

# Eschentriebsterben – Erkennung der Eschenvitalität mit hyperspektralen Fernerkundungsdaten

UWE KNAUER<sup>1,2</sup>, KATHARINA HOLSTEIN<sup>2</sup>, BONITO THIELERT<sup>2</sup>,  
DENNY SCHMELZ<sup>2</sup> & INA EHRHARDT<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Der Beitrag beschreibt die Erfassung, Verarbeitung und Auswertung hyperspektraler Bilddaten zur Ableitung von Kenngrößen, die für ein Monitoring des Eschentriebsterbens geeignet sind. Die Darstellung beschreibt laufende Forschungsarbeiten und versteht sich als Diskussionsbeitrag zur gewählten Methodik. Die Methoden umfassen die flugzeuggestützte Datenaufnahme mit HYSPEX-Hyperspektralkameras, die Datenaufbereitung mit PARGE und ATCOR, die Ableitung eines DOM aus simultan erhobenen RGB-Bilddaten sowie die Berechnung von spektralen Indices für Korrelationsuntersuchungen zu terrestrisch erhobenen Schadstufen in den Eschenbeständen. Es wird ein Ausblick auf die weiteren Arbeiten im Projektverlauf gegeben.*

## 1 Einleitung

Das Vorkommen der Gemeinen Esche im deutschen Wald sowie in Europa geht seit einigen Jahren kontinuierlich zurück. Dieser Rückgang ist auf das Eschentriebsterben, hervorgerufen durch den Pilz *Hymenoscyphus fraxineus* (Falsches Weißes Eschenstengelbecherchen), zurückzuführen. Der drastische Rückgang der Eschenbestände hat sowohl forstwirtschaftliche Folgen, als auch eine starke Auswirkung auf die Biodiversität im Wald. Zur Rettung der Gemeinen Esche wurde ein Verbundprojekt aus fünf Forschungsverbänden mit 27 Teilprojekten gestartet (FRAXFORFUTURE 2021). Ziel ist die Entwicklung praktikabler Lösungen zum Erhalt der Esche.

Im Beitrag wird auf Ansätze und neue Verfahren für das Monitoring des Gesundheitszustands der Gemeinen Esche durch begleitende Überwachung der Schadentwicklung mittels Fernerkundung, speziell der Hyperspektraltechnik eingegangen. Ziel der Arbeiten ist, auf Basis von hyperspektralen Fernerkundungsdaten Methoden zur Unterscheidung der Esche von anderen Baumarten sowie zur Bestimmung des Vitalitätszustandes innerhalb der Eschenpopulation zu entwickeln. Hierfür sollen aus den Spektren der Bestände mittels Methoden des maschinellen Lernens und der statistischen Datenverarbeitung geeignete Indices zur Erfassung der Esche und deren Vitalität abgeleitet werden.

Über das Bundesgebiet verteilt wurden ca. 20 Monitoringflächen mit erhöhter Beobachtungsintensität als Basis zur Datengewinnung für den Forschungsverbund eingerichtet. Auf diesen Waldflächen findet ein detailliertes Monitoring der räumlichen und zeitlichen Dynamik der Ausbreitung des Eschentriebsterbens sowie des Gesundheitszustandes von Eschenbeständen auf Einzelbaum- und Bestandesebene statt. Darüber hinaus werden anhand retrospektiver und

---

<sup>1</sup> Hochschule Anhalt, Digitale Technologien in der Pflanzenproduktion, Strenzfelder Allee 28, D-06406 Bernburg, E-Mail: uwe.knauer@hs-anhalt.de

<sup>2</sup> Fraunhofer IFF, Joseph-von-Fraunhoferstr. 1, D-39106 Magdeburg, E-Mail: [katharina.holstein, bonito.thielert, ina.ehrhardt]@iff.fraunhofer.de

aktueller Monitoring- und Fernerkundungsdaten Verfahren entwickelt, um das Eschensterben großflächig zu erfassen und auszuwerten. Im Rahmen der Intensivbeobachtung werden phänologische, physiologische, biochemische und holzanatomische Parameter untersucht, auf deren Basis Frühindikationen für Befallsdispositionen von Eschen abgeleitet werden sollen (PETERS et al. 2021).

Im projektbezogenen fernerkundlichen Monitoring des Gesundheitszustandes von Eschen finden u.a. Befliegungen mit räumlich und (hyper-)spektral hochauflösender Messtechnik statt. Die Befliegungszeiträume liegen im Frühjahr sowie im Spätsommer, um Daten unter unterschiedlichen Austriebsbedingungen der Bäume zu gewinnen. Die Befliegungen ergänzend erfolgt die bodenbasierte Intensivbeobachtung der ausgewählten Flächen, bei der neben der georeferenzierten Erfassung des Standorts aller Einzelbäume auch deren Vitalitätszustand wiederholt beurteilt und systematisch dokumentiert wird (FRAXMON 2021).

