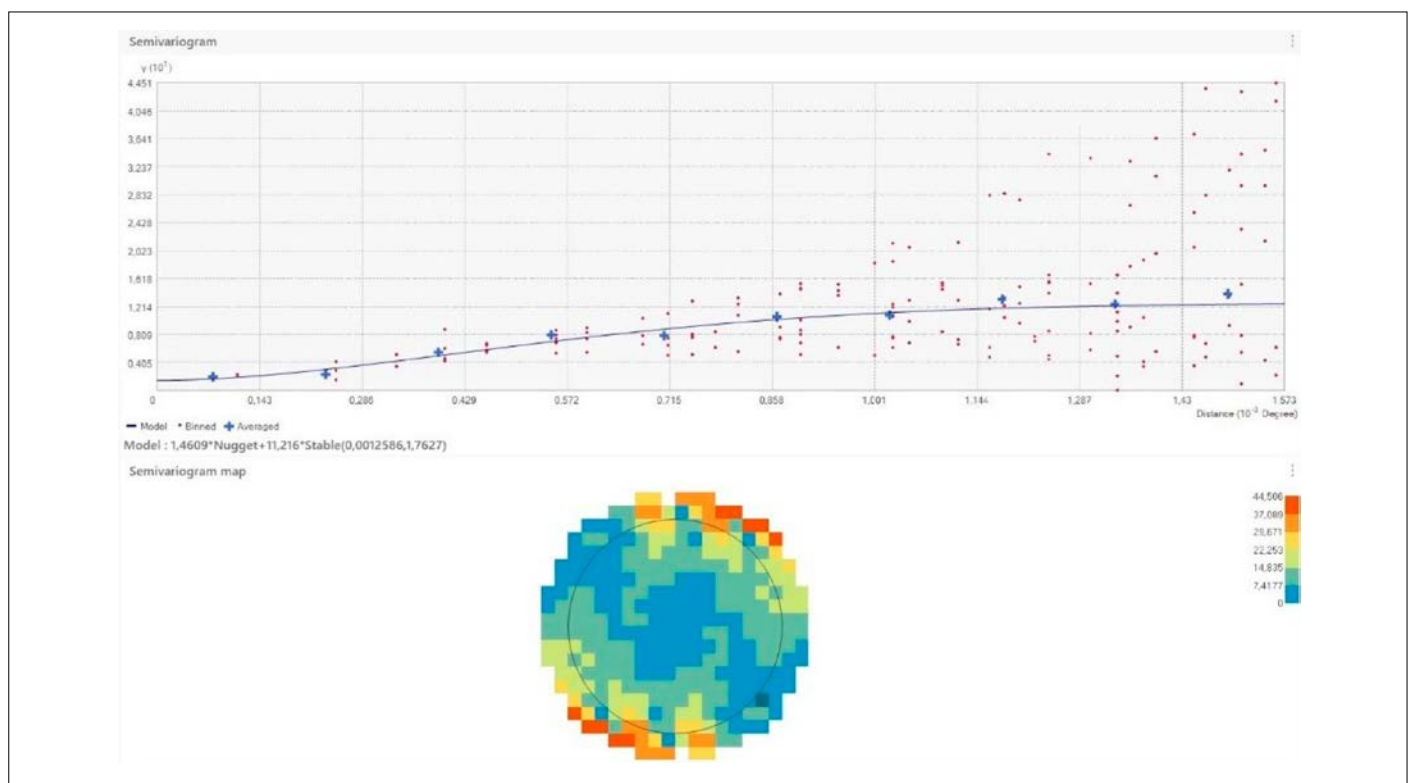


Abbildung 7: Semivariogramm der Bodentemperaturoberfläche

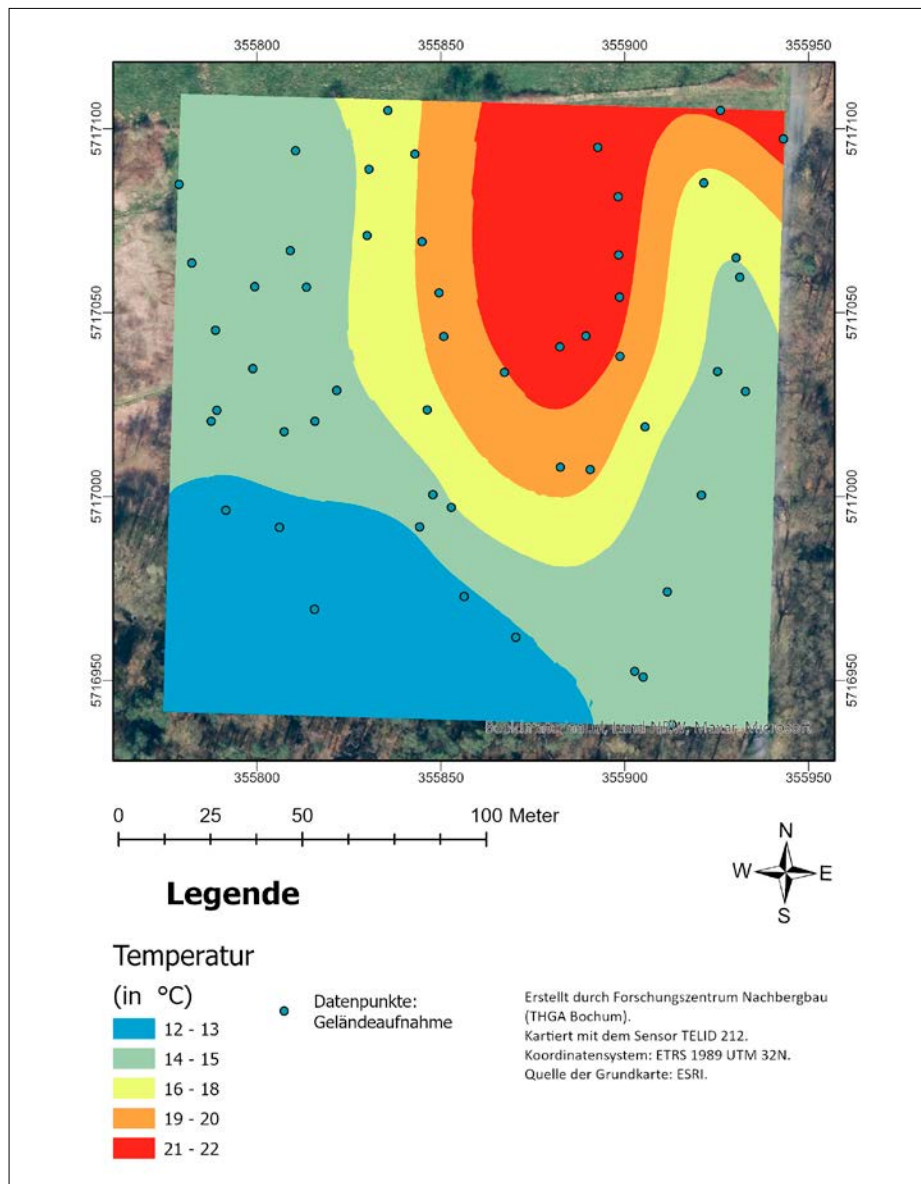


Abbildung 8: Interpolierte Oberfläche der kartierten Temperaturen an der Bodenoberfläche

te erreichten in der Sonne fast 22 °C. Der Schattenwurf der umliegenden Wälder und Niederwälder führte zu niedrigeren Temperaturen im Süden und Osten. Unmittelbar in Waldnähe wurden lediglich 12 °C gemessen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Kartierung etwa drei Stunden dauerte, am frühen Nachmittag im Osten begann und später im Nordwesten endete. Betrachtet man die daraus resultierenden interpolierten Feuchtwerte, ergibt sich ein ganz anderes Bild. Eine große Wiesenfläche weist durchschnittliche Bodenfeuchtheitswerte (um 30%) auf, die mit hohen Temperaturen korrelieren. Im Südosten hingegen beeinflusst die hohe Feuchtigkeit unter dem Wald das Bild erheblich. Auch im Nordosten sind hohe Feuchtheitswerte zu beobachten. Ebenfalls ergibt sich im Bereich des am östlichen Bildrand gelegenen Baumbestands aus jüngeren und schon schütterten Bäumen (Hain) eine Abweichung. Ist dieses Areal in der Temperaturmessung zwar relativ kühl (Beschattung), weist es trotzdem vergleichsweise geringe Bodenfeuchtwerte auf.

