Satelliten und Drohnen erkennen, wo Wasser fehlt

Potenzial von Fernerkundung für die Bewässerungssteuerung

In der landwirtschaftlichen Praxis werden Flächen häufig einheitlich bewirtschaftet und behandelt, als seien sowohl die Bodeneigenschaften als auch der Pflanzenbestand innerhalb eines Schlages homogen. Tatsächlich weisen landwirtschaftliche Flächen jedoch aufgrund natürlicher Bodenunterschiede sowie unterschiedlicher Standortbedingungen eine hohe räumliche Heterogenität auf. Diese Unterschiede können auch innerhalb der Grenzen eines einzelnen Schlages auftreten und sich beispielsweise in Bodenart, Nährstoffversorgung, Wasserverfügbarkeit oder Pflanzenentwicklung widerspiegeln.

Zur Erfassung dieser räumlichen Variabilität kann unterschiedliche Technik eingesetzt werden, wie beispielsweise Schlepper- oder fahrzeuggetragene Sensoren. Um die Reaktion von Pflanzenbeständen auf diese gegebenen Bedingungen laufend überwachen zu können, gewinnen Satelliten und Drohnen zunehmend an Bedeutung. Durch multispektrale Aufnahmen können verschiedene Indizes berechnet werden, welche räumliche und zeitliche Unterschiede in der Ausprägung eines Pflanzenbestandes zeitnah erfassen können, beispielsweise im Hinblick auf auftretenden Nährstoffmangel, Trockenstress oder Pflanzenkrankheiten.

Die Möglichkeiten der Anwendung von multispektralen Satelliten- und Drohnenaufnahmen zur Analyse von Pflanzenbeständen und deren Verwertbarkeit für die Bewässerungssteuerung soll im Folgenden dargestellt werden.

Satelliten und Drohnen werden in der Praxis immer öfter zur Fernerkundung in der Landwirtschaft eingesetzt. Dabei unterscheiden sie sich vor allem in ihrer Flächenleistung, der räumlichen Auflösung und der Flexibilität.

Satelliten überblicken große Bereiche

Satelliten sind künstliche Flugkörper, die in der Regel auf einer niedrigen Umlaufbahn um die Erde kreisen und mithilfe von Sensoren kontinuierlich Daten aus dem Weltall erfassen. Dadurch ist die regelmäßige Beobachtung sehr großer Flächen möglich. Wettersatelliten Im Vergleich dazu sind häufig geostationär, das heißt scheinbar ruhend über einem Punkt der Erdoberfläche.

Sentinel-2 ist ein Beispiel für eine europäische Erdbeobachtungsmission im Bereich der optischen Fernerkundung, die im Rahmen des Copernicus-Programms von der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) und der Europäischen Union umgesetzt wird. Sämtliche hieraus gewonnenen Daten sind frei verfügbar. Die Standardkonstellation besteht aus zwei aktiven Satelliten, die sich mit einem Versatz von 180 ° zueinander auf derselben Umlaufbahn bewegen. Unter günstigen Bedingungen überfliegt der Satellit dasselbe Gebiet somit etwa alle fünf Tage erneut. Je weiter man sich den Polen nähert, desto häufiger überschneiden sich die Bildstreifen. In sehr hohen Breiten kommt es so fast täglich zu Überflügen. Die Auflösung variiert dabei je nach Spektralkanal und liegt zwischen 10 und 60 Meter.

Für Untersuchungen kleinerer Gebiete gibt es kostenpflichtige Angebote wie das von PlanetScope, die Satellitenbilder mit einer hohen Detailgenauigkeit bereitstellen. Die zahlreichen Kleinsatelliten der SuperDove-Generation liefern Bilder mit einer Pixelgröße von 3 × 3 Metern. Dadurch lassen sich Unterschiede und Abgrenzungen innerhalb eines landwirtschaftlichen Schlages genauer erkennen. Zudem ermöglicht die Vielzahl der Satelliten eine sehr häufige Aufnahme derselben Fläche.