## **2 Lösungsansatz**

Zur Untersuchung der Vitalitätsunterschiede und zur Entwicklung eines auf Hyperspektraldaten basierenden Monitorings werden mit flugzeuggestützten Sensoren erhobene Spektraldaten zu georeferenzierten und hinsichtlich atmosphärischer Einflüsse korrigierten Hyperspektralbildern aufbereitet. Diese bilden die Datengrundlage für weitergehende Analysen. Die Zuordnung von terrestrisch erhobenen Referenzdaten erfolgt über die Geokoordinaten der Einzelbäume. Für die Untersuchungsgebiete wurden diese im Rahmen der Flächeneinrichtung zuvor terrestrisch eingemessen (FRAXFORFUTURE 2020).

### **2.1 Datenerhebung**

Die Erfassung der Hyperspektraldaten erfolgt über ein Dual-Kamerasystem des norwegischen Herstellers Norsk Elektro Optikk. Es kommen eine Kamera Hypspx VNIR 1800 (NEO-VNIR 2022) in Kombination mit einer Kamera Hypspx SWIR 384 (NEO-SWIR 2022) zum Einsatz. Tabelle 1 beschreibt wesentliche optische und spektrale Eigenschaften des Sensorsystems. Die gegenüber Vorgängermodellen erhöhte Aufnahmezeit erlaubt den Betrieb in geringeren Flughöhen und bei höheren Fluggeschwindigkeiten ohne, dass die Gefahr einer Unterabtastung besteht. Dies erfordert den gleichzeitigen Einsatz eines Inertialmesssystems (IMU) mit vergleichbarer zeitlicher Auflösung. Eingesetzt wurde das IMU/GNSS Applanix POS-AV (APPLANIX 2022). Begrenzend auf die Wahl der Aufnahmezeit wirkt allerdings die für einen guten Signal-Rausch-Abstand erforderliche Belichtungszeit, um die zur Verfügung stehende hohe radiometrische Auflösung von 16 Bit effektiv auszunutzen. Als Kompromiss zwischen der durch den Kameraöffnungswinkel und Flughöhe begrenzten Flächenleistung und hoher räumlicher Auflösung wurde eine Flughöhe von 1000 m über der Erdoberfläche für die Befliegungen geplant.

Tab. 1: Übersicht zu den Eigenschaften des Sensorsystems

Eigenschaften	VNIR 1800	SWIR 384
Wellenlängenbereich	400-1000 nm	930-2500 nm
Kameraöffnungswinkel	17°	16°
Anzahl spektraler Bänder	186	288
Anzahl räumlicher Pixel	1800	384
Spektrale Auflösung	3,26 nm	5,45 nm
Aufnahmerate (Zeilen pro Sekunde)	260 fps	400 fps
Radiometrische Auflösung	16 Bit	16 Bit

## 2.2 Radiometrische Korrektur der Hyperspektraldaten

Die radiometrische Korrektur der erhobenen Spektraldaten erfolgt einerseits durch Berücksichtigung von herstellereitig bereitgestellten Kalibrierdaten für die Sensoren und andererseits durch Umrechnung der Radianzwerte in Reflektanzwerte mittels der Software ATCOR 4 (SCHLÄPFER & RICHTER 2022).

Im ersten Schritt erfolgt die Umrechnung der pro Pixel der Sensormatrix gemessenen Intensitätswerte (Einheit DN für Digital Number) in die Radianz. Dem liegt eine unter Laborbedingungen durchgeführte Referenzmessung des Herstellers zugrunde. Hierbei werden die Sensitivitätsunterschiede auf dem Sensorchip durch Verwendung einer homogenen Lichtquelle sowie einer Ulbricht-Kugel registriert und eine Matrix mit Korrekturwerten abgeleitet.

Im zweiten Schritt erfolgt die Umrechnung der am Sensor ermittelten Radianzwerte in Reflektanzwerte an der Oberfläche. Hierzu werden anhand der Spektraldaten die zum Messzeitpunkt herrschenden atmosphärischen Bedingungen geschätzt. Dies beinhaltet die Quantifizierung des Anteils diffuser und direkter Strahlung im Messsignal, die Berücksichtigung von Sonnenstand und Intensität der Sonneneinstrahlung und unterschiedliche Aerosolgehalte. Die verwendete Software ATCOR 4 verwendet dazu einen modellbasierten Ansatz, der die spektrale Charakteristik typischer Oberflächen bereits berücksichtigt. Zusätzlich können Referenzflächen mit bekannter spektraler Charakteristik in die Atmosphärenkorrektur einbezogen werden. Diese Information kann über geofrenzierte Feldmessungen mit Spektrometern oder in der aufgenommenen Szene platzierte Kalibrierfelder gewonnen werden.