Abbildung 7 zeigt das Semivariogramm für die Verteilung der gemessenen Temperaturen an der Bodenoberfläche. Für die Simple-Kriging-Interpolation wurden die stabile Funktion und die Nug-

getvarianz mit einem Wert von 1,46 verwendet. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 8 dargestellt; Tabelle 1 dokumentiert die Kennwerte des Modells. Der RMS von lediglich 1,76 °C bei einer Sensorgenauigkeit von 0,5 °C ist akzeptabel.

Abbildung 9 zeigt das Semivariogramm für die Menge der gemessenen Bodenfeuchtwerte in bis zu 5 cm Tiefe (Sensorlänge). Für die Simple-Kriging-Interpolation wurden die stabile Funktion und die Nuggetvarianz mit einem Wert von 0,68 verwendet. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 10 dargestellt. Es fällt auf, dass der RMS bei 11,5 Vol.-% liegt. Damit liegt er deutlich über der vom Hersteller angegebenen Messungenauigkeit, der Wert entspricht aber den Ergebnissen von Bernsdorf & Khaing Zin (2023).

6.2 INDEXBERECHNUNG

Die Beobachtung des Umweltzustands wird durch diverse Fernerkundungsmethoden ermöglicht, die sich die grundlegenden Reflexionseigenschaften von Objekten zunutze machen. Diese wiederum sind von den Material- oder Oberflächeneigenschaften abhängig. Jedes Objekt von Interesse (Wasser, Boden, Vegetation, etc.)

Probenanzahl	52
Mittelwert	0,26
RMS (Root Mean Square)	11,50
Mittelwert standardisiert	0,02
RMSE (Root Mean Square Error)	1,03

Tabelle 2: Charakteristik der Ergebnisse für die Interpolation der kartierten Bodenfeuchtwerte

ist durch ein spezifisches Reflexions- und Absorptionsmuster gekennzeichnet, was in der wissenschaftlichen Nomenklatur als spektrale Signatur bezeichnet wird (Kuchly et al. 2020).

Die spektrale Signatur der Vegetation ist prinzipiell vom Photosynthese-Prozess gekennzeichnet, da eine Pflanze elektromagnetische Strahlung absorbieren muss, um sie in Energie, im Wesentlichen Zucker, umzuwandeln. Gleichzeitig schützt sich die Pflanze vor Überhitzung und reflektiert bestimmte Wellenlängen. Gesunde Pflanzen absorbieren in der Regel bei roten und blauen Wellenlängen und reflektieren sie bei grünen und Nah-Infrarot-Wellenlängen (NIR). NIR ist für unser Auge nicht sichtbar, weshalb uns die klassische Pflanze grün erscheint. Vegetationsbausteine, Wassergehalt und andere Eigenschaften verursachen die im Spektrum vorkommende Variation (Jones & Vaughan 2010). Durch die Untersuchung dieser Eigenschaften lassen sich Informationen über den Gesundheitszustand (Funktionsfähigkeit des Chlorophylls) und den Wassergehalt der Pflanzen gewinnen. Hierzu werden Vegetationsindizes (VI) genutzt, die bestimmte Wellenlängen rechnerisch in Beziehung setzen (Jones & Vaughan 2010). Vegetationsindizes werden durch die Kombination von zwei oder mehreren Spektralbändern berechnet und sind dimensionslos (Pawlik et al. 2023^o).

Folgende Indizes wurden zur Analyse verwendet: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Rouse et al. 1973), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index, Gittelson et al. 1996), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index, Huete et al. 1988) und MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index, Qi et al. 1994). Die Vegetationsindizes nutzen die unterschiedlichen Eigenschaften von je zwei Spektralbändern:

- Der NDVI basiert auf der Ausnutzung der spektralen Charakteristik von Vegetation im roten und NIR-Wellenlängenbereich.

$$\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (\text{Formel 1})$$

- Der GNDVI-Indikator basiert auf der Nutzung des Verhältnisses im grünen und nahen Infrarotband. Er ist ein Indikator für die photosynthetische Aktivität der Pflanzendecke.

$$\frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \quad (\text{Formel 2})$$

- Der SAVI-Indikator basiert – wie der NDVI-Indikator – auf der Verwendung des NIR- und roten Wellenlängenbereichs, einschließlich des Indikators L , der den Einfluss des Bodens berücksichtigt. Dieser Indikator minimiert also die Auswirkungen von offenem Boden auf die umliegende Vegetation.

$$\left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \right) \cdot (1 + L) \quad (\text{Formel 3})$$

wo $L = 0,5$

- Der MSAVI-Indikator basiert ebenfalls auf NIR und nutzt den roten Wellenlängenbereich. In den frühen Stadien der Vegetationsentwicklung werden sie vom NDVI-Indikator als schwache Vege-

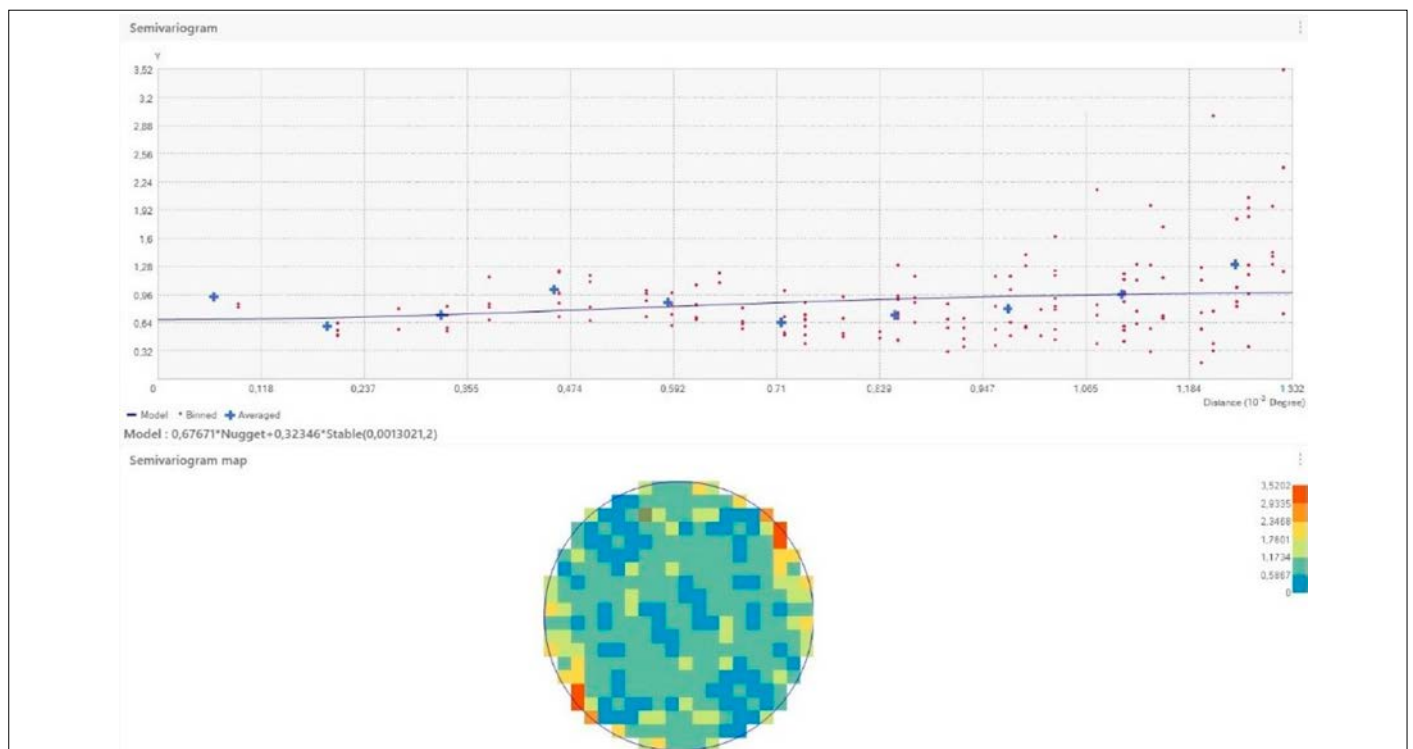


Abbildung 9: Semivariogramm der Bodenfeuchteoberfläche

tation interpretiert. MSAVI reduziert den Einfluss des Bodens, so dass eine bessere Beobachtung der Vegetation möglich ist.

$$\frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - RED)}}{2} \quad (\text{Formel 4})$$

Die Auswahl dieser Vegetationsindikatoren erfolgte auf der Grundlage der Spektralbänder, die bei Drohnenflügen mit einer Multispektralkamera zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse der berechneten NDVI und GNDVI sind in Abbildung 11 dargestellt.