Weiter lassen sich durch Satellitendaten Entwicklungen über größere Zeiträume verfolgen, ohne dass die Flächen befahren oder beflogen werden müssen. Optische Sensorsysteme messen dabei die von der Erdoberfläche und dem Pflanzenbestand reflektierte Sonnenstrahlung in verschiedenen Wellenlängen. Allerdings unterliegen diese Sensorsysteme in der Praxis insbesondere bei bewölktem Himmel Einschränkungen. Die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung wird durch die Wassertröpfchen in den Wolken gestreut und teilweise absorbiert. Dadurch wird der Blick auf den eigentlichen Pflanzenbestand verdeckt. Eine geschlossene oder dichte Wolkendecke kann die Nutzung optischer Satellitendaten daher erheblich einschränken oder eine Auswertung der betroffenen Flächen unmöglich machen.

Drohnen liefern höhere Auflösungen

Drohnen sind ferngesteuerte oder autonom fliegende, unbemannte Luftfahrzeuge. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber Satelliten besteht darin, dass sie in deutlich geringeren Flughöhen eingesetzt werden und dadurch eine



Satelliten-Orthofoto, Bewässerungsversuchsfeld Riedstadt-Leeheim, Aufnahmedatum: 03.08.2026.
Quelle: PlanetScope SuperDove



Drohnen-Orthofoto, Bewässerungsversuchsfeld Riedstadt-Leeheim, Aufnahmedatum: 03.08.2026.
Fluggerät: DJI Mavic 3M



Sentinel-2-Satellit. *Bild: ESA, P. Carril*

wesentlich höhere räumliche Auflösung der aufgenommenen Bilder ermöglichen. Auch eine geschlossene Wolkendecke verhindert die Aufnahme des Pflanzenbestandes durch Drohnen in der Regel nicht. Zudem wird die erfasste Strahlung aufgrund der geringeren Entfernung zwischen Zielfläche und Sensor nur vergleichsweise wenig durch atmosphärische Einflüsse beeinträchtigt. Allerdings können wechselnde Lichtverhältnisse und Wolkenschatten die Vergleichbarkeit der Aufnahmen einschränken.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, Drohnen mit unterschiedlichen Sensorsystemen auszustatten und zeitlich flexibel einzusetzen. Dadurch lassen sich kleinräumige Unterschiede innerhalb eines Pflanzenbestandes, beispielsweise Fehlstellen oder Unterschiede in der Bodenbedeckung, räumlich differenziert erfassen und sichtbar machen.

Im direkten Vergleich zur Satellitenfernerkundung ist der Einsatz von Drohnen derzeit noch mit einem höheren organisatorischen und personellen Aufwand verbunden. So limitieren die Akkukapazität, die Flughöhe und die Fluggeschwindigkeit die tatsächliche Flächenleistung. Zudem muss der Flug meist von einer Person vor Ort gestartet, überwacht und beendet werden und auch die anschließende Auswertung der Daten erfolgt meist noch manuell. Nicht zuletzt schränkt das Wetter das System ein, da starker Wind oder Niederschlag einen Start unmöglich machen können.

Aktuelle Entwicklungen zielen daher zunehmend darauf ab, den Drohneneinsatz durch Automatisierung effizienter und weniger personalintensiv zu gestalten. Ein Beispiel hierfür ist das am Markt verfügbare DJI Dock 3 der Firma DJI. Dieser autonome Drohnenhangar ermöglicht die Durchführung von Missionen, ohne dass sich ein Pilot direkt vor Ort befinden muss.

Damit ergänzen sich beide Ansätze: Während Satelliten einen regelmäßigen Überblick über große Flächen ermöglichen, können Drohnen für eine hochauflösende und zeitlich flexible Mission eingesetzt werden.

Vom Spektralsignal zum Vegetationsindex

Doch wie lassen sich auf Basis von Satelliten- und Drohnendaten überhaupt Aussagen über den Zustand eines Pflanzenbestandes treffen? Die Grundlage hierfür bildet das spektrale Reflexionsmuster der Pflanzen. Je nach physiologischem Zustand, Entwicklungsstadium und Bestandsstruktur reflektieren Pflanzen das einfallende Sonnenlicht in charakteristischer Weise. Insbesondere im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich unterscheiden sich gesunde und gestresste Pflanzen in ihrem Reflexionsverhalten. Mithilfe geeigneter Sensorsysteme lassen sich diese Unterschiede erfassen und anschließend mithilfe verschiedener Auswertungsverfahren, beispielsweise durch die Berechnung von Vegetationsindizes, quantifizieren. Auf diese Weise lassen sich aus Fernerkundungsdaten Hinweise auf bestimmte Eigenschaften und den Zustand des Pflanzenbestandes ableiten.