Operationell wird eine automatische Atmosphärenkorrektur eingesetzt. Bei wolkenfreiem Himmel und somit hinreichend gut vorhersagbarer spektraler Charakteristik der Lichteinstrahlung (TOA) anhand eines Emissionsmodells der Sonne wird aus den Navigationsdaten für jeden Flugstreifen die Hauptflugrichtung und damit die Ausrichtung zur Sonne ermittelt. Anhand des GPS-Zeitstempels erfolgt die Bestimmung von Zenith- und Azimutwinkel der Sonne. Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre zum Messzeitpunkt wird anhand der Wasserabsorptionsbanden in den gemessenen Spektraldaten geschätzt und bildet den wesentlichen Parameter zur Abschätzung des Streulichtanteils am Messsignal. Die Sensoreigenschaften werden durch die bandbezogenen Parameter mittlere Wellenlänge und Halbwertsbreite (FWHM) beschrieben und sind für die verwendeten Kameras hinterlegt. Wesentliche Unterschiede für die modellbasierte Atmosphärenkorrektur bestehen zwischen maritimen, unversiegelten natürlichen und urban geprägten Landschaften. Für das Monitoring von Waldflächen werden in ATCOR 4 daher Modelle für unversiegelte natürliche Oberflächen (Modus: *rural*) vorausgewählt.

### 2.3 Geometrische Korrektur der Hyperspektraldaten

Hierzu werden die Positionsdaten der GNSS-Antenne/des Inertialmesssystems unter Berücksichtigung des Antennen-Sensor-Leverarm auf die raumzeitlichen Koordinaten der beiden Hyperspektralkameras umgerechnet. Hierfür kommt die Software POSPAC (TRIMBLE 2022) zum Einsatz. Die Berechnung erfolgt im Postprocessing unter Berücksichtigung korrigierter Bahndaten der Navigationssatelliten sowie der differentiellen Korrektur des GNSS-Fehlers hinsichtlich regionaler Laufzeitfehler und Veränderungen des Trägerphasensignals. Hierzu wird eine virtuelle Basisstation für das Untersuchungsgebiet durch Interpolation der Korrektursignale eines globalen Stationsnetzwerks rechnerisch bestimmt. Alternativ können auch die Daten einer realen, im Untersuchungsgebiet zu platzierenden Basisstation genutzt werden. Aufgrund der Befliegung mehrerer, räumlich weit verteilt liegender Monitoringflächen an einem Tag wurde auf virtuelle Basisstationen zurückgegriffen. Anhand von Triggersignalen der Kameras, die über einen Trigger-Eingang der IMU gemeinsam mit dem Datenstrom des Navigationssystems gespeichert werden, kann für jeden Zeitpunkt der Aufnahme einer Bildzeile eine Lageinformation des Sensors ermittelt werden. Dies erfolgt mittels der Software HYSPEX NAV, die vom Kamerahersteller bereitgestellt wird und die mit POSPAC korrigierten Daten als Eingabe erhält.

Die geometrische Korrektur der Zeilenscannerdaten erfolgt mittels der Software PARGE (SCHLÄPFER 2022). Hierzu werden die mit HYSPEX NAV zu jedem Hyperspektralbild generierten Navigationsdaten zusammen mit dem Hyperspektralbild importiert. Außerdem benötigt das Programm Informationen zu den geometrischen Eigenschaften des Sensors. Diese werden durch einen Vektor beschrieben, dessen Elemente die räumlichen Beobachtungswinkel für jeden Bildpunkt des Hyperspektralsensors darstellen. Für den NADIR-Einsatz und den geringen Öffnungswinkel des Systems (SWIR-FOV=16°) wird eine äquidistante Unterteilung des Intervalls [-8°;+8°] entsprechend der Pixelanzahl der Sensoren (VNIR-Kamera=1800 Pixel, SWIR-Kamera=384 Pixel) verwendet. Wichtig ist die Berücksichtigung der Einbaulage der Kameras zur Flugrichtung. Ggf. muss eine sich im Vorzeichen unterscheidende Konfiguration genutzt werden, die für PARGE als Sensorkalibrationsdatei bereitgestellt werden muss.

Anhand der bereitgestellten Sensorcharakteristik und der Navigationsdaten erfolgt eine geografische Eingrenzung des Befliegungsgebiets. Für dieses Gebiet kann ein digitales Oberflächenmodell (DOM) entweder aus einem globalen Geländemodell generiert oder aus anderer Quelle importiert werden. Die Verwendung eines globalen Modells bietet den Vorteil der Datenverfügbarkeit für jedwede Befliegung und die Nachteile einer geringen räumlichen Auflösung sowie mangelnder Aktualität. Da für eine Anwendung im Forst aufgrund der variierenden Wuchshöhen und bspw. gegenüber Agrarlandschaften kleinräumig großen Höhenunterschieden, varrierender Belaubung, der Bewirtschaftung, möglichen Sturmschäden und Kalamitäten ein aktuelles DOM erforderlich ist, wird dieses aus simultan erhobenen RGB-Bilddaten für die jeweilige Befliegung berechnet. Näheres zu diesem Vorverarbeitungsschritt ist in Abschnitt 3.3 beschrieben.