Es lohnt sich, auf den südlichen Teil des Bilds zu achten. Hier erkennt man – trotz der Nutzung entsprechender Korrekturmechanismen in der Photogrammetrie-Software – den Schattenwurf der Bäume, der das Ergebnis beeinflusst, weil er die Reflektion/Absorption überlagert. Dieser Effekt konnte auch unter Nutzung einer Kalibriertafel nicht verhindert werden. Aus diesem Grund weisen

die NDVI- und GNDVI-Indizes in der Abbildung 11 an diesem Standort niedrigere Werte der Pflanzengesundheit auf, belegen aber nicht unbedingt eine geringere Vitalität.

Die minimalen Indikatorwerte werden im östlichen Teil des Bilds beobachtet, wo sich eine Straße befindet. Bei beiden berechneten Indikatoren werden hier auch die höchsten Werte der Analyse beobachtet, die einen Hain mit jungem Baumbestand repräsentieren.

Da es in dieser Studie um Temperatur und Bodenfeuchtigkeit geht, wurden auch Fernerkundungsindikatoren verwendet, die durch ihre Berechnung den Einfluss des Bodens auf das Indexergebnis reduzieren. Die in Abbildung 12 dargestellten SAVI- und MSAVI-Indizes zeigen, dass der zentrale Teil des Grünlandschlags eine gesunde Vegetation aufweist, während der östliche und südliche Teil (wo sich in der Nähe ein Waldgebiet befindet) eine geringere Vitalität hat. Es ist erwähnenswert, dass auch SAVI und MSAVI die Straßenoberfläche perfekt abbilden.

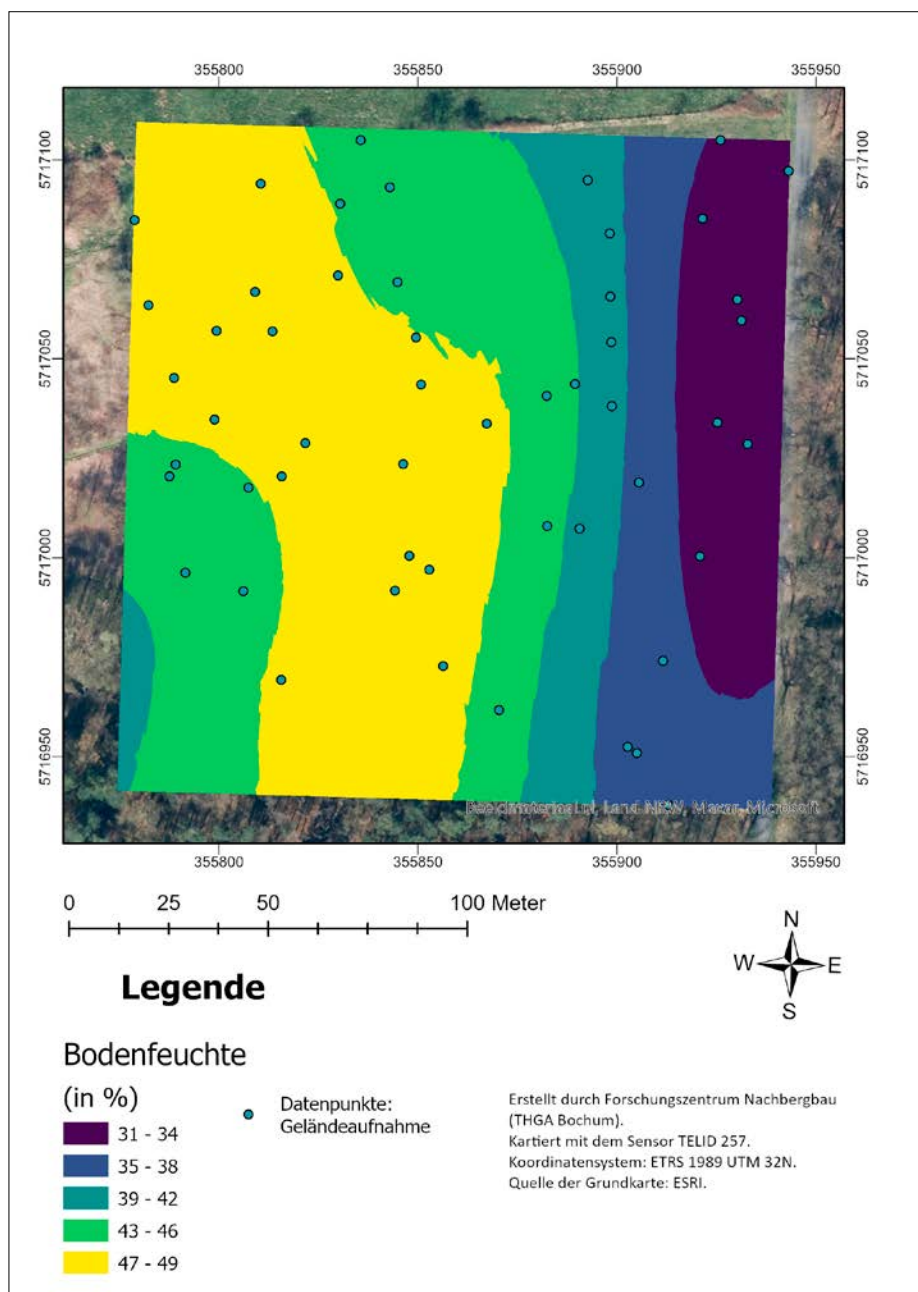


Abbildung 10: Interpolierte Oberfläche der kartierten Bodenfeuchtwerte in bis zu 5 cm Tiefe