Der normierte differenzierte Vegetationsindex (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) zählt zu den bekanntesten Vegetationsindizes. Er nutzt die Reflexion von Pflanzen im roten und nahinfraroten Bereich des reflektierten Sonnenlichts und setzt diese beiden Bereiche ins Verhältnis (Gleichung 1):

$$NDVI = \frac{(NIR - Rot)}{(NIR + Rot)}$$

NDVI = Normierter differenzierter Vegetationsindex
NIR = Reflexion im nahinfraroten Bereich
Rot = Reflexion im roten Bereich

Als dimensionslose Kennzahl deckt der NDVI einen Wertebereich von –1 bis +1 ab. Höhere positive Werte sind unter geeigneten Aufnahmebedingungen typischerweise mit einer stärkeren Ausprägung grüner, vitaler Vegetation verbunden, während niedrige Werte häufig auf eine geringe Vegetationsbedeckung oder eine mögliche Beeinträchtigung des Pflanzenbestandes hinweisen können. Negative Werte treten hauptsächlich bei Wasseroberflächen auf, die keine Vegetation aufweisen.

Dabei ist zu beachten, dass der NDVI durch Schadursachen wie Pflanzenkrankheiten, Nährstoffmangel oder Trockenstress beeinflusst werden kann, da sich diese unmittelbar auf die Pflanze und ihre Inhaltsstoffe auswirken. Allerdings ist er nicht in der Lage, die Ursachen direkt voneinander zu unterscheiden oder zu messen. Er spiegelt primär die spektralen Eigenschaften des Pflanzenbestandes wider. Dennoch geben Veränderungen des NDVI Hinweise auf Veränderungen der Vegetation, sodass betroffene Teilflächen frühzeitig erkannt und gezielt untersucht werden können. ➞

Ein Nachteil des NDVI besteht darin, dass bei sehr dichter Vegetation Unterschiede nur noch eingeschränkt erkennbar sind, da der Index bei hoher Biomasse zunehmend an Aussagekraft verliert. Zudem können in frühen Entwicklungsphasen der Pflanzen Einflüsse des freiliegenden Bodens die NDVI-Messwerte beeinflussen.

Einsatz von Fernerkundung im Bewässerungsversuch

Am Versuchsstandort Riedstadt-Leeheim in Südhessen führt der Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) derzeit einen dreijährigen Bewässerungsversuch im Rahmen des Projektes LN-09 „Erschließung von Wasserressourcen für die Landwirtschaft“ des hessischen Klimaplans durch. Das Projekt wird aus Landesmitteln finanziert. Der Standort liegt in der Bewässerungsregion Hessisches Ried und zählt zu den wärmsten und trockensten Versuchsstandorten des LLH. Im Mittelpunkt des Versuchs steht der Vergleich zwischen einer sensorgestützten und einer modellgestützten Bewässerungssteuerung. Eine Variante ohne zusätzliche Bewässerung dient als Kontrolle.

Neben den drei Bewässerungsvarianten werden zwei Sojabohnensorten, Adelfia und Arnold, angebaut. Daraus ergeben sich insgesamt sechs unterschiedliche Versuchskombinationen. Die einzelnen Parzellen haben eine Größe von 4,5 m × 10 m und sind funktional in Rand-, Mess- und Kernbereiche unterteilt. Diese kleinräumige Struktur stellt eine besondere Herausforderung für die Fernerkundung dar, da die vergleichsweise kleinen Flächen eine hohe räumliche Auflösung der Aufnahmen erfordern. Insbesondere bei Satellitendaten besteht die Gefahr, dass einzelne Pixel mehrere Parzellen oder angrenzende Randbereiche erfassen. Dadurch können sich unterschiedliche spektrale Signale überlagern, was die eindeutige Zuordnung und Auswertung der einzelnen Versuchsvarianten erschwert.