Der nächste Verarbeitungsschritt ist die sogenannte Boresight-Kalibrierung. Darunter versteht man die Ermittlung der Sensororientierung im Referenzkoordinatensystem. Die Boresight-Kalibrierung kann entweder passpunktbasiert oder automatisiert durch Auswertung einer Doppelkreuzbefliegung desselben Gebietes erfolgen. Der passpunktbasierte bietet den Vorteil, die

nach der Boresight-Kalibrierung erzielte Lagegenauigkeit gut einschätzen zu können. Ihr Nachteil liegt in der Erfordernis, hinreichend viele Messmarken im Gelände zu verteilen bzw. hinreichend viele geeignete Landmarken präzise zu vermessen. Ein pragmatischer Lösungsansatz ist die Verwendung von Passpunkten, deren Lage in einem bereits georeferenzierten aktuellen Ortholuftbild (z.B. aus Befliegungen des amtlichen Vermessungswesens) hinreichend genau bestimmt werden kann. Kandidaten für Passpunkte sind diejenigen Landmarken, deren Lage sowohl im Ortholuftbild als auch im Hyperspektralbild sicher identifiziert werden kann. Geeignet sind bspw. die Eckpunkte von Fahrbahnmarkierungen, Fußpunkte von Pfählen, etc. Demgegenüber bietet die automatisierte Boresightkalibrierung den Vorteil, keinen Auswahlprozess für die Passpunkte zu durchlaufen und damit eine Auswertung ohne zusätzliche interaktive Komponente durchführen zu können. Eine mögliche Kombination beider Ansätze, die automatisierte Suche von geeigneten Passpunkte in den Hyperspektralbildern und im hochauflösenden digitalen Ortholuftbild, wird in (KNAUER 2013) beschrieben. Die Boresightkalibrierung wird im passpunktbasierten Verfahren für einen einzelnen Flugstreifen und im automatisierten Verfahren für die Flugstreifen des Befliegungsmusters durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Form von Korrekturwinkelangaben in die Prozessierung der weiteren Flugstreifen übernommen. Innerhalb der Software PARGE wird dazu der Status des aktuellen Projekts in einer Datei gesichert, aus der die Boresight-Parameter später direkt geladen werden können.

Nach Durchführung dieser vorbereitenden Schritte erfolgt die eigentliche Berechnung eines hyperspektralen Orthofotos über parametrische Geokodierung in einem vorgegebenen Raster. Die Rastergröße wird als Parameter frei gewählt. Das zugrundeliegende Verfahren ist ein Raytracing-Algorithmus. Die Position auf der Oberfläche wird als Schnittpunkt des Strahls zwischen Position des Pixels und DOM ermittelt. Die in den einzelnen Bändern enthaltene spektrale Information wird den korrespondierenden Bändern des Orthofotos an der entsprechenden Position hinzugefügt. PARGE bietet Wahlmöglichkeiten bzgl. der Berechnung. Es ist zwischen hoher räumlicher Genauigkeit und spektraler Genauigkeit abzuwägen. Die schnelle bilineare Nächste-Nachbarn-Interpolation als Resampling-Verfahren stellt einen guten Kompromiss dar und wird daher vorrangig eingesetzt.

Nach der Prozessierung der einzelnen Flugstreifen erfolgt die Erstellung eines Orthomosaiks. Hierzu werden die einzubeziehenden Flugstreifen eines Befliegungsgebiets ausgewählt. Die Reihenfolge der Auswahl bestimmt die Art der Überlagerung. Es besteht die Wahlmöglichkeit der überlappenden Darstellung nach der Reihenfolge und alternativ die Auswahl nach der Nächster-Nachbar-Regel (MODUS: *center cropped*). Die Sichtbarkeit eines Bildpunkts wird hier durch die Lage der Ebene in dieser Reihenfolge bestimmt. In der Regel bietet sich aufgrund visuell besserer visueller Ergebnisse die Wahl der überlappenden Darstellungsweise an. Das Orthomosaik wird i.d.R. mittels der Angabe von Geokoordinaten auf einen rechteckigen Bereich, der die Monitoringfläche komplett enthält begrenzt. Dieses wird für die weitere Verarbeitung im ENVI-Format gespeichert.