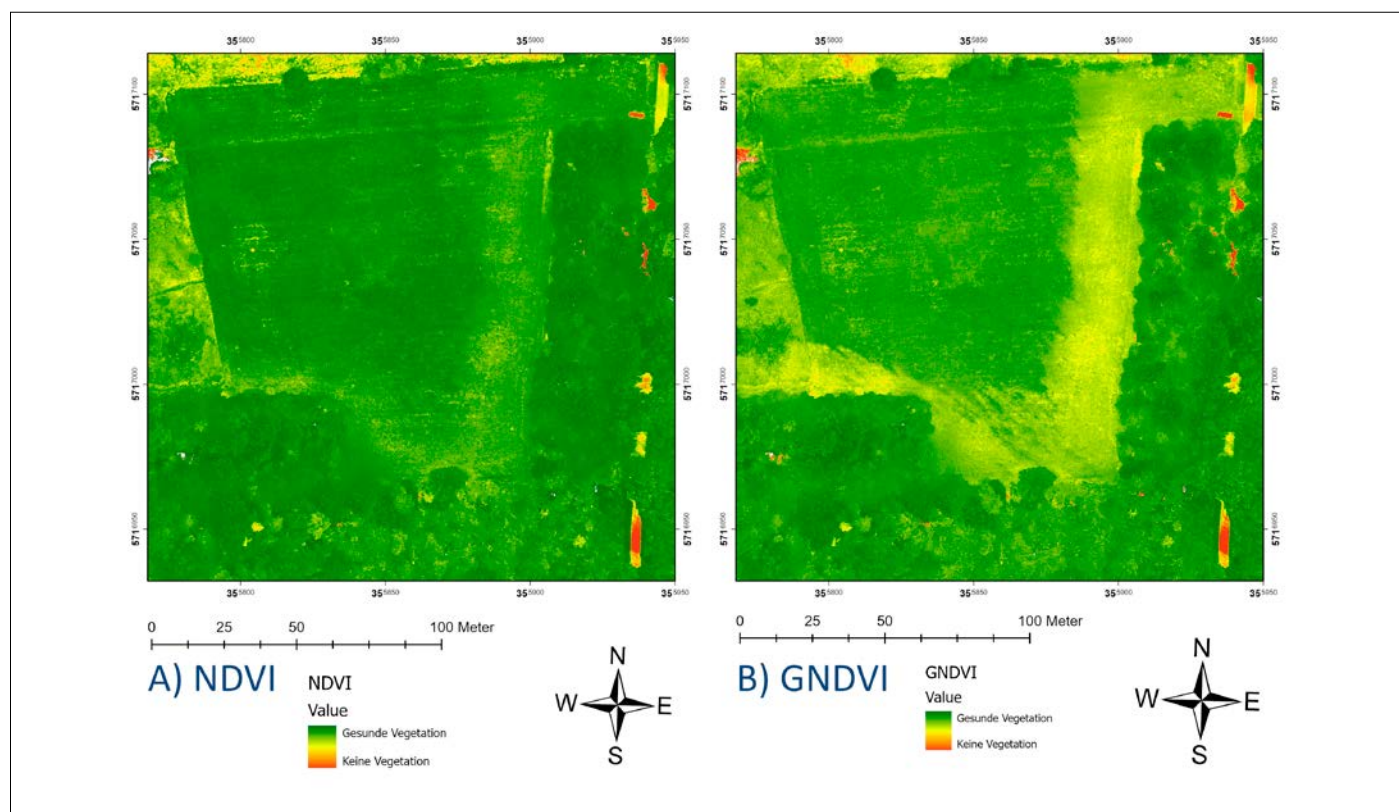


Abbildung 11: Vegetationsindikatoren: A) NDVI und B) GNDVI

7 DISKUSSION DER KORRELATIONSVERSUCHE

Die Betrachtung der Beziehung zwischen den beiden unabhängigen Variablen Bodenfeuchte und Temperatur der Bodenoberfläche kann in einem GIS mithilfe von Diagrammen dargestellt werden. Es ist erwähnenswert, dass im Untersuchungsgebiet verschiedene Vegetations- bzw. Nutzungstypen unterschieden werden können. Im südlichen und östlichen Teil ist Wald zu erkennen, während der zentrale Teil als Grünland genutzt wird.

Im Rahmen der Untersuchung wurden In-situ-Messungen von Bodenfeuchte und Temperatur durchgeführt. Eine erste Analyse des Zusammenhangs in den Eingangsdaten zwischen diesen Variablen ergab, dass es offensichtlich keine Korrelation zwischen ihnen gibt. Die Ergebnisse sind beispielhaft für den Grünlandanteil in Abbildung 13 dargestellt. Es wäre zu erwarten gewesen, dass eine hohe Temperatur auch zu geringerer Bodenfeuchte führt. Insbesondere, weil im Sommer 2022 hohe Temperatur- und Einstrahlungswerte über eine längere Witterungsperiode angehalten haben.

In dieser Studie wurden multispektrale Drohnenflüge und eine Analyse der Ergebnisse durchgeführt. Dazu wurden gängige Fernerkundungsindizes GNDVI, NDVI, MSAVI und SAVI berechnet. Die Analyse der Beziehungen zwischen diesen Indizes und jeweils der Bodenfeuchte und -temperatur ergab in vielen Fällen keine eindeutigen, bestenfalls schwache Zusammenhänge ($r^2 = 0,01$ und $r^2 = 0,43$ ($r = 0,66$)). Das höchste Bestimmtheitsmaß bzw. eine gute Korrelation konnte für den Zusammenhang GNDVI und Bodenfeuchtwerten berechnet werden. Alle Ergebnisse sind in den Abbildungen 14 bis 21 dokumentiert.

Die Eingangsthese, hohe Temperaturen wirken sich insbesondere in flach wurzelnden Pflanzen schnell auf die Bodenfeuchte aus, die in der Folge einen schnellen Einfluss auf die Pflanzenge-

sundheit und entsprechende Vegetationsindizes erkennen lässt, lässt sich daher in der vorliegenden Untersuchung nicht nachweisen. Die Autoren weisen darauf hin, dass mögliche Ursachen im Versuchsaufbau liegen können. Einerseits kann die Dauer der Kartierung von ca. drei Stunden zur gewählten Jahreszeit einen Einfluss auf die Temperaturergebnisse durch sehr verschiedene Sonnenstände haben. Die Tageszeit spielt dabei ebenfalls eine Rolle. Am 06.10.2022 war sonniges, warmes Wetter. Die direkte Sonneneinstrahlung bestimmter Flächen sowie die später im Kartierungsverlauf teils deutliche Beschattung bestimmter Bereiche durch den schon tiefen Sonnenstand können Unwägbarkeiten verursachen und einen erheblichen Einfluss auf die Reaktion der Vegetation gehabt haben. Die Vegetation versucht etwa durch das Schließen der Stomata auf Wasserstress durch hohe Temperaturen zu reagieren und geht sparsam mit Wasser um. Zudem wird die Blattfläche reduziert, um eine Überhitzung der Blätter zu vermeiden. Trotzdem funktioniert die Pflanze quasi normal und ist durch einen Vegetationsindex nicht unbedingt als geschädigt erkennbar.

Daher zeigten die berechneten Fernerkundungsindizes trotz teils hoher Temperaturen an der Bodenoberfläche oder an anderen Stellen geringen Bodenfeuchtwerten, dass die Vegetation im Untersuchungsgebiet eine gute bis sehr gute Vitalität aufwies. Lediglich in den beschatteten Bereichen sind reduzierte Vitalitätswerte zu beobachten. Bemerkenswert ist, dass die Bodenfeuchtwerte im Waldgebiet zwar die höchsten Werte aufweisen (Bestandsklima). Bei der Untersuchung der Korrelation zwischen den Fernerkundungsindikatoren und den interpolierten Bodenfeuchtwerten wurde trotzdem keine Korrelation zwischen den Variablen für das Waldgebiet festgestellt. Ein Grund kann sein, dass die gemessene Bodenfeuchte in ca. 5 cm Tiefe keinen Einfluss auf die Vitalität der