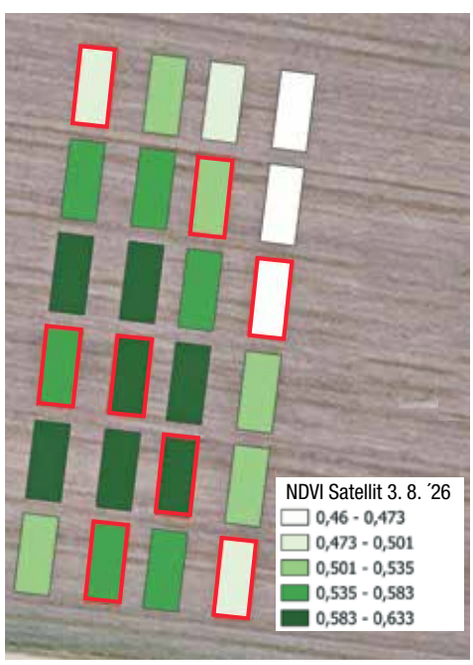
Während der Vegetationsperiode werden wöchentlich verschiedene Bestandsparameter erhoben. Dazu zählen unter anderem die gravimetrische Bodenfeuchte sowie visuelle Bonituren zur Beurteilung der Bestandsentwicklung und des Auftretens von Krankheiten und Schädlingen. Ergänzend dazu wurden im Jahr 2026 erstmals hochaufgelöste kommerzielle Satellitendaten und Drohnenaufnahmen eingesetzt. Damit soll untersucht werden, inwieweit sich die spektralen Eigenschaften und Unterschiede innerhalb der Pflanzenbestände erfassen lassen und welches Potenzial digitale Fernerkundungsmethoden für eine bedarfsgerechte Bewässerungssteuerung unter Praxisbedingungen bieten.

Räumliche Auflösung von Satelliten- und Drohnenbildern

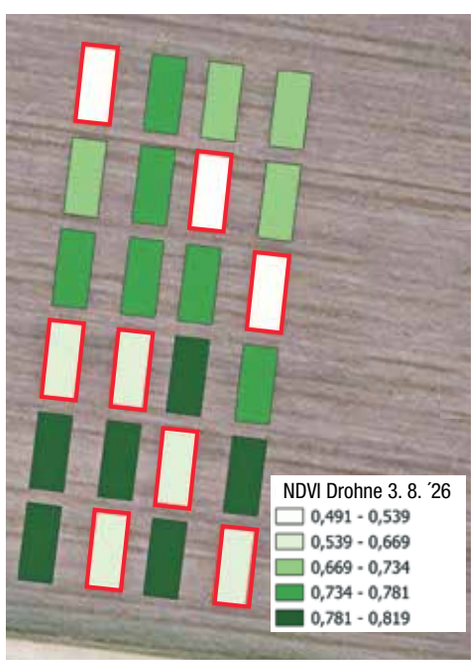
Die Größe der einzelnen Versuchsparzellen stellt hohe Anforderungen an die räumliche Auflösung der eingesetzten Fernerkundungssysteme. Abbildung 2 und 3 zeigen die am selben Tag aufgenommenen Orthofotos, die auf Basis unterschiedlich hoch aufgelöster Bilddaten eines kommerziellen Satelliten beziehungsweise einer Drohne erstellt wurden.

Das dargestellte Satellitenbild basiert auf Daten der PlanetScope-Satellitenkonstellation, deren Standardprodukte mit einer Pixelgröße von 3 × 3 m bereitgestellt werden. Demgegenüber liefert die multispektrale Drohne DJI Mavic 3M (Abb. 3) Aufnahmen mit deutlich höherer Auflösung und kleineren Pixeln. Bei einer Flughöhe von 12 Meter über Fläche beträgt die Auflösung der Drohnendaten 0,55 cm x 0,55 cm pro Pixel. Dieser extreme Unterschied wird besonders deutlich, wenn man die mathematische Datenmenge pro Versuchsparzelle (4,5 m × 10 m) für die Berechnung des NDVI vergleicht. Während für das Satellitensystem rechnerisch im Schnitt etwa fünf Pixel pro Parzelle zur Verfügung stehen, liefert die Drohne auf derselben Fläche über 1,5 Millionen Pixel.

Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass eine einzelne Parzelle bei der satellitengestützten Aufnahme nur durch wenige Pixel abgebildet wird. Dadurch steigt das Risiko, dass einzelne Pixel Signale aus mehreren benachbarten Bereichen erfassen und somit Mischpixel entstehen. Die Drohne ermöglicht hingegen aufgrund ihrer deutlich höheren räumlichen Auflösung eine wesentlich detailliertere Darstellung der einzelnen Parzellen.



Mittlerer NDVI pro Parzelle. Berechnung anhand des Satelliten-Orthofotos vom 3. August 2026. Rot markierte Parzellen wurden nicht bewässert.



Mittlerer NDVI pro Parzelle. Berechnung anhand des Drohnen-Orthofotos vom 3. August 2026. Rot markierte Parzellen wurden nicht bewässert.

Auflösung entscheidet über Aussagekraft und Einsatzgebiet

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die Ergebnisse aus der Rasterdaten. Hierfür wurden die entsprechenden Pixeldaten verwendet, um den NDVI pro Parzelle zu berechnen. Die Analyse wurde mit der frei verfügbaren Geoinformationssystem-Software (GIS) QGIS unter Verwendung des Rasterdatenrechners und der Zonenstatistik durchgeführt. Dabei kennzeichnen dunklere Grüntöne höhere NDVI-Werte innerhalb der untersuchten Parzelle.

Trotz der Unterschiede in der räumlichen Auflösung zeigen die Analyseergebnisse beider Datenquellen ein ähnliches räumliches Muster. Die Vegetation im oberen Bereich des Versuchsfeldes zeigt tendenziell niedrigere NDVI-Werte als der untere Bereich. Dies ist ein Hinweis darauf, dass der Pflanzenbestand dort an diesem Tag weniger dicht beziehungsweise weniger vital war als im unteren Bereich. Zusätzlich fällt

auf, dass insbesondere die unbewässerten Parzellen auf Grundlage der Drohnendaten heller eingefärbt sind und damit einen niedrigeren NDVI-Wert aufweisen als die bewässerten Varianten. Diese Unterschiede sind mit den Satellitendaten weniger stark sichtbar, was an der unterschiedlichen Auflösung der beiden Systeme liegen kann.

Da eine Parzelle im Versuch 4,5 m × 10 m groß ist und der Satellit nur 3 m × 3 m auflöst, kommt es an den Rändern zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, dass einzelne Pixel auch spektrale Informationen angrenzender Bereiche enthalten. Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung lassen sich die einzelnen Parzellen in den Drohnenaufnahmen deutlich präziser voneinander abgrenzen und auswerten.

Damit wird deutlich, dass die Wahl zwischen Satelliten- und Drohnendaten maßgeblich von der Fragestellung und der gewünschten Detailtiefe abhängt. Während Satellitensysteme ein wertvolles Werkzeug für das kontinuierliche Monitoring grundlegender Boden- und Bestandsunterschiede darstellen, stößt ihre Auflösung bei kleinräumigen oder parzellenspezifischen Details an Grenzen. Für die präzise Erfassung solcher kleinen Strukturen bieten die Drohnensysteme eine wichtige Ergänzung, weshalb sich beide Technologien in einer modernen, datenbasierten Landwirtschaft nicht ausschließen, sondern optimal ergänzen.

Potenzial und Grenzen für die Bewässerungssteuerung

Schlussfolgernd zeigen die Ergebnisse, dass die Nutzung des NDVI die landwirtschaftliche Bewässerungssteuerung grundsätzlich unterstützen kann. Zum Aufnahmezeitpunkt am 3. August 2026 befand sich der Sojabestand bereits in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium und wies eine hohe Biomasse sowie eine weitgehend geschlossene Bodenbedeckung auf. In den unbewässerten Kontrollvarianten waren zu diesem Zeitpunkt bereits deutliche optisch Anzeichen von Wassermangel erkennbar, die sich insbesondere in den hochaufgelösten Drohnenaufnahmen durch geringere NDVI-Werte widerspiegelten.