Im Fall einer unzureichenden Georeferenzierung, die sich insbesondere in den Überlappungsbereichen der Flugstreifen bei der Mosaikberechnung zeigen kann, muss entweder der Gesamtprozess inklusive Boresight-Kalibrierung erneut durchlaufen werden oder es kann eine

nachträgliche Minimierung der geometrischen Abweichung zwischen den Flugstreifen im Gesamtverband erfolgen. Hierzu wird aus den Spektralbildern der einzelnen Flugstreifen jeweils ein einkanaliges Bild eines spektralen Index (für den VNIR-Bereich wird der NDVI verwendet) aufgrund höherer Robustheit gegenüber Schattenwurf und BRDF-Effekten genutzt. Für diese Bilder wird in der Abfolge der Flugstreifen die paarweise Korrelationsfunktion durch schnelle zweidimensionale Fouriertransformation, Multiplikation der Fourierspektren und Rücktransformation in den Ortsbereich berechnet. Entsprechend des Korrelationstheorems kann die Verschiebung zwischen den Flugstreifen als Maximalwertbestimmung im Ergebnisbild bestimmt werden.

## **2.4 Berechnung des Digitalen Oberflächenmodells**

Das für die Georeferenzierung der hyperspektralen Zeilenscannerdaten erforderliche DOM wird mit der Software Agisoft Metashape Professional (AGISOFT 2022) erstellt. Eine geeignete Alternative stellt die Software Pix4Dmapper (PIX4D 2022) dar. Simultan in einem festen Zeitintervall während des Fluges aufgezeichnete RGB-Bilder werden genutzt, um eine dichte Punktwolke und durch Vermaschung ein 3D-Modell des Kronendaches zu erzeugen. Anhand dieser Daten wird das DOM als zweidimensionale Karte der Höheninformation im Referenzkoordinatensystem erzeugt und als GEOTIFF gespeichert. Dieses Format kann in PARGE importiert werden.

## **2.5 Berechnung vitalitätsbezogener spektraler Kenngrößen**

Das atmosphärenkorrigierte und georeferenzierte Hyperspektralbild bildet die wesentliche Grundlage für die Berechnung spektraler Indizes. Diese werden als Rasterbilder entsprechend der räumlichen Auflösung des Hyperspektralbildes erzeugt. In der Literatur sind eine Reihe spektraler Indices beschrieben (JONES & VAUGHAN 2010), die sich zur Erfassung von Vitalitätsunterschieden der Vegetation eignen. Weite Verbreitung hat die Auswertung des NDVI (ROUSE 1974), der auf Blattebene zum Chlorophyllgehalt und auf Kronenebene gut zur Biomasse und damit dem Belaubungsgrad korreliert ist. Ergänzend wird häufig der PRI ausgewertet, der Stresseffekte insbesondere auch durch seine Sensitivität gegenüber Carotinoiden im Bereich des grünen Lichts charakterisieren hilft (GAMON et al. 1992). Neben dem forstlichen Monitoring werden spektrale Indices auch in der Fernerkundung für landwirtschaftliche Anwendungen und in den Umweltwissenschaften genutzt, so dass zahlreiche weitere Indices definiert wurden (HEINRICH 2022).

Darüber hinaus bietet die Aufnahme der Hyperspektralbilder die Möglichkeit, für die Vitalitätsansprache verschiedener Schädigungsgrade der Esche neue spezifische Indices zu entwickeln. Hierbei werden zwei Ansätze verfolgt. Erstens die Bestimmung einzelner Wellenlängen und Wellenlängenkombinationen mit hoher Relevanz für die Vitalitätsbewertung und deren Verrechnung zu einem neuen skalaren Indexwert (MAHLEIN et al. 2013). Zweitens das Trainieren eines Klassifikations- oder Regressionsmodells zur Vorhersage eines Vitalitätsindex, der als Referenzwert zur Verfügung gestellt wird (BANI et al. 2017). Der Vitalitätsindex ergibt sich dann als Wert der Modellantwort auf neue Spektraldaten. Eine Kombination beider Verfahren ist ebenfalls möglich (BENDEL et al. 2020). Mit geeigneten Verfahren erfolgt zunächst eine

Bewertung der Relevanz einzelner Prädiktorvariablen (KNAUER et al. 2017). Damit kann aus komplexen Modellen, die anhand der vollständigen Hyperspektraldaten trainiert wurden, eine Teilmenge an relevanten spektralen Bändern identifiziert werden. Für diese wird dann im zweiten Schritt untersucht, wie sie sich z.B. in Form eines differentiellen Indexwertes miteinander kombinieren lassen, um eine robuste Bewertung der Eschenvitalität zu ermöglichen. Aufbauend können verschiedene Modelle zur Vitalitätsansprache, aber auch zur Erkennung der in einem Ensemble-Klassifikator zusammengefasst werden, um das Vorhersageergebnis zu verbessern (KNAUER et al. 2019).