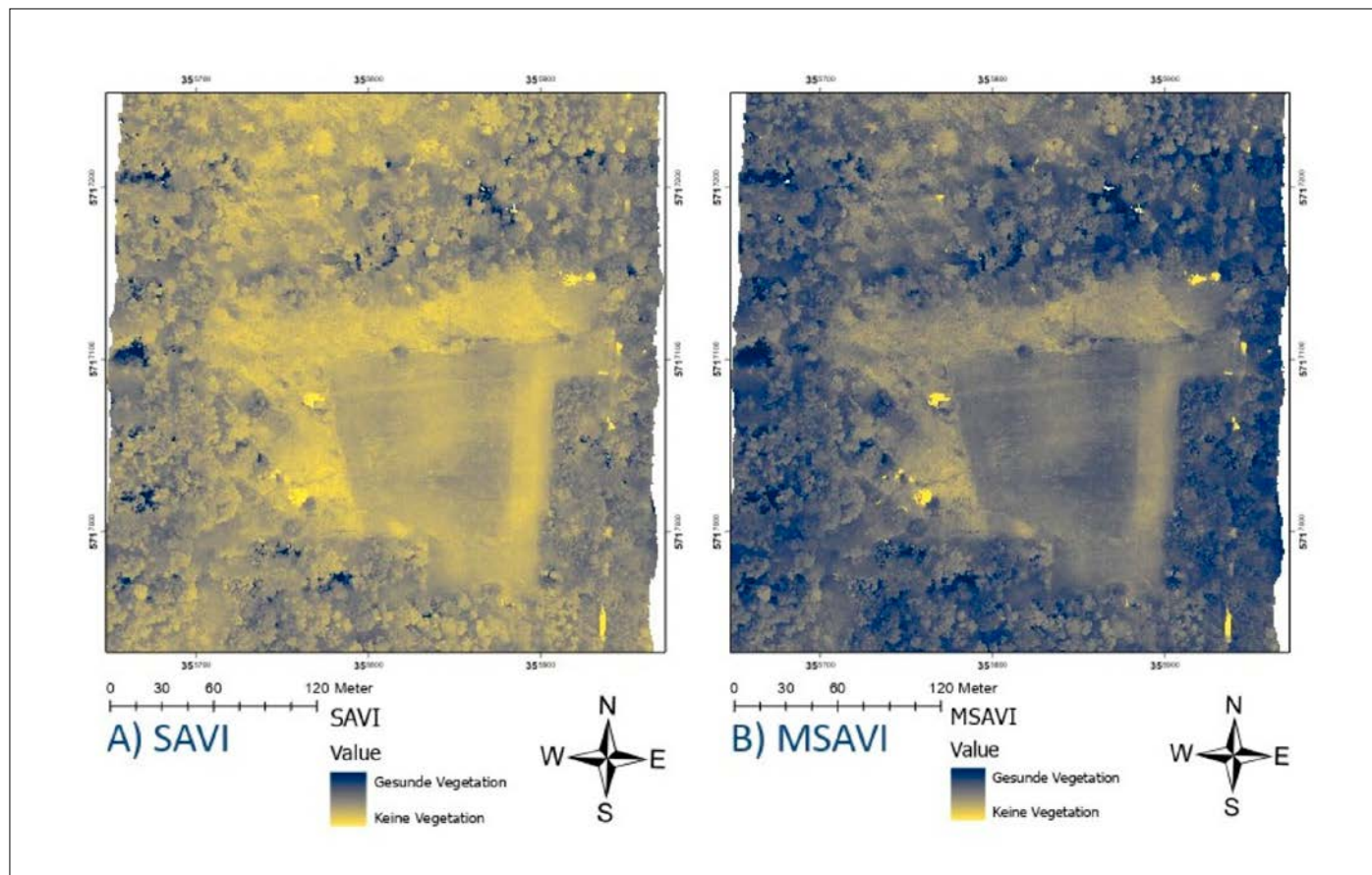


Abbildung 12: Bodenindikatoren: A) SAVI und B) MSAVI

tiefwurzelnenden Bäume hat oder aber auf den einsetzenden Herbst im Waldbestand zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein direkter zeitlicher Zusammenhang nicht besteht. Es ist allerdings wahrscheinlich, dass die Vegetation auf nachteilige Faktoren, wie einer reduzierten Bodenfeuchte nahe oder unterhalb des Welkepunkts, entsprechend mit einer Zeitverzögerung reagiert. Daher schlagen die Autoren vor, Tests multitemporal anzusetzen. Neben einer Erfassung zu verschiedenen Tageszeiten könnten die multispektralen Drohnenaufnahmen zeitverzögert einige Tage nach der Kartierung zu klareren Ergebnissen führen.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der vorliegende Beitrag greift einen Teilaspekt der am FZN gängigen Methoden des Geomonitorings auf und hinterfragt sie kritisch. Über Bodenanalysen und In-situ-Sensoren wurden Kartierungen der Bodenfeuchte durchgeführt und versucht, Korrelationen zur Vegetation und deren Entwicklung herzustellen. Dies erfolgte mithilfe von multispektralen Drohnendaten und daraus abgeleiteten Vegetationsindizes. Im Ergebnis konnten – bis auf die Ausnahme Bodenfeuchte zu GNDVI – keine oder nur schwache Zusammenhänge zwischen den Parametern Temperatur der Bodenoberfläche, Bodenfeuchte und Pflanzengesundheit mithilfe dieser Methode nachgewiesen werden. Gründe dafür wurden diskutiert und liegen gegebenenfalls in einer zeitverzögerten Reaktion des Systems. Die Studie zeigt, dass die oben genannte Forschungsmethodik in der Umweltüberwachung für ein umfassendes Verständnis der Phänomene angewendet werden kann. Sie hat aber Limitierungen, da

unterschiedliche Landnutzungen gegebenenfalls anders auf Trockenstress reagieren. Eine lokale Betrachtung mithilfe von Drohnen ist daher zum Verständnis des globalen Modells nicht direkt nutzbar. Es muss zumindest auf einen jahreszeitlich geeigneten Zeitpunkt beschränkt und diverse Parameter berücksichtigt werden.

Die Autoren weisen auf den erheblichen Einfluss der Versuchsanlage hin (Sonneneinstrahlung, Dauer der Kartierung, Jahreszeit). Eine korrekte Interpretation der Ergebnisse kann dadurch beeinflusst werden und muss bedacht werden. Zwar lässt sich die Beschattung in photogrammetrischer Software (meist) berücksichtigen. Trotzdem wird der Schluss gezogen, dass die oben genannte Kartiermethode für verschiedene Tageszeiten und eine kontinuierliche Überwachung auf der Grundlage einer festen Anzahl von Punkten angewandt werden sollte. Die Einbindung von mehr Personal könnte dieses Problem reduzieren. Demgegenüber müssen die Kartierungen der Pflanzengesundheit, also die Ableitung von Vegetationsindizes aus multispektralen Drohnendaten, zeitverzögert erfolgen, damit das System überhaupt reagieren kann.

Um die Korrelation zwischen der Bodenfeuchte und den aus den Drohnenflügen ermittelten Sensorwerten besser zu verstehen, schlagen die Autoren ein langfristiges Geomonitoring vor, das die Beobachtung der Umgebung zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten ermöglicht. Weiterhin müssen die Untersuchungen auf diverse Landnutzungs- und -bedeckungsarten ausgeweitet werden. Beispielsweise reagieren großflächige Fortbestände mit tiefwurzelnenden Baumarten erheblich später auf Trockenstress. Hier ist eine kritische Interpretation satellitengebundener Datenerhebung in Bezug auf die Landbedeckung sehr zu empfehlen.

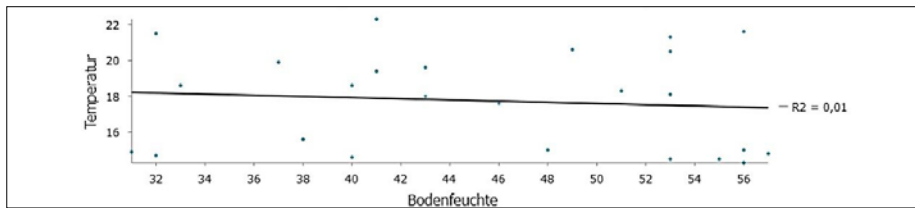


Abbildung 13: Die Beziehung zwischen Bodenfeuchte und Temperatur im Grünlandbereich (Eingangsgangsdaten)