In der Praxis könnte dieser oder ein anderer geeigneter Index genutzt werden, um relative Unterschiede innerhalb eines Schlages zu identifizieren und darauf aufbauend Zonen für eine teilflächenspezifische Bewässerung zu erstellen. Hierfür müssen jedoch noch geeignete Auswertungsverfahren entwickelt werden.

Für eine tatsächliche Bewässerungsentscheidung sind zusätzliche Informationen, vor allem zu Bodenfeuchte und aktuellem Wasserbedarf des Bestandes, erforderlich. Zudem reagiert der NDVI primär auf den Chlorophyllgehalt und die Bestandsstruktur, sodass der Index meist erst dann sinkt, wenn die Pflanze bereits physiologische Schäden erlitten hat. Außerdem lässt sich die Ursache eines absinkenden Wertes nicht direkt ableiten.

In Bezug auf die räumliche Auflösung verdeutlicht der Versuch zusätzlich, dass die 3 m × 3 m Pixel der kommerziellen Satellitendaten bei kleinräumigen Strukturen zu Mischpixeln führen können. Dies schränkt eine parzellenspezifische Bewertung und die Übertragbarkeit auf eine hochpräzise Bewässerungssteuerung ebenso ein. Die Aussagekraft des NDVI ist damit unmittelbar vom gewählten System und dessen räumlicher Auflösung abhängig.

Weitere Indizes, die spektrale Daten auswerten

Neben dem NDVI lassen sich jedoch mit multispektralen Daten weitere Indizes wie der NDRE (Normalized Difference Red Edge Index) berechnen. Der NDRE basiert auf der Nutzung des sogenannten „Red Edge"-Bereichs, der den Übergang zwischen dem sichtbaren roten und nahinfraroten Licht im Wellenlängenbereich von etwa 680 bis 750 Nanometern (nm) beschreibt. Der NDRE kann insbesondere in dichten Pflanzenbeständen empfindlicher auf Veränderungen des Chlorophyllgehalts reagieren als der NDVI und dadurch zusätzliche Informationen für die Erkennung von Stress liefern. Die konkrete Eignung zur frühzeitigen Erkennung von Wassermangel hängt jedoch unter anderem von der Pflanzenart, dem Entwicklungsstadium, der Stärke und Dauer des Stresses sowie den Aufnahmebedingungen ab.

Auch der GNDVI-Index (Green Normalized Difference Vegetation Index) kann zusätzliche Informationen über den Zustand von Pflanzen liefern. Er nutzt die Reflexion des grünen Lichts und ermöglicht dadurch Rückschlüsse auf den Chlorophyllgehalt der Pflanzen. Besonders bei dicht bewachsenen Flächen kann er den NDVI sinnvoll ergänzen und dabei helfen, Unterschiede im Zustand der Pflanzen besser zu erkennen.

Die Verknüpfung vieler Datenquellen führt zum Ziel

Für eine zukunftsfähige Praxisanwendung erscheint daher insbesondere die Kombination verschiedener Systeme sinnvoll. Satellitendaten ermöglichen ein regelmäßiges, großflächiges Monitoring der Bestandsentwicklung, während Drohnen punktuell für detailreiche, teilflächenspezifische Analysen eingesetzt werden können. Vegetationsindizes können dabei helfen, den Bewässerungsbedarf von Pflanzen besser einzuschätzen.

Um die Ergebnisse richtig zu beurteilen, sollten sie jedoch immer gemeinsam mit weiteren Informationen betrachtet werden. Dazu gehören beispielsweise Wetterdaten und Angaben dazu, wie viel Wasser im Boden vorhanden ist. Diese Informationen können unter anderem durch Bodenfeuchtesensoren oder mithilfe von Modellen zum Wasserhaushalt gewonnen werden.

Praxistipp: Die Index Database hilft dabei, passende Vegetationsindizes für bestimmte Anwendungen und Satellitensensoren zu finden. Sie zeigt, welche Indizes mit den verfügbaren Sensorbändern berechnet werden können, und bietet zusätzliche Informationen zu Einsatzmöglichkeiten und Literaturquellen: *https://www.indexdatabase.de/.*

Julian Veit, Pierre Klüber, Anna Keppler, LLH, Fachinformation Pflanzenbau