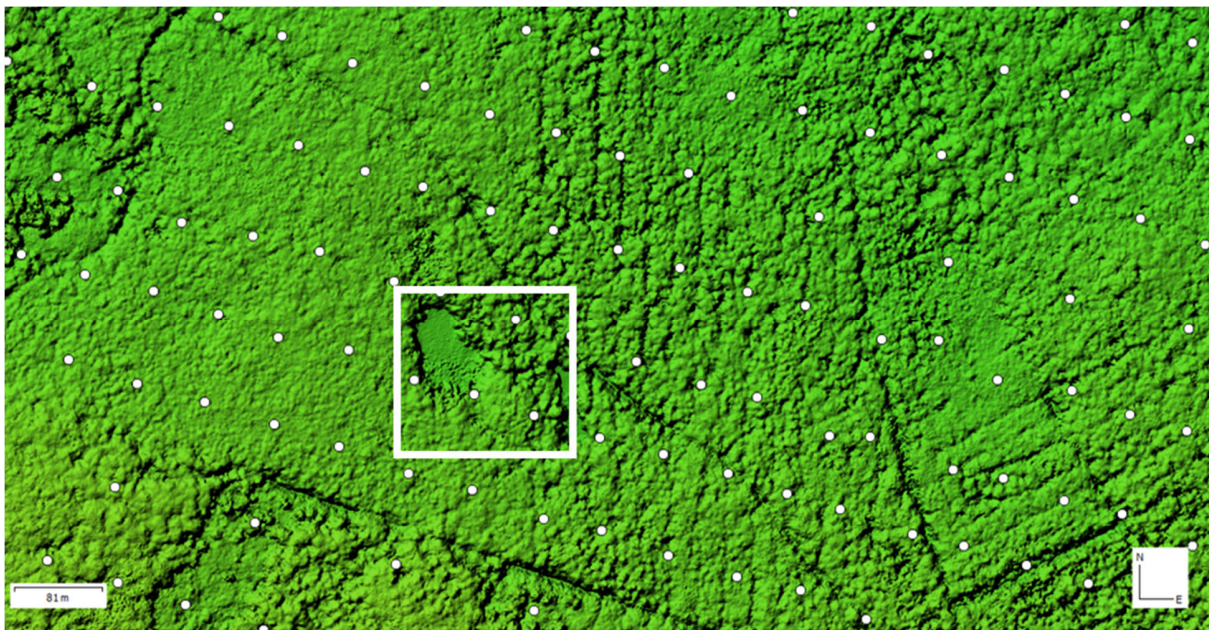


Abb. 1: Ausschnitt aus dem Oberflächenmodell eines Befliegungsgebiets in Thüringen mit einer Rastergröße von 11 cm. Der Kreis zeigt die Lage der forstlichen Monitoringfläche. Die Punkte über dem Gebiet zeigen die Koordinaten der Bildaufnahmepositionen an. Der zugrundeliegende Messflug erfolgte am 22.7.2021.

### 3 Erste Ergebnisse

Es wurden Messflüge am 11.9.2020, 22.07.2021 und 9.9.2021 durchgeführt. Entsprechend der zuvor beschriebenen Methodik wurden DOM für die einzelnen Befliegungsgebiete berechnet. Abb. 1 zeigt beispielhaft das Oberflächenmodell des Waldgebiets Ettersberg in Thüringen. Der Kreis kennzeichnet in Näherung die Lage der Beobachtungsfläche. Die Lagekorrektur erfolgte unter Einbeziehung von 7 Passpunkten, die gleichmäßig im Befliegungsgebiet platziert wurden. Unter Nutzung des DOM sowie der Softwarepakete PARGE und ATCOR 4 erfolgt die Georeferenzierung der Hyperspektraldaten. Abb. 2 zeigt beispielhaft den Ausschnitt ein aus dem Hyperspektralbild für das Untersuchungsgebiet abgeleiteten spektralen Index. Die exakte Georeferenzierung und Verbesserung der Lagegenauigkeit ist Gegenstand der aktuellen Arbeiten. Arbeiten hinsichtlich der Baumartenerkennung und der spektralen Charakterisierung des Eschentriebsterbens konnten auf Basis der beschriebenen Methodik aufgenommen werden. Die

georeferenzierten Karten werden in ein GIS-System importiert und dort weiter ausgewertet. Parallel werden Trainingsdatensätze für die Baumartenklassifikation und die Modellierung von Vitalitätsunterschieden aufgebaut. Die Prozessierung dieser Datensätze erfolgt in einem separaten, speziell für das maschinelle Lernen mit Hyperspektraldaten entwickelten Umgebung des Fraunhofer IFF auf Basis von MATLAB.