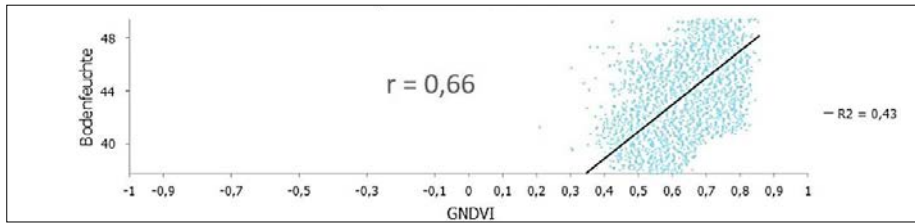


Abbildung 14: Die Beziehung zwischen GNDVI und Bodenfeuchte

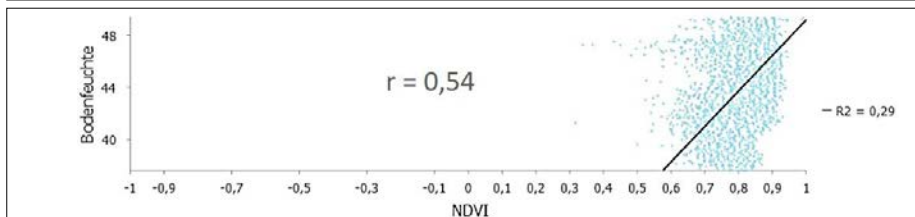


Abbildung 15: Die Beziehung zwischen NDVI und Bodenfeuchte

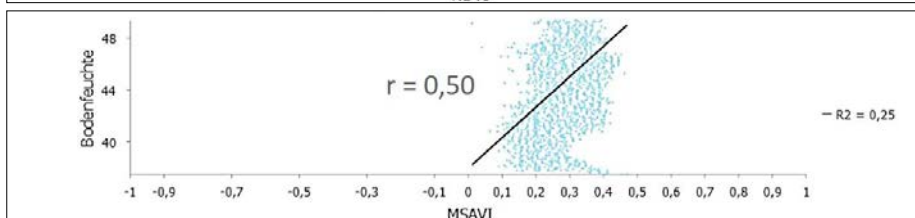


Abbildung 16: Die Beziehung zwischen MSAVI und Bodenfeuchte

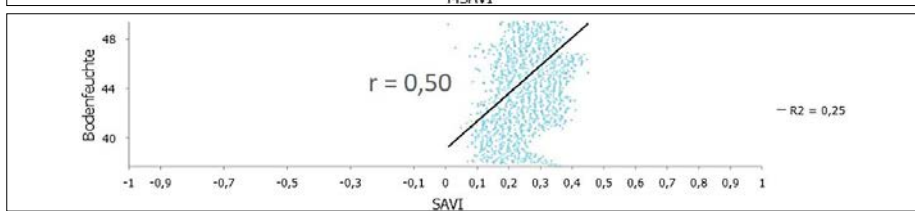


Abbildung 17: Die Beziehung zwischen SAVI und Bodenfeuchte

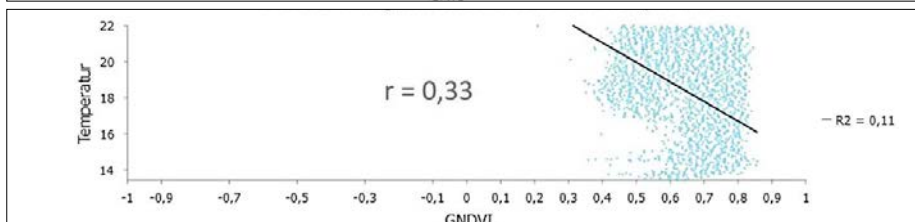


Abbildung 18: Die Beziehung zwischen GNDVI und Temperatur

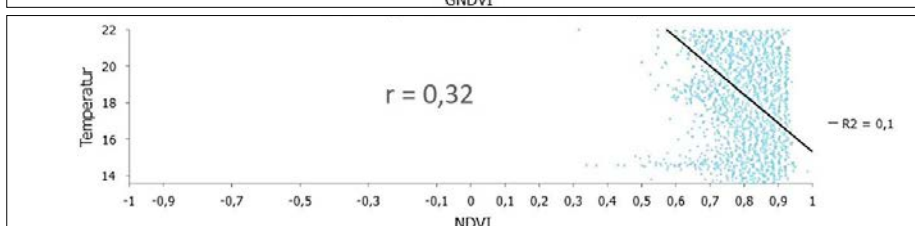


Abbildung 19: Die Beziehung zwischen NDVI und Temperatur

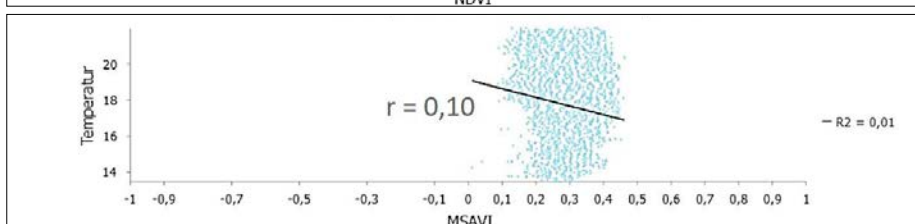


Abbildung 20: Die Beziehung zwischen MSAVI und Temperatur

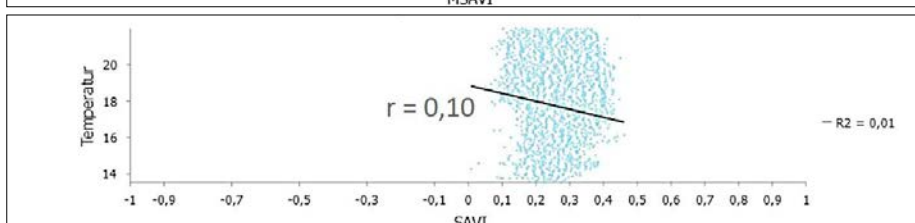


Abbildung 21: Die Beziehung zwischen SAVI und Temperatur

DANKSAGUNG

Das Projekt „C₂M₂ Climate Change – Monitoring und Management“ wurde von der Emscher-genossenschaft – Lippeverband (EGLV) finanziert. Die Autoren danken den Kollegen der EGLV für die Unterstützung im Projekt. Auch dem Unternehmen Microsensors GmbH sei an dieser Stelle für die unkomplizierte Bereitstellung von Sensoren beispielsweise im Rahmen der Bachelorarbeit Flügge (2022) gedankt. Gleiches gilt für die Kollegen am FZN, die unkomplizierte personelle Unterstützung bei der Datenerfassung geleistet haben.

Die Fortführung einiger Ansätze sind im Projekt MuSE möglich geworden. Die Autoren danken der RAG-Stiftung für die großzügige Projektfiananzierung unter der Förderkennziffer 2021-0002. Der EGLV ist Dank geschuldet, da die Standorte aus dem C₂M₂-Projekt und die verfügbare Messeinrichtung im MuSE-Projekt weiterverwendet werden können.

Das Projekt Digital Twin – Integriertes Geomonitoring wurde von der RAG-Stiftung (No. 20-0013) finanziert. Die Autoren danken dem Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen für die Unterstützung und Zusammenarbeit.

