

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben

Thema:

Entwicklung von Methoden und Verfahren zur flächendeckenden und homogenen Generierung von Waldparametern auf der Basis digitaler Oberflächenmodelle aus Luftbilddaten

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Teilvorhaben 2: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 22025014

Teilvorhaben 2: 22024816

Laufzeit:

01.06.2017 bis 28.02.2021

Monat der Erstellung:

03/2021

Datum der Veröffentlichung:

24.09.2021

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

SCHLUSSBERICHT

I. Ziele

1 Aufgabenstellung

Im Verbundprojekt F³ – „Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten“ wurden standardisierte Verfahren entwickelt, um in automatisierten Abläufen Karten wichtiger forstlicher Waldstrukturparameter zu erstellen. Dies sind Karten der Vegetationshöhe, des Überschirmungsgrads, des Vorkommens von Lücken im Kronendach, der Kronendachrauigkeit, des Vorkommens von lockeren Altholz- bzw. Überhälterbeständen und der Verteilung des Holzvorrats sowie der oberirdischen Biomasse. Auch wurde ein Verfahren zur Vorprozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten erarbeitet, das für Vegetationsauswertungen optimiert ist. Ein erster Ansatz zur automatisierten Erstellung einer großflächigen, für forstliche Planungszwecke nutzbaren Baumartenkarte auf der Basis von Sentinel-2-Satellitendaten wurde entwickelt. Alle im Rahmen des F³-Projekts entwickelten Verfahren sind auf die Verarbeitung deutschlandweit flächendeckend verfügbarer Datensätze ausgerichtet. Sie sind daher weiträumig anwendbar und in der Lage, in regelmäßigen Zeittakten aktualisierte forstliche Informationsprodukte zu generieren. Alle Verfahren wurden umfangreich dokumentiert und vollumfänglich veröffentlicht. Es bestehen keine Nutzungsbeschränkungen. Die Verfahren stehen daher einer großen Nutzendengemeinde zur Verfügung und sind u. a. in forstbetriebliche Informationssysteme integrierbar. Ein Konzept für die effiziente Bereitstellung der Karten unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen wurde ebenfalls entwickelt.

Durch die erreichten Projektergebnisse wird die Aufrechterhaltung und Optimierung einer ordnungsgemäßen und nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder in Deutschland unterstützt. Der Kreis der potentiellen Nutzenden umfasst Forstbetriebe und -verwaltungen, Naturschutzinstitutionen, Landesvermessungsinstitutionen und wissenschaftliche Einrichtungen.

Gegenstand des Projekts ist die Anwendung von Fernerkundungstechniken zur Erfassung von Waldstrukturen. Entwicklungen im Bereich der Fernerkundung sind sehr dynamisch und geprägt von kontinuierlichen Weiterentwicklungen der Erfassung und Auswertung von Fernerkundungsdaten. Nach Möglichkeit wurde dies in der Umsetzung des Arbeitsplans des Projekts berücksichtigt. So hatte sich gezeigt, dass die Baumartenerfassung basierend auf den spektralen Werten von Orthophotos nicht effektiv durchgeführt werden kann. Erfahrungen Dritter zeigten jedoch, dass die kurz vor dem Projektstart verfügbar gewordenen Sentinel-2-Satellitendaten ein hohes Potential diesbezüglich aufweisen. Abweichend von der ursprünglichen Planung im Projektantrag, wurden daher Sentinel-2-Satellitendaten anstelle von Orthophotos für die Baumartenklassifizierung genutzt.

Ebenso musste von der ursprünglichen Planung, das Ertragspotential von Standorten zu modellieren, abgewichen werden. Recherchen ergaben, dass kaum geeignete Datensätze flächendeckend und deutschlandweit vorliegen um eine solche Modellierung durchzuführen. Durch Gespräche mit Experten im Bereich der Bodenkunde und weitergehende Beschäftigung mit dem Thema „Modellierung des Ertragspotentials“ wurde klar, dass diese sehr aufwendige Aufgabe im Rahmen des F³-Projekts nicht leistbar ist. Aufgrund fehlender Referenzdaten wäre zudem eine Einschätzung der Genauigkeit der Vorhersage des Ertragspotentials und damit die Brauchbarkeit für die Modellierung von Holzvorräten und Biomasse schwierig. Daher wurde entschieden, statt des modellierten Ertragspotential die verfügbaren Standortsinformationen (Klima, Boden, Topographie) direkt als Prädiktoren in der Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse zu nutzen (Abschnitte 1.4.2 und 1.4.3). So konnte gewährleistet werden, dass der Einfluss von Klima, Boden und Topographie in der Vorratsmodellierung Berücksichtigung findet, ohne das Risiko einer

eventuell unscharfen Modellierung des Ertragspotentials einzugehen. Vorteil dieses Vorgehens ist auch die nun mögliche flexible Anpassung der Modellierung an die Datenverfügbarkeit in verschiedenen Bundesländern. In Ländern, die über qualitativ hochwertige und akkurate Standortdaten verfügen, können diese zur Modellierung genutzt werden. In Ländern, in denen diese Daten nicht vorliegen, kann auf weniger akkurate Basisdaten zurückgegriffen werden. Die Aufbereitung und Integration dieser Basisdaten ist mit den von uns hierfür geschaffenen Verfahren möglich.

Das F³-Projekt wurde in enger Kooperation zwischen den beteiligten Institutionen durchgeführt. Die Verfahrensentwicklung fand gemeinsam und in stetiger Absprache statt. So wurde gewährleistet, dass unterschiedliche regionale Gegebenheiten und Datenverfügbarkeiten berücksichtigt werden konnten. Regelmäßige, vierteljährliche Projekttreffen und wöchentliche Jour fixe Telefonate unterstützten die enge Zusammenarbeit und Abstimmung innerhalb des Projekts und sorgten darüber hinaus für ein angenehmes und produktives Arbeitsklima.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

Der Wechsel von analoger zu digitaler Luftbildtechnik, der um das Jahr 2005 vollzogen wurde, eröffnete neue Auswertungsmöglichkeiten und erhöhte das Nutzungspotential von Fernerkundungsdaten für forstliche Anwendungen, vor allem hinsichtlich der Erfassung von Vegetationsmerkmalen und -schäden.^{1,2,3}

Aufbauend auf digitaler Luftbildtechnik fand eine rasante Weiterentwicklung der digitalen Photogrammetrie sowie der automatisierten Bilddatenauswertung statt. Zu den neu entstandenen Möglichkeiten gehört u.a. die automatisierte Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) aus digitalen Luftbilddaten. DOM stellen die dreidimensionale Ausprägung der Erdoberfläche einschließlich der darauf befindlichen Objekte, wie Vegetation und Gebäude, dar (siehe Abbildung 1). Bei bewaldeten Landschaftsteilen bildet ein DOM die Bestandes- bzw. Kronenoberfläche einschließlich der sich darin befindenden Lücken ab. Bei der automatisierten DOM-Berechnung kommen „Image Matching“-Verfahren zum Einsatz, welche aus den überlappend aufgenommenen, orientierten Luftbildern durch Bildkorrelationstechniken dreidimensionale Informationen ableiten^{4,5,6}. Diese Informationen liegen zunächst als unregelmäßige dreidimensionale Punktwolken vor, die sich in Rasterdaten mit regelmäßiger Verteilung der Höhenwerte umrechnen lassen⁴.

¹ VDI, 1993. Richtlinie VDI 3793, Blatt 2; VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

² AFL, 2003. Luftbild-Interpretation – Bestimmungsschlüssel für die Beschreibung von strukturreichen Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild; Schriftenreihe des Landesforstpräsidiums Sachsen, Heft 26/2003.

³ Ackermann, J., Adler, P., Bauerhansl, C., Brockamp, U., Engels, F., Franken, F., Ginzler, C., Gross, C.-P., Hoffmann, K., Jütte, K., Kenneweg, H., Koukal, T., Martin, K., Regner, B., Seitz, R., Troycke, A., 2012. Das digitale Luftbild - Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich; Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (Hrsg.), Beiträge aus der NW-FVA, Band 7, 84 S.

⁴ Adler, P., 2001. Einsatz digitaler Photogrammetrie zur Beschreibung von Waldbeständen – am Beispiel der digitalen photogrammetrischen Erfassung der Level 2 Flächen Baden-Württembergs. Dissertation, Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 148 S.

⁵ Hirschmugl, M., Ofner, M., Raggam, J., Schardt, M., 2007. Single tree detection in very high resolution remote sensing data. Remote Sensing Of Environment, 2007, 110, S. 533 - 544.

⁶ Hirschmugl, M., 2008. Derivation of Forest Parameters from UltracamD Data. Dissertation TU Graz, 2008.

Digitales Oberflächenmodell (DOM) ———
 Digitales Geländemodell (DGM) ———

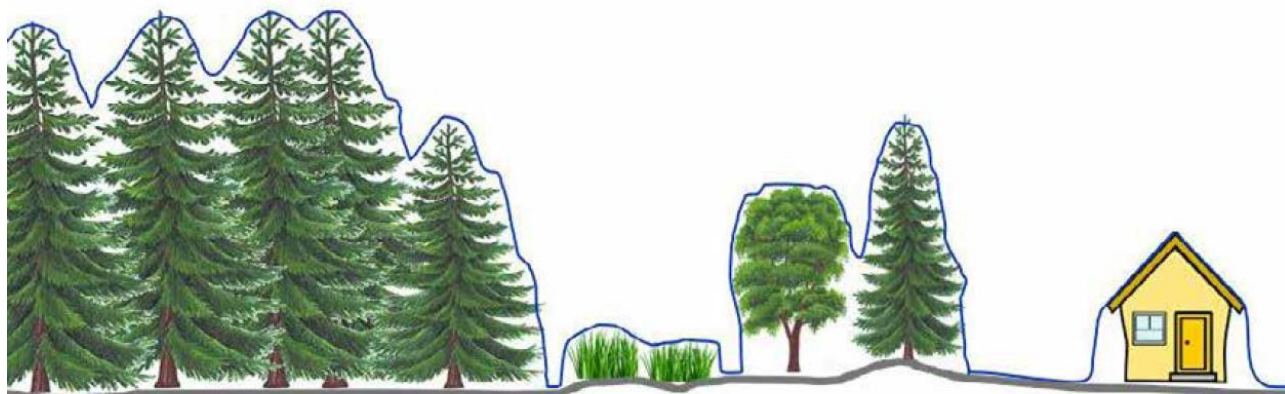


Abbildung 1: Illustration eines digitalen Oberflächenmodells (DOM) und eines digitalen Geländemodells (DGM). Quelle: Waser, WSL in Ackermann et al. 2020⁷.

Verfahren des Image Matchings zur DOM-Berechnung sind in verschiedenen Open Source-Programmen, wie zum Beispiel im Projekt MicMac des IGN^{8,9}, und kommerziellen Programmen, wie z. B. Match-T DSM¹⁰ (Trimble Inpho) oder SURE¹¹ (nframes), realisiert. Die beiden zuletzt genannten Softwareprodukte wurden für das Image Matching im F³-Projekt verwendet. Neben den angewendeten Image Matching-Algorithmen haben die Eigenschaften der verwendeten digitalen Luftbilder Einfluss auf die Qualität der DOM. Als Datengrundlage für die großflächige Ableitung der DOM bieten sich die regelmäßigen, flächendeckenden Luftbildbefliegungen (Turnus von 2-3 Jahre) der Landesvermessungsinstitutionen der Bundesländer an. Hier werden unter Einsatz großformatiger Matrixkameras Stereo-Luftbilder mit vier Bildkanälen (Rot (R), Grün (G), Blau (B), Nahes Infrarot (NIR)) und einer Bodenauflösung von in der Regel 20 cm angefertigt. Seit einigen Jahren werden von den Landesvermessungsinstitutionen Luftbilder üblicherweise mit einer Überlappung von 80% entlang der Flugstreifen und 30 – 50% zwischen den Flugstreifen aufgenommen. Diese große Überlappung der Luftbilder bietet große Vorteile für die DOM-Berechnung, da jedes Objekt der Erdoberfläche in mehreren, aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommenen Bildern erfasst wird. Ein weiterer wesentlicher Vorteil sind die Bundesländer übergreifend vergleichbaren Eigenschaften der digitalen Luftbilddatensätze. Standardisierung wird durch den Zusammenschluss der Landesvermessungsinstitutionen in der „Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland“ (AdV) erreicht und gewährleistet. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die Erzeugung bundesweiter DOM in gleichbleibend hoher Qualität. Durch die Ausrichtung der entwickelten Verfahren auf die Auswertung von Luftbilddaten der Landesvermessungsinstitutionen ist gewährleistet, dass ein umfassender Fundus an Grundlagendaten zur Verfügung steht, der in regelmäßigen Zeittakten

⁷ Ackermann, J.; Adler, P.; Aufreiter, C.; Bauerhansl, C.; Bucher, T.; Franz, S.; Engels, F.; Ginzler, C.; Hoffmann, K.; Jütte, K.; Kenneweg, H.; Koukal, T.; Martin, K.; Oehmichen, K.; Ruffer, O.; Sagischewski, H.; Seitz, R.; Straub, C.; Tintrup, G.; Zielewska-Büttner, K., 2020. Oberflächenmodelle aus Luftbildern für forstliche Anwendungen. Leitfaden AFL 2020. WSL Berichte, 87. 60 p.

⁸ Cléry, I., Pierrot-Desseilligny, M., 2011. An ergonomic interface to compute 3D models using photogrammetry; Proceedings du XXIIIe symposium de la CIPA, Prag.

⁹ <http://logiciels.ign.fr/?Micmac> [letzter Zugriff 22.10.2020].

¹⁰ http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-696437/022516-018C_Inpho_MATCH-T_DSM_TS_USL_0516_LR.pdf [letzter Zugriff 22.10.2020].

¹¹ <https://www.nframes.com/products/sure-aerial/> [letzter Zugriff 22.10.2020].

aktualisiert wird und daher für retrospektive sowie zukünftige Anwendungen des waldbezogenen Monitorings verwendet werden kann.

Normalisierte Oberflächenmodelle (nDOM), welche die Höhe der Vegetation abbilden, lassen sich erzeugen, indem das DOM mit einem digitalen Geländemodell (DGM) verrechnet wird ($\text{DOM} - \text{DGM} = \text{nDOM}$). DGM Daten liegen in allen Bundesländern in hoher Auflösung von 1 m vor. Im F³-Projekt dienen DOM und nDOM als wichtigste Basisdaten für die Ableitung von für forstliche Anwendungen relevanten Waldstrukturparametern. Die im F³-Projekt durchgeführten Arbeiten knüpfen dabei an Erfahrungen der Oberflächenvergleiche¹² und die Erkenntnisse aus der Arbeit mit luftbildbasierten DOM für die automatische Extraktion von Bestandesparametern und Strukturelementen an^{13,14,15,16}. Dabei liegt der Fokus des Projekts auf der Optimierung bestehender Ansätze, deren Umsetzung in großflächigen Anwendungen und der Entwicklung entsprechender automatisierter Arbeitsabläufe.

Ergänzend zu den Luftbilddaten der regelmäßigen Befliegungen der Landesvermessungsinstitutionen stehen multispektrale Daten der Sentinel-2-Satelliten des Copernicus-Programms der Europäischen Weltraumagentur (ESA) zur Verfügung. Die Zwei-Satelliten-Konstellation liefert mit Sentinel-2A (Start 2015) und Sentinel-2B (Start 2017) im 5-Tage-Zyklus Daten der Erdoberfläche in 13 spektralen Bändern. Dazu gehören Bänder im sichtbaren Wellenlängenbereich, Bänder im Bereich des nahen und kurzwelligen Infrarots, sowie dem für Vegetation aussagekräftigen Red-Edge-Bereich. Multispektrale Informationen können auch aus Luftbilddaten (Orthophotos) extrahiert werden. Jedoch sind diese üblicherweise auf lediglich vier Bänder der Bereiche Rot, Grün, Blau und nahes Infrarot begrenzt. Zwischen einzelnen Befliegungsblöcken können aufgrund unterschiedlicher Sonnenstände große Beleuchtungsunterschiede auftreten. Hinzu kommt, dass sich durch die vergleichsweise lange Zeitspanne bei einer Befliegung eines größeren Gebietes der Sonnenstand mitunter stark ändert und infolgedessen große Beleuchtungsunterschiede zwischen den Luftbildern eines Befliegungsblocks auftreten. Dem F³-Projekt vorangegangene Tests haben ergeben, dass der Ausgleich dieser Beleuchtungsunterschiede äußerst arbeitsintensiv und zeitaufwändig ist. Fernerkundungssatelliten, wie die Sentinel-2-Satelliten, überfliegen hingegen sehr große Gebiete innerhalb von Sekunden, sodass Bilder ohne Beleuchtungsunterschiede durch Änderungen des Sonnenstands aufgezeichnet werden. Die Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie zur Differenzierung von Baumarten, finanziert durch das Umweltbundesamt (UBA), unterstreichen das immense Potential von Sentinel-2-Satellitendaten zur Unterscheidung von Baumarten. Die Notwendigkeit der Verwendung hochgenauer Referenzdaten in ausreichender Zahl und der Integration weiterer Zusatzinformationen für eine zuverlässige Baumartendifferenzierung wird betont¹⁷. Auch Fassnacht

¹² Adler, P., Naake, T., Peters, S., Ginzler, C., Bauerhansl, C., Stepper, C., 2014. Reliability of forest canopy height extraction from digital aerial images. ForestSAT conference, 4-7. November 2014, Riva del Garda.

¹³ Ullah, S., Adler, P., Dees, M., Koch, B., 2015. Evaluating the potential of stereo aerial photographs for canopy height model generation. Forstliche Forschungsberichte München, 214 (2015), S. 83-90.

¹⁴ Zielewska-Büttner, K., Adler, P., Ehmann, M., Braunisch, V., 2016. Automated Detection of Forest Gaps in Spruce Dominated Stands Using Canopy Height Models Derived from Stereo Aerial Imagery. Remote Sensing, 2016, 8, 175.

¹⁵ Kirchhoefer, M., Schumacher, J., Adler, P., 2019. Potential of remote sensing-based forest attribute models for harmonising large-scale forest inventories on regional level: a case study in Southwest Germany. Annals of Forest Science, 76 (33).

¹⁶ Schumacher, J., Rattay, M., Kirchhöfer, M., Adler, P., Kändler, G., 2019. Combination of Multi-Temporal Sentinel 2 Images and Aerial Image Based Canopy Height Models for Timber Volume Modelling. Forests, 10 (746). Online: <<https://www.mdpi.com/1999-4907/10/9/746/pdf>> [letzter Zugriff 17.02.2020].

¹⁷ Zeug, G., Immitzer, M., 2019: Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Satellitenfernerkundungsdaten (Copernicus) für Zwecke der Ableitung ökologischer Belastungsgrenzen und der Verifizierung von Indikatoren der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Abschlussbericht, Dessau-Roßlau, 101 Seiten. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-27_texte_16-2019_copernicus.pdf> [letzter Zugriff 22.10.2020].

et al. (2016)¹⁸ heben die Vorteile von Satellitenbilddaten, dabei auch explizit Sentinel-2-Daten, für die Baumartendifferenzierung auf überregionaler Ebene hervor.

3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Bei den Tagungen der Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (AFL) sowie der Arbeitsgruppe Forstliche Fernerkundung der Länder (AFFEL) wurde regelmäßig über den Projektfortschritt berichtet. Die Rückmeldungen der anderen Teilnehmenden wurden genutzt, um die Verfahren des Projekts besonders hinsichtlich einer deutschlandweiten Anwendung zu verbessern. Ziel der AFFEL ist die Entwicklung fernerkundungsbasierter Verfahren und deren Integration in forstbetriebliche Entscheidungs- und Planungsprozesse. Deshalb wurde die regelmäßige Unterrichtung der AFFEL-Mitglieder als eine wesentliche Basis für den Übertrag der Projektergebnisse auf andere Bundesländer angesehen.

¹⁸ Fassnacht et al., 2016: Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 186, pp. 64-87.

II. Ergebnisse

1 Erzielte Ergebnisse

Die im F³-Projekt erzielten Ergebnisse bestehen aus drei integralen Komponenten:

1. Entwicklung und technische Umsetzung von automatisierten Verfahren zur flächendeckenden und standardisierten Ableitung forstlicher Strukturparameter aus Fernerkundungsdaten.
2. Umfangreiche Dokumentation der entwickelten Verfahren sowie die vollumfängliche und uneingeschränkte Veröffentlichung der Verfahren in Form von Software-Skripten und der zugehörigen Dokumentation über eigene Projekt-Webseiten auf der Online-Plattform www.waldwissen.net.
3. Konzept zur öffentlichen Bereitstellung flächendeckend generierter forstlicher Strukturdaten unter Berücksichtigung der Rechtslage bzgl. Datenschutz, INSPIRE-Richtlinie und Umweltinformationsverpflichtungen.

Nachfolgend werden die entwickelten Verfahren zusammenfassend beschrieben und der Inhalt des Datenveröffentlichungskonzepts dargestellt. Eine detaillierte Dokumentation der Verfahren ist beigefügt (Anhänge 3 – 7) bzw. steht auf www.waldwissen.net zum Download bereit¹⁹. Aufgrund der an den genannten Stellen verfügbaren umfassenden Dokumentation werden in den folgenden Abschnitten die entwickelten Verfahren beschrieben ohne auf technische Details (z. B. einzelne Softwareparameter) einzugehen.

1.1 Arbeitsbereich 1: Projekt- und Datenmanagement

Im Arbeitsbereich „Projekt- und Datenmanagement“ wurden die wesentlichen Grundlagen für die Arbeiten im Projekt geschaffen. Dazu gehörten, neben der Projektplanung und der Koordination des kontinuierlichen Austauschs zwischen den beteiligten Institutionen (Abschnitt 1.1.1), die Auswahl der Projektgebiete (Abschnitt 1.1.2), die Beschaffung der Daten (Abschnitt 1.1.3) sowie die Auswahl und Definition der abzuleitenden forstlichen Strukturparameter (Abschnitt 1.3). Des Weiteren gehörte zu diesem Arbeitsbereich die Analyse, Zusammenstellung und Aufbereitung der technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen der Datenbereitstellung (Abschnitt 1.1.4).

1.1.1 Projektmanagement und Projektkommunikation

Zu Beginn des Projektes und für jedes Arbeitspaket wurde zwischen den Partnerinstitutionen eine gemeinsam Arbeits- und Ablaufplanung abgestimmt. Vierteljährliche Projekttreffen, welche zunächst abwechselnd in Göttingen und Freiburg und ab Frühjahr 2020 dann virtuell stattfanden, wurden zur intensiven Abstimmung, Diskussion und weiteren Planung genutzt. Die laufende Projektkommunikation wurde durch wöchentlichen telefonischen Austausch als jour-fixe unterstützt.

1.1.2 Projektgebiete

Um bei der Entwicklung der Methoden und Verfahren eine möglichst große Diversität bezüglich Waldtypen, Baumarten und standörtlichen Verhältnissen abzudecken, wurden sechs Projektgebiete mit unterschiedlichen standörtlichen Eigenschaften und Baumartenzusammensetzungen ausgewählt: drei in Baden-Württemberg und drei in Niedersachsen. Die drei baden-württembergischen Projektgebiete verteilen sich auf den Südschwarzwald und die südliche Oberrheinebene, die Schwäbische Alb sowie das Südwestdeutsche Alpenvorland (Abbildung 2). Die

¹⁹ https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

drei niedersächsischen Projektgebiete liegen in den Regionen Heide, Solling und Harz (Abbildung 3). Die Projektgebiete umfassen eine Waldfläche von insgesamt 3.446 km². Für die Projektgebiete wurden flächendeckend Oberflächenmodelle, forstliche Strukturparameter sowie Holzvorrat und oberirdische Biomasse nach den im Projekt entwickelten Verfahren berechnet. Diese werden als Beispieldaten entsprechend dem ebenfalls im Projekt entwickelten Konzept zur Datenbereitstellung veröffentlicht werden (siehe Abschnitt 1.1.4 und Anhang 6).

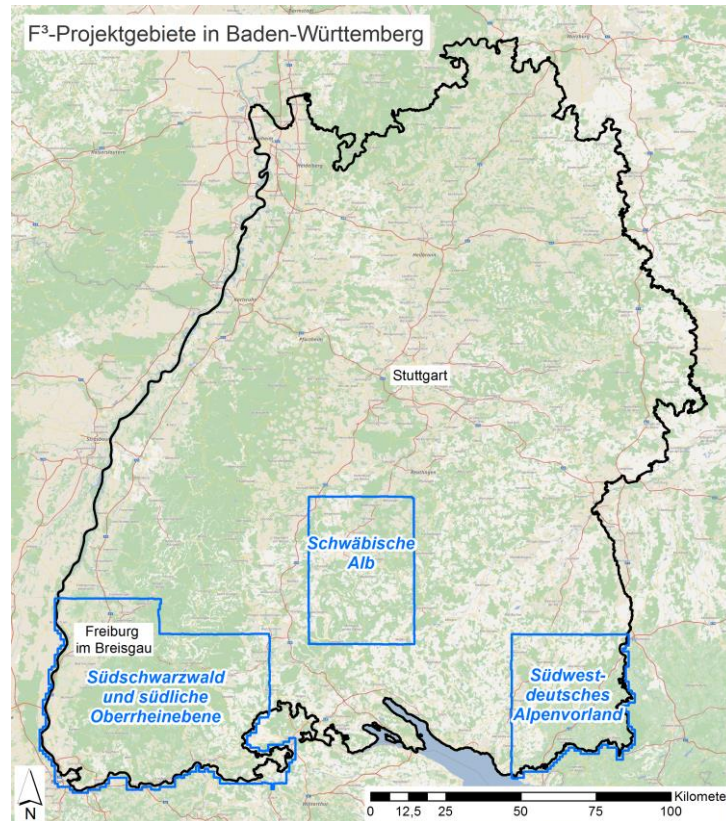


Abbildung 2: Lage der Projektgebiete in Baden-Württemberg (Hintergrundkarte: OpenStreetMap).

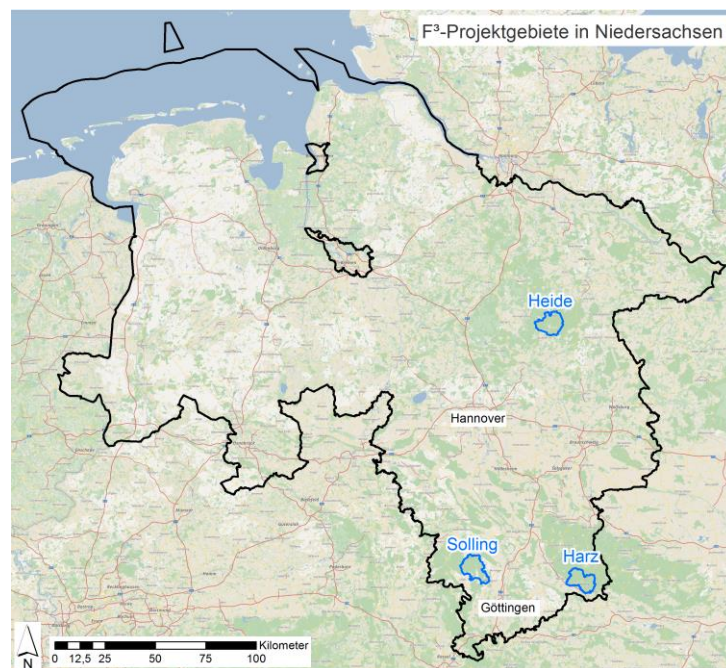


Abbildung 3: Lage der Projektgebiete in Niedersachsen (Hintergrundkarte: OpenStreetMap).

1.1.3 Datenbeschaffung und Datenmanagement

Daten

Datengrundlage für die Verfahrensentwicklung und die Berechnung forstlicher Strukturparameter bildeten Stereo-Luftbilder der regelmäßigen Befliegungen der Landesvermessungsinstitutionen Niedersachsens (Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen, LGLN) und Baden-Württembergs (Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung, LGL-BW). Die Daten wurden von den Landesvermessungsinstitutionen kostenfrei für die Zwecke des Projekts zur Verfügung gestellt. Die Luftbilddaten haben eine nominelle Bodenauflösung von 20 cm und umfassen die vier Spektralkanäle R, G, B und NIR. Die für die baden-württembergischen Projektgebiete genutzten Luftbilddaten wurden in den Jahren 2012 und 2013 mit einer Überlappung von 60% (entlang der Flugstreifen) bzw. 30% (zwischen den Flugstreifen) aufgenommen. Die Luftbilddaten der niedersächsischen Projektgebiete wurden mit einer Überlappung von 80% (entlang der Flugstreifen) bzw. 30% (zwischen den Flugstreifen) im Jahre 2016 aufgenommen. Zusätzlich zu den Luftbilddaten stellten das LGLN bzw. das LGL-BW digitale Geländemodelle mit 1 m horizontaler Auflösung (DGM1) bereit.

Weitere Datensätze, die für die Verfahrensentwicklung genutzt wurden, waren Sentinel-2-Satellitendaten, forstliche Daten der dritten Bundeswaldinventur (BWI 3)²⁰, der Betriebsinventuren der Niedersächsischen Landesforsten (NLF) sowie der Anstalt öffentlichen Rechts Forst Baden-Württemberg (ForstBW) und Bestandesinformationen der Forsteinrichtung der NLF und ForstBW. Außerdem wurden Klimadaten (langjähriger mittlerer Niederschlag und langjährige mittlere Temperatur) in 1 km-Bodenauflösung des Deutschen Wetterdienstes (DWD)²¹ sowie Bodendaten zu Bodendichte („bulk density“), potentieller Kationenaustauschkapazität („cation exchange capacity“), Skelettgehalt („coarse fragments“) und Stickstoff („nitrogen“) in 250 m Bodenauflösung des International Soil Reference and Information Centre (ISRIC)²² verwendet.

Die Qualität der abgeleiteten Strukturdaten ist stark von der Qualität der Eingangsdaten abhängig. So führen ungünstige Bildgeometrie sowie unzureichende Radiometrie bei optischen Daten (Luftbilder, Satellitenbilddaten) oder Ungenauigkeiten der Co-Registrierung zwischen verschiedenen Eingangsdatensätzen dazu, dass die daraus abgeleiteten Daten nicht fehlerfrei sind. Um die Genauigkeit der abgeleiteten sowie modellierten forstlichen Strukturparameter zu quantifizieren, wurden umfangreiche Validierungsstudien durchgeführt. Hierfür wurden für das Projektgebiet im „Solling“ in Niedersachsen hochgenaue Airborne Laser Scanning (ALS) Punktwolken, die drei Monate vor den entsprechenden Luftbildern aufgenommen worden waren, durch das LGLN bereitgestellt. Die Genauigkeit der ALS-Punktwolke liegt in der Höhe bei 15 cm und in der Lage bei 30 cm. Die nominelle Auflösung beträgt 40 cm, bzw. 5 Punkte/m². Die Rohdaten wurden bereits durch das LGLN klassifiziert und um Ausreißer bereinigt. Des Weiteren standen aus anderen Projekten der FVA manuell in Stereo-Luftbildern erfasste Referenzdaten zur Verfügung. Diese umfassen zum einen stereoskopische Baumhöhenmessungen auf zwei Flächen im Nordschwarzwald bzw. dessen Vorbergzone (*Abbildung 4*). Die Fläche „Rastatt“ liegt im Landkreis Rastatt. Hier waren insgesamt 840 Höhen gemessen worden, davon 157 auf Baumspitzen. Die restlichen 683 Messpunkte waren auf den Baumkronen gemessen worden. Auf der Fläche „Pforzheim“, im Landkreis Pforzheim, waren an 212 Baumspitzen die Höhen gemessen worden.

²⁰ Dritte Bundeswaldinventur 2012: <https://www.bundeswaldinventur.de/dritte-bundeswaldinventur-2012/> [letzter Zugriff 04.11.2020].

²¹ Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes: <https://cdc.dwd.de/portal/> [letzter Zugriff 04.11.2020].

²² Bodendaten des International Soil Reference and Information Centre: <https://soilgrids.org/> [letzter Zugriff 04.11.2020].

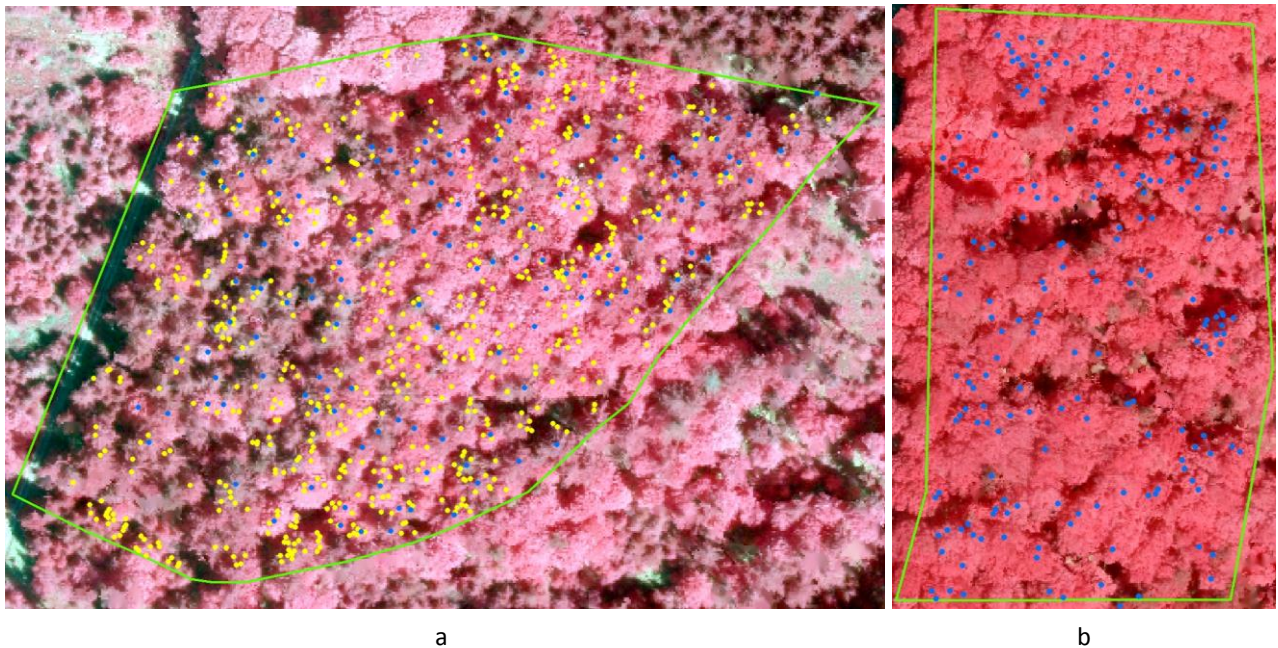


Abbildung 4: Gemessene Höhen in den Validierungsgebieten Rastatt (a) und Pforzheim (b) mit CIR-Orthophoto im Hintergrund. Blaue Punkte = auf Baumspitzen gemessene Höhen; gelbe Punkte = auf Baumkronen gemessene Höhen.

Des Weiteren stand aus der an der FVA durchgeführten Untersuchung von Zielewska-Büttner et al. (2016)²³ eine auf Stereo-Interpretation basierte Kartierung von Stichprobenflächen in offene und geschlossene Bestände sowie in Bestandeslücken im Nordschwarzwald zur Verfügung. Das Validierungsgebiet „Schönmünz“ (Gemeinde Baiersbronn) umfasst eine Fläche von 1.023 ha. Referenzkartierungen der Klassen geschlossener und offener Bestand lagen für 80 per stratifizierter Zufallsauswahl ausgewählte Stichprobenflächen (Radius = 25 m) vor (Abbildung 5). Außerdem standen 120 zufällig ausgewählte Stichprobenflächen (Radius = 25 m) zur Validierung der Erfassung von Bestandeslücken zur Verfügung (Abbildung 5). Innerhalb dieser Stichprobenflächen wurden Lücken mit einer Mindestgröße von 10 m² stereoskopisch erfasst und kartiert. Um auch die Abwesenheit von Lücken validieren zu können, wurden innerhalb der Validierungsplots zufällig verteilte Kreise mit einer Fläche von 95 m² ausgewiesen („nicht-Lücken Kreise“). Diese Fläche entspricht der mittleren Größe der stereoskopisch erfassten Lücken. Die Anzahl der Kreise entspricht der Anzahl der stereoskopisch erfassten Lücken (Abbildung 6).

²³ Zielewska-Büttner, K., Adler, P., Ehmann, M., Braunisch, V., 2016. Automated Detection of Forest Gaps in Spruce Dominated Stands Using Canopy Height Models Derived from Stereo Aerial Imagery. Remote Sensing, 2016, 8, 175.

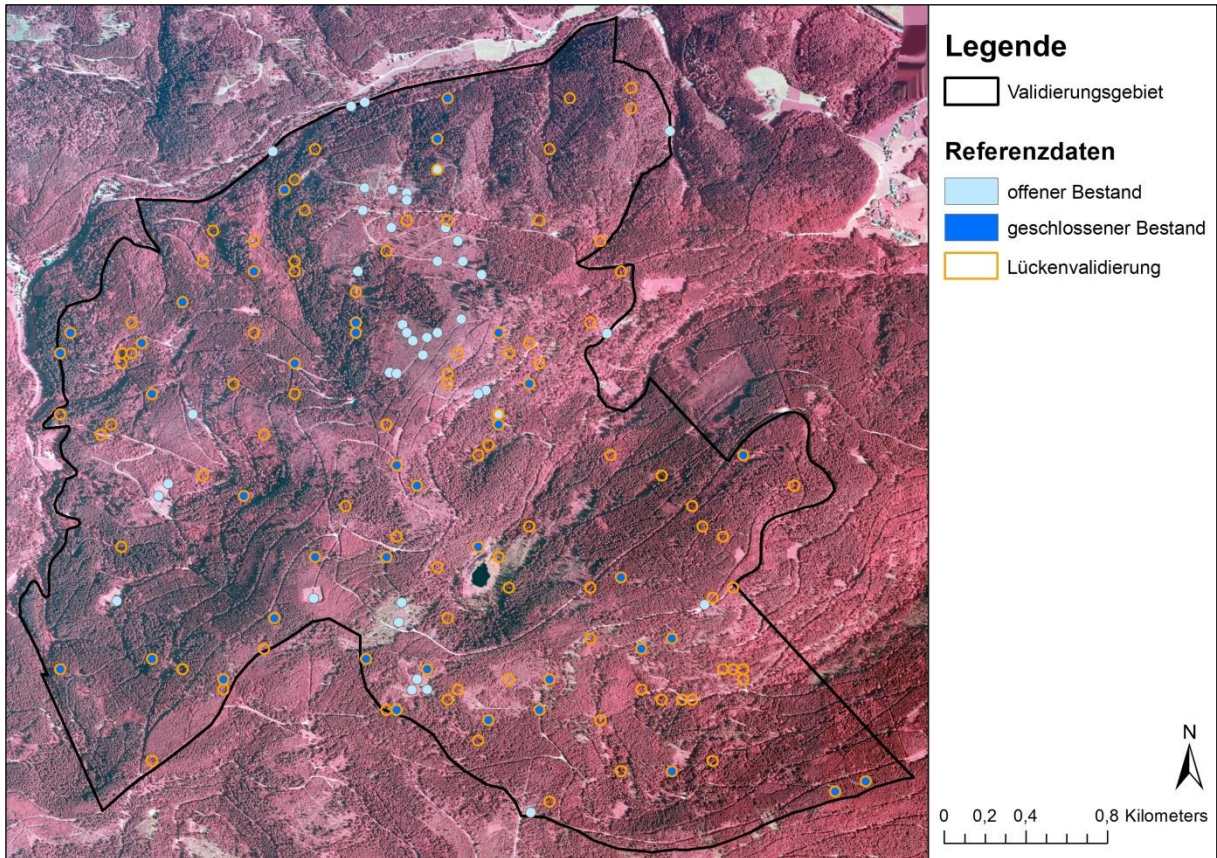


Abbildung 5: Verteilung der Referenzdaten für die Klassifizierung in offene und geschlossene Bestände sowie Lücken im Gebiet „Schönmünz“ (Gemeinde Baiersbronn). Hintergrundbild: CIR-Orthophoto.

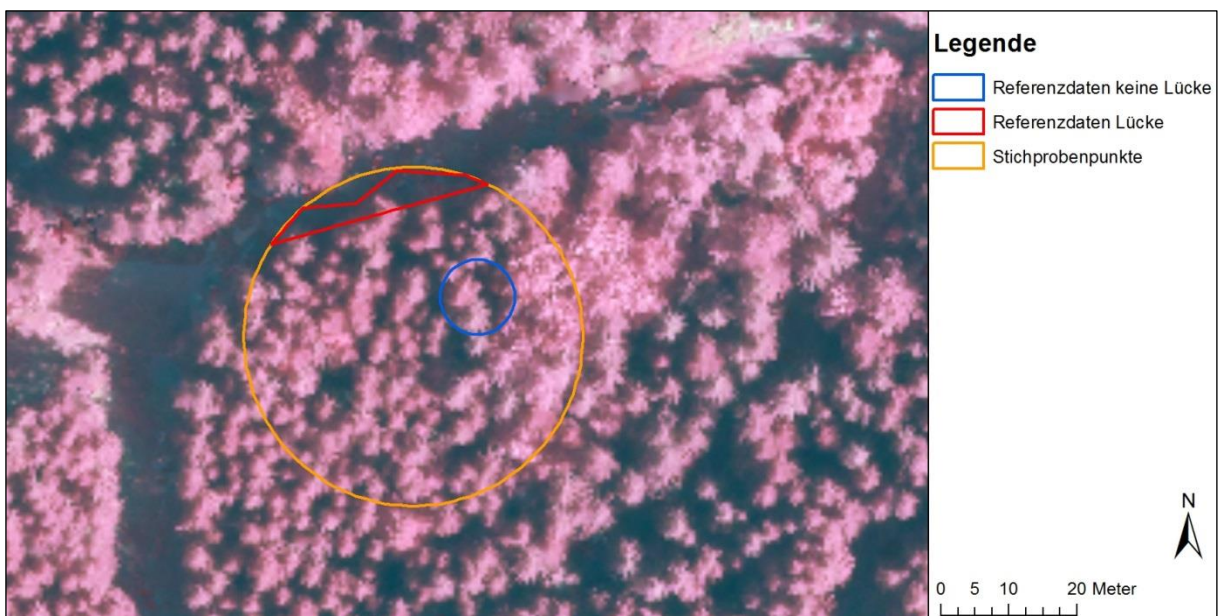


Abbildung 6: Beispiel Referenzdaten für die Lückenvalidierung: Stichprobenplots mit stereoskopisch erfassten Lücken (rot) und nicht-Lücken Kreisen (blau). Hintergrundbild: CIR-Orthophoto.

Datenmanagement

Die große Menge und hohe Diversität der Eingangsdaten und der generierten Daten erfordert eine Datenstruktur, die die Zuordenbarkeit der Datensätze zueinander als auch die effiziente Verarbeitung der Daten gewährleistet. Diese Datenstruktur soll dabei nicht nur das projektinterne Datenmanagement unterstützen, sondern auch bei einer Implementierung in der Praxis umsetzbar sein.

Die im F³-Projekt erstellten forstlichen Strukturdaten basieren hauptsächlich auf Luftbilddaten der regelmäßigen Befliegungen der Landesvermessungsinstitutionen. Die Datenhaltung lehnt sich deshalb an die Befliegungsplanung an. D. h. die abgeleiteten Datenkacheln werden zuerst nach Befliegungsjahr, dann nach Gebiet (Befliegungslos) und abschließend nach „Thema“ (forstlicher Strukturparameter, z. B. Überschirmung) abgelegt.

Um eine flächendeckende Anwendbarkeit der Methodik auf große Gebiete gewährleisten zu können, ist es wichtig die Dateigröße der einzelnen Datensätze und der Zwischenprodukte der Verarbeitung für ein gängiges Computersystem (z. B. 8 GB RAM Prozessor 3,3 GHz) handhabbar zu halten. Deshalb erfolgt die Datenhaltung in Datenkacheln mit einheitlicher Ausdehnung von 1000 x 1000 m. Die Lage der Kacheln orientiert sich dabei am jeweils verwendeten Koordinatensystem, so dass die Kanten der Kacheln mit den vollen Kilometerwerten des Systems übereinstimmen. Bei der Verfahrensentwicklung wurde darauf geachtet, dass Daten prozessiert werden können, die in einem der beiden in Deutschland vorrangig verwendeten Koordinatensysteme (Gauß-Krüger, EPSG-Codes 31466, 31467 und 31468, sowie UTM, EPSG Codes 25832 und 25833) vorliegen. Der Dateiname jeder Kachel gibt an, an welcher Koordinate die Kachel in das Koordinatensystem eingehängt ist (Süd-West-Ecke). Durch ein entsprechendes Präfix wird im Dateinamen ebenfalls angegeben, um welchen forstlichen Strukturparameter es sich handelt (z. B. „ueberschirmung_“). Abweichend werden die im Projekt erzeugten Baumarten-, Holzvorrats- und Biomassekarten (siehe Abschnitt 1.4) nicht in Kacheln sondern als vollständige Mosaik des jeweiligen Gebiets gespeichert. Dies ist bedingt durch die Nutzung von Sentinel-2-Satellitendaten, welche in 100 x 100 km-Bildkacheln bereitgestellt werden, die sich nicht mit dem F³-Kachelsystem decken. Durch die gröbere Auflösung dieser Daten (10 m bzw. 20 m) und die daraus resultierende kleinere Dateigröße ist hier, anders als bei hochaufgelösten Daten, eine Verarbeitung über größere Gebiete mit gängigen Computersystemen problemlos möglich. Detaillierte Angaben zur Datenstruktur und der Namensgebung der Kacheln befinden sich in der Dokumentation zu Meilenstein M7 „Konzept zur datenschutzkonformen Umsetzung der länderübergreifenden und bundesweiten Bereitstellung der Waldstrukturparameter“ (Anhang 6 oder Download²⁴).

1.1.4 Datenschutz und Zugriffsrechte bei der Datenbereitstellung

Einleitung

Ziel des F³-Projekts ist die Aufbereitung und Bereitstellung großräumiger, flächendeckender und regelmäßig aktualisierbarer Waldstrukturdaten für Akteurinnen und Akteure des Forstsektors, des Naturschutzes und der forstlichen Forschung. Die Datenbereitstellung muss dabei so gestaltet sein, dass eine umfassende und effektive Nutzung der Daten möglich ist.

Für Behörden gelten Datenbereitstellungspflichten nach der Umweltinformationsgesetzgebung des Bundes beziehungsweise der Länder. Zugleich müssen Aspekte des Datenschutzes beachtet werden. Aufgrund der komplexen Gemengelage hat sich das F³-Projekt mit den rechtlichen Rahmenbedingungen sowie den technischen Möglichkeiten zur Datenbereitstellung flächendeckender Waldstrukturdaten auseinandergesetzt. Die Bereitstellung entsprechender Metadaten wurde hierbei ebenfalls beleuchtet.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Beurteilung der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Datenbereitstellung basiert vornehmlich auf juristischen Beratungen, die über die Justizariate der für Forstwirtschaft zuständigen Ministerien der Bundesländer Baden-Württemberg (Ministerium für Ländlichen Raum

²⁴ M7 – „Konzept zur datenschutzkonformen Umsetzung der länderübergreifenden und bundesweiten Bereitstellung der Waldstrukturparameter“https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

und Verbraucherschutz (MLR)) und Niedersachsen (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML)) eingeholt wurden. Zusätzlich wurden eigene Recherchen angestellt. Nachfolgend sind die Ergebnisse hieraus kurz dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in der Dokumentation zu Meilenstein M7 (Anhang 6 oder als Download²⁴). Die Ergebnisse bieten einen Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen der Bereitstellung flächendeckender Waldstrukturdaten. Sie sind jedoch keinesfalls als juristische Beratung zu sehen noch erheben sie Anspruch auf Vollständigkeit, Richtigkeit und Aktualität. Sie können eine eigene, fundierte Überprüfung der Rechtslage nicht ersetzen. Hierauf wird auch in allen Veröffentlichungen aus dem F³-Projekt, die dieses Thema tangieren, hingewiesen.

Bei der Bereitstellung flächendeckender Waldstrukturdaten müssen verschiedene rechtliche Aspekte berücksichtigt werden. Diese lassen sich grob in drei Bereiche einteilen:

1. die Bereitstellungspflicht von Umweltinformationen im Falle behördlicher Daten,
2. den Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen, der der Datenbereitstellung entgegenstehen könnte und
3. die EU-Richtlinie INSPIRE.

Geregelt werden diese Aspekte in den entsprechenden Gesetzen zur Bereitstellung von Umweltinformationen. Für diese gibt auf internationaler Ebene die „EU-Richtlinie über den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen“²⁵ den Rahmen vor. Die Umsetzung dieser Richtlinie in nationales Recht geschieht in Deutschland über das Umweltinformationsgesetz (UIG)²⁶ für informationspflichtige Stellen des Bundes sowie die entsprechenden Landesgesetzgebungen für die informationspflichtigen Stellen der Länder.

Im Rahmen der juristischen Beratung²⁷ konnten folgende Informationen für das F³-Projekt gewonnen werden:

- Bezüglich der Datenbereitstellungspflicht wurde festgestellt, dass alle nach F³-Verfahren erstellten Strukturdaten als Umweltinformationen betrachtet werden können und daher auch bereitgestellt werden müssen. Dies gilt allerdings nur für behördliche Daten und auch nur, wenn diese bereits erstellt sind. Ein Recht auf Erstellung dieser Daten besteht nicht.
- Wenn die Bereitstellung von Umweltinformationen Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse verletzen würde, könnte die Herausgabe der Daten abgelehnt werden. Laut juristischer Einschätzung sind Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse „Tatsachen, Umstände und Vorgänge mit Bezug auf ein bestimmtes Unternehmen, die nicht offenkundig sind“ und an deren Nichtverbreitung ein berechtigtes Interesse besteht. Die Einschätzung der Justiziarate hierzu ist, dass im Fall der Waldstrukturdaten Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse nicht verletzt werden. Auch dann nicht, wenn es sich bei den Daten um Holzvorratskarten handelt, die Privatwaldflächen einschließen. Begründet wird dies damit, dass die Daten keinen direkten Bezug zu Flurstücken oder Waldbesitzenden besitzen und dass dieser auch nicht ohne weiteres herzustellen sei. Des Weiteren ermöglicht das freie Waldbetretungsrecht jeder Person, sich selbst vor Ort über die Struktur eines Waldes zu informieren.
- Bezüglich der Anwendung der INSPIRE-Richtlinie wurde festgestellt, dass behördliche Geodaten INSPIRE-konform bereitgestellt werden müssen, wenn sie einer der 34 INSPIRE-

²⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32003L0004> [letzter Zugriff 15.10.2020]

²⁶ http://www.gesetze-im-internet.de/uig_2005/index.html [letzter Zugriff 08.07.2020]

²⁷ von Bülow, W.-D. und Krüger, B.: Juristische Beratung zur Datenbereitstellung von Fernerkundungsbasierten forstlichen Strukturdaten – Ihre Anfrage vom 25.02.2019 mit Auftragsbeschreibung rechtliche Beratung. Internes Dokument. Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, Stuttgart, 2020.

Geodaten Themen²⁸ zuordenbar sind²⁹. Die nach den F³-Verfahren abgeleiteten Strukturparameter fallen unter die Geodaten Themen „Höhe“ bzw. „Bodenbedeckung“. Das heißt, dass spezifische Vorgaben bei der Datenbereitstellung und Metadatenhaltung eingehalten werden müssen. Die Umsetzung dieser Vorgaben ist über Geodaten-Infrastrukturen geregelt, die auf Bundes- und Länderebene bestehen.

Obwohl die Bundesländer und der Bund eine eigene Gesetzgebung bezüglich der Bereitstellung von Umweltinformationen haben, ist durch die übergeordnete „EU-Richtlinie über den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen“ die rechtliche Situation bundesweit weitgehend vergleichbar.

Weitere Recherchen und Gespräche mit Personen aus der forstlichen Praxis ergaben, dass die Umsetzbarkeit einer weitreichenden Datenbereitstellung nicht nur von den rechtlichen Rahmenbedingungen abhängig ist. Politische Bedenken, z. B. aufgrund abweichender Einschätzung bezüglich des Schutzes von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen, können zu Problemen bei der Datenbereitstellung führen. Deshalb wird empfohlen, die Datenbereitstellung einzelfallweise zu prüfen und grundsätzlich in Abstimmung mit der der eigenen Behörde übergeordneten Stelle durchzuführen. Ziel sollte es sein, Risiken rechtzeitig zu erkennen und Konflikte zu vermeiden, z. B. aufgrund abweichender Einschätzung bezüglich des Schutzes von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

Technische Umsetzung der Datenbereitstellung

Die Art der Bereitstellung forstlicher Strukturdaten hat einen großen Einfluss auf die Nutzbarkeit dieser Daten durch verschiedene Nutzendengruppen. Internetbasierte Dienste erlauben einen ortsungebundenen und zentralisierten Zugriff und unterstützen dadurch die effektive und umfassende Datennutzung. Für die internetbasierte Bereitstellung von Geodaten gibt es verschiedene technische Möglichkeiten. Bekannt sind vor allem Dienste, die es erlauben die bereitgestellten Daten direkt in ein eigenes Geografisches Informationssystem (GIS) einzubinden. Die Dienste unterscheiden sich in der Art der Daten, die übertragen werden.

- „Web Map Service“ (WMS): Beim WMS wird ein Kartenbild üblicherweise als einfaches Raster-Grafikformat übertragen, nicht jedoch die Daten selbst. Dieser (Karten-)Dienst eignet sich zur Darstellung der Daten und zur visuellen Interpretation.
- „Web Coverage Service“ (WCS): Ein WCS ist ein Datendienst, der die verfügbaren Daten zusammen mit ihren Metadaten zur Visualisierung und zum Download bereitstellt. Daten (z. B. Raster), die über einen WCS geliefert werden, können von Nutzenden heruntergeladen und maschinell weiterverarbeitet werden.
- „Web Feature Service“ (WFS): Wie der WCS bietet auch der WFS direkten Zugriff auf die Geodaten. Der WFS ist jedoch auf Vektordaten beschränkt und eignet sich daher nicht für die Bereitstellung der forstlichen Strukturdaten des F³-Projekts, die als Rasterdatensätze vorliegen.

WMS, WCS und WFS sind etablierte Methoden der Datenbereitstellung, und es existieren entsprechende Standards des „Open Geospatial Consortiums“ (OGC)³⁰. WMS sind weit verbreitet

²⁸ <https://inspire.ec.europa.eu/Themes/Data-Specifications/2892> [letzter Zugriff 14.07.2020]

²⁹ M. Streng, Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, persönliche Kommunikation, 24. Februar 2020

³⁰ <https://www.ogc.org/> [letzter Zugriff 06.07.2020]. Basierend auf diesen etablierten Standards, werden zurzeit neue Standards—„OCG API“ (API = Application Programming Interface) Standards—entwickelt, die die Vorteile moderner

und werden genutzt, um öffentliche Geodaten bereitzustellen, häufig in Kombination mit einem online „Geodaten-Viewer“. Dieser erlaubt es die Daten in einem Internet-Browser ohne zusätzliche Software zu betrachten. Zudem können auf diese Weise der WMS-Link sowie die Metadaten nutzendenfreundlich bereitgestellt werden. Beispiele für Geodaten-Viewer einzelner Bundesländer sind das Geoportal Baden-Württemberg³¹ und der Bayern Atlas³².

Neben der Einrichtung von Internet-Diensten, wie WMS und WCS, besteht auch die Möglichkeit, Geodaten über cloudbasierte Online-Plattformen bereitzustellen. Neben den Daten können dort auch Werkzeuge bereitgestellt werden, die es den Nutzenden ermöglichen, weitergehende Auswertungen in der Cloud durchzuführen. Beispiele hierfür sind die „Copernicus Data and Information Access Services“ (DIAS) Plattformen CODE-DE³³ und Mundi Web Services³⁴.

Trotz der großen Auswahl an Möglichkeiten zur technischen Umsetzung der Datenbereitstellung ist es empfehlenswert, bereits bestehende Infrastrukturen, wie z. B. Geoportale der Bundesländer, zu nutzen. Dies reduziert nicht nur den Arbeitsaufwand für die Datenbereitstellung, sondern bietet auch eine große Nutzendenfreundlichkeit, da sie einen zentralen Zugang zu verschiedenen Geodaten bieten.

Die während der Projektlaufzeit im Zuge der Methodenentwicklung mit den F³-Verfahren erzeugten flächendeckenden Waldstrukturdaten wurden als Kartendienst (WMS) bereitgestellt. Ziel der Datenbereitstellung ist, beispielhaft darzustellen, wie die Bereitstellung von Waldstrukturdaten inklusive der INSPIRE-konformen Metadaten umgesetzt werden kann. Zusätzlich kann der Kartendienst als Vorschau auf die mit den F³-Verfahren generierten Waldstrukturdaten dienen, über den sich Datennutzende bezüglich der Dateneigenschaften informieren können. Für die Generierung der WMS wurden die Funktionalitäten der Software ArcGIS genutzt. Die detaillierte Vorgehensweise ist in Anhang 6 beschrieben. Die Links für den Zugriff auf die WMS werden über die F³-Projektseiten (<https://www.waldwissen.net/de/technik-und-planung/waldinventur/f3-fernerkundungsbasierte-walddaten> [letzter Zugriff 23.02.2021]) zur Verfügung gestellt.

1.2 Arbeitsbereich 2: Großflächige normalisierte Oberflächenmodelle von Waldgebieten

1.2.1 Verfahrensbeschreibung zur Ableitung von Oberflächenmodellen

Akkurate digitale Oberflächenmodelle (DOM) und normalisierte digitale Oberflächenmodelle (nDOM = DOM - DGM) sind das Fundament der im F³-Projekt entwickelten Verfahren zur flächendeckenden Ableitung forstlicher Strukturparameter. DOM und nDOM werden aus Punktwolken generiert, die mittels Image Matching-Techniken aus Stereo-Luftbildaufnahmen der regelmäßigen Befliegungen der Landesvermessungsinstitutionen abgeleitet werden (Abschnitt 1.1.3).

Das im Folgenden beschriebene Verfahren zur Ableitung von DOM und nDOM aus Luftbildern baut auf ein an der FVA entwickeltes Verfahren³⁵ auf. Dieses wurde für die Verarbeitung von Punktwolken entwickelt, welche mit der Image Matching-Software SURE (nFrames) generiert

Internet-Entwicklungsmethoden im Zugriff auf Geodaten nutzen sollen (<https://ogcapi.ogc.org/> [letzter Zugriff 06.07.2020]).

³¹ <https://www.geoportal-bw.de/> [letzter Zugriff 06.07.2020]

³² <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/> [letzter Zugriff 06.07.2020]

³³ <https://code-de.org/> [letzter Zugriff 06.07.2020]

³⁴ <https://mundiwebservices.com/> [letzter Zugriff 06.07.2020]

³⁵ Schumacher, J., Rattay, M., Kirchhöfer, M., Adler, P., Kändler, G., 2019. Combination of Multi-Temporal Sentinel 2 Images and Aerial Image Based Canopy Height Models for Timber Volume Modelling. *Forests*, 10 (746). Online: <<https://www.mdpi.com/1999-4907/10/9/746/pdf>> [letzter Zugriff 17.02.2020].

wurden. Im Rahmen des F³-Projekts wurde das Verfahren zur Filterung der Punktwolken und Erzeugung von DOM und nDOM grundlegend überarbeitet. Zusätzlich fand eine Erweiterung und Verallgemeinerung statt, wodurch ermöglicht wird, dass auch Punktwolken der Image Matching-Software MATCH-T DSM (Trimble) prozessiert werden können. Das Verfahren ist in der Dokumentation zu Meilenstein M3 „Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern“ (Anhang 3 oder Download³⁶) ausführlich beschrieben, inklusive verwendeter Parametereinstellungen. Die nachfolgende Beschreibung ist eine Kurzfassung dieses Dokuments.

Das F³-Verfahren zur Oberflächenableitung besteht aus drei Hauptarbeitsschritten: (1) Image Matching, (2) Filterung und (3) Rasterung. Eine schematische Darstellung des Verfahrensablaufs ist in Abbildung 7 zu sehen.

(1) Image Matching

Image Matching ermöglicht das Messen von Oberflächenhöhen in digitalen, sich überlappenden Luftbildern. Die verwendeten Luftbilder müssen orientiert sein, das heißt, ihre Position und Lage im Raum müssen bekannt und die aufnehmende Kamera kalibriert sein. Luftbilder aus den regulären Befliegungen der Landesvermessungsinstitutionen erfüllen diese Voraussetzungen. Beim Image Matching werden im Überlappungsbereich der Luftbilder einander entsprechende (homologe) Punkte identifiziert. Basierend auf der scheinbaren Positionsänderung dieser Punkte in den Bildern (Parallaxe) sowie den Orientierungsinformationen der Kamera, kann die Höhe der Punkte berechnet werden. Mit Software, die sogenannte „Dense Image Matching“-Methoden anwendet, kann dieser Prozess automatisch und theoretisch für jedes Pixel eines Bildes durchgeführt werden und so eine dreidimensionale Punktwolke abgeleitet werden.

Zwei der kommerziell verfügbaren und weit verbreiteten Image Matching-Softwareprogramme wurden für die Verfahrensentwicklung im F³-Projekt verwendet: „SURE“ der Firma nFrames und „MATCH-T DSM“ der Firma Trimble. Für beide Programme wurden Einstellparameter festgelegt, die die abgeleiteten Oberflächenmodelle für die nachfolgende Berechnung von forstlichen Strukturparametern optimieren. Die Matching-Methoden anderer Softwareprogramme unterscheiden sich mitunter stark von denen der hier verwendeten Software. Zudem sind die Entwicklungen in diesem Bereich sehr dynamisch. Daher konnten im Rahmen des F³-Projekts nicht alle möglichen Softwareprogramme getestet werden. Grundsätzlich gilt, dass für jede Software eigene, für Waldflächen optimierte Parametereinstellungen gefunden werden müssen.

³⁶ M3 – Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern:
https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

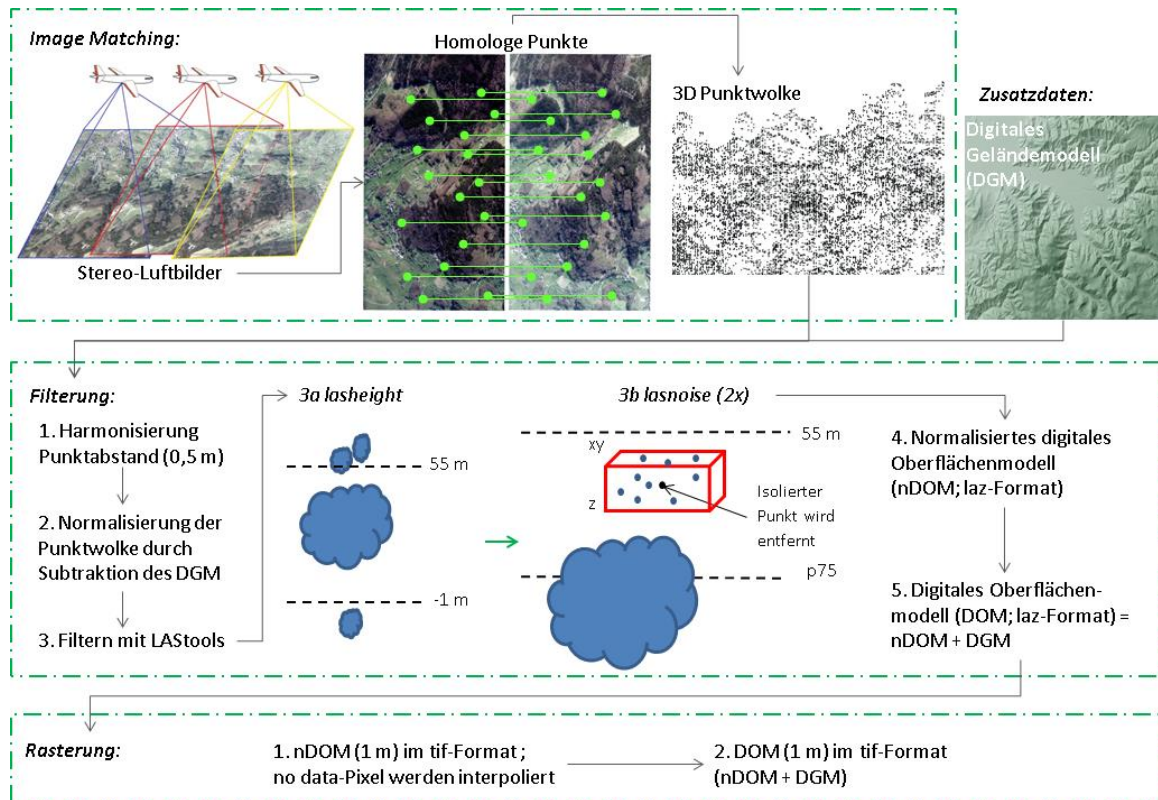


Abbildung 7: Schematischer Ablauf der DOM- und nDOM-Generierung.

Sowohl bei der Nutzung von SURE als auch von MATCH-T DSM hat sich, bei einer 80/30-Überlappung, das Image Matching bis zur obersten Pyramidenstufe (20 cm Pixelgröße) als vorteilhaft erwiesen, auch wenn dies die benötigte Rechenzeit erhöht. Selbst wenn anschließend die geometrische Auflösung wieder herabgesetzt wird, z. B. auf 50 oder 100 cm, werden die Baumhöhen mit dieser Einstellung am besten erfasst. Zur Abbildung von Waldbeständen, deren Kronendach üblicherweise heterogen ist und Lücken enthält, hat es sich bewährt, die Softwareeinstellungen so zu wählen, dass durch Interpolationsverfahren durchgeführte Glättungen der Punktwolke vermieden werden.

Das Ergebnis des Image Matchings sind Punktwolkenkacheln mit einer Ausdehnung von jeweils 1000 x 1000 m. Bevor der nächste Schritt (Filterung) erfolgen kann, muss das Ergebnis des Image Matchings einer (visuellen) Qualitätsprüfung unterzogen werden, bei der vor allem die Vollständigkeit der prozessierten Fläche kontrolliert wird. Dadurch können Fehler aufgrund von Wolken oder unzureichender Bildorientierung erkannt werden. Wie eine Qualitätsprüfung durchgeführt werden kann, variiert von Software zu Software. Je nach bereitgestellten Informationen und Daten können Statistiken einen Hinweis auf die Qualität liefern, sich Messabweichungen graphisch darstellen lassen oder es kann die Vollständigkeit in abgeleiteten Rasterprodukten (z. B. Orthophotos) visuell erkennbar gemacht werden. Sollten Fehler auftauchen, muss versucht werden, diese durch Anpassung der Softwareeinstellungen zu beseitigen. Wenn dies nicht möglich ist, müssen Position und Ausdehnung fehlerhafter Flächen dokumentiert werden, sodass sie bei der Nutzung der abgeleiteten Strukturparameter berücksichtigt werden können.

(2) Filterung

Aus Luftbildaufnahmen erzeugte 3D-Punktwolken sind nicht fehlerfrei. Während des Image Matchings kann es, z. B. in dunklen Bildbereichen, zu falschen Zuordnungen homologer Bildpunkte kommen, woraus fehlerhafte Höheninformationen resultieren. Um fehlerhafte Punkte bzw. Punktgruppen aus der Punktwolke zu entfernen, wurde ein mehrstufiges Filterverfahren implementiert, in dessen Zug Punkte, die aufgrund ihres Höhenabstands zum Gelände oder ihrer isolierten Lage als fehlerhaft eingestuft werden können, aus der Punktwolke gelöscht werden. Ein

hochgenaues, digitales Geländemodell (DGM) mit 1 m Auflösung (DGM1) wird hierzu benötigt. Geeignete Laserscanning basierte DGM-Daten können von den Vermessungsinstitutionen der Bundesländer bezogen werden. Im Rahmen der Filterung wird das DGM ebenfalls dazu verwendet, die 3D-Punktwolke zu normalisieren. Das heißt, die Geländehöhe wird von den Punkthöhen abgezogen und so ein normalisiertes Oberflächenmodell (nDOM) erzeugt.

Das Verfahren zu Punktwolkenfilterung ist in einem Softwareskript (*cloud2ndom.py*³⁷) unter Nutzung der Programmiersprache Python implementiert. Darin werden Funktionalitäten von LAStools³⁸ für die Prozessierung der Punktwolken verwendet. Die Parameter der Filter wurden so gewählt, dass sie ein optimales Ergebnis für Waldflächen in Mitteleuropa liefern. Unter Verwendung des DGM1 wird die Punktwolke normalisiert (LAStools Funktionalität *lasheight*¹). Im gleichen Schritt wird der erste von drei Filtern angewendet. Dabei werden Punkte, die mehr als 1 m unter oder mehr als 55 m über dem DGM1 liegen, als Ausreißer identifiziert und entfernt (Abbildung 7). Es ist zu bedenken, dass Punkte auf Bäumen die größer als 55 m sind, teilweise als Ausreißer behandelt und gelöscht werden. Der obere Schwellwert 55 m wurde als Kompromiss zwischen Entfernung möglichst vieler Ausreißer und vollständiger Erfassung sehr großer Bäume gewählt. Es wird angenommen, dass Bäume die größer 55 m sind, nur sehr selten vorkommen. Der untere Schwellwert -1 m berücksichtigt Ungenauigkeiten in den Höhenwerten sowie einen potentiellen Höhenversatz zwischen DGM1 und der Punktwolke.

Anschließend werden durch die zweimalige Anwendung des LAStools Filters *lasnoise*¹ isolierte Punkte bzw. Punktgruppen entfernt (Abbildung 7). Dabei wird die Filterung auf Punkte beschränkt, die oberhalb des 75. Perzentils in einer 4 x 4 m Umgebung liegen. Dadurch werden nur isolierte Punkte gelöscht, die nach oben aus der Punktwolke ausreißen. Bei der ersten Anwendung von *lasnoise*¹ werden Punkte als Ausreißer definiert, die maximal 40 Nachbarpunkte innerhalb einer Umgebung von 10 x 10 x 4 m haben. Bei der zweiten Anwendung sind Punkte als Ausreißer definiert, die maximal 8 Nachbarpunkte innerhalb einer Umgebung von 3 x 3 x 3 m haben. Die jeweilige Definition wird auf jeden Punkt separat angewandt und alle identifizierten Punkte werden gelöscht.