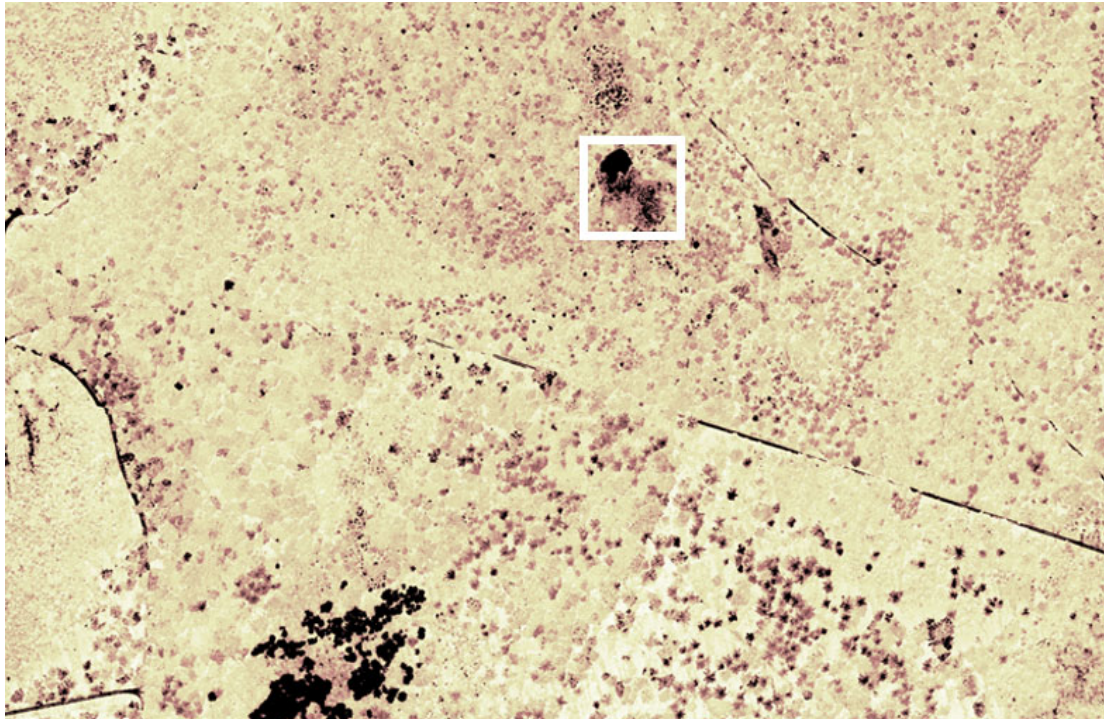


Abb. 2: Kartenausschnitt mit Visualisierung des spektralen Index NDVI zur Sichtbarmachung von Vitalitätsunterschieden. Dunklere Flächen entsprechen Bereichen mit geringerem Anteil vitaler Vegetation. Der zugrundeliegende Messflug erfolgte am 11.9.2020. Eine Korrespondenz zu Abb. 1 wird durch die markierte Fläche als Landmarke hergestellt.

#### 4 Fazit & Ausblick

Der Artikel beschreibt Methodik und Vorgehensweise bei Datenerfassung und Datenauswertung zum Monitoring des Eschentriebsterbens mittels hyperspektraler Fernerkundung. Es werden die methodischen Schritte der Datenverarbeitung von der Bildaufnahme bis zur Ableitung von Vitalitätsindices beschrieben. Erste Ergebnisse illustrieren den gewählten Ansatz. Es sind jedoch umfangreiche weitere Arbeiten erforderlich. Daher sind weitere Messflüge geplant, um die erforderliche Datengrundlage für die Ableitung von robusten Modellen zur Vitalitätsvorhersage zu schaffen. Die Flüge finden begleitend zu umfangreichen terrestrischen Bonituren/Ansprachen auf Einzelbaumebene statt, so dass geeignete Referenzdaten zur Verfügung stehen. Als prinzipielle Herausforderung sind Unterschiede in der Bewertung des Eschenschädigungsgrades durch einen Beobachter am Boden und durch die Bewertung der Krone aus der Luft zu nennen. Trotz dieser Differenzen bieten die Fernerkundungsmethoden jedoch ein hohes Potential, da sie durch hohe



räumliche Auflösung gleichzeitig eine flächenhafte Erfassung und eine Analyse auf Einzelbaumebene erlauben. Die hohe spektrale Auflösung von Hyperspektralkamerasystemen kann unter Einbeziehung räumlicher Beziehungen genutzt werden, verschiedene Schädigungsstufen abzubilden.