Literatur

- Aspinall, R. J.; Miller, D. R. (1990): Mixing climate change models with remotely-sensed data using raster based GIS. In: Remote Sensing and Global Change. In: Proceedings of the 16th Annual Conference of the Remote Sensing Society, Swansea, S. 1-11.
- Atrachimowicz, I.; Jankowska, A.; Pawlik, M. (2018): Śladami Franciszka Pabla – czyli jak rozbudowano GIS Parku Narodowego Gór Stołowych o historyczne dane przestrzenne. In: Arcana GIS. <https://www.arcanagis.pl/slاديم-franciszka-pabla-czyli-jak-rozbudowano-gis-parku-narodowego-gor-stolowych-o-historyczne-dane-przestrzenne/> (12.12.2022).
- Benninghaus, H. (1982): Deskriptive Statistik – Statistik für Soziologen. Studienskripte zur Soziologie. Teubner, Stuttgart.
- Bernsdorf, B.; Rudolph, T.; Khaing Zin, P. (2022): Climate Change – Management and Monitoring – Boden und in situ-Sensordaten als Schlüssel zum Prozessverständnis. In: Mining Report – Glückauf, 158 (1), S. 32-52. <https://mining-report.de/climate-change-management-and-monitoring-boden-und-in-situ-sensordaten-als-schlüssel-zum-prozessverständnis> (12.12.2022).
- Bernsdorf, B.; Khaing Zin, P. (2023): Zur Bewertung von In-situ-Sensoren bei der Einschätzung von Prozessabläufen im Geomonitoring. In: Zeitschrift der deutschen Geologischen Gesellschaft, 16.01.2023 (Early Access Article). DOI: 10.1127/zdgg/2023/0339.
- Beyer, F.; Steiger, A.; Grenzdörffer, G. (2019): Multitemporale Auswertung von Moor-Vegetationsgesellschaften unter Verwendung von multisensoralen UAS-Daten. In: gis.Science, 4/2019, S. 119-132.
- Blachowski, J. (2004): Pozycjonowanie satelitarne GPS w inwentaryzacji terenowej szlaków rowerowych województwa dolnośląskiego. Praca dyplomowa, Podyplomowe studium GIS, Politechnika Wrocławska.
- Blachowski, J. (2019): Studenci Politechniki Wrocławskiej tworzą interaktywną mapę kampusu Uczelni. In: Arcana GIS. <https://www.arcanagis.pl/studenci-politechniki-wroclawskiej-tworza-interaktywna-mape-kampusu-uczelni/?print=print> (12.12.2022).
- Blachowski, J.; Koźma, J. (2006): Możliwości Wykorzystania Pozycjonowania Satelitarnego Gps Dla Potrzeb Inwentaryzacji I Geoturystycznego Udośćpienia Geotopów W Obszarze Polskiej Części Projektowanego Geoparku "Łuk Mużakowa". In: Mining Science, VIII (1), S. 23-34. <http://www.miningscience.pwr.edu.pl/Slowo-kluczowe-geopark/59772> (12.12.2022).
- Crepin, J.; Johnson, R. L. (1993): Soil Sampling for Environmental Assessment. In: Carter, M. R. (Ed.): Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science, Boca Rota, FL, USA, S. 5-18.
- DIN EN ISO 11461: 2014-07: Bestimmung des Wassergehaltes des Bodens als Volumenanteil mittels Stechzylinder – Gravimetrisches Verfahren (ISO 11461:2001); Deutsche Fassung EN ISO 11461:2014. Beuth, Berlin.
- DIN EN ISO 14688-1:2018-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung, Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung Beschreibung (ISO 14688-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2018. Beuth, Berlin.
- DIN EN ISO 1789-4:2017-04: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 1789-4:2016); Deutsche Fassung EN ISO 1789-4:2016. Beuth, Berlin.
- DIN 19683, Blatt 4:1973: Physikalische Laboruntersuchungen, Bestimmung des Wassergehaltes des Bodens, April 1973. Beuth, Berlin.
- DJI (o. J.): Technische Daten DJI P4 multispectral. <https://www.dji.com/de/p4-multispectral/specs> (12.12.2022).
- Dixon, C.; Leach, B. (1977): Sampling Methods for Geographical research. In: Concepts and Techniques in Modern Geography, 17.
- Emscher-genossenschaft (o. J.): Der Emscher-Umbau. <https://www.eglv.de/emscher/der-umbau> (12.12.2022).
- Esri Inc. (o. J.^a): Survey 123. <https://survey123.arcgis.com/>.
- Esri Inc. (o. J.^b): Überblick über das Toolset „Stichprobe“ (ArcGIS Pro Resources). <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/2.8/tool-reference/data-management/an-overview-of-the-sampling-toolset.htm> (12.12.2022).
- Esri Inc. (o. J.^c): Comparing interpolation methods (ArcGIS Resources). <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/comparing-interpolation-methods.htm> (12.12.2022).

- Esri Inc. (o. J.^d): Funktionsweise des Werkzeugs „Kriging“ (ArcGIS Resources). <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/tool-reference/3d-analysis/how-kriging-works.htm> (12.12.2022).
- Flügge, P. (2022): Vergleich von Bodenfeuchtesensoren mit herkömmlichen Bodenfeuchtebestimmungen an Proben aus dem Einzugsgebiet der Boye. Bachelorarbeit, Studiengang Geotechnik und Angewandte Geologie, Universität Bochum (unveröffentlicht).
- Forschungszentrum Nachbergbau (o. J.^a): Projekt C2M2 – Climate Change – Management and Monitoring (Projektwebseite). <https://fzn.thga.de/forschung/c2m2/> (12.12.2022).
- Forschungszentrum Nachbergbau (o. J.^b): Projekt MUSE – Multisensor-Geomonitoring zur Optimierung nachbergbaulicher Wasserhaltung (Projektwebseite). <https://fzn.thga.de/forschung/muse> (12.12.2022).
- Forschungszentrum Nachbergbau (o. J.^c): Projekt Digital Twin– Geomonitoring meets Industrie 4.0 (Projektwebseite). <https://fzn.thga.de/forschung/digital-twin> (12.12.2022).
- Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen online (o. J.): Bodenkarte 1: 50.000. Geologischer Dienst NRW, Krefeld.
- Gitelson, A.; Kaufman, Y. J.; Merzlyak, M. N. (1996): Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. In: *Remote Sensing of Environment*, 58 (3), S. 289-298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7).
- Goerke-Mallet, P.; Rudolph, T.; Brune, J.; Kretschmann, J. (2020): The importance of „Social License to Operate“ for Mining Life Cycle. In: Kretschmann, J.; Goerke-Mallet, P.; Melchers, C. (Eds.): *Done for Good 2.0*. Selbstverlag THGA, Bochum, S. 310-322.
- Hamraz, H.; Sadeghi-Niaraki, A.; Omati, M.; Noori, N. (2014): GIS-Based Air Pollution Monitoring using Static Stations and Mobile Sensor in Tehran/Iran. In: *International Journal of Scientific Research in Environmental Sciences*, 2 (12), S. 435-448. DOI: 10.12983/ijres-2014-p0435-0448.
- Held, T. (2007): *Der Fluss der Mitte – Die Verwandlung der Emscherregion*. In: Zepp, H. (Hrsg.): *Ökologische Problemräume Deutschlands*. Deutsche Akademie für Landeskunde. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S. 23-46.
- Hilhorst, M. A. (2000): A Pore Water Conductivity Sensor. In: *Soil Science Society of America Journal*, 64 (6), S. 1922-1925.
- Huete, A. R. (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI). In: *Remote Sensing of Environment*, 25 (3), S. 295-309.
- Isaak, E. H.; Srivastava, R. M. (1989): *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, Oxford/New York.
- Işcan, F.; Güler, E. (2021): Developing a mobile GIS application related to the collection of land data in soil mapping studies. In: *International Journal of Engineering and Geosciences*, 6 (1), S. 27-39. DOI: 10.26833/ijeg.677958.
- Jones, H. G.; Vaughan, R. A. (2010): *Remote sensing of vegetation. Principles, Techniques and Applications*. Oxford University Press, Oxford/New York.
- Kaneswaran, R. B.; Chakravarthy, A. S. N. (2016): Mobile GIS in Groundwater Pollution Monitoring Application. In: *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET Special Issue ICRACSC-2016)*, S. 044-049.
- Krämer, D. (2009): Anbindung von Geoinformationssystem an FülInfoSys. In: Grosche, J.; Wunder, M. (Eds.): *Verteilte Führungsinformationssysteme*. Springer, Berlin.
- Kuechly H. U.; Cozacu, A.; Kodl, G.; Nicolai, C.; Vallentin, C. (2020): *Grundlagen der Fernerkundung. Infreihe SAPIENS: Satellitendaten für Planung, Industrie, Energiewirtschaft und Naturschutz*. Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam.
- Kupke, S. (2002): *Deterministische und stochastische Interpolationsverfahren*. Friedrich-Schiller-Universität Jena, Studienarbeiten (eBook). München. DOI: 10.3239/9783638225465.
- Laurini, R.; Thompson, D. (1996): *Fundamentals of Spatial Information Systems*. 5th Ed. The A.P.I.C. Series, 37.
- Lehmann, W. (1995): *Anwendung geostatistischer Verfahren auf die Bodenfeuchte in ländlichen Einzugsgebieten*. IHW 52, 174 S. u. Anhang.
- Li, C.; Jiang, Y. (2011): Development of mobile GIS system for forest resources second-class inventory. In: *Journal of Forestry Research*, 22, S. 263-268. <https://doi.org/10.1007/s11676-011-0160-1>.
- Makinwa, K. A. A. (2010): Smart temperature sensors in standard CMOS. In: *Proc. EuroSensors XXIV*, September 5-8, 2010, Linz, Austria. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.09.262>.
- Malla, M. A.; Rather, M. A.; Teli, M. N.; Kuchhay, N. A. (2014): Comparison of Spatial Interpolation Techniques – A Case Study of Anantnag District J&K, India. In: *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 4 (11), S. 59-67. https://www.ijmer.com/papers/Vol4_Issue11/Version-1/G04011_01-5967.pdf (12.12.2022).
- Microsensys (o. J.^a): Product Datasheet TELID 257.nfc – Datenblatt. Erfurt.
- Microsensys (o. J.^b): Product Datasheet TELID 212.nfc – Datenblatt. Erfurt.
- Microsensys (o. J.^c): From RFID Transponder to RFID Sensor – Datenblatt. Erfurt.
- Naoum, S.; Tsanis, I. K. (2004): Ranking Spatial Interpolation Techniques Using a GIS-based DSS. In: *Global Nest Journal*, 6 (1), S. 1-20.
- Nhavoto, J. A.; Grönlund, Ä. (2014): Mobile Technologies and Geographic Information Systems to Improve Health Care Systems: A Literature Review. In: *JMIR Mhealth Uhealth* 2 (2), e21. DOI: 10.2196/mhealth.3216.
- Nowak, M. M.; Dziób, K.; Ludwisiak, L.; Chmiel, J. (2020): Mobile GIS applications for environmental field surveys: A state of the art. In: *Global*