Das Endprodukt ist das finale nDOM im laz-Format (nDOM-Punktwolke), aus dem das nDOM und das DOM im tif-Format abgeleitet werden (siehe Schritt 3 Rasterung). Um das DOM im laz-Format zu erstellen, wird die nDOM-Punktwolke mit der LAStools Funktionalität *lasduplicate*¹ mit der ungefilterten und nicht normalisierten Punktwolke anhand der x- und y-Koordinaten der Punkte verglichen. Die durch die Normalisierung veränderte z-Koordinate bleibt unbeachtet. Im F³-Verfahren entsprechen die Duplikate den nicht normalisierten Punkten und werden als eigene Punktwolke (DOM im laz-Format) gespeichert. Die DOM- und die nDOM-Punktwolke im laz-Format haben einen Punktabstand von 0,5 m.

(3) Rasterung

Zusätzlich zu DOM und nDOM als Punktwolken im laz-Format werden DOM und nDOM auch in einem Rasterformat (TIFF) mit einer horizontalen Auflösung von 1 m erstellt (Abbildung 8). Hierfür wird zunächst die nDOM-Punktwolke (laz-Format) mit der LAStools Funktionalität *lasgrid*¹ in ein Raster mit 1 x 1 m-Pixel Auflösung konvertiert. Für jedes Pixel des resultierenden Rasters im tif-Format wird jeweils der Höhenwert des höchsten Punktes innerhalb des Pixelbereichs übernommen. Alle Höhenwerte < 0 werden auf 0 gesetzt. Kleine Lücken im Raster (NA-Pixel ohne Datenwert) werden mit Hilfe eines 3 x 3 m Suchfensters aufgefüllt. Datenlücken im Raster, die größer als 3 x 3 m sind, werden mit Hilfe eines flächendeckenden TIN (Triangulated Irregular Network) interpoliert und aufgefüllt. Da die Interpolation großer NA-Flächen zu ungenauen

³⁷ Python-Skript *cloud2ndom.py*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip

³⁸ rapidlasso GmbH: <https://rapidlasso.com/> [letzter Zugriff 23.10.2020]

Ergebnisse führt, werden solche Flächen nicht gefüllt. Die maximale Flächengröße ist durch das zur Erzeugung des TIN-Rasters verwendete LAs2ools Modul ‚las2dem‘ begrenzt, welches keine Dreiecke mit einer Seitenlänge von mehr als 100 m erzeugt. Große Datenlücken (NA-Flächen), die z. B. durch das Image Matching von Wasserflächen entstehen können, bleiben daher als NA-Werte erhalten.

Zur Erzeugung des DOM im tif-Format wird unter Nutzung des ArcGIS Spatial Analyst Raster Calculators das DGM1 zum nDOM im tif-Format addiert ($DOM = nDOM + DGM1$).

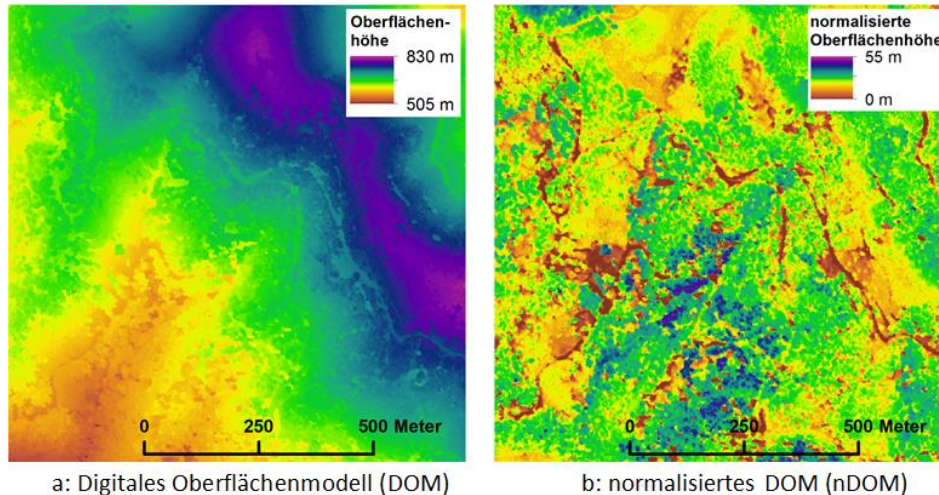


Abbildung 8: Beispiele für ein digitales Oberflächenmodell (a) und ein normalisiertes digitales Oberflächenmodell (b) im Rasterformat.

1.2.2 Validierung der Oberflächenmodelle

Die Qualität der Oberflächenmodelle ist mitunter stark von der Bild- und Befliegungsgeometrie, sowie der Radiometrie der für das Image Matching verwendeten Luftbilddaten beeinflusst. Qualitativ hochwertige Oberflächenmodelle werden erzielt, wenn mit hoher Überlappung aufgenommene Bilder, in denen alle Bildbereiche gut ausgeleuchtet und kontrastreich erfasst sind, verwendet werden. In Schattenbereichen, in denen die Bilder nahezu schwarz erscheinen, und in sehr hellen kontrastarmen Bildbereichen kann es vorkommen, dass nicht genügend Informationen vorhanden sind, um in den Bildpaaren homologe Punkte zu identifizieren. In Luftbilddaten von Wäldern sind Schatten häufig in Bestandeslücken und an Waldrändern zu finden, sodass die durch Image Matching erzeugten Punktwolken in diesen Bereichen Ungenauigkeiten aufweisen können. Der Anteil von beschatteten Bereichen hängt stark vom Sonnenstand zum Zeitpunkt der Bildaufnahme und von der Bestandesstruktur ab. Die mit dem hier beschriebenen Verfahren erstellten Oberflächenmodelle stellen daher keine fehlerfreie Abbildung der Bestandesoberfläche dar. Zur Einschätzung der Qualität der nach dem F³-Verfahren abgeleiteten Oberflächenmodelle wurden Validierungsstudien durchgeführt, die der Quantifizierung der erreichbaren Höhengengenauigkeit dienten. Hierfür wurden die in Abschnitt 1.1.3 aufgeführten Validierungsdaten als Referenz genutzt: ALS-basierte Oberflächenmodelle und stereoskopische Baumhöhenmessungen. Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung der Validierungsmethoden und -ergebnisse befindet sich in der Dokumentation zu Meilenstein M5 „Methodenbeschreibung zur Ableitung von Waldstrukturparametern aus Oberflächenmodellen“ (Anhang 4 oder Download³⁹).

³⁹ M4 – Methodenbeschreibung zur Ableitung von Waldstrukturparametern aus Oberflächenmodellen: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

(a) Vergleich mit ALS-basierten Oberflächenmodellen

Oberflächenmodelle, die aus Airborne Laser Scanning (ALS) - Daten abgeleitet wurden, sind nicht durch Schatten beeinflusst und bilden, bei entsprechender Punktdichte, Objekte üblicherweise detailgetreuer ab als luftbildbasierte Oberflächenmodelle. Daher eignen sich die in Abschnitt 1.1.3 erwähnten, für das Projektgebiet Solling verfügbaren ALS-Daten, die nur drei Monate vor den Luftbildern aufgenommen wurden, ideal als Validierungsdaten. Aus den ALS-Punktwolken wurden, analog zu den luftbildbasierten Punktwolken, DOM und nDOM generiert und als Kacheln abgelegt deren Lage mit den Kacheln der luftbildbasierten Oberflächenmodelle korrespondiert (Ausdehnung 1000 x 1000 m).

Der visuelle Vergleich zwischen luftbildbasiertem nDOM (Abbildung 9a) und ALS-basiertem nDOM (Abbildung 9b) sowie das daraus erzeugte Differenzbild (Abbildung 9c) zeigen, dass das nDOM aus ALS-Daten eine größere Anzahl an Lücken (in brauner Farbe dargestellt) innerhalb der Baumbestände aufweist. Außerdem erscheinen die Kronen einzelner Bäume klarer voneinander abgegrenzt. Abweichungen zwischen luftbild- und ALS-basiertem nDOM treten besonders in beschatteten Bereichen auf. Zum Beispiel sind die von Nord nach Süd durch das Gebiet verlaufenden Bestandesgrenzen, die im Luftbild aufgrund der Beschattung sehr dunkel erscheinen, im luftbildbasierten nDOM nur ungenau abgebildet, während sie im ALS basierten nDOM klar zu erkennen sind. Der überwiegende Teil der Bestandesoberfläche wird dagegen mit deutlich höherer Genauigkeit dargestellt, was durch die große Ausdehnung der weiß eingefärbten Bereiche im Differenzbild verdeutlicht wird. In diesen Bereichen beträgt die Höhenabweichung weniger als ± 2 m.

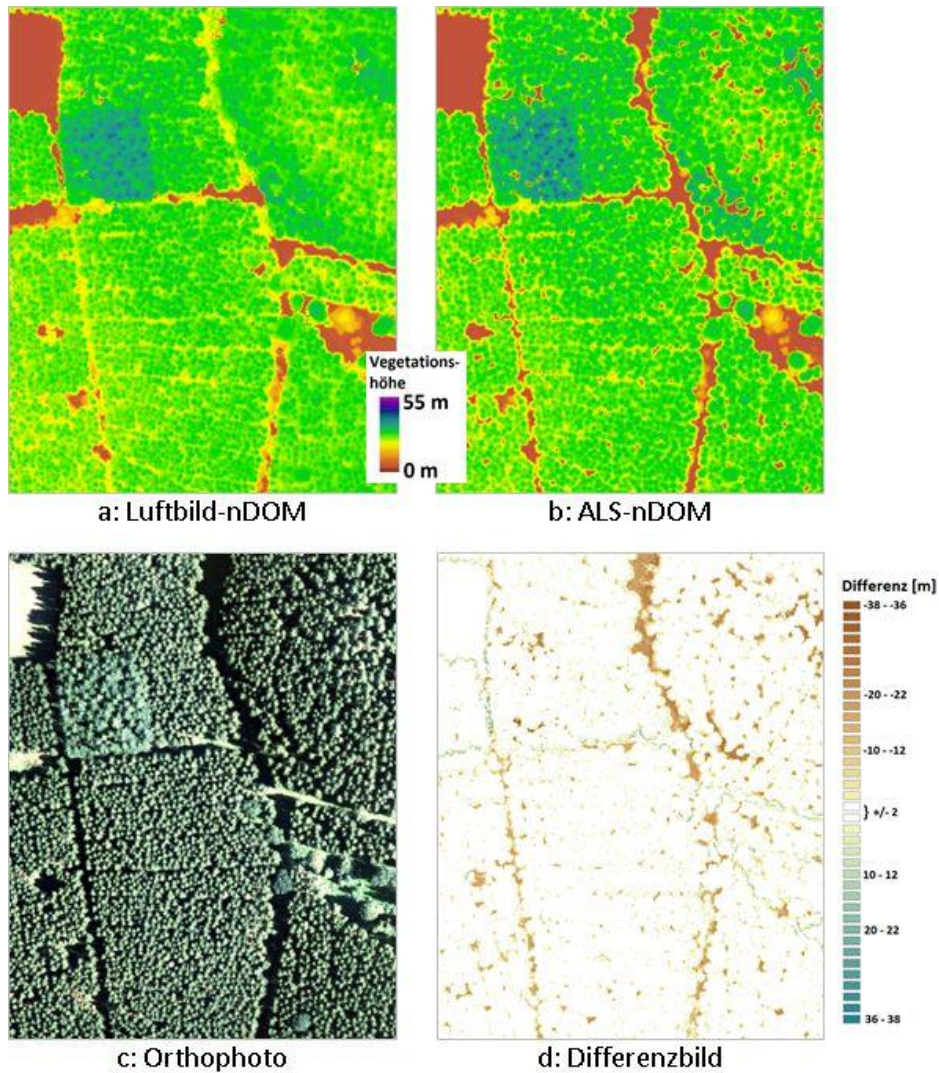


Abbildung 9: Exemplarische Gegenüberstellung eines luftbildbasierten nDOM (a) und eines ALS-basierten nDOM (b) sowie das dazugehörige Orthophoto (c). Das Differenzbild (d) wurde durch Subtraktion des Luftbild-nDOM vom ALS-nDOM erzeugt. Es visualisiert und quantifiziert die Höhenunterschiede der in a und b gezeigten nDOM.

Basierend auf dem Differenzbild wurden für jede 1000 x 1000 m-Bildkachel Maßzahlen zur Einschätzung der Höhengenaugigkeit berechnet: mittlerer absoluter Fehler (MAE: Mean Absolute Error), Wurzel des gemittelten Fehlerquadrats (RMSE: Root Mean Square Error) und Verzerrung (Bias):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |nDOM_{ALS_i} - nDOM_{LB_i}|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (nDOM_{ALS_i} - nDOM_{LB_i})^2}$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n nDOM_{ALS_i} - nDOM_{LB_i}}{n}$$

Das Ergebnis hieraus ist in Abbildung 10 zu sehen. Die Werte für den MAE schwanken zwischen 0,54 m und 3,3 m mit einem Mittelwert von 1,8 m und einem Median von 1,7 m. Dabei steigt der MAE mit zunehmendem Waldanteil (Wald = ALS-nDOM mit einer Höhe > 3 m), was in Abbildung 11 illustriert wird. Dies deutet darauf hin, dass es in Wäldern einen größeren Teil an beschatteten Bereichen gibt, in denen das Image Matching ungenauer funktioniert als im Offenland, das im vorliegenden Fall durch Agrarflächen mit vergleichsweise geringer vertikaler Strukturdiversität und daher wenigen Schattenflächen charakterisiert ist.

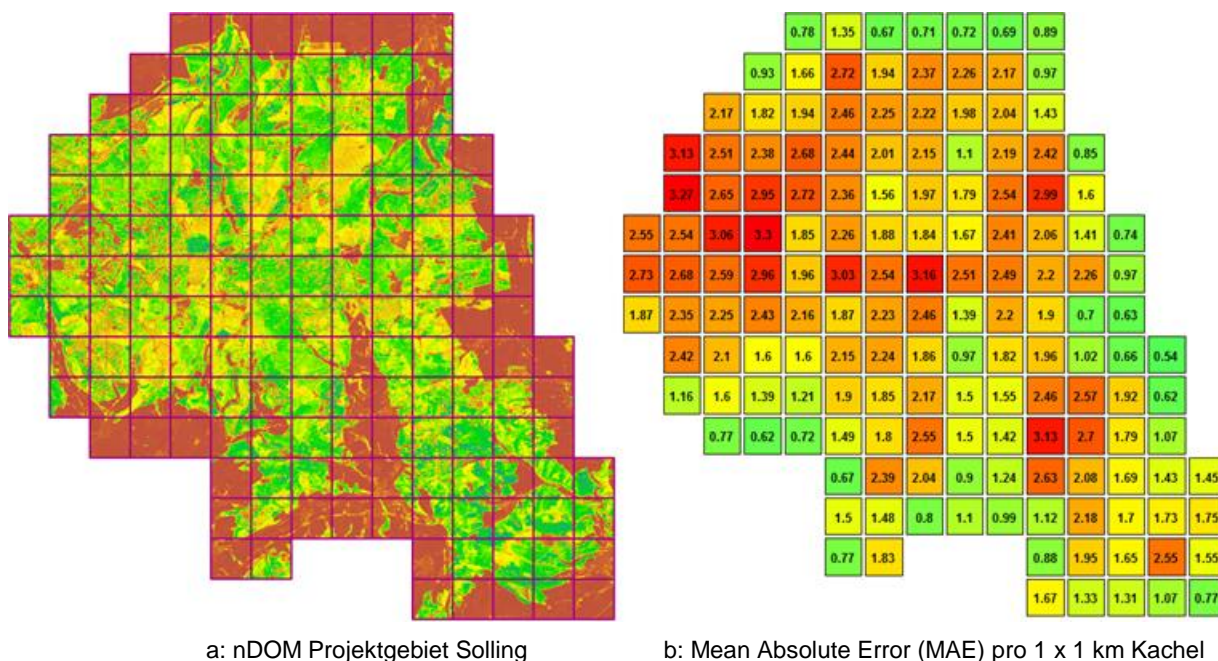


Abbildung 10: nDOM-Kacheln des Projektgebiets im Solling (a) und der pro Kachel aus dem Differenzbild berechnete MAE (b).

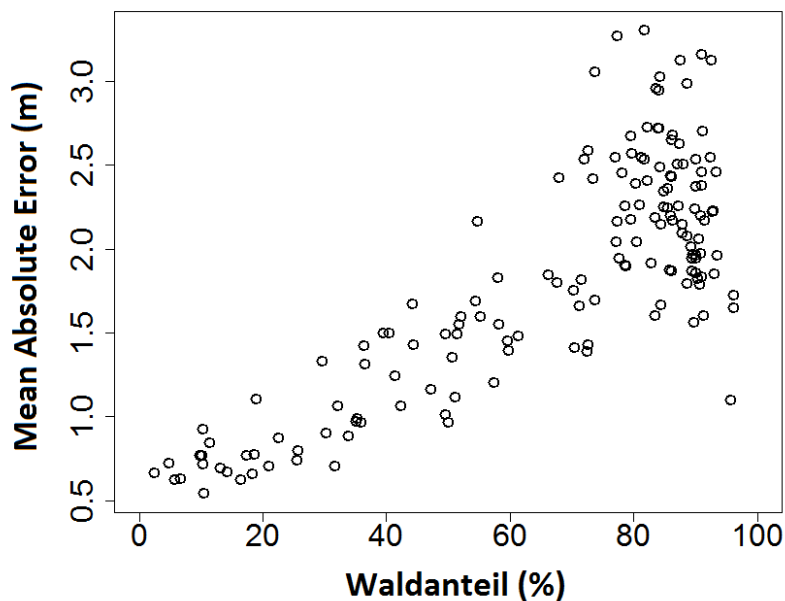


Abbildung 11: Die Grafik zeigt den Zusammenhang zwischen MAE und Waldanteil pro nDOM Kachel (N = 155). Es ist die Tendenz zu beobachten, dass der MAE mit zunehmendem Waldanteil steigt.

Für die N = 97 nDOM-Kacheln mit einem Waldanteil > 70% liegt der MAE im Mittel bei 2,2 m und der mittlere RMSE bei 5,1 m (Tabelle 1). Dabei ist eine hohe Variabilität der MAE Werte zu

beobachten, was darauf hindeutet, dass einige Kacheln weniger komplexe Bestandesoberflächen aufweisen, z. B. dichte Jungwuchsbestände mit wenigen Lücken und homogenen Baumdimensionen. Wohingegen andere Kacheln durch komplexe Altbestände mit größerer Variabilität an Baumdimensionen und einem höheren Anteil an Bestandeslücken und dadurch bedingt mehr Schattenwurf charakterisiert sind. Der mittlere Bias beträgt -0,3 m (Tabelle 1), was bedeutet, dass die Höhe des ALS-basierte nDOM im Durchschnitt geringer ist als die des luftbildbasierten nDOM. Dies ist eine Folge der genaueren Erfassung von Bestandeslücken im ALS-nDOM, wodurch sich insbesondere in diesen Bereichen großen negative Differenzen zwischen ALS- und luftbildbasiertem nDOM ergeben.

Tabelle 1: Vergleich eines luftbildbasierten nDOM mit einem ALS-basierten nDOM. Die Tabelle zeigt die Verteilung der MAE, RMSE und Bias Werte von Kacheln mit > 70% Wald (n = 97) im Untersuchungsgebiet Holzminden im Solling, Niedersachsen.

	nDOM		
	MAE	RMSE	Bias
Minimum	1,1 m	2,6 m	-1,5 m
Median	2,2 m	5,1 m	-0,3 m
Mittelwert	2,2 m	5,1 m	-0,3 m
Maximum	3,3 m	7,1 m	0,4 m

(b) Vergleich mit stereoskopisch gemessenen Baumhöhen

Der Vorteil von aus dem gleichen Bilddatensatz stereoskopisch gemessenen Höhen als Referenzdaten besteht darin, dass die Einflüsse durch Ko-Registrierungsfehler ausgeschlossen werden können. Es wird so ausschließlich die Genauigkeit der Höhenableitung mittels eines automatisierten versus eines manuellen Verfahrens untersucht. Ein Nachteil hierbei ist, dass das manuelle, stereoskopische Messen sehr zeitaufwendig ist. Für die Validierung im F³-Projekt wurden deshalb bereits vorhandene stereoskopisch gemessene Baumhöhen außerhalb der F³-Projektgebiete genutzt (Abschnitt 1.1.3). Für diese Validierungsflächen wurden nach dem oben beschriebenen F³-Verfahren Oberflächenmodelle aus Luftbildern abgeleitet. Für jeden stereoskopisch gemessenen 3D-Punkt wurde der entsprechende Pixelwert aus dem nDOM ausgelesen und die Differenz zwischen stereoskopisch gemessener und aus dem nDOM extrahierter Höhe gebildet. Daraus wurde der RMSE sowie der MAE berechnet (Tabelle 2). Dabei wurden für die Validierungsfläche Rastatt alle Höhenmessungen zusammen (840 Punkte) als auch getrennt nach Messungen auf Baumspitzen (Rastatt 1: 157 Punkte) und Messungen auf Baumkronen (Rastatt 2: 683 Punkte) ausgewertet. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Abbildung 12 zeigt einen grafischen Vergleich der normalisierten stereoskopisch gemessenen Höhen und den Höhen aus dem Luftbild-nDOM.

Tabelle 2: Ergebnisse (RMSE, MAE) des Vergleichs von stereoskopisch gemessenen und aus dem Luftbild-nDOM (Rasterformat) extrahierten Höhen.

Fläche (Punkte)	RMSE	MAE
Rastatt (840)	1,56 m	1,03 m
Rastatt 1 (157)	1,82 m	1,38 m
Rastatt 2 (683)	1,49 m	0,94 m
Pforzheim (212)	2,18 m	0,84 m

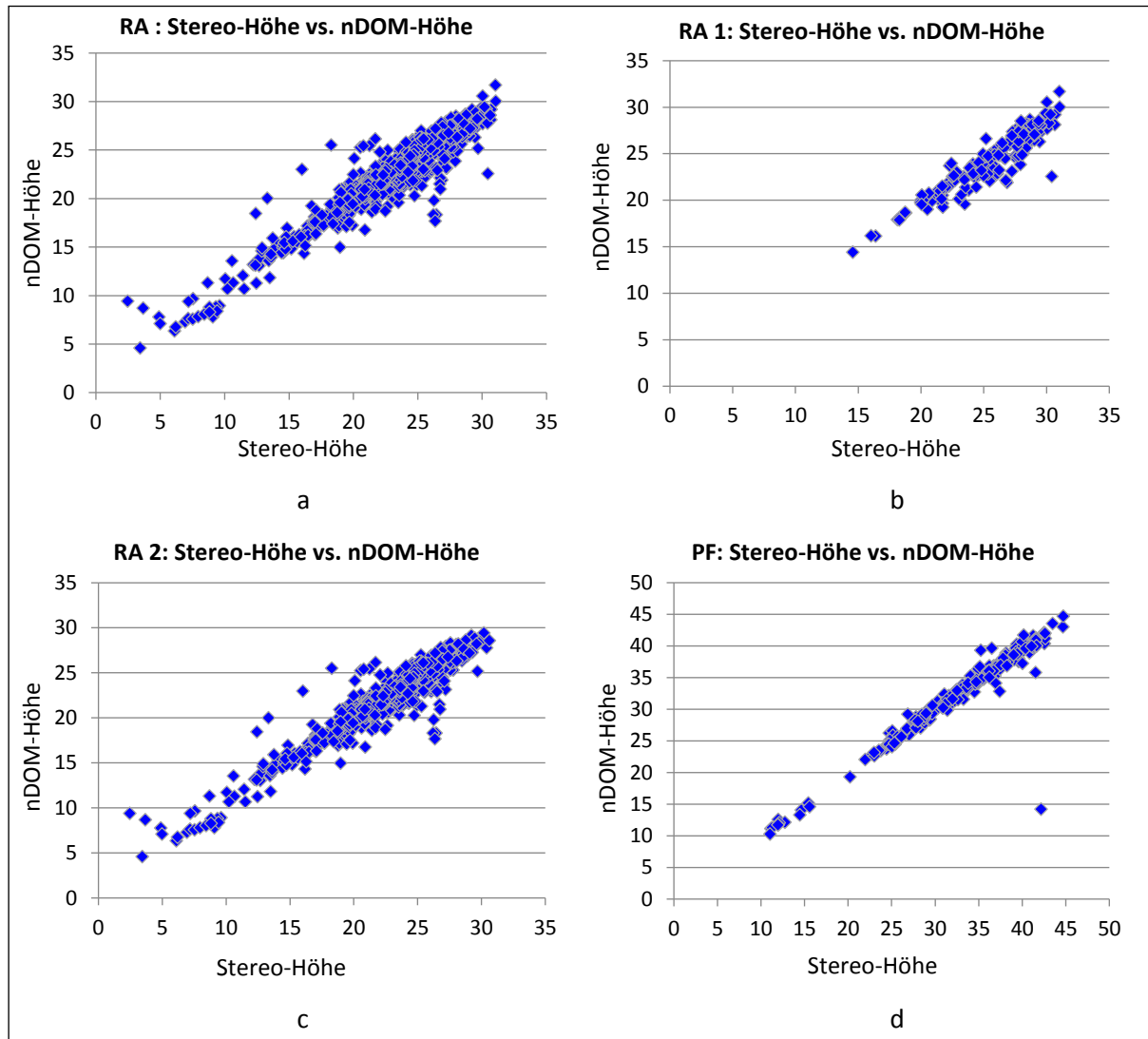


Abbildung 12: Grafische Darstellung der Unterschiede zwischen stereoskopisch gemessenen Höhen und Höhen extrahiert aus dem Luftbild-nDOM (Rasterformat). Der Validierungsdatensatz Rastatt (RA) wird zusätzlich unterschieden nach Höhenmessungen nur auf Baumspitzen (RA 1) und Höhenmessungen auf der Kronenoberfläche (RA 2). Im Validierungsdatensatz Pforzheim (PF) wurden nur Baumspitzenhöhen gemessen.

In Pforzheim wird der höchste RMSE (2,18 m), aber gleichzeitig auch der niedrigste MAE (0,84 m) erzielt. Dies kann durch den Ausreißer von 28 m Höhenunterschied (Abbildung 12d) erklärt werden. Dieser Ausreißer konnte nach visueller Überprüfung auf einen Matching-Fehler zurückgeführt werden. Ohne diesen Ausreißer läge der RMSE bei 1,03 m, während sich der MAE nur auf 0,85 m ändert. Auch in Rastatt streuen die Höhenunterschiede (RMSE 1,56 m); Höhenunterschiede von bis zu 14 m werden beobachtet (Abbildung 12a-c).

Die Höhenvalidierung hat gezeigt, dass aus Luftbildern abgeleitete Oberflächenmodelle Baumhöhen mit hoher Genauigkeit erfassen können, vor allem wenn die Baumkronen gut ausgeleuchtet sind. Allerdings können auch hier Matching-Fehler auftreten, die punktuell zu großen Höhenabweichungen führen können. Der Vergleich mit ALS-basierten Oberflächenmodellen zeigt, dass die größten Ungenauigkeiten luftbildbasierter Oberflächenmodelle in stark beschatteten Bereichen, wie Lücken und an Bestandesrändern, auftreten. Die Validierung der luftbildbasierten Oberflächenmodelle ist nicht nur wichtig für die Einschätzung der erzielbaren Höhengenaugkeiten, sondern liefert auch entscheidende Hinweise auf die zu erwartenden Genauigkeiten der aus den Oberflächenmodellen abgeleiteten forstlichen Strukturparameter (Abschnitte 1.3 und 1.4).

1.3 Arbeitsbereich 3: Ableitung forstlicher Strukturparameter aus Oberflächenmodellen

Die Verfahren zur automatisierten Berechnung der forstlichen Strukturparameter Vegetationshöhe, Überschildung, Waldtyp (offene und geschlossene Bestände), Bestandeslücken, Kronendachrauigkeit und Überhälter bzw. lockere Althölzer wurden in Python-Skripten implementiert, die LAStools⁴⁰ sowie ArcGIS (ArcPy)⁴¹ Funktionalitäten nutzen. Die Berechnungen basieren auf Oberflächenmodellen, die nach den in Abschnitt 1.2 beschriebenen Verfahren generiert wurden. Die Parameter werden dabei grundsätzlich für die gesamte von den Oberflächenmodellen abgedeckte Fläche berechnet ohne zu berücksichtigen, ob es sich dabei um Wald handelt oder nicht. Die Begrenzung auf Waldflächen muss jeweils nach Berechnung der Strukturparameter erfolgen. Die hierfür benötigte Waldmaske muss von den Nutzenden bereitgestellt werden und ist frei wählbar.

Eine detaillierte Beschreibung der Verfahren befindet sich in der Dokumentation zu Meilenstein M4 „Methodenbeschreibung zur Ableitung von Waldstrukturparametern aus Oberflächenmodellen“ (Anhang 4 oder Download⁴²).

1.3.1 Vegetationshöhe

Verfahrensbeschreibung

Die Vegetationshöhe ist ein zentraler Aspekt der Waldstruktur und wird direkt aus dem nDOM abgeleitet. Im Wald liefert sie neben der Information über die Höhe des Kronendachs wichtige Hinweise zur Bestandesabgrenzung und -typisierung. Die Vegetationshöhe wird im F³-Projekt über zwei Datensätze bereitgestellt. Der erste ist das nDOM mit einer horizontalen Auflösung von 1 m. Der zweite Datensatz ist die „Waldhöhenstrukturkarte“, kurz WHSK, eine vergrößerte Variante des nDOM mit einer horizontalen Auflösung von 5 m, die die Vegetationshöhe in 1 m-Klassen angibt. Die gröbere Auflösung vereinfacht die visuelle Interpretation und kartographische Darstellung größerer Geländeausschnitte, z. B. in Übersichtskarten eines Forstreviers, und reduziert den von den Daten benötigten Speicherplatz. Zur Erzeugung der WHSK wird das nDOM (tif-Format) auf eine Pixelgröße von 5 x 5 m aggregiert, wobei jeweils die höchste Höhe als Pixelwert beibehalten wird. Anschließend werden die Höhenwerte auf ganze Meter gerundet. Für die Visualisierung wurde der WHSK eine Farbskala (Abbildung 13) zugewiesen, die die Höhenwerte der WHSK zu Gruppen von 3 m zusammenfasst (1 – 3 m, 3 – 6 m usw.), die jeweils im selben Farbton visualisiert werden. Dieses Verfahren ist im Software-Skript *whsk_F3.py*⁴³ implementiert.

Ein der WHSK ähnliches Farbschema, jedoch für kontinuierliche Daten, wird dem nDOM zugewiesen. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 14b zu sehen. Ein Beispiel für die WHSK ist in Abbildung 14c dargestellt. Der zu diesen Abbildungen passende Ausschnitt aus dem Orthophoto in Abbildung 14a soll der Orientierung dienen.

⁴⁰ LAStools, rapidlasso GmbH: <https://rapidlasso.com/> [letzter Zugriff 23.10.2020]

⁴¹ ESRI ArcPy: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-python-libraries/libraries/arcpy> [letzter Zugriff 13.01.2021]

⁴² M4 – Methodenbeschreibung zur Ableitung von Waldstrukturparametern aus Oberflächenmodellen: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

⁴³ Python-Skript *whsk_F3.py*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]



Abbildung 13: Farbskala der Waldhöhenstrukturkarte.

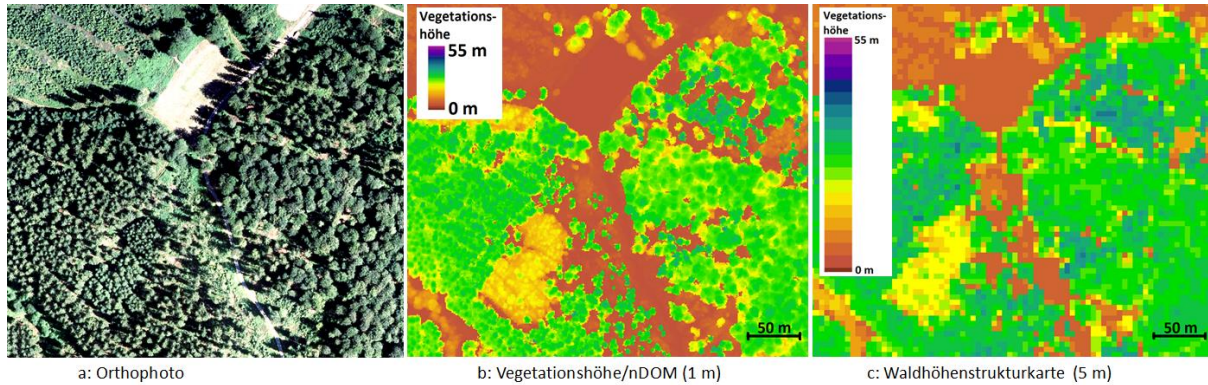


Abbildung 14: Gegenüberstellung von (a) Orthophoto, (b) Vegetationshöhe/nDOM mit 1 m Auflösung und (c) WHSK mit 5 m Auflösung.

Validierung

Analog zum für das nDOM beschriebene Verfahren (Abschnitt 1.2.2) wurden auch Waldhöhenstrukturkarten (WHSK) sowohl aus ALS-basierten als auch aus luftbildbasierten Daten generiert und die Abweichungen mittels der Maßzahlen MAE, RMSE und Bias quantifiziert (Tabelle 3). Die Abweichungen (MAE und RMSE) der WHSK zu den Referenzdaten (Tabelle 3) sind geringer als die Abweichungen der nDOM zu den Referenzdaten (Tabelle 1). Dies lässt sich mit der größeren Auflösung der WHSK begründen. Bei der Erstellung der WHSK werden die Pixelwerte des nDOMs pro 5 x 5 m Fläche aggregiert und nur der höchsten Wert pro Flächeneinheit ausgewählt. Durch diese Aggregation werden vorrangig Pixelwerte erhalten, die oben auf Baumkronen liegen, also in Bereichen, die üblicherweise gut beleuchtet sind und in denen das Image Matching optimale Ergebnisse liefert. Dies resultiert in merklich geringeren MAE- und RMSE-Werten als beim nDOM. Die Ausrichtung der WHSK an den oberen Höhen des nDOM resultiert in Bias Werten, die sich in Ihrem Vorzeichen von denen des nDOM unterscheiden. Während beim nDOM der Bias im Mittel negativ war, ist der mittlere Bias der WHSK positiv, d.h. die ALS-basierte WHSK liegt im Durchschnitt höher als die luftbildbasierte WHSK.

Tabelle 3: Vergleich der luftbildbasierten Waldhöhenstrukturkarte mit einer ALS-basierten Waldhöhenstrukturkarte. Die Tabelle zeigt die Verteilung der MAE, RMSE und Bias Werte von Kacheln mit > 70% Wald (n = 97) im Untersuchungsgebiet Holzminden im Solling, Niedersachsen.

	WHSK		
	MAE	RMSE	Bias
Minimum	0,7 m	1,5 m	-0,4 m
Median	1,4 m	3,0 m	0,5 m
Mittelwert	1,4 m	3,1 m	0,5 m
Maximum	2,2 m	5,0 m	1,2 m

1.3.2 Kronendachrauigkeit

Verfahrensbeschreibung

Die Kronendachrauigkeit quantifiziert die Unebenheit des Kronendachs von Waldbeständen. Sie ist u. a. für den Strahlungs- und den Wasserhaushalt des Waldes von Bedeutung⁴⁴. Eine geringe Kronendachrauigkeit kann beispielsweise auf einen schwächeren windbedingten Austausch zur Atmosphäre hinweisen als in Beständen, die durch eine höhere Kronendachrauigkeit charakterisiert sind. Die Kronendachrauigkeit kann darüber hinaus auch die Stabilität von Beständen, z. B. bei Starkwindereignissen, beeinflussen. Zudem kann sie als Indikator für die Biodiversität oder das Waldentwicklungsstadium eines Bestandes dienen.

Die Möglichkeiten zur Einschätzung der Kronendachrauigkeit sind vielfältig, während es kaum Referenzdaten für eine direkte Evaluierung der Parametergüte gibt. Als Indikator für die Oberflächenrauigkeit der Wälder werden im F³-Verfahren zwei Maßzahlen berechnet, Standardabweichung und Perzentilabstand, welche die vertikale Struktur des Kronendaches anzeigen, indem sie die Variabilität der Vegetationshöhe pro Flächeneinheit quantifizieren. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei diesen Maßzahlen nicht um die in der Aerodynamik verwendete „Rauigkeitslänge“ handelt.

Die Kronendachrauigkeit eines Waldbestandes ist nicht nur von der Höhe der Bäume, sondern auch von der Reliefierung des Geländes abhängig. Daher werden die Rauigkeitsmaßzahlen aus dem digitalen Oberflächenmodell (DOM, Abbildung 15) abgeleitet. Im Python-Skript *,rauigkeit_F3.py*⁴⁵ wird mit den LAsTools-Funktionalitäten *,lasconopy'*, *,lasdiff'* und *,lasgrid'* die Kronendachrauigkeit für drei Skalenebenen generiert, sodass zwischen kleinräumiger Rauigkeit pro 20 x 20 m-Pixelfläche, der Rauigkeit auf mittelgroßen (50 x 50 m) oder großen (100 x 100 m) Flächen gewählt werden kann. Für jede Skalenebene werden je zwei Maße der Oberflächenrauigkeit berechnet: (a) die Standardabweichung der Höhenwerte pro Flächeneinheit (Abbildung 16) und (b) der Abstand zwischen dem 5. und 95. Perzentil der Höhenwerte (Abbildung 17). Zur Berechnung von (b) wird zuerst das 5. bzw. 95. Perzentil bestimmt und anschließend die Differenz zwischen den beiden Perzentilen gebildet.

⁴⁴ Parker, G. G., Harmon, M. E., Lefsky, M. A., Chen, J., van Pelt, R., Weiss, S. B., Thomas, S. C., Winner, W. E., Shaw, D. C., Franklin, J. F., 2004. Three-dimensional Structure of an Old-growth Pseudotsuga-tsuga Canopy and its Implications for Radiation Balance, Microclimate, and Gas Exchange. *Ecosystems*, 7: 440-453.

⁴⁵ Python-Skript *,rauigkeit_F3.py'*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

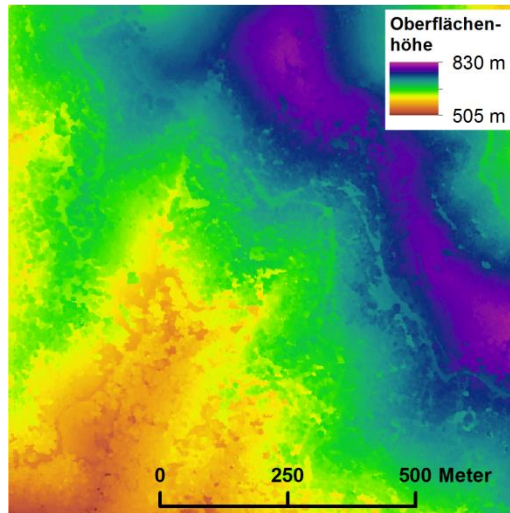


Abbildung 15: Digitales Oberflächenmodell (DOM) in 1 m-Auflösung. Aus diesem wurden die Karten der Kronendachrauigkeit in Abbildung 16 und Abbildung 17 abgeleitet.

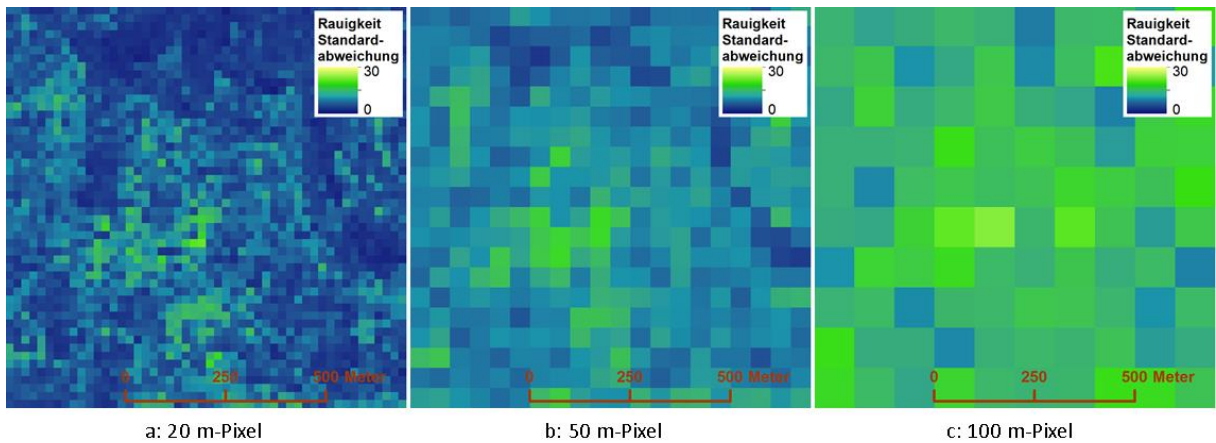


Abbildung 16: Oberflächenrauigkeit berechnet als Standardabweichung der Höhenwerte des DOM (Abbildung 15) in verschiedenen Auflösungen.

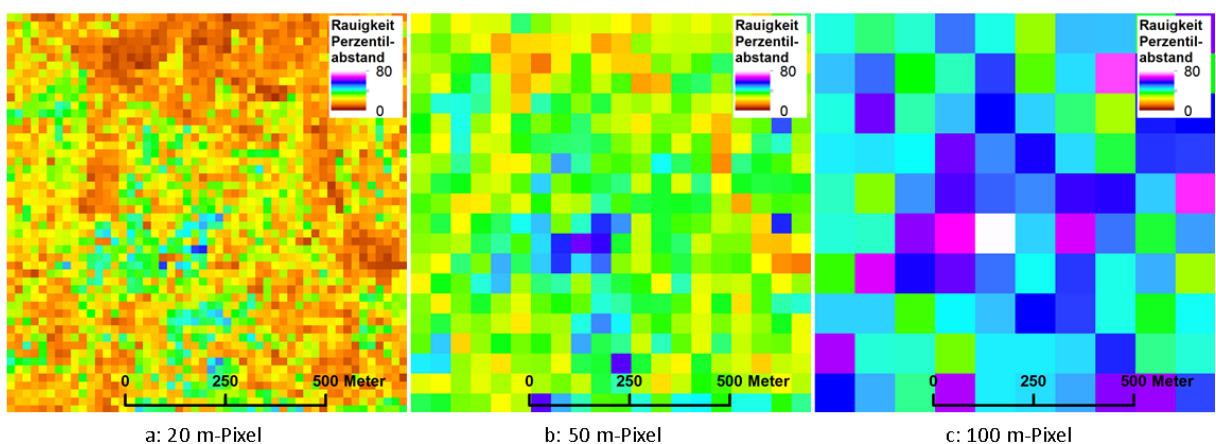


Abbildung 17: Oberflächenrauigkeit berechnet als Abstand zwischen dem 5. und 95. Perzentil der Höhenwerte des DOM (Abbildung 15) in verschiedenen Auflösungen.

Validierung

Wie bereits oben erwähnt, gibt es kaum Referenzdaten für eine direkte Validierung der Genauigkeit der nach dem F³-Verfahren berechneten Rauigkeitsparameter. Als Validierungsdatensatz bot sich

deshalb nur das ALS-DOM aus dem Projektgebiet Solling an, aus dem analog zum Luftbild-DOM die Kronendachrauigkeit abgeleitet wurde. Die Abweichung der luftbildbasierten von der ALS-basierten Kronendachrauigkeit wurde mittels der Maßzahlen MAE, RMSE und Bias quantifiziert, analog zur Beschreibung in Abschnitt 1.2.2. Dabei wurden nur Kacheln mit einem Waldanteil von mehr als 70% beachtet.

Die Abweichungen zwischen den Standardabweichung-Kronendachrauigkeiten (Tabelle 4) zeigen, dass sich luftbild- und ALS-basierte Karten in der 20 m-Auflösung im Mittel um 1,6 m (MAE) bzw. 2,2 m (RMSE) unterscheiden. Der positive Bias zeigt, dass die auf ALS-basierten Oberflächenmodellen durchgeführte Berechnung der Rauigkeit zu höheren Werten führt. Im Mittel liegen die auf ALS-Daten beruhenden Rauigkeitswerte um 1,5 m (Bias) über den luftbildbasierten Werten. Dies kann durch die unterschiedliche Arbeitsweise der Sensoren erklärt werden. Da ALS-Sensoren in der Lage sind, auch in dunklen Bildbereichen akkurate Daten zu liefern, enthält dieser Datensatz eine Vielzahl an Bestandeslücken, die im luftbildbasierten Datensatz fehlen. Die größere Anzahl von Bestandeslücken in den ALS-Daten bedingt eine größere Variabilität der Höhenwerte pro Flächeneinheit, ergo eine größere Kronendachrauigkeit. Tabelle 4 zeigt außerdem, dass die Abweichungen mit größer werdenden Flächeneinheiten kleiner werden. So liegt z. B. der mittlere MAE der Kronendachrauigkeit pro 20 m-Pixel bei 1,6 m, während er in der 100 m-Auflösung nur 1,1 m beträgt.

Für das Kronendachrauigkeitsmaß Perzentilabstand wurden ebenfalls die Abweichungen zwischen der luftbild- und ALS-basierten Berechnung ermittelt (Tabelle 4). Auch hier liegen die ALS-basierten Rauigkeitswerte über den luftbildbasierten Rauigkeitswerten (z. B. 4,1 m mittlerer Bias bei 20 m-Auflösung). Ebenfalls ist die Tendenz zu beobachten, dass die Abweichungen zwischen den Datensätzen bei zunehmender Pixelgröße abnehmen.

Tabelle 4: Vergleich der luftbildbasierten Kronendachrauigkeit (Standardabweichung und Perzentilabstand) mit einer ALS-basierten Kronendachrauigkeitskarte. Die Tabelle zeigt die Verteilung der MAE, RMSE und Bias Werte von Kacheln mit > 70% Wald (N = 97) im Untersuchungsgebiet Holzminden im Solling, Niedersachsen. Die Werte werden pro Aggregationsstufe, d.h. pro 20 x 20 m-, 50 x 50 m- und 100 x 100 m-Pixelgröße, angegeben.

Kronendachrauigkeit / Standardabweichung									
	20 x 20 m-Pixel			50 x 50 m-Pixel			100 x 100 m-Pixel		
	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE	Bias
Minimum	0,7 m	1,1 m	0,6 m	0,6 m	0,9 m	0,6 m	0,5 m	0,7 m	0,5 m
Median	1,6 m	2,2 m	1,5 m	1,3 m	1,7 m	1,3 m	1,1 m	1,3 m	1,1 m
Mittelwert	1,6 m	2,2 m	1,5 m	1,4 m	1,7 m	1,3 m	1,1 m	1,3 m	1,1 m
Maximum	2,5 m	3,3 m	2,5 m	2,2 m	2,7 m	2,2 m	1,8 m	2,0 m	1,8 m
Kronendachrauigkeit / Perzentilabstand									
	20 x 20 m-Pixel			50 x 50 m-Pixel			100 x 100 m-Pixel		
	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE	Bias
Minimum	2,0 m	3,7 m	1,7 m	1,7 m	2,8 m	1,6 m	1,7 m	2,3 m	1,7 m
Median	4,3 m	7,2 m	4,1 m	4,0 m	6,0 m	3,9 m	3,4 m	4,5 m	3,3 m
Mittelwert	4,4 m	7,1 m	4,1 m	4,1 m	6,1 m	4,1 m	3,5 m	4,8 m	3,5 m
Maximum	6,7 m	10,2m	6,5 m	7,1 m	9,5 m	7,1 m	6,5 m	8,0 m	6,5 m

1.3.3 Überschirmung, Waldtyp und Bestandeslücken

Die Ableitung von Überschirmungsparametern, die Einteilung der Landschaft in offene und geschlossene Bestände sowie die Erfassung von Lücken des Kronendachs werden in einem mehrstufigen Verfahren erreicht. Die Ergebnisse aus diesem Verfahren sind von besonderem Interesse für den Waldnaturschutz und können wichtige Hinweise für das Waldmanagement liefern.

Verfahrensbeschreibung

Die Einteilung eines Waldbestandes in offene/geschlossene Bestände sowie Bestandeslücken basiert auf Informationen über die Überschirmung eines Bestandes mit Baumkronen. Das Verfahren zur Ableitung dieser Strukturparameter basiert auf dem nDOM, dessen Ableitung in Abschnitt 1.2.1 beschrieben wurde, als Eingangsdatensatz. Das Verfahren ist im Software-Skript `waldtyp_F3.py`⁴⁶ implementiert.

Die Überschirmung gibt an, welcher Prozentsatz des Bodens durch die vertikale Projektion der Kronen abgedeckt wird⁴⁷. In Zielewska-Büttner et al. (2016)⁴⁸ wird der Überschirmungsgrad definiert als der Anteil der Vegetation ≥ 1 m innerhalb eines Umkreises mit Radius 25 m. Für das F³-Projekt wurde diese Definition übernommen, der Höhenschwellwert jedoch auf 3 m angepasst. Dadurch soll Unterwuchs wie Brombeeren und Adlerfarn, aber auch Verjüngung von der Berechnung des Überschirmungsgrades ausgeschlossen werden. Im ersten Schritt des Verfahrens wird eine Überschirmungskarte erstellt, indem alle Pixel des nDOM mit einer Höhe ≥ 3 m über dem Boden als Baumkronen, d. h. überschirmte Fläche, angesehen werden. Mit einem kreisförmigen Moving Window (Radius = 25 m) wird darauf basierend für jedes Pixel eine Prozentangabe bezüglich des Baumpixelanteils in seiner Umgebung berechnet. Die resultierende Überschirmungskarte hat eine horizontale Auflösung von 1 m und wird in zwei voneinander unabhängigen Prozessierungsschritten weiterverarbeitet:

(a) Die Pixel der in 1 x 1 m-Auflösung vorliegenden Karte werden auf 25 x 25 m-Pixel aggregiert, wobei jeweils der Median der ursprünglichen Pixelwerte zum neuen Pixelwert wird. Das Resultat ist die finale Überschirmungskarte (Abbildung 18b), die durch eine gute Interpretierbarkeit bei vergleichsweise geringer Dateigröße charakterisiert ist.

(b) Das Überschirmungsprozent der in 1 x 1 m-Auflösung vorliegenden Karte ist eine wichtige Eingangsgröße zur Ausweisung des Waldtyps. Der Waldtyp bezeichnet die Unterscheidung in offene und geschlossene Bestände und wird in Anlehnung an Zielewska-Büttner et al. (2016)⁴⁸ ausgewiesen: Offene Bestände sind alle Flächen mit einer Überschirmung $< 60\%$ und geschlossene Bestände sind Flächen mit einer Überschirmung $\geq 60\%$. Um als Bestand ausgewiesen zu werden, muss die Flächengröße mindestens 0,5 ha betragen. Nach der Anwendung des Überschirmungsschwellwertes werden zusammenhängende Flächen $< 0,5$ ha aufgelöst und mit der angrenzenden Fläche verschmolzen. Die resultierende Kartierung in offene und geschlossene Bestände ist die Basis für die anschließende Kartierung von Bestandeslücken.

Die im F³-Projekt genutzte Lückendefinition ist eng an Zielewska-Büttner et al. (2016)⁴⁸ angelehnt. Eine Erfassung von Lücken findet nur innerhalb geschlossener Bestände statt. Lücken sind definiert als Flächen mit einer maximalen Vegetationshöhe von 3 m (analog zum Höhenschwellwert in der Überschirmungsdefinition) und einer Mindestfläche von 10 m². Innerhalb offener Bestände werden keine Lücken ausgewiesen, da bereits die Definition der maximalen Überschirmung von $< 60\%$ impliziert, dass lückenhafte Strukturen charakteristische Elemente dieser Klasse sind. Das Ergebnis der Lückenerfassung wird mit dem Ergebnis aus der Waldtypkartierung kombiniert, woraus eine Karte mit den drei Klassen (1) „offener Bestand“, (2) „geschlossener Bestand“ und (3) „Lücke“ entsteht, der eine fixe Farbpalette zugewiesen wird. Abbildung 18c zeigt beispielhaft eine solche Karte.

⁴⁶ Python-Skript `waldtyp_F3.py`: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

⁴⁷ McElhinny, C., Gibbons, P., Brack, C., Bauhus, J., 2005. Forest and woodland stand structural complexity: its definition and measurement. *Forest Ecology and Management*, 218: 1-24.

⁴⁸ Zielewska-Büttner, K., Adler, P., Ehmann, M., Braunisch, V., 2016. Automated Detection of Forest Gaps in Spruce Dominated Stands Using Canopy Height Models Derived from Stereo Aerial Imagery. *Remote Sensing*, 2016, 8, 175.

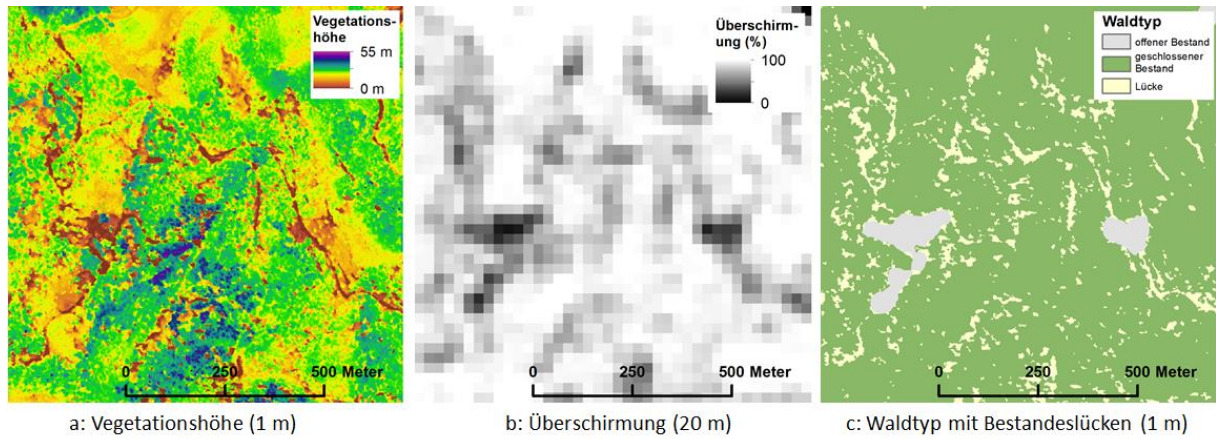


Abbildung 18: Herleitung von Überschirmungs- und Waldtypinformationen. (a) Ausgangsdatensatz Vegetationshöhe (nDOM); (b) Überschirmung; (c) Waldtyp mit Bestandeslücken.

Validierung Waldtyp und Bestandeslücken

Für die Validierung von Waldtyp und Bestandeslücken standen sowohl ALS-Daten als auch eine stereoskopische Kartierung zur Verfügung. Die Überschirmungskarte wurde nicht gesondert validiert. Hinweise auf die Genauigkeit der Überschirmungskarte lassen sich aus den erzielten Genauigkeiten der Waldtypkarte ableiten.

(a) Vergleich mit ALS-basierter Klassifizierung

Das Python-Skript `waldtyp_F3.py`⁴⁶ wurde für das Projektgebiet Solling sowohl auf das luftbildbasierte nDOM als auch auf das ALS-basierte nDOM (siehe Abschnitt 1.2.2) angewendet. Die Klassifikationsergebnisse wurden flächendeckend miteinander verglichen, wobei die ALS-basierte Klassifikation als Referenz diente. Anhand einer Konfusionsmatrix ist im Folgenden dargestellt, inwieweit die luftbildbasierte Klassifizierung mit der Referenzklassifizierung übereinstimmt.

Tabelle 5: Konfusionsmatrix der Klassifizierung von Waldtyp und Bestandeslücken.

Klasse	ALS Klassifikation			Summe (ha)	Nutzer- genauigkeit
	Offener Bestand (ha)	Geschlossener Bestand (ha)	Lücke (ha)		
Offener Bestand (ha)	518,54 (4,74%)	37,62 (0,34%)	23,35 (0,21%)	579,51 (5,29%)	89,48%
Geschlossener Bestand (ha)	40,36 (0,37%)	9459,54 (86,42%)	408,96 (3,74%)	9908,86 (90,52%)	95,47%
Lücke (ha)	20,54 (0,19%)	87,61 (0,80%)	350,12 (3,20%)	458,27 (4,19%)	76,40%
Summe (ha)	579,44 (5,29%)	9584,77 (87,56%)	782,43 (7,15%)	10946,64 (100%)	<i>Gesamt- genauigkeit</i>
Produzentengenauigkeit	89,49%	98,69%	44,75%	<i>Gesamt- genauigkeit</i>	10328,21 ha 94,35%

Aus der Konfusionsmatrix (Tabelle 5) geht hervor, dass die Klassifikation, basierend auf dem Luftbild-nDOM, zu 94,4% (Gesamtgenauigkeit) mit der Referenzklassifikation, basierend auf dem ALS-nDOM, übereinstimmt. Insbesondere die Klassen „offener Bestand“ und „geschlossener Bestand“ zeigen große Übereinstimmungen. Hier werden 89,5% bzw. 98,7% der in den ALS-basierten Daten als offener bzw. geschlossener Bestand klassifizierten Fläche auch in den luftbildbasierten Daten als solche klassifiziert (siehe Tabelle 5, Produzentengenauigkeit). Ebenso

sind 89,5% bzw. 95,5% der in den luftbildbasierten Daten als offen respektive geschlossenen klassifizierten Pixel auch in den ALS-basierten Daten als solche klassifiziert (siehe Tabelle 5, Nutzergenauigkeit).

Weniger Übereinstimmung findet man bei der Klasse „Lücke“. Hier wurden nur knapp 45% der im ALS-Datensatz als Lücken identifizierten Lücken auch in den luftbildbasierten Daten erfasst und nur 76% der in den luftbildbasierten Daten erfassten Lücken wurden auch in den Referenzdaten als Lücke klassifiziert.

(b) Vergleich mit stereoskopischer Bildinterpretation

Wie schon bei der Validierung der Oberflächenhöhen (Abschnitt 1.2.2), wurde an der FVA für die Validierung der Lückenerkennung auf bereits vorhandene, stereoskopisch-manuell erzeugte Referenzdaten zurückgegriffen. Auch hier standen keine ALS-Daten zur Verfügung.

Für das Validierungsgebiet „Schönmünz“ (Abschnitt 1.1.3) wurden Luftbilddaten von 2012 genutzt, die nach dem für das F³-Projekt festgelegten Verfahren zur Oberflächenableitung (Abschnitt 1.2.1) prozessiert wurden. Anschließend wurde das Gebiet mittels des Python-Skriptes *waldtyp_F3.py*⁴⁶ in offene Bestände, geschlossene Bestände und Lücken klassifiziert (Abbildung 19).

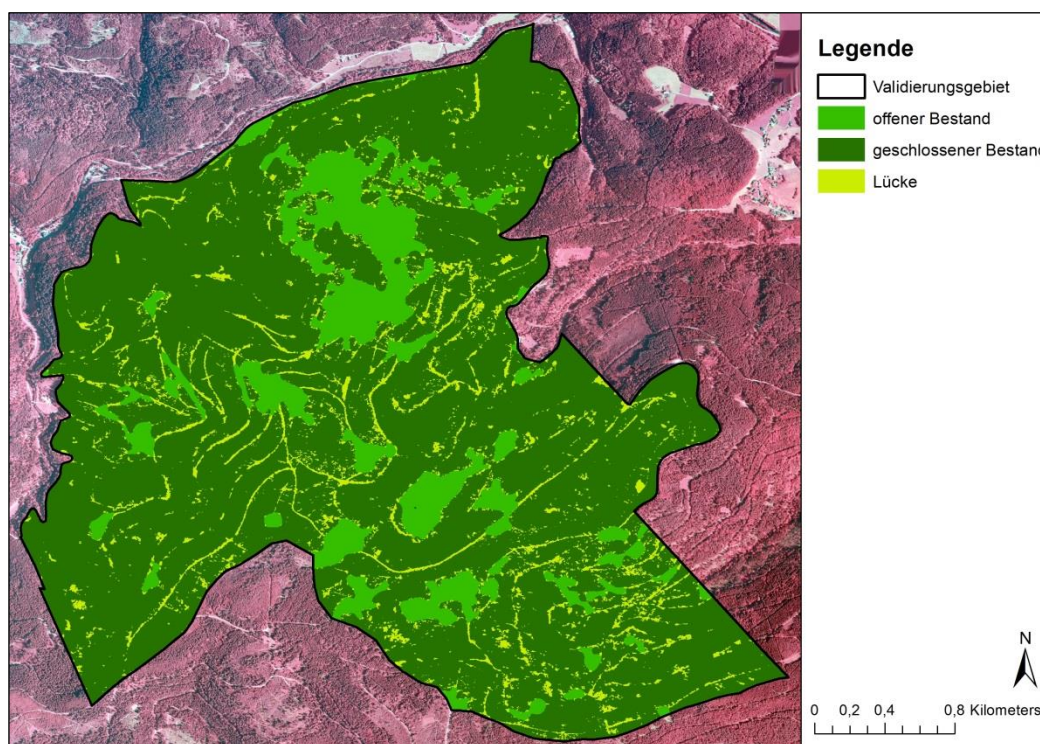


Abbildung 19: Klassifizierungsergebnis für offene Bestände, geschlossene Bestände und Lücken im Validierungsgebiet Schönmünz.

Die Validierung erfolgte auf Stichprobenplots und getrennt für Waldtyp (offene/geschlossene Bestände) und Bestandeslücken. Für die Validierung der Waldtypklassifikation wurden die Ergebnisraster der automatischen Klassifizierung in eine Vektordatei mit je einem Multipart-Polygon für die Klasse „geschlossene Bestände“ und einem für die Klasse „offener Bestand“ umgewandelt. Die Klasse „Bestandeslücken“ wurde in diesem Vorgang in die Klasse „geschlossener Bestand“ aufgelöst (Abbildung 20). Die an den Mittelpunkten der 80 Stichprobenplots (siehe Abschnitt 1.1.3) festgestellte Klasse der automatischen Klassifikation wurde extrahiert und mit der

Referenzkartierung verglichen. Daraus wurde, den Vorgaben von Olofsson et al. (2014)⁴⁹ folgend, eine Konfusionsmatrix erstellt und es wurden die Nutzer-, Produzenten- und Gesamtgenauigkeit berechnet (Tabelle 6).

Bis auf drei Plots wurden alle Plots korrekt klassifiziert, was zu einer Gesamtgenauigkeit von 97,1% führt. Nutzer- und Produzentengenauigkeiten liegen zwischen 83% und 99%. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den Ergebnissen aus der Validierung mit ALS-Daten (Tabelle 5). Zwei der drei falsch klassifizierten Plots liegen im Grenzbereich zwischen offenem und geschlossenem Bestand. Dies zeigt, dass sich offene und geschlossene Bestände mit dem F³-Verfahren gut kartieren lassen, dass es jedoch in dem Übergangsbereichen zwischen den Klassen zu Abweichungen kommen kann.

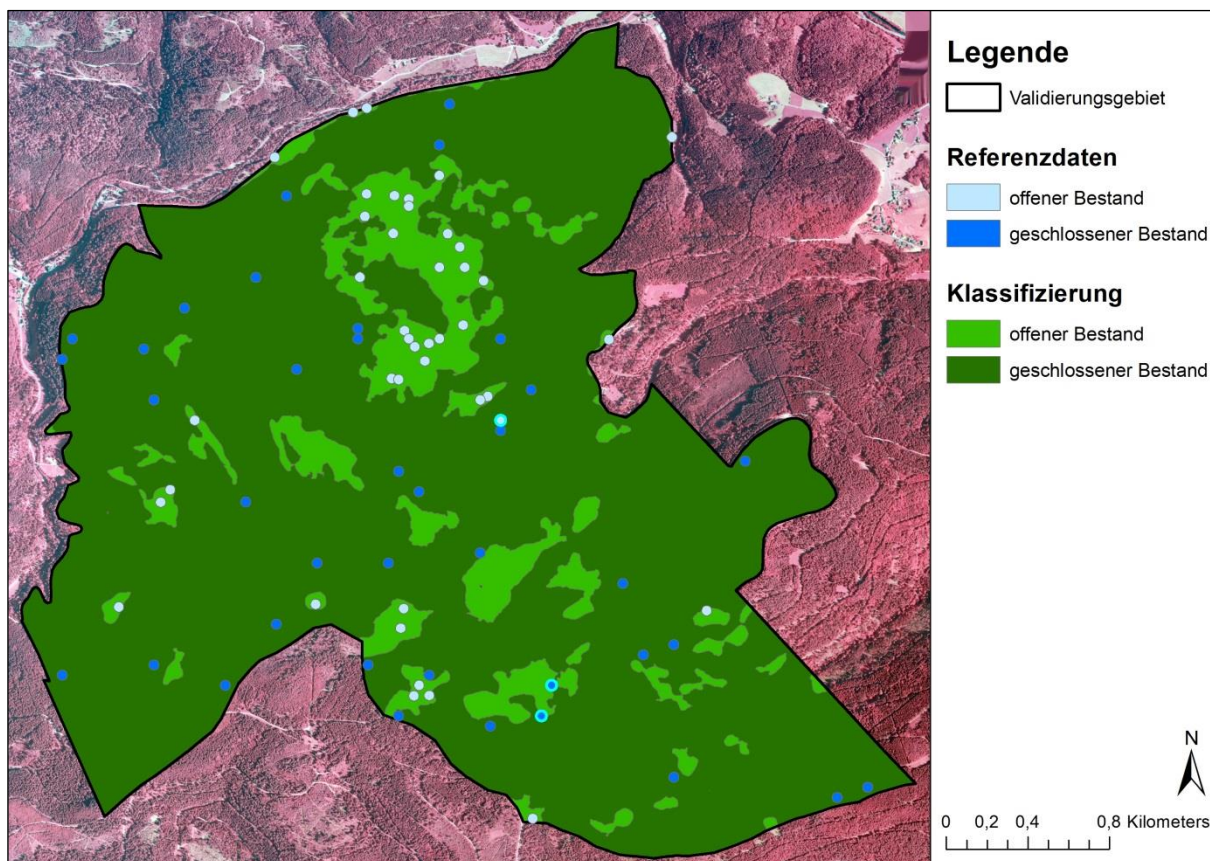


Abbildung 20: Validierung der Klassifizierung in offene und geschlossene Bestände. Plots mit Fehlklassifizierung sind hervorgehoben (hellblaue Umrandung).

⁴⁹ Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., Wulder, M. A., 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. Remote Sensing of Environment, 148 (2014): 42-57.

Tabelle 6: Konfusionsmatrix der Validierung offener und geschlossener Bestände mit Angaben zur Nutzer-, Produzenten- und Gesamtgenauigkeit.

	Klasse	Referenzdaten			Nutzer- genauigkeit
		Offener Bestand	Geschlossener Bestand	Summe	
Automatische Klassifikation	Offener Bestand	11,88% (41 Plots)	0,58% (2 Plots)	12,46% (43 Plots)	95,35%
	Geschlossener Bestand	2,37% (1 Plot)	85,18% (36 Plots)	87,54% (37 Plots)	97,30%
	Summe	14,24% (42 Plots)	85,76% (38 Plots)	100% (80 Plots)	<i>Gesamt- genauigkeit</i>
	<i>Produzenten- genauigkeit</i>	83,38%	99,32%	<i>Gesamt- genauigkeit</i>	97,05%

Für die Lückenvalidierung mussten die als Referenzdaten genutzten 120 Stichprobenplots (Abschnitt 1.1.3) zuerst bereinigt werden, da sie ursprünglich für ein anderes Projekt⁵⁰ erstellt worden waren. Dort weicht das Klassifizierungsergebnis für offene und geschlossene Bestände vom Ergebnis aus dem F³-Projekt ab. Deshalb wurden die zufälligen Stichprobenplots auf solche reduziert, die nach der Klassifizierung im F³-Projekt innerhalb der Klasse „geschlossener Bestand“ lagen. Dadurch wurde die Anzahl der Stichprobenplots auf 116 reduziert. Zusätzlich wurden alle nicht-Lücken-Kreise (150 Kreise) der verbliebenen Stichprobenplots visuell im Orthophoto überprüft. Kreise, die eindeutig im Bereich einer Lücke lagen, z. B. auf einem Weg oder im Bereich einer manuell kartierten Lücke, wurden markiert und von der Validierung ausgeschlossen. Insgesamt waren davon 13 Kreise betroffen. Für einige Kreise ergaben sich bei der visuellen Überprüfung Schwierigkeiten, die auf die mäßige Bildqualität (Schlagschatten) zurückzuführen sind. Für alle Kreise wurde daher festgehalten, ob die korrekte Zuordnung zur Klasse „nicht Lücke“ sicher oder unsicher ist. Auch für die Validierung der Bestandeslücken wurden die Ergebnisraster der automatischen Klassifizierung in eine Vektordatei umgewandelt, wobei allerdings die Klasse „Lücke“ beibehalten wurde. Die 116 Stichprobenflächen, in denen die Kartierung der Referenzdaten erfolgte (Beispiel siehe Abbildung 21), wurden mit den klassifizierten Polygonen verschnitten und es wurde berechnet, zu welchem Anteil die Referenzpolygone mit der Klasse Lücke überlappen. Die Ergebnisse wurden mit dem Flächenanteil der jeweiligen Klasse („Lücke“ und „keine Lücke“) gewichtet⁴⁹ und es wurde eine Konfusionsmatrix abgeleitet (Tabelle 7). Dabei müssen mindestens 20% einer stereoskopisch kartierten Lücke mit einer automatisch klassifizierten Lücke überlappen, damit die Lücke als erfasst gilt. Im Gegenzug gelten nicht-Lücken-Kreise, die sich weniger als 20% mit der Klasse Lücke überlappen, als korrekt erfasst. Mit der Einführung eines Überlappungsschwellwertes soll eine Verzerrung des Ergebnisses durch kleinflächige Überschneidungen vermieden werden.

⁵⁰ Zielewska-Büttner, K., Adler, P., Ehmann, M., Braunisch, V., 2016. Automated Detection of Forest Gaps in Spruce Dominated Stands Using Canopy Height Models Derived from Stereo Aerial Imagery. Remote Sensing, 2016, 8, 175.

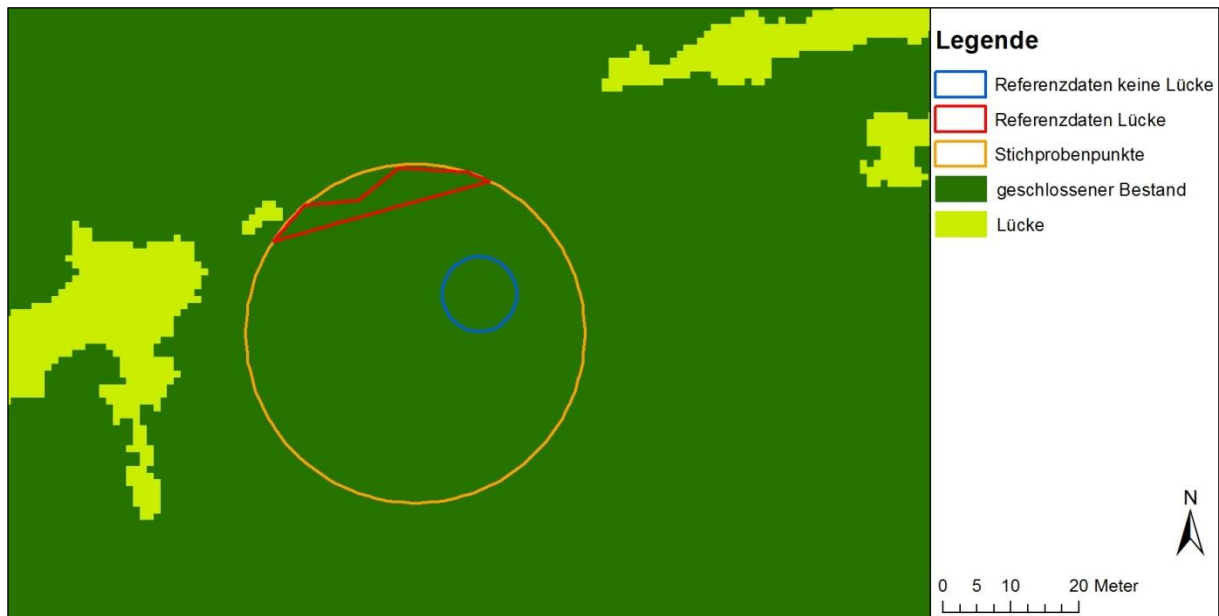


Abbildung 21: Beispiel Lückenvalidierung: Stichprobenplots mit stereoskopisch erfasster Lücke und nicht-Lücke-Kreisen. Ergebnis der automatischen Klassifizierung im Hintergrund.

Die Gesamtgenauigkeit der Lückenvalidierung (Tabelle 7) beträgt 87% mit einer Nutzergenauigkeit der Lückenerkennung von 71,4%. Es werden 14 Lücken automatisch klassifiziert, die tatsächlich aber nicht vorhanden sind. Die Produzentengenauigkeit für die Lückenerfassung zeigt mit 34,6%, dass nur etwas mehr als ein Drittel der tatsächlich vorhandenen Lücken auch erfasst wird. Dies deutet auf merkbare Unterschiede in der Lückenabgrenzung zwischen stereoskopischer Bildinterpretation und automatischer Klassifizierung hin. Teilweise kann dies auf Ungenauigkeiten in der Stereomessung zurückgeführt werden. Subjektive Einschätzung sowie eine geringe Anzahl von Stereo-Modellen und eine ungünstige Aufnahmegeometrie durch die 60% Längs- und 30% Querüberlappung können zu von den tatsächlichen Verhältnissen abweichenden, Lückenkartierungen führen. Dies wurde auch bei der visuellen Überprüfung der nicht-Lücken-Kreise im Orthophoto deutlich. Wie bereits oben beschrieben, lagen im Orthophoto manche Kreise eindeutig im Bereich von Lücken, die allerdings nicht kartiert worden waren.

Tabelle 7: Konfusionsmatrix der Lückenvalidierung mit Angaben zur Nutzer-, Produzenten- und Gesamtgenauigkeit. Eine Lücke gilt als korrekt erfasst ab einer Überlappung von 20% zwischen Referenzdaten und automatisch klassifizierten Daten.

Klasse		Referenzdaten			Nutzer-genauigkeit
		Lücke	Keine Lücke	Summe	
Automatische Klassifikation	Lücke (Overlap = 1)	5,68% (35 Flächen)	2,27% (14 Flächen)	7,96% (49 Flächen)	71,43%
	Keine Lücke (Overlap = 0)	10,76% (18 Flächen)	81,29% (136 Flächen)	92,04% (154 Flächen)	88,31%
	Summe	16,44% (53 Flächen)	83,56% (150 Flächen)	100% (203 Flächen)	Gesamt-genauigkeit
	Produzenten-genauigkeit	34,57%	97,28%	Gesamt-genauigkeit	86,97%

Zusätzlich beeinflusst die Qualität der Fernerkundungsdaten die Qualität der Lückenerfassung. Von allen 150 nicht-Lücken-Kreisen wurden bei der visuellen Überprüfung im Orthophoto 20 Kreise als unsicher markiert. Sechs dieser nicht-Lücken-Kreise gehören zu den 14 Kreisen, die fälschlicherweise als Lücken klassifiziert wurden (Tabelle 7). Einige dieser Kreise wurden in der aus

dem Image Matching stammenden, ungefilterten Punktwolke in der Software CloudCompare⁵¹ genauer visuell untersucht. Dabei waren die einzelnen Punkte mit ihren entsprechenden RGB-Farbwerten eingefärbt. Es zeigten sich eindeutige Matching-Fehler, z. B. wurden beleuchtete Kronenteile auf dem Boden angezeigt, was zu einer automatisch erfassten Lücke führte. Auch die im Orthophoto auftretenden Artefakte und Bildbereiche, in denen das Bild verschmiert erscheint, deuten auf Matching-Fehler hin, die zu einer überhöhten Erfassung von Lücken führen können. Schlagschatten und geringe Überlappung (60% Längs- und 30% Querüberlappung) der Luftbilder fördern das Auftreten von Matching-Fehlern. Trotz der vergleichsweise hohen Gesamtgenauigkeit von knapp 87% kann die hier vorgestellte Lückenerkennung Hinweise auf das Vorkommen von nur 35% der Lücken geben, die auch visuell erkennbar sind. Gleichzeitig werden jedoch relativ viele Flächen fälschlicherweise als Lücken klassifiziert. Dies unterstreicht die Bedeutung von qualitativ hochwertigen Fernerkundungsdaten für die Ableitung forstlicher Strukturparameter. Bei Daten, die mit höherer Überlappung (mindestens 80% Längs- und 30% Querüberlappung) und zu Tageszeiten befliegen werden, die große Schlagschatten vermeiden, ist eine bessere Lückenerkennung möglich, wie das Ergebnis der Validierung mit ALS-Daten zeigt. Die dort verwendeten Luftbilddaten wurden mit einer Längsüberlappung von 80% und einer Querüberlappung von 30% aufgenommen.

1.3.4 Lockere Althölzer bzw. Überhälterbestände

Aufgelockerte Bestände mit einem großen Anteil von Althölzern, z. B. Überhälterbestände oder lockere Althölzer, sind aus Sicht des Waldmanagements und auch des Waldnaturschutzes von großer Bedeutung. Das charakteristische Merkmal dieser Bestände sind locker oder einzeln stehende, erwachsene, hohe Bäume oder Baumgruppen, deren Kronen sich nicht berühren. Dies führt zu ausgeprägten Schwankungen der Vegetationshöhe auf relativ kleiner Fläche. Diese Schwankungen werden genutzt, um Hinweise auf das Vorkommen solcher Bestände aus normalisierten digitalen Oberflächenmodellen (nDOM) abzuleiten. Dabei können mit den verwendeten fernerkundungsbasierten Daten die beiden Bestandestypen „lockere Althölzer“ und „Überhälterbestände“ nicht differenziert werden, da diese sich vor allem durch ihre Herkunft und Bewirtschaftungsform unterscheiden. Überhälter sind Bäume, die nach der Nutzung eines Waldbestandes, z. B. als Samenbäume, zum Schutz der Verjüngung oder zur Starkholzproduktion, auf der Fläche belassen wurden. Die Auflockerung des Bestandes wird also künstlich und meist nach einem bestimmten Muster erzeugt. Lockere Althölzer hingegen können auch unabhängig von der Bewirtschaftung entstehen, z. B. durch natürlichen Ausfall mehrerer Bäume in Altbeständen. Die Bezeichnung „lockere Althölzer“ ist also weiter gefasst und beschreibt eine bestimmte Waldstruktur unabhängig von der Bewirtschaftungsform. Es wird daher im Folgenden der allgemeinere Begriff „lockere Althölzer“ verwendet.

Das im F³-Projekt entwickelte Verfahren zur Kartierung lockerer Altholzbestände ist im Software-Skript *lockere_althoelzer_F3.py*⁵² implementiert. Das offene Bestandsbild von Altholzbeständen, welches durch große isoliert stehende Bäume sowie einer Vielzahl von Lücken geprägt ist, resultiert in einer großen Heterogenität der im normalisierten Oberflächenmodell (nDOM) abgebildeten Baumhöhen. Die Heterogenität wird als Basis für die Ausweisung lockerer Althölzer genutzt und mittels der Standardabweichung der Höhen innerhalb einer Nachbarschaft von 20 x 20 m quantifiziert. Alle Pixel mit einer Standardabweichung > 7 werden als potentielle lockeren Althölzer ausgewiesen. Diese enthalten jedoch auch noch Kleinstflächen (< 1 ha) sowie Flächen entlang von Forstwegen oder anderen Bestandsgrenzen, die aufgrund des Nebeneinanders von hohen Bäumen und vegetationsfreien bzw. niedrig bewachsenen Flächen ebenfalls eine große Heterogenität der Höhenwerte aufweisen. Um die Klassifikation dieser Flächen zu korrigieren, wird für alle Pixel

⁵¹ <https://www.cloudcompare.org/> [letzter Zugriff 17.11.2020]

⁵² Python-Skript *lockere_althoelzer_F3.py*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021].

mittels einer Moving Window-Analyse geprüft, ob der Anteil potentieller „lockerer Althölzer“-Pixel in ihrer Nachbarschaft (Radius: 40 m bzw. 2 Pixel) größer 50% ist. Ist dies der Fall, wird für das betroffene Pixel angenommen, dass es tatsächlich zur Klasse „lockere Althölzer“ gehört. Andernfalls verliert es diese Klassenzugehörigkeit. Abschließend werden Fläche < 1 ha und solche, die eine Breite von 60 m unterschreiten, ebenfalls aus der Klasse „lockere Althölzer“ entfernt. Abbildung 22 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der resultierenden Karte im Vergleich zum nDOM.

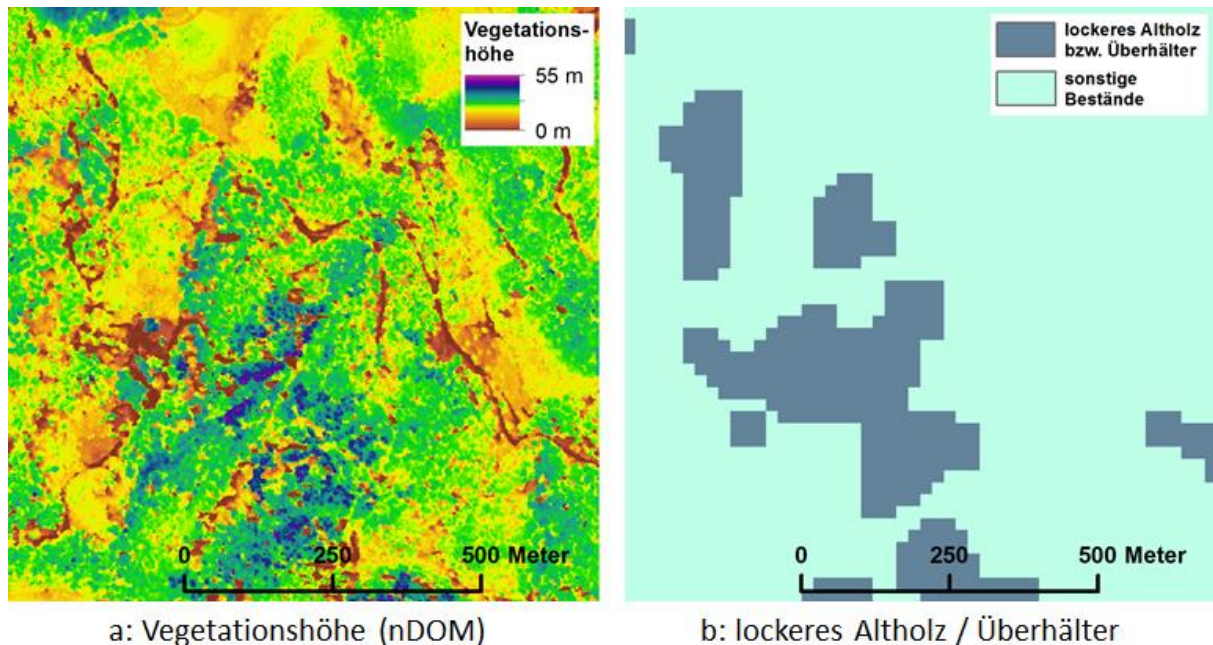


Abbildung 22: Erfassung lockerer Althölzer: a) Ausschnitt des normalisierten Oberflächenmodells, das zur Kartierung von lockeren Altholzbeständen verwendet wurde; b) nach dem im F³-Projekt entwickelten Verfahren erstellte Karte.

1.4 Arbeitsbereich 4: Ableitung von Holzvorrats- und Biomassedaten

Für die nachhaltige Bewirtschaftung des Waldes sind Daten über die räumliche Verteilung von Holzvorräten und der Biomasse eine wichtige Basis. Insbesondere in Zeiten häufiger Kalamitäten durch Sturm und Insekten (z. B. Borkenkäfer) stellen sie eine wertvolle Grundlage für die Planung von Maßnahmen der Holzernte, der Verjüngung, des Waldschutzes und des Natur- und Klimaschutz dar. Die Gewinnung von Informationen über den aktuellen Holzvorrat ist deshalb seit jeher eines der wichtigsten Ziele von Waldinventuren. Auch flächendeckende Informationen über Biomasse haben große Bedeutung gewonnen, insbesondere für die Erfassung von Kohlenstoffvorräten und für Untersuchungen zur CO₂ Speicherfähigkeit des Waldes.

Um flächendeckende Daten bezüglich Holzvorrat und Biomasse abzuleiten, wurde ein Verfahren entwickelt, das basierend auf aus normalisierten digitalen Oberflächenmodellen (nDOM) abgeleiteten Parametern der Bestandesstruktur in Verbindung mit Baumartenkarten und Standortdaten Vorräte von Holz und Biomasse flächendeckend modelliert.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Verfahren vorgestellt, die entwickelt wurden, um die für die Modellierung von Holzvorrat und Biomasse benötigten Datensätze Baumartenkarte (Abschnitt 1.4.1) und Standortinformation (Abschnitt 1.4.2) zu generieren bzw. aufzubereiten. Abschnitt 1.4.3 erläutert dann die Ableitung von Bestandesstrukturparametern aus nDOM-Daten sowie die Integration dieser Datensätze zum Zwecke der Modellierung.

1.4.1 Gewinnung von Baumarteninformationen aus Sentinel-2-Satellitendaten

Holzvorrat und Biomasse eines Baumes sind nicht nur von BHD und Höhe abhängig, sondern auch von der baumartspezifischen Allometrie. Um die Genauigkeit der Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse (Abschnitt 1.4.3) durch die Bereitstellung von Hilfsinformationen zu verbessern, wurde daher ein Verfahren zur fernerkundungsbasierten Baumartenklassifizierung entwickelt. Wie bereits in Abschnitt 1 angeführt, wurde von der ursprünglichen Planung, für diese Aufgabe digitale Orthophotos zu nutzen, abgewichen. Stattdessen wurden Sentinel-2-Satellitendaten genutzt, die basierend auf wissenschaftlichen Studien^{53,54} sowie eigenen Erfahrungen für diesen Zweck besser geeignet scheinen.

Das F³-Verfahren zur Baumartenklassifikation verwendet Sentinel-2-Daten eines einzigen Aufnahmezeitpunkts. Durch die Beschränkung auf einen Zeitpunkt im Hochsommer (Mitte Juni bis Mitte August) werden Schwierigkeiten bei der Baumartendifferenzierung durch räumlich variierende phänologische Entwicklungen minimiert.

Das entwickelte Verfahren gliedert sich in zwei übergeordnete Schritte: (a) Vorprozessierung/Aufbereitung der Sentinel-2-Satellitendaten und (b) Ableitung der Baumarteninformation. Das Verfahren ist nachfolgend zusammenfassend beschrieben. Eine detailliertere Beschreibung ist in der Dokumentation zu Meilenstein M5 „Verfahren zur Ableitung von Baumarteninformationen aus Fernerkundungsdaten“ (Anhang 5 oder Download⁵⁵) zu finden.

(a) Vorprozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten

Ziel der Vorprozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten ist die Gewinnung einer standardisierten Datengrundlage, die zur Erstellung von Baumartenkarten genutzt werden kann. Die entwickelten Schritte der Prozessierung wurden daher für die Analyse von Waldflächen optimiert. Zur Vorprozessierung gehören das Erstellen einer Wolkenmaske (inklusive Wolkenschatten), die Korrektur atmosphärischer Einflüsse, das Resampling der 20 m Bänder der Sentinel-2-Satellitendaten auf 10 m Auflösung, eine topographische Korrektur und die Berechnung von Vegetationsindizes.

Als Eingangsdaten werden Sentinel-2 Level-1C⁵⁶ Satellitendaten benötigt. Diese Daten sind orthorektifiziert, aber noch nicht atmosphärisch und topographisch korrigiert und können z. B. über den Copernicus Open Access Hub⁵⁷ kostenfrei bezogen werden. Neben den Sentinel-2-Satellitendaten wird ein digitales Geländemodell (DGM) mit einer Auflösung von 10 m oder höher benötigt, um eine topografische Korrektur der Satellitendaten zu ermöglichen (siehe unten).

⁵³ Zeug, G., Immitzer, M., 2019: Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Satellitenfernerkundungsdaten (Copernicus) für Zwecke der Ableitung ökologischer Belastungsgrenzen und der Verifizierung von Indikatoren der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Abschlussbericht, Dessau-Roßlau, 101 Seiten. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-27_texte_16-2019_copernicus.pdf> [letzter Zugriff 22.10.2020].

⁵⁴Fassnacht et al., 2016: Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 186, pp. 64-87.

⁵⁵ M5 – „Verfahren zur Ableitung von Baumarteninformationen aus Fernerkundungsdaten“: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

⁵⁶ Sentinel-2 Level-1C: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> [letzter Zugriff 18.11.2020]

⁵⁷ Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> [letzter Zugriff 18.11.2020]

Für die Entwicklung des F³-Verfahrens zur Vorprozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten, wurden verschiedene Softwarepakete getestet: Sen2Cor⁵⁸, ERDAS Imagine ATCOR⁵⁹, FORCE⁶⁰, MAJA⁶¹, ERDAS Imagine NoClouds⁶² und Fmask 4.0⁶³. Nach visueller Qualitätsansprache, um augenscheinlich „schlechte“ Ergebnisse zu entfernen, wurden alle Programme, die verwertbare Ergebnisse lieferten, in vollständigen Prozessierungsketten miteinander kombiniert und anhand der Güte des Baumartenklassifikationsergebnisses beurteilt. Hierbei zeigte sich, dass bei der topographischen Korrektur mit den verfügbaren Software-Programmen keine zufriedenstellenden Ergebnisse generiert werden konnten. Für die topographische Korrektur wurde daher das R-Paket *RStoolbox*⁶⁴ genutzt und einer der dort implementierten Algorithmen modifiziert. Basierend auf den Ergebnissen der Qualitätskontrolle wurde folgendes Verfahren für Vorprozessierung der Sentinel-2-Satellitebilddaten entwickelt:

1. Erstellung einer **Wolkenmaske** aus den Level-1C-Daten mit der Software Fmask 4.0⁶³. Es wurden Software-Einstellungen (Abbildung 23) ermittelt, die für die meisten Bilder, nach visueller Überprüfung, in zufriedenstellenden Wolkenmasken resultieren. Die Einstellungen wurden so gewählt, dass der Wolkenanteil eher überschätzt wird, also tendenziell mehr Wolken detektiert werden, als im Bild vorhanden sind. Dadurch wird verhindert, dass Gebiete mit Wolkeneinfluss später in der Klassifizierung der Baumarten verwendet werden und Fehlklassifikationen verursachen. Es wird empfohlen, die generierte Wolkenmaske mit der tatsächlichen Verteilung von Wolken im Bild visuell zu vergleichen und die Einstellungen des Programms Fmask anzupassen, sollten die Wolken nicht ausreichend genau erfasst worden sein.

⁵⁸ Sen2Cor: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> [letzter Zugriff 19.11.2020]

⁵⁹ ERDAS Imagine ATCOR: <https://www.geosystems.de/en/products/atcor-workflow-for-imagene/overview> [letzter Zugriff 19.11.2020]

⁶⁰ FORCE: <https://www.uni-trier.de/index.php?id=63673> [letzter Zugriff 19.11.2020]

⁶¹ MAJA: <https://logiciels.cnes.fr/en/node/58?type=desc> [letzter Zugriff 19.11.2020]

⁶² ERDAS Imagine NoClouds: <https://www.geosystems.de/produkte/imagene-noclouds> [letzter Zugriff 19.11.2020]

⁶³ Fmask 4.0: <https://github.com/gersl/fmask> [letzter Zugriff 19.11.2020]

⁶⁴ R-Paket *RStoolbox*: <https://bleutner.github.io/RStoolbox/> [letzter Zugriff 19.11.2020]

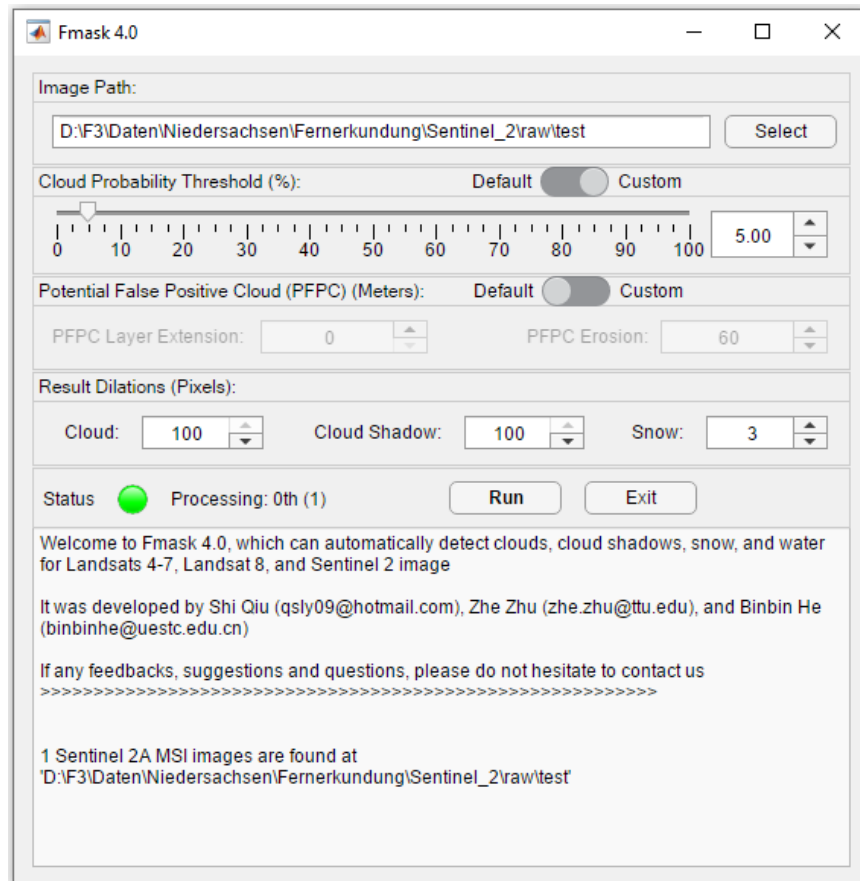


Abbildung 23: GUI des Programms Fmask 4.0 mit den empfohlenen Einstellungen zur Erzeugung einer Sentinel-2-Wolkenmaske.

- Die Software Sen2Cor⁶⁵ wurde verwendet, um eine **Atmosphären- sowie Cirruskorrektur** der Sentinel-2-Satellitendaten durchzuführen. Die Korrektur reduziert den Einfluss atmosphärischer Störungen auf die Pixelwerte der Satellitendaten. Sie kann entweder als Plugin über die Software SNAP (Sentinels Application Platform)⁶⁵ genutzt oder als eigenständiges Programm über die Kommandozeile ausgeführt werden. Im ersten Fall stellt das Sen2Cor-Plugin (Abbildung 24) für die Software SNAP eine grafische Benutzeroberfläche bereit, in der alle Einstellungen (Abbildung 25) getätigt werden können. Der Vorteil besteht in der dadurch leichteren Handhabung der Software. Bei der Nutzung von Sen2Cor als eigenständige Software muss die Software SNAP nicht installiert werden. Zudem werden alle Einstellungen im XML-Format gespeichert, was eine weitestgehend automatisierte Prozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten ermöglicht.

⁶⁵ Sentinels Application Platform (SNAP): <http://step.esa.int/main/download/snap-download/> [letzter Zugriff 19.11.2020]

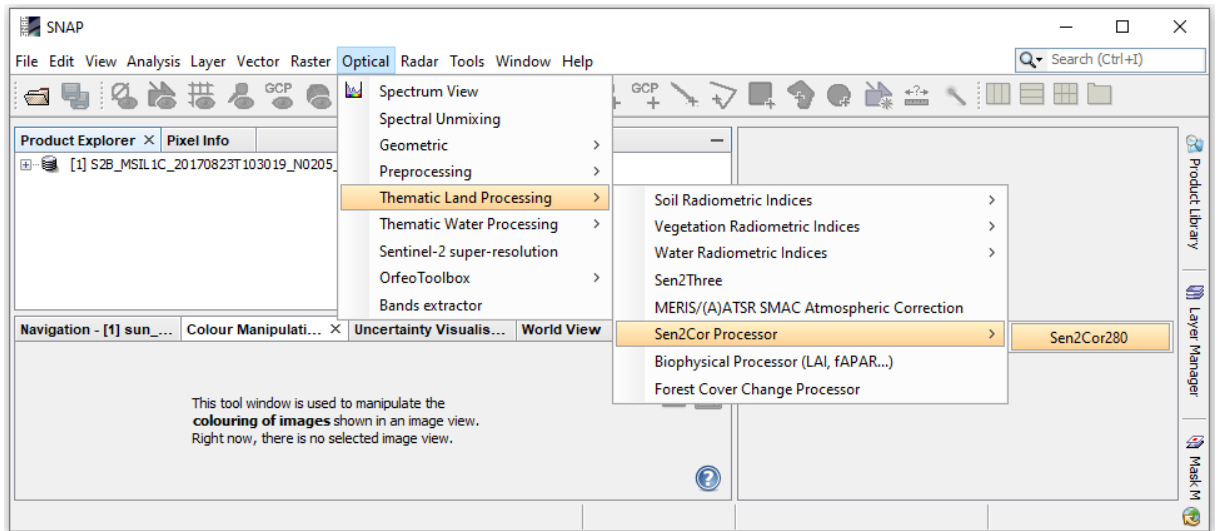


Abbildung 24: Öffnen des Sen2Cor 2.8-Plugins in der Software SNAP.

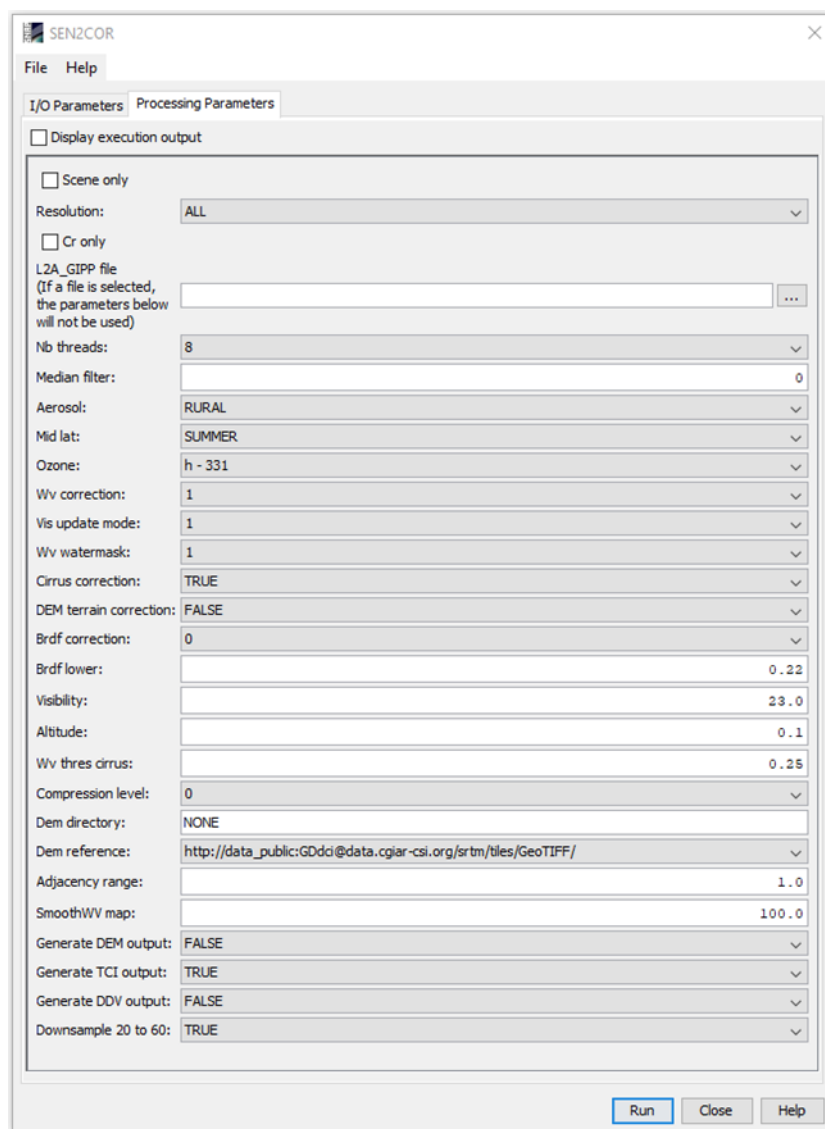


Abbildung 25: GUI des Sen2Cor-Plugins mit den für die atmosphärische Korrektur empfohlenen Einstellungen.

3. **Resampling** der 20 m-Bänder auf 10 m-Auflösung: Sentinel-2-Satellitendaten beinhalten 13 Spektralbänder, die in unterschiedlichen Auflösungen aufgezeichnet wurden. Mit Hilfe des DSen2⁶⁶ Python Skripts werden die in 20 m-Auflösung vorliegenden Bänder auf eine Auflösung von 10 m hochskaliert. Hierbei werden die 20 m-Pixel mittels eines *Deep Neural Networks* unter Zuhilfenahme der 10 m-Bänder spektral entmischt.
4. Durchführung der **topographischen Korrektur**, um Beleuchtungsunterschiede innerhalb einer Sentinel-2-Szene auszugleichen, die durch die Topographie des Geländes bedingt sind (Abbildung 26). Hierzu wurde das R-Skript *,S2_topocorr.R'*⁶⁷ erstellt, das auf die R-Pakete *,raster'*⁶⁸, *,RStoolbox'*⁶⁴ und *,plotKML'*⁶⁹ zugreift. Das R-Skript ist in drei Teile gegliedert: (1) Das digitale Geländemodell wird auf die Ausdehnung der Sentinel-2-Kachel zugeschnitten und an die 10 m-Auflösung der Sentinel-2-Satellitendaten angepasst (Resampling). (2) Die Wolken- und Wolkenschattenflächen in der Sentinel-2-Szene werden ausmaskiert und die topographische Korrektur der Sentinel-2-Satellitendaten wird mit einer modifizierten Variante der Minnaert-Funktion durchgeführt. Die Modifikation reduziert den Korrekturfaktor k der Minnaert-Funktion (siehe Formel 5 in Riaño et. al 2003⁷⁰) um 40%. Dies verhindert, dass es zu Überkorrektureffekten kommt, die dazu führen, dass dunkle Bildbereiche zu stark aufgehellt werden. Die Korrektur wird stratifiziert nach Hangneigungsklassen durchgeführt. Für jedes Stratum wird ein eigener Korrekturfaktor k berechnet. (3) Berechnung von 16 Vegetationsindizes als zusätzliche Eingangsdaten in die Baumartenklassifizierung (siehe Abschnitt B.3.4 in Anhang 5).

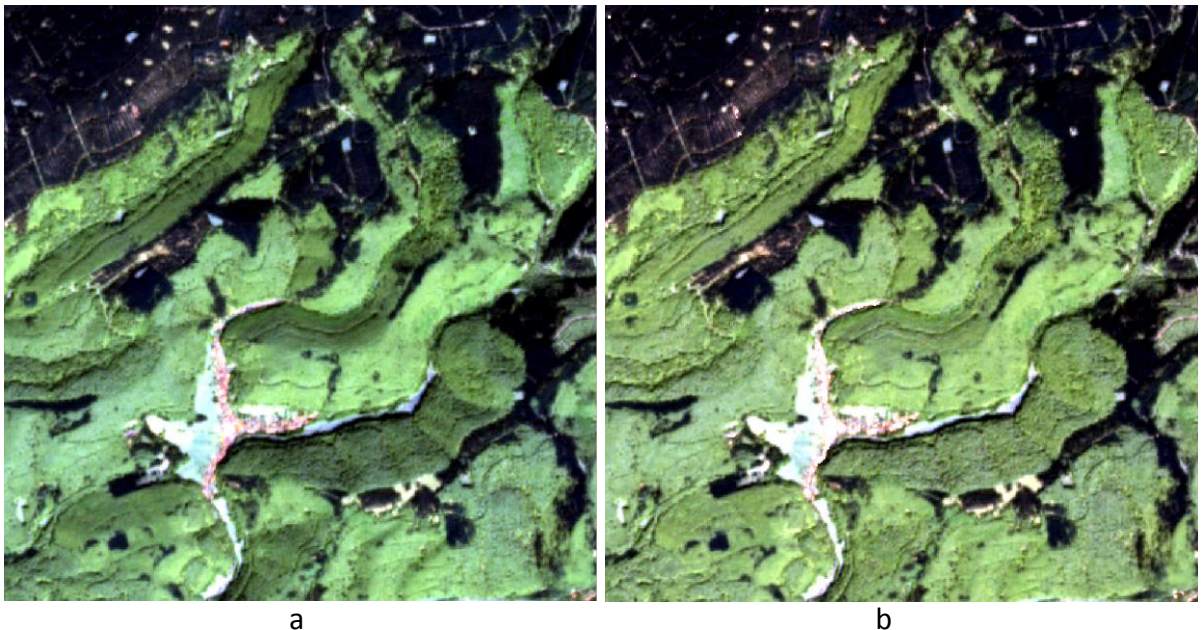


Abbildung 26: Ausschnitt aus Sentinel-2-Kompositbild (Bänder SWIR2, SWIR1, RedEdge1) vor (a) und nach (b) topographischer Korrektur.

⁶⁶ Informationen zu DSen2: <https://arxiv.org/pdf/1803.04271.pdf> [letzter Zugriff 19.11.2020] und <https://github.com/lanha/DSen2> [letzter Zugriff 19.11.2020]

⁶⁷ R-Skript *,S2_topocorr.R'*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

⁶⁸ R-Paket *,raster'*: <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/> [letzter Zugriff 19.11.2020]

⁶⁹ R-Paket *,plotKML'*: <https://CRAN.R-project.org/package=plotKML> [letzter Zugriff 19.11.2020]

⁷⁰ Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Aguado, I., 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(5):1056 – 1061.

(b) Ableitung von Baumarteninformationen aus Sentinel-2-Satellitendaten

Das F³-Verfahren zur Ableitung von Baumarteninformationen ist im R-Skript *„Baumarten_Sentinel2_F3.R“*⁷¹ implementiert. Die Eingangsdaten sind die nach dem oben beschriebenen Verfahren vorprozessierten Sentinel-2-Satellitendaten, Referenzdaten als Punkt-Shapefile, die das Vorkommen von Baumarten bzw. Baumartengruppen räumlich verorten, sowie eine Waldmaske im Raster-Format, die Wald (Wert „1“) und Nicht-Wald (Wert „NA“) unterscheidet.

Für die Auswahl der Referenzdaten wurde im F³-Projekt folgende Empfehlung erstellt: Es sollte darauf geachtet werden, dass die Referenzdaten (a) alle zu erfassenden Baumarten abdecken und (b) für jede Baumart eine ausreichend große Menge an Datenpunkten enthalten. Des Weiteren müssen (c) alle Datenpunkte reine Klassen darstellen, also keine Mischklassen enthalten, und (d) sollten Aufnahmezeitpunkt der Referenzdaten und Aufnahmezeitpunkt der Satellitendaten nicht zu weit auseinanderliegen. Im Idealfall handelt es sich bei den Referenzdaten um Daten von terrestrischen Erhebungen, welche auch aus Stichprobeninventuren abgeleitet werden können. Zur Nutzung des F³-Verfahrens und insbesondere zur Durchführung der Quantifizierung der Kartengenauigkeit ist es wichtig, dass die Referenzdatenpunkte unabhängig voneinander ausgewählt wurden und jeder Datenpunkt einem einzelnen Pixel der Sentinel-2-Satellitendaten zugeordnet werden kann. Werden pro Datenpunkt mehrere Pixel ausgewählt, z. B. alle Pixel innerhalb eines Polygons, können die hier implementierten Berechnungen der Kartengenauigkeiten in falschen Ergebnissen resultieren.

Im Rahmen des F³-Projekts wurden Forsteinrichtungsdaten (Bestandes- und Betriebsinventuren) der Landesforstbetriebe als Referenzdaten verwendet. In den niedersächsischen Testgebieten stand eine ausreichende Anzahl Stichprobenpunkte der Betriebsinventuren zur Verfügung, für die Baumartenkartierung in Baden-Württemberg wurde darüber hinaus auf Bestandsdaten der Forsteinrichtung zurückgegriffen. In den Forsteinrichtungsdaten wurden Reinbestände der Zielbaumarten identifiziert. Innerhalb dieser Bestandespolygone wurden alle Pixel ausgewählt, die einen Abstand von mind. 20 m zu Bestandsgrenzen und Infrastrukturobjekten, wie Wege und Straße, haben. Da keine ausreichende Anzahl an Polygonen zur Verfügung stand, die es erlaubte, pro Polygon nur ein Pixel für Training und Validierung auszuwählen, mussten für einige Baumarten alle in den Polygonen verfügbaren Pixel verwendet werden. Die verwendeten Validierungsdaten sind daher nicht unabhängig voneinander, wodurch die Validierungsergebnisse der baden-württembergischen Baumartenklassifizierung verzerrt sein könnten. Die Polygone (und die dazugehörigen Pixel) wurden in Trainings- und Testpolygone unterteilt, um eine geographische Abhängigkeit zwischen Trainings- und Testdaten zu vermeiden.

Das R-Skript *„F3-Baumarten_Sentinel2“* führt folgende Schritte durch:

1. Einlesen der Sentinel-2-Satellitendaten
2. Einlesen der Referenzdaten
3. Verschneiden der Sentinel-2-Satellitendaten und der Referenzdaten zur Extraktion der Sentinel-2-Pixelwerte
4. Trainieren eines Random Forest-Klassifikators
5. Erstellen einer Baumarten- bzw. Baumartengruppenkarte mit 10 m-Auflösung
6. Erstellen einer Baumarten- bzw. Baumartengruppenkarte mit 20 m-Auflösung (als Eingangsdatensatz für die Modellierung von Holzvorrat und Biomasse)
7. Erstellen einer Genauigkeitsmatrix und Berechnen der Kartengenauigkeiten

Das Ergebnis besteht aus drei Dateien: (a) Baumartenkarte mit 10 m-Auflösung, (b) Baumartenkarte mit 20 m-Auflösung und (c) Tabelle mit den Ergebnissen der Validierung (Genauigkeitsmatrix,

⁷¹ R-Skript *„F3-Baumarten_Sentinel2.R“*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

Kartengenauigkeiten). Das Ausgabe-Koordinatensystem ist UTM Zone 32N WGS84 (EPSG-Code 32632).

(c) Validierungsergebnisse aus dem F³-Projekt

Die Genauigkeit der Baumartenklassifizierung ist zum einen von der Qualität der Satellitendaten abhängig, zum anderen aber auch stark von Qualität und Quantität der verfügbaren Referenzdaten beeinflusst. Die im Folgenden dargestellten Validierungsergebnisse der Baumartenklassifikation der F³-Projektgebiete können daher nur als illustrierende Beispiele dienen. Mit anderen Satellitendaten und anderen Referenzdaten durchgeführte Klassifikationen können höhere aber auch niedrigere Genauigkeiten erreichen. Dies wird auch daran deutlich, dass die Baumartenkarten der Projektgebiete keine einheitliche Genauigkeit aufweisen, sondern die Gesamtgenauigkeiten zwischen 57,1% (Baden-Württemberg), 74,1% (Heide), 76,7% (Solling) und 85,8% (Harz) schwanken. Auch Produzenten und Nutzergenauigkeiten der einzelnen Baumarten variieren mitunter stark von Gebiet zu Gebiet. In Solling und Harz erreichen nur Buche und Fichte Produzentengenauigkeiten über 80%, die Produzentengenauigkeiten der anderen Baumarten liegen unter 50%. In der Heide werden nur Eiche (Produzentengenauigkeit 69,8%) und Kiefer (Produzentengenauigkeit 91,4%) gut erfasst. Die Produzentengenauigkeiten der anderen Baumarten liegen bei knapp über 50% (Douglasie) oder darunter.

Durch landesweite Baumartenreferenzdaten, die in Baden-Württemberg bereits zur Verfügung standen, war es möglich, das F³-Verfahren auch auf eine landesweite Anwendbarkeit zu testen. Die Validierungsergebnisse der landesweiten Baumartenkarte sind im Detail in Anhang 5 dargestellt. Mit dem landesweiten Ansatz wurde eine Gesamtgenauigkeit von 57,1% erzielt. Die höchste Nutzergenauigkeit erreicht die Baumart Kiefer (83,3%), gefolgt von der Roteiche (79,5%). Die Baumartengruppe der sonstigen Laubbäume weist die insgesamt geringste Genauigkeit (47,6%) auf. Dies ist durch die hohe Varianz innerhalb dieser Klasse zu erklären, die mehrere verschiedene Baumarten verschiedener Spektralsignaturen umfasst. Die beiden Nadelbaumarten Douglasie (Produzentengenauigkeit 18,2%) und Kiefer (Produzentengenauigkeit 22,7%) werden oft fälschlicherweise als Fichten klassifiziert. Ein Beispiel einer nach dem F³-Verfahren erstellten Baumartenkarte ist in Abbildung 27 dargestellt mit der dazugehörigen Konfusionsmatrix der Validierung in Tabelle 8. Weitere detaillierte Tabellen und Abbildungen zur Baumartenklassifizierung befinden sich in Anhang 5.

Die Validierung fand nur an Reinbeständen statt. Deshalb ist, über die hier angegebene Gesamtgenauigkeit der berechneten räumlich expliziten Baumartenkarte hinaus, zu beachten, dass die Genauigkeit im Bereich von Mischbeständen reduziert sein kann. Mischbestände führen auf der Ebene der Sentinel-2-Satellitendaten zu Mischpixeln, welche verschiedene Baumarten umfassen und deren Klassifikation eine große Herausforderung darstellt.

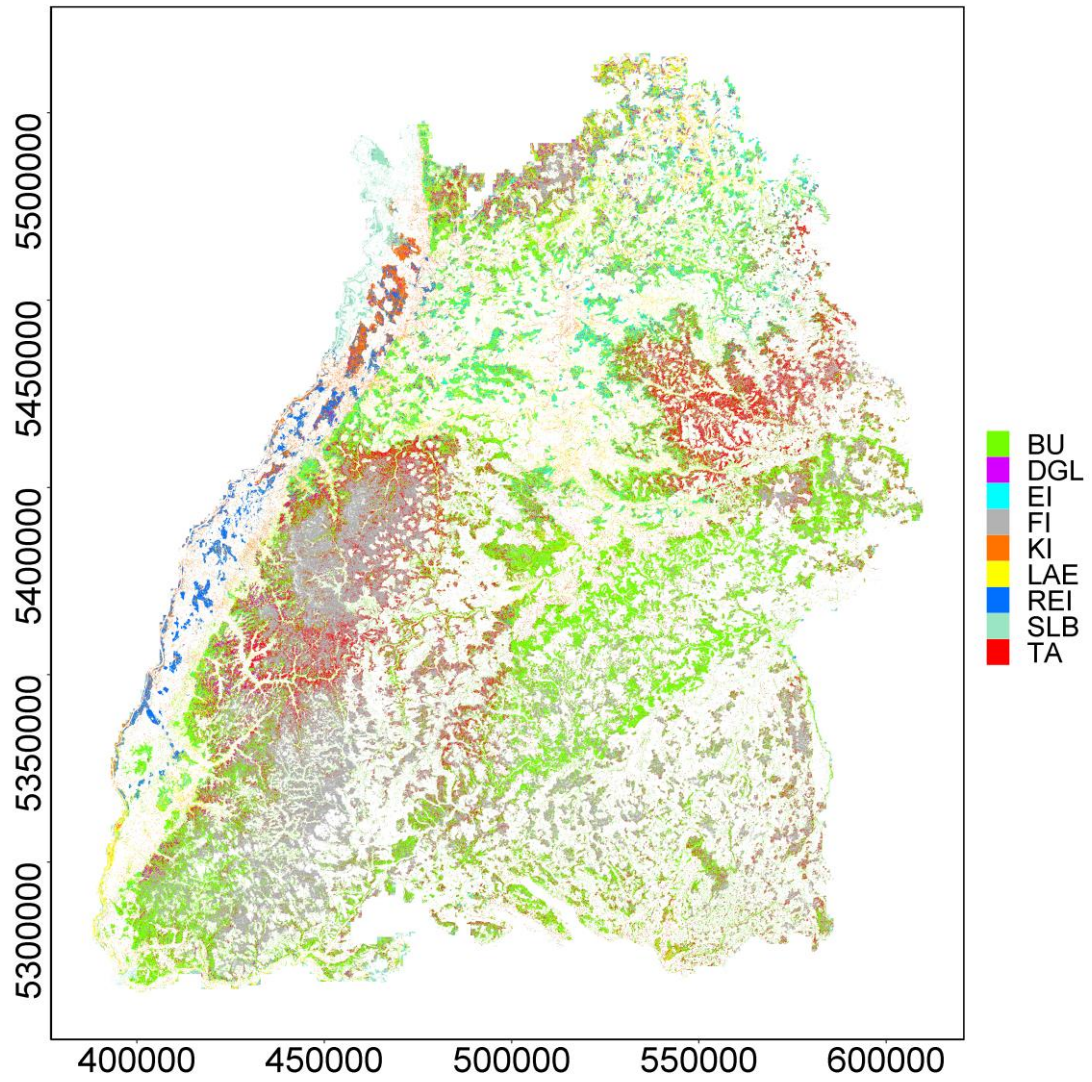


Abbildung 27: Baumartenverteilung in Baden-Württemberg als Beispiel einer nach dem F^3 -Verfahren erstellte Baumartenkarte. Baumartenkarten der anderen Testgebiete befinden sich Anhang 5.

Tabelle 8: Konfusionsmatrix der Baumartenklassifizierung für Baden Württemberg. Konfusionsmatrizen der anderen Testgebiete befinden sich in Anhang 5.

		Referenzdaten									Summe	Nutzer-Genauigkeit (%)
		TA	BU	LAE	SLB	FI	KI	DGL	EI	REI		
Klassifikation	Baumart											
	TA	91	3	18	9	3	1	8	3	1	137	66,4
	BU	0	86	13	28	3	1	8	22	2	163	52,8
	LAE	0	1	50	12	0	5	2	2	0	72	69,4
	SLB	0	1	3	10	0	1	2	0	4	21	47,6
	FI	0	1	11	8	92	45	33	0	0	190	48,4
	KI	0	3	0	2	0	40	1	2	0	48	83,3
	DGL	4	0	0	1	2	5	39	0	0	51	76,5
	EI	4	3	5	12	0	2	5	69	0	100	69,0
REI	0	2	0	18	0	0	2	2	93	117	79,5	
Summe		99	100	100	100	100	100	100	100	899	Gesamtgenauigkeit (%)	
Produzenten-Genauigkeit (%)		95,7	94,0	42,0	15,6	93,7	22,9	18,1	40,4	55,5	Gesamtgenauigkeit (%)	57,1

1.4.2 Herleitung standortbezogener Ertragspotentiale

Wie die Erstellung einer Baumartenkarte (Abschnitt 1.4.1), war das Ziel der Herleitung eines standortsbezogenen Ertragspotentials die Gewinnung von Zusatzinformationen, um die Genauigkeit der Vorhersage bei der Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse (Abschnitt 1.4.3) zu verbessern.

Im Rahmen des F³-Projekts wurden deshalb Recherchen zu bestehenden Verfahren und geeigneten Eingangsdaten zur Modellierung des Ertragspotentials durchgeführt. Diese ergab, dass zwar geeignete Datensätze und Verfahren in einigen Bundesländern existieren, deren Verfügbarkeit bzw. Anwendbarkeit jedoch auf das jeweilige Bundesland beschränkt ist. Durch die Recherche zeigte sich, dass bei Modellierung des Ertragspotentials Klimadaten (Temperatur, Niederschlag) und Bodendaten (Stickstoffeintrag, Basensättigung, Skelettgehalt) eine wichtige Rolle spielen. Zusätzlich sollte auch die Brauchbarkeit von Daten über die Topographie für die Modellierung des Ertragspotentials untersucht werden.

Gespräche mit Experten im Bereich der Bodenkunde machten deutlich, dass in den einzelnen Bundesländern keine entsprechenden, miteinander vergleichbaren Boden- und Standortdaten verfügbar sind. Die deutschlandweit verfügbare Bodenübersichtskarte 1:200 000 (BÜK 200)⁷² wurde nach näherer Überprüfung als nicht geeignet betrachtet, da diese keine relevanten Informationen, wie Stickstoffeintrag, enthält und andere Daten in einem nicht einheitlichen Format angegeben sind, was eine automatisierte Auswertung erschwert. Als alternativer Datensatz, der deutschlandweit und kostenfrei zu Verfügung steht, wurde der Datensatz ‚soilgrids‘ des International Soil Reference and Information Centre (ISRIC)⁷³ identifiziert. Diese Daten liegen in einer Auflösung von 250 m vor und werden mit Hilfe globaler Modelle abgeleitet. Sie beinhalten u.a. die Bodeninformationen Bodendichte („bulk density“), potentielle Kationenaustauschkapazität

⁷² BÜK 200:

https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/Bodenkundliche_Karten_Datenbanken/BUK200/buek200_node.html [letzter Zugriff 20.11.2020]

⁷³ ‚soilgrids‘-Bodendaten des International Soil Reference and Information Centre: <https://soilgrids.org/> [letzter Zugriff 04.11.2020].

(„cation exchange capacity“), Skelettgehalt („coarse fragments“) und Stickstoff („Nitrogen“), die das Ertragspotential eines Standortes beeinflussen könnten.

Die weitergehende Beschäftigung mit der Literatur zur „Modellierung des Ertragspotentials“ und der Austausch mit Experten der Modellierung von Standortseigenschaften ergab, dass eine fundierte und aussagekräftige Modellierung des Ertragspotentials in Anbetracht der sehr uneinheitlichen Datenlage den Rahmen des F³-Projekts sprengen würde. Zudem wäre aufgrund fehlender Referenzdaten eine Einschätzung der Genauigkeit der Vorhersage des Ertragspotentials und damit die Brauchbarkeit für die Holzvorrats- und Biomassemodellierung schwierig. Die Modellierung des Ertragspotentials von Standorten wurde aber von allen befragten Personen als wichtig eingestuft, da aus ihr ein Datensatz resultieren würde, der für verschiedene forstliche Anwendungen wichtige Informationen bereitstellen würde. Zu diesem Zweck würde es jedoch eines eigenen Projekts bedürfen, dessen Ziele die Integration verschiedener heterogener Datensätze zu Standorteigenschaften und die darauf aufbauende Modellierung der Leistungsfähigkeit der Standorte und einer adäquaten Validierung der Modellierung wären. Im Rahmen des F³-Projekts wurde in Folge der gewonnenen Einsichten darauf verzichtet, das Ertragspotential zu modellieren und stattdessen ein Verfahren implementiert, welches die verfügbaren Standortinformationen (Klima, Boden, Topographie) direkt als Prädiktoren in der Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse einbindet. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, dass das Verfahren flexibilisiert wird, da es an die regional verfügbaren Datensätze angepasst werden kann. In der Basisvariante können die im Folgenden beschriebenen deutschlandweit verfügbaren Basisdaten zu Boden und Klimaeigenschaften für die Modellierung verwendet werden. Sind jedoch für einzelne Bundesländer oder Regionen akkuratere Daten verfügbar, können diese ohne weiteres in die Modellierung eingebunden werden, um so die Modellgenauigkeiten gegenüber der Basisvariante zu verbessern.

Für folgende Basisdaten, die bundesweit einheitlich vorliegen, wurden Verfahren zur Aufbereitung implementiert:

1. Klima:

Der langjährige (1981 – 2011) mittlere Niederschlag⁷⁴ und das langjährige (1981 – 2011) Mittel der monatlich gemittelten Lufttemperaturmaxima in 2 m Höhe über dem Boden⁷⁵ wurden als 1 x 1 km-Raster kostenfrei vom Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes⁷⁶ bezogen. Diese Rasterdaten wurden aus Daten der DWD-Stationen und qualitativ gleichgestellten Partnernetzstationen in Deutschland abgeleitet. Da diese Daten im Gauß-Krüger Koordinatensystem vorlagen, wurden diese noch in das UTM Zone 32N ETRS89 Koordinatensystem, in dem auch die Modellierung von Holzvorrat und Biomasse stattfand (siehe Abschnitt 1.4.3), transformiert. Dies wurde mit dem ArcGIS-Tool ‚Project Raster‘ erreicht. Dabei wurde gleichzeitig die Auflösung auf 20 m erhöht und die Lage der 20 m-Pixel an die Lage der Pixel der Waldstrukturmetriken angepasst.

2. Boden:

Um die Bodeneigenschaften potentielle Kationenaustauschkapazität und Stickstoffvorrat (Indikatoren für die Nährstoffversorgung/Bodenfruchtbarkeit) sowie Lagerungsdichte als Indikator für die Durchwurzelbarkeit aus den Soilgrids-Daten berechnen zu können, wurden alle sechs

⁷⁴ DWD langjährig gemittelter Niederschlag: Dokumentation unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/precipitation/BESCHREIBUNG_gridsgermany_multi_annual_precipitation_8110_de.pdf [letzter Zugriff 30.11.2020], Daten unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/precipitation/grids_germany_multi_annual_precipitation_1981-2010_17.asc.gz [letzter Zugriff 30.11.2020].

⁷⁵ DWD langjährig gemittelte Lufttemperaturmaxima: Dokumentation unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/air_temperature_max/BESCHREIBUNG_gridsgermany_multi_annual_air_temperature_max_de.pdf [letzter Zugriff 30.11.2020], Daten unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/air_temperature_max/grids_germany_multi_annual_air_temp_max_1981-2010_17.asc.gz [letzter Zugriff 30.11.2020].

⁷⁶ Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes: <https://cdc.dwd.de/portal/> [letzter Zugriff 30.11.2020]

verfügbaren Bodentiefen (0 – 5 cm, 5 – 15 cm, 15 – 30 cm, 30 – 60 cm, 60 – 100 cm, 100 – 200 cm) der Datenlayer Bodendichte („bulk density“), Kationenaustauschkapazität („cation exchange capacity“), Skelettgehalt („coarse fragments“) und Stickstoff („Nitrogen“) heruntergeladen. Dies wurde direkt über den Soilgrids-Viewer⁷⁷ bzw. über die Verbindung mit dem entsprechenden WCS⁷⁸ durchgeführt. Für die Nutzung in der Holzvorrats- und Biomassemodellierung wurden die Bodendaten mit den R-Skript *soilgrids_F3.R*⁷⁹ aufbereitet. Das Skript aggregiert die Daten zu den Klassen (1) Topsoil (0 – 30 cm), (2) Hauptwurzelraum (0 – 100 cm) sowie (3) komplettes Profil (0 – 200 cm) und berechnet (a) Stickstoffvorrat (t/ha) pro Klasse, (b) maximale Bodendichte im Hauptwurzelraum (kg/dm³) sowie (c) die potentielle Kationenaustauschkapazität (kmol(c)/ha) pro Klasse. Anschließend wurden die Daten aus dem originalen Homolosine WGS84 Koordinatensystem⁸⁰ mit dem ArcGIS-Tool *Project Raster* in das UTM Zone 32N ETRS89 Koordinatensystem transformiert. Gleichzeitig wurde ein Resampling auf eine 20 x 20 m-Pixelausdehnung durchgeführt, bei dem auch die Lage der Bodendatenpixel an die Lage der Pixel der Waldstrukturmetriken (Abschnitt 1.4.3) angepasst wurde (über Auswahl eines Waldstrukturmetrikasters in „Environments...“ → „Processing Extent“ → „Snap Raster“).

3. Topographie:

Zur Ableitung topographischer Parameter wurde das digitale Geländemodell DGM1 im LAZ-Format verwendet, das von den Landesvermessungsinstitutionen bereitgestellt wurde (Abschnitt 1.1.3). Mit dem LAStools-Modul *lasgrid* wurden die Parameter mittlere Geländehöhe und Standardabweichung (Indikator für die Steigung des Geländes) mit einer horizontalen Auflösung von 20 x 20 m abgeleitet. Das Geländemodell ist im Normalfall keinen Änderungen unterworfen, sodass die Ableitung der genannten Parameter nur einmalig durchgeführt werden muss. Daher wird hierfür kein Software-Skript zur Verfügung gestellt. Da das DGM1 bereits im UTM Zone 32N ETRS89 Koordinatensystem vorlag, war eine Koordinatentransformation nicht nötig. Jedoch wurde mit dem ArcGIS-Tool *Resample* die Lage der Pixel der Topographieparameter an die Lage der Waldstrukturpixel angepasst (über Auswahl eines Waldstrukturmetrikasters in „Environments...“ → „Processing Extent“ → „Snap Raster“).

1.4.3 Flächendeckende Modellierung von Holzvorrat und Biomasse

Das Verfahren zur Herleitung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse integriert Daten verschiedener Quellen für die Modellierung mit Random Forest. Akkurate nDOM-Daten (Abschnitt 1.2) sind das Fundament des Verfahrens. Sie dienen als Grundlage zur Quantifizierung der strukturellen Eigenschaften von Wäldern, die eine wichtige erklärende Größe in der Modellierung darstellen. Die Einbindung weiterer erklärender Variablen (Prädiktoren) in die Modellierung, z. B. Daten zu Baumartenzusammensetzung, Boden, Klima und Topographie, führt potentiell zu genaueren Vorhersagen bezüglich Holzvorrat und Biomasse.

Das F³-Verfahren zur Holzvorrats- und Biomassemodellierung ist hier zusammenfassend beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung befindet sich in der Dokumentation zu Meilenstein M8 „Verfahren zur Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse“ (Anhang 7 oder

⁷⁷ soilgrids viewer: <https://soilgrids.org/> [letzter Zugriff 23.11.2020]

⁷⁸ soilgrids WCS URLs: <https://maps.isric.org/> [letzter Zugriff 23.11.2020]

⁷⁹ R-Skript *soilgrids_F3.R*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

⁸⁰ Homolosine WGS84 Koordinatensystem: https://www.isric.org/explore/soilgrids/faq-soilgrids#How_can_I_use_the_Homolosine_projection [letzter Zugriff 23.11.2020]

Download⁸¹). Die zum Verfahren gehörenden Software-Skripte zur Datenaufbereitung sowie zur Modellierung von Holzvorrat und Biomasse stehen online zur Verfügung⁸².

(a) Daten

Bei der Verfahrensentwicklung spielte die deutschlandweite Verfügbarkeit der Eingangsdatensätze eine große Rolle. Die hier verwendeten Datensätze dienen als Beispiele, die illustrieren, wie die Einbindung in das Verfahren erfolgt. Weitere bzw. andere Datensätze, die z. B. höher aufgelöst oder akkurater sind, können in das Verfahren integriert und für die Modellierung genutzt werden. Aufgrund der Verwendung eines Random Forest-Modells, das problemlos weitere Datensätze bei der Modellierung berücksichtigen kann, ist das Verfahren flexibel erweiterbar bzw. bei nicht Vorhandensein einzelner Datensätze reduzierbar.

Die Eingangsdatensätze gliedern sich in zwei Gruppen: Prädiktordaten und Referenzdaten. Zu den im F³-Verfahren genutzten Prädiktordaten gehören die Baumartenzusammensetzung, Klimadaten, Bodendaten, Daten zur Topographie und aus dem nDOM abgeleiteten Waldstrukturmetriken. Diese Daten stammen aus verschiedenen Quellen und liegen daher in unterschiedlichen Formaten, Projektionen, Auflösungen etc. vor. Sie sind nicht unmittelbar miteinander kombinierbar, sondern müssen entsprechend aufbereitet werden. Dies umfasst vor allem die Projektion aller Daten in ein gemeinsames Koordinatensystem (z. B. UTM ETRS89 Zone 32N (EPSG-Code: 25832)) und ein Resampling, welches Ausdehnung und Lage der einzelnen Rasterpixel aneinander anpasst. Die Erstellung und Aufbereitung der Baumartenkarte ist in Abschnitt 1.4.1 beschrieben. Abschnitt 1.4.2 beschreibt die Aufbereitung der Klima-, Boden- und Topographiedaten. Mittels des Python-Skripts *Metriken_Holzvolumen_F3.py*⁸³ werden unter Verwendung der Software LAStools aus den nDOM-Daten (Abschnitt 1.2) Statistiken abgeleitet, die die Struktur des Waldes pro 20 x 20 m-Flächen beschreiben. Die Auswahl dieser statistischen Metriken orientiert sich maßgeblich an den von Schumacher et al. (2019)⁸⁴ für die Modellierung des Holzvorrats in Baden-Württemberg verwendeten Metriken. Das Skript berechnet für jede nDOM-Kachel die folgenden Werte:

- Mittlere Höhe des nDOM pro 20 x 20 m-Pixel
- Maximale Höhe des nDOM pro 20 x 20 m-Pixel
- Standardabweichung der Höhenwerte des nDOM pro 20 x 20 m-Pixel
- 95. Perzentil der Höhenwerte des nDOM pro 20 x 20 m-Pixel
- 75. Perzentil der Höhenwerte des nDOM pro 20 x 20 m-Pixel
- Prozentualer Anteil der Fläche (20 x 20 m), die mit Höhenwerten > 6 m überschirmt ist
- Prozentualer Anteil der Fläche (20 x 20 m), die mit Höhenwerten > 20 m überschirmt ist

⁸¹ M8 – „Verfahren zur Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse“:
https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021].

⁸² Software-Skripte für Holzvorrats- und Biomassemodellierung:
https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021].

⁸³ Python-Skript *Metriken_Holzvolumen_F3.py*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021].

⁸⁴ Schumacher, J., Rattay, M., Kirchhöfer, M., Adler, P., Kändler, G. 2019. Combination of Multi-Temporal Sentinel 2 Images and Aerial Image Based Canopy Height Models for Timber Volume Modelling. *Forests* 2019, 10, 746.

Anschließend werden die Kacheln mit dem R-Skript *,mosaic_tiles_F3.R'*⁸⁵ zu Mosaiken zusammengefügt. Die so entstandenen Rastermosaiken dienen als Vorlage für das Resampling der anderen Prädiktordaten.

Neben den flächendeckend benötigten Prädiktordaten werden Referenzdaten aus terrestrischen Aufnahmen (z. B. Stichprobeninventuren) benötigt um die Modelle zur Vorhersage von Holzvorräten und Biomasse zu trainieren und zu validieren. Referenzdaten der jeweiligen Region müssen vom Nutzenden bereitgestellt werden. Mögliche Datenquellen hierfür sind die Betriebsinventuren der staatlichen Forstbetriebe oder Daten der Bundeswaldinventur (BWI). Als Referenzdaten im F³-Projekt wurden folgende Inventurdaten genutzt:

- Daten der Betriebsinventur (2011 und 2012) der Niedersächsischen Landesforsten für die niedersächsischen Projektgebiete
- Daten der dritten Bundeswaldinventur (BWI 3, 2011 – 2012) für die baden-württembergischen Projektgebiete

In beiden Fällen waren Daten zu Brusthöhendurchmesser (BHD) und Baumhöhe der an den Stichprobenpunkten ausgewählten Bäume vorhanden. Im BWI 3 - Datensatz lagen zudem bereits für jeden Probestandort der modellierte Derbholtzvorrat und die modellierte oberirdische Biomasse vor. Für die Daten der Betriebsinventur der Niedersächsischen Landesforsten der Jahre 2011 und 2012 wurden die Einzelbaummessungen mit dem Waldwachstumssimulator ForestSimulator (Hansen und Nagel 2014⁸⁶) auf das Jahr der Luftbildbefliegung 2016 fortgeschrieben. Die Modellierung des Derbholtzvorrats jedes Baumes erfolgte ebenfalls mit dem ForestSimulator, die Modellierung der oberirdischen Biomasse jedes Baumes erfolgte mit Hilfe des R-Paket *,rbdapro'*⁸⁷. Von den Holz- und Biomassevorräten der Einzelbäume wurde für jeden Stichprobenpunkt eine Schätzung des Derbholtzvorrats pro ha und der oberirdischen Biomasse pro ha ermittelt. Pro Stichprobenpunkt wurde außerdem die Höhe des höchsten Baumes bestimmt und in einer Spalte der Attributtabelle gespeichert. Die Inventurdaten wurden als Punkte in einer Shape-Datei gespeichert, deren Attributtabelle für jeden Stichprobenpunkt die folgenden Angaben enthält:

- Holzvorrat (m³/ha)
- Oberirdische Biomasse (t/ha)
- Höhe des höchsten Baumes

(b) Modellierung von Holzvorrat und Biomasse

Nachdem alle für die Modellierung benötigten Datensätze (Referenzdaten als Shape-Datei, Prädiktoren als Rasterdateien) entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweise aufbereitet wurden, kann die Erstellung der Holzvorrats- und Biomassekarten mit Hilfe des R-Skripts *,modellierung_volumen_biomasse_F3.R'*⁸⁸ durchgeführt werden.

Das Skript liest die aufbereiteten Prädiktoren (Rasterdateien) sowie Referenzdaten (Shape-Datei) ein und führt die folgenden Schritte durch:

- 1.) Maskieren aller Pixel mit einer Kronenüberschirmung < 25%.

⁸⁵ R-Skript *,mosaic_tiles_F3.R'*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021].

⁸⁶ Hansen, J., Nagel, J., 2014. Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGroSS – Anwendung und theoretische Grundlagen. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt Band 11. Göttingen: Universitätsverlag. DOI: 10.17875/gup2014-757.

⁸⁷ R-Paket *,rbdapro'*: <https://gitlab.com/vochr/rbdapro> [letzter Zugriff 30.11.2020].

⁸⁸ R-Skript *,modellierung_volumen_biomasse_F3.R'*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

- 2.) Zuschneiden aller Rasterdaten auf eine gemeinsame Ausdehnung.
- 3.) Auslesen der Pixelwerte der Rasterdaten an den Koordinaten der Referenzdaten (Stichprobenpunkte).
- 4.) Detektion und Löschen von Ausreißern: Weicht die höchste Baumhöhe eines Stichprobenpunktes der Referenzdaten um 25% von der höchsten Höhe des Oberflächenmodells an diesem Punkt ab, gilt dieser Datenpunkt als Ausreißer und wird aus dem Datensatz entfernt.
- 5.) Trainieren je eines Random Forest-Modells zur Modellierung von Holzvorrat und Biomasse.
- 6.) Anwendung der Modelle auf die Rasterdaten zur Erzeugung von Holzvorrats- und Biomassekarten.
- 7.) Berechnung der Vorhersagefehler (totaler und relativer RMSE) der Modelle basierend auf den Out-Of-Bag-Samples des Random Forest-Modells. Graphische Ausgabe eines Scatterplots (vorhergesagte vs. beobachtete Werte) inkl. der Vorhersagefehlerwerte.

Beispiele für die erzeugten Holzvorrats- und Biomassekarten sind in Abbildung 28 zusammen mit dem entsprechenden Ausschnitt aus dem Orthophoto dargestellt.

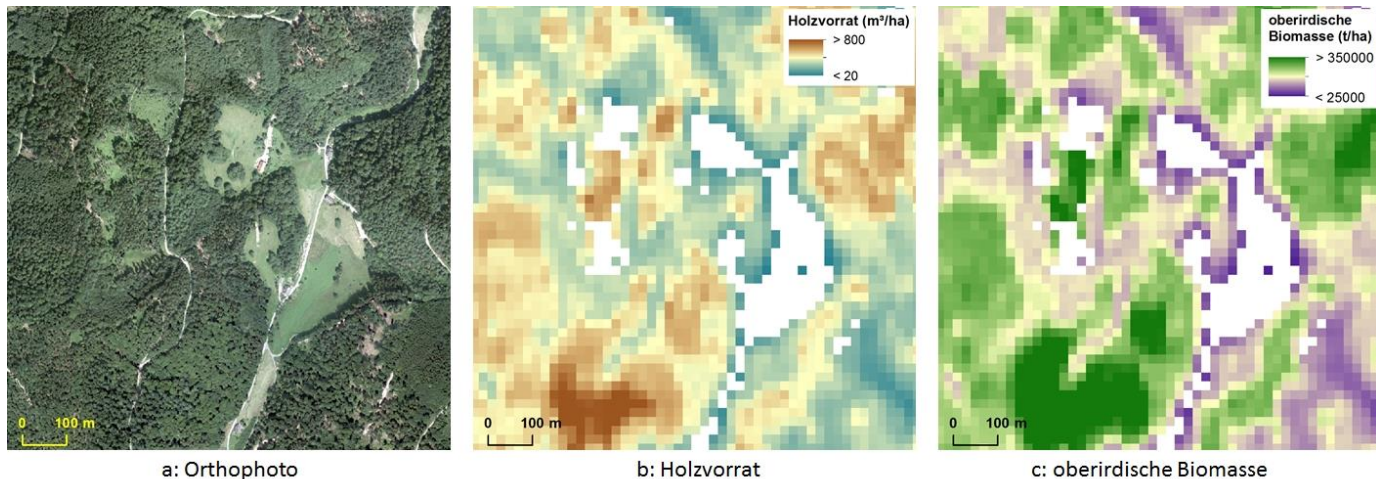


Abbildung 28: Beispielkarten für Holzvorrat (b) und oberirdische Biomasse (c). Zur Orientierung wird das dazugehörige Orthophoto (a) angezeigt.

(c) Validierungsergebnisse Holzvorrats- und Biomassemodellierung

Für die niedersächsischen Projektgebiete im Solling und Harz ergab die Kreuzvalidierung, dass das Modell in der Lage ist, den Derbh Holzvorrat mit einem Vorhersagefehler von $117,2 \text{ m}^3/\text{ha}$ (RMSE) bzw. $30,9\%$ (rel. RMSE) zu modellieren. Das Modell für die Vorhersage der oberirdischen Baumbiomasse (BHD $> 7 \text{ cm}$) weist einen Vorhersagefehler von $69,4 \text{ t/ha}$ (RSME) bzw. $31,2\%$ (rel. RMSE) auf (vgl. Abbildung 29).

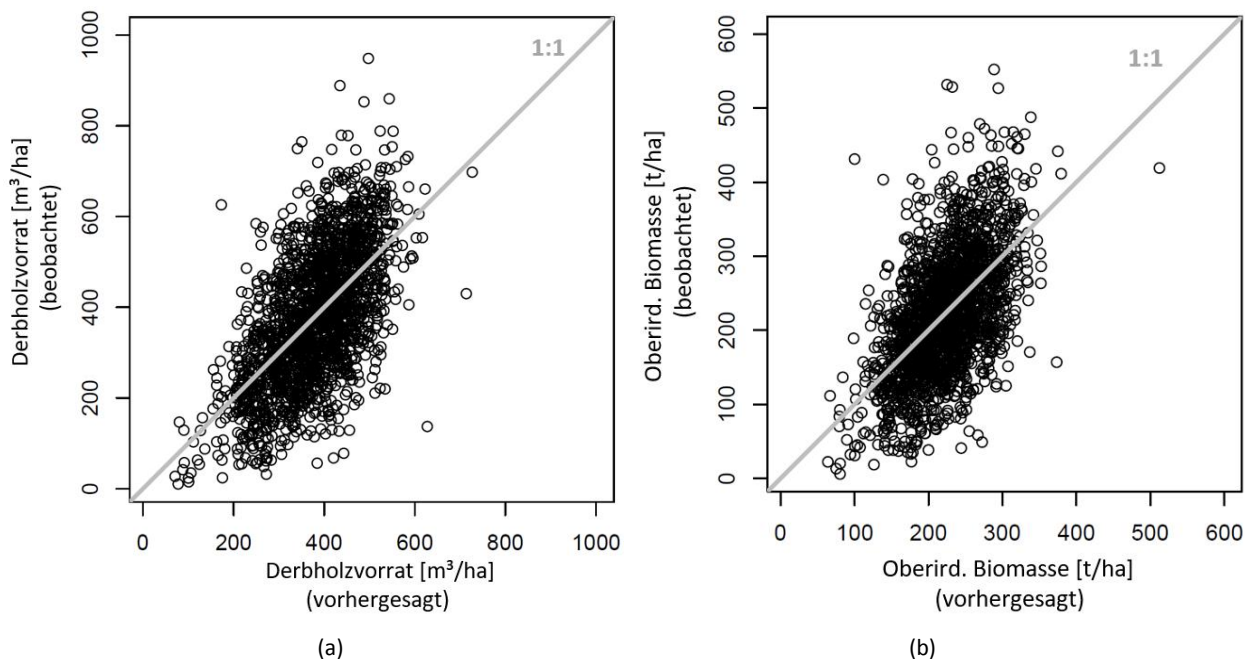


Abbildung 29: Darstellung der beobachteten (a) Derbholzvorrats- bzw. (b) Biomassewerte abgetragen gegen die vorhergesagten Werte der niedersächsischen Projektgebiete Solling und Harz.

Das Random Forest-Modell modelliert den Derbholzvorrat in den südwestdeutschen Projektgebieten mit einem Vorhersagefehler von 198,7 m³/ha (RMSE) bzw. 43,7 % (rel. RMSE). Das Modell für die Vorhersage der oberirdischen Baumbiomasse (BHD > 7 cm) weist einen Vorhersagefehler von 103,3 t/ha (RMSE) bzw. 41,7 % (rel. RMSE) auf (vgl. Abbildung 30).

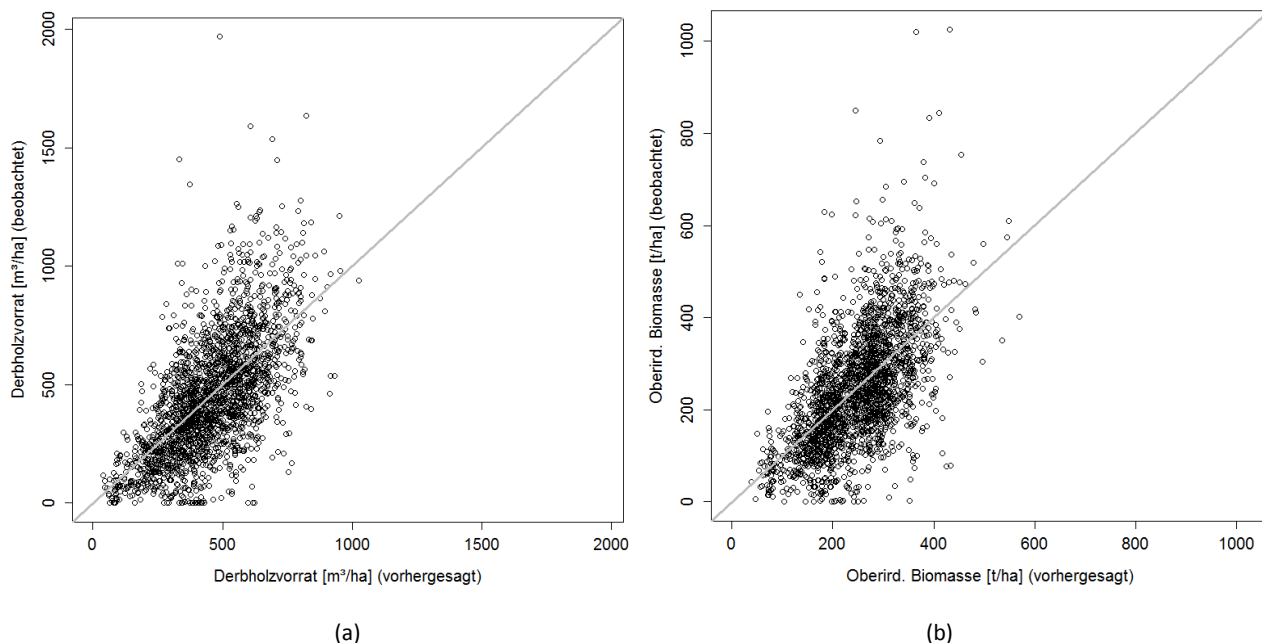


Abbildung 30: Darstellung der beobachteten (a) Derbholzvorrats- bzw. (b) Biomassewerte, abgetragen gegen die vorhergesagten Werte in den südwestdeutschen Projektgebieten.

2 Verwertung

Die im F³-Projekt entwickelten Verfahren ermöglichen die standardisierte und weitgehend automatisierte Erzeugung flächendeckender und länderübergreifend vergleichbarer Waldstrukturdaten. Die detaillierten Beschreibungen der entwickelten Verfahren sowie der

entsprechenden Softwarecodes werden der Öffentlichkeit dauerhaft und in vollem Umfang zur Verfügung gestellt. Dies geschieht über die von den forstlichen Forschungsinstitutionen FVA, WSL, LWF und BFW betriebenen Online-Plattform www.waldwissen.net⁸⁹, deren Ziel es ist, praxisrelevantes Wissen aus der Wald- und Umweltforschung forstlichen Praktikern zugänglich zu machen. Als Ergänzung zu Software-Skripten und Dokumentationen werden die für die Projektgebiete erzeugten Datensätze über Web Map Services (WMS) ebenfalls öffentlich bereitgestellt. Interessierte Nutzende haben so die Möglichkeit, anhand konkreter großflächiger Datenbeispiele einen Eindruck von der räumlichen und thematischen Auflösung der forstlichen Strukturkarten, sowie der Handhabung der Daten zu bekommen. Durch die integrative Bereitstellung aller relevanten Informationen kann der Wert der Daten für verschiedene Nutzungszwecke optimal eingeschätzt werden. Die Standardisierung des Verfahrens erlaubt dabei den Einsatz der so berechneten Daten in großräumigen, bundesländerübergreifenden Auswertungen und Analysen, z. B. im Bereich der Klimafolgenforschung.

Die praktische Umsetzung und Integration der entwickelten Verfahren durch forstliche Akteure, z. B. in betriebliche Abläufe, wird durch die Strategie der umfassenden Veröffentlichung gefördert, Weiterentwicklungen werden ermöglicht. Die weite Bekanntmachung des F³-Projekts und der in dessen Rahmen erzielten Ergebnisse durch die Arbeitsgruppe Forstlicher Fernerkundung der Länder (AFFEL) und die Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (AFL) sowie die Durchführung von Status- und Abschlusskolloquium (Abschnitt 4) ermöglichte es, Landesforstverwaltungen, Waldbesitzende, Naturschutzinstitutionen und Forschungseinrichtungen zu erreichen. Positive Rückmeldungen aus diesen potentiellen Nutzendengruppen zeigen das große Interesse an den nach F³-Verfahren erzeugten forstlichen Strukturdaten. Einem beachtlichen Anteil der potentiellen Nutzenden fehlt jedoch die technische Infrastruktur zur direkten Umsetzung der Verfahren. Daher wäre es wünschenswert, die Daten zentral zu prozessieren und über Online-Plattformen oder Dienste den Nutzenden zur Verfügung zu stellen. Diese Aufgabe könnte idealerweise von den Landesvermessungsinstitutionen oder auch den Landesforstverwaltungen übernommen werden. In Bundesländern, wie z. B. Nordrhein-Westfalen, die Geländemodelle und Oberflächenmodelle bereits heute schon flächendeckend über ihre Geodatenportale (z. B. www.geoportal.nrw) zum freien Download anbieten, wäre es voraussichtlich mit geringem zusätzlichem Aufwand möglich, ebenfalls die nach dem F³-Verfahren erzeugten forstlichen Strukturdaten zu generieren und zugänglich zu machen.

Die flächendeckende Verfügbarkeit von regelmäßig aktualisierbaren F³-Waldstrukturdaten würden die Möglichkeiten des administrativen und betrieblichen Handelns erweitern. Insbesondere im Zuge der Bewältigung von Kalamitäten können Waldstrukturdaten eine wichtige Rolle einnehmen. Sie können zur Abschätzung angefallener Kalamitätsholzmassen dienen, da nach Erfassung der Waldschäden nicht nur die Größe der betroffenen Fläche bekannt wäre, sondern auch die approximative Schadholzmenge. Auch ließe sich, basierend auf diesen Daten, die mittelfristige forstbetriebliche Planung nach Schadereignissen anpassen.

Des Weiteren können die F³-Verfahren Waldstrukturdaten für Privatwaldflächen liefern, wie sie bisher nicht verfügbar sind. Sie können somit effektiv zur Unterstützung des (Klein)Privatwaldes beitragen, indem sie z. B. Daten für entsprechende aktuelle Projekte, wie WaldExpert⁹⁰, liefern. Ein ähnlicher Ansatz wird zurzeit im FNR-geförderten Projekt „Integriertes Forstliches Informationssystem für den Kleinparzellierten Nicht-Staatswald“ (INKA, 08/2018 — 07/2021)⁹¹

⁸⁹ F³-Projektseiten: <https://www.waldwissen.net/de/technik-und-planung/waldinventur/f3-fernerkundungsbasierte-walddaten> [letzter Zugriff 23.11.2020]

⁹⁰ Projekt Waldexpert: <https://www.fva-bw.de/projekte/projekt/1590-waldexpert-digitales-entscheidungssystem-fuer-den-privatwald> [letzter Zugriff 24.11.2020]

⁹¹ INKA-Projekt: <https://www.forstpraxis.de/forschungsprojekt-soll-kleinprivatwaldbesitzer-bei-waldinventur-unterstuetzen/> [letzter Zugriff 27.11.2020]

verfolgt. Hier werden Strukturen entwickelt, um flächendeckende Waldinformationen über ein Informationssystem Waldbesitzenden zur Verfügung zu stellen. Um einen Austausch von Erfahrungen zu ermöglichen, wurden Projektbearbeitende, die sich im INKA-Projekt mit forstlicher Fernerkundung befassen, zu beiden F³-Kolloquien (siehe Abschnitt 4) eingeladen.

3 Erkenntnisse von Dritten

Während der Laufzeit des F³-Projekts wurden in verschiedenen, groß angelegten Forschungs- und Entwicklungsprojekten neue Erkenntnisse zur Baumartenklassifizierung mit Sentinel-2-Satellitendaten erzielt. Die Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie⁹² zur Differenzierung von Baumarten, finanziert durch das Umweltbundesamt (UBA), unterstreichen das große Potential von Sentinel-2-Satellitendaten zur Baumartenerkennung durch das Erreichen hoher Genauigkeiten bei der Klassifizierung von Baumartengruppen. Die Notwendigkeit der Verwendung hochgenauer Referenzdaten in ausreichender Zahl und der Integration weiterer Zusatzinformationen für eine zuverlässige Baumartendifferenzierung wird betont⁹². Darauf aufbauend wurde am Umweltforschungszentrum Leipzig ein Projekt zur Erstellung einer deutschlandweiten Baumartenkarte mit Sentinel-2-Satellitendaten⁹³ durchgeführt (Projektlaufzeit: 11.2017 – 10.2019). Die Ergebnisse dieses Vorhabens liegen jedoch bisher noch nicht vor. Eine landesweite Baumartenkarte für Rheinland-Pfalz, die als Datenquelle für die Forsteinrichtung genutzt wird, wurde im Rahmen des Projekts Sentinel4GRIPS⁹⁴ erstellt. Durch Teilnahme an Workshops- und Kolloquien, die im Rahmen dieser Projekte organisiert wurden, fand ein Austausch mit Fachkolleg*innen zu aktuellen Entwicklungen statt. Zusätzlich zeigten die Ergebnisse von Persson et al. (2018)⁹⁵ und Wessel et al. (2018)⁹⁶ das Potential von Sentinel-2-Satellitendaten für die Klassifizierung von Baumarten. Diese Erkenntnisse unterstützten die Entscheidung, von der ursprünglichen Planung des F³-Projekts abzuweichen und Sentinel-2-Satellitendaten anstatt Luftbilddaten für die Klassifizierung von Baumarten zu verwenden (Abschnitt 1).

Des Weiteren haben die Ergebnisse aus Schumacher et al. (2019)⁹⁷ gezeigt, dass die Genauigkeit der Modellierung des Holzvorrats basierend auf Fernerkundungsdaten durch Informationen zum Laubbaumanteil verbessert werden kann. Da im F³-Projekt ein ähnlicher Ansatz für die Holzvorrats- und Biomassemodellierung verfolgt wurde, diente diese Studie als Ausgangspunkt für die Auswahl der Prädiktoren. Die in Schumacher et al. (2019)⁹⁷ genutzten Prädiktoren wurden um aus dem F³-Projekt stammende Prädiktoren (Baumarten, Standortsinformationen) erweitert.

⁹² Immitzer, M., Atzberger, C., Zeug, G., 2017: Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Satellitenfernerkundungsdaten (Copernicus) für Zwecke der Ableitung ökologischer Belastungsgrenzen und der Verifizierung von Indikatoren der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Präsentation bei Nationales Forum für Fernerkundung und Copernicus 2017 Copernicus@Work Berlin, 15.03.2017, online: http://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum_2017/Terranea_BOKU_pub.pdf [letzter Zugriff 24.11.2020]

⁹³ Projekt „Ermittlung naturschutzbezogener Kriterien in der Umweltprüfung der Bedarfsplanung für Stromnetze und in der Bundesfachplanung zur Erhöhung der Planungssicherheit und Verhinderung von Zielkonflikten“: https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Forum_2018/preidl_Copernicus_Forum_Berlin_2018_online.pdf [letzter Zugriff 24.11.2020]

⁹⁴ Sentinel4GRIPS: https://www.d-copernicus.de/fileadmin/user_upload/004_Copernicus_2018_v02_ProfHill.pdf [letzter Zugriff 24.11.2020]

⁹⁵ Persson, M., Lindberg, E., Reese, H., 2018. Tree Species Classification with Multi-Temporal Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 10, 1794; doi:10.3390/rs10111794

⁹⁶ Wessel, M., Brandmeier, M., Tiede, D., 2018. Evaluation of Different Machine Learning Algorithms for Scalable Classification of Tree Types and Tree Species Based on Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 10, 1419; doi:10.3390/rs10091419

⁹⁷ Schumacher, J., Rattay, M., Kirchhöfer, M., Adler, P., Kändler, G., 2019. Combination of Multi-Temporal Sentinel 2 Images and Aerial Image Based Canopy Height Models for Timber Volume Modelling. *Forests*, 10 (746), 19 pages.

In einer Metastudie⁹⁸ zum Einsatz luftbildbasierter Oberflächenmodelle zur Gewinnung von Waldstrukturdaten wurde festgestellt, dass die flächige Ableitung von Inventurdaten, wie Holzvorrat, Grundfläche und Höhe, eine Genauigkeit erzielt, die mit Laser Scanning-basierten Daten vergleichbar ist. Dies unterstreicht die Tauglichkeit des im F³-Projekt gewählten Ansatzes.

4 Veröffentlichungen

Es wurden verschiedene Wege der Veröffentlichung und Bekanntmachung der Projektergebnisse gewählt, um diese möglichst vielen Akteur*innen in der Forstpraxis, der Forstverwaltung, der forstlichen Forschung und der Naturschutzverwaltung bekannt zu machen. Dabei wurde der Fokus auf die Forstpraxis gelegt.

Projektseiten auf www.waldwissen.net

Als zentraler Anlaufpunkt für Interessierte am F³-Projekt und den darin erzielten Ergebnissen wurden mehrere Webseiten, die die Inhalte des Projekts sowie die entwickelten Verfahren beschreiben, auf www.waldwissen.net erstellt. Die Startseite kann über <https://www.waldwissen.net/de/technik-und-planung/waldinventur/f3-fernerkundungsbasierte-walddaten> [letzter Zugriff 27.11.2020] aufgerufen werden. Über diese Internetpräsenz werden ebenfalls alle Software-Skripte sowie die dazugehörigen ausführlichen Dokumentationen zum Download öffentlich bereitgestellt⁹⁹.

Artikel in AFZ – Der Wald

Die Zeitschrift AFZ – Der Wald¹⁰⁰ hat eine weite Verbreitung bei öffentlichen und privaten Forstbetrieben sowie bei forstlichen Forschungs- und Lehranstalten in Deutschland. Ein Artikel mit dem Titel „Flächendeckende Waldstrukturdaten für die Forstwirtschaft“ wurde in AFZ – Der Wald veröffentlicht¹⁰¹.

Pressemitteilung

In Zusammenarbeit mit Frau Plothe (FNR) wurde eine Pressemitteilung zum Projektabschluss verfasst und über die FNR-Homepage bereitgestellt. Die Pressemitteilung wurde von forstpraxis.de übernommen: <https://www.forstpraxis.de/projekt-f3-vom-luftbild-zur-holzvorratskarte/> [letzter Zugriff 15.01.2021]

FowiTa 2018

Eine Präsentation zur Vorstellung des Projekts wurde auf der Forstwissenschaftlichen Tagung (FowiTa 2018) am 27.9.2018 in Göttingen gehalten:

Beckschäfer, P., Kirchhöfer, M., Adler, P. und Ackermann, J. 2018. Homogenisierung von Methoden zur flächigen Erfassung forstlicher Strukturparameter gestützt auf luftbildbasierte Oberflächenmodelle. Forstwissenschaftliche Tagung 2018, September 2018, Göttingen, Germany.

⁹⁸ Goodbody, T.R.H., Coops, N.C., White, J.C., 2019. Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. Current Forestry Reports 5: 55; Doi:10.1007/s40725-019-00087-2.

⁹⁹ Downloadlink F³-Dokumentationen und Software-Skripte: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 27.11.2020]

¹⁰⁰ AFZ – Der Wald: <https://www.forstpraxis.de/zeitschrift/afz-der-wald/> [letzter Zugriff 27.11.2020]

¹⁰¹ Kirchhöfer, M., Beckschäfer, P., Adler, P., Ackermann, J., 2021: Flächendeckende Waldstrukturkarten für die Forstwirtschaft. AFZ – Der Wald, 3/2021.

Statuskolloquium

Am 17.09.2019 fand an der FVA in Freiburg das F³-Statuskolloquium statt. Unter den 29 Teilnehmenden befanden sich Vertreter*innen von Landesforstverwaltungen, forstlichen Forschungsanstalten, Hochschulen, Landesvermessungen, Umwelt- sowie Nationalparkverwaltungen und privaten Ingenieurbüros des Umweltbereichs. Die Rückmeldungen und Kommentare der Teilnehmenden waren überwiegend positiv und motivierend. Sie unterstrichen die Bedeutung der Projektergebnisse für die forstliche Praxis. Von den Teilnehmenden formulierte Anregungen flossen in die Projektergebnisse ein.

FVA-Einblick

Das Statuskolloquium wurde zum Anlass genommen, in der Zeitschrift „FVA-Einblick“ einen Artikel¹⁰² über das F³-Projekt zu veröffentlichen. Die „FVA-Einblick“ informiert vor allem Forstleute aus Baden-Württemberg aber auch darüber hinaus über neue Forschungsergebnisse der FVA.

Abschlusskolloquium

Am 28.10.2020 wurde das F³-Abschlusskolloquium als Online-Veranstaltung durchgeführt, da eine Präsenzveranstaltung aufgrund der Corona-Pandemie nicht durchführbar war. Die vertonten Präsentationen wurden im Voraus den Teilnehmenden als Videos zur Verfügung gestellt. Am Abschlusskolloquium wurden die erzielten Ergebnisse diskutiert. Unter den 29 Teilnehmenden befanden sich u. a. Vertreter*innen von Landesforstverwaltungen, forstlichen Forschungsanstalten, Hochschulen, Landesvermessungen, Umwelt- sowie Nationalparkverwaltungen und privaten Ingenieurbüros des Umweltbereichs.

Online Präsentationen auf YouTube

Die für das F³-Abschlusskolloquium erstellten Videos der Präsentationen wurden auf einen projekteigenen YouTube-Kanal¹⁰³ hochgeladen. Dort sind je eine Präsentation zur Projektvorstellung, der Ableitung forstlicher Strukturparameter, der Erstellung der Baumartenkarte, der Ableitung von Holzvorrat und Biomasse sowie zur Datenbereitstellung öffentlich zugänglich.

Homepage FVA & NW-FVA

Kurzbeschreibungen des Projekts wurden auf den Internetseiten von NW-FVA und FVA veröffentlicht.

NW-FVA: <https://www.nw-fva.de/index.php?id=650> [letzter Zugriff 22.01.2021]

FVA: <https://www.fva-bw.de/projekte/projekt/1411-f3-flaechendeckende-fernerkundungsbasierte-forstliche-strukturdaten> [letzter Zugriff 22.01.2021]

Austausch mit Landesvermessungsinstitutionen

Der Projektfortschritt wurde Vertretern des Landesamts für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) und des Niedersächsischen Forstplanungsamtes präsentiert (27.2.2019). Des Weiteren wurde eine Projektpräsentation auf der Veranstaltung „Aktuelles aus der Fernerkundung – Informationsaustausch“ des Landesamts für Geoinformation und Landesvermessung Baden-Württemberg (LGL-BW) am 18.07.2019 gehalten. Dadurch wurden neben Vertretern des LGL-BW auch Vertreter von baden-württembergischen Kommunen und

¹⁰² F³-Projekt in FVA-einblick 3/2019: <https://www.fva-bw.de/fileadmin/publikationen/einblick/einblick20193.pdf> [letzter Zugriff 27.11.2020]

¹⁰³ F³-YouTube-Kanal: https://www.youtube.com/channel/UCCAnI-v9ebl0CeewFve_uQg [letzter Zugriff 27.11.2020]

verschiedenen Behörden (Umweltverwaltung, Nationalpark Schwarzwald, Wasserwirtschaft) erreicht.

Wissenschaftlerseminare NW-FVA

Präsentationen des Projektfortschritts und Diskussionen der entwickelten Verfahren fanden während zweier Wissenschaftlerseminare an der NW-FVA am 23.4.2018. und am 28.1.2019 statt.

AFL & AFFEL

Im Rahmen der halbjährlich stattfindenden Tagungen der Arbeitsgemeinschaft Forstlicher Luftbildinterpreten (AFL) und der Arbeitsgruppe Forstliche Fernerkundung der Länder (AFFEL) fanden regelmäßige Diskussionen des Projektfortschritts statt.

MSc-Arbeiten

Drei MSc-Arbeiten wurden während der Projektlaufzeit fertiggestellt und trugen zur Entwicklung und Validierung der F³-Verfahren bei:

Plazas Cebrián A. 2019. Modelling timber volume prediction on the basis of surfacemodels from digital aerial stereo images. University of Göttingen.

Kersting F. 2019. Tree species identification with multitemporal Sentinel-2 images. University of Göttingen.

Költzow, J., 2020. Tree Species Classification using Random Forest and Sentinel-2 Multispectral Satellite Imagery. Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde.

ANHANG

1 Teilvorhaben 22025014

1.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens „Südwestdeutsche regionalspezifische Waldformationen“ ist die Entwicklung von homogenen Verfahren zur Ableitung von forstlichen Strukturparametern aus Fernerkundungsdaten unter Berücksichtigung südwestdeutscher regionalspezifischer Waldformationen.

1.2 Bearbeitete Arbeitspakete

An der FVA wurden, in enger Kooperation mit der NW-FVA, alle vier Arbeitspakete des F³-Projekts bearbeitet:

- AP 1 Projekt- und Datenmanagement
- AP 2 Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur großflächigen Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle von Waldgebieten
- AP 3 Ableitung forstlicher Strukturparameter aus Oberflächenmodellen
- AP 4 Ableitung von Holzvorrats- und Biomassedaten

Für die Bearbeitung der Arbeitspakete 1 und 2 trug die FVA die Hauptverantwortung und die NW-FVA war mitverantwortlich tätig. Für die Bearbeitung der Arbeitspakete 3 und 4 trug die NW-FVA die Hauptverantwortung und die FVA war mitverantwortlich tätig.

1.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

1.3.1 AP 1: Projekt- und Datenmanagement

Neben der allgemeinen Projektkoordination hat die FVA mehrere Projekttreffen in Freiburg organisiert und an weiteren, von der NW-FVA in Göttingen organisierten Treffen teilgenommen. Regelmäßige wöchentliche Telefonate zwischen den Projektbearbeitenden der FVA und NW-FVA fanden statt.

Ein für beide Projektpartner verbindliches Datenmanagementkonzept wurde in Absprache mit der NW-FVA entwickelt. Die FVA war verantwortlich für die Datenbeschaffung in den südwestdeutschen Projektgebieten sowie die Haltung und Verwaltung dieser und der daraus abgeleiteten Daten.

Bei der Veröffentlichung von Projektergebnissen wurde folgendes erreicht:

- Kontinuierlicher Kontakt zu und Austausch mit Mitgliedern der AFL und AFFEL.
- Technische und organisatorische Umsetzung des Statuskolloquiums sowie Kommunikation mit Interessierten und Teilnehmenden. Inhaltliche Umsetzung zusammen mit der NW-FVA.
- Vorstellung des Projekts bei einer Veranstaltung des LGL-BW. Dabei wurden Vertreter baden-württembergischer Kommunen und verschiedener Behörden erreicht.
- Struktur und textlicher Inhalt der F³-Projektseiten auf www.waldwissen.net in Abstimmung mit der NW-FVA. Kommunikation mit der Waldwissen.net-Redaktion.
- Artikel in der Zeitschrift AFZ – Der Wald in Abstimmung mit der NW-FVA.

- Unterstützung der NW-FVA bei der Planung und Durchführung des Abschlusskolloquiums und Erstellung von vertonten Präsentationen als Videos.
- Veröffentlichung in „FVA-Einblick“
- Konzeption und Betreuung einer MSc-Arbeit, die im Rahmen des Projekts erstellt wurde

Um die rechtlichen Rahmenbedingungen der Datenbereitstellung von fernerkundungsbasierten, forstlichen Strukturdaten beleuchten zu können, nutzte die FVA verwaltungsinterne Ressourcen. Eine mit der NW-FVA abgestimmte Anfrage für eine juristische Beratung wurde an die Justiziere im Referat 51 (Recht, Nachhaltigkeit, Klimaschutz, Grundsatzfragen) des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR) geschickt. Diese Anfrage und mehrmalige Kontaktaufnahmen zur Klärung verschiedener Fragen resultierten in einer detaillierten, schriftlichen juristischen Stellungnahme zur Datenbereitstellung von fernerkundungsbasierten, forstlichen Strukturdaten, auf welche ein großer Teil der Ausführungen in Meilenstein M7 (siehe Anhang 6) beruht.

Die technischen Möglichkeiten der Datenbereitstellung wurden untersucht. Als Beispiel für die Umsetzung der Datenbereitstellung wurden die Schritte zur Erstellung eines WMS (Kartendienst) beschrieben und auf die im F³-Projekt erzeugten Waldstrukturkarten der südwestdeutschen Projektgebiete angewandt. Ein Antrag zur Veröffentlichung dieser Kartendienste über das Geoportal-BW wurde gestellt. Im Zuge dessen wurden auch INSPIRE-konforme Metadaten für diese Datensätze erstellt.

1.3.2 AP 2: Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur großflächigen Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle von Waldgebieten

Für die Entwicklung eines einheitlichen Verfahrens zur Oberflächenberechnung wurde ein an der FVA bereits vorhandenes Verfahren als Grundlage genutzt. Dieses Verfahren wurde in enger Abstimmung mit der NW-FVA verbessert und für eine potentielle deutschlandweite Anwendung angepasst, indem unterschiedliche Eingangsdaten mit verschiedenen Punktdichten berücksichtigt wurden. Eine detaillierte Verfahrensbeschreibung sowie Dokumentation des Python-Softwarecodes wurde in ständiger Abstimmung mit der NW-FVA erstellt (Anhang 3).

Das Image Matching als Grundlage der Oberflächenberechnung wurde an der FVA mit der Software SURE durchgeführt. Hierfür wurden für Waldflächen optimierte Einstellungen der Software-Parameter bestimmt, gültig jeweils für Luftbilddaten, aufgenommen mit einer Längsüberlappung von 60% beziehungsweise 80% und einer Querüberlappung von 30%.

Basierend auf dem gemeinsamen Verfahren zur Oberflächenberechnung, wurden Oberflächenmodelle flächendeckend für die drei südwestdeutschen Projektgebiete (Südschwarzwald und südliche Oberrheinebene, Schwäbische Alb, Südwestdeutsches Alpenvorland) berechnet.

1.3.3 AP 3: Ableitung forstlicher Strukturparameter aus Oberflächenmodellen

Für die Ableitung der forstlichen Strukturparameter Vegetationshöhe, Waldhöhenstrukturkarte (WHSK), offene und geschlossene Bestände, Lücken, Rauigkeit des Kronendachs und lockere Altholz- bzw. Überhälterbestände wurden an der NW-FVA Software-Skripte entworfen und an der FVA getestet. In enger Zusammenarbeit von FVA und NW-FVA wurde das Verfahren weiterentwickelt und an Gegebenheiten in Baden-Württemberg angepasst sowie im Meilensteindokument M4 (Anhang 4) dokumentiert. Anhand von an der FVA vorliegender stereoskopischer Messungen von Baumhöhen sowie Kartierungen von offenen Beständen, geschlossenen Beständen und Lücken wurden Validierungen der Strukturparameter „Vegetationshöhe“ (normalisiertes digitales Oberflächenmodell) und „Waldtyp“ durchgeführt. Die Ergebnisse der Validierungen wurden in das Meilensteindokument M4 eingearbeitet.

Für die drei baden-württembergischen Projektgebiete wurden alle unter Arbeitspaket 3 fallenden forstlichen Strukturparameter berechnet.

1.3.4 AP 4: Ableitung von Holzvorrats- und Biomassedaten

Gewinnung von Baumarteninformationen aus Sentinel-2-Satellitendaten

Die Möglichkeiten und Auswirkungen der Vorprozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten wurden intensiv untersucht. Dies beinhaltete die Schritte Erstellung einer Wolkenmaske, Atmosphärenkorrektur und topografische Normalisierung. Hierfür wurden an der FVA verschiedene Softwareprodukte (Sen2Cor, ERDAS Imagine ATCOR, ERDAS Imagine NoClouds, MAJA) mit jeweils verschiedenen Parametereinstellungen getestet. Zusätzlich lagen mit anderer Software (FORCE, Fmask, R) an der NW-FVA prozessierte Daten vor. Die einzelnen Ergebnisse wurden zusammen mit der NW-FVA evaluiert und ein gemeinsames Verfahren für die Vorprozessierung der Sentinel-2-Satellitendaten entwickelt.

Anschließend wurden Sentinel-2-Szenen beschafft, die die in Abstimmung mit der NW-FVA festgelegten Kriterien (Aufnahmedatum im Sommer (Juni – August) 2017, möglichst geringe Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Aufnahmen und möglichst geringer Wolkenanteil (< 10%)) erfüllten. Diesen Kriterien entsprechende Szenen, die die Projektgebiete in Baden-Württemberg komplett abdecken, wurden mit dem Aufnahmedatum 19.06.2017 bzw. 26.06.2017 gefunden. Darüber hinaus waren an diesen beiden Tagen annähernd wolkenfreie Szenen für drei weitere Kacheln verfügbar. Damit konnte die komplette Landesfläche abgedeckt und die Menge nutzbarer Referenzdaten für das Trainieren des Random Forest-Klassifikators erhöht werden.

Die Referenzdaten für die Baumartendifferenzierung in Baden-Württemberg basieren auf Betriebsinventur (BI)- und Bestandesdaten der Forsteinrichtung. Die Daten wurden vor ihrer Nutzung gefiltert, plausibilisiert und miteinander kombiniert.

Eine landesweite Baumartenkarte wurde nach dem mit der NW-FVA abgestimmten Verfahren abgeleitet. Dafür wurde ein R-Skript genutzt, das an der NW-FVA entwickelt und an die Referenzdatensituation der FVA angepasst wurde. In Zusammenarbeit mit der NW-FVA wurde die Dokumentation zur Herleitung von Baumarteninformationen aus Sentinel-2-Satellitendaten (Meilenstein M5 in Anhang 5) erstellt.

Herleitung standortsbezogener Ertragspotentiale

Die Arbeiten der FVA zur Herleitung standortsbezogener Ertragspotentiale beinhalteten vor allem interne Recherchen und Nachfragen in den Abteilungen „Boden und Umwelt“ sowie „Waldwachstum“. Als Ergebnis der Gespräche mit Experten im Bereich der Bodenkunde wurde zusammen mit der NW-FVA entschieden, das Ertragspotential nicht zu modellieren, sondern stattdessen relevante standörtliche Informationen direkt in die Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse einfließen zu lassen. Hinweise auf relevante Standortinformationen wurden dabei aus einem in der Abteilung „Waldwachstum“ im Rahmen der Klimafolgenforschung durchgeführten Projekt zur Regionalisierung baumartenspezifischer Bonitäten entnommen.

Holzvorrats- und Biomasseberechnung

In enger Zusammenarbeit mit der NW-FVA wurde ein Verfahren für die flächendeckende Modellierung von Holzvorrat und Biomasse entwickelt. Es wurden Metriken bestimmt, die als Vorhersageparameter in der Modellierung dienen. Die Auswahl dieser Metriken stützte sich auf Erfahrungen aus anderen Projekten, die unter anderem an der FVA durchgeführt worden waren. Die von der NW-FVA erstellten Software-Skripte für die Holzvorrats- und Biomassemodellierung wurden auf die Datenlage der FVA angepasst und auf die Daten aus den baden-württembergischen Projektgebieten angewandt. Um einen Hinweis auf die erreichbare Genauigkeit zu erhalten, wurden

die Ergebnisse validiert Gemeinsam mit der NW-FVA wurde eine detaillierte Dokumentation des Verfahrens erstellt (Meilenstein M8 in Anhang 7).

2 Teilvorhaben 22024816

2.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens „Nordwestdeutsche regionalspezifische Waldformationen“ ist die Entwicklung von standardisierten Verfahren zur Ableitung von forstlichen Strukturparametern aus Fernerkundungsdaten unter Berücksichtigung nordwestdeutscher regionalspezifischer Waldformationen.

2.2 Bearbeitete Arbeitspakete

An der NW-FVA wurden, in enger Kooperation mit der FVA, alle vier Arbeitspakete des F³-Projekts bearbeitet:

- AP 1 Projekt- und Datenmanagement
- AP 2 Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur großflächigen Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle von Waldgebieten
- AP 3 Ableitung forstlicher Strukturparameter aus Oberflächenmodellen
- AP 4 Ableitung von Holzvorrats- und Biomassedaten

Für die Bearbeitung der Arbeitspakete 1 und 2 trug die FVA die Hauptverantwortung und die NW-FVA war mitverantwortlich tätig. Für die Bearbeitung der Arbeitspakete 3 und 4 trug die NW-FVA die Hauptverantwortung und die FVA war mitverantwortlich tätig.

2.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

2.3.1 AP 1: Projekt- und Datenmanagement

Die allgemeine Projektkoordination oblag der FVA. Die NW-FVA hat mehrere Projekttreffen in Göttingen organisiert und an den von der FVA organisierten Treffen in Freiburg teilgenommen. Regelmäßige wöchentliche Jour fixe Telefonate zwischen den Projektbearbeitenden der NW-FVA und der FVA fanden statt.

Die NW-FVA übernahm die Datenbeschaffung für die nordwestdeutschen Projektgebiete sowie die Haltung und Verwaltung dieser und der daraus abgeleiteten Daten.

Die Projektergebnisse wurden über verschiedene Kanäle der Öffentlichkeit zugänglich gemacht:

- Kontinuierlicher Kontakt zu und Austausch über den Projektfortschritt mit Mitgliedern von AFL und AFFEL.
- Unterstützung der FVA bei der Planung und Durchführung des Statuskolloquiums inkl. Moderation des Statuskolloquiums.
- Technische und organisatorische Umsetzung des als Onlineveranstaltung abgehaltenen Abschlusskolloquiums sowie vor- und nachbereitende Kommunikation mit Interessierten und Teilnehmenden.
- Erstellung und Bereitstellung von Videopräsentationen der Projekthinhalte auf dem YouTube-Kanal des F³-Projekts.
- Pressemitteilung (FNR) zum Projektabschluss.
- Präsentation des Projekts auf der Forstwissenschaftlichen Tagung (FowiTa) 2018 in Göttingen.
- Präsentation des Projektfortschritts in zwei Wissenschaftlerseminaren der NW-FVA.

- Vorstellung des Projekts vor Vertretern des LGLN und des Niedersächsischen Forstplanungsamtes.
- Mitarbeit an der inhaltlichen Gestaltung der F³-Projektseiten auf www.waldwissen.net.
- Mitarbeit an einem Artikel über das F³-Projekt in der Zeitschrift AFZ – Der Wald.
- Konzeption, Betreuung und Veröffentlichung von zwei MSc-Arbeiten.

Um die rechtlichen Rahmenbedingungen der öffentlichen Datenbereitstellung von fernerkundungsbasierten, forstlichen Strukturdaten beleuchten zu können, nutzte die NW-FVA verwaltungsinterne Ressourcen. Eine mit der FVA abgestimmte Anfrage für eine juristische Beratung wurde an das Justizariat des Niedersächsischen Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML) gestellt. Diese Anfrage und mehrmalige Kontaktaufnahmen zur Klärung verbliebener Fragen resultierten in einer schriftlichen Stellungnahme des ML zur Bereitstellung der im Projekt erzeugten Daten.

Als Beispiel für die Umsetzung der Datenbereitstellung wurde die Erstellung eines WMS-Kartendienstes beschrieben und auf die im F³-Projekt erzeugten Waldstrukturkarten der nordwestdeutschen Projektgebiete angewandt. INSPIRE-konforme Metadaten für diese Datensätze wurden erstellt und ebenfalls veröffentlicht.

2.3.2 AP 2: Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur großflächigen Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle von Waldgebieten

Die Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Berechnung von Oberflächenmodellen baut auf ein Verfahren der FVA auf. Dieses Verfahren wurde in AP 2, basierend auf den Ergebnissen umfangreicher Validierungsstudien, komplett überarbeitet und optimiert, auch wurde der Softwarecode für eine potentielle deutschlandweite Anwendung vorbereitet. Eine detaillierte Verfahrensbeschreibung sowie Dokumentation des Python-Softwarecodes wurde in enger Abstimmung mit der FVA erstellt (Anhang 3).

Das Image Matching, das die Grundlage für die Erstellung von Oberflächenmodellen bildet, wurde an der NW-FVA mit der Software MatchT-DSM durchgeführt. Für die Berechnung mit MatchT-DSM wurden für Waldflächen optimierte Einstellungen der Software-Parameter bestimmt. Dies geschah für Luftbilddaten mit einer Längsüberlappung von 80% und einer Querüberlappung von 30% unter Verwendung von aus hochgenauen LiDAR-Daten abgeleiteten Referenzmodellen.

Basierend auf dem gemeinsamen Verfahren zur Oberflächenberechnung, wurden Oberflächenmodelle flächendeckend für die drei nordwestdeutschen Projektgebiete berechnet.

2.3.3 AP 3: Ableitung forstlicher Strukturparameter aus Oberflächenmodellen

Für die Ableitung der forstlichen Strukturparameter Vegetationshöhe, Waldhöhenstrukturkarte (WHSK), offene und geschlossene Bestände, Lücken, Rauigkeit des Kronendachs und lockere Altholz- bzw. Überhälterbestände wurden an der NW-FVA Software-Skripte entwickelt, die an der FVA getestet und angepasst wurden. Hochaufgelöste LiDAR-Daten dienen als Validierungsdatensätze. Die Verfahren zur Ableitung forstlicher Strukturparameter aus Oberflächenmodellen sowie der Ergebnisse der Validierung wurden im Meilensteindokument M4 dokumentiert.

Für die drei nordwestdeutschen Projektgebiete wurden alle unter Arbeitspaket 3 fallenden forstlichen Strukturparameter flächendeckend berechnet.

2.3.4 AP 4: Ableitung von Holzvorrats- und Biomassedaten

Gewinnung von Baumarteninformationen aus Sentinel-2-Satellitendaten

Zur Aufbereitung von Sentinel-2-Satellitendaten wurde eine Prozessierungskette erprobt und entwickelt, die verschiedene Software-Produkte miteinander kombiniert, um atmosphärische und topographische Einflüsse auf die in den Daten erfassten Reflexionswerten zu korrigieren. Dies beinhaltete die Erstellung einer Wolkenmaske, die Atmosphärenkorrektur und die topografische Normalisierung. Die Möglichkeiten und Auswirkungen der Korrektur von Sentinel-2-Satellitendaten mit verschiedenen Softwarelösungen wurden intensiv untersucht. An der NW-FVA wurden für die Erstellung von Wolkenmasken die Programme Sen2Cor, MAJA, Fmask und FORCE mit jeweils verschiedenen Parametereinstellungen getestet. Für die Atmosphärenkorrektur wurden die Programme Sen2Cor und FORCE verglichen. Für die topographische Normalisierung wurden verschiedene Algorithmen des R-Pakets ‚rStoolbox‘ sowie der Programme Sen2Cor und FORCE evaluiert. Darüber hinaus wurde eine für Sentinel-2-Daten angepasste Variante zur topographischen Korrektur an der NW-FVA entwickelt und implementiert. Außerdem wurden verschiedene Methoden zum Resampling der in 20 m Auflösung vorliegenden Sentinel-2-Bänder auf eine Auflösung von 10 m verglichen. Die Ergebnisse dieser Tests wurden zusammen mit der FVA evaluiert und ein abgestimmtes Verfahren für die Vorprozessierung zur optimalen Aufbereitung der Sentinel-2-Satellitendaten entwickelt.

Kriterien für die Auswahl von Sentinel-2-Satellitendaten wurden mit der FVA abgestimmt: Aufnahmedatum im Sommer (Juni – August) 2017, möglichst geringe Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Aufnahmen und möglichst geringer Wolkenanteil (< 10%). Entsprechende Sentinel-2-Szenen wurden für die nordwestdeutschen Projektgebiete beschafft und nach dem festgelegten Verfahren prozessiert.

Als Referenzdaten für die Baumartendifferenzierung wurden Stichprobendaten der Betriebsinventur (BI) der Niedersächsischen Landesforsten aufbereitet und verwendet.

Ein R-Skript wurde an der NW-FVA entwickelt, das die aufbereiteten Sentinel-2-Satellitendaten mit den Referenzdaten verschneidet, einen Random Forest-Klassifikator trainiert und auf die Daten anwendet. Die entstehende Baumartenkarte wird exportiert und mit Hilfe einer Kreuzvalidierung geprüft. Eine Genauigkeitsmatrix sowie daraus abgeleitete Genauigkeitsmetriken werden automatisiert erstellt und ausgegeben. Baumartenkarten der nordwestdeutschen Projektgebiete wurden nach dem abgestimmten Verfahren abgeleitet. Das Verfahren zur Herleitung von Baumarteninformationen aus Sentinel-2-Satellitendaten wurde in Zusammenarbeit mit der FVA dokumentiert (Meilenstein M5 in Anhang 5).

Herleitung standortsbezogener Ertragspotentiale

Die Arbeiten der NW-FVA zur Herleitung standortsbezogener Ertragspotentiale umfassten interne Recherchen in den Fachbereichen „Wald- und Bodenzustand“ und „Waldwachstum“ sowie der wissenschaftlichen Literatur. Als Ergebnis der Recherche wurde in Absprache mit der FVA entschieden, das Ertragspotential nicht als eigenständigen Informationslayer zu modellieren, sondern relevante Datensätze zu standörtlichen Eigenschaften direkt in die Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse einfließen zu lassen. Hinweise zu relevanten Standortinformationen wurden dabei einem an der FVA in der Abteilung „Waldwachstum“ im Rahmen der Klimafolgenforschung durchgeführten Projekt zur Regionalisierung baumartenspezifischer Bonitäten entnommen. An der NW-FVA wurden Software-Skripte und Verfahrensbeschreibungen entwickelt, um die benötigten Standortdaten zu Klima, Topographie und Boden für die Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse aufzubereiten. Skripte und Verfahren wurden umfangreich dokumentiert (Meilenstein M8 in Anhang 7).

Holzvorrats- und Biomasseberechnung

In Zusammenarbeit mit der FVA wurde ein Verfahren für die flächendeckende Modellierung von Holzvorrat und Biomasse entwickelt. Es wurden Metriken bestimmt, die als Vorhersageparameter in der Modellierung dienen. Die Auswahl dieser Metriken stützte sich auf Erfahrungen anderer

Projekte, die unter anderem an der FVA durchgeführt worden waren. Software-Skripte, die die entsprechenden Waldstrukturmetriken aus normalisierten Oberflächenmodellen automatisiert ableiten, wurden an der NW-FVA entwickelt und dokumentiert. Außerdem wurde an der NW-FVA ein Software-Skript zur Modellierung von Holzvorrat und Biomasse entwickelt. Das Skript liest die aufbereiteten Daten zu Standort und Waldstruktur ein und verschneidet sie mit Referenzdaten aus Waldinventuren. Anschließend werden Random Forest-Modelle trainiert und validiert sowie die modellierten Holzvorrats- und Biomassekarten exportiert. Die aus einer Kreuzvalidierung gewonnenen Abweichungen zwischen modellierten und beobachteten Werten werden zur Berechnung des absoluten und relativen RMSE verwendet. Alle Software-Skripte wurden an der FVA getestet. Gemeinsam mit der FVA wurde eine detaillierte Dokumentation des Verfahrens erstellt (Meilenstein M8 in Anhang 7).



Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten

Verbundvorhaben „Entwicklung von Methoden und Verfahren zur flächendeckenden und homogenen Generierung von Waldparametern auf der Basis digitaler Oberflächenmodelle aus Luftbilddaten (F³)“

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)
Wonnhaldestr. 4, 79100 Freiburg

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Förderkennzeichen: 22025014 (FVA), 22024816 (NW-FVA)

Dokumentation zu Meilenstein 3

„Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern“



Meilenstein 3

Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Software	1
2.1	Image Matching Software	1
2.1.1	SURE	1
2.1.2	Match-T DSM.....	1
2.2	Python	2
2.3	ArcGIS	2
2.4	LAStools.....	2
3	Benötigte Daten	2
3.1	Luftbilder	2
3.2	Digitales Geländemodell 1 m (DGM1).....	2
4	Organisation der Daten	3
5	Prozessierung	3
5.1	Prozessierung des digitalen Geländemodells (DGM)	3
5.2	Image Matching.....	5
5.3	Qualitätsprüfung	10
5.4	Berechnung von DOM und nDOM mit dem Python-Skript „cloud2ndom_F3.py“	11
5.4.1	Bereinigung und Vereinheitlichung der Eingangsdaten	12
5.4.2	Filterung der Punktwolke	14
5.4.3	Generierung des nDOM im .tif-Format	18
5.4.4	Generierung des DOM im .tif-Format	19
5.4.5	Zuweisung einer Farbskala	19
	Literatur.....	19



1 Einleitung

Im F³-Projekt (Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten) werden Methoden und Verfahren zur standardisierten Ableitung und kartenmäßigen Darstellung von Waldstrukturparametern basierend auf Fernerkundungsdaten entwickelt. Hierdurch wird die Basis für eine standardisierte Datengrundlage bezüglich Bestandeshöhe, Holzvolumen etc. für eine nachhaltige Waldwirtschaft in Deutschland geschaffen. Die entwickelten Methoden sind deutschlandweit einsetzbar und die Ergebnisse flächendeckend, hoch aufgelöst und regelmäßig aktualisierbar. Die Methoden und Verfahren basieren auf deutschlandweit verfügbaren Datensätzen. Die genutzten Fernerkundungsdaten umfassen Luftbilder der regulären Bildflüge der Landesvermessungsverwaltungen, Sentinel-2 Satellitenbilddaten und laserscanningbasierte digitale Geländemodelle (DGM). Forstliche Daten stammen aus der dritten Bundeswaldinventur („BWI3“) oder den Betriebsinventuren („BI“; Stichprobenerhebung) sowie den Bestandesinventuren (bestandesweise Forsteinrichtung). Zusätzlich werden Klima- und Standortdaten verwendet.

Das im Folgenden beschriebene Verfahren zur Ableitung digitaler Oberflächenmodelle (DOM) und normalisierter digitaler Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern baut auf ein an der FVA entwickeltes Verfahren (Schumacher et al., 2019) auf. Dieses wurde für die Verarbeitung von Punktwolken entwickelt, welche mit der Image Matching-Software SURE generiert wurden. Im Rahmen des F³-Projekts wurde das Verfahren zur Filterung der Punktwolken und Erzeugung von DOM und nDOM grundlegend überarbeitet. Zusätzlich fand eine Erweiterung und Verallgemeinerung statt, sodass nun auch Punktwolken der Image Matching-Software MATCH-T DSM prozessiert werden können. Die nachfolgende Beschreibung zeigt detailliert die Schritte des Verfahrens.

2 Software

Die im Folgenden aufgeführte Software wurde innerhalb des F³-Projekts für die DOM-/nDOM-Generierung genutzt. Das entwickelte und hier beschriebene Verfahren ist bei Vorhandensein dieser Software implementierbar.

2.1 Image Matching Software

2.1.1 SURE

Das Image Matching für die Oberflächengenerierung an der FVA wird mit der nFrames Software SURE (“SURface REconstruction”; Version 2.3.1.41) durchgeführt. Die Software implementiert Semi-Global Matching (SGM; Hirschmüller 2005 und 2008).

2.1.2 Match-T DSM

Das Image Matching für die Oberflächengenerierung an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) wird mit der Trimble/Inpho Software MATCH-T DSM (Version 9.2) durchgeführt.



2.2 Python

Das Verfahren zur DOM/nDOM-Berechnung aus photogrammetrischen Punktwolken ist in einem Python-Skript implementiert, das über ArcPy die Verwendung von ArcGIS-Funktionalitäten ermöglicht.

2.3 ArcGIS

Für die DOM-/nDOM-Berechnung werden ArcGIS-Funktionalitäten genutzt. Neben der Lizenzstufe „Basic“ (ArcView) wird die Extension „Spatial Analyst“ benötigt. Das hier vorgestellte Verfahren wurde in ArcGIS 10.5 (ESRI) umgesetzt.

2.4 LAStools

Das hier beschriebene Verfahren zur DOM-/nDOM-Berechnung stützt sich zu einem großen Teil auf die Funktionalitäten von LAStools (rapidlasso GmbH). Folgende LAStools-Funktionen werden verwendet: lasinfo, lastile, lasheight, lasnoise, lasgrid, lasthin, las2las, las2dem, lasduplicate, lasindex. Die hier vorgestellten Methoden wurden entwickelt unter Verwendung der LAStools Version vom 19. November 2018.

3 Benötigte Daten

3.1 Luftbilder

Für die DOM-/nDOM-Berechnung sind digitale Luftbilddaten aus den regelmäßigen Befliegungen der Landesvermessungsverwaltungen vorgesehen. Dies sind 4-Kanal-Bilder (RGBI) mit einer nominellen geometrischen Auflösung von 20 cm und einer Überlappung von 60/30- bzw. 80/30. Das hier beschriebene Verfahren beinhaltet nicht die Orientierung der Luftbilder. Es wird vorausgesetzt, dass diese von den Landesvermessungsverwaltungen mit Hilfe von Kontrollpunkten und direkt erfasster äußerer Orientierungsparameter in einem Bündelblockausgleich hergeleitet und mit den Bildern bereitgestellt wird. Es ist möglich, dass Bildblöcke, die ohne Kontrollpunkte orientiert wurden (nur direkt erfasste äußere Orientierungsparameter und Bündelblockausgleich), einen zu großen Versatz, vor allem in der Höhe, aufweisen. Dies verhindert die Ableitung qualitativ hochwertiger Oberflächenmodelle.

- Dateiformat der Luftbilder: TIFF
- Dateiformat der Orientierungsdaten: Inpho .prj Datei

3.2 Digitales Geländemodell 1 m (DGM1)

Für das Image Matching (mit MATCH-T DSM) und für die Normalisierung der Oberflächenmodelle wird das von den Landesvermessungsverwaltungen bereitgestellte Digitale Geländemodell mit 1 m räumlicher Auflösung benötigt. Die Landesvermessungsverwaltungen generieren das DGM1 aus hochgenauen Laserscannerdaten.

- Dateiformat des DGM1: ASCII (.xyz)

4 Organisation der Daten

Um große Gebiete und die damit einhergehenden großen Datenmengen prozessieren zu können, werden die Daten in quadratische Kacheln von 1 km² unterteilt. Eine solche Einteilung der Daten in Kacheln wird im Zuge des Image Matchings vorgenommen und bis zum Ende der Prozessierung beibehalten. Die quadratischen Kacheln werden so zugeschnitten, dass ihre Kanten mit den vollen Kilometern des jeweiligen Koordinatensystems (Gauß-Krüger oder UTM) zusammenfallen. Die Dateinamen der einzelnen Kacheln beinhalten die Koordinaten der linken unteren Kachelecke (Südwestecke), um sie geografisch zuordnen zu können.

Im Falle von Daten im Gauß-Krüger Koordinatensystem besteht der Dateiname aus 8 Ziffern, wobei die ersten vier Ziffern für den Rechtswert und die letzten vier Ziffern für den Hochwert stehen. Für Daten im UTM-Koordinatensystem beinhaltet der Name 9 Ziffern, mit den ersten fünf Ziffern für den Rechtswert (inklusive Zonenindex, z. B. 32) und den letzten vier Ziffern für den Hochwert. In beiden Fällen fallen die letzten drei Ziffern der Koordinaten (000) weg. Alle nach dem Image Matching durchzuführenden Prozessierungsschritte werden kachelweise ausgeführt. Den Kacheln wird entsprechend ihres Themas ein Präfix im Dateinamen zugeordnet, z. B. „DTM_“ für das Geländemodell (DGM), „DSM_“ für das Oberflächenmodell (DOM) und „nDSM_“ für das normalisierte Oberflächenmodell (nDOM).

5 Prozessierung

5.1 Prozessierung des digitalen Geländemodells (DGM)

Das DGM wird während des Image Matchings (mit MATCH-T DSM) sowie während der Weiterverarbeitung der Punktwolken in verschiedenen geometrischen Auflösungen und Dateiformaten benötigt. Je nach verwendeter Image Matching Software unterscheiden sich die benötigten Formate. Bei der Nutzung von SURE muss das DGM in 1 m Auflösung (DGM1) im .laz-Format vorliegen. Wird das Image Matching mit MATCH-T DSM durchgeführt, wird zusätzlich zum DGM1 im .laz-Format auch noch ein DGM mit 25 m Auflösung (DGM25) im .tif- bzw. .dtm-Format benötigt. Die Aufbereitung der DGM Daten erfolgt mit der Software LAsTools. Es wird in der nachfolgenden Beschreibung davon ausgegangen, dass das DGM1 in der von den Vermessungsverwaltungen üblicherweise verwendeten Kachelung von 1000 x 1000 m im .xyz-Format vorliegt.

Konvertierung von .xyz zu .laz: Um die .xyz Dateien in .laz Dateien zu konvertieren, wird das LAsTools Modul „txt2laz.exe“ mit den folgenden Einstellungen gestartet:

- „process all files“ ausgewählt
- (x), (y) und (z) ausgewählt
- parse string: xyz
- format: laz

Während der Konvertierung wird allen Punkten die Klasse 0 zugewiesen. Über die Kommandozeile kann der Prozess nach folgendem Muster gestartet werden:



```
txt2las.exe -lof "dgm\xyz\file_list_xyz.txt  
-parse xyz  
-odir "dgm\laz" -olaz
```

Die nun vorliegenden .laz-Dateien werden im weiteren Verlauf unter anderem für die Normalisierung des Oberflächenmodells verwendet, die vom Python-Skript „cloud2ndom.py“ durchgeführt wird. Um die DGM .laz Dateien hierfür nutzen zu können, müssen sie nach dem im Abschnitt 4 erläuterten Muster benannt werden. Für UTM-Daten wäre der Dateiname, z. B., „DTM_32XXXXYYYY.laz“. Wobei XXX für die ersten 3 Ziffern des UTM 32 Ostwert (ohne Zonenindex) und YYYY für die ersten 4 Ziffern des UTM 32 Nordwert steht. Sollten die DGM Dateien nicht nach dem genannten Schema benannt sein, muss eine Umbenennung stattfinden. Das Python-Skript „rename_F3.py“, das vom Skript „cloud2ndom_F3.py“ aufgerufen wird (siehe Abschnitt 5.4), implementiert bereits die entsprechende Umbenennung der DGM-Namensmuster des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) sowie des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL-BW). So werden die auf UTM-Koordinaten basierende DGM-Namensmuster 2XXXXYYYY.laz und DGM_32XXX_YYYY.laz umbenannt in DTM_32XXXXYYYY.laz sowie das auf Gauß-Krüger-Koordinaten basierende DGM-Namensmuster DGM_XXXX_YYYY.laz umbenannt in DTM_XXXXYYYY.laz. Bei abweichenden Namensmustern der DGM-Kacheln muss der Code im Skript „rename_F3.py“ entsprechend modifiziert werden (Anpassung der *Regular Expressions*).

Erstellung des DGM25 im .tif-Format: Um das DGM1 auf eine Auflösung von 25 m zu vergrößern und vom .laz-Format in das .tif-Format zu konvertieren, wird das LAStools Modul „lasgrid.exe“ verwendet. Da das DGM25 später für das Image Matching mit der Software MATCH-T DSM (Abschnitt 5.2) verwendet werden soll, ist zu beachten, dass das entstehende DGM25 als eine Datei (keine Kachelung) abgespeichert werden muss (Aktivierung der Option „merge files into one“). In der GUI wird der Prozess mit folgenden Einstellungen gestartet:

- „process all files“ ausgewählt
- „merge files into one“ ausgewählt
- Filename: dgm25merg
- Pixel/step size: 25
- item: elevation
- op: average
- format: tif

Über die Kommandozeile kann der Prozess nach folgendem Muster gestartet werden:

```
lasgrid.exe -lof "dgm\laz\file_list_laz.txt  
-merged  
-step 25  
-elevation  
-average  
-odir "dgm" -o "dgm25merg.tif"
```

5.2 Image Matching

Für das Image Matching muss Software verwendet werden, die große Datenmengen prozessieren kann und Punktwolken hoher Dichte (Ziel: ein 3D-Punkt je Bildpixel) erzeugt. Hierfür existieren mehrere kommerzielle Softwarepakete (z. B. SURE, MATCH-T DSM, ERDAS, PhotoScan). Diese unterscheiden sich zum Teil stark in den Matching-Methoden und in den Parametern, die eingestellt werden können. Die Entwicklungen in diesem Bereich sind sehr dynamisch. Daher konnten im Rahmen des F³-Projekts nicht alle möglichen Softwarelösungen getestet werden. Grundsätzlich gilt, dass für jede Software eigene, für Waldflächen optimierte Parametereinstellungen gefunden werden müssen.

Im Folgenden werden die im F³-Projekt als optimal befundenen Parametereinstellungen für SURE und MATCH-T DSM beschrieben. Die Einstellungen für das Image Matching mit der Software MATCH-T DSM wurden durch einen Vergleich der bildbasierten Oberflächenmodelle mit hochgenauen Referenzdaten, d.h. einem laserscanningbasierten Oberflächenmodell, ermittelt. Die Abweichungen der bildbasierten Modelle vom Referenzmodell wurden mittels des Root Mean Square Errors (RMSE) quantifiziert und es wurde ein visueller Vergleich der Modelle anhand eines Differenzbildes durchgeführt.

Für das Image Matching mit SURE wurden bereits vor Beginn des F³-Projekts Parametereinstellungen festgelegt, die für Luftbilder mit Längsüberlappung von 60 bzw. 67% und Querüberlappung von 30% optimale Ergebnisse liefern, da zu diesem Zeitpunkt keine regelmäßigen Aufnahmen höher überlappender Luftbilder in Baden-Württemberg durchgeführt wurden. Die Parametereinstellungen wurden durch einen Vergleich der Höhen im nDOM mit stereoskopische gemessenen Baumhöhen ermittelt. Seit 2017 werden in Baden-Württemberg regelmäßige Befliegungen mit einer Überlappung von 80/30 durchgeführt. Für die stärkere Überlappung optimierte Parametereinstellungen wurden im F³-Projekt festgelegt. Zur Feststellung der optimalen Parameter wurden die bildbasierten DOM anhand von RMSE und Differenzbildern mit laserscanningbasierten DOM verglichen. Zusätzlich wurde die Menge der „no data“-Pixel (NA) miteinander verglichen.

Bei SURE wie auch bei MATCH-T DSM hat sich (bei einer 80/30-Überlappung) das Image Matching bis zur obersten Pyramidenstufe (20 cm Pixelgröße) als vorteilhaft erwiesen, auch wenn dies eine höhere Rechenzeit bedeutet. Selbst wenn später die geometrische Auflösung wieder herabgesetzt wird, z. B. auf 50 oder 100 cm, wurden die Baumhöhen besser erfasst. Für Waldbestände ist es sinnvoll, dass die Software übermäßige Glättung vermeidet.

Nachfolgend werden die im Rahmen des F³-Projekts ermittelten optimalen Parametereinstellungen für SURE (60 bzw. 67/30- sowie 80/30-Überlappung) und MATCH-T DSM (80/30-Überlappung) für Luftbilder mit einer nominellen geometrischen Auflösung von 20 cm dargestellt.

- *SURE-Einstellungen*

Die nFrames Software SURE wird bei der F³-Projektpartnerin FVA zum Image Matching für die Oberflächengenerierung verwendet. Die Software implementiert Semi-Global Matching (SGM). SURE erzeugt zwei verschiedene, regelmäßige Punktwolken: (a) „Cloud“, in der Lücken im Grid durch Verdeckung und Schatten nicht durch Interpolation aufgefüllt wurden. Und (b) „Cloud_Refined“, in der fehlende Werte bereits interpoliert wurden. Die Punktwolke „Cloud_Refined“ wird für die weiteren Prozessierungsschritte zur nDOM-Berechnung verwendet.

Für SURE (Version 2.3.1.41) werden größtenteils die Grundeinstellungen der Software für das Szenario „Aerial Nadir“ mit 60% bzw. 67% sowie 80% „forward overlap“ und 30% „sideward overlap“ beibehalten. Im SURE-GUI werden folgende Einstellungen manuell gesetzt:

- Parameters:
 - Quality: High (Längsüberlappung < 80%: Berechnung nur bis zur Pyramidenstufe 1)
 - Quality: Ultra (Längsüberlappung ≥ 80%: Berechnung bis zum Originalbild)
- Advanced configuration:
 - Xmin/Xmax“ und „Ymin/Ymax“: 2D-Projektfläche die genau mit den vollen Kilometer-Koordinaten des entsprechenden Koordinatensystems zusammenfallen und gleichzeitig alle zu prozessierenden Luftbilder beinhalten (Haken bei „auto“ entfernen)
 - Tile size: Kachelgröße auf „manual“ und 1000 m setzen
 - GSD: Ground Sampling Distance auf „manual“ und $0,25 \times 2 = 0,5$ m (Längsüberlappung < 80%) bzw. $0,2 \times 1 = 0,2$ m (Längsüberlappung ≥ 80%) setzen
 - Pointcloud format: „laz“ (reduziert den benötigten Speicherplatz; als Ausgabeformat könnte auch „las“ gewählt werden, was die Prozessierung beschleunigt, aber mehr Speicherplatz benötigt.)
 - Minimum model count (fold): 1 (berechnet die größtmögliche Gebietsausdehnung).
 - Minimum detections per cell: 1

Das nachfolgende Beispiel zeigt, wie man SURE mit den Einstellungen für 80% Längsüberlappung über die Kommandozeile starten kann:

```
sure.exe -inphoprj P:\luftbilder\orientation\image_block.prj -basepath P:\SURE_output -scenario AERIAL 80 30 -tilesize 1000 -gsd 0.2 -area2d 595000 610000 5716000 5729000 -apply_area_based_image_selection -laz -fold 1 -ignore_earth_curv
```

Beim Image Matching mit SURE werden verschiedene Produkte erzeugt. Relevant für das hier beschriebene Verfahren zur Oberflächengenerierung sind die „Cloud_Refined“-Daten. Diese Punktwolke wird von SURE für die Orthophotoerstellung produziert (wenn keine Orthophotos berechnet werden, wird auch kein Cloud_Refined berechnet). Im Vergleich zur Punktwolke „Cloud“ ist „Cloud_Refined“ in ihrer Qualität verbessert und kleinere NA-Flächen wurden interpoliert und mit Punkten gefüllt. „Cloud“ ist für die DOM/nDOM-Berechnung nicht von Bedeutung, kann aber einen Hinweis auf die Qualität des Image Matching in Bezug auf Vollständigkeit geben (Erstellung einer NA-Maske).

Die hier gemachten Angaben beziehen sich auf SURE Versionen bis einschließlich 3, mit denen auch die Berechnungen im F³-Projekt durchgeführt wurden. Ab Version 4, die erst im letzten Drittel der Projektlaufzeit (1. Quartal 2020) verfügbar wurde, haben sich die Einstellmöglichkeiten (besonders für die Kommandozeile) geändert. Zum Beispiel muss nun auch der Speicherort der Bilddaten (-i) angegeben werden und die Befehle „-gsd“ und „-laz“ wurden zu „--gsd“ bzw. „--laz“ geändert. Das nachfolgende Beispiel zeigt, wie man SURE Version 4.1 mit den Einstellungen für 80% Längsüberlappung über die Kommandozeile starten kann:



```
sure.exe -o P:\luftbilder\orientation\image_block.prj -i P:\luftbilder  
-p P:\SURE_output -s AERIAL_NADIR 80 30 -q ULTRA -t 1000 --gsd 0.2 -a  
595000 610000 5716000 5729000 --laz --ignore-earth-curvature
```

- *MATCH-T DSM-Einstellungen*

- a. Vorbereitung der Daten

Um mit MATCH-T DSM eine Punktwolke zu erstellen, müssen die Eingangsdaten zuvor aufbereitet werden. Es müssen die Dateipfade zu den Bilddateien angepasst werden, Bildpyramiden und ein Übersichtsbild des Projektgebietes erzeugt werden, außerdem muss die DGM25 .tif Datei in das .dtm Format konvertiert werden. Hierzu sind folgende Schritte durchzuführen:

Nach dem Start des Applications Master wird über den Button „Open...“ die .prj Datei der Luftbilder geöffnet. Die Eigenschaften des nun geöffneten Projekts können im „Project Editor“ eingesehen und geändert werden.

Anpassen der Pfade zu den Bilddateien: Doppelklick auf „Frame Type“ → Auswahl aller Listeneinträge → „Edit“ → Im Fenster „Frame Photo Properties“ den Eintrag „Image path“ auswählen und anschließend zum Dateordner, der die Luftbilder enthält, navigieren.

Im selben Menü („Frame Photo Properties“) den Eintrag „Terrain Height“ auswählen und die durchschnittliche Geländehöhe eintragen → „OK“.

Das Berechnen der Bildpyramiden erfolgt über das Hauptmenü: „Imaging“ → „Image Commander“ → Auswahl aller Listeneinträge → „Process Image Overviews“ → Häkchen bei „Enforce tile rather than scanline organization“ entfernen → „Start“.

Das Erzeugen eines Übersichtsbilds der Projektregion (optional) erfolgt über: „Imaging“ → „Image Commander“ → „Process Project Overview“ → „Generate Quick-Ortho“ → „Start“.

Für das gesamte Gebiet, für welches das Image Matching durchgeführt werden soll, muss ein zusammenhängendes DGM (eine Datei, keine Kacheln!) in den Inpho-eigenen Formaten .dtm oder .ras vorliegen. Mit dem „DTM Toolkit“ muss dazu das in Schritt 4.2 erzeugten DGM25 (.tif Format) in das .dtm Format konvertiert werden („Capture“ → „DTM Toolkit“ → „Convert“).

- b. Image Matching

Nachdem die Eingangsdaten, wie zuvor beschrieben, aufbereitet wurden, können die Einstellungen für das eigentliche Image Matching gewählt werden. Hierbei müssen Einstellungen sowohl über die graphische Benutzeroberfläche von MATCH-T DSM vorgenommen werden als auch über die Match.status-Datei.

- b.1. Einstellungen: Match.status Datei

Um eine Match.status Datei zu erzeugen, muss über MS Windows eine leere Textdatei erstellt werden („Windows“ → „Zubehör“ → „Editor“). In diese Datei wird der unten folgende Text eingefügt. Anschließend wird die Datei unter dem Namen „Match.status“ in dem Ordner, der auch die .prj Datei der zu prozessierenden Luftbilder enthält, gespeichert. Im unten gezeigten Text der Match.staus Datei müssen die gelb hinterlegten Koordinaten an das zu prozessierende Gebiet angepasst werden. Es müssen die Koordinaten der linken unteren Ecke des Gebiets angegeben werden. Die Werte müssen auf volle Tausender gerundet sein, was dazu führen kann,



dass die Koordinate außerhalb des Gebietes liegt (siehe Beispielkoordinaten in Gelb im Text unten).

Text für die Match.status Datei:

```
*** 3D point cloud: ***
-z_factor 1.0 ..... Factor for Z discontinuity of 2.5D filtering
                    (default: 1.0 * [5*sigma])
-z_smooth 0.5 ..... Factor for Z smoothing in 2.5D filtering
                    (default: 2.0 * [sigma])
-PtsFormat "las12" ..... Output format of 3D point cloud
                    (pts,dxf,xyz,wnp,bwnp,bxyz,--->las,las12,xyzc)
-dtmshift ..... Top/lower cloud points preferred for DEM
                    interpolation

*** Tile manager application: ***
-TpixPts ..... Create point cloud tile manager files
-TpixPtsCoordName ..... Tile manager file names with
                    coordinates
-TpixPtsOriginX 591000 ..... X origin of point cloud tile manager
                    files
-TpixPtsOriginY 5715000 ..... Y origin of point cloud tile manager
                    files
-TpixPtsSizeX 1000 ..... X tile size of point cloud tile manager
                    files
-TpixPtsSizeY 1000 ..... Y tile size of point cloud tile manager
                    files

*** Miscellaneous: ***
-stddev2las ..... Output of standard deviation to LAS intensity
                    (shift: 10000)

*** User interface: ***
-filtering ..... Display additional Finite Element Filter
                    settings
```

b.2. Einstellungen: MATCH-T DSM graphische Benutzeroberfläche

Nachdem die Match.status Datei erstellt wurde, muss der Applications Master geschlossen und anschließend neu gestartet werden. Das Projekt wird über den Button „Open...“ des Applications Master geöffnet. Im Applications Master wird dann über den Menüpunkt „Capture“ → „MATCH-T DSM“ der „MATCH-T DSM Commander“ geöffnet und dort über den Button „Add“ ein neuer Task hinzugefügt und parametrisiert. Im sich öffnenden Fenster „Parameter Settings“ (Abbildung 1) muss die Area ID: „DSM_Cloud“ vergeben werden. Im Menübereich „Output“ muss unter Directory: der Ausgabeordner festgelegt und die Option „Enable LasZip format for point cloud files“ markiert werden. Anschließend wird über den Button „...“ neben dem Feld „Strategy“ das

Fenster „Surface Generation Parameter Dialog“ geöffnet (Abbildung 2). Im „Surface Generation Parameter Dialog“ werden die in Abbildung 2 gezeigten Einstellungen gewählt und mit „OK“ gespeichert.

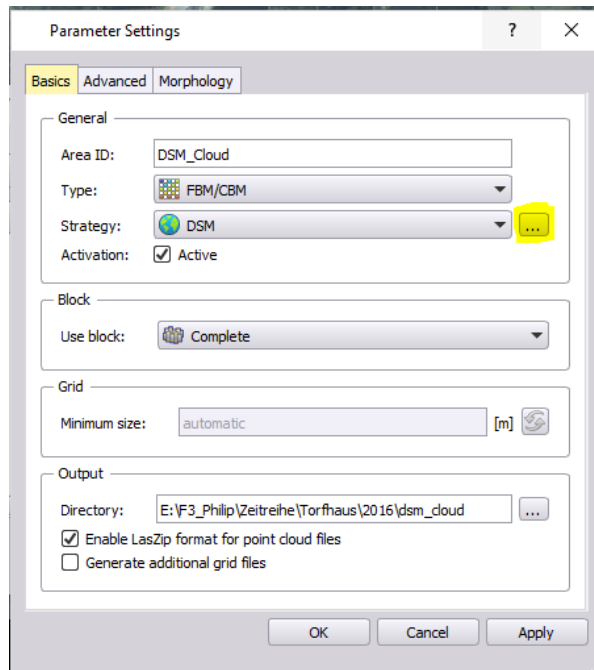


Abbildung 1: Darstellung des Parameter Settings Fensters (Tabellenreiter Basics) der Software MATCH-T DSM und der zu wählenden Einstellungen.

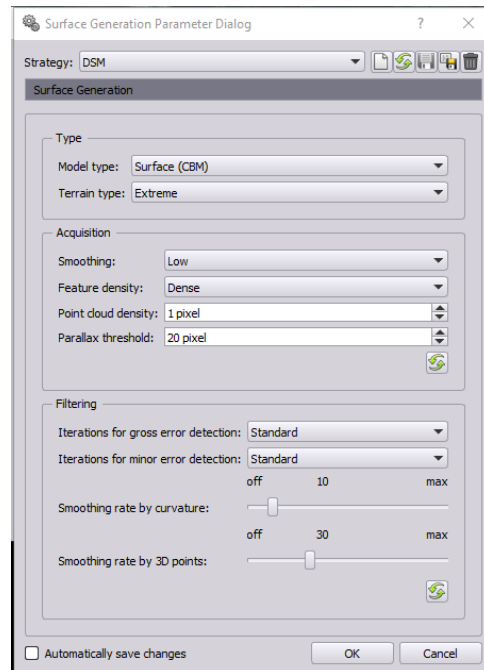


Abbildung 2: Darstellung des Surface Generation Parameter Dialog Fensters der Software MATCH-T DSM und der zu wählenden Einstellungen.

Zuletzt wird im Fenster „Parameter Settings“ der Tabellenreiter „Advanced“ geöffnet. Unter Options müssen die Werte „Optimize“ = Balance, „Start at“ = Level 10 und „Stop at“ = Level 0 spezifiziert werden. Dann muss die Option „Consider initial height model“ markiert und der Pfad zum DGM25 (.dtm Format) spezifiziert (Abbildung 3) werden. Über „OK“ wird das Parameter Set gespeichert und das Fenster „Parameter Settings“ geschlossen.

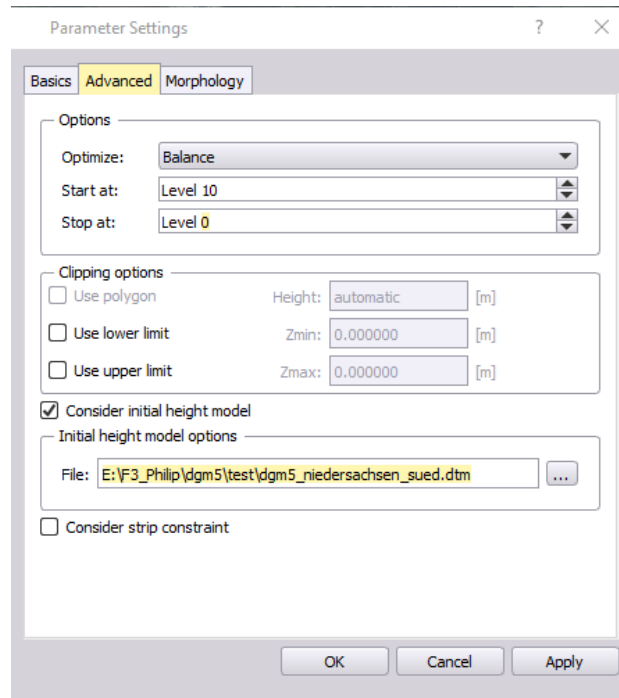


Abbildung 3: Darstellung des Parameter Settings Fensters (Tabellenreiter Advanced) der Software MATCH-T DSM und der zu wählenden Einstellungen.

Im MATCH-T DSM Commander erscheint der soeben parametrisierte Matching Task nun als Listeneintrag (Abbildung 4). Nachdem das Safe-Icon (Diskettensymbol) angeklickt wurde, kann der Matching Task gestartet werden („Process“ → „Start“).

Als Output generiert MATCH-T DSM .laz Dateien mit einer Ausdehnung von 1000 x 1000 m.

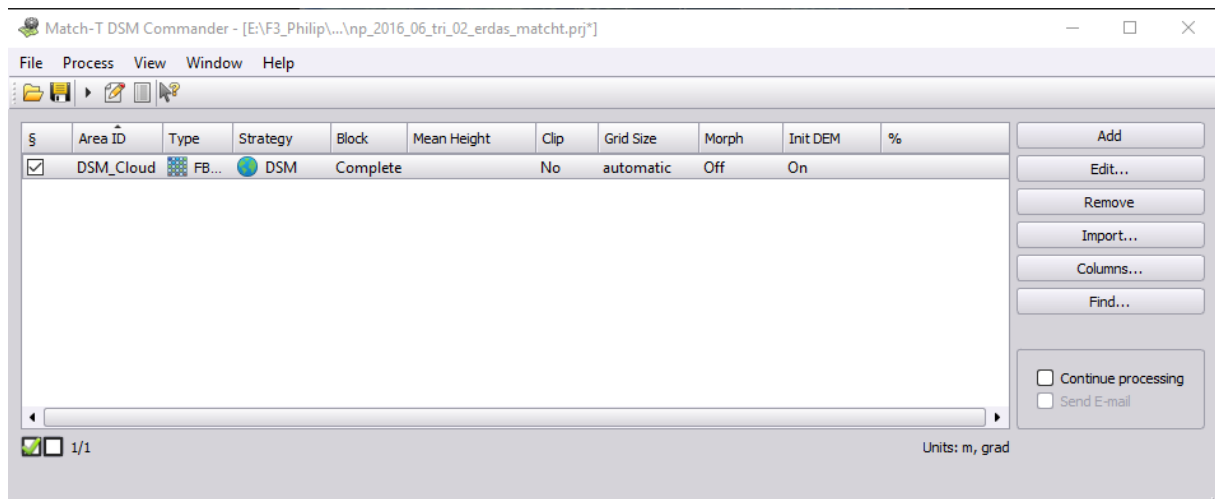


Abbildung 4: Darstellung des MATCH-T DSM Commander Fensters und der zu wählenden Einstellungen.

5.3 Qualitätsprüfung

Bevor mit der nDOM-Berechnung fortgefahren wird, sollte eine erste (visuelle) Qualitätsprüfung der Punktwolken erfolgen, bei der vor allem die Vollständigkeit der prozessierten Fläche überprüft wird. Dadurch können Fehler aufgrund von Wolken oder unzureichender Bildorientierung erkannt werden. Wie eine Qualitätsprüfung durchgeführt werden kann, variiert von Software zu Software. Je nach bereitgestellten Informationen und Daten können Statistiken einen Hinweis auf die Qualität liefern, sich Messabweichungen graphisch darstellen lassen oder die Vollständigkeit in abgeleiteten

Rasterprodukten (z. B. Orthophotos) visuell erkennbar gemacht werden. In MATCH-T DSM ist eine visuelle Überprüfung der generierten Punktwolken mit Hilfe des „DTMaster“ möglich („Capture“ → „DTMaster“). Nach Öffnen des DTMaster kann über „File“ → „Import“ → „Tile Manager“ eine Übersicht über alle erzeugten Punktwolkekacheln visualisiert werden. Nach Auswahl einzelner Kacheln per Mausklick können sie über den Button „Load“ in den DTMaster geladen und im Detail betrachtet werden. Über den Button „Display Points“ können z. B. verschiedene Farbschemata für die Darstellung gewählt werden und über den Button „Profile Area“ kann per drag-and-drop ein Bereich der Punktwolke für die Darstellung in einem 3D-Viewer ausgewählt werden.

Die Ergebnisse des Image Matchings mit SURE wurden in diesem Projekt mit Hilfe eines ArcGIS Mosaic Datasets aller Orthophotokacheln überprüft. Falsche Höhen aufgrund von Matchingfehlern führen in einem Orthophoto, das auf Basis des DOM berechnet wurde, zu Artefakten und Bildbereichen, in denen das Bild verschmiert erscheint. Werden solche Strukturen erkannt, können die entsprechenden Punktwolkekacheln, z. B. mit LAStools („lasview“) oder in der Software Cloud Compare (<http://cloudcompare.org/> [letzter Zugriff 17.02.2020]), genauer untersucht werden.

5.4 Berechnung von DOM und nDOM mit dem Python-Skript „cloud2ndom_F3.py“

Die nachfolgend beschriebene Berechnung von DOM und nDOM ist im F³-Projekt in einem Python-Skript (Nutzung von ArcPy) implementiert und läuft vollautomatisch. Es ist zu beachten, dass der Ordner, der das Skript cloud2ndom_F3.py enthält, ebenfalls das Python-Skript rename_F3.py enthalten muss. Das Skript rename_F3.py wird während der Prozessierung durch cloud2ndom.py aufgerufen und verwendet. Ebenfalls enthalten sein müssen der Ordner „lyr_files“ und das darin abgelegte Farbschema. Andernfalls kann den nDOM-Ausgabedateien nicht das für die Darstellung angepasste, aussagekräftige Farbschema (Abbildung 5) zugewiesen werden. Im Skript müssen folgende Einstellungen angepasst werden:

1. cloud: Pfad zu den Punktwolkekacheln (Zeile 76)
z. B. r"S:\project_area_1\image_matching\Cloud_Refined"
2. dtm: Pfad zu den 1000 x 1000 m DGM1-Kacheln (Zeile 78)
z. B. r"S:\project_area_1\image_matching\cloud2ndsm\dgm1"
3. output_path: Pfad zur Ablage von DOM und nDOM (Zeile 80)
z. B. r"S:\project_area_1\image_matching\cloud2ndsm"
4. lastools: Pfad zum LAStools-Ordner (Zeile 82)
z. B. r"S:\Projekte\Hinweise\software\LAStools18"
5. epsg: EPSG-Code des verwendeten Koordinatensystems der Eingangsdaten (Zeile 86)
z. B. 31467 für Gauß-Krüger Zone 3 oder 25832 für UTM Zone 32 N
6. min_area: Mindestfläche (in %) für die pro Kachel Höhendaten vorhanden sein müssen, damit diese Kachel prozessiert wird (Zeile 88). Voreinstellung ist 10 (%).

Gestartet wird das Skript über eine Batch-Datei (.bat), die den Pfad zur zu nutzenden Python-Installation sowie zum Python-Skript angeben. Sie kann beispielsweise mit einem Texteditor erstellt werden, indem folgender Text eingefügt und die Datei mit der Endung .bat gespeichert wird:

```
C:\Python27\ArcGIS10.5\python.exe C:\Pfad\zum\Skript\cloud2ndom_F3.py
PAUSE
```

Während der Prozessierung werden temporäre Daten im „output_path“ Verzeichnis abgelegt, die nach Abschluss der DOM- und nDOM-Berechnung wieder gelöscht werden.

Nachdem das Skript gestartet wurde, werden die in den Abschnitten 4.4.1 bis 4.4.5 detailliert erläuterten Operationen zur Harmonisierung, Filterung, Normalisierung und Rasterung der Punktwolke durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisdateien sind:

- 1.) Oberflächenmodell als Punktwolke (50 cm Punktabstand) im laz-Format. Die Ausdehnung der Kacheln beträgt 1000 x 1000 m.
- 2.) Oberflächenmodell als Rasterdatei im tif-Format. Die tif-Dateien haben eine Auflösung von 1 m und eine Ausdehnung von 1000 x 1000 m.
- 3.) Normalisiertes Oberflächenmodell (50 cm Punktabstand) im laz-Format. Jede Kachel ist mit einem 100 m Puffer umgeben, der als „withheld“ klassifiziert ist. Die Ausdehnung der Kacheln beträgt inklusive des Puffers 1200 x 1200 m.
- 4.) Normalisiertes Oberflächenmodell im tif-Format. Die tif-Dateien haben eine Auflösung von 1 m und eine Ausdehnung von 1000 x 1000 m.

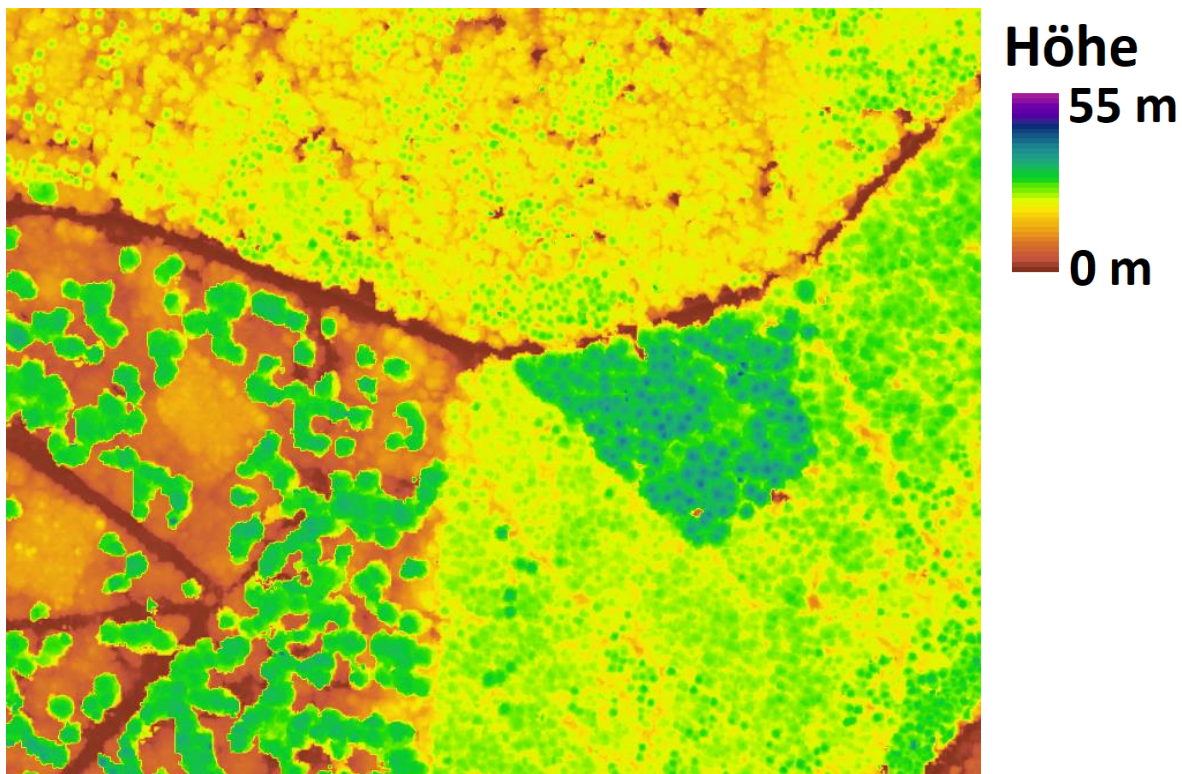


Abbildung 5: Illustration des nDOM Farbschemas.

5.4.1 Bereinigung und Vereinheitlichung der Eingangsdaten

Um die Ableitung von DOM und nDOM aus der Punktwolke zu optimieren, werden die Eingangsdaten zunächst in mehreren Schritten bereinigt und vereinheitlicht:

- 1.) Löschen (nahezu) leerer Dateien: Aufgrund der vorgegebenen Kachelung der Daten, können nach dem Image Matching Punktwolkenkacheln existieren, die keine oder nur

sehr wenige Punkte enthalten. Diese befinden sich im Randbereich des Matching-Gebietes und entstehen abhängig vom Gebietszuschnitt und der Verteilung der Stereo-Luftbilder. Leere oder nahezu leere Punktwolkendateien werden aufgrund ihrer Dateigröße (<1500 byte) erkannt und gelöscht.

- 2.) Harmonisierung der Namensgebung der Eingangsdaten: Für die weitere Prozessierung muss die Namensgebung der Eingangsdaten (Punktwolken- und DGM-Dateien) harmonisiert werden. Hierfür wird das Python-Skript `rename_F3.py` aufgerufen. Basierend auf den dort definierten „Regular Expressions“ werden Dateien mit bestimmter Namensstruktur erkannt und entsprechend den Vorgaben (siehe Abschnitt 4) umbenannt. Je nach Muster der Namensgebung der Eingangsdaten, müssen die Regular Expressions zur Erstellung des neuen Dateinamens im Skript `rename_F3.py` angepasst werden.
- 3.) Vergleich der Abdeckung von DGM und Punktwolke: Das nDOM kann nur für Kacheln erstellt werden, für die auch ein DGM vorhanden ist. In Grenzgebieten werden Luftbildbefliegungen üblicherweise etwas über die Grenze hinaus durchgeführt, um Datenlücken im grenznahen Bereich zu vermeiden. Dadurch können beim Image Matching Punktwolkekacheln entstehen, für die keine DGM Daten vorliegen. Um einen Abbruch der nDOM-Berechnung aufgrund fehlender DGM-Kacheln zu vermeiden, wird eine Liste der Kacheln erstellt, die sowohl von der photogrammetrischen Punktwolke als auch vom DGM abgedeckt sind.
- 4.) Beschränkung auf Kacheln, die zu mindestens 10% mit Daten gefüllt sind: Kacheln in denen nur zu einem geringen Anteil Höhendaten vorhanden sind, verlängern die Prozessierungszeit und erhöhen den benötigten Speicherplatz ohne viel zusätzliche Informationen bereitzustellen. Zudem liegen diese Kacheln üblicherweise in den Randbereichen von Befliegungsblöcken, in denen die Qualität der Bildorientierung und des Image Matchings und somit auch der Höhenwerte vermindert ist. Daher werden nur Kacheln prozessiert, die auf mindestens 10% (= 100.000 m²) der Fläche Höheninformationen enthalten. Der Datenanteil einer Kachel wird mit dem LAsTools-Befehl „`lasinfo`“ erfragt.

```
lasinfo -lof i"intermediate\pc_common_tile_list.txt" ^
-nh -nv -cd -nmm ^
-odir "intermediate\info_dir" -otxt
```

Für jede Punktwolkenkachel wird eine Textdatei erstellt, aus der die Größe der mit Höhendaten gefüllten Fläche („*covered area in square units*“/„*kilounits*“) ausgelesen werden kann. Nur Kacheln mit Flächenanteilen von mindestens 10% werden für die weitere Prozessierung verwendet. Der Wert 10% ist hier voreingestellt, kann aber durch den/die NutzerIn in Zeile 88 angepasst werden.

- 5.) Harmonisierung des Punktabstands: Da alle im Folgenden verwendeten Filter (siehe Abschnitt 5.4.2) für Punktwolken mit einem nominellen Punktabstand von 50 cm optimiert wurden, müssen Punktwolken mit höherer Punktdichte ausgedünnt werden. Dies hat auch den positiven Effekt, dass die zu prozessierenden Dateien weniger Speicherplatz in Anspruch nehmen und die Verarbeitung mit höherer Geschwindigkeit abläuft. Zuerst wird geprüft, ob ein Ausdünnen der Punktwolke nötig ist. Dafür wird aus

der ersten Punktwolkekachel mit dem LAStools-Befehl „lasinfo“ die benötigte Information in eine Textdatei geschrieben.

```
lasinfo -i "Point_Cloud\DSM_Cloud_*.las" ^  
-nh -nv -cd -nmm ^  
-odir "intermediate\las_info.txt" -otxt
```

Aus dieser Textdatei wird der mittlere Punktabstand extrahiert. Ist dieser kleiner als 0,5 m, wird die Punktwolke ausgedünnt. Dafür wird eine Liste der auszdünnenden Kacheln (list_thin.txt) erstellt und der LAStools Befehl „lasthin“ mit den folgenden Parametereinstellungen verwendet. Lasthin legt ein Raster mit einer Weite von 50 cm über die Punktwolke und wählt pro Rasterzelle den Punkt aus, der dem 95. Perzentil der in der Zelle vorhandenen Punkte am nächsten kommt.

```
lasthin -cpu 64 -lof i"intermediate\pc_tile_list.txt" ^  
-percentile 95 ^  
-step 0.5  
-odir "intermediate\lasthin" -olaz ^
```

5.4.2 Filterung der Punktwolke

Die Parameter der Filter wurden so gewählt, dass sie ein optimales Ergebnis für Waldflächen in Mitteleuropa liefern. Bevor die aus dem Image Matching der Luftbilder entstandene Punktwolke gefiltert werden kann, müssen die zu prozessierenden Kacheln gepuffert werden, um Randeffekte bei der Filterung zu vermeiden. Unter Verwendung des DGM1 wird die Punktwolke normalisiert und anschließend werden Punkte, die mehr als 1 m unter oder mehr als 55 m über dem DGM1 liegen, entfernt (Abbildung 6). Allerdings ist zu bedenken, dass Punkte auf Bäumen die größer als 55 m sind, teilweise als Ausreißer behandelt und gelöscht werden. Der obere Schwellwert 55 m wurde als Kompromiss zwischen Entfernung möglichst vieler Ausreißer und vollständiger Erfassung sehr großer Bäume gewählt. Es wird angenommen, dass Bäume die größer 55 m sind, nur sehr selten vorkommen (meistens beschränkt auf Douglasienbestände). Der untere Schwellwert -1 m berücksichtigt Ungenauigkeiten in den Höhenwerten sowie einen potentiellen Höhenversatz zwischen DGM1 und der Punktwolke und vermeidet die Löschung von Punkten, die tatsächlich keine Ausreißer sind. Mit dem LAStools Befehl „lasnoise“ werden außerdem isolierte Punkte bzw. Punktgruppen entfernt (Abbildung 6).

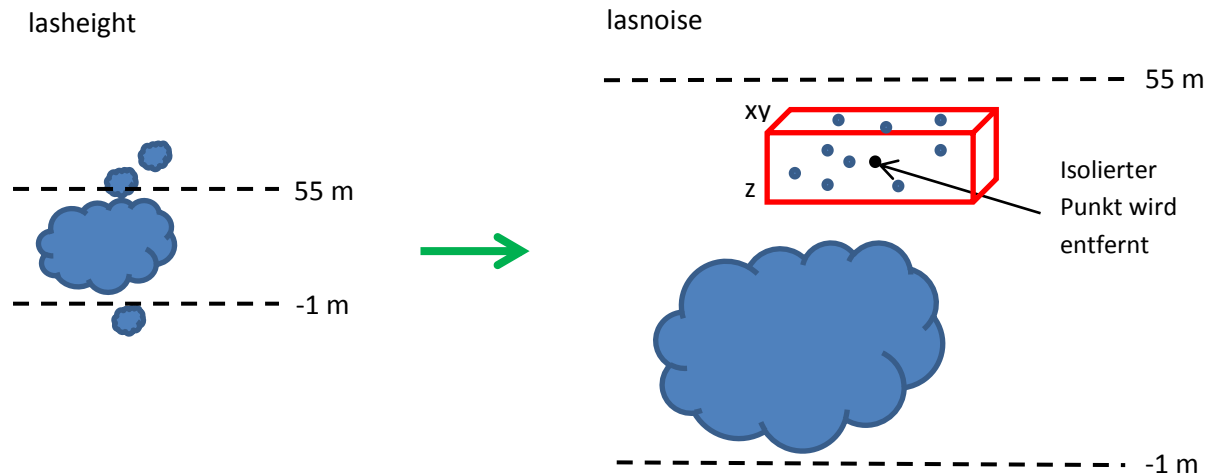


Abbildung 6: Einsatz von lasheight (Ausreißer werden entfernt) und lasnoise (isolierte Punkte werden entfernt) zur Punktwolkenfilterung.

Aus der so entstandenen gefilterten Punktwolke können anschließend Waldstrukturattribute abgeleitet und als Rasterdaten abgespeichert werden. Zudem werden daraus ein DOM (Abschnitt 5.4.4) und ein nDOM (Abschnitt 5.4.3) im Rasterformat (.tif) erstellt. Die Details des Filterprozesses sind im Folgenden beschrieben:

- 1.) Normalisieren der Punktwolke: Um die Punktwolke zu normalisieren, d. h. das Geländemodell von der Punktwolke zu subtrahieren, müssen die Punkte des Geländemodells sowie die Punkte der Punktwolke unterschiedlichen Klassen zugeordnet sein. Den DGM-Punkten wurde schon bei der Erstellung die Klasse 0 zugewiesen (Abschnitt 5.1) bei der photogrammetrischen Punktwolke wird dies mit LAStools: las2las erreicht. Hierfür werden alle zu prozessierenden Kacheln in einer Textdatei (list_class.txt) aufgelistet und an las2las übergeben. Anschließend müssen die Datensätze zu einer Datei zusammengefasst werden, welche dann um 100 m pro Seite gepuffert wird (LAStools: lastile), um Randeffekte zu vermeiden. Hierfür müssen zwei Listen erstellt werden, die jeweils nur die Kacheln enthalten, die sowohl von der klassifizierten, photogrammetrischen Punktwolke (pc_tile_list.txt) als auch vom DGM (dtm_tile_list.txt) abgedeckt sind. Im nächsten Schritt wird dann die Höhe des Geländes von der ursprünglichen Punktwolke subtrahiert. Ab diesem Schritt läuft die Prozessierung kachelweise.

- Weist den Punkten der Punktwolke die Klasse 5 zu:

```
las2las -lof "intermediate\list_class.txt" ^
        -set_classification 5 ^
        -odir "intermediate\class_5"
        -olaz
```

- Fasst die Punkte der Punktwolke und die des DGM1 in einer Datei zusammen und schneidet sie in 1000 x 1000 m Kacheln mit 100 m Puffer pro Seite. Damit dieser Vorgang auf mehr als einem Prozessor laufen kann, wird zuvor der LAStools Befehl lasindex sowohl auf die Punktwolke als auch DGM Daten angewendet.

```
lastile -lof "intermediate\pc_tile_list.txt" ^
        -lof "intermediate\dtm_tile_list.txt" ^
        -tile_size 1000 -buffer 100 ^
        -rescale 0.01 0.01 0.01 ^
        -flag_as_withheld ^
        -odir "intermediate\lastile" -olaz
```

- Mit dem Befehl `lasheight` wird nun die Geländehöhe von den z-Koordinaten der Punktwolke subtrahiert. Außerdem werden alle Punkte, die sich mehr als 55 m über bzw. -1 m unter der Geländehöhe befinden, aus der Punktwolke entfernt (Abbildung 6):

```
lasheight -i "intermediate\lastile\tile_*.laz" ^
          -class 0 ^
          -drop_below -1 ^
          -drop_above 55 ^
          -replace_z ^
          -o "intermediate\lasheight_1_*.laz" -olaz
```

- Abschließend werden die Punkte des Geländemodells wieder aus der Punktwolke entfernt:

```
las2las -i "intermediate\lasheight_1_*.laz" ^
        -drop_classification 0 ^
        -o "intermediate\las2las_*.laz" -olaz
```

- 2.) Klassifizieren der Punktwolke: Die nächsten zwei Prozessierungsschritte dienen dazu die Punktwolke in zwei Klassen zu unterteilen: (a) Punkte die oberhalb des 75. Perzentils liegen und (b) Punkte die unterhalb des 75. Perzentils liegen. Hierzu wird zuerst mit dem LAsTools Befehl `lasthin` ein 4 x 4 m Grid über die Punktwolke gelegt und innerhalb jeder Zelle der Punkt ausgewählt, der dem 75. Perzentil aller in dieser Zelle vorkommenden Punkte am nächsten ist. Diesen Punkten wird die Klasse 8 zugewiesen. Anschließend werden mit dem LAsTools Befehl `lasheight` die Punkte der Klasse 8 zu einem TIN verknüpft und allen Punkten die sich unterhalb des TINs befinden die Klasse 3 zugewiesen:

```
lasthin -i "intermediate\las2las_*.laz" ^
        -step 4 ^
        -percentile 75 ^
        -classify_as 8 ^
        -o "intermediate\lasthin_2_*.laz" -olaz

lasheight -i "intermediate\lasthin_2_*.laz" ^
          -class "8" ^
          -classify_below 0 3 ^
          -o "intermediate\lasheight_2_*.laz" -olaz
```

- 3.) Filtern der Punktwolke: Der im Folgenden angewendete Filter ist das LAStools Werkzeug „lasnoise“, welches verwendet wird, um isolierte Punkte bzw. Punktgruppen zu entfernen. Isolierte Punkte werden definiert als Punkte, die maximal 40 Nachbarpunkte innerhalb einer Umgebung von 10 x 10 x 4 m haben. Diese Definition wird auf jeden Punkt separat angewandt und alle als isoliert definierte Punkte werden gelöscht (Abbildung 6). Nach der Anwendung wird das Werkzeug „lasnoise“ abermals angewendet. Diesmal sind isolierte Punkte definiert als Punkte, die maximal 8 Nachbarpunkte innerhalb einer Umgebung von 3 x 3 x 3 m haben. Auch diese Punkte werden aus dem Datensatz entfernt. Um nur Punkte zu löschen, die nach oben aus der Punktwolke ausreißen, wird mit dem Argument „-ignore_class 3“ der Zugriff des Filters auf die im vorherigen Schritt als Klasse 3 klassifizierten Punkte ausgeschlossen. Das Endprodukt ist das finale nDOM im laz-Format, aus dem das nDOM und das DOM im tif-Format abgeleitet werden (Abschnitt 4.4.3):

```
lasnoise -i "intermediate\lasheight_2_*.laz" ^
        -ignore_class 3 ^
        -step_xy 10 -step_z 4 ^
        -isolated 40 ^
        -remove_noise ^
        -o "intermediate\lasnoise_1_*.laz" -olaz

lasnoise -i "intermediate\lasnoise_1_*.laz" ^
        -ignore_class 3 ^
        -step_xy 3 -step_z 3 ^
        -isolated 8 ^
        -remove_noise ^
        -o "nDSM_laz\nDSM_*.laz" -olaz
```

- 4.) Erstellen des digitalen Oberflächenmodells (DOM) im laz-Format: Um ein DOM zu erstellen, verwenden wir die ungefilterte und nicht normalisierte Punktwolke. (Bevor die Punktwolken miteinander verglichen werden können, müssen sie in einer Datei zusammengefasst werden; LAStools lasindex & lastile.) Auf diesem Wege werden aus der ursprünglichen Punktwolke alle Punkte, die während der bisherigen Prozessierung ausgedünnt oder als Ausreißer identifiziert und gefiltert wurden, entfernt. Ergebnis dieses Schritts sind zwei Punktwolken je Kachel. Nur die Punktwolke (laz-Datei) mit dem Namenszusatz „_removed“ wird weiter verwendet, die andere wird gelöscht. Bei der verbleibenden Datei wird der Namenszusatz „_removed“ aus dem Namen entfernt. Das Resultat ist das finale DOM im laz-Format:

```
lastile -i "nDSM_laz\nDSM_*.laz" ^
        -i "intermediate\lastile\tile_*.laz" ^
        -o "intermediate\lastile2_*.laz" -olaz

lasduplicate -i "intermediate\lastile2_*.laz" ^
        -record_removed -drop_withheld^
        -o "DSM_laz\DSM_*.laz" -olaz
```

5.4.3 Generierung des nDOM im .tif-Format

Die Generierung von nDOM Kacheln im .tif-Format wird in ein bzw. zwei Stufen durchgeführt, abhängig davon, ob die Kachel NA-Pixel enthält oder nicht.

Raster Erzeugung aus gefilterten nDOM Punktwolken

Die nDOM Punktwolke (.laz-Format) wird mit dem LAsTools-Werkzeug „lasgrid“ in ein Raster mit 1 x 1 m-Pixel Auflösung konvertiert. Für jedes Pixel des resultierenden Rasters im .tif-Format wird jeweils der Höhenwert des höchsten Punktes innerhalb des Pixelbereichs übernommen. Alle Werte < 0 werden auf 0 gesetzt. Kleine Lücken im Raster (NA-Pixeln ohne Datenwert) werden aufgefüllt (3 x 3 m Suchfenster).

```
lasgrid -i "nDSM_laz\nDSM_*.laz" ^
        -elevation -highest -clamp_z_below 0^
        -fill 3 -step 1 -drop_withheld^
        -o "intermediate\*_grid.tif" -otif
```

Die resultierenden Dateien werden anschließend auf das Vorhandensein weiterer NA-Pixel überprüft. Hierfür wird das ArcGIS-Werkzeug „GetRasterProperties“ genutzt. Kacheln, die keine NA-Pixel beinhalten, werden als fertige nDOM Kacheln behandelt, in „nDSM_*.tif“ umbenannt und in den Endergebnisordner „nDSM“ kopiert.

nDOM Erstellung für Rasterkacheln mit NA-Pixeln

Kacheln, die NA-Pixel enthalten, werden weiter prozessiert, um die NA-Pixel mit interpolierten Werten zu füllen. Hierfür wird aus den entsprechenden Kacheln mit dem LAsTools-Werkzeug las2dem ein flächendeckendes TIN (Triangulated Irregular Network) erzeugt, das in ein Raster mit 1 x 1 m-Pixeln konvertiert wird. Der 100 m breite Puffer, der das nDOM (.laz-Format) umgibt, wird während der Prozessierung entfernt.

```
las2dem -i "intermediate\nDSM_laz\nDSM_*.laz" ^
        -elevation -step 1 -use_tile_bb ^
        -clamp_z_below 0 ^
        -o "intermediate\*_dem.tif" -otif
```

Anschließend werden die nDOM-Kacheln (.tif-Format) mit dem TIN-Raster verschnitten, sodass die NA-Pixel der nDOM-Kacheln mit den interpolierten Werten der TIN-Raster gefüllt werden. Dies geschieht mittels ArcGIS „raster calculator“ (Extension „Spatial Analyst“). Auf diese Weise werden NA-Flächen von kleiner bis mittlerer Größe mit interpolierten Datenwerten gefüllt (Abbildung 7). Da die Interpolation über große Flächen sehr fehlerhaft sein kann, werden große NA-Flächen nicht gefüllt. Die maximale Flächengröße ist durch das zur Erzeugung des TIN-Rasters verwendete LAsTools Modul „las2dem“ begrenzt, welches keine Dreiecke mit einer Seitenlänge von mehr als 100 m erzeugt. Große NA-Flächen, die z. B. durch das Image Matching von Wasserflächen entstehen können, bleiben daher als NA-Werte erhalten.

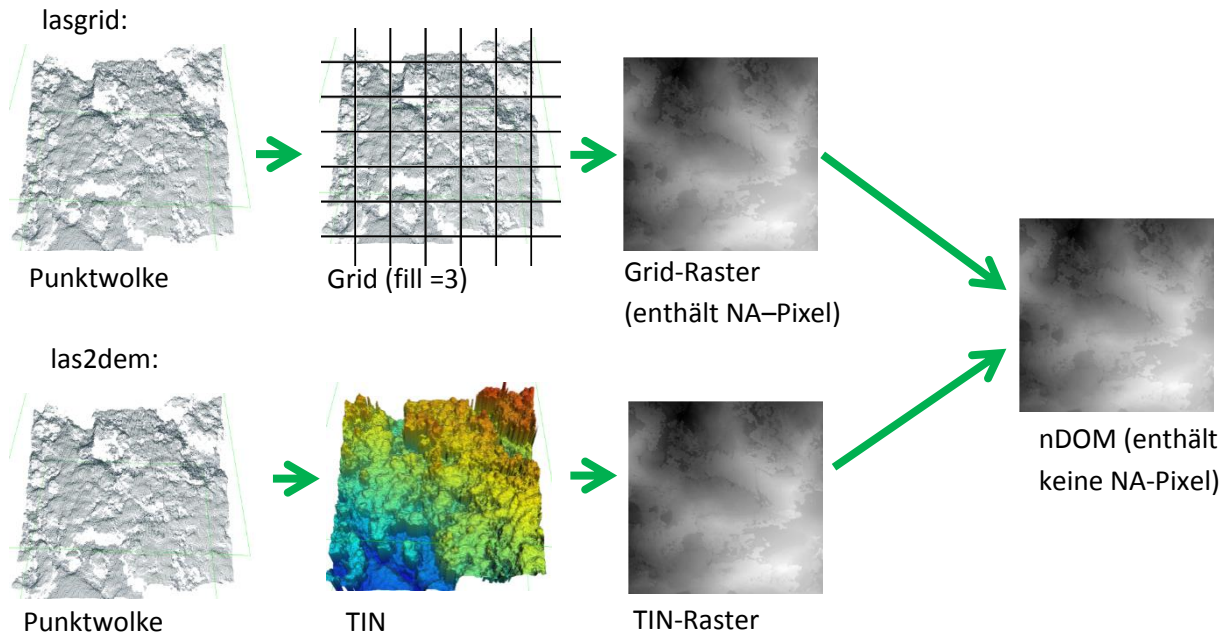


Abbildung 7: nDOM-Erstellung für Grid-Raster mit NA.

5.4.4 Generierung des DOM im .tif-Format

Zum soeben erzeugten nDOM im .tif-Format (Abschnitt 4.4.3) wird nun das DGM addiert um das finale DOM zu erzeugen. Hierzu wird zuerst das DGM1 in eine Rasterdatei konvertiert, welche dann unter Nutzung des ArcGIS Spatial Analyst Raster Calculators zum nDOM addiert wird ($\text{DOM} = \text{nDOM} + \text{DGM1}$).

5.4.5 Zuweisung einer Farbskala

Jeder nDOM-Rasterkachel wird eine Farbskala (siehe Abbildung 9) zur einheitlichen Darstellung zugewiesen indem eine ArcGIS-Layer-Datei erstellt wird. Hierfür wird das .tif-Raster im Ordner „lyr_files“ als Vorlage genutzt.

Literatur

- Hirschmüller, H., 2005: Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference: IEEE. 807-814.
- Hirschmüller, H., 2008: Stereo processing by semi-global matching and mutual information. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on 30: 328-341.
- Schumacher, J., Rattay, M., Kirchhöfer, M., Adler, P., Kändler, G., 2019. Combination of Multi-Temporal Sentinel 2 Images and Aerial Image Based Canopy Height Models for Timber Volume Modelling. Forests, 10 (746), available online < <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/9/746/pdf> > [accessed 17 February 2020].



Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten

Verbundvorhaben „Entwicklung von Methoden und Verfahren zur flächendeckenden und homogenen Generierung von Waldparametern auf der Basis digitaler Oberflächenmodelle aus Luftbilddaten (F3)“

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)
Wonnhaldestr. 4, 79100 Freiburg

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Förderkennzeichen: 22025014 (FVA), 22024816 (NW-FVA)

Dokumentation zu Meilenstein 4

„Methodenbeschreibung zur Ableitung von
Waldstrukturparametern aus Oberflächenmodellen“



Meilenstein 4

Methodenbeschreibung zur Ableitung von Waldstrukturparametern aus Oberflächenmodellen

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Forstliche Strukturparamter.....	1
2.1	Vegetationshöhe	1
2.2	Überschirmung, Waldtyp (offene & geschlossene Bestände) und Bestandeslücken	4
2.3	Überhälter bzw. lockere Althölzer.....	8
2.4	Oberflächenrauigkeit.....	9
3	Validierung der Waldstrukturkarten	12
3.1	Einleitung.....	12
3.2	Vergleich von ALS- und luftbildbasierten forstlichen Strukturkarten	13
3.2.1	Daten	13
3.2.2	Das normalisierte Oberflächenmodell	15
3.2.3	Visuelle Gegenüberstellung ALS-basiertes nDOM und luftbildbasiertes nDOM.....	17
3.2.4	Die Waldhöhenstrukturkarte (WHSK)	18
3.2.5	Überschirmung (offene und geschlossene Bestände) und Bestandeslücken	19
3.2.6	Oberflächenrauigkeit.....	21
3.3	Validierung mit manuell erzeugten Vergleichsdaten	22
3.3.1	Vergleich des nDOM mit stereoskopisch gemessenen Höhen.....	22
3.3.2	Vergleich der Lückenerkennung mit Referenzdaten aus stereoskopischer Bildinterpretation.....	27
4	Literatur.....	33



1 Einleitung

Im Rahmen des Verbundvorhabens F³ wurden Python-Skripte zur automatisierten Berechnung der forstlichen Strukturparameter Vegetationshöhe, Überschildung, Waldtyp (offene und geschlossenen Bestände), Bestandeslücken, Oberflächenrauigkeit des Kronendachs und Überhälter bzw. lockere Althölzer entwickelt. Die Berechnungen basieren auf Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und normalisierten Digitalen Oberflächenmodellen (nDOM), die nach dem ebenfalls im Verbundvorhaben F³ entwickelten, standardisierten Verfahren zur Ableitung von Oberflächenmodellen aus Luftbilddaten generiert wurden. Eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens findet sich im Dokument M3 „Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern“.

2 Forstliche Strukturparameter

Wie DOM und nDOM, werden auch die Strukturparameter kachelweise für 1000 x 1000 m große Kacheln berechnet. Die Einteilung in Kacheln sowie die Namensgebung der Kacheln sind im Dokument M3 „Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern“ beschrieben. Zur Berechnung der Strukturparameter finden sowohl laz-Punktwolken (mittlere Punktdichte: 0,5 m) als auch DOM- und nDOM-Dateien im tif-Format (horizontale Auflösung: 1 m) Verwendung. Für Berechnungen, die basierend auf Punktwolken durchgeführt werden, wird die Software LAStools (Version 180919) verwendet. Daten und Methoden zur Berechnung der Strukturparameter sind im Folgenden erläutert. Die Parameter werden dabei grundsätzlich für die gesamte von den Daten abgedeckte Fläche berechnet ohne zu berücksichtigen, ob es sich dabei um Wald oder handelt oder nicht. Die Begrenzung auf Waldflächen muss jeweils nach Berechnung der Strukturparameter erfolgen. Die hierfür benötigte Waldmaske ist frei wählbar.

Hinweise:

Es ist zu beachten, dass die 4 Python Skripte *whsk_F3.py*, *waldtyp_F3.py*, *rauigkeit_F3.py* und *lockere_althoelzer_F3.py* im selben Ordner abgelegt sein müssen, in dem auch der Unterordner *color_maps* abgelegt ist. Sollte dies nicht der Fall sein, können die Skripte nicht auf die im Ordner *color_maps* abgelegten Farbschemata zugreifen, die den erzeugten Rasterdateien zugewiesen werden.

Es ist zu beachten, dass die Python Skripte *whsk_F3.py*, *waldtyp_F3.py*, *rauigkeit_F3.py* und *lockere_althoelzer_F3.py* für Daten entwickelt wurden, die mit dem Skript *cloud2ndom.py* erzeugt wurden. Ausgabedateien des Skripts *cloud2ndom_F3.py* sind laz- bzw. tif-Dateien mit einer Kachelgröße von 1000 x 1000 m. Der Dateiname jeder Kachel beinhaltet Informationen über die Koordinate der linken unteren Ecke der Kachel. Diese Information wird während der Verarbeitung mit dem Skript *waldtyp_F3.py* benötigt um die Rasterkacheln, die während der Prozessierung mit einem Puffer umgeben werden, am Ende der Prozessierung wieder auf ihre ursprüngliche Ausdehnung zuzuschneiden.

2.1 Vegetationshöhe

Die Vegetationshöhe ist ein zentraler Aspekt der Waldstruktur. Sie ist direkt aus dem normalisierten Oberflächenmodell (nDOM) ableitbar. Im Wald liefert sie u.a. wichtige Hinweise zur Bestandesab-

grenzung und -typisierung. Um Informationen über die Vegetationshöhe verfügbar zu machen, werden mittels standardisierter Verfahren zwei Datensätze erzeugt:

- (1) Das normalisierte Oberflächenmodell, das bereits durch die Prozessierung der photogrammetrischen Punktwolken mit dem Python Skript *cloud2ndom_F3.py* erzeugt wurde (Abb. 2 b). Dieses Oberflächenmodell hat eine geometrische Auflösung von 1 m, gibt die Höhe der sich auf der Erdoberfläche befindenden Objekte in Metern (mit 2 Dezimalstellen) an und liegt als Rasterdatei im tif-Format vor.
- (2) Eine vergrößerte Variante des nDOM, die in Baden-Württemberg unter dem Namen „Waldhöhenstrukturkarte“, kurz WHSK, bekannt ist, wird mit dem Python Skript *whsk_F3.py* erzeugt. Die WHSK hat eine geometrische Auflösung von 5 m (definiert in Zeile 161; „pixel_step“) und gibt die Vegetationshöhe in 1 m-Klassen an. Zur Erzeugung der WHSK wird das nDOM (tif-Format) auf eine Pixelgröße von 5 x 5 m aggregiert, wobei jeweils die höchste Höhe als Pixelwert beibehalten wird (ArcGIS Tool „Aggregieren“). Anschließend werden die Höhenwerte auf ganze Meter gerundet (ArcGIS Tool „Reklassifizieren“). Die hierfür benötigte „RemapRange“ wird mit der Funktion *remap()* (Zeilen 61-70) gebildet. Die Eingabeparameter dieser Funktion können in Zeile 162 („remap_classes“) angepasst werden. Den erzeugten WHSK Rasterdateien wird die in Abb. 1 gezeigte Farbskala zugewiesen, die für die Darstellung der WHSK, z. B. in ArcGIS oder QGIS, genutzt werden kann. Die Farbskala fasst zum Zwecke der Visualisierung die Höhenwerte der WHSK zu Gruppen von 3 m zusammen, sodass Höhenwerte von 1 – 3 m, 3 – 6 m usw. je in derselben Farbe dargestellt werden (siehe Abb. 1 und Abb. 2 c).

Python Skript: *whsk_F3.py*

Bevor das Python Skript whsk_F3.py gestartet werden kann, muss in Zeile 166 der Pfad zum Eingabeordner, der die normalisierten Oberflächenmodelle im tif-Format enthält, spezifiziert werden. Außerdem muss in Zeile 168 der Pfad zum Ausgabeordner, der die generierten Waldhöhenstrukturkarten enthalten soll, angegeben werden. Der Ausgabeordner muss zuvor manuell angelegt werden.



Abb. 1: Farbskala der Waldhöhenstrukturkarte.

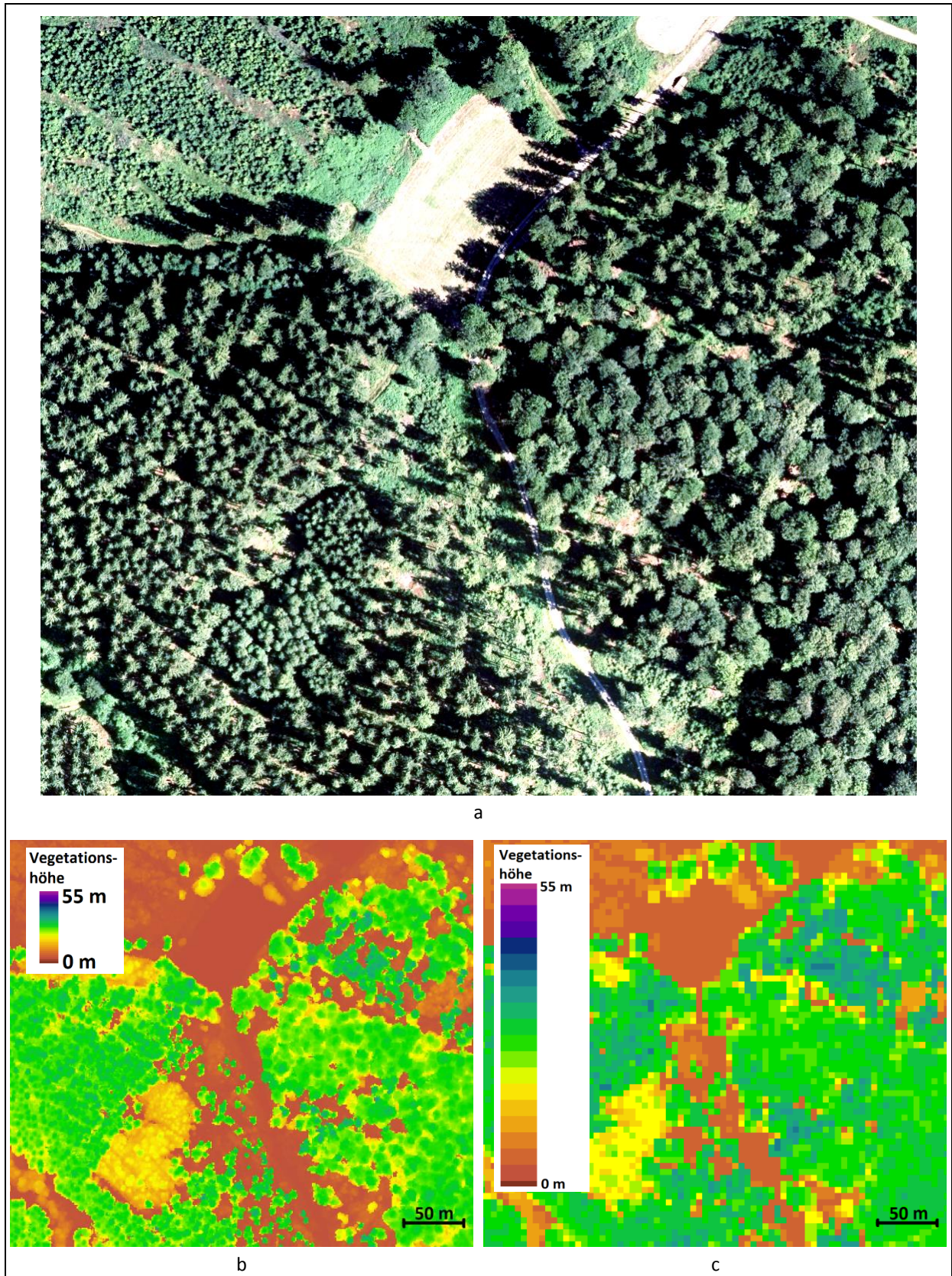


Abb. 2: Ableitung der Waldhöhenstrukturkarte: a) Orthophotoausschnitt (Solling, Niedersachsen); b) Ausschnitt aus dem normalisierten Oberflächenmodell (räumliche Auflösung: 1 m); c) Waldhöhenstrukturkarte (horizontale Auflösung: 5 m).

2.2 Überschirmung, Waldtyp (offene & geschlossene Bestände) und Bestandeslücken

Die Überschirmung gibt an welcher Prozentsatz des Bodens durch die vertikale Projektion der Kronen abgedeckt wird (McElhinny et al. 2005). In Zielewska-Büttner et al. (2016) wird der Überschirmungsgrad definiert als der Anteil der Vegetation ≥ 1 m innerhalb eines umgebenden Kreises mit Radius 25 m. Für das F³-Projekt wurde diese Definition übernommen, der Hörschwelwert jedoch auf 3 m angepasst. Dadurch soll Unterwuchs wie Brombeeren und Adlerfarn, aber auch Verjüngung von der Berechnung des Überschirmungsgrades ausgeschlossen werden.

Der Waldtyp bezeichnet die Unterscheidung in offene und geschlossene Bestände und wird in Anlehnung an Zielewska-Büttner et al. (2016) ausgewiesen: Offene Bestände sind alle Flächen mit einem Überschirmungsprozent < 60 und geschlossene Bestände sind Flächen mit einer Überschirmung $\geq 60\%$. Um als Bestand ausgewiesen zu werden, muss die Flächengröße mindestens 0,5 ha betragen.

Lücken in Waldbeständen können im Allgemeinen über ihre Größe, Form, räumliche Verteilung und Konnektivität beschrieben werden, wobei die Lückencharakteristiken Größe und räumliche Verteilung in der Literatur vorherrschend sind (Zielewska-Büttner et al., 2016). Die Lückendefinition in Zielewska-Büttner et al. (2016) zielt auf die Nutzbarkeit der Ergebnisse in Habitatstudien für ein breites Artenspektrum. Deshalb wurden dort niedrige Schwellenwerte in Bezug auf Lückengröße und Vegetationshöhe gewählt und keine Einschränkungen bezüglich Form und Mindestdurchmesser eingeführt. Da das F³-Projekt einen ähnlich breiten Ansatz verfolgt, lehnt sich die hier verwendete Lückendefinition an Zielewska-Büttner et al. (2016) an: Lücken werden nur in geschlossenen Beständen erfasst und ihre Mindestgröße beträgt 10 m². In offenen Beständen werden keine Lücken ausgewiesen, da bereits die Definition der maximalen Überschirmung von $< 60\%$ impliziert, dass lückenhafte Strukturen charakteristische Elemente dieses Waldtyps sind. Die maximale Vegetationshöhe (maximale Höhe des nDOMS) in der Lücke ist 3 m, analog zum Hörschwelwert in der Überschirmungsdefinition.

Python Skript: *waldtyp_F3.py*

*Bevor das Python Skript *waldtyp_F3.py* gestartet werden kann, muss in **Zeile 51** der Pfad zum Eingabeordner, der die normalisierten Oberflächenmodelle im laz-Format enthält, spezifiziert werden. In **Zeile 53** muss der Pfad zum Ausgabeordner, der die generierten Karten enthalten soll, angegeben werden. Außerdem muss in **Zeile 55** der Pfad zum „bin“-Ordner der LAStools spezifiziert werden.*

Das Python-Skript *waldtyp_F3.py* trennt offene Bestände (Kronenüberschirmung $< 60\%$) von geschlossenen Beständen (Kronenüberschirmung $\geq 60\%$), die eine Mindestgröße von 0,5 ha haben und kartiert innerhalb der geschlossenen Bestände Lücken mit einer Fläche ≥ 10 m². Bei der Berechnung gelten alle Pixel des Oberflächenmodells ab einer Höhe von 3 m über dem Boden als Baumkronen, d. h. sie werden als überschirmte Fläche berücksichtigt. Ebenfalls generiert das Skript eine Überschirmungskarte mit einer Auflösung von 25 m.

Basis der Kartierung ist das im laz-Format vorliegende normalisierte, digitale Oberflächenmodell (nDOM) mit einer geometrischen Auflösung von 0,5 m. Jede Kachel des nDOM (laz-Format) ist mit einem Puffer von 100 m umgeben, welcher im letzten Prozessierungsschritt entfernt wird, sodass die Ausdehnung jeder Kachel wieder 1000 x 1000 m beträgt. Während der Prozessierung wird der Puffer jedoch benötigt, um Randeefekte zu vermeiden.



Überschirmung

Das gepufferte nDOM wird im ersten Prozessierungsschritt mit dem LAStool „lasgrid“ vom laz-Format in ein Raster (tif-Format) mit 1 m Auflösung konvertiert.

```
(0) lasgrid -lof file_list.txt -step 1 -elevation -highest -fill 3 -otif
```

Anschließend wird das nDOM binarisiert, sodass alle Pixel mit einem Höhenwert ≥ 3 m den Wert 1 (Baum) erhalten und die Pixel mit einem Höhenwert < 3 m den Wert 0 (nicht-Baum). Dies geschieht mit der ArcGIS Funktion „Reklassifizieren“ („Reclassify“):

```
(1) Reclassify(raster_out_0, "VALUE", "-2 3 0;3 60 1", "NODATA")
```

Mittels eines kreisförmigen Moving Windows (Radius = 25 m) wird die binarisierte Baum-/nicht-Baum-Karte in eine Überschirmungskarte überführt, in der jedes Pixel eine Prozentangabe bezüglich des Baumpixelanteils in seiner Umgebung enthält (ArcGIS Tool „Focal Statistics“):

```
(2) FocalStatistics(raster_out_1, "Circle 25 CELL", "MEAN", "DATA")
```

Im Folgenden wird die Überschirmungskarte in die Klassen offene Bestände (Überschirmung $< 60\%$; Klassenwert „0“) und geschlossene Bestände (Überschirmung $\geq 60\%$; Klassenwert „1“) eingeteilt (ArcGIS-Funktion „Reklassifizieren“ („Reclassify“)):

```
(3) Reclassify(raster_out_2, "VALUE", "0 0,5999 0;0,6 1 1", "NODATA")
```

Die Mindestgröße für Flächen, die als offene bzw. geschlossene Bestände ausgewiesen werden, beträgt 0,5 ha. Kleinere Flächen werden aufgelöst und mit der angrenzenden Fläche verschmolzen. Dies geschieht mit mehreren aufeinanderfolgend angewandten ArcGIS-Funktionen.

Zuerst werden aneinander angrenzende Pixel mit gleichem Wert zu Regionen zusammengefügt („Gruppieren zu Regionen“ („RegionGroup“)):

```
(4) RegionGroup(raster_out_3, "EIGHT", "WITHIN", "ADD_LINK", None)
```

Dann werden nur solche Regionen ausgewählt, die eine Mindestgröße von 0,5 ha ($\hat{=}$ 5000 Pixel) aufweisen („nach Attributen extrahieren“ („ExtractByAttributes“)):

```
(5) ExtractByAttributes(raster_out_4, "Count >= 5000")
```

Regionen mit einer Fläche $< 0,5$ ha wird ein NoData-Wert zugewiesen. Allen anderen Regionen wird wieder ihr ursprünglicher Klassenwert (offener („0“) bzw. geschlossener („1“) Bestand) zugewiesen (ArcGIS Funktion „Reklassifizieren“ („Reclassify“)). Anschließend werden die NoData-Pixel mit dem Klassenwert des nächstgelegenen Pixels (euklidische Distanz) aufgefüllt (ArcGIS Funktion „Nibble“). Hierfür wird auf das klassifizierte Raster aus Schritt (3) zurückgegriffen:

```
(6) Reclassify(raster_out_6, "LINK", "0 0;1 1", "NODATA")
```

```
(7) Nibble(raster_out_3, raster_out_6, "DATA_ONLY")
```

Bestandeslücken

Innerhalb geschlossener Bestände werden Lücken mit einer Flächengröße ≥ 10 m² ausgewiesen. Die maximale Vegetationshöhe (maximale Höhe des nDOM) in der Lücke beträgt 3 m.

Zur Kartierung der Lücken werden alle Pixel des nDOM mit einer Höhe < 3 m den zuvor kartierten geschlossenen Beständen hinzugefügt. Dies geschieht über „Map Algebra“ in ArcGIS (9). Zunächst muss jedoch die Kartierung in geschlossene und offene Bestände durch eine Anpassung der Klassenwerte vorbereitet werden (8).

```
(8) Reclassify(raster_out_7, "VALUE", "0 1;1 3", "NODATA")
```



```
(9) Raster(raster_out_8) - Raster(raster_out_1)
```

Dadurch entstehen vier Klassen: „0“ offene Bestände, „1“ Lücken innerhalb offener Bestände, „2“ geschlossene Bestände und „3“ Lücken innerhalb geschlossener Bestände. Nachfolgend werden Klassen „0“ und „1“ zur Klasse „1“ offene Bestände zusammengefasst (ArcGIS Funktion „Reklassifizieren“ („Reclassify“)):

```
(10) Reclassify(raster_out_9, "VALUE", "0 1;1 1;2 2;3 3", "NODATA")
```

Anschließend werden Lücken deren Flächengröße < 10 m² beträgt, gelöscht. Dies wird erreicht, indem alle aneinander angrenzenden Pixel gleicher Klasse zu Regionen zusammengefügt werden (11) und von diesen Regionen nur solche extrahiert werden, die größer als 10 m² sind (12). Anschließend werden den Regionen wieder ihre ursprünglichen Klassen zugewiesen (13) und entstandene NoData-Pixel mit den Klassenwerten benachbarter Pixel aufgefüllt (14).

```
(11) RegionGroup(raster_out_10, "EIGHT", "WITHIN", "ADD_LINK", None)
```

```
(12) ExtractByAttributes(raster_out_11, "Count > 9")
```

```
(13) Reclassify(raster_out_12, "LINK", "1 1;1 2 2;2 3 3", "NODATA")
```

```
(14) Nibble(raster_out_10, raster_out_13, "DATA_ONLY")
```

Die so erstellten Raster sowie die Ergebnisse aus der Überschirmungsberechnung (2) werden auf Kacheln mit 1000 x 1000 m Ausdehnung zugeschnitten. Dafür wird die Ausdehnung für jede Kachel aus dem Dateinamen hergeleitet und das Raster dann mit der ArcGIS Funktion „Raster ausschneiden“ („Clip_management“) zugeschnitten.

Die Karten mit Lücken, offenen und geschlossenen Beständen werden im Ausgabeordner im Unterordner waldtyp mit dem Präfix „waldtyp“ abgespeichert. Jeder Karte wird eine Farbpalette zugewiesen, die die in Abb. 3 b illustrierte Farbdarstellung generiert.

Die Karten enthalten die Werte:

1 = offener Bestand

2 = geschlossener Bestand

3 = Lücke

Die Überschirmungskarte wird in Schritt (2) erzeugt und enthält Werte zwischen 0 (0% Überschirmung) und 1 (100% Überschirmung) in einer horizontalen Auflösung von 1 m. Um die Interpretierbarkeit dieser Karte zu erhöhen, wird sie auf eine Auflösung von 25 m aggregiert, wobei jeweils der Median der ursprünglichen Pixelwerte zum neuen Pixelwert wird. Die Karte wird anschließend im Unterordner ueberschirmung des Ausgabeordners mit dem Präfix „ueberschirmung“ abgespeichert.

Abb. 3a zeigt das nDOM, das für die Kartierung der in Abb. 3b dargestellten offenen und geschlossenen Bestände sowie die innerhalb geschlossener Bestände erfassten Bestandeslücken genutzt wurde. In Abb. 3b ist zu sehen, dass Lücken auch ausgewiesen werden, wenn sie unmittelbar an einen offenen Bestand angrenzen. Man könnte erwarten, dass diese Lücken ebenfalls dem offenen Bestand zugerechnet werden. Jedoch zeigt ein Blick auf die Überschirmungskarte (Abb. 4), dass an jedem Pixel dieser Lücken eine Überschirmung von $\geq 60\%$ in einem Radius von 25 m ermittelt wurde. Somit sind diese Flächen eindeutig dem geschlossenen Bestand zuzurechnen und werden als Lücken klassifiziert.

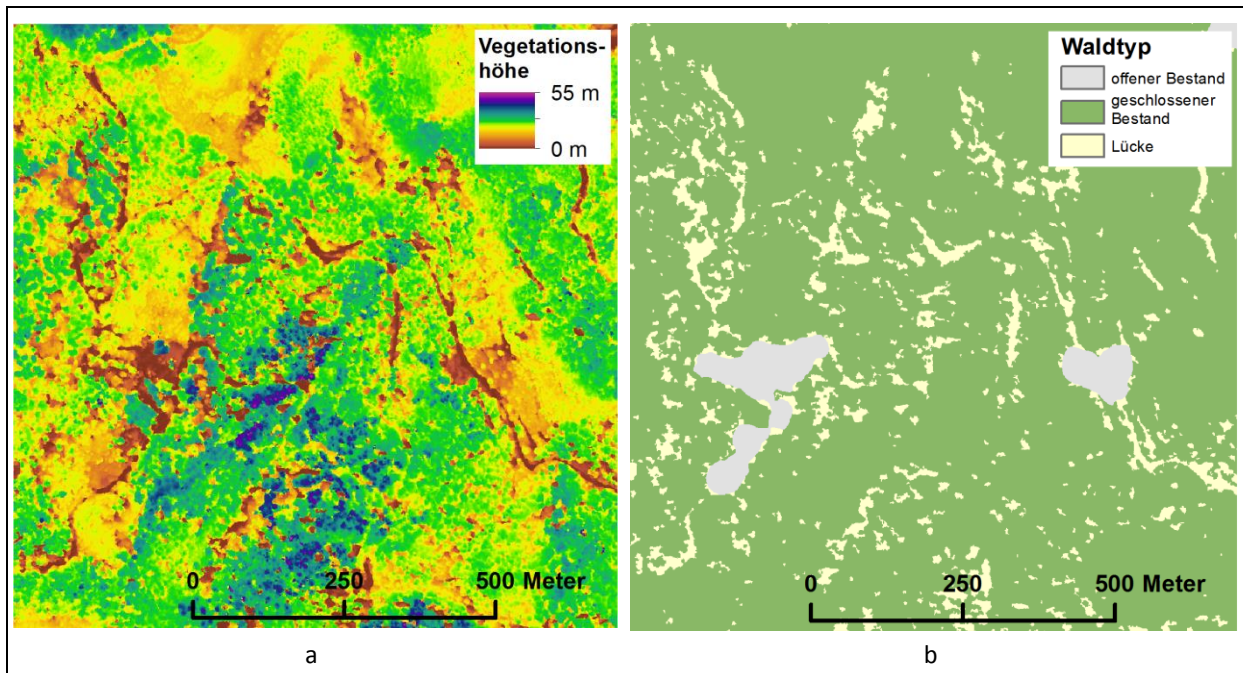


Abb. 3: Ableitung der Lücken- und Waldtypkarte: a) Ausschnitt des normalisierten Oberflächenmodells, das zur Kartierung offener und geschlossener Bestände sowie zur Kartierung von Bestandeslücken verwendet wurde; b) mit dem Python Skript *waldtyp_F3.py* erstellte Lücken- und Waldtypkarte.

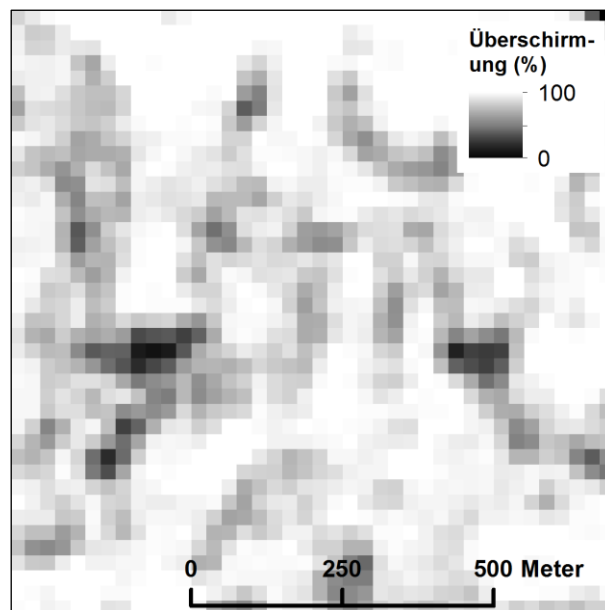


Abb. 4: Überschildungskarte zu Abb. 3.

Für manche Anwendungen könnte es wünschenswert sein, die an offene Bestände grenzenden Lücken den offenen Beständen zuzuordnen. Einen Ansatz hierzu bietet das zusätzliche Skript *luecken_aufloesen.py*. Dieses Skript wird nicht auf die Daten in diesem Projekt angewandt, um die Ergebnisse der Lückenerkennung weiterhin universell nutzen zu können. Es soll jedoch als Hilfestellung dienen, falls eine Verschmelzung dieser Lücken mit den benachbarten offenen Beständen gewünscht ist. Mit *luecken_aufloesen.py* werden Lückenflächen erfasst, deren gemeinsame Grenze mit offenen Beständen mindestens 25% ihres Gesamtumfangs ausmachen. Diese Flächen werden dann der Klasse „1“ offene Bestände zugeschlagen. Dies geschieht über die im Skript *luecken_aufloesen.py* imple-

mentierte Funktion „join_border_based“. Eine detailliertere Beschreibung hierzu findet sich in der Datei „liesmich_luecken_aufloesen.txt“.

2.3 Überhälter bzw. lockere Althölzer

Eine Differenzierung zwischen den Bestandestypen Überhälter und lockere Althölzer ist anhand der verwendeten Daten nicht möglich, da beide ähnlich strukturiert sind und im Vegetationshöhenmodell ein ähnliches Erscheinungsbild aufweisen. Sowohl Überhälter als auch lockere Altholzbestände sind durch locker oder einzeln stehende erwachsene hohe Bäume oder Baumgruppen charakterisiert, deren Kronen sich meist nicht berühren. Überhälter sind Bäume, die nach der Nutzung eines Waldbestandes, z. B. als Samenbäume, zum Schutz der Verjüngung oder für die Starkholzproduktion, auf der Fläche belassen wurden. Die Auflockerung des Bestandes wird also künstlich und oftmals nach einem bestimmten Muster erzeugt. Lockere Althölzer hingegen entstehen unabhängig von den oben genannten Zielen, z. B. durch natürlichen Ausfall oder Entnahme mehrerer Bäume in Altbeständen. Lockere Althölzer ist also ein weiter gefasster Begriff, der unabhängig von der Bewirtschaftungsform eine bestimmte Waldstruktur beschreibt. Da die Bewirtschaftungsform nicht fernerkundlich erfasst werden kann, wird der Begriff „lockere Althölzer“ verwendet.

Python Skript: *lockere_althoelzer_F3.py*

Bevor das Python Skript lockere_althoelzer_F3.py gestartet werden kann, muss in Zeile 62 der Pfad zum Eingabeordner, der die normalisierten Oberflächenmodelle im laz-Format enthält, spezifiziert werden. In Zeile 64 muss der Pfad zum Ausgabeordner, der die generierten Karten enthalten soll, angegeben werden. Außerdem muss in Zeile 66 der Pfad zum „bin“-Ordner der LAStools Installation spezifiziert werden.

Das Skript *lockere_althoelzer_F3.py* identifiziert Überhälterbestände bzw. lockere Althölzer. Das offene Bestandesbild von Überhälter- bzw. Altholzbeständen, welches durch große, isoliert stehende Bäume geprägt ist, resultiert in einer großen Heterogenität der im Vegetationshöhenmodell abgebildeten Baumhöhen. Das Skript *lockere_althoelzer_F3.py* nutzt diese Eigenschaft und quantifiziert die Heterogenität der Vegetationshöhen mittels der Standardabweichung der nDOM-Zellen innerhalb einer Nachbarschaft von 20 x 20 m. Alle Zellen, die eine Standardabweichung > 7 aufweisen, werden als potentielle Überhälter bzw. lockeren Althölzer ausgewiesen. Die auf diese Weise ausgewiesenen Flächen umfassen neben den tatsächlichen Überhälter- und lockeren Altholzbeständen jedoch auch Kleinstflächen, die eine Mindestgröße von 1 ha unterschreiten, sowie Flächen entlang von Forstwegen oder anderen Bestandesgrenzen, die aufgrund des Nebeneinanders von hohen Bäumen und vegetationsfreien bzw. niedrig bewachsenen Flächen ebenfalls eine große Heterogenität der Höhenwerte aufweisen. Anschließend wird mittels einer Moving Window-Analyse geprüft, ob in einer kreisförmigen Nachbarschaft (Radius: 40 m bzw. 2 Pixel) der Anteil potentieller Überhälter-Pixel größer als 50% ist. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, erhält das Pixel den Klassenwert 1 (Überhälter bzw. lockeres Altholz), andernfalls den Klassenwert 0. Im Folgenden werden Flächen mit einer Größe < 1 ha und solche, die eine Breite von 60 m unterschreiten, aus der Karte entfernt.

Die Karten werden im Ausgabeordner im Unterordner „lockere_althoelzer“ als tif-Dateien mit dem präfix „lockere_althoelzer“ abgespeichert. Jeder Karte wird eine Farbpalette zugewiesen, die die in Abb. 5b illustrierte Farbdarstellung generiert.

Die Karte enthält die Werte:

1 = Überhälter bzw. lockeres Altholz

0 = sonstige Bestände

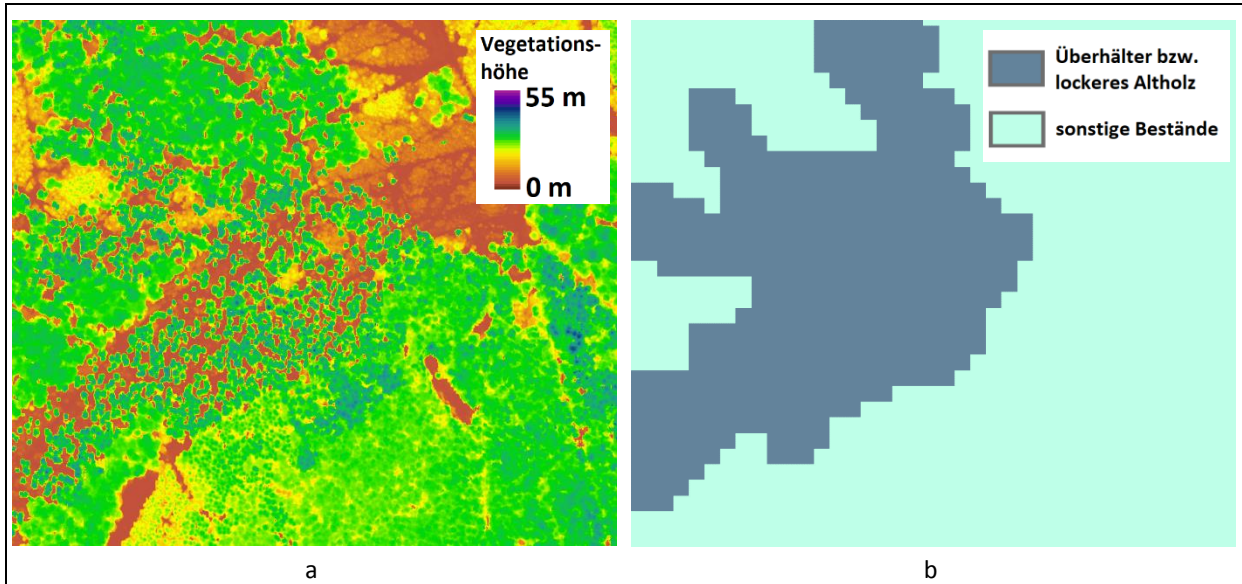


Abb. 5: Ableitung Überhälter- bzw. lockere Althölzerkarte: a) Ausschnitt des normalisierten Oberflächenmodells, das zur Kartierung von Überhälter- bzw. lockeren Altholzbeständen verwendet wurde; b) mit dem Python Skript `lockere_althoelzer_F3.py` erstellte Karte.

2.4 Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenrauigkeit quantifiziert die Unebenheit des Kronendachs von Waldbeständen, weshalb auch häufig die Bezeichnung Kronendachrauigkeit verwendet wird. Sie ist von Bedeutung für den Strahlungs- und den Wasserhaushalt des Waldes (Parker et al. 2004), da sie, beispielsweise den aerodynamischen Wasserdampftransport vom Kronendach zur Atmosphäre beeinflusst. Gemeinhin ist in Beständen mit einem nur wenig rauen Kronendach, das aus dicht beieinander stehenden Bäumen, ähnlicher Höhe geformt ist, der windbedingte Austausch zur Atmosphäre geringer als in Beständen, deren Kronendach größere Höhenunterschiede aufweist. Die Oberflächenrauigkeit kann darüber hinaus auch die Stabilität von Beständen, z. B. bei Starkwindereignissen, beeinflussen. Zusätzlich kann sie als Indikator für Biodiversität oder Waldentwicklungsstadium dienen.

Die Möglichkeiten die Kronenoberflächenrauigkeit einzuschätzen sind vielfältig, während es kaum Referenzdaten für eine direkte Evaluierung der Parametergüte gibt. Als Indikator für die Oberflächenrauigkeit der Wälder werden hier zwei Maßzahlen berechnet, Standardabweichung und Perzentilabstand, welche die vertikale Struktur des Kronendaches anzeigen, indem sie die Variabilität der Vegetationshöhe pro Flächeneinheit quantifizieren. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei diesen Maßzahlen nicht um die in der Aerodynamik verwendete „Rauigkeitslänge“ handelt.

Da die Oberflächenrauigkeit eines Waldbestandes nicht nur von der Höhe der Bäume, sondern auch von der Reliefierung des Geländes abhängig ist, werden die Maßzahlen basierend auf dem DOM (laz-Format) berechnet.

Python Skript: *rauigkeit_F3.py*

*Bevor das Python Skript *rauigkeit_F3.py* gestartet werden kann, muss in **Zeile 210** der Pfad zum Eingabeordner, der die Oberflächenmodelle im laz-Format enthält, spezifiziert werden. In **Zeile 212** muss der Pfad zum Ausgabeordner, der die generierten Karten enthalten soll, angegeben werden. In **Zeile 216** muss das Koordinatenreferenzsystem (UTM Zone 32N oder Gauß-Krüger Zone 3) spezifiziert werden, in dem die Daten vorliegen. Dies geschieht über die Angabe des entsprechenden EPSG-Codes: 25832 (UTM Zone 32 N), 25833 (UTM Zone 33 N) oder 31466 / 31467 / 31468 (GK 2 / 3 / 4). Außerdem muss in **Zeile 219** der Pfad zum „bin“ Ordner von LAStools spezifiziert werden.*

Im Skript *rauigkeit_F3.py* wird die Oberflächenrauigkeit für drei Skalenebenen generiert, sodass zwischen kleinräumiger Rauigkeit pro 20 x 20 m Pixel (Abb. 6b & c), der Rauigkeit auf mittelgroßen (50 x 50 m; 6d & e) oder großen (100 x 100 m, Abb. 6f & g) Flächen gewählt werden kann (Variable „pixel_step“ in Zeile 230 des Python Skripts). Für jede Skalenebene werden je zwei Maße der Oberflächenrauigkeit berechnet: (a) die Standardabweichung der Höhenwerte pro Flächeneinheit und (b) der Abstand zwischen dem 5. und 95. Perzentil der Höhenwerte. Zur Berechnung von (b) wird zuerst das 5. bzw. 95. Perzentil bestimmt und anschließend die Differenz zwischen den beiden Perzentilen gebildet. Zur Berechnung der Standardabweichung sowie der Perzentile wird der LAStools Befehl *lascanopy* verwendet. Das Ergebnis wird im Ausgabeordner im Unterverzeichnis „rauigkeit\std_20{50,100}“ gespeichert. Die Code-Beispiele zeigen die Berechnung für die Skalenebene 20 x 20 m.

Standardabweichung:

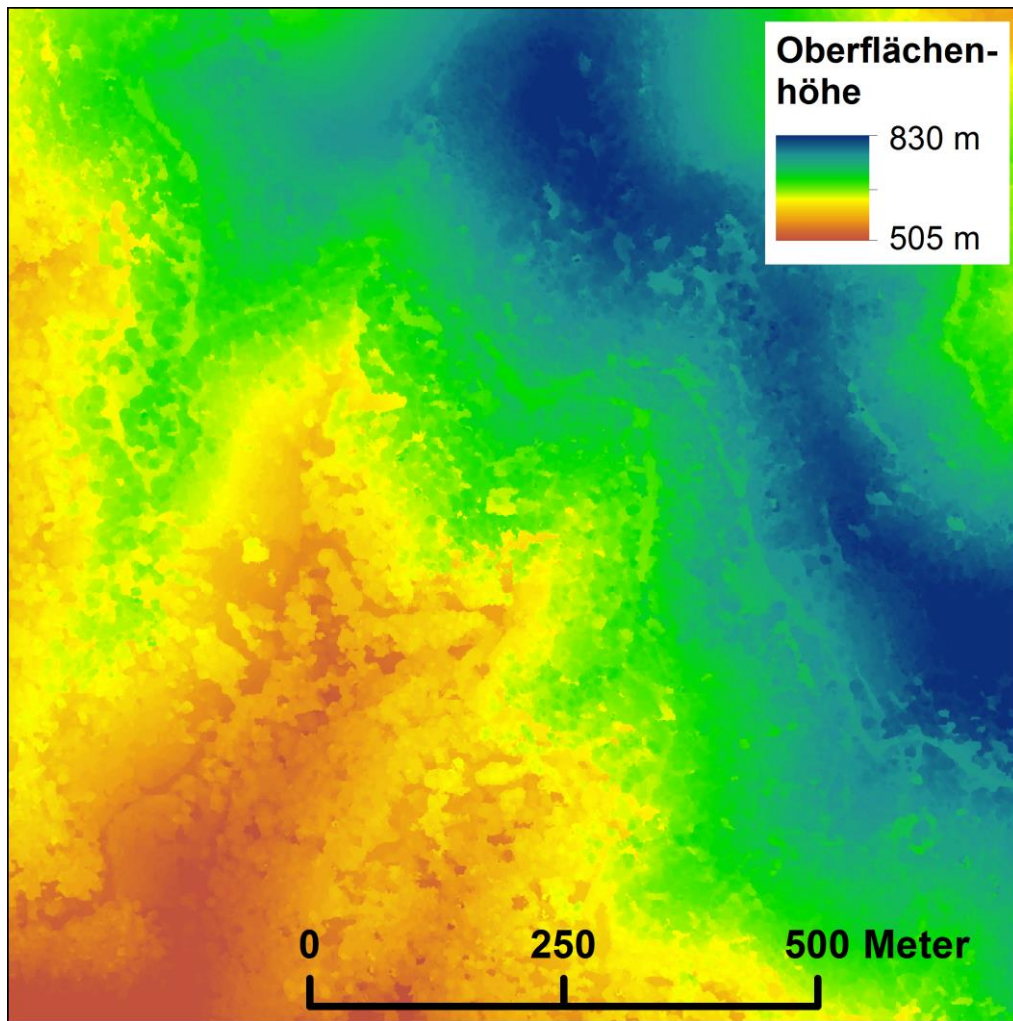
```
lascanopy -lof file_list.txt -height_cutoff -1 -drop_withheld -step 20 -std -otif
```

Perzentile:

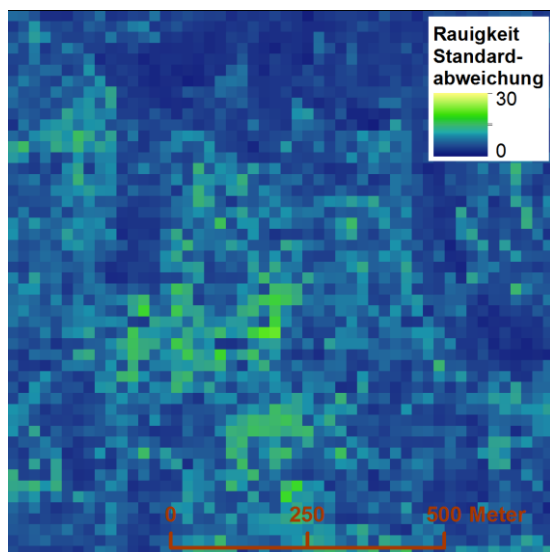
```
lascanopy -lof file_list.txt -height_cutoff -1 -drop_withheld -step 20 -p 5 95 -olaz
```

Um die Abstände zwischen den 5. und 95. Perzentilen zu berechnen, wird der LAStools-Befehl *lasdiff* verwendet. Die berechneten Perzentilabstände werden anschließend durch Verwendung des LAStools-Befehls *lasgrid* als Rasterdateien im tif-Format im Ausgabeordner im Unterverzeichnis „rauigkeit\perz_20{50,100}“ gespeichert.

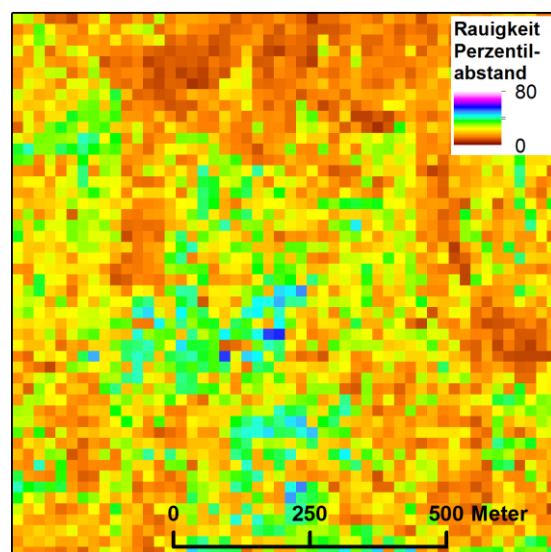
```
lasdiff -i D:\F3\test\550000_5729000_p95.laz -i D:\F3\test\550000_5729000_p05.laz -o D:\F3\testdaten\550000_5729000_p95_p05.tif  
lasgrid -lof file_list.txt -step 20 -otif
```



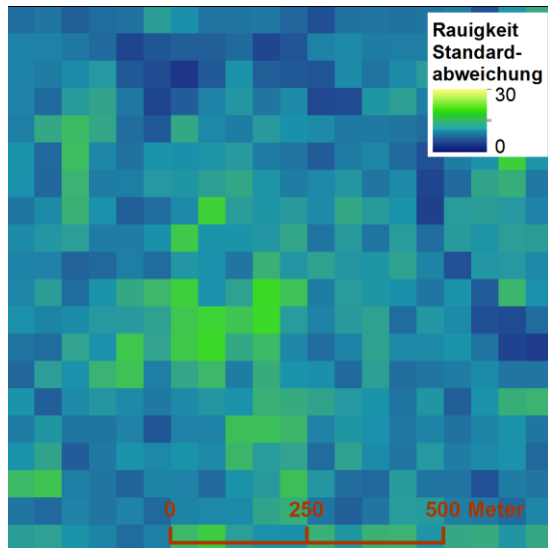
a: Ausschnitt des Oberflächenmodells, das zur Quantifizierung der Oberflächenrauigkeit der Vegetation (siehe b - g) verwendet wurde.



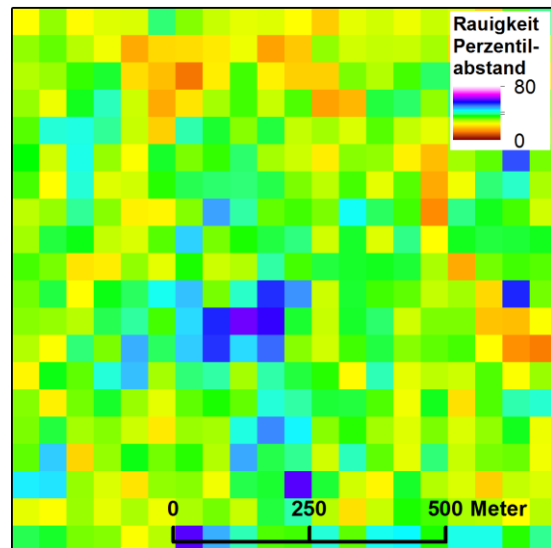
b: Oberflächenrauigkeit berechnet als Standardabweichung der Höhenwerte des nDOM (a) pro 20 m-Pixel.



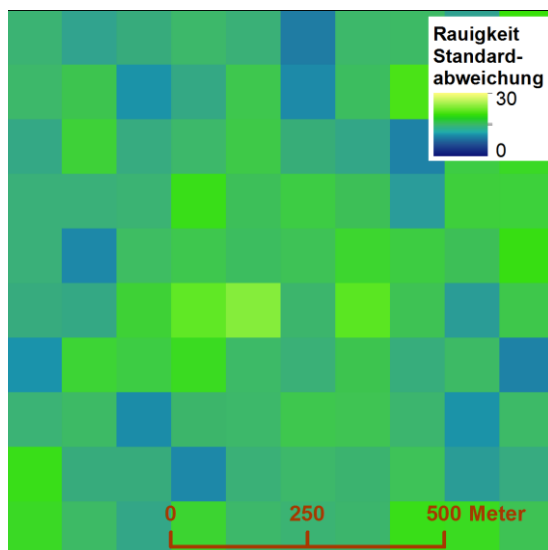
c: Oberflächenrauigkeit berechnet als Perzentilabstand der Höhenwerte des nDOM (a) pro 20 m-Pixel.



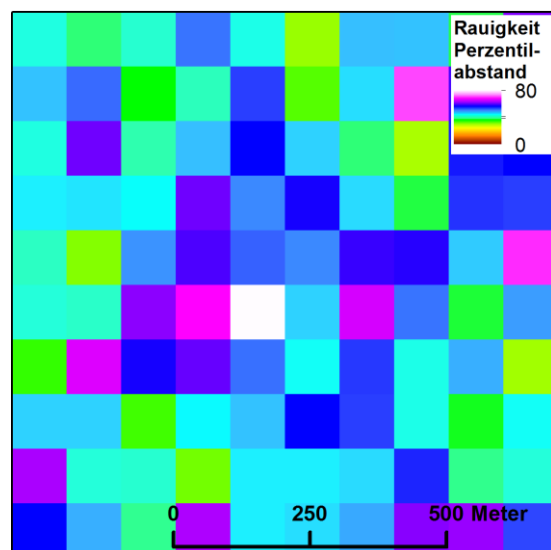
d: Oberflächenrauigkeit berechnet als Standardabweichung der Höhenwerte des nDOM (a) pro 50 m-Pixel.



e: Oberflächenrauigkeit berechnet als Perzentilabstand der Höhenwerte des nDOM (a) pro 50 m-Pixel.



f: Oberflächenrauigkeit berechnet als Standardabweichung der Höhenwerte des nDOM (a) pro 100 m-Pixel.



g: Oberflächenrauigkeit berechnet als Perzentilabstand der Höhenwerte des nDOM (a) pro 100 m-Pixel.

Abb. 6: DOM (a) und Ergebnisse verschiedener Berechnungen der Oberflächenrauigkeit (b-g).

3 Validierung der Waldstrukturkarten

3.1 Einleitung

Die nach den oben beschriebenen Verfahren erstellten Datensätze basieren auf 3-dimensionalen Punktwolken, welche mittels Image Matching-Techniken aus Luftbilddaten berechnet wurden (siehe Dokumentation zu M3 „Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern“). Die Qualität dieser Punktwolken und Oberflächenmodelle ist stark von der Luftbild- und Befliegungsgeometrie, sowie der Radiometrie der Luftbilddaten abhängig. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Bilder mit hohen Überlappungen aufgenommen werden und alle



Bildbereiche gut ausgeleuchtet und kontrastreich erfasst sind. In Schattenbereichen, in denen die Bilder nahezu schwarz erscheinen, und in sehr hellen kontrastarmen Bildbereichen kann es vorkommen, dass nicht genügend Informationen vorhanden sind um einzelne Objekte voneinander zu unterscheiden. In Luftbildaufnahmen von Wäldern sind Schatten häufig in Bestandeslücken oder an Waldrändern zu finden, sodass die durch Image Matching erzeugten Punktwolken in diesen Bereichen Ungenauigkeiten aufweisen können. Der Anteil von beschatteten Bereichen hängt stark vom Sonnenstand zum Zeitpunkt der Aufnahme und der Bestandesstruktur ab.

Es sei daher darauf hingewiesen, dass die mit dem hier beschriebenen Verfahren erstellten Oberflächenmodelle keine fehlerfreie Abbildung der Bestandesoberfläche darstellen. Ebenso sind in der Folge die aus den Oberflächenmodellen abgeleiteten forstlichen Strukturkarten nicht fehlerfrei. Dies ist bei der Interpretation der Daten und insbesondere bei Verwendung der Daten für eine Zeitreihe zu beachten. Veränderungen in der Aufnahmegeometrie, des Aufnahmezeitpunkts, des Schattenwurfs und der Witterung zum Flugzeitpunkt beeinflussen die aus Luftbildern abgeleiteten Oberflächenmodelle, sodass es innerhalb einer Zeitreihe zu Unschärfen und Artefakten kommen kann. Die Kombination von Oberflächenmodellen unterschiedlicher Fernerkundungssensoren in einer Zeitreihe birgt zusätzliche Schwierigkeiten. Oberflächenmodelle, die aus ALS-Daten abgeleitet wurden, sind nicht durch Schatten beeinflusst und bilden, bei entsprechender Punktdichte, Objekte im Allgemeinen detailgetreuer ab als luftbildbasierte Oberflächenmodelle. Eine Zeitreihe, in der sowohl luftbild- als auch ALS-basierte Oberflächenmodelle verwendet werden, kann nur mit Einschränkungen analysiert und interpretiert werden.

Im Folgenden werden die mit dem im F³-Projekt entwickelten Verfahren erzeugbaren Oberflächenmodelle und forstlichen Strukturkarten mit verschiedenen Referenzdaten verglichen. Als Referenzdaten werden ALS-basierte Oberflächenmodelle sowie stereoskopische Baumhöhenmessungen und Bestandeslückenkartierungen verwendet. Anhand dieser Vergleiche soll eine Einschätzung der Genauigkeit der luftbildbasierten Datensätze sowie deren Detailgrad und Vergleichbarkeit verschiedener Datensätze ermöglicht werden.

3.2 Vergleich von ALS- und luftbildbasierten forstlichen Strukturkarten

3.2.1 Daten

Für das ca. 155 km² große Untersuchungsgebiet Holzminden im Solling, Niedersachsen, stehen digitale Luftbilder und ALS-Punktwolken zur Verfügung. Beide Datensätze wurden vom LGLN (Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen) für die Verwendung im F³-Projekt zur Verfügung gestellt.

Die Luftbilder wurden am 19.07.2016 mit einer UltraCam Xp aufgenommen und enthalten 4 spektrale Kanäle (Rot, Grün, Blau und Infrarot). Die Bodenauflösung beträgt 20 cm und die Längs- und Querüberlappung 80% bzw. 30%. Diese Bilder dienen als Eingangsdaten für das im Dokument M3 beschriebene Image Matching mit der Software MATCH-T DSM und SURE, anschließend wurde mit dem Pythonskript *cloud2ndom_F3.py* die aus dem Image Matching resultierende Punktwolke gefiltert und es wurden digitale Oberflächenmodelle (DOM) und normalisierte digitale Oberflächenmodelle (nDOM) im .laz und .tif Format erzeugt, welche dann zur Generierung der oben (Abschnitt 2) beschriebenen forstlichen Strukturkarten verwendet wurden.

Die ALS-Daten wurden drei Monate früher als die Luftbilder aufgenommen. Der größte Teil der ALS-Daten wurde am 17.03.2016 (122 Kacheln) aufgenommen. Einige Flächen am östlichen Rand des



Gebiets wurden kurze Zeit später am 27.03.2016 (22 Kacheln) und am 28.03.2016 (11 Kacheln) aufgenommen. Die Genauigkeit der Punkte liegt in der Höhe bei 15 cm und in der Lage bei 30 cm. Die nominelle Auflösung der ALS-Punktwolke beträgt 40 cm, bzw. 5 Punkte/m². Der Scanwinkel beträgt 60 Grad. Die Rohdaten wurden bereits vom LGLN klassifiziert und um Ausreißer bereinigt. Aus den ALS-Daten wurden ebenfalls DOM und nDOM generiert, welche anschließend als Eingangsdaten für die Erzeugung forstlicher Strukturkarten genutzt wurden. DOM und nDOM der ALS-Daten wurden mit der Software LAStools erzeugt und mit der Software R auf die Ausdehnung von 1000x1000 m zugeschnitten. Details der Prozessierung:

```
# drop classifications which are not needed and reduce point density to 0.5 m
lasthin -cpu64 -i D:\F3\Lidar\*.laz -cores 7 -drop_classification 7 -drop_classification 15 -step 0.5 -highest -odir D:\F3
\Lidar_2 -olaz
# set point type to "2" and classify all points as "5"
las2las -cpu64 -i D:\F3\Lidar_2\*.laz -cores 7 -set_classification 5 -set_point_type 2 -odir D:\F3\Lidar_3 -olaz
# combine DGM and LiDAR points
lastile -cores 7 -i D:\F3\Geodaten\DGM1_laz\*.laz -i D:\F3\Lidar_3\*.laz -odir D:\F3\Lidar_4 -olaz
# buffer each tile with a 100 m buffer
lastile -cores 7 -i D:\F3\Lidar_4\*.laz -buffer 100 -flag_as_withheld -odir D:\F3\Lidar_5 -olaz
# For nDSM:
# For nDSM: subtract DGM elevation from LiDAR points to normalize the height, remove all points below -1 m and above
55 m height
lasheight -cpu64 -i D:\F3\Lidar_5\*.laz -cores 7 -class "0" -replace_z -drop_below -1 -drop_above 55 -odir D:\F3\Lidar_6 -
olaz
# For DSM:
# For DSM: remove all points below -1 m and above 55 m height above DTM
lasheight -cpu64 -i D:\F3\Lidar_5\*.laz -cores 7 -class "0" -do_not_store_in_user_data -drop_below -1 -drop_above 55 -odir
D:\F3\Lidar_6b -olaz
# For DSM: write DSM (without buffer) as LAZ (1 m resolution)
lasgrid -cpu64 -cores 7 -i D:\F3\Lidar_6b\*.laz -drop_withheld -drop_classification 0 -step 1 -subcircle 0.5 -elevation -highest
-fill 3 -odir D:\F3\Aus_Lidar\DSM_laz -olaz
# In the last step the DSM LAZ files were cropped to an extent of 1000*1000 m (before it has been 1002*1002 m).
lastile -cpu64 -cores 7 -i D:\F3\Aus_Lidar\DSM_laz -tile_size 1000 -odir D:\F3\Aus_Lidar\DSM_laz_clip -olaz
# For nDSM:
# For nDSM: write nDSM (without buffer) as TIFF (1 m resolution)
lasgrid -cores 7 -i D:\F3\Lidar_6\*.laz -drop_classification 0 -drop_withheld -clamp_z_below 0 -epsg 25832 -step 1 -subcircle
0.5 -elevation -highest -fill 3 -odir D:\F3\Aus_Lidar\nDSM_tiff -otif
# For nDSM: write nDSM (with buffer) as LAZ (1 m resolution)
lasgrid -cpu64 -cores 7 -i D:\F3\Lidar_6\*.laz -drop_classification 0 -step 1 -subcircle 0.5 -elevation -highest -fill 3 -odir
D:\F3\Aus_Lidar\nDSM_laz -olaz

# The resulting nDSM TIFF has an extent of 1002*1002 m and therefore was clipped to 1000*1000 m using the following R
code.
library(raster)
library(rgdal)
library(snow)
library(foreach)
library(doParallel)
setwd('D:/F3/Aus_Lidar')

img.path <- list.files(paste('nDSM_tiff/', sep="/"), pattern=".tif$", full.names=F)

cores=detectCores()
cl <- makeCluster(cores[1]-2)
registerDoParallel(cl)

foreach(i=1:length(img.path), .packages='raster') %dopar% {
  img <- raster(paste('nDSM_tiff/', img.path[i], sep="/"))
```

```

xmin <- as.numeric(substr(img.path[i], 1,6))
xmax <- xmin+1000
ymin <- as.numeric(substr(img.path[i], 8,14))
ymax <- ymin+1000
ex <- extent(xmin, xmax, ymin, ymax)
img <- crop(img, ex)
crs(img) <- CRS('+init=EPSG:25832')
writeRaster(img, paste('nDSM_tiff_clip', img.path[i], sep="/"), overwrite=T)
}
stopCluster(cl)

```

3.2.2 Das normalisierte Oberflächenmodell

Zum Vergleich der luftbild- und ALS-basierten nDOM wurden die beiden Datensätze übereinandergelegt und durch Subtraktion des Luftbild-nDOM vom ALS-nDOM ein Differenzbild berechnet (vgl. Abb. 11). Anschließend konnte für jede Bildkachel (1000 x 1000 m) eine Maßzahl berechnet werden, die die Abweichung der beiden Datensätze voneinander quantifiziert. Als Maßzahlen dienen der mittlere absolute Fehler (MAE: Mean Absolute Error), die Wurzel des gemittelten Fehlerquadrats (RMSE: Root Mean Square Error) und die Verzerrung (Bias). Die verwendeten Formeln sind:

$$\begin{aligned}
 \text{MAE} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |n\text{DOM}_{ALS_i} - n\text{DOM}_{LB_i}| \\
 \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (n\text{DOM}_{ALS_i} - n\text{DOM}_{LB_i})^2} \\
 \text{Bias} &= \frac{\sum_{i=1}^n n\text{DOM}_{ALS_i} - n\text{DOM}_{LB_i}}{n}
 \end{aligned}$$

Die luftbildbasierte nDOM-Kachel mit der geringsten Abweichung zum ALS-basierten nDOM hat einen MAE von 0,54 m während die Kachel mit der größten Abweichung einen MAE von 3,3 m aufweist. Im Mittel beträgt der MAE 1,8 m (Median 1,7 m). Es fällt jedoch auf, dass insbesondere Kacheln, die wenig Wald enthalten, einen niedrigen MAE aufweisen, während Kacheln mit höherem Waldanteil tendenziell höhere MAE Werte aufweisen. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 7 illustriert, in der der MAE pro Kachel gegen den Waldanteil pro Kachel abgetragen ist. Der Waldanteil wurde hier als Anteil der Pixel im ALS-nDOM mit einer Höhe > 3 m bestimmt. Es ist zu beobachten, dass mit zunehmendem Waldanteil auch der MAE steigt, was darauf hindeutet, dass es in Wäldern einen größeren Teil an beschatteten Bereichen gibt, in denen das Image Matching ungenauer funktioniert als im Offenland, das im vorliegenden Fall durch Agrarflächen mit vergleichsweise geringer vertikaler Strukturdiversität und wenigen Schattenflächen charakterisiert ist. Für Kacheln mit einem Waldanteil von ca. 70% und mehr ist eine hohe Variabilität der MAE Werte zu beobachten, was darauf hindeutet, dass einige Kacheln mit weniger komplexen Bestandesoberflächen bestanden sind, z. B. dichte Jungwuchsbestände, die wenige Lücken aufweisen und durch homogene Baumdimensionen gekennzeichnet sind. Wohingegen andere Kacheln durch komplexe Altbestände mit größerer Variabilität an Baumdimensionen und einem höheren Anteil an Bestandeslücken und dadurch bedingt mehr Schattenwurf charakterisiert sind.

Für die $n = 97$ nDOM Kacheln mit einem Waldanteil $> 70\%$ liegt der MAE im Mittel bei 2,2 m und der mittlere RMSE bei 5,1 m. Die MAE- sowie RMSE-Werte für das nDOM, das basierend auf Punktwolken des mit der Software SURE durchgeführten Image Matchings erzeugt wurde, sind in Tabelle 1 aufgeführt und sind für beide Verfahren sehr ähnlich. Die Abweichung des SURE-basierten nDOMs ist etwas geringer als die des mit MATCH-T erzeugten Datensatzes. Sowohl MATCH-T DSM als auch SURE-basierte nDOM weisen einen mittleren Bias von -0,3 m auf, was bedeutet, dass die Höhe des ALS-basierte nDOM im Durchschnitt unter der des luftbildbasierten nDOM liegt. Dies liegt wiederum daran, dass die ALS-Daten die Bestandeslücken besser erfassen. Dadurch ergeben sich insbesondere in diesen Bereichen großen negative Differenzen zwischen ALS und luftbildbasiertem nDOM. Für Baumkronen ist andererseits zu beobachten, dass die Differenzen hier überwiegend leicht (ca. 30 – 90 cm) positiv sind, d.h. das ALS-basierte nDOM weist in diesen Bereichen etwas höhere Werte auf als das luftbildbasierte nDOM. Folgende Tendenzen lassen sich erkennen: (1) Die Höhe der Vegetation in schattigen Bestandeslücken kann im luftbildbasierten nDOM zu hoch dargestellt sein (Abweichungen von mehreren Metern sind möglich). (2) Höhen gut ausgeleuchteter Baumkronen können laut dieser Untersuchung leicht unter den ALS-Höhen (Abweichungen von weniger als einem Meter) liegen. Dies könnte durch die Unterschiede beim Ausdünnen der Punktwolken mit „lasthin“ hervorgerufen worden sein. Für das luftbildbasierte nDOM wurde beim Ausdünnen der Wert des 95. Perzentils beibehalten (siehe Dokument M3 „Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern“, S. 16). Für das ALS-nDOM wurde dagegen der höchste Wert beibehalten (siehe Abschnitt 3.2.1).

Tabelle 1: Vergleich der luftbildbasierten nDOMs (Image Matching mit Software MATCH-T DSM bzw. SURE) mit einem ALS-basierten nDOM. Die Tabelle zeigt die Verteilung der MAE, RMSE und Bias Werte von Kacheln mit $> 70\%$ Wald ($n = 97$) im Untersuchungsgebiet Holzminden im Solling, Niedersachsen.

	nDOM MATCH-T DSM			nDOM SURE		
	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE	Bias
Minimum	1,1 m	2,6 m	-1,5 m	1,0 m	2,5 m	-1,3 m
1. Quantil	1,9 m	4,4 m	-0,5 m	1,8 m	4,2 m	-0,5 m
Median	2,2 m	5,1 m	-0,3 m	2,1 m	4,9 m	-0,3 m
Mittelwert	2,2 m	5,1 m	-0,3 m	2,1 m	4,9 m	-0,3 m
3. Quantil	2,5 m	5,8 m	-0,1 m	2,3 m	5,5 m	0,0 m
Maximum	3,3 m	7,1 m	0,4 m	2,9 m	7,0 m	0,5 m

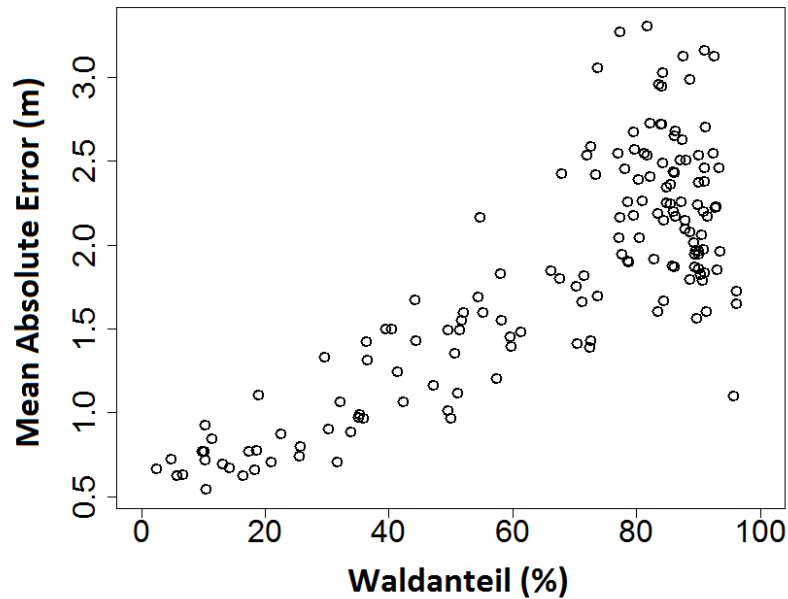


Abb. 7: Die Grafik zeigt den Zusammenhang zwischen MAE und Waldanteil pro nDOM Kachel (n = 155). Es ist die Tendenz zu beobachten, dass der MAE mit zunehmendem Waldanteil steigt.

3.2.3 Visuelle Gegenüberstellung ALS-basiertes nDOM und luftbildbasiertes nDOM

In Abb. 8 ist ein Ausschnitt eines luftbildbasierten nDOM einem auf ALS-Daten beruhendem nDOM (Abb. 9) gegenübergestellt. Der visuelle Vergleich der beiden nDOM zeigt, dass das nDOM aus ALS Daten eine größere Anzahl an Lücken innerhalb der Baumbestände aufweist. Außerdem erscheinen die Kronen einzelner Bäume klarer voneinander abgegrenzt. Vergleicht man die die beiden gezeigten nDOM mit dem dazugehörigen Orthophoto (Abb. 10), ist zu erkennen, dass die beiden nDOM insbesondere in den Schattenbereichen des Luftbildes voneinander abweichen. Z. B. sind die von Nord nach Süd durch das Gebiet verlaufenden Bestandesgrenzen, die im Luftbild aufgrund der Beschattung sehr dunkel erscheinen, im luftbildbasierten nDOM nur ungenau abgebildet, während sie im ALS-basierten nDOM klar zu erkennen sind. Das aus den nDOM berechnete Differenzbild (Abb. 11) visualisiert und quantifiziert die Abweichungen des luftbildbasierten nDOMs vom ALS-basierten nDOM. In brauner Farbe dargestellte Flächen kennzeichnen Lücken, die im Luftbild-nDOM nicht erfasst sind. In blauer Farbe sind Bereiche dargestellt, in denen das Luftbild-nDOM niedrigere Höhen aufweist als das ALS-nDOM. Alle Abweichungen die weniger als ± 2 m betragen, sind im Differenzbild weiß dargestellt. Die große Ausdehnung der weiß eingefärbten Bereiche verdeutlicht, dass der überwiegende Anteil der Bestandesoberfläche im Luftbild-nDOM mit deutlich höherer Genauigkeit dargestellt wird als die nicht einsehbaren bzw. beschatteten Bildbereiche an Bestandesrändern bzw. in Lücken.

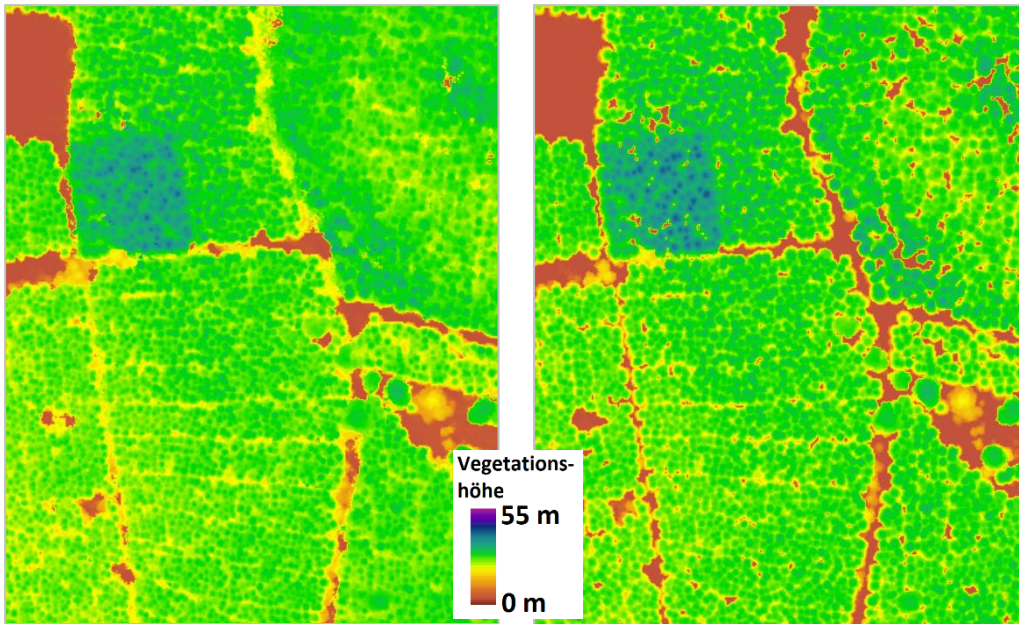


Abb. 8: Luftbildbasiertes nDOM (SURE ImageMatching).

Abb. 9: ALS-basiertes nDOM.



Abb. 10: Orthophoto.

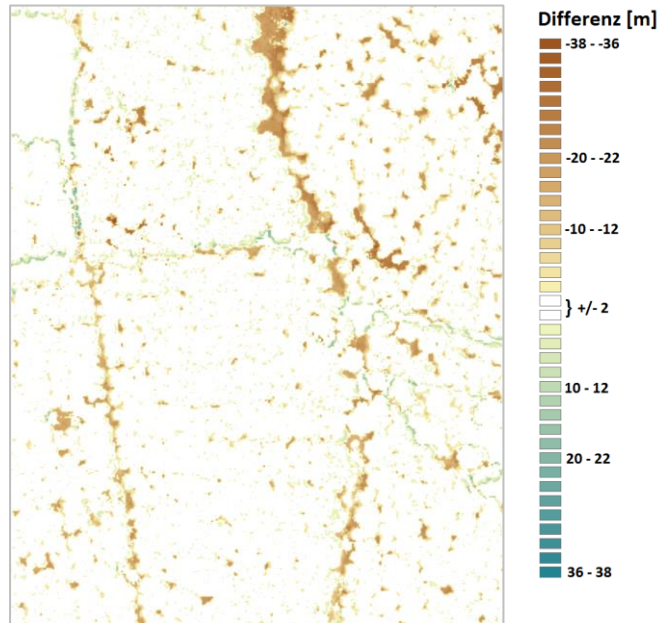


Abb. 11: Differenzbild der in Abb. 8 und Abb. 9 gezeigten nDOM.
(Differenz = ALS nDOM – Luftbild nDOM)

3.2.4 Die Waldhöhenstrukturkarte (WHSK)

Analog zum für das nDOM beschriebene Verfahren, wurden auch Waldhöhenstrukturkarten (WHSK) sowohl aus ALS-basierten als auch aus luftbildbasierten Daten generiert und die Abweichungen mittels der Maßzahlen MAE, RMSE und Bias quantifiziert (Tabelle 2). Die Abweichungen (MAE und RMSE) der WHSK zu den Referenzdaten (Tabelle 2) sind geringer als die Abweichungen der nDOM zu

den Referenzdaten (Tabelle 1). Dies lässt sich mit der größeren Auflösung der WHSK begründen. Bei der Erstellung der WHSK werden die Pixelwerte des nDOMs pro 5 x 5 m Fläche aggregiert und nur der höchste Wert pro Flächeneinheit ausgewählt. Durch diese Aggregation werden vorrangig Pixelwerte erhalten, die oben auf Baumkronen liegen, also in Bereichen, die üblicherweise gut beleuchtet sind und in denen das Image Matching gute Ergebnisse liefert. Dies resultiert in merklich geringeren MAE- und RMSE-Werten als beim nDOM. Die Ausrichtung der WHSK an den oberen Höhen des nDOM resultiert in Bias Werten, die sich in Ihrem Vorzeichen von denen des nDOM unterscheiden. Während beim nDOM der Bias im Mittel negativ war, ist der mittlere Bias der WHSK positiv, d.h. die ALS-basierte WHSK liegt im Durchschnitt höher als die luftbildbasierte WHSK. Die bereits für das nDOM beschriebene Tendenz, dass das luftbildbasierte nDOM zu leicht niedrigeren Baumkronenhöhen neigt, ist auch in der WHSK zu beobachten und resultiert in einem positiven Bias der WHSK.

Wie bereits in Tabelle 1 aufgezeigt, sind auch für die WHSK (siehe Tabelle 2) die Abweichungen beider Verfahren (Image Matching Mit MATCH-T DSM bzw. SURE) ähnlich. Die Abweichung (MAE und RMSE) der vom Programm SURE erzeugten Daten von den ALS-basierten Referenzdaten geringer als die von MATCH-T DSM erzeugten Daten. Der Bias der vom Programm SURE erzeugten Daten liegt hingegen höher als der von mit MATCH-T DSM erzeugten Daten.

Tabelle 2: Vergleich der luftbildbasierten Waldhöhenstrukturkarte (Image Matching mit Software MATCH-T DSM bzw. SURE) mit einer ALS-basierten Waldhöhenstrukturkarte. Die Tabelle zeigt die Verteilung der MAE, RMSE und Bias Werte von Kacheln mit > 70% Wald ($n = 97$) im Untersuchungsgebiet Holzminden im Solling, Niedersachsen.

	WHSK MATCH-T DSM			WHSK SURE		
	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE	Bias
Minimum	0,7 m	1,5 m	-0,4 m	0,7 m	1,3 m	0,0 m
1. Quantil	1,2 m	2,5 m	0,4 m	1,1 m	2,3 m	0,5 m
Median	1,4 m	3,0 m	0,5 m	1,2 m	2,7 m	0,7 m
Mittelwert	1,4 m	3,1 m	0,5 m	1,2 m	2,7 m	0,7 m
3. Quantil	1,6 m	3,6 m	0,6 m	1,4 m	3,0 m	0,8 m
Maximum	2,2 m	5,0 m	1,2 m	1,8 m	4,5 m	1,2 m

3.2.5 Waldtyp (offene und geschlossene Bestände) und Bestandeslücken

Das Skript *waldtyp_F3.py* erstellt Waldklassifizierungen, die zwischen Bestandeslücken sowie offenen und geschlossenen Beständen unterscheiden. Dieses Skript wurde sowohl auf luftbildbasierte als auch auf ALS-basierte nDOM Dateien angewendet. Luftbildbasierte nDOM liegen in zwei Varianten vor: für Variante 1 wurde das Image Matching zur Erzeugung der Punktwolken mit dem Programm MATCH-T DSM von Trimble durchgeführt, für Variante 2 mit dem Programm SURE von nFrames.

Die Klassifikationsergebnisse der Varianten 1 und 2 wurden flächendeckend mit der Waldklassifikation der ALS-Daten verglichen. Die Klassifikation der ALS-Daten diente hierbei als Referenz. Anhand von Konfusionsmatrizen ist im Folgenden dargestellt, inwieweit die luftbildbasierten Klassifizierungen mit der Referenzklassifizierung übereinstimmen.

Tabelle 3: Konfusionsmatrix der Variante 1 (MATCH-T DSM) der Waldklassifizierung.

Klasse	ALS Klassifikation			Summe (ha)	Nutzer- genauigkeit
	Offener Be- stand (ha)	Geschlossener Bestand (ha)	Lücke (ha)		
Offener Bestand (ha)	518,54 (4,74%)	37,62 (0,34%)	23,35 (0,21%)	579,51 (5,29%)	89,48%
Geschlossener Bestand (ha)	40,36 (0,37%)	9459,54 (86,42%)	408,96 (3,74%)	9908,86 (90,52%)	95,47%
Lücke (ha)	20,54 (0,19%)	87,61 (0,80%)	350,12 (3,20%)	458,27 (4,19%)	76,40%
Summe (ha)	579,44 (5,29%)	9584,77 (87,56%)	782,43 (7,15%)	10946,64 (100%)	<i>Gesamt- genauigkeit</i>
Produzenten- genauigkeit	89,49%	98,69%	44,75%	<i>Gesamt- genauigkeit</i>	10328,21 ha 94,35%

Aus der Konfusionsmatrix (Tabelle 3) geht hervor, dass die Klassifikation der MATCH-T DSM-Daten zu 94,35% (Gesamtgenauigkeit) mit der Referenzklassifikation der ALS-Daten übereinstimmt. Insbesondere die Klassen 1 (offener Bestand) und 2 (geschlossener Bestand) zeigen große Übereinstimmungen. Hier werden 89,5% bzw. 98,7% der in den ALS-Daten als offener bzw. geschlossener Bestand klassifizierten Fläche auch in den luftbildbasierten Daten als solche klassifiziert (siehe Tabelle 3, Produzentengenauigkeit). Ebenso sind 89,5% bzw. 95,5% der in den Luftbilddaten als offen respektive geschlossen klassifizierten Pixel auch in den ALS Daten als solche klassifiziert (siehe Tabelle 3, Nutzergenauigkeit).

Weniger Übereinstimmung findet man bei Klasse 3, den Bestandeslücken. Hier wurden nur knapp 45% der im ALS-Datensatz als Lücken identifizierten Lücken auch in den luftbildbasierten Daten erfasst und nur 76% der in den luftbildbasierten Daten erfassten Lücken wurden auch in den Referenzdaten als Lücke klassifiziert.

Tabelle 4: Konfusionsmatrix der Variante 2 (SURE) der Waldklassifizierung.

Klasse	ALS Klassifikation			Summe (ha)	Nutzer- genauigkeit
	Offener Be- stand (ha)	Geschlossener Bestand (ha)	Lücke (ha)		
Offener Be- stand (ha)	554,74 (5,07%)	58,49 (0,53%)	38,52 (0,35%)	651,75 (5,95%)	85,12%
Geschlossener Bestand (ha)	17,08 (0,16%)	9429,56 (86,14%)	335,09 (3,06%)	9781,73 (89,36%)	96,40%
Lücke (ha)	7,65 (0,07%)	96,71 (0,88%)	408,81 (3,73%)	513,17 (4,69%)	79,66%
Summe (ha)	579,47 (5,29%)	9584,76 (87,56%)	782,42 (7,15%)	10946,65 (100%)	<i>Gesamt- genauigkeit</i>
Produzenten- genauigkeit	95,73%	98,38%	52,25%	<i>Gesamt- genauigkeit</i>	10393,11 ha 94,94%

Die Klassifikation der SURE-Daten erzielt ähnliche Genauigkeiten (Tabelle 4), liegt aber in fast allen Bereichen leicht höher als die Klassifikation der MATCH-T DSM-Daten. Am stärksten fällt dies bei der Klasse „Lücke“ auf, wo eine Produzentengenauigkeit von 52,3% und eine Nutzergenauigkeit von

79,7% erreicht werden. Bei offenem und geschlossenem Bestand erzielten die SURE-Daten Produzentengenauigkeiten von 95,7% bzw. 98,4% sowie Nutzergenauigkeiten von 85,1% und 96,4%.

3.2.6 Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenrauigkeit des DOM wird mittels der Standardabweichung und des Perzentilabstands (Abstand zwischen dem 5. und 95. Perzentil) der Höhenwerte des DOM pro Flächeneinheit (20 x 20 m, 50 x 50 m und 100 x 100 m Pixel) berechnet. Für den Vergleich der aus Luftbilddaten abgeleiteten Oberflächenrauigkeit mit aus ALS-Daten abgeleiteten Oberflächenrauigkeit wurden, wie bereits für das DOM beschrieben, die Abweichung der luftbildbasierten von der ALS-basierten Oberflächenrauigkeit mittels der Maßzahlen MAE, RMSE und Bias quantifiziert.

Die Abweichungen zwischen den Oberflächenrauigkeiten (Tabelle 5) zeigen, dass sich luftbild- und ALS-basierte Karten in der 20 m Auflösung im Mittel um 1,6 m (MAE) bzw. 2,2 m (RMSE) unterscheiden. Der positive Bias zeigt, dass die auf ALS-basierten Oberflächenmodellen durchgeführte Berechnung der Rauigkeit zu höheren Werten führt. Im Mittel liegen die auf ALS-Daten beruhenden Rauigkeitswerte um 1,6 m über den luftbildbasierten Werten. Dies kann durch die unterschiedliche Arbeitsweise der verwendeten Sensoren erklärt werden. Da ALS-Sensoren in der Lage sind, auch in dunklen Bildbereichen akkurate Daten zu liefern, enthält dieser Datensatz eine Vielzahl an Bestandeslücken, die im luftbildbasierten Datensatz fehlen. Die größere Anzahl von Bestandeslücken in den ALS-Daten bedingt eine größere Variabilität der Höhenwerte pro Flächeneinheit, ergo eine größere Oberflächenrauigkeit. Tabelle 5 zeigt außerdem, dass die Abweichungen mit größer werdenden Flächeneinheiten kleiner werden. So liegt z. B. der mittlere MAE der Oberflächenrauigkeit pro 20 m Pixel bei 1,6 m während er in der 100 m Auflösung nur 1,1 m beträgt.

Für das Oberflächenrauigkeitsmaß Perzentilabstand wurden ebenfalls die Abweichungen zwischen der luftbild- und ALS-basierten Berechnung ermittelt (Tabelle 6). Auch hier liegen die ALS-basierten Rauigkeitswerte über den luftbildbasierten Rauigkeitswerten (z. B. 4,1 m mittlerer Bias bei 20 m Auflösung). Ebenfalls ist die Tendenz zu beobachten, dass die Abweichungen zwischen den Datensätzen bei zunehmender Pixelgröße abnehmen.

Tabelle 5: Vergleich der luftbildbasierten Oberflächenrauigkeit / Standardabweichung (Image Matching mit Software MATCH-T DSM) mit einer ALS-basierten Oberflächenrauigkeitskarte. Die Tabelle zeigt die Verteilung der MAE, RMSE und Bias Werte von Kacheln mit > 70% Wald (n = 97) im Untersuchungsgebiet Holzminden im Solling, Niedersachsen. Die Werte werden pro Aggregationsstufe, d.h. pro 20 x 20 m, 50 x 50 m und 100 x 100 m Pixelgröße, angegeben.

Oberflächenrauigkeit / Standardabweichung									
MATCH-T DSM									
	20 x 20 m Pixel			50 x 50 m Pixel			100 x 100 m Pixel		
	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE	Bias
Minimum	0,7 m	1,1 m	0,6 m	0,6 m	0,9 m	0,6 m	0,5 m	0,7 m	0,5 m
1. Quantil	1,3 m	1,8 m	1,1 m	1,1 m	1,4 m	1,1 m	0,9 m	1,1 m	0,9 m
Median	1,6 m	2,2 m	1,5 m	1,3 m	1,7 m	1,3 m	1,1 m	1,3 m	1,1 m
Mittelwert	1,6 m	2,2 m	1,5 m	1,4 m	1,7 m	1,3 m	1,1 m	1,3 m	1,1 m
3. Quantil	1,8 m	2,6 m	1,7 m	1,6 m	2,0 m	1,6 m	1,3 m	1,6 m	1,3 m
Maximum	2,5 m	3,3 m	2,5 m	2,2 m	2,7 m	2,2 m	1,8 m	2,0 m	1,8 m

Tabelle 6: Vergleich der luftbildbasierten Oberflächenrauigkeit / Perzentilabstand (Image Matching mit Software MATCH-T DSM) mit einer ALS-basierten Oberflächenrauigkeitskarte. Die Tabelle zeigt die Verteilung der MAE, RMSE und Bias Werte von Kacheln mit > 70% Wald ($n = 97$) im Untersuchungsgebiet Holzminden im Solling, Niedersachsen. Die Werte werden pro Aggregationsstufe, d.h. pro 20 x 20 m, 50 x 50 m und 100 x 100 m Pixelgröße, angegeben.

**Oberflächenrauigkeit / Perzentilabstand
MATCH-T DSM**

	20 x 20 m Pixel			50 x 50 m Pixel			100 x 100 m Pixel		
	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE	Bias	MAE	RMSE	Bias
Minimum	2,0 m	3,7 m	1,7 m	1,7 m	2,8 m	1,6 m	1,7 m	2,3 m	1,7 m
1. Quantil	3,6 m	6,0 m	3,2 m	3,3 m	5,0 m	3,1 m	2,6 m	3,7 m	2,6 m
Median	4,3 m	7,2 m	4,1 m	4,0 m	6,0 m	3,9 m	3,4 m	4,5 m	3,3 m
Mittelwert	4,4 m	7,1 m	4,1 m	4,1 m	6,1 m	4,1 m	3,5 m	4,8 m	3,5 m
3. Quantil	5,1 m	7,2 m	4,8 m	4,9 m	7,2 m	4,9 m	4,2 m	5,9 m	4,2 m
Maximum	6,7 m	10,2 m	6,5 m	7,1 m	9,5 m	7,1 m	6,5 m	8,0 m	6,5 m

3.3 Validierung mit manuell erzeugten Vergleichsdaten

3.3.1 Vergleich des nDOM mit stereoskopisch gemessenen Höhen

Die Genauigkeit der Höhen im DOM und nDOM ist maßgeblich für die Genauigkeit der abgeleiteten Strukturparameter. Neben ALS-Daten, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, können hierfür auch stereoskopisch gemessenen Höhen verwendet werden. Der Vorteil von aus dem gleichen Bilddatensatz stereoskopisch gemessenen Höhen als Referenzdaten besteht darin, dass die Einflüsse unterschiedlicher Messinstrumente und Ko-Registrierungsfehler ausgeschlossen werden können. Es wird so ausschließlich die Genauigkeit der Höhenableitung mittels eines automatisierten versus eines manuellen Verfahrens untersucht. Ein Nachteil hierbei ist, dass das manuelle, stereoskopische Messen sehr zeitaufwendig ist. Für die Validierung im F³-Projekt wurden deshalb bereits vorhandene stereoskopisch gemessene Baumhöhen außerhalb der F³-Projektgebiete genutzt. Diese verteilen sich auf zwei Flächen im Nordschwarzwald bzw. dessen Vorbergzone (Abb. 12).

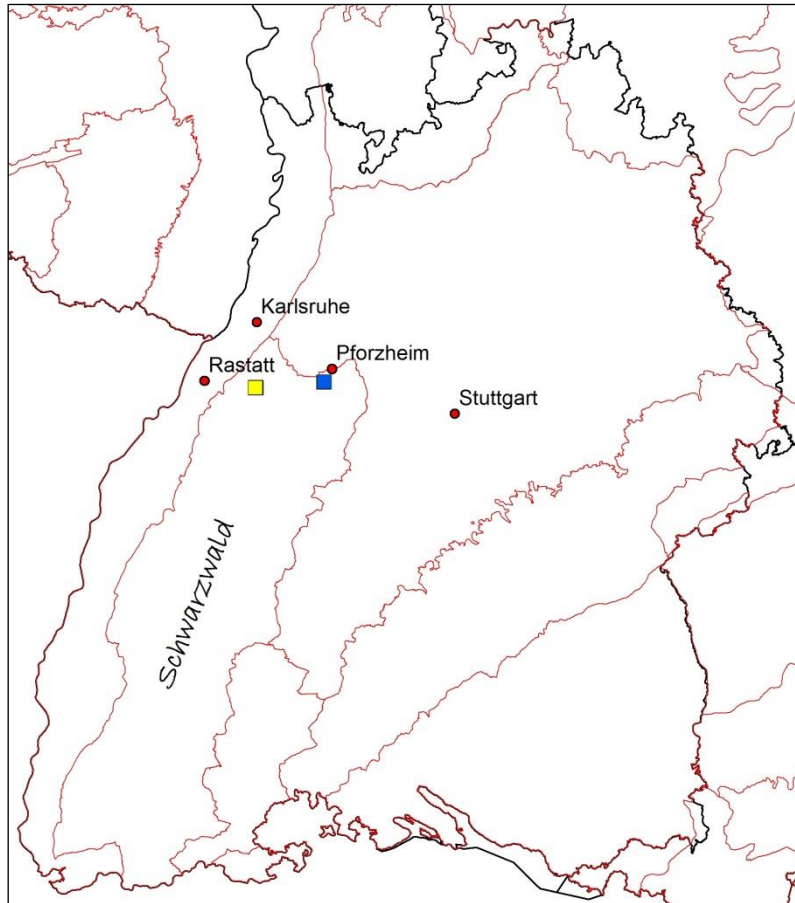


Abb. 12: Lage der Höhenvalidierungsgebiete innerhalb Baden-Württembergs. Gelb = Validierungsgebiet „Rastatt“; blau = Validierungsgebiet „Pforzheim“.

Die Fläche „Rastatt“ (Abb. 12) liegt im Landkreis Rastatt. Hier waren insgesamt 840 Höhen gemessen worden, davon 157 auf Baumspitzen. Die restlichen 683 Messpunkte waren auf den Baumkronen gemessen worden (Abb. 13). Diese beiden Kategorien wurden sowohl zusammen (RA) als auch getrennt (RA1 = Baumspitzen; RA2 = Baumkronen) ausgewertet. Auf der Fläche „Pforzheim“ (Abb. 12), die im Landkreis Pforzheim liegt, waren an 212 Baumspitzen die Höhen gemessen worden (Abb. 14).

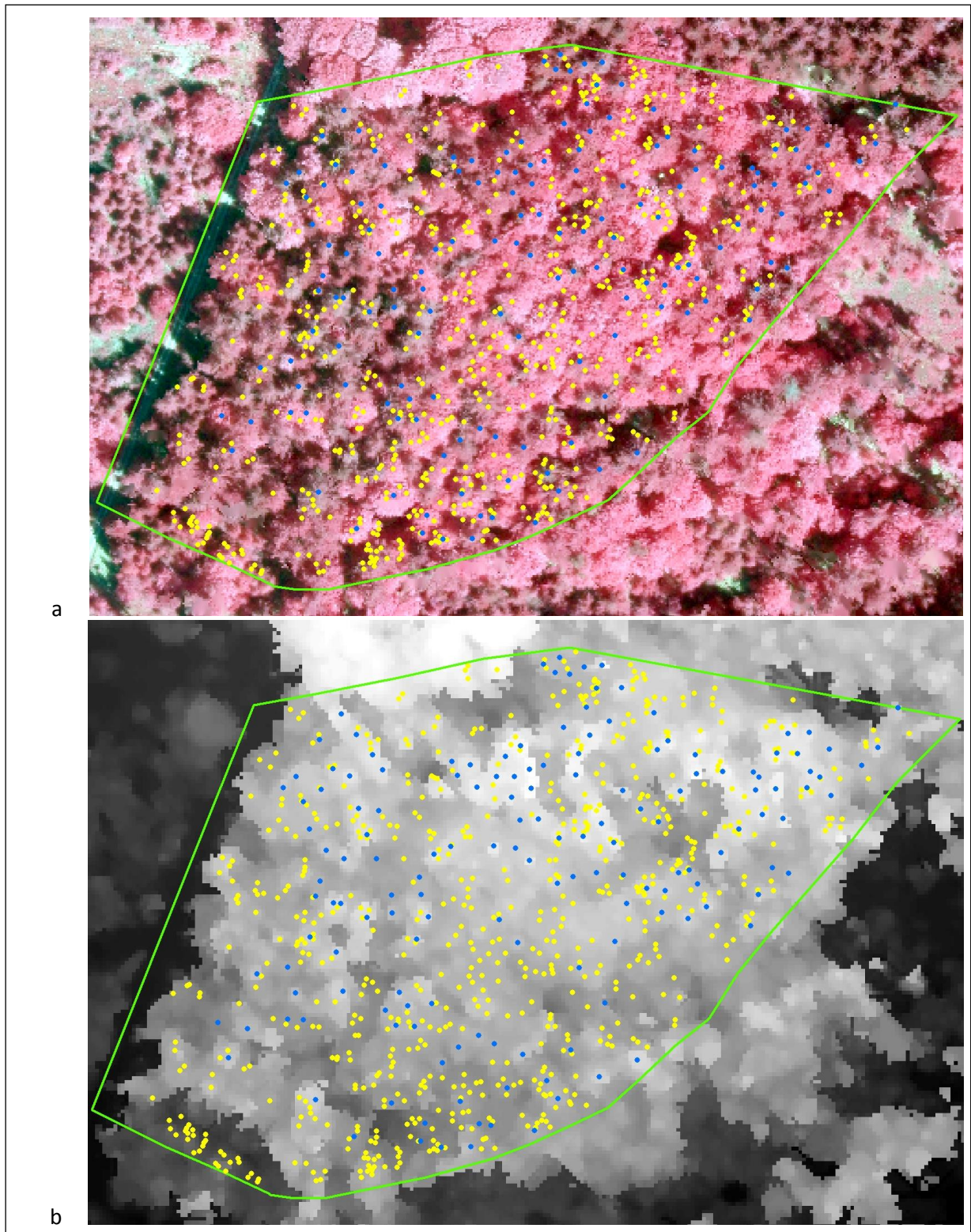


Abb. 13: Gemessene Höhen im Validierungsgebiet Rastatt mit CIR-Orthophoto (a) bzw. 1 m-DOM (b) im Hintergrund. Blaue Punkte = Höhen auf Baumspitzen; gelbe Punkte = Höhen auf Baumkronen.

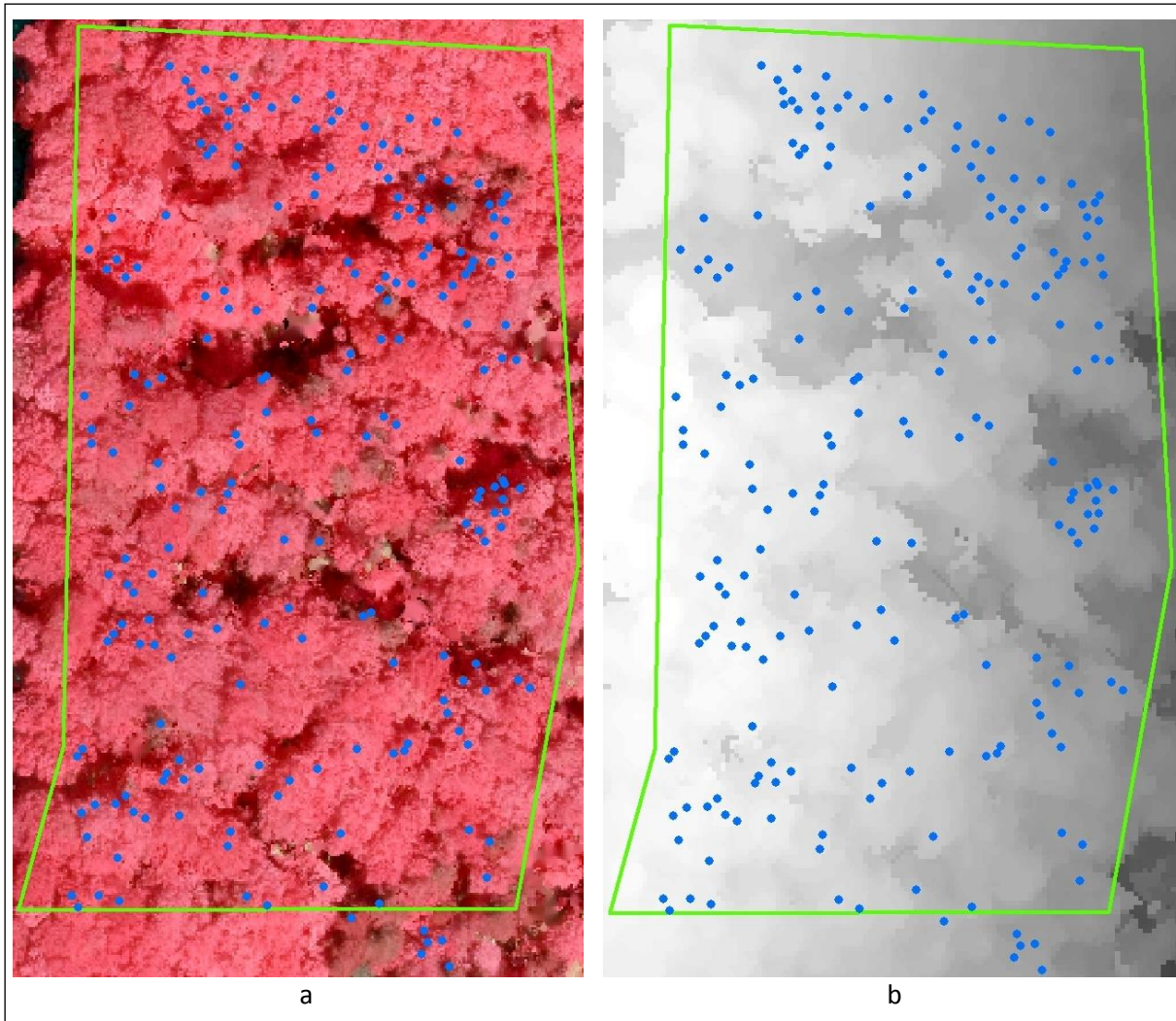


Abb. 14: Gemessene Baumspitzenhöhen im Validierungsgebiet Pforzheim mit CIR-Orthophoto (a) bzw. 1 m-DOM (b) im Hintergrund.

Mittels des stereoskopischen Verfahrens wurden absolute Höhen gemessen, das heißt es wurde keine Geländehöhe stereoskopisch gemessen und abgezogen. Die Höhenmessungen basieren auf Daten einer im Mai 2012 durchgeführten Luftbildbefliegung. Zur Generierung des nDOM wurden die Luftbilder mit der Software SURE nach dem für das F³-Projekt festgelegten Vorgehensweise zur Oberflächenberechnung (siehe Dokumentation zu M3) prozessiert.

Mit der Software ArcGIS wurde für jeden stereoskopisch gemessenen 3D-Punkt der entsprechende Pixelwert aus dem 1 m Luftbild-nDOM (Rasterformat) ausgelesen (Tool „Extract Values to Points“ (Spatial Analyst Tools → Extraction)). Zusätzlich wurde die Geländehöhe aus dem DGM mit 1 m Auflösung (bereitgestellt durch das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL)) extrahiert. Diese wurden von den stereoskopisch gemessenen Höhen abgezogen. Die normalisierten Stereo-Höhen wurden mit den nDOM-Höhen verglichen und der RMSE sowie der MAE berechnet (Tabelle 7). Abb. 15 zeigt einen grafischen Vergleich zwischen den normalisierten stereoskopisch gemessenen Höhen und den Höhen aus dem Luftbild-nDOM. In Pforzheim wird der höchste RMSE (2,18 m) aber gleichzeitig auch der niedrigste MAE (0,84 m) erzielt. Dies kann durch den Ausreißer von 28 m Höhenunterschied (Abb. 15 d) erklärt werden. Ohne diesen Ausreißer läge der RMSE bei 1,03 m, während sich der MAE nur auf 0,85 m ändert. Auch in Rastatt streuen die Hö-

henunterschiede stark (RMSE 1,56 m); Höhenunterschiede von bis zu 14 m werden beobachtet (Abb. 15 a – c).

Tabelle 7: Ergebnisse (RMSE, MAE) des Vergleichs zwischen stereoskopisch gemessenen und aus dem Luftbild-DOM (Rasterformat) mit „Extract Values to Points“ extrahierten Höhen.

Fläche (Punkte)	RMSE	MAE
Rastatt (840)	1,56 m	1,03 m
Rastatt 1 (157)	1,82 m	1,38 m
Rastatt 2 (683)	1,49 m	0,94 m
Pforzheim (212)	2,18 m	0,84 m

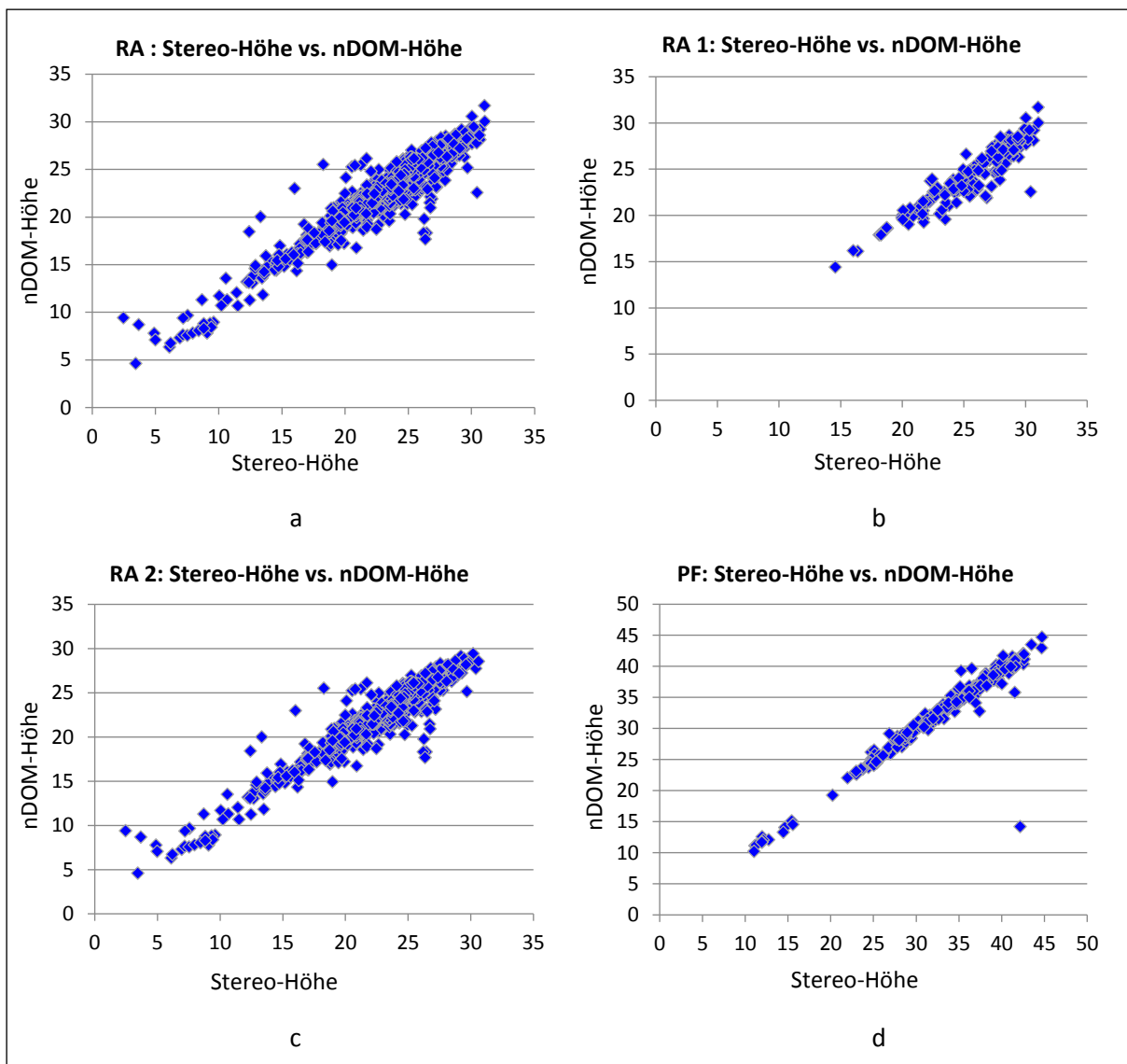


Abb. 15: Grafische Darstellung der Unterschiede zwischen stereoskopisch gemessenen Höhen und Höhen extrahiert mit „Extract Values to Points“ aus dem 1 m Luftbild-nDOM (Rasterformat).

Die Höhenvalidierung hat gezeigt, dass aus Luftbildern abgeleitete Oberflächenmodelle Baumhöhen mit hoher Genauigkeit erfassen können, allerdings streuen die Daten und es treten Ausreißer auf. Der stärkste Ausreißer tritt im Validierungsgebiet Pforzheim (Abb. 15 d) auf und ist wohl auf einen

Image Matching-Fehler zurückzuführen, der bei der nDOM-Berechnung nicht herausgefiltert wurde. Dies wird in Abb. 16 ersichtlich. Während nach dem Orthophoto (Abb. 16 a) der Höhenmesspunkt durchaus auf einer Baumkrone zu liegen scheint, werden im DOM (Abb. 16 b) an dieser Stelle mit sehr dunklen Grautönen Höhenwerte weit unterhalb der Baumkronenspitze angezeigt. Dabei zeigen die Pixel mit den niedrigeren Höhenwerten einen abrupten Höhenabfall an und bilden gleichzeitig eine unnatürliche Form, die einen Image Matching-Fehler nahelegt.

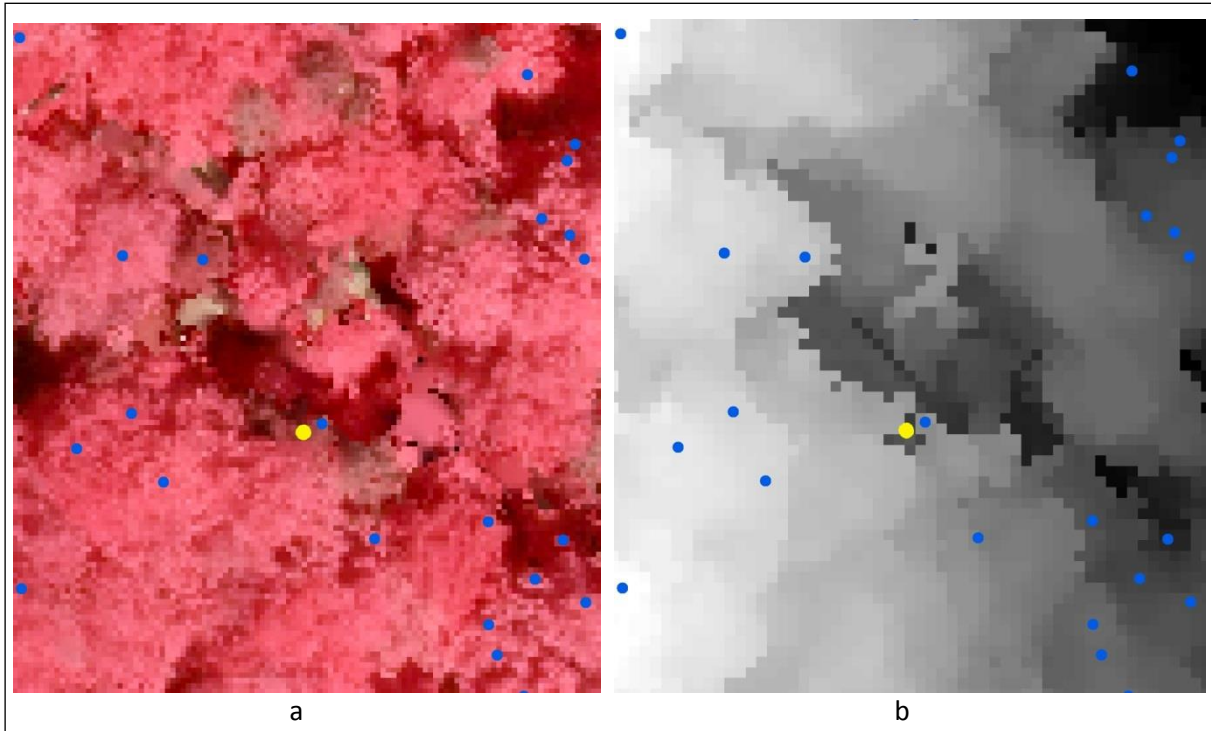


Abb. 16: Ausreißer mit 28 m Höhenunterschied (gelb markierter Punkt) und andere Höhenmesspunkte (blau) im Validierungsgebiet Pforzheim. Im Hintergrund das Orthophoto (a) bzw. DOM (b).

3.3.2 Vergleich der Lückenerkennung mit Referenzdaten aus stereoskopischer Bildinterpretation

Wie schon bei der Validierung der Oberflächenhöhen wurde an der FVA für die Validierung der Lückenerkennung auf bereits vorhandene, stereoskopisch-manuell erzeugte Referenzdaten zurückgegriffen. Auch hier standen keine ALS-Daten zur Verfügung.

Das Validierungsgebiet „Schönmünz“ hat eine Größe von 1023 ha (davon 1,8 ha Gewässerfläche) und liegt bei Schönmünz (Gemeinde Baiersbronn) im Nordschwarzwald. Eine detaillierte Beschreibung des Gebiets ist in Zielewska-Büttner et al. (2016) zu finden. Für die Validierung wurden Luftbilddaten dieses Gebietes von 2012 genutzt, die mit SURE und nach dem für das F³-Projekt festgelegten Verfahren zur Oberflächenableitung (siehe Dokumentation zu M3) prozessiert wurden. Anschließend wurde mittels des Python-Skriptes „waldtyp_F3.py“ in offene Bestände, geschlossene Bestände und Lücken klassifiziert (siehe Abschnitt 2.2). Das Ergebnis ist in Abb. 17 dargestellt.

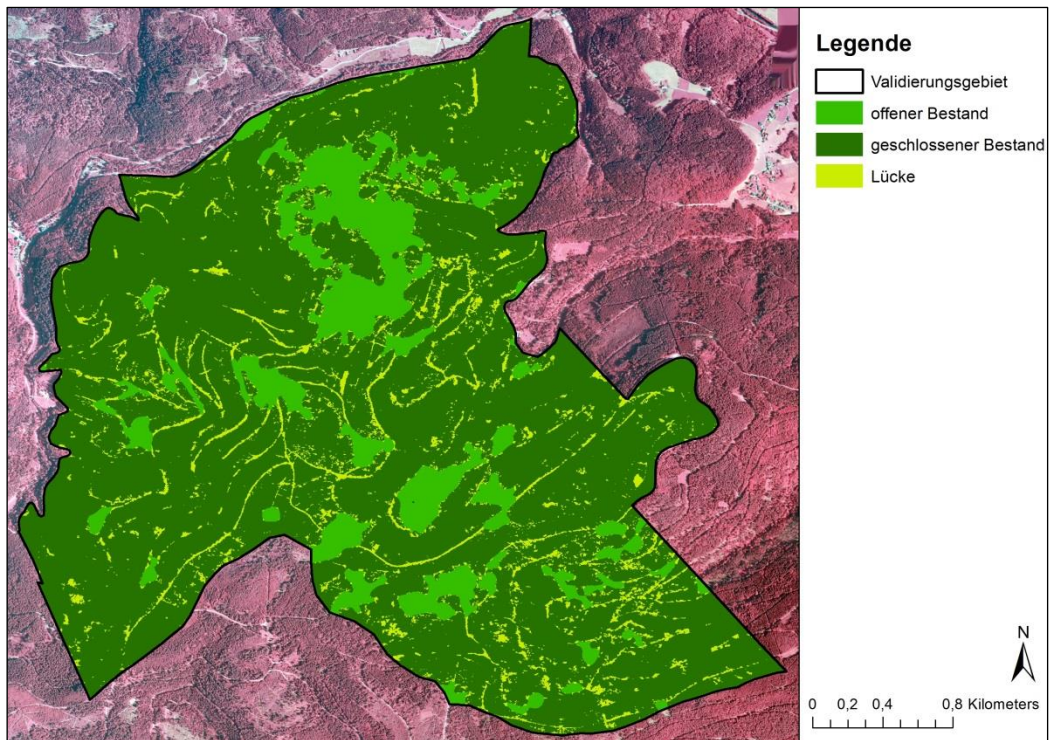


Abb. 17: Klassifizierungsergebnis für offene Bestände, geschlossene Bestände und Lücken im Validierungsgebiet Schönmünz.

Referenzdaten offene und geschlossene Bestände

Die Referenzdaten für dieses Gebiet stammen von Zielewska-Büttner et al. (2016), die ebenfalls eine Einteilung in offene und geschlossene Bestände anhand der Überschirmung (offen < 60%; geschlossen \geq 60%) vorgenommen haben. Für die Validierung nutzten Zielewska-Büttner et al. (2016) 80 Stichprobenplots (Radius = 25 m) die per stratifizierter Zufallsauswahl zu gleichen Teilen auf die beiden Klassen verteilt wurden. Für jeden der Plots wurde die Überschirmung stereoskopisch unter Zuhilfenahme schematischer Bildbeispiele in 5%-Schritten geschätzt. Basierend auf diesen Daten wurde die vorherige Stratenzugehörigkeit der Plots korrigiert, sodass 38 Plots der Klasse „geschlossener Bestand“ (Überschirmung \geq 60%) und 42 Plots der Klasse „offener Bestand“ (Überschirmung < 60%) zugeordnet wurden (Abb. 18). Diese Klasseneinteilung diente als Referenz für die Validierung.

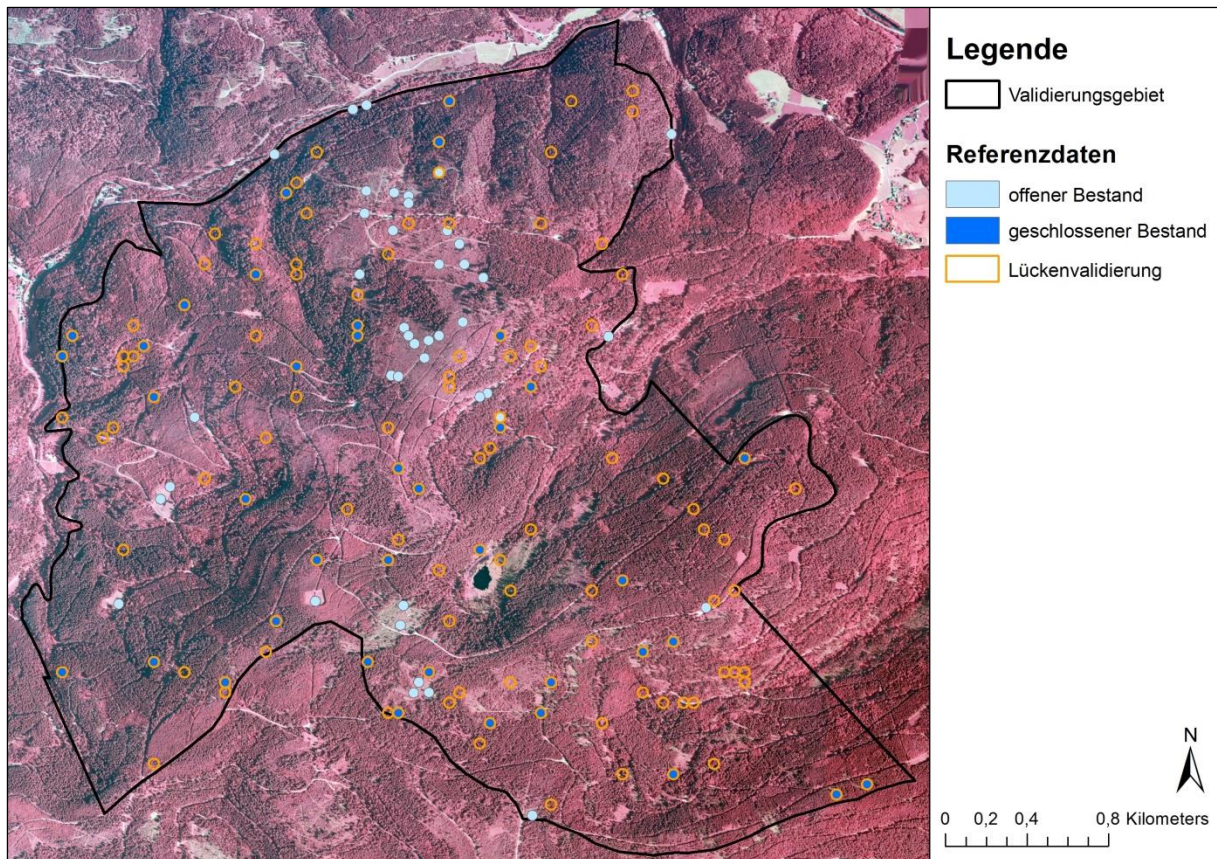


Abb. 18: Verteilung der Referenzdaten für die Klassifizierung in offene und geschlossene Bestände sowie Lücken. CIR-Orthophoto im Hintergrund.

Validierung offene und geschlossenen Bestände

Für die Validierung wurde mittels der Software ArcGIS aus den einzelnen, klassifizierten Rastern (*.tif) (siehe Abschnitt 2.2) ein Mosaik erstellt („Mosaic To New Raster“) und auf das Validierungsgebiet zugeschnitten („Extract by Mask“). Anschließend wurde das Raster in eine Vektordatei konvertiert („Raster To Polygon“). Mit dem Befehl „Dissolve“ wurden alle Polygone zu zwei „multipart“ Polygonen zusammengefasst, wobei die Klasse „Lücke“ in die Klasse „geschlossene Bestände“ aufgelöst wurde (Abb. 19). Die an den Mittelpunkten der Stichprobenplots festgestellte Klasse der automatischen Klassifikation wurde extrahiert und mit der Referenzkartierung verglichen. Daraus wurde, den Vorgaben von Olofsson et al. (2014) folgend, eine Konfusionsmatrix erstellt und es wurden die Nutzer-, Produzenten- und Gesamtgenauigkeit berechnet (Tabelle 8).

Bis auf drei Plots wurden alle Plots korrekt klassifiziert, was zu einer Gesamtgenauigkeit von 97,05% führt. Nutzer- und Produzentengenauigkeiten liegen zwischen 83% und 99%. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den Ergebnissen aus der Validierung mit ALS-Daten (Tabelle 3 und Tabelle 4). Zwei der drei falsch klassifizierten Plots liegen im Grenzbereich zwischen offenem und geschlossenem Bestand. Dies zeigt, dass sich offene und geschlossene Bestände mit der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Methode gut kartieren lassen, dass es jedoch in dem Übergangsbereichen zwischen den Klassen zu Abweichungen kommen kann.

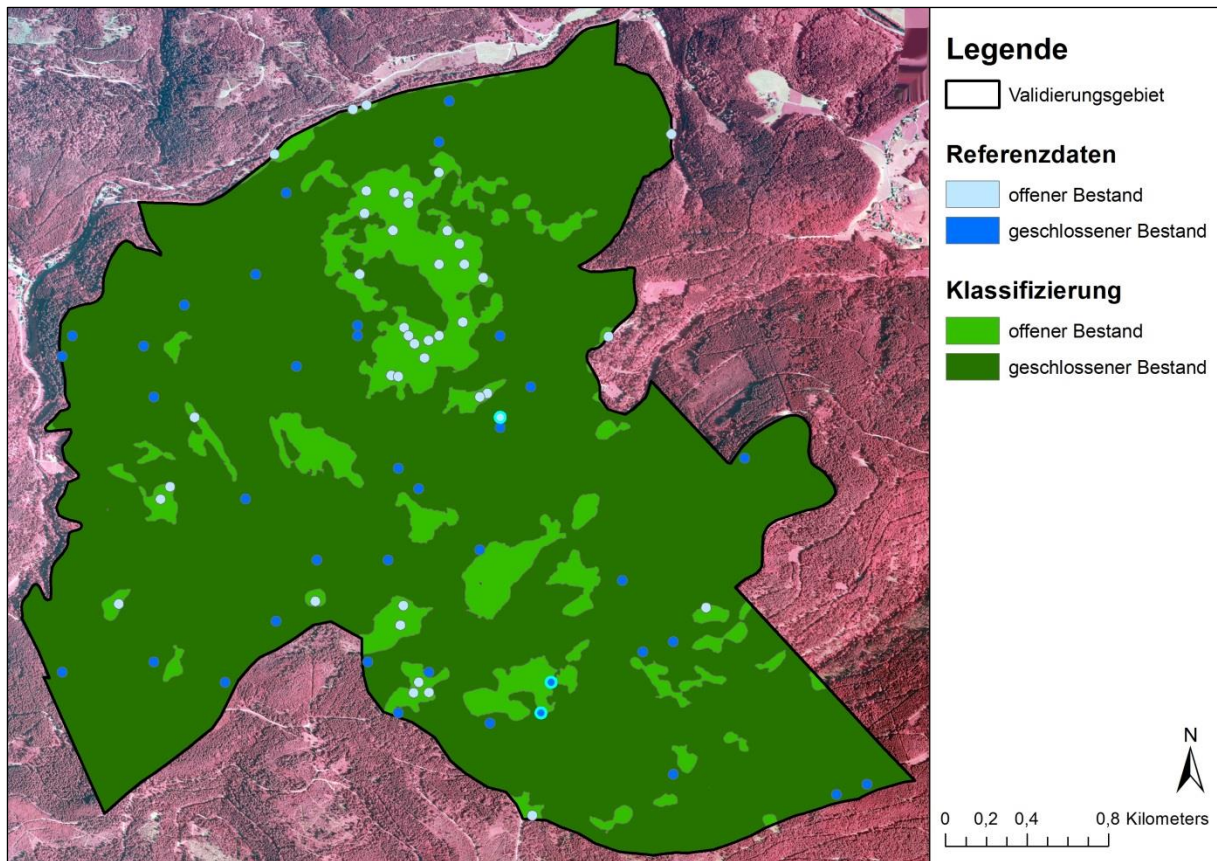


Abb. 19: Validierung der Klassifizierung in offene und geschlossene Bestände. Plots mit Fehlklassifizierung sind hervorgehoben (hellblaue Umrandung).

Tabelle 8: Konfusionsmatrix der Validierung offener und geschlossener Bestände mit Angaben zur Nutzer-, Produzenten- und Gesamtgenauigkeit.

	Klasse	Referenzdaten			<i>Nutzer- genauigkeit</i>
		Offener Bestand	Geschlossener Bestand	Summe	
Automatische Klassifikation	Offener Bestand	11,88% (41 Plots)	0,58% (2 Plots)	12,46% (43 Plots)	95,35%
	Geschlossener Bestand	2,37% (1 Plot)	85,18% (36 Plots)	87,54% (37 Plots)	
	Summe	14,24% (42 Plots)	85,76% (38 Plots)	100% (80 Plots)	<i>Gesamt- genauigkeit</i>
	<i>Produzenten- genauigkeit</i>	83,4%	99,3%	<i>Gesamt- genauigkeit</i>	97,05%

Referenzdaten Lücken

Wie schon für die Validierung der Klassifizierung in offene und geschlossene Bestände, stammen auch die Referenzdaten für die Lückenvalidierung von Zielewska-Büttner et al. (2016). Die Referenzdaten wurden basierend auf 120 zufällig ausgewählten Stichprobenplots (Radius = 25 m) erstellt, die innerhalb der in Zielewska-Büttner et al. (2016) als „geschlossener Bestand“ klassifizierten Fläche (nur hier werden Lücken ausgewiesen) liegen (Abb. 18). Dabei wurden die 38 „geschlossener Bestand“-Plots mit verwendet. Da erwartet wurde, dass die Geländesituation einen Einfluss auf die

Güte der Lückenerkennung hat, wurde das Gebiet in 12 Straten eingeteilt und 10 Plots pro Stratum ausgewählt. Die Straten ergeben sich durch Kombination von Hangneigungs- (0°-10°: „flach“; 10°-20°: „stark geneigt“; >20°: „steil“) und Expositionsklassen (315°-45°: „Nord“; 45°-135°: „Ost“; 135°-225°: „Süd“; 225°-315°: „West“). Innerhalb jeden Plots wurden Lücken mit einer Mindestgröße von 10 m² stereoskopisch erfasst und kartiert. Um auch die Abwesenheit von Lücken validieren zu können, wurden innerhalb der Validierungsplots Kreise mit einer Fläche von 95 m² ausgewiesen („nicht-Lücken Kreise“). Diese Fläche entspricht der mittleren Größe der stereoskopisch erfassten Lücken. Die Anzahl der Kreise entspricht der Anzahl der stereoskopisch erfassten Lücken. Die Kreise wurden zufällig auf die Stichprobenpunkte verteilt. Ein Beispiel der Referenzdaten für die Lückenvalidierung findet sich in Abb. 20.

Vor der Durchführung der Validierung für das F³-Projekt war es nötig die Referenzdaten zu bereinigen, da sie ursprünglich für ein anderes Projekt erstellt worden waren. Dort weicht das Klassifizierungsergebnis für offene und geschlossene Bestände vom Ergebnis aus dem F³-Projekt ab. Deshalb wurden die zufälligen Stichprobenplots auf solche reduziert, die nach der Klassifizierung im F³-Projekt innerhalb der Klasse „geschlossener Bestand“ lagen. Dadurch wurde die Anzahl der Stichprobenplots auf 116 reduziert. Zusätzlich wurden alle nicht-Lücken-Kreise (150 Kreise) der verbliebenen Stichprobenplots visuell im Orthophoto überprüft. Kreise, die eindeutig im Bereich einer Lücke lagen, z. B. auf einem Weg oder im Bereich einer manuell kartierten Lücke, wurden markiert und von der Validierung ausgeschlossen. Insgesamt waren davon 13 Kreise betroffen. Für einige Kreise ergaben sich bei der visuellen Überprüfung Schwierigkeiten, die auf die mäßige Bildqualität (Schlagschatten) zurückzuführen sind. Für alle Kreise wurde daher festgehalten, ob die korrekte Zuordnung zur Klasse „nicht Lücke“ sicher oder unsicher ist.



Abb. 20: Beispiel Referenzdaten für die Lückenvalidierung: Stichprobenplots mit stereoskopisch erfassten Lücken (rot) und nicht-Lücken Kreisen (blau). CIR-Orthophoto im Hintergrund.

Lückenvalidierung

Für die Lückenvalidierung (Beispiel in Abb. 20 und Abb. 21) wurden ebenfalls die aus dem klassifizierten Raster erzeugten Polygone genutzt (siehe oben). Die 116 Stichprobenflächen, in denen die Kar-

tierung der Referenzdaten erfolgte, wurden mit den klassifizierten Polygonen verschnitten und es wurde berechnet, zu welchem Anteil die Referenzpolygone mit der Klasse Lücke überlappen. Die Ergebnisse wurden mit dem Flächenanteil der jeweiligen Klasse („Lücke“ und „keine Lücke“) gewichtet (Olofsson et al., 2014) und es wurde eine Konfusionsmatrix abgeleitet (Tabelle 9). Dabei müssen mindestens 20% einer stereoskopisch kartierten Lücke mit einer automatisch klassifizierten Lücke überlappen, damit die Lücke als erfasst gilt. Im Gegenzug gelten nicht-Lücken-Kreise, die sich weniger als 20% mit der Klasse Lücke überlappen, als korrekt erfasst. Mit der Einführung eines Überlappungsschwellwertes soll eine Verzerrung des Ergebnisses durch kleinflächige Überschneidungen vermieden werden.



Abb. 21: Beispiel Lückenvalidierung: Stichprobenplots mit stereoskopisch erfasster Lücke und nicht-Lücke-Kreisen. Ergebnis der automatischen Klassifizierung im Hintergrund.

Tabelle 9: Konfusionsmatrix der Lückenvalidierung mit Angaben zur Nutzer-, Produzenten- und Gesamtgenauigkeit. Eine Lücke gilt als korrekt erfasst ab einer Überlappung von 20% zwischen Referenzdaten und automatisch klassifizierten Daten.

Klasse	Referenzdaten			Nutzer- genauigkeit
	Lücke	Keine Lücke	Summe	
Lücke (Overlap = 1)	5,68% (35 Flächen)	2,27% (14 Flächen)	7,96% (49 Flächen)	71,43%
Keine Lücke (Overlap = 0)	10,76% (18 Flächen)	81,29% (136 Flächen)	92,04% (154 Flächen)	
Automatische Klassifikation	Summe	83,56% (150 Flächen)	100% (203 Flächen)	Gesamt- genauigkeit
	34,57%	97,28%	Gesamt- genauigkeit	86,97%

Die Gesamtgenauigkeit der Lückenvalidierung (Tabelle 9) beträgt 86,97% mit einer Nutzergenauigkeit der Lückenerkennung von 71,43%. Es werden 14 Lücken automatisch klassifiziert, die tatsächlich aber

nicht vorhanden sind. Die Produzentengenauigkeit für die Lückenerfassung zeigt mit 34,57%, dass nur etwas mehr als ein Drittel der tatsächlich vorhandenen Lücken auch erfasst werden.

Dies deutet auf merkliche Unterschiede in der Lückenabgrenzung zwischen stereoskopischer Bildinterpretation und automatischer Klassifizierung hin. Teilweise kann dies auf Ungenauigkeiten in der Stereomessung zurückgeführt werden. Subjektive Einschätzung sowie eine geringe Anzahl von Stereomodellen und eine ungünstige Aufnahmegeometrie durch die 60% Längs- und 30% Querüberlappung können zu von den tatsächlichen Verhältnissen abweichenden Lückenkartierungen führen. Dies wurde auch bei der visuellen Überprüfung der nicht-Lücken Kreise im Orthophoto deutlich. Wie bereits oben beschrieben lagen im Orthophoto manche Kreise eindeutig im Bereich von Lücken, die allerdings nicht kartiert worden waren.

Zusätzlich beeinflusst die Qualität der Fernerkundungsdaten die Qualität der Lückenerfassung. Von allen 150 nicht-Lücken Kreisen wurden bei der visuellen Überprüfung im Orthophoto 20 Kreise als unsicher markiert. Sechs dieser nicht-Lücken Kreise gehören zu den 14 Kreisen, die fälschlicherweise als Lücken klassifiziert wurden (Tabelle 9). Einige dieser Kreise wurden in der aus dem Image Matching stammenden, ungefilterten Punktwolke in der Software CloudCompare (<https://www.cloudcompare.org/> [letzter Zugriff 19.03.2020]) genauer visuell untersucht. Dabei waren die einzelnen Punkte mit ihren entsprechenden RGB-Farbwerten eingefärbt. Es zeigten sich eindeutige Matchingfehler, z. B. wurden beleuchtete Kronenteile auf dem Boden angezeigt, was zu einer automatisch erfassten Lücke führte. Auch die im Orthophoto auftretenden Artefakte und Bildbereiche, in denen das Bild verschmiert erscheint, deuten auf Matchingfehler hin, die zu einer überhöhten Erfassung von Lücken führen können. Schlagschatten und geringe Überlappung (60% Längs- und 30% Querüberlappung) der Luftbilder fördern das Auftreten von Matchingfehlern. Trotz der vergleichsweise hohen Gesamtgenauigkeit von knapp 87% kann die hier vorgestellte Lückenerkennung Hinweise auf das Vorkommen von nur 35% der Lücken geben, die auch visuell erkennbar sind. Gleichzeitig werden jedoch relativ viele Flächen fälschlicherweise als Lücken klassifiziert. Dies unterstreicht die Bedeutung von qualitativ hochwertigen Fernerkundungsdaten für die Ableitung forstlicher Strukturparameter. Bei Daten, die mit höherer Überlappung (mindestens 80% Längs- und 30% Querüberlappung) und zu Tageszeiten befliegen werden, die große Schlagschatten vermeiden, ist eine bessere Lückenerkennung möglich, wie das Beispiel in Abschnitt 3.2.5 zeigt.

4 Literatur

- McElhinny, C., Gibbons, P., Brack, C., Bauhus, J., 2005. Forest and woodland stand structural complexity: its definition and measurement. *Forest Ecology and Management*, 218: 1-24.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., Wulder, M. A., 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148 (2014): 42-57.
- Parker, G. G., Harmon, M. E., Lefsky, M. A., Chen, J., van Pelt, R., Weiss, S. B., Thomas, S. C., Winner, W. E., Shaw, D. C., Franklin, J. F., 2004. Three-dimensional Structure of an Old-growth *Pseudotsuga-tsuga* Canopy and its Implications for Radiation Balance, Microclimate, and Gas Exchange. *Ecosystems*, 7: 440-453.
- Zielewska-Büttner, K., Adler, P., Ehmann, M., Braunisch, V., 2016. Automated Detection of Forest Gaps in Spruce Dominated Stands Using Canopy Height Models Derived from Stereo Aerial Imagery. *Remote Sensing*, 2016, 8, 175.



Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten

Verbundvorhaben „Entwicklung von Methoden und Verfahren zur flächendeckenden und homogenen Generierung von Waldparametern auf der Basis digitaler Oberflächenmodelle aus Luftbilddaten (F3)“

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)
Wonnhaldestr. 4, 79100 Freiburg

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Förderkennzeichen: 22025014 (FVA), 22024816 (NW-FVA)

Dokumentation zu Meilenstein 5 „Verfahren zur Ableitung von Baumarteninformationen aus Fernerkundungsdaten“



Meilenstein 5

Verfahren zur Ableitung von Baumarteninformationen aus Fernerkundungsdaten

A	Einleitung.....	1
B	Vorprozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten.....	1
B.1	Daten	1
B.2	Benötigte Software.....	4
B.3	Prozessierung	5
B.3.1	Erstellen einer Wolkenmaske (Fmask 4.0)	5
B.3.2	Atmosphärische Korrektur	6
B.3.2.1	Alternative 1: SNAP – Sen2Cor Plugin	6
B.3.2.2	Alternative 2: Sen2Cor als eigenständige Software	8
B.3.3	Resampling der 20 m Bänder auf 10 m Auflösung (DSen2)	9
B.3.4	Topographische Korrektur und Berechnung von Vegetationsindizes (R)	10
C	Ableitung von Baumarteninformationen aus Sentinel-2-Satellitendaten	15
C.1	Referenzdaten	15
C.2	Baumartenerfassung	16
C.3	Validierungsergebnisse aus dem F ³ -Projekt	18
ANHANG	22

A Einleitung

Das Ziel der Baumartenklassifizierung im F³-Projekt ist die Herleitung von Zusatzinformationen für die Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse (siehe hierzu die Dokumentation zu Meilenstein M8 „Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse“¹). Die Baumart beeinflusst Holzvorrat und Biomasse. Als Zusatzinformation in einem Modellierungsprozess sollte eine Baumartenkarte deshalb helfen, die Genauigkeit der Vorhersage zu verbessern. Die mit den nachfolgend beschriebenen Methoden erzeugte Baumartenkarte erreicht eine Genauigkeit, die für den vorgesehenen Zweck im Projekt ausreicht, nicht aber in anderen Bereichen mit höheren Genauigkeitsansprüchen, etwa bei der forstbetrieblichen Inventur. Es sollte immer zuerst geprüft werden ob die entsprechenden Genauigkeitsanforderungen erfüllt werden.

Die Methodenbeschreibung gliedert sich in zwei Teile. In Abschnitt B ist die Vorprozessierung der Sentinel-2-Satellitendaten beschrieben. In Abschnitt C ist die Klassifizierung beschrieben sowie das Ergebnis der Kartenvalidierung dargestellt.

B Vorprozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten

Ziel der hier beschriebenen Vorprozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten ist die Gewinnung einer Datengrundlage, die zur Erstellung von Baumartenkarten genutzt werden kann. Die entwickelten Schritte der Prozessierung wurden daher für die Analyse von Waldflächen optimiert.

Die im Folgenden vorgestellte Prozessierung umfasst das Maskieren von Wolken, Wolkenschatten und Schnee, eine Korrektur atmosphärischer Einflüsse, das Resampling der 20 m-Bänder der Sentinel-2-Satellitendaten auf 10 m Auflösung, eine topographische Korrektur und die Berechnung von Vegetationsindizes.

B.1 Daten

Für das Verfahren werden Sentinel-2 **Level-1C**²-Satellitendaten benötigt. Das heißt, orthorektifizierte aber noch nicht atmosphärisch und topografisch korrigierte Daten. Die Daten können z. B. über den Copernicus Open Access Hub³ kostenfrei bezogen werden. Zum Auffinden der Level-1C-Daten auf dieser Plattform muss in den Suchkriterien der „Mission: Sentinel-2“ im Feld „Product Type“ der Eintrag „S2MSI1C“ ausgewählt werden (Abbildung 1).

¹ M8 – „Verfahren zur Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse“:

https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021].

² Sentinel-2 Level-1C: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> [letzter Zugriff 28.11.2020].

³ Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> [letzter Zugriff 28.11.2020].

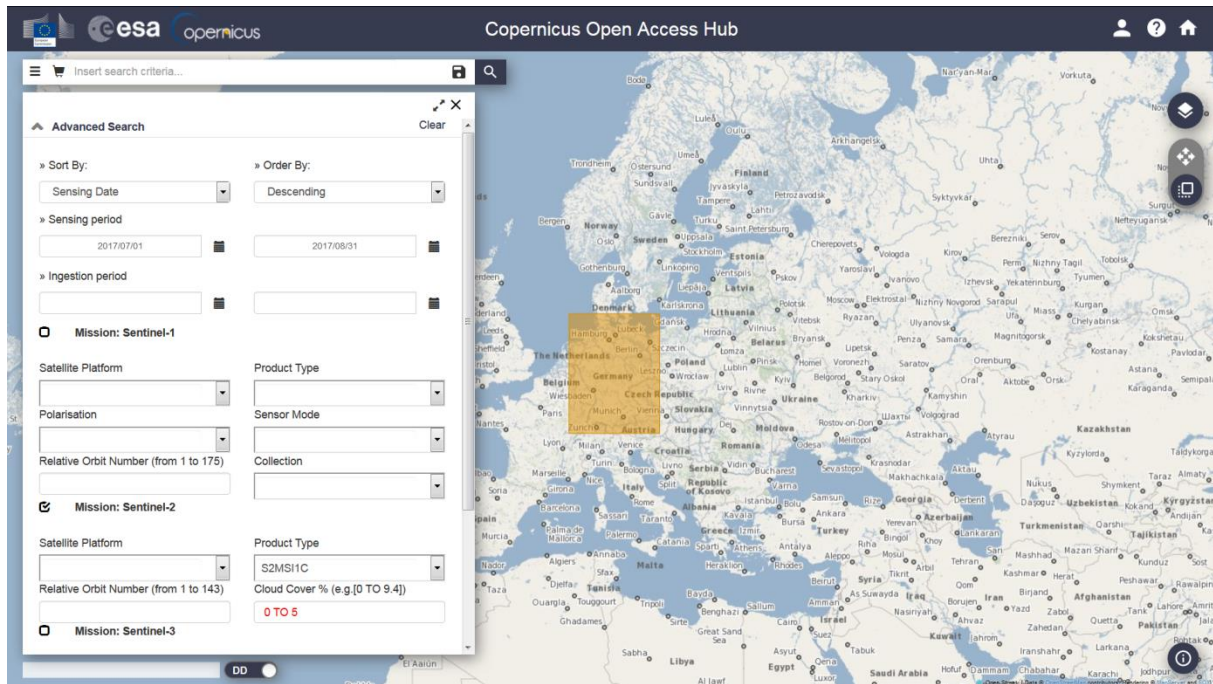


Abbildung 1: Suchmaske für Sentinel-Satellitendaten im Copernicus Open Access Hub. Einstellungen für Sentinel-2 Level-1C (Product Type: S2MS1C) mit Wolkenanteil von 0-5% aufgenommen zwischen 01. Juli und 31. August 2017 im Bereich des auf der Karte selektierten Gebietes.

Die Sentinel-2 Level-1C-Satellitendaten werden in 100 x 100 km Bildkacheln („Granules“) im UTM/WGS84-Koordinatensystem bereitgestellt. Die Granules sind um 5 km gepuffert, sodass bei Auswertungen Randeffekte vermieden werden können. Die Daten werden im Format „SAFE“ (Standard Archive Format for Europe) zur Verfügung gestellt. Diesem Format liegt eine feste Ordnerstruktur zugrunde, in der neben den Satellitendaten auch Metadaten gespeichert sind. Der Dateiname folgt einer einheitlichen Namenskonvention⁴:

MMM_MSIXXX_YYYYMMDDHHMMSS_Nxxyy_ROOO_Txxxxx_<Product Discriminator>.SAFE

- MMM: Missionsidentifikation (S2A/S2B)
- MSIXXX: MSIL1C steht für ein Level-1C-Produkt (MSIL2A stünde für ein Level-2A-Produkt, das hier nicht verwendet wird)
- YYYYMMDDHHMMSS: Datum und Startzeit der Datenaufnahme
- Nxxyy: PDGS Processing Baseline Nummer (z. B. N0204)
- ROOO: Relative Orbitnummer (R001 - R143)
- Txxxxx: Kachelnummer (z. B. T32UMU)
- Product Discriminator: Datums- und Zeitangabe mit 15 Stellen um zwischen verschiedenen Endprodukten der gleichen Datenaufnahme zu unterscheiden (z. B. 20170105T013443)
- SAFE: Produktformat (Standard Archive Format for Europe)

Die Kachelnummer stellt den Bezug zur geografischen Abdeckung der Kachel her. Die weltweite Kacheleinteilung (KML-Format) kann unter folgendem Link heruntergeladen werden: https://sentinel.esa.int/documents/247904/1955685/S2A_OPER_GIP_TILPAR_MPC_20151209T095117_V20150622T000000_21000101T000000_B00.kml [letzter Zugriff 28.11.2020]. Ein auf das

⁴ Sentinel-2 Namenskonvention: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/naming-convention> [letzter Zugriff 02.12.2020].

deutsche Bundesgebiet reduzierter Datensatz wird vom Julius Kühn Institut als „Web Feature Service“ (WFS) angeboten⁵. Dieser Datensatz wird in Abbildung 2 dargestellt.

Die Sentinel-2-Satelliten nehmen Daten in 13 verschiedenen spektralen Bändern mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen (10, 20 und 60 m) auf. Eine Übersicht der Sentinel-2-Bänder und ihrer räumlichen Auflösung ist in Tabelle 1 und Abbildung 3 zu finden.

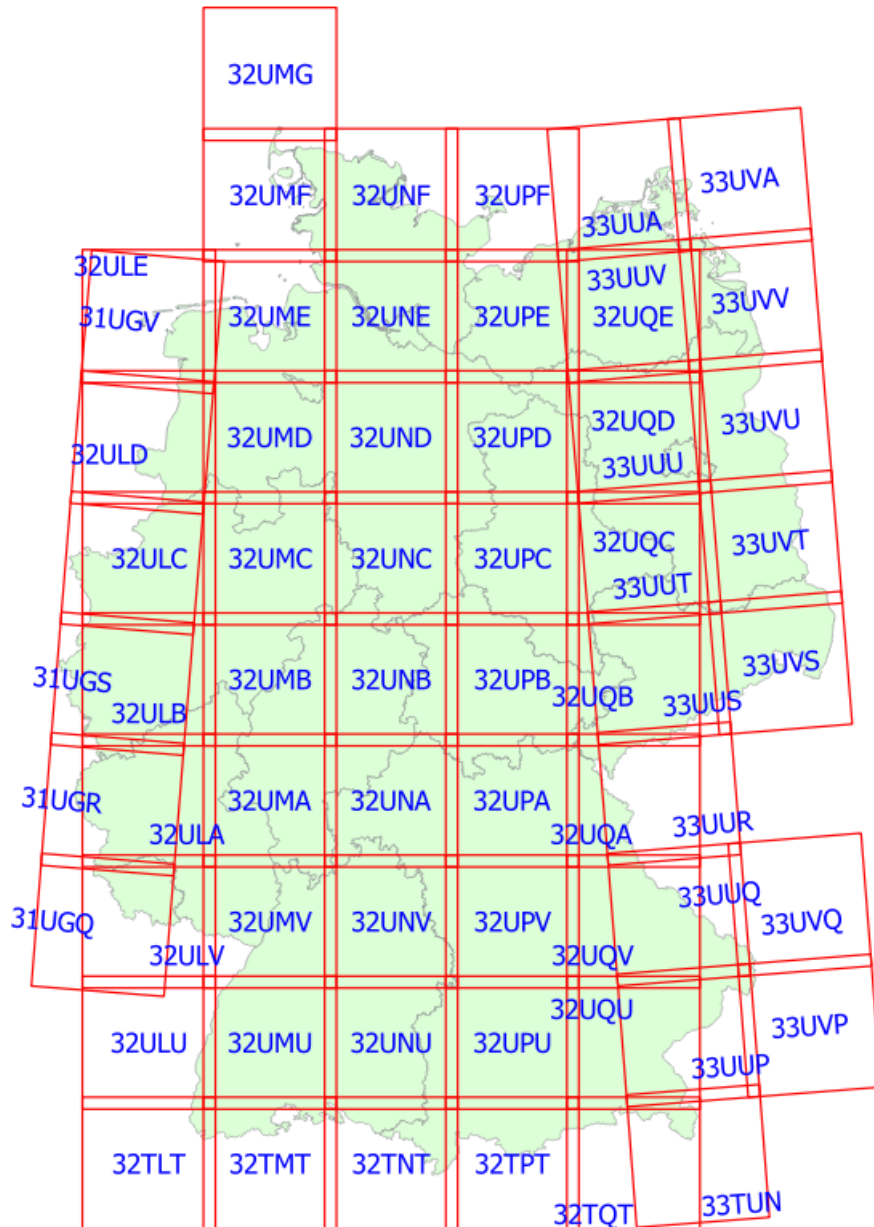


Abbildung 2: Sentinel-2-Kacheln für das Gebiet der BRD (Quelle: <https://ffj.julius-kuehn.de/webdienste/webdienste-des-ffj/sentinel-2-kacheln.html>).

⁵ Sentinel-2-Granule BRD: <https://ffj.julius-kuehn.de/webdienste/webdienste-des-ffj/sentinel-2-kacheln.html> [letzter Zugriff 28.11.2020].

Tabelle 1: Eigenschaften der spektralen Bänder der Sentinel-2-Satellitendaten.

Sentinel-2-Bänder	Mittlere Wellenlänge	Räumliche Auflösung
1 Aerosole	442 nm	60 m
2 Blau	492 nm	10 m
3 Grün	559 nm	10 m
4 Rot	665 nm	10 m
5 Red Edge	704 nm	20 m
6 Red Edge	739 nm	20 m
7 Red Edge	780 nm	20 m
8 NIR	833 nm	10 m
8A Narrow NIR	864 nm	20 m
9 Wasserdampf	943 nm	60 m
10 SWIR–Cirruswolken	1377 nm	60 m
11 SWIR	1610 nm	20 m
12 SWIR	2186 nm	20 m

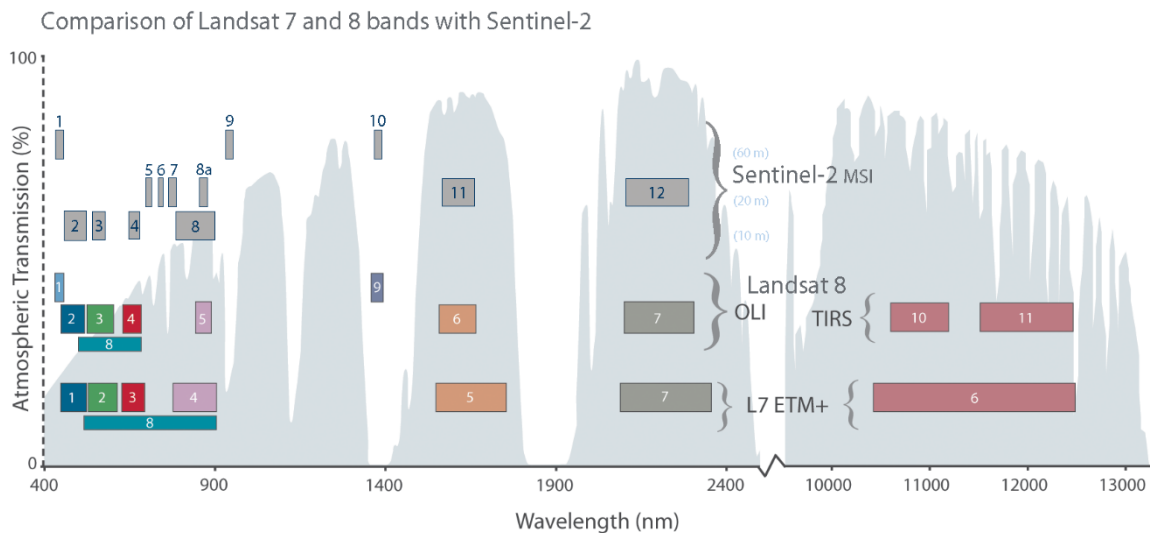


Abbildung 3: Darstellung der spektralen Bänder der Sentinel-2-Satellitendaten im Vergleich zu Landsat-8- und Landsat-7-Satellitendaten (Quelle: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/sentinel-2a-launches-our-compliments-our-complements> [letzter Zugriff 11.01.2021]).

Neben den Sentinel-2-Satellitendaten wird ein digitales Geländemodell (DGM) mit einer Auflösung von 10 m oder höher benötigt, um eine topographische Korrektur der Satellitendaten zu ermöglichen (siehe Abschnitt B.3.4).

B.2 Benötigte Software

Für die Atmosphärenkorrektur von Sentinel-2 Level-1C-Satellitendaten wird die Sentinel Toolbox der Software SNAP sowie das Plugin Sen2Cor verwendet. Alternativ kann Sen2Cor auch als eigenständige Software genutzt werden. Zur Erstellung einer Wolkenmaske wird die Software Fmask 4.0 benötigt. Das Resampling der 20 m-Bänder erfolgt mit dem Python-Skript DSen2. Die topographische Korrektur sowie die Berechnung der Vegetationsindizes werden mit der Statistiksoftware R durchgeführt.

Alle benötigten Programme sind kostenfrei verfügbar und stehen unter folgenden Internetadressen zum Download bereit.

- SNAP (Sentinels Application Platform)
 - <http://step.esa.int/main/download/snap-download/> [letzter Zugriff 11.01.2021]
- Sen2Cor (SNAP Plugin und als eigenständige Software)
 - http://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/sen2cor_v2-8/ [letzter Zugriff 11.01.2021]
- Fmask 4.0
 - <https://github.com/gersl/fmask> [letzter Zugriff 11.01.2021]
- R
 - <https://www.r-project.org/> [letzter Zugriff 11.01.2021]
- DSen2
 - <https://github.com/lanha/DSen2> [letzter Zugriff 11.01.2021]

B.3 Prozessierung

B.3.1 Erstellen einer Wolkenmaske (Fmask 4.0)

Zur Erstellung einer Sentinel-2-Wolkenmaske wird das Programm Fmask 4.0 verwendet. Nach dem Start des Programms müssen lediglich wenige Einstellungen vorgenommen werden (siehe Abbildung 4). Die im F³-Projekt ermittelten Einstellungen resultierten für die meisten Bilder nach visueller Überprüfung in zufriedenstellenden Wolkenmasken. Die Einstellungen wurden so gewählt, dass der Wolkenanteil eher überschätzt wird, also tendenziell mehr Wolken detektiert werden als im Bild vorhanden sind. Dadurch wird verhindert, dass Gebiete mit Wolkeneinfluss später bei der Klassifizierung der Baumarten verwendet werden und Fehlklassifikationen verursachen. Es wird empfohlen, die generierte Wolkenmaske mit der tatsächlichen Verteilung von Wolken im Bild visuell zu vergleichen und die Einstellungen des Programms Fmask anzupassen, sollten die Wolken nicht ausreichend genau erfasst worden sein. Den größten Einfluss auf die Menge erfasster Wolken hat der Wert „Cloud Probability Threshold“. Werden hier höhere Werte eingetragen, detektiert das Programm weniger Wolken, bei niedrigeren Werten steigt die Menge detektierter Wolken an. Auch der Menüpunkt „Result Dilations“ beeinflusst die Größe der ausgewiesenen Wolken- und Wolkenschatten stark. Dieser Wert definiert, wie groß der Buffer sein soll, mit dem die detektierten Wolken umgeben werden. Eine Anpassung dieser Werte kann, je nach Wolkenart, angeraten sein. Wolken, die zu den Rändern hin ausfransen und dünne, semi-transparente Schleier bilden, werden an den Rändern häufig nur unzureichend genau erfasst. Durch die Wahl eines höheren Wertes für den Buffer können die Wolkenränder dennoch in der Wolkenmaske berücksichtigt werden. Dicke und kompakte Wolken, die sich eindeutig abgrenzen lassen, benötigen hingegen nur einen Buffer von geringer Größe. Nachfolgend ist der Arbeitsablauf mit der Software Fmask beschrieben:

- 1.) Öffnen des Programms Fmask 4.0 und Anpassen der folgenden Einstellungen.
- 2.) *Image Path*: Navigieren zum Ordner, der die Sentinel-2 Level-1C-Daten enthält, für die eine Wolkenmaske erstellt werden soll. Das Programm prozessiert alle Sentinel-2-Satellitendaten, die in diesem Ordner enthalten sind.
- 3.) *Cloud Probability Threshold (%)*: Durch Klicken auf den Button „Custom“ wird die Eingabe eines Wertes ermöglicht. Mit dem Schieberegler den Wert auf 5.0 setzen, alternativ kann der Wert mittels Tastatur in das Feld rechts des Reglers eingetragen werden.

- 4.) *Result Dilations (Pixels)*: Die hier eingetragenen Werte geben die Größe des Puffers an, der um detektierte Wolken, Wolkenschatten und Schnee gezeichnet werden soll. Werte für Cloud auf 100, Cloud Shadow auf 100 und Snow auf 3 setzen.
- 5.) *Run*: Nachdem die Einstellungen angepasst wurden, wird mit dem Button „Run“ das Programm gestartet. Die Prozessierungsdauer beträgt in der Regel 5 bis 10 Minuten pro Sentinel-2-Kachel.
- 6.) *Output*: Die generierte Wolkenmaske wird innerhalb der Ordnerstruktur der Sentinel-2-Satellitendaten im Ordner „FMASK_DATA“ als TIFF-Datei gespeichert.

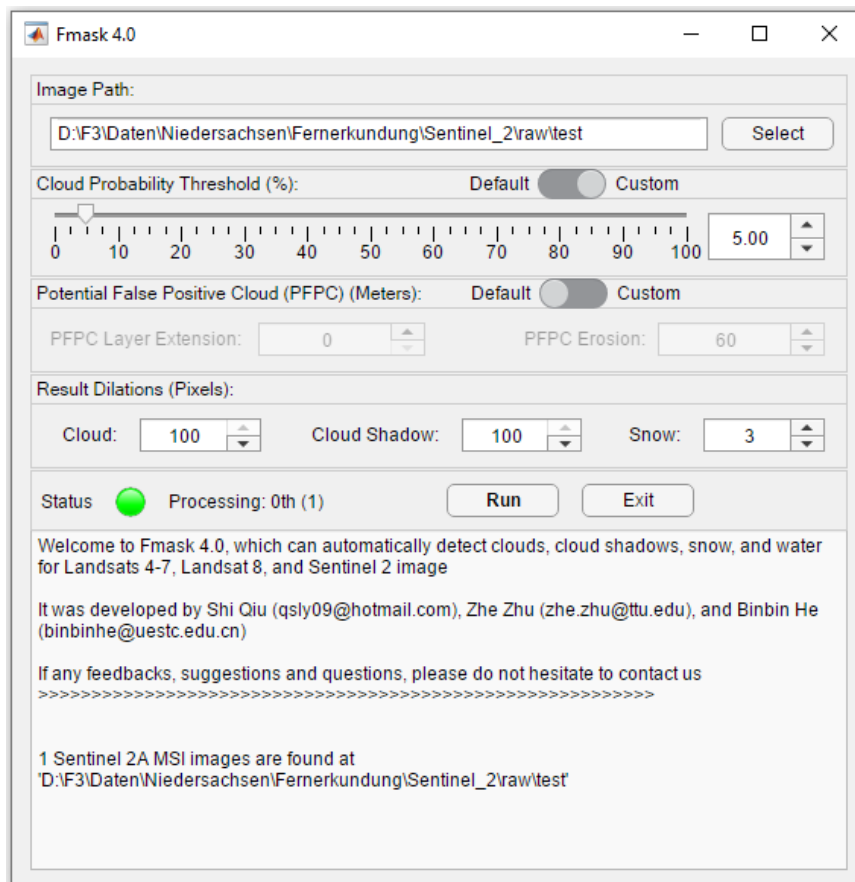


Abbildung 4: GUI des Programms Fmask 4.0 mit den im F³-Projekt genutzten Einstellungen zur Erzeugung einer Sentinel-2-Wolkenmaske.

B.3.2 Atmosphärische Korrektur

Die Software Sen2Cor wird verwendet, um eine Atmosphären- sowie Cirruskorrektur der Sentinel-2-Satellitendaten durchzuführen. Die Korrektur reduziert den Einfluss atmosphärischer Störungen auf die Pixelwerte der Satellitendaten. Sie kann entweder als Plugin über die Software SNAP genutzt oder als eigenständiges Programm über die Kommandozeile ausgeführt werden.

B.3.2.1 Alternative 1: SNAP – Sen2Cor-Plugin

Das Sen2Cor-Plugin für die Software SNAP stellt eine grafische Benutzeroberfläche bereit, in der alle Einstellungen getätigt werden können. Der Vorteil besteht in der dadurch leichteren Handhabung der Software.

- 1.) Öffnen der Sentinel-2 Level-1C-Satellitendaten in der Software SNAP.
- 2.) Öffnen des Plugins Sen2Cor über die Menüpunkte „Optical“ → „Thematic Land Processing“ → „Sen2Cor Processor“ → „Sen2Cor280“ (Abbildung 5).

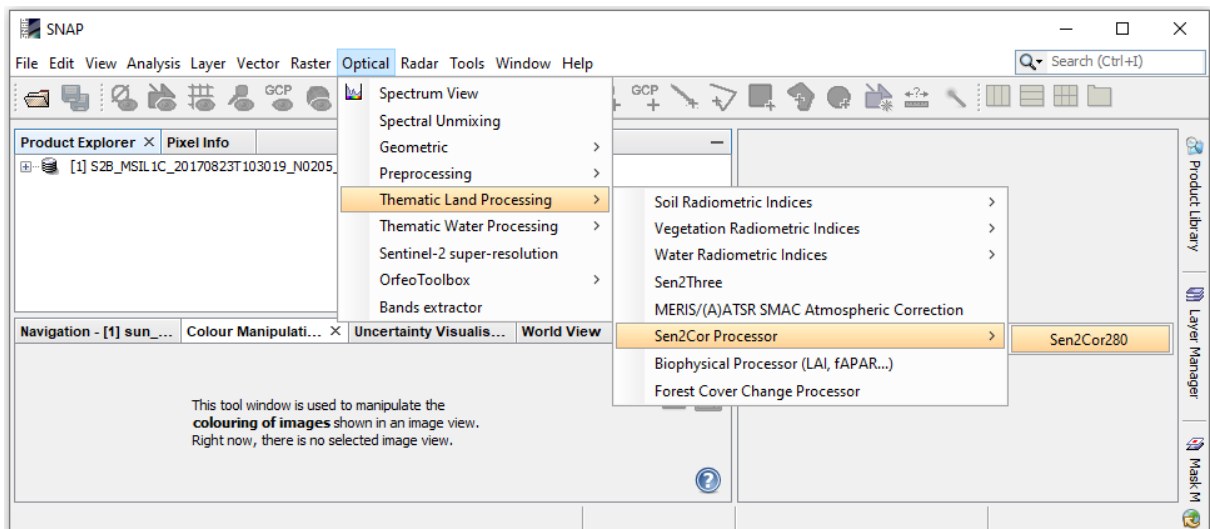


Abbildung 5: Öffnen des Sen2Cor 2.8 Plugins in der Software SNAP.

- 3.) Im geöffneten GUI des Sen2Cor-Plugins die Registerkarte „Processing Parameter“ wählen und die folgenden Einstellungen vornehmen (Abbildung 6):
 - a. Resolution: ALL
 - b. *Nb threads*: Anzahl der Prozessoren des PCs, die für die Prozessierung genutzt werden sollen.
 - c. Cirrus correction: TRUE
 - d. Alle anderen Einstellungen bleiben unverändert.
 - e. Auf „Run“ klicken, um den Prozess zu starten.
 - f. Output: Nach Beendigung der Berechnung befindet sich im Ordner, der auch das verwendete Level-1C-Bild enthält, ein neuer Ordner. Dieser enthält das korrigierte Bild und ist an dem Namensbestandteil „MSIL2A“ zu erkennen.

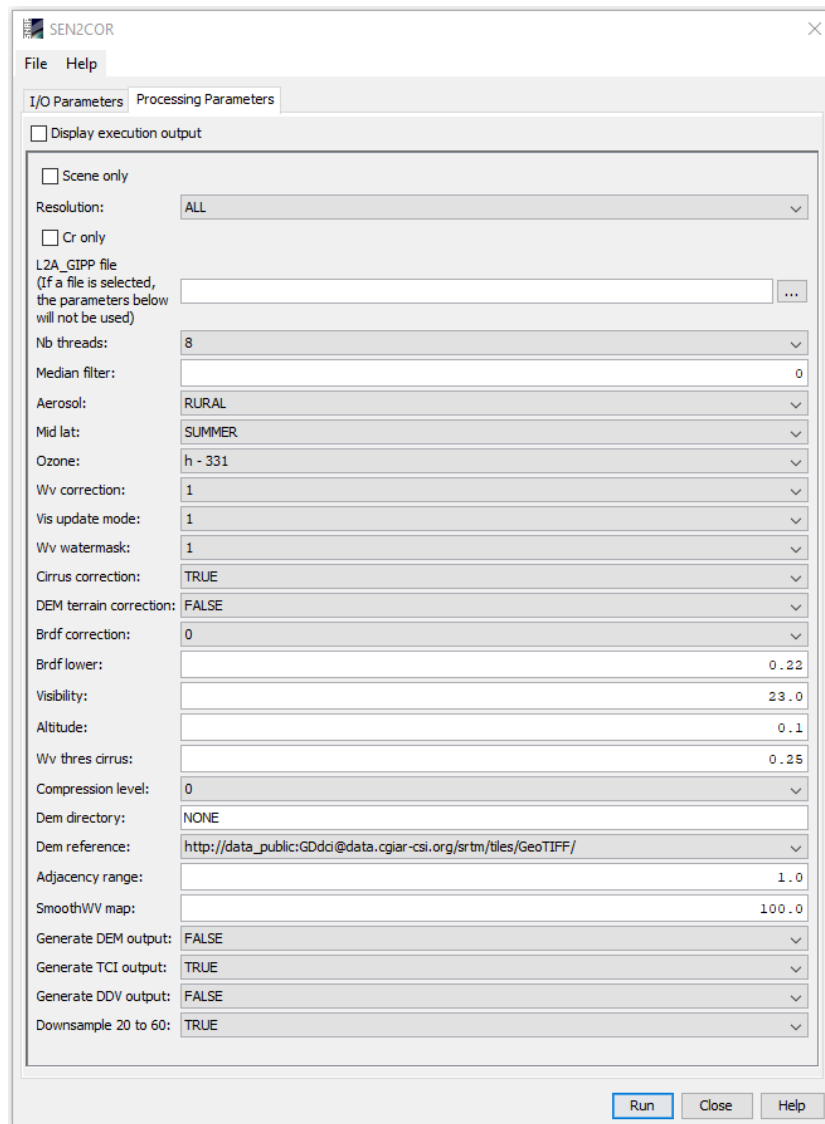


Abbildung 6: GUI des Sen2Cor-Plugins mit den für die atmosphärische Korrektur empfohlenen Einstellungen.

B.3.2.2 Alternative 2: Sen2Cor als eigenständige Software

Bei der Nutzung von Sen2Cor als eigenständige Software muss die Software SNAP nicht installiert werden. Zudem werden alle Einstellungen im XML-Format gespeichert, was eine weitestgehend automatisierte Prozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten ermöglicht. Nachfolgend wird auf die Nutzung von Sen2Cor V2.8 über die Kommandozeile eingegangen:

- 1.) Sen2Cor V2.8 über http://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/sen2cor_v2-8 [letzter Zugriff 11.01.2021] herunterladen und installieren. Bei der Installation wird das Verzeichnis „C:\Users\nutzer.name\Documents\sen2cor\2.8\“ angelegt. Dies ist das \$HOME-Verzeichnis.
- 2.) Im \$HOME-Verzeichnis befindet sich im Ordner „cfg“ die Datei „L2A_GIPP.xml“ mit der durch Anpassung der Inhalte bestimmter XML-Tags verschiedene Nutzungseinstellungen vorgenommen werden können. Die Namen der XML-Tags haben Bezug zu den Parameternamen in Abbildung 6 und die Einstellungen können entsprechend aus dieser Abbildung übernommen werden.

Zum Starten des Prozesses muss in der Kommandozeile zum Installationsverzeichnis von Sen2Cor (hier C:\Sentinel\Sen2Cor-02.08.00-win64) navigiert werden. Dort wird folgende Eingabe gemacht und anschließend die Prozessierung gestartet:

```
L2Aprocess.bat
S:\Pfad\Eingabe\S2A_MSIL1C_20190619T103031_N0207_R108_T32UMU_20190
619T141311.SAFE --resolution 10 --output_dir S:\Pfad\Ausgabeordner
```

Wenn die Auflösung („resolution“), wie hier, auf 10 m gesetzt ist, werden auch die 20 m-Bänder automatisch mitprozessiert. Andere Einstellmöglichkeiten für „resolution“ sind „20“ und „60“. Die GIPP-Datei, wird automatisch gefunden, weshalb es unbedingt nötig ist, dass diese im vorgegebenen Ordner unter C:\Users\nutzer.name\Documents\sen2cor\2.8\cfg\ (siehe oben) verbleibt. Auch der Name darf nicht geändert werden.

Die Ergebnisse aus Sen2Cor werden in einer festgelegten Dateistruktur gespeichert. Dabei wird jedes einzelne Band in einer separaten Datei (*.jp2) abgelegt. Die ursprünglichen 10 m-Bänder (B02 (Blau), B03 (Grün), B04 (Rot), B08 (nahes Infrarot)) werden nach der Korrektur in einer Auflösung von 10 m sowie 20 m abgelegt. Die 20 m-Bänder (B05, B06, B07, B8A, B11, B12) behalten ihre Auflösung bei.

B.3.3 Resampling der 20 m-Bänder auf 10 m-Auflösung (DSen2)

Sentinel-2-Satellitendaten beinhalten 13 Spektralbänder, die in unterschiedlichen Auflösungen aufgezeichnet wurden. Mit Hilfe des DSen2 Python-Skripts werden die in 20 m-Auflösung vorliegenden Bänder auf eine Auflösung von 10 m hochskaliert. Hierbei werden die 20 m-Pixel mittels eines *Deep Neural Networks* unter Zuhilfenahme der 10 m-Bänder spektral entmischt. Details der angewendeten Methode können hier nachgelesen werden:

<https://arxiv.org/pdf/1803.04271.pdf>⁶ [letzter Zugriff 11.01.2021]

<https://github.com/lanha/DSen2> [letzter Zugriff 11.01.2021]

- 1.) Das Skript ist derzeit nur für die Prozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten verfügbar, die in der Ordnerstruktur der Level-1C vorliegen. Aus diesem Grunde müssen die im vorherigen Schritt erstellten Level-2A-Daten in den ursprünglichen Level-1C-Ordner kopiert werden. Hierzu wird in den „IMG_DATA“ Ordner der Level-1C-Daten navigiert und es werden alle dort vorhandenen Dateien gelöscht (Level-1C-Ordnerpfad: z. B. D:\F3\S2B_MSIL1C_20170823T103019_N0205_R108_T32UND_20170823T103018.SAFE\GRANULE\L1C_T32UND_A002422_20170823T103018\IMG_DATA)
- 2.) Im Ordner „IMG_DATA“ der Level-2A-Daten befinden sich drei Ordner mit den Bezeichnungen „R10m“, „R20m“ und „R60m“.
 - a. Den Ordner „R10m“ öffnen und die .jp2-Dateien der Bänder B02, B03, B04 und B08 in den Ordner „IMG_DATA“ des Level-1C-Produkts kopieren.
 - b. Den Ordner „R20m“ öffnen und die .jp2-Dateien der Bänder B05, B06, B07, B08A, B11 und B12 in den Ordner „IMG_DATA“ des Level-1C-Produkts kopieren.
 - c. Aus allen Dateinamen im Level-1C-Ordner die Zeichenfolgen „_10m“ bzw. „_20m“ entfernen, sodass die Dateinamen wieder der ursprünglichen Level-1C-Namensgebung entsprechen, z. B. T32UNC_20170823T103019_B02_10m.jp2 → T32UNC_20170823T103019_B02.jp2

⁶ Lanaras, C., Bioucas-Dias, J., Galliani, S., Baltasvias, E., Schindler, K., 2018. Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 146, pp. 305–319.

- 3.) Das Python-Skript DSen2 wird über die Kommandozeile des Rechners mit folgendem Befehl gestartet:

```
python.exe /pfad/zu/s2_tiles_supres.py /pfad/zu/input_file.SAFE
/MTD_MSIL1C.xml /pfad/zu/output_file.tif --copy_original_bands
```

Beispiel:

```
python.exe "C:/Users/pbeckschaefer/Documents/DSen2-
master/testing/s2_tiles_supres.py"
"D:/F3/S2B_MSIL1C_20170823T103019_N0205_R108_T32UNC_20170823T103018.S
AFE/MTD_MSIL1C.xml"
"D:/F3/S2B_MSIL1C_20170823T103019_N0205_R108_T32UNC_20170823T103018_D
Sen2.tif" --copy_original_bands
```

B.3.4 Topographische Korrektur und Berechnung von Vegetationsindizes (R)

Um Beleuchtungsunterschiede innerhalb einer Sentinel-2-Szene auszugleichen, die durch die Topographie des Geländes bedingt sind, wird eine topographische Korrektur durchgeführt. Hierzu wird das R-Skript „**S2_topocorr.R**“ verwendet, das auf die R-Pakete *raster*⁷, *RStoolbox*⁸ und *plotKML*⁹ zugreift. Im Anschluss an die topographische Korrektur berechnet das Skript 16 Vegetationsindizes.

Das Skript ist in drei Teile gegliedert: (1) Vorbereitung des digitalen Geländemodells, (2) topographische Korrektur und (3) Berechnung von Vegetationsindizes.

Bevor das Skript gestartet werden kann, müssen im Skript folgende Angaben gemacht werden:

- (a) **Zeile 38:** Pfad zum Arbeitsverzeichnis (Working Directory)
- (b) **Zeile 41:** Pfad zum digitalen Geländemodell (DGM5 oder DGM10)
- (c) **Zeile 46:** Pfad zur Sentinel-2-Szene. Achtung: Der Pfad ist ohne die Dateierdung .tif anzugeben.
- (d) **Zeile 49:** Pfad zur Wolkenmaske (erzeugt mit Fmask 4.0).
- (e) **Zeile 52 und 53:** *Sun Zenith* und *Sun Azimuth* der Sentinel-2-Szene. Die Werte können in der Software SNAP abgelesen werden (siehe unten).
- (f) **Zeile 59:** Sollen Vegetationsindizes berechnet werden?
 - i. Ja: setzen Sie den Wert auf TRUE (Default).
 - ii. Nein: setzen Sie den Wert auf FALSE.
- (g) **Zeile 64:** Soll eine NDVI-basierte Vegetationsmaske erstellt werden, um nicht-Vegetationsflächen zu maskieren und von der Prozessierung auszuschließen?
 - i. Ja: setzen sie den Wert auf TRUE (Default).
 - ii. Nein: setzen Sie den Wert auf FALSE.
- (h) **Zeile 67:** Sind die Pixelwerte der Sentinel-2-Szene zwischen 0 und 1 skaliert?
 - i. Ja: setzen sie den Wert auf TRUE.
 - ii. Nein: setzen Sie den Wert auf FALSE (Default).
- (i) **Zeile 75:** Wurde die Sentinel-2-Szene mit der Software DSen2 prozessiert?
 - i. Ja: setzen sie den Wert auf TRUE (Default).
 - ii. Nein: setzen Sie den Wert auf FALSE.

⁷ R-Paket *raster*: <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/> [letzter Zugriff 02.12.2020].

⁸ R-Paket *RStoolbox*: <https://bleutner.github.io/RStoolbox/> [letzter Zugriff 02.12.2020].

⁹ R-Paket *plotKML*: <https://CRAN.R-project.org/package=plotKML> [letzter Zugriff 02.12.2020].

Nachdem diese Angaben gemacht wurden, kann das komplette Skript gestartet werden ohne weitere Änderungen am Code vorzunehmen.

Nach Abschluss der Prozessierung mit dem R-Skript liegen die spektralen Bänder der Sentinel-2-Satellitendaten in folgender Reihenfolge vor:

- (1) Blue (492.4 nm)
- (2) Green (559.8 nm)
- (3) Red (664.6 nm)
- (4) Red Edge 1 (704.1 nm)
- (5) Red Edge 2 (740.5 nm)
- (6) Red Edge 3 (782.8 nm)
- (7) Near Infrared (832.8 nm)
- (8) Narrow Near Infrared (864.7 nm)
- (9) Short Wave Infrared 1 (1613.7 nm)
- (10) Short Wave Infrared 2 (2202.4 nm)

1. Teil I – Vorbereitung des digitalen Geländemodells (DGM)

Teil I dient dazu, das DGM für die topographische Korrektur vorzubereiten. Hierfür wird das DGM auf die Ausdehnung der Sentinel-2-Kachel zugeschnitten und an die 10 m-Auflösung der Sentinel-2-Satellitendaten angepasst (Resampling). Es wird empfohlen, das so prozessierte DGM zu speichern und für künftige Prozessierungen desselben Geländeausschnitts vorzuhalten. Künftige Prozessierungen können dann unmittelbar mit Teil II des Skripts begonnen werden.

2. Teil II – Topographische Korrektur

Teil II des Skripts maskiert die Wolken- und Wolkenschattenflächen der Sentinel-2-Szene aus und führt die topographische Korrektur der Sentinel-2-Satellitendaten mit einer modifizierten Variante der Minnaert Funktion durch. Die Modifikation reduziert den Korrekturfaktor k der Minnaertgleichung (siehe Formel 5 in Riaño et. al 2003¹⁰) um 40%. Dies verhindert, dass es zu Überkorrekturereffekten kommt, die dazu führen, dass dunkle Bildbereiche zu stark aufgehellt werden. Die Korrektur wird stratifiziert nach Hangneigungsklassen durchgeführt. Um die Stratifikation des Bildes in Hangneigungsklassen durchzuführen, wird Code des R-Paket *RStoolbox*⁸ verwendet. Für jedes Stratum wird ein eigener Korrekturfaktor k berechnet.

Die korrekten Werte für Sun Zenith und Azimuth einer jeden Sentinel-2-Szene sind in den Sentinel-2-Satellitendaten als Bänder hinterlegt, die in SNAP geöffnet werden können. Hierzu öffnen Sie die entsprechende Sentinel-2-Szene in SNAP und navigieren in den Unterordner Bands → Sun. Durch Doppelklick auf den Eintrag sun_zenith öffnet sich im unteren linken Fenster des SNAP GUI ein Diagramm, auf dessen x-Achse Minimum, Mittelwert und Maximum der in der Szene ermittelten sun_zenith Werte angegeben sind (Abbildung 7). Lesen Sie den Mittelwert ab und übertragen Sie ihn in das Skript (Zeile 52). Den Mittelwert für den sun_azimuth ermitteln Sie anschließend auf die gleiche Weise und tragen ihn in Zeile 53 des Skripts ein. Alternativ können beide Werte auch aus der innerhalb des SAFE-Verzeichnisses abgelegten Datei „MTD_TL.xml“ (z. B. ..\S2A_MSIL1C_20170619T103021_N0205_R108_T32UNA_20170619T103021.SAFE\GRANULE\L1C_T

¹⁰ Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Aguado, I., 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(5): 1056 – 1061.

32UNA_A010401_20170619T103021\MTD_TL.xml) ausgelesen werden. Innerhalb des XML-Tags <Mean_Sun_Angle> geben die XML-Tags <ZENITH_ANGLE> und <AZIMUTH_ANGLE> die entsprechenden Werte an.

Ein Beispiel der Auswirkungen der topographischen Korrektur ist in Abbildung 8 zu sehen.

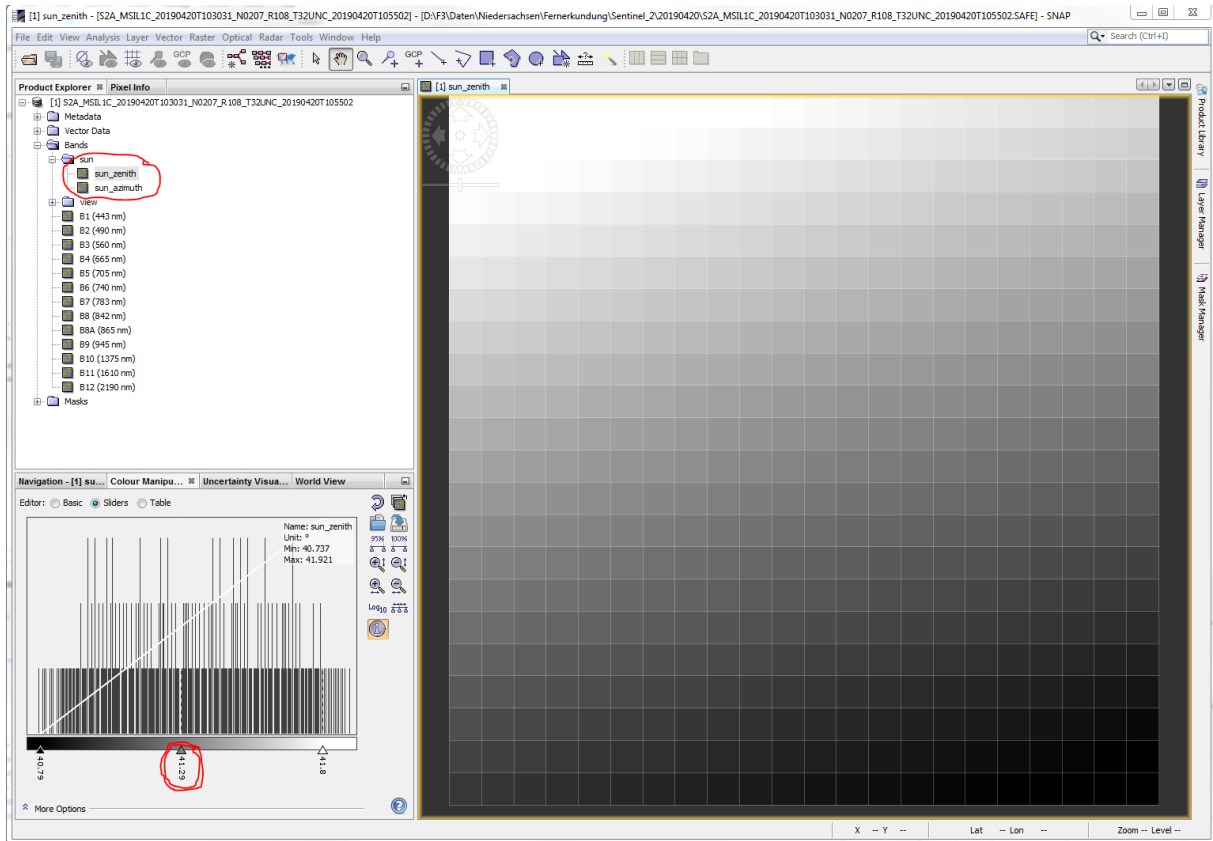


Abbildung 7: Screenshot des SNAP GUI. Rot umrandet ist der Ordner, der die Bänder sun_zenith und sun_azimuth enthält (oben links). Außerdem ist der Mittelwert des sun_zenith, der in das R-Skript übertragen werden muss, rot umrandet (unten links).

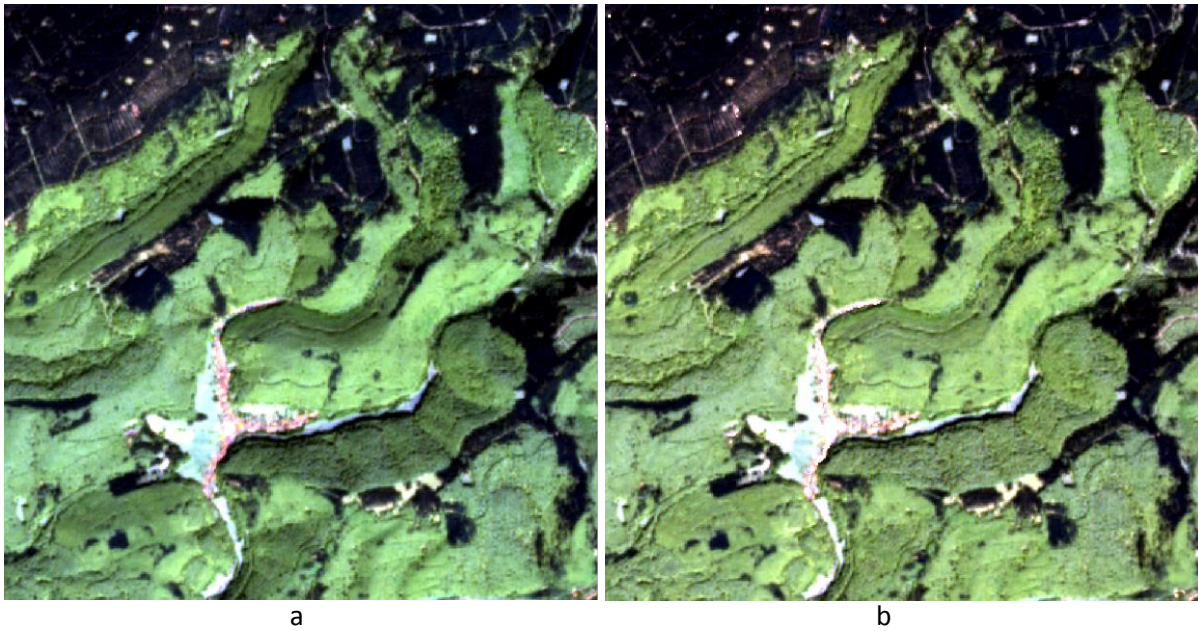


Abbildung 8: Ausschnitt aus Sentinel-2-Kompositbild (Bänder SWIR2, SWIR1, RedEdge1) vor (a) und nach (b) topographischer Korrektur.

3. Teil III – Berechnung von Vegetationsindizes

Im Anschluss an die topographische Korrektur berechnet das Skript 16 Vegetationsindizes und speichert diese in zwei TIFF-Dateien mit der Endung „VI1.tif“ bzw. „VI2.tif“.

Die Datei mit der Endung VI1.tif enthält Indizes, die ausschließlich unter Verwendung der Sentinel-2-Bänder, die ursprünglich mit einer Auflösung von 10 m aufgezeichnet wurden (Blue, Green, Red und Near Infrared (NIR)), berechnet wurden:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
 - $(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) * 10000$
- GLI (Green Leaf Index)
 - $((2 * \text{Green} - \text{Red} - \text{Blue}) / (2 * \text{Green} + \text{Red} + \text{Blue})) * 10000$
- PBI (Plant Biochemical Index)
 - $\text{NIR} / \text{Green} * 10000$
- NGRDI (Normalized Green Red Difference Index)
 - $(\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red}) * 10000$
- CVI (Chlorophyll Vegetation Index)
 - $\text{NIR} * (\text{Red} / \text{Green}^2) * 10000$
- GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)
 - $(\text{NIR} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green}) * 10000$
- BNDVI (Blue Normalized Difference Vegetation Index)
 - $(\text{NIR} - \text{Blue}) / (\text{NIR} + \text{Blue}) * 10000$



Die Datei mit der Endung VI2.tif enthält Indizes, für deren Berechnung auch Bänder verwendet wurden, die ursprünglich mit 20 m-Auflösung aufgezeichnet wurden.

- MCARI (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index)
 - $((\text{Red Edge 1} - \text{Red}) - (\text{Red Edge 1} - \text{Green})) * (\text{Red Edge 1} / \text{Red})$
- MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)
 - $(\text{Green} - \text{SWIR2}) / (\text{Green} + \text{SWIR2}) * 10000$
- MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index)
 - $(\text{Red Edge 2} - \text{Red Edge 1}) / (\text{Red Edge 1} - \text{Red}) * 1000$
- NDREI1 (Normalized Difference Red Edge Index 1)
 - $(\text{Red Edge 2} - \text{Red Edge 1}) / (\text{Red Edge 2} + \text{Red Edge 1}) * 10000$
- NDREI2 (Normalized Difference Red Edge Index 2)
 - $(\text{Red Edge 3} - \text{Red Edge 1}) / (\text{Red Edge 3} + \text{Red Edge 1}) * 10000$
- SLAVI (Specific Leaf Area Vegetation Index)
 - $\text{NIR} / (\text{Red} + \text{SWIR 2}) * 1000$
- NDWI1 (Normalized Difference Water Index 1)
 - $(\text{NIR} - \text{SWIR 1}) / (\text{NIR} + \text{SWIR 1}) * 10000$
- NDWI2 (Normalized Difference Water Index 2)
 - $(\text{NIR} - \text{SWIR 2}) / (\text{NIR} + \text{SWIR 2}) * 10000$
- IRECI (Inverted Red Edge Chlorophyll Index)
 - $(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{Red Edge 1} / \text{Red Edge 2}) * 1000$

C Ableitung von Baumarteninformationen aus Sentinel-2-Satellitendaten

Zur Erstellung einer Karte, die das Vorkommen von Baumarten bzw. Baumartengruppen zeigt, existieren verschiedene geeignete Methoden. Im Folgenden beschreiben wir ein Verfahren, das im Rahmen des Projektes F³ erprobt wurde und sich für die Ziele des Projektes F³ bewährt hat. Datengrundlage sind (a) Sentinel-2-Satellitendaten, die wie in Abschnitt A beschrieben, aufbereitet wurden und (b) Referenzdaten, die das Vorkommen von Baumarten bzw. Baumartengruppen räumlich verorten. Das hier beschriebene Verfahren ist im R-Skript *F3-Baumarten_Sentinel2.R*¹¹ implementiert, welches folgende Schritte durchführt:

- Einlesen der Sentinel-2-Satellitendaten
- Einlesen der Referenzdaten
- Verschneiden der Sentinel-2-Satellitendaten und der Referenzdaten zur Extraktion der Sentinel-2-Pixelwerte
- Trainieren eines Random Forest-Klassifikators
- Erstellen einer Baumarten- bzw. Baumartengruppenkarte
- Erstellen einer Genauigkeitsmatrix und Berechnung der Kartengenauigkeiten

Aufgrund der Verwendung eines Random Forest-Modells, das problemlos weitere Datensätze bei der Modellierung berücksichtigen kann, ist das Verfahren flexibel erweiterbar. Sollten den Nutzenden weitere Datensätze zur Verfügung stehen, die das Potential haben die Baumartendifferenzierung zu verbessern (z. B. Vegetationshöhenmodelle als Indikator für das Baumalter), können auch diese Datensätze in das Verfahren integriert und für die Modellierung verwendet werden.

C.1 Referenzdaten

Als Quelle für Referenzdaten kommen Datensätze in Frage, die das räumliche Vorkommen von Baumarten abbilden. Bei der Auswahl der Referenzdaten sollte darauf geachtet werden, dass die Daten (a) alle zu erfassenden Baumarten abdecken und (b) für jede Baumart eine ausreichend große Menge an Datenpunkten enthalten. Des Weiteren müssen (c) alle Datenpunkte reine Klassen darstellen, also keine Mischklassen enthalten, und (d) sollten Aufnahmezeitpunkt der Referenzdaten und Aufnahmezeitpunkt der Satellitendaten nicht zu weit auseinanderliegen. Im Idealfall handelt es sich bei den Referenzdaten um Daten von terrestrischen Erhebungen, welche auch aus Stichprobeninventuren abgeleitet werden können. Zur Nutzung des hier beschriebenen Verfahrens und insbesondere zur Durchführung der Quantifizierung der Kartengenauigkeit ist es wichtig, dass die Referenzdatenpunkte unabhängig voneinander ausgewählt wurden und jeder Datenpunkt einem einzelnen Pixel der Sentinel-2-Satellitendaten zugeordnet werden kann. Werden pro Datenpunkt mehrere Pixel ausgewählt, resultieren die hier implementierten Berechnungen der Kartengenauigkeiten in falschen Ergebnissen!

Im Rahmen des Projekts F³ wurden Forsteinrichtungsdaten (Bestandes- und Betriebsinventuren) der Landesforstbetriebe als Referenzdaten verwendet.

Exemplarisch soll kurz erläutert werden, wie die Daten der Betriebsinventur der Niedersächsischen Landesforsten für die Klassifikation aufbereitet wurden. Für die niedersächsischen Projektgebiete in

¹¹ R-Skript *F3-Baumarten_Sentinel2.R*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021].

Heide, Solling und Harz wurden Daten der Betriebsinventur aus den Jahren 2015 (Heide), 2012 (Harz) und 2011 (Solling) genutzt. An den Stichprobenpunkten der Betriebsinventur erfolgt die Aufnahme konzentrischer Probekreise mit einem Durchmesser von (a) 26 m für Bäumen mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) > 30 cm und einem Durchmesser von (b) 12 m für die Aufnahme von Bäumen mit einem BHD \geq 7 cm und einem BHD \leq 30 cm. Um möglichst baumartenreine Probekreise zu identifizieren, wurde für jeden Probepunkt ermittelt, welche Baumart den nach Grundfläche gewichteten größten Anteil stellt. Probeflächen auf denen eine Baumart mehr als 75% der Grundfläche repräsentiert, wurden als Referenzdaten für die Baumartenklassifikation ausgewählt.

Neben den Daten der Betriebsinventur können auch Bestandesdaten der Forsteinrichtung als Referenzdaten genutzt werden. Dies wurde für die Klassifikation der Baumarten in Baden-Württemberg zusätzlich getan. Hier wurden alle Reinbestände der Zielbaumarten ausgewählt und mit einem Abstand von 20 m zu Bestandesgrenzen und Infrastruktur abgeschnitten, um die Überschneidung mit anderen Beständen, Straßen und Waldwegen auszuschließen. Für jeden Mittelpunkt eines Sentinel-2-Pixels, der in eines der verbleibenden Polygone fällt, wurde eine Punktgeometrie erstellt. Die Polygone (und die dazugehörigen Punkte) wurden in Trainings- und Testpolygone unterteilt. Hierdurch konnte eine geographische Abhängigkeit zwischen Trainings- und Testpixeln vermieden werden.

C.2 Baumartenerfassung

Benötigte Daten

Das R-Skript `„Baumarten_Sentinel2_F3.R“`⁴¹ erstellt eine Baumartenkarte und eine Genauigkeitsmatrix, auf dessen Grundlage die Genauigkeiten der Karte berechnet werden. Um das Skript zu nutzen, werden folgende Eingangsdaten benötigt:

- (a) Sentinel-2-Satellitendaten (aufbereitet nach dem Verfahren zur Vorprozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten, siehe Abschnitt A).
- (b) Referenzdaten: Punkt-Shapefile der Referenzdatenpunkte, z. B. Mittelpunktkoordinaten von Inventurstichprobenpunkten. Die Attributtabelle der Referenzdaten darf nur die Spalten (1) ID und (2) Baumart enthalten.
- (c) Waldmaske im Rasterformat, um Nicht-Waldflächen zu maskieren. Die Waldmaske muss die Werte 1 = Wald und NA = Nicht-Wald enthalten. Falls Auflösung und/oder Lage der Pixel der Waldmaske nicht mit der Sentinel-2-Kachel übereinstimmen, wird die Waldmaske durch ein Nearest Neighbor Resampling an die Sentinel-2-Daten angepasst.

Vorbereitung des R-Skripts

Bevor das Skript `„Baumarten_Sentinel2_F3.R“` gestartet werden kann, müssen die folgenden Angaben gemacht werden:

- (a) **Zeile 42:** Pfad zum Arbeitsverzeichnis (Working Directory). In diesem Ordner werden die Ausgabedateien (Baumartenkarte und Genauigkeitsmatrix) gespeichert.
- (b) **Zeile 45:** Anzahl der Prozessoren, die für die Berechnung genutzt werden soll.

- (c) **Zeile 48:** Ausdehnung des Gebiets, für das eine Baumartenkarte erstellt werden und auf das sich die Kartenvalidierung beziehen soll. Die Gebietsausdehnung ist über die Angabe der Koordinaten Xmin, Xmax, Ymin und Ymax zu spezifizieren.
- (d) **Zeile 51:** Pfad zur Waldmaske (Raster).
- (e) **Zeile 54:** Pfad zu den Referenzdaten (Shape-Datei).
- (f) **Zeile 57:** Name der Attributtabellenspalte mit der Baumarteninformation
- (g) **Zeile 60:** Pfad zu den Sentinel-2-Satellitendaten (nach Vorprozessierung).
- (h) **Zeile 63:** Name der Ausgabedatei (Baumartenkarte). Neben der Baumartenkarte mit 10 m-Auflösung wird unter dem gleichen Namen die auf 20 m generalisierte Variante der Baumartenkarte gespeichert (Namenszusatz „_20m.tif“). Die Ergebnisse der Kartenvalidierung werden als CSV-Datei ebenfalls mit dem hier spezifizierten Namen exportiert (Namenszusatz „_accuracy.csv“).

Ausgabedateien

Die Ausgabe des Skripts besteht aus drei Dateien, die im in Zeile 42 angegebenen Verzeichnis abgelegt werden. Dies sind (a) die Baumartenkarte mit 10 m-Auflösung, (b) die Baumartenkarte mit 20 m-Auflösung und (c) die Tabelle mit den Ergebnissen der Validierung.

- (a) Die Baumartenkarte mit 10 m-Auflösung enthält die mit Random Forest modellierten Baumarten.
- (b) Die Baumartenkarte mit 20 m-Auflösung wurde durch ein Resampling der Baumartenkarte mit 10 m-Auflösung erstellt. D. h. die Auflösung wurde um den Faktor 2 vergrößert, wobei die jeweils häufigste Baumart pro 20 m-Pixel übernommen wurde. Sollten mehrere Baumarten gleich häufig vorkommen, wird per Zufallszahl entschieden, welche Baumart ausgewählt wird.
- (c) Die Ergebnisse der Validierung umfassen zwei Konfusionsmatrizen sowie die daraus abgeleiteten Kennwerte der Kartengenauigkeit (vgl. Tabelle 2). Die erste Matrix enthält die Anzahl der korrekt bzw. falsch klassifizierten Pixel (siehe Tabellen 1 & 3 in Olofsson et al. 2013¹²). Die Matrix wird durch eine im Zuge des Modelltrainings durchgeführte Kreuzvalidierung des Random Forest-Modells erstellt. Zur Erstellung der zweiten Matrix (Tabellen 2 & 4 in Olofsson et al. 2013¹²) wurden die Einträge der ersten Matrix mit den Flächenanteilen der Baumarten in der Karte gewichtet. Durch die Gewichtung erfolgt die Berechnung der Genauigkeiten entsprechend der kartierten Flächenanteile und nicht gewichtet nach der Verteilung der Referenzdatenpunkte auf die verschiedenen Baumarten. Die Tabelle enthält die im Folgenden aufgeführten Spalten (für eine detaillierte Beschreibung der Berechnung siehe Olofsson et al. 2014¹³):
 - a. **maparea:** [ha] Kartierte Fläche je Baumart in Hektar.

¹² Olofsson, P., Foody, G.M., Stehman, S.V., Woodcock, C.E., 2013. Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. Remote Sensing of Environment, Vol. 129: 122 – 131.

¹³ Olofsson, P., Foody, G.M., Herold, M., Stehman, S.V., Woodcock, C.E., Wulder, M.A., 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. Remote Sensing of Environment, Vol. 148: 42 – 57.

- b. **prop_maparea:** [%] Prozentualer Anteil je Baumart an der kartierten Waldfläche.
- c. **adj_proparea:** [%] Mittels der Genauigkeitsmatrix korrigierter Anteil je Baumart an der kartierten Waldfläche.
- d. **CI_adj_proparea:** [%] Konfidenzintervall des mittels der Genauigkeitsmatrix korrigierten Anteils je Baumart an der kartierten Waldfläche (adj_proparea).
- e. **adj_area:** [ha] Mittels der Genauigkeitsmatrix korrigierte Fläche je Baumart.
- f. **CI_adj_area:** [ha] Konfidenzintervall der mittels der Genauigkeitsmatrix korrigierten Fläche je Baumart an der kartierten Waldfläche (adj_area).
- g. **UA:** [%] Nutzergenauigkeit.
- h. **CI_UA:** [%] Konfidenzintervall der Nutzergenauigkeit.
- i. **PA:** [%] Produzentengenauigkeit.
- j. **CI_PA:** [%] Konfidenzintervall der Produzentengenauigkeit.
- k. **OA:** [%] Gesamtgenauigkeit.
- l. **CI_OA:** [%] Konfidenzintervall der Gesamtgenauigkeit.

C.3 Validierungsergebnisse aus dem F³-Projekt

Das Ziel der Baumartenklassifizierung im F³-Projekt ist die Herleitung zusätzlicher Eingangsdaten für die Verbesserung der Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse (siehe auch Dokumentation zu Meilenstein M8 „Verfahren zur Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse“¹). Die Genauigkeit der Baumartenklassifizierung ist zum einen von der Qualität der Satellitendaten abhängig, zum anderen aber auch stark von Qualität und Quantität der verfügbaren Referenzdaten beeinflusst. Die im Folgenden dargestellten Validierungsergebnisse der Baumartenklassifikation der Untersuchungsgebiete des F³-Projektes können daher nur als illustrierende Beispiele dienen. Mit anderen Satellitendaten und anderen Referenzdaten durchgeführte Klassifikationen können höhere, aber auch niedrigere Genauigkeiten erreichen. Dies wird auch daran deutlich, dass die Baumartenkarten der F³-Untersuchungsgebiete keine einheitliche Genauigkeit aufweisen, sondern die Gesamtgenauigkeiten zwischen 57,1% (Baden-Württemberg) und 86% (Harz) schwanken. Auch Produzenten und Nutzergenauigkeiten der einzelnen Baumarten variieren mitunter stark von Gebiet zu Gebiet.

Tabelle 2 bis Tabelle 3 zeigen die Validierungsergebnisse der Baumartenklassifikation der niedersächsischen Projektgebiete in Heide, Solling und Harz (die zugehörigen Karten finden Sie im Anhang). Hier wurden jeweils die Baumarten Eiche (EI), Buche (BU), Fichte (FI), Douglasie (DGL), Kiefer (KI) und Lärche (LAE) klassifiziert. Die Validierung ergab Gesamtgenauigkeiten von 74,1% (Heide, Tabelle 2), 76,7% (Solling, Tabelle 3) und 85,8% (Harz, Tabelle 4). In Solling und Harz erreichen nur Buche und Fichte Produzentengenauigkeiten über 80%, die Produzentengenauigkeiten der anderen Baumarten liegen unter 50%. In der Heide werden nur Eiche (Produzentengenauigkeit 69,8%) und Kiefer (Produzentengenauigkeit 91,4%) gut erfasst. Die Produzentengenauigkeiten der anderen Baumarten liegen bei knapp über 50% (Douglasie) oder darunter.



Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten – Meilenstein 5

Tabelle 2: Validierungsergebnis zur Baumartenkartierung im Untersuchungsgebiet Heide. In den vorangestellten Konfusionsmatrizen entsprechen die Spalten den Referenzdaten und die Zeilen der Klassifikation.

	EI	BU	FI	DGL	KI	LAE		EI	BU	FI	DGL	KI	LAE	maparea	prop_maparea	adj_proparea	Cl_adj_proparea	adj_area	Cl_adj_area	UA	Cl_UA	PA	Cl_PA	OA	Cl_OA
EI	23	4	3	0	3	1	EI	3,6	0,6	0,5	0	0,5	0,2	758,65	5,3	5,1	1,4	73644,357	208,071	67,6	16	69,8	16,8	74,1	4,4
BU	2	10	0	1	4	0	BU	0,3	1,5	0	0,1	0,6	0	356,1	2,5	3,5	1,5	50540,245	216,793	58,8	24,1	41,4	19,1		
FI	2	0	27	3	18	1	FI	0,5	0	6,4	0,7	4,3	0,2	1753,69	12,1	15,9	3,4	229597,113	498,107	52,9	13,8	40,6	10		
DGL	1	0	4	20	1	1	DGL	0,2	0	0,7	3,6	0,2	0,2	700,9	4,9	6,8	2	98192,476	288,567	74,1	16,8	52,7	15,2		
KI	2	4	27	8	198	12	KI	0,6	1,2	8	2,4	58,6	3,6	10727,31	74,3	64,1	4,2	925608,487	601,633	78,9	5,1	91,4	2,6		
LAE	0	1	1	0	0	2	LAE	0	0,2	0,2	0	0	0,5	143,42	1	4,6	2,1	66424,322	310,043	50	56,6	10,7	11,9		

Tabelle 3: Validierungsergebnis zur Baumartenkartierung im Untersuchungsgebiet Solling. In den vorangestellten Konfusionsmatrizen entsprechen die Spalten den Referenzdaten und die Zeilen der Klassifikation.

	EI	BU	FI	DGL	KI	LAE		EI	BU	FI	DGL	KI	LAE	maparea	prop_maparea	adj_proparea	Cl_adj_proparea	adj_area	Cl_adj_area	UA	Cl_UA	PA	Cl_PA	OA	Cl_OA
EI	133	44	18	4	2	14	EI	3,2	1,1	0,4	0,1	0	0,3	2237,31	5,2	7,9	0,7	337345,879	301,934	61,9	6,5	41,2	4,1	76,9	1,2
BU	162	1543	250	10	4	137	BU	3,9	37,5	6,1	0,2	0,1	3,3	21868,88	51,2	41,3	1,1	1763593,013	463,084	73,3	1,9	90,8	1,1		
FI	37	162	2299	62	33	129	FI	0,6	2,5	35,5	1	0,5	2	17957,92	42,1	42,3	0,9	1806295,023	402,497	84,5	1,4	83,9	1,5		
DGL	0	0	3	7	0	0	DGL	0	0	0	0,1	0	0	67,06	0,2	1,4	0,3	59782,814	129,269	70	29,9	7,7	3,4		
KI	0	0	0	0	0	1	KI	0	0	0	0	0	0	14,41	0	0,8	0,2	34161,608	100,757	0	NA	0	0		
LAE	5	10	11	1	6	21	LAE	0,1	0,2	0,3	0	0,1	0,5	556,43	1,3	6,2	0,7	264752,462	290,589	38,9	13,1	8,2	2,7		

Tabelle 4: Validierungsergebnis zur Baumartenkartierung im Untersuchungsgebiet Harz. In den vorangestellten Konfusionsmatrizen entsprechen die Spalten den Referenzdaten und die Zeilen der Klassifikation.

	EI	BU	FI	DGL	KI	LAE		EI	BU	FI	DGL	KI	LAE	maparea	prop_maparea	adj_proparea	Cl_adj_proparea	adj_area	Cl_adj_area	UA	Cl_UA	PA	Cl_PA	OA	Cl_OA
EI	41	9	10	0	1	2	EI	1,2	0,3	0,3	0	0	0,1	1274,32	1,9	3,1	0,5	208980,3	307,555	65,1	11,9	39,2	6,6	85,8	1
BU	56	869	176	12	3	52	BU	1,3	20,9	4,2	0,3	0,1	1,3	18934,17	28,1	24,5	0,9	1651618,5	582,941	74,4	2,5	85,3	1,8		
FI	30	181	3434	57	14	59	FI	0,6	3,3	63,4	1,1	0,3	1,1	47019,81	69,7	68	0,9	4584084	593,211	91	0,9	93,2	0,8		
DGL	0	0	2	7	0	0	DGL	0	0	0,1	0,2	0	0	169,86	0,3	1,5	0,3	101119,5	218,774	77,8	28,8	12,7	4,9		
KI	0	0	0	0	0	0	KI	0	0	0	0	0	0	4,05	0	0,4	0,2	26965,2	113,624	NA	NA	0	0		
LAE	1	0	1	0	0	0	LAE	0	0	0	0	0	0	10,79	0	2,4	0,4	161791,2	296,509	0	0	0	0		

In Baden-Württemberg wurden landesweite Baumartenreferenzdaten verwendet, welche, wie oben beschrieben, auf den Stichprobenplots der Betriebsinventuren und Forsteinrichtungspolygonen basieren. Die Stichprobenpunkte wurden zusätzlich anhand der Vegetationshöhenmodelle automatisiert gefiltert und dabei Punkte mit Vegetation niedriger als 7 m aus dem Datensatz entfernt. Im Rahmen einer Masterarbeit (Költzow 2020¹⁴) wurde nach den oben beschriebenen Methoden eine landesweite Baumartenkarte erzeugt. Die Validierungsergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt. Zusätzlich zu den in den niedersächsischen Projektgebieten klassifizierten Baumarten, wurden in Baden-Württemberg auch die Baumarten Tanne (TA) und Roteiche (REI) sowie die Klasse sonstige Laubbäume (SLb) klassifiziert. Dies war durch die regional größere Bedeutung der Baumart Tanne und der spektralen Besonderheit der Roteiche bedingt. Im Rahmen der Masterarbeit wurde der Einfluss unterschiedlicher Sampleproportionen untersucht. Die in Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse basieren auf einem balancierten Referenzdatensatz mit je 100 Datenpunkten pro Baumart für die Validierung und 1000 Punkten pro Baumart für das Trainieren des Modells.

Mit dem landesweiten Ansatz wurde eine Gesamtgenauigkeit von 57,1% erzielt (Konfusionsmatrix in Tabelle 5). Die höchste Nutzergenauigkeit erreicht die Baumart Kiefer (83,3%), gefolgt von der Roteiche (79,5%). Die Baumartengruppe der sonstigen Laubbäume weist die insgesamt geringste Genauigkeit auf. Dies ist durch die hohe Varianz innerhalb dieser Klasse zu erklären, die mehrere verschiedene Baumarten verschiedener Spektralsignaturen umfasst. Die beiden Nadelbaumarten Douglasie und Kiefer werden oft fälschlicherweise als Fichten klassifiziert.

Diese Klassifizierung wurde für die gesamte Waldfläche Baden-Württembergs entwickelt und bildet somit eine sehr große Variabilität von Bestandessituationen ab. Hier zeigt sich besonders, dass für eine gute Qualität der Baumartenkarte sehr gute Trainingsdaten notwendig sind, welche die gesamte Variabilität der Baumartenvorkommen abbilden. Wird eine große Fläche klassifiziert, so beeinflusst neben der Anzahl und Güte der Trainingsdaten auch die Qualität der gewählten Satellitenszenen das Ergebnis der Klassifikation.

Die Validierung fand nur an Reinbeständen statt. Deshalb ist, über die hier angegebene Gesamtgenauigkeit der berechneten räumlich expliziten Baumartenkarte hinaus, zu beachten, dass die Genauigkeit im Bereich von Mischbeständen reduziert sein kann. Mischbestände führen auf der Ebene der Sentinel-2-Satellitendaten zu Mischpixeln, welche verschiedene Baumarten umfassen und deren Klassifikation eine große Herausforderung darstellt.

¹⁴ Jonathan Költzow: Tree Species Classification using Random Forest and Sentinel-2 Multispectral Satellite Imagery. MSc-Arbeit, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde 2020.

Tabelle 5: Validierungsergebnis zur Baumartenkartierung in Baden-Württemberg. In den vorangestellten Konfusionsmatrizen entsprechen die Spalten den Referenzdaten und die Zeilen der Klassifikation.

	TA	BU	LAE	SLB	FI	KI	DGL	EI	REI		TA	BU	LAE	SLB	FI	KI	DGL	EI	REI
TA	91	3	18	9	3	1	8	3	1	TA	8,8	0,3	1,7	0,9	0,3	0,1	0,8	0,3	0,1
BU	0	86	13	28	3	1	8	22	2	BU	0	17,3	2,6	5,6	0,6	0,2	1,6	4,4	0,4
LAE	0	1	50	12	0	5	2	2	0	LAE	0	0,1	5	1,2	0	0,5	0,2	0,2	0
SLB	0	1	3	10	0	1	2	0	4	SLB	0	0,2	0,6	1,9	0	0,2	0,4	0	0,7
FI	0	1	11	8	92	45	33	0	0	FI	0	0,2	1,8	1,3	14,7	7,2	5,3	0	0
KI	0	3	0	2	0	40	1	2	0	KI	0	0,2	0	0,1	0	2,5	0,1	0,1	0
DGL	4	0	0	1	2	5	39	0	0	DGL	0,2	0	0	0	0,1	0,2	1,9	0	0
EI	4	3	5	12	0	2	5	69	0	EI	0,2	0,1	0,2	0,6	0	0,1	0,2	3,4	0
REI	0	2	0	18	0	0	2	2	93	REI	0	0	0	0,3	0	0	0	0	1,6

	maparea	prop_maparea	adj_proparea	CI_adj_proparea	adj_area	CI_adj_area	UA	CI_UA	PA	CI_PA	OA	CI_OA
TA	198584,8	13,3	9,2	1,1	13725968	16256,2	66,4	7,9	95,7	2,8	57,1	3,7
BU	489691,2	32,8	18,4	2,6	27451937	38955,09	52,8	7,7	94	3,5		
LAE	107835,8	7,2	11,9	2,1	17754242	31532,67	69,4	10,7	42	7,9		
SLB	58184,04	3,9	11,9	2,4	17754242	36462,45	47,6	21,9	15,6	6,7		
FI	451969,9	30,3	15,7	2,3	23423663	34169,02	48,4	7,1	93,7	4,7		
KI	45177,31	3	11	2	16411484	30000,18	83,3	10,7	22,9	4,7		
DGL	36879,75	2,5	10,5	2,1	15665507	32069,87	76,5	11,8	18,1	4,3		
EI	74496,89	5	8,5	1,8	12681601	27531,02	69	9,1	40,4	9,1		
REI	29133,48	2	2,8	0,9	4177469	13484,76	79,5	7,3	55,5	17,9		

ANHANG

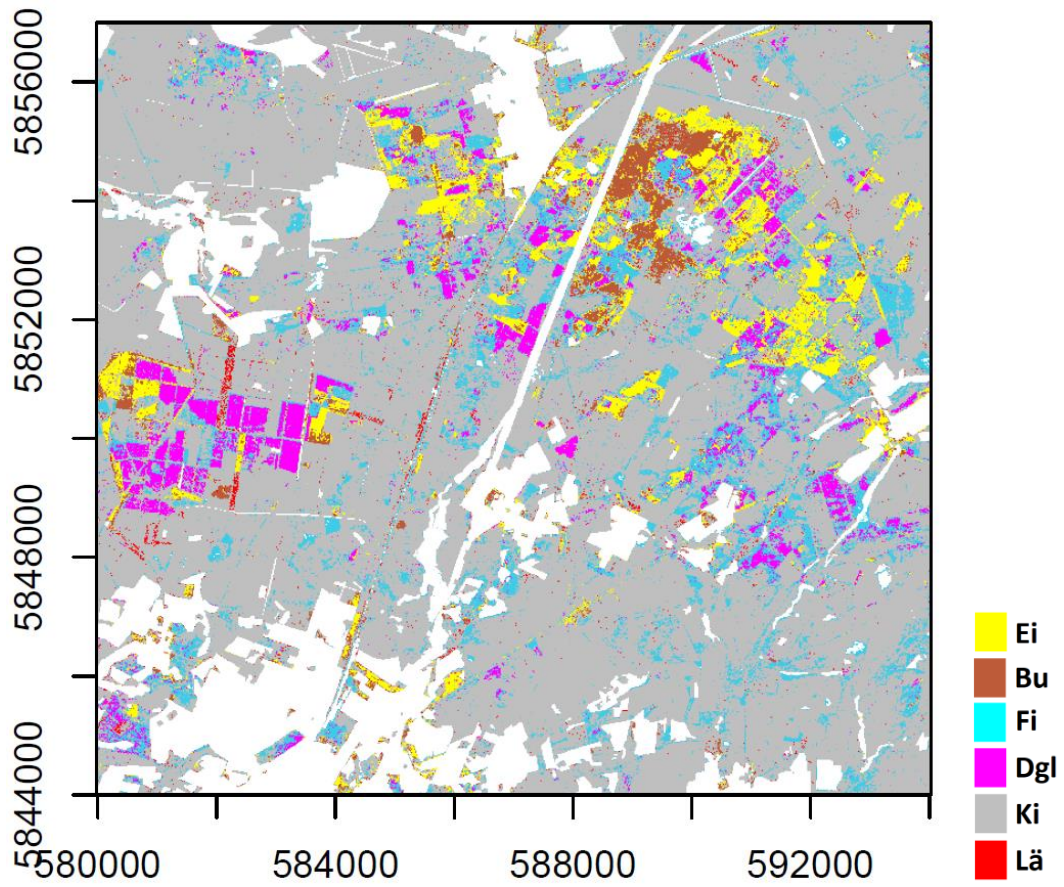


Abbildung 9: Klassifikation von Baumarten im Untersuchungsgebiet Heide. Die zugehörigen Validierungsergebnisse befinden sich in Tabelle 2.



Abbildung 10: Ausschnittsvergrößerung aus Abbildung 9. Schwarze Linien kennzeichnen die Bestandesabgrenzungen der Forsteinrichtung.

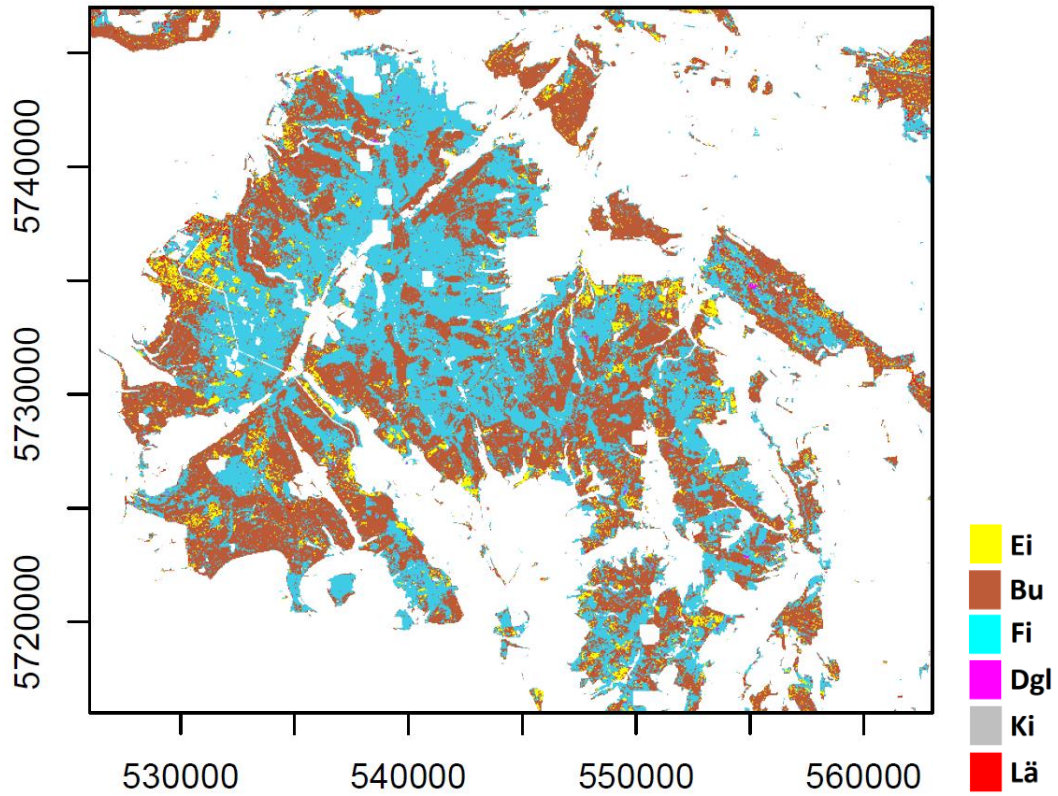


Abbildung 11: Klassifikation von Baumarten im Untersuchungsgebiet Solling. Die zugehörigen Validierungsergebnisse befinden sich in Tabelle 3.



Abbildung 12: Ausschnittsvergrößerung aus Abbildung 11. Schwarze Linien kennzeichnen die Bestandesabgrenzungen der Forsteinrichtung.

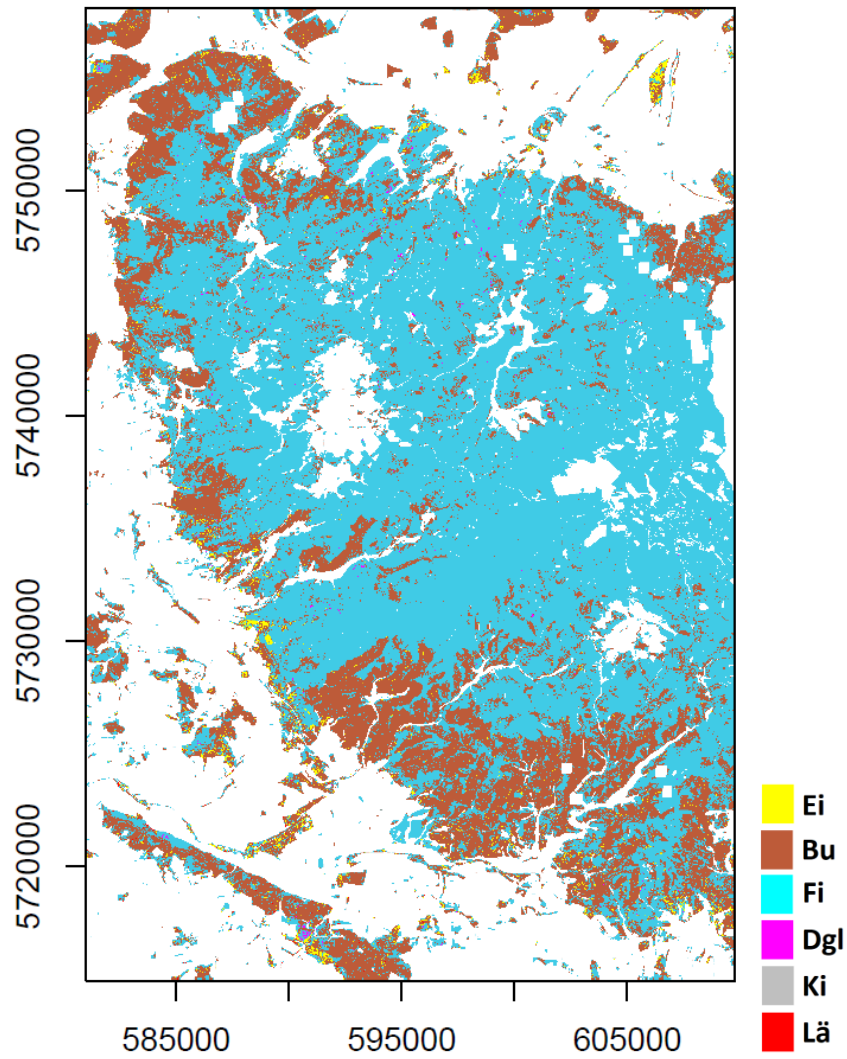


Abbildung 13: Klassifikation von Baumarten im Untersuchungsgebiet Heide. Die zugehörigen Validierungsergebnisse befinden sich in Tabelle 4.

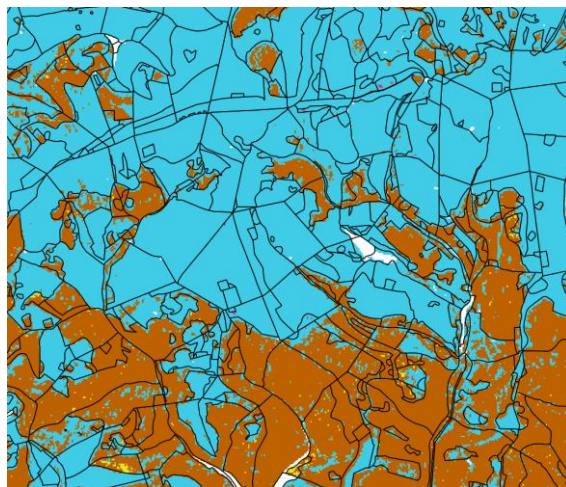


Abbildung 14: Ausschnittsvergrößerung aus Abbildung 13. Schwarze Linien kennzeichnen die Bestandesabgrenzungen der Forsteinrichtung.

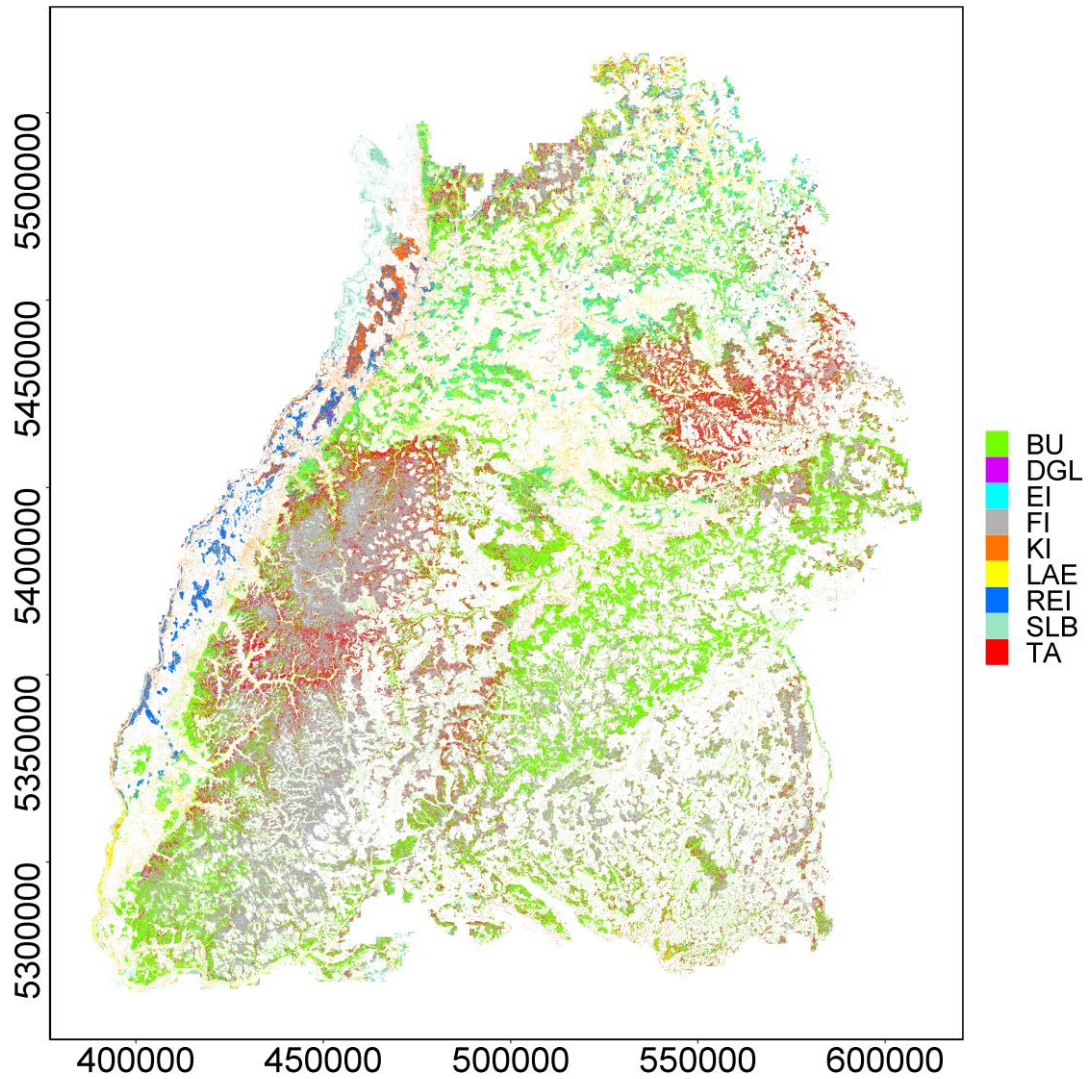


Abbildung 15: Klassifikation von Baumarten in Baden-Württemberg. Die zugehörigen Validierungsergebnisse befinden sich in Tabelle 5.



Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten

Verbundvorhaben „Entwicklung von Methoden und Verfahren zur flächendeckenden und homogenen Generierung von Waldparametern auf der Basis digitaler Oberflächenmodelle aus Luftbilddaten (F³)“

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA),
Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA),
Wonnhaldestr. 4, 79100 Freiburg

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Förderkennzeichen: 22025014 (FVA), 22024816 (NW-FVA)

Dokumentation zu Meilenstein 7

„Konzept zur datenschutzkonformen Umsetzung der länderübergreifenden und bundesweiten Bereitstellung der Waldstrukturparameter“



Meilenstein 7

Konzept zur datenschutzkonformen Umsetzung der länderübergreifenden und bundesweiten Bereitstellung der Waldstrukturparameter

Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Daten	3
2.1	Rasterdaten	3
2.1.1	Themen.....	3
2.1.2	Datenstruktur	4
2.2	Metadaten.....	5
3	Möglichkeiten der technischen Umsetzung.....	7
4	Rechtliche Rahmenbedingungen	8
4.1	Allgemeines	8
4.2	Beurteilung Datenbereitstellungspflicht	9
4.3	Beurteilung Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.....	10
4.4	INSPIRE	10
4.5	Gebühren, Datennutzungsrechte und Haftung.....	11
5	Beispiel: Bereitstellung F ³ -Projektdaten	12
5.1	Vorbereitung der Daten und Generierung des WMS.....	12
5.2	Freischaltung des WMS über das Geoportal-BW.....	15
5.3	Nutzbarkeit der bereitgestellten F ³ -Daten.....	18
6	Empfehlungen aus dem F ³ -Projekt.....	18
6.1	Empfehlungen zur Bereitstellungstechnik	19
6.2	Empfehlungen die rechtliche Lage betreffend	19



1 Einleitung

Das F³-Projekt zielt auf die Bereitstellung großräumiger, flächendeckender und regelmäßig aktualisierbarer Waldstrukturdaten für Forstbetriebe, administrativ übergeordnete Ebenen, die forstliche Forschung, den Naturschutz und weitere Akteure. Es ist erforderlich die Datenbereitstellung so zu gestalten, dass eine umfassende und effektive Nutzung der Daten durch verschiedene Nutzengruppen ermöglicht wird. Gute Voraussetzungen hierfür bieten internetbasierte Dienste. Auch gelten für Behörden Datenbereitstellungspflichten, während zeitgleich Belange des Datenschutzes eine Rolle spielen.

Um zu beleuchten, wie eine Bereitstellung flächendeckender Daten technisch umgesetzt werden könnte und welche rechtlichen Aspekte hiervon berührt werden würden, hat das F³-Projekt weitreichende Recherchen angestellt. In diesem Dokument werden die erzielten Ergebnisse und daraus gewonnene Erkenntnisse dargestellt. Daraus werden Empfehlungen abgeleitet, die bei der Bereitstellung entsprechender Datendienste helfen sollen. Dies beinhaltet auch die exemplarische Bereitstellung der im Projekt erstellten forstlichen Strukturdaten als webbasierte Visualisierungsdienste.

2 Daten

Die in diesem Dokument dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Bereitstellung der im F³-Projekt erzeugten forstlichen Strukturdaten und ihrer Metadaten. Die Daten sind im nachfolgenden beschrieben und wurden beispielhaft als Kartendienste allgemein zugänglich gemacht (Abschnitt 5).

2.1 Rasterdaten

2.1.1 Themen

Alle forstlichen Strukturdaten, die nach den im F³-Projekt entwickelten Methoden erstellt wurden, sind als Rasterdaten im TIF-Format gespeichert. Auf der technischen Ebene unterscheiden sich die Rasterdaten vor allem in ihrer geometrischen Auflösung und Bit-Tiefe (Tabelle 1).

Tabelle 1: Aus Fernerkundungsdaten abgeleitete Strukturdaten mit Dateipräfix, geometrischer Auflösung und Bittiefe.

Thema	Dateipräfix	Auflösung	Bittiefe
Digitales Oberflächenmodell (DOM)	dsm_	1 m	32 Bit
Normalisiertes DOM (nDOM)	ndsm_	1 m	32 Bit
Waldhöhenstrukturkarte	whsk_	5 m	8 Bit
Kronendachrauigkeit			
– Perzentilabstand	rauigkeit_perz##(##)	20, 50, 100 m	32 Bit
– Höhen-Standardabweichung	rauigkeit_std##(##)	20, 50, 100 m	32 Bit
Überschirmung	ueberschirmung_	25 m	32 Bit



Waldtyp	waldtyp_	1 m	2 Bit
Lockere Althölzer und Überhälterbestände	lockere_althoelzer_	20 m	2 Bit
Holzvorrat	vorrat_	20 m	32 Bit
Oberirdische Biomasse	biomasse_	20 m	32 Bit

Detaillierte Beschreibungen der Methoden zur Herleitung der Rasterdaten sind in den Dokumentationen zu den Meilensteinen M3 („Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern“), M4 („Methodenbeschreibung zur Ableitung von Waldstrukturparametern aus Oberflächenmodellen“) und M8 („Verfahren zur Berechnung des Holzvorrats und der Biomasse“) zu finden. Alle diese Dokumente sind über die Projekt-Webseite (<https://www.waldwissen.net/de/technik-und-planung/waldinventur/f3-fernerkundungsbasierte-walddaten> [letzter Zugriff 15.10.2020]) verfügbar.

2.1.2 Datenstruktur

Die Berechnungsmethoden des F³-Projekts sind geeignet Daten im UTM- sowie im Gauß-Krüger-Koordinatensystem zu prozessieren. Entsprechend ist auch die Datenstruktur auf diese Koordinatensysteme (EPSG-Codes 25832, 25833, 31466, 31467, 31468) angepasst. Dies ist von Bedeutung für die Aufteilung der Daten in Kacheln sowie für die Namensgebung der einzelnen Kacheldateien.

Alle Rasterdaten werden in Kacheln mit einheitlicher Ausdehnung von 1000 x 1000 m unterteilt. Die Lage der Kacheln orientiert sich dabei am jeweils verwendeten Koordinatensystem, so dass die Kanten mit den vollen Kilometerwerten des Systems übereinstimmen.

Der Dateiname jeder Kachel gibt an, an welcher Koordinate die Kachel in das Koordinatensystem eingehängt ist. Im Dateinamen werden jeweils die Koordinaten (Rechtswert und Hochwert) der südwestlichen Ecke mitgeführt. Die letzten drei Ziffern der Koordinaten werden jedoch nicht angegeben, da es sich hierbei um Nullen handelt. Für Kacheln im UTM-System ist zu beachten, dass Deutschland geographisch in zwei UTM-Zonen (Zone 32 N und 33 N) liegt. Daher wird die entsprechende Meridiankennziffer („32“ bzw. „33“) ebenfalls im Dateinamen mitgeführt. Daraus ergeben sich 5 Ziffern, die den Rechtswert definieren und 4 Ziffern, die den Hochwert definieren. Durch ein entsprechendes Präfix wird im Dateinamen ebenfalls angegeben, um welchen forstlichen Strukturparameter es sich handelt (Tabelle 1). Bei den Kronendachrauigkeitsparametern enthält dieses Präfix auch Informationen zur Herleitung der Kronendachrauigkeitswerte („perz“ für Perzentilabstand; „std“ für Standardabweichung) und die geometrische Auflösung (20, 50 oder 100 m).

Beispiel einer UTM-Koordinate (Zone 32 N) und des daraus abgeleiteten Namensbestandteils für gekachelte Dateien:

Thema: Digitales Oberflächenmodell (DOM)

UTM-Zone: 32N

Rechtswert: 462000

Hochwert: 5481000

Beispiel Dateiname für DOM-Kachel: dsm_324625481.tif



Bei Gauß-Krüger-Daten wird analog zu den UTM-Daten verfahren. Auch hier wird, wie üblich, der Zonenindex („2“, „3“ oder „4“) mitgeführt. Daraus ergeben sich Koordinatenwerte für Rechtswert und Hochwert von je 7 Ziffern. Nach Entfernung der letzten drei Ziffern verbleiben noch je 4 Stellen für den Dateinamen:

Rechtswert: 3 412000

Hochwert: 5295000

Beispiel Dateiname für DOM-Kachel: dsm_34125295.tif

Die gekachelten Raster werden getrennt nach Befliegungsjahr und Befliegungslos der den Berechnungen zugrunde liegenden Luftbilder in einer Ordnerstruktur gehalten. Dabei bildet das Befliegungsjahr die oberste Ebene, das Befliegungslos die mittlere Ebene und das Rasterthema (z. B. nDOM, Kronendachrauigkeit, Waldtyp usw.) die untere Ebene. Die korrekte Zuordnung der Rasterdaten zum jeweilig zugrunde liegenden Befliegungslos und -jahr wird auch bei der Datenbereitstellung sichergestellt, indem die entsprechende Information in den Metadaten (Abschnitt 2.2) festgehalten wird.

2.2 Metadaten

Metadaten beschreiben die Eigenschaften der erzeugten Rasterdaten. Sofern die bereitgestellten forstlichen Strukturdaten unter die INSPIRE-Datenspezifikation (siehe Info-Box 1 und Abschnitt 4.3) fallen, müssen auch deren Metadaten INSPIRE-konform erfasst und bereitgestellt werden. Ebenso müssen für den Bereitstellungsdienst Metadaten erfasst und bereitgestellt werden. Diese „Capabilities-Dokumente“ beschreiben die Eigenschaften der Dienste-Schnittstellen.

Info-Box 1: INSPIRE und Metadaten

INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community) ist die Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft. Die Umsetzung der EU-INSPIRE-Richtlinie (<https://inspire.ec.europa.eu/> [letzter Zugriff 14.07.2020]) ist verpflichtend für alle Mitgliedsstaaten (siehe Abschnitt 4.3). Neben Metadaten umfasst die Richtlinie Durchführungsbestimmungen zur Einrichtung von Netzdiensten, Sicherstellung der Interoperabilität zwischen Geodatenätzen in Europa und dem Zugang zu Geodatenätzen sowie deren Nutzung. Die Umsetzung in nationales Recht in Deutschland erfolgt über das „Gesetz über den Zugang zu digitalen Geodaten“ (GeoZG, <http://www.gesetze-im-internet.de/geozg/> [letzter Zugriff 14.07.2020]) des Bundes sowie über die entsprechende Gesetzgebung der Bundesländer (Auflistung unter <https://www.gdi-de.org/INSPIRE/rechtliche%20Umsetzung> [letzter Zugriff 14.07.2020]).

§ 3 Absatz 2 GeoZG definiert Metadaten wie folgt: „Metadaten sind Informationen, die Geodaten oder Geodatendienste beschreiben und es ermöglichen, Geodaten und Geodatendienste zu ermitteln, in Verzeichnisse aufzunehmen und zu nutzen.“ (https://www.gesetze-im-internet.de/geozg/_3.html [letzter Zugriff 31.03.2020]). Unter anderem beinhaltet die Gesetzgebung die Erzeugung einheitlicher Metadaten zu den entsprechenden Geodaten sowie deren Bereitstellung. Die geforderten Metadaten sind in der „Verordnung (EG) Nr. 1205/2008 der Kommission vom 3. Dezember 2008 zur Durchführung der Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich Metadaten“ (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R1205> [letzter Zugriff 27.03.2020]) aufgeführt. In Deutschland werden diese Vorgaben im Rahmen der „Geodateninfrastruktur Deutschland“ (GDI-DE;

<https://www.gdi-de.org> [letzter Zugriff 27.03.2020]) umgesetzt und gleichzeitig mit Vorgaben bestehender Standards aus ISO 19115/19119/19139 und OGC (Open Geospatial Consortium) harmonisiert. Entsprechend wurden Konventionen bezüglich Metadaten sowie deren Bereitstellung im Arbeitskreis Metadaten erarbeitet und als „Architektur der Geodateninfrastruktur Deutschland – Konventionen zu Metadaten“ ([https://www.gdi-de.org/SharedDocs/Downloads/DE/GDI-DE/Dokumente/Konventionen zu Metadaten V2.0.3.pdf? blob=publicationFile](https://www.gdi-de.org/SharedDocs/Downloads/DE/GDI-DE/Dokumente/Konventionen_zu_Metadaten_V2.0.3.pdf?blob=publicationFile) [letzter Zugriff 15.10.2020]) veröffentlicht. Die Bundesländer bieten im Rahmen ihrer eigenen Geodateninfrastruktur, kurz GDI (aufbauend auf GDI-DE), Editoren und Hilfestellungen für die Erstellung INSPIRE-konformer Metadaten an. Eine Auflistung der Kontaktstellen bei Bund und Ländern ist im Internet unter <https://www.gdi-de.org/GDI-DE/Kontaktstellen> [letzter Zugriff 15.10.2020] abrufbar.

Als Beispiel für Metadateninformationen wird nachfolgend der Inhalt des Metadaten-Editors der GDI Baden-Württemberg dargestellt. Nicht alle Angaben sind nach INSPIRE-Richtlinie zwingend erforderlich.

- Basisinformationen
 - Titel des Metadatensatzes
 - Datum (Erstellung/Publikation/Überarbeitung)
 - Identifikator: Code aus Namensraum und UUID, z. B. <http://www.lgl-bw.de/10451069-e255-4698-9795-22195b2c79df>
 - Kurzbeschreibung
 - Kontakt für die Ressource: Verantwortliche Organisation, Email-Adresse, Funktion
 - Schlüsselwörter: z. B. inspireidentifiziert, opendata
 - Thesaurus: Titel und Publikationsdatum
 - Ressourceneinschränkungen:
 - Anwendungseinschränkungen
 - Zugriffseinschränkungen
 - Nutzungseinschränkungen
 - Andere Einschränkungen, Nutzungsbedingungen
 - gmd:spatialRepresentationType (Vektor / Raster, Gitter / Stereomodell / TIN / Text, Tabelle / Video)
 - Räumliche Auflösung
 - Sprache
 - Thematik
 - Ausdehnung: Geografisches Begrenzungsrechteck
- Referenzsystem
 - EPSG-Code
 - Namensraum (urn:ogc:def:crs:EPSG)
- Vertriebsinformation
 - Abgabeformat
 - Vertriebsstelle
- Datenqualität
 - Bezugsebene (z. B. Datenbestand)
 - Konsistenz des