## 5 Danksagung

Die Arbeiten werden als Teil des Verbundprojektes FraxForFuture von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe aus Mitteln des Waldklimafonds unter dem Förderkennzeichen 2019WK20D4 gefördert. Besonderer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen des Forstlichen Forschungs- und Kompetenzzentrums Gotha für die Erhebung von Referenzdaten. Gleichermäßen gilt unser Dank den Partnern im Teilprojekt FraxMon für die gute Zusammenarbeit und den intensiven fachlichen Austausch.

## 6 Literaturverzeichnis

- AGISOFT, 2022: Features Professional Edition. <https://www.agisoft.com/features/professional-edition/>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- APPLANIX, 2022: POS-AV. <https://www.applanix.com/products/posav.htm>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- BANI, G., SEIFFERT, U., BIEHL, M. & MELCHERT, F., 2017: Adaptive basis functions for prototype-based classification of functional data. 12. International Workshop on Self-Organizing Maps and Learning Vector Quantization, Clustering and Data Visualization, 1-8, <https://doi.org/10.1109/WSOM.2017.8020020>.
- BENDEL, N., KICHERER, A., BACKHAUS, A., KLÜCK, H.-C., SEIFFERT, U., FISCHER, M., VOEGELE, R. T. & TOEPFER, R., 2020: Evaluating the Suitability of Hyper- and Multispectral Imaging to Detect Foliar Symptoms of the Grapevine Trunk Disease Esca in Vineyards. *Plant Methods*, **16**, Artikel 142, <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00685-3>.
- FRAXFORFUTURE, 2020: Flächeneinrichtung. <https://www.fraxforfuture.de/untersuchungsflaechen/flaecheneinrichtung>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- FRAXFORFUTURE, 2021: FraxForFuture - Gemeinsam für den Erhalt der Esche. <https://www.fraxforfuture.de>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- FRAXMON, 2021: FraxMon. <https://www.fraxforfuture.de/boniturmerkmale>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- GAMON, J., PENUELAS, J. & FIELD, C., 1992: A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, **41**, 35-44.
- HEINRICH, V., 2022: Index DataBase – A database for remote sensing indices, <https://www.indexdatabase.de/>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- JONES, H. G. & VAUGHAN, R. A., 2010: *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*, Oxford University Press, 1. Auflage, ISBN 978-0199207794.
- KNAUER, U. & SEIFFERT, U., 2013: An Approach for Automated Registration of Hyperspectral Images for BoreSight Calibration. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für*

- Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Seyfert, E. (Hrsg.), Band **22**, 271-278.
- KNAUER, U., MATROS, A., PETROVIC, T., ZANKER, T., SCOTT, E. S. & SEIFFERT, U., 2017: Improved classification accuracy of powdery mildew infection levels of wine grapes by spatial-spectral analysis of hyperspectral images. *Plant Methods*, **13**(1), 1-15, <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0198-y>.
- KNAUER, U., REKOWSKI, C., STECKLINA, M., KROKOTSCH, T., PHAM MINH, T., HAUFFE, V., KILIAS, D., EHRHARDT, I., SAGISCHEWSKI, H., CHMARA, S. & SEIFFERT, U., 2019: Tree Species Classification Based on Hybrid Ensembles of a Convolutional Neural Network (CNN) and Random Forest Classifiers. *Remote Sensing*, **11**(23), 2788, <https://doi.org/10.3390/rs11232788>.
- MAHLEIN, A.-K., RUMPF, T., WELKE, P., DEHNE, H.-W., PLÜMER, L., STEINER, U. & OERKE, E.-C., 2013: Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment*, **128**, 21-30.
- NEO-VNIR, 2022: HySpex VNIR-1800. <https://www.hyspex.com/hyspex-products/hyspex-classic/hyspex-vnir-1800/>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- NEO-SWIR, 2022: HySpex SWIR-384. <https://www.hyspex.com/hyspex-products/hyspex-classic/hyspex-swir-384/>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- PETERS, S., LANGER G. & KÄTZEL, R., 2021: Bonitur geschädigter Eschen im Kontext des Eschentriebsterbens. *AFZ-Der Wald*, **76**(12), 28-31.
- PIX4D, 2022: Pix4Dmapper. <https://www.pix4d.com/de/produkt/pix4dmapper-photogrammetrie-software>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A. & DEERING, D. W., 1974: Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. 3. ERTS-1 Symposium der NASA, Washington DC, 309-317.
- SCHLÄPFER, D., 2022: PARGE Image Rectification. <https://www.rese-apps.com/software/parge/>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- SCHLÄPFER, D. & RICHTER, R., 2022: ATCOR 4 - for Airborne Remote Sensing Systems. <https://www.rese-apps.com/software/atcor-4-airborne/index.html>, letzter Zugriff am 22.01.2022.
- TRIMBLE, 2022: Applanix POSPac MMS. <https://de.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/applanix-pospac-mms>, letzter Zugriff am 22.01.2022.