- Ecology and Conservation, 23, September 2020, e01089. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01089>.
- Nitsche, T.; Wotzlaw, A. (2008): Konzeption eines Portals zur Integration von Daten aus heterogenen Quellen. FKIE-Bericht, 167. Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften e. V., Wachtberg.
- Pawlik, M. (2017): Rozbudowa interaktywnej mapy kampusu Politechniki Wrocławskiej z wykorzystaniem mobilnych narzędzi GIS. Post-conference materials from III Ogólnopolska Sesja Studentkich Kół Naukowych, Szczecin, S. 78.
- Pawlik, M.; Gellendin, M.; Bernsdorf, B.; Rudolph, T.; Benndorf, J. (2021): Digital Twin – as instrument for observing changes and trends on the Earth's surface. In: 2nd Geoscience & Engineering in Energy Transition Conference (Online Conference), 25.11.2021. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202121006>.
- Pawlik, M.; Gellendin, M.; Bernsdorf, B.; Rudolph, T.; Benndorf, J. (2022^a): Digital-Twin – How to Observe Changes and Trends on the Post-mining Areas. In: International Journal of Earth & Environmental Sciences, 7. <https://doi.org/10.15344/2456-351X/2022/195>.
- Pawlik, M.; Haske, B.; Bernsdorf, B.; Rudolph, T.; Benndorf, J. (2022^b): Analyse des Zustands der Vegetation auf dem Gelände des stillgelegten Bergwerks Prosper-Haniel anhand von multispektralen Satellitenbildern der Sentinel-2 Mission und Drohnenflüge. In: Markscheidewesen, 129 (1), S. 37-44.
- Pawlik, M.; Rudolph, T.; Bernsdorf, B. (2023^a): Analysis of the vegetation condition on the area of the closed Prosper-Haniel mine in 1984-2021 using multispectral satellite images. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences (in Vorbereitung).
- Pawlik, M.; Haske, B.; Bernsdorf, B.; Rudolph, T.; John, A.; Blachowski, J.; Kujawa, P.; Dynowski, A. (2023^b): The use of Mobile GIS in scientific research – Case Studies. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences (in Vorbereitung).
- Prasad Raju, H.; Partheeban, P.; Rani Hemamalini, R. (2012): Urban Mobile Air Quality Monitoring Using GIS, GPS, Sensors and Internet. In: International Journal of Environmental Science and Development, 3 (4), S. 323-327.
- Qi, J.; Chehbouni, A.; Huete, A. R.; Kerr, Y. H.; Sorooshian, S. (1994): A modified soil adjusted vegetation index. In: Remote Sensing of Environment, 48 (2), S. 119-126.
- Rautenberg, M. (2022): Von der Kloake zum Naturparadies: Über den gelungenen Umbau der Emscher. In: National Geographic Deutschland, 5. Mai 2022. <https://www.nationalgeographic.de/umwelt/2022/05/von-der-kloake-zum-naturparadies-ueber-den-gelungenen-umbau-der-emscher>.
- Rajkai, K.; Rydén, B. E. (1992): Measuring areal soil moisture distribution with the TDR method. In: Geoderma, 52 (1-2), S. 73-85.
- Rittenhouse, P.; Aldrich, L. (2017): Using Mobile Geographic Information Systems to Improve Operational Efficiency, Data Reliability, and Access in Mine Action. In: Journal of Conventional Weapons Destruction, 21 (2), Art. 5. <http://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss2/> (12.12.2022).
- Rouse, J. W.; Haas R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. (1973): Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third ERTS Symposium, NASA, Vol. 1, S. 309-317.
- Rudolph, T.; Yin, X.; Goerke-Mallet, P. (2022): Umfassende Definition des Geo- und Umweltmonitoring aus nachbergbaulichen Erfahrungen im Ruhrgebiet. In: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (Open Access). DOI 10.1127/zdgg/2022/0335.
- Shekhar, S.; Zhang, P. (2004): Spatial Data Mining: Accomplishments and research Needs. University of Minnesota, Department of Computer Science and Engineering (Vorlesungsskript). http://www.spatial.cs.umn.edu/paper_ps/giscience.pdf (12.12.2022).
- Sponagel, H.; Grotenthaler, W.; Hartmann, K. J.; Hartwich, R.; Janetzko, P.; Joisten, H.; Kühn, K.; Sabel, K. J.; Traidl, R. (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5 Aufl. Schweizerbart, Stuttgart.
- Tippler, P.; Mosca, G. (2009): Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure. 6. Aufl. Springer Spektrum, Heidelberg.
- Tobler, W. (1970): A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. In: Clark University (Ed.): Economic Geography, Vol. 46 (Supplement: Proceedings, International Geographical Union, Commission on Quantitative Methods), S. 234-240.
- Topp, G.; Clarke, J. L.; Davis, P. A. (1980): Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines. In: Water Resources Research, 16 (3), S. 574-582.
- Tsou, M. H. (2004): Integrated Mobile GIS and Wireless Internet Map Servers for Environmental Monitoring and Management. In: Cartography and Geographic Information Science, 31 (3), S. 153-165.
- Webster, R.; Oliver, M. A. (1990): Statistical Methods in soil and land resource survey. Oxford University Press, Oxford/New York.
- Wulf, A.; Blume, H. P.; Fleige, H.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretzschmar, R.; Stahr, K.; Wilke, B. M. (2018): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. 17. Aufl. Springer, Heidelberg.
- Yin, X.; Bernsdorf, B.; Goerke-Mallet, P.; Rudolph, T. (2022): Die „Muse“ im nachbergbaulichen Geomonitoring – Neue Ansätze für das Poldermonitoring. In: Markscheidewesen, 129 (1), S. 29-36.
- Zhang, J.; Xiuhong, L.; Liu, Q.; Zhao, L.; Dou, B. (2016): An Extended Kriging method to interpolate soil moisture data measured by wireless sensor network. In: Hydrology and Earth System Sciences Discussions. DOI: 10.5194/hess-2016-401.
- Zain Rashid, A. H.; Abdul Rasam, A. R.; Idris, A. N.; Adnan, N. A.; Othman, F. (2019): Online Mapping and GIS Mobile Healthcare Systems for Intensifying Low-and-Middle-Income Community Accessibility. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences, Vol. 385. DOI: 10.1088/1755-1315/385/1/012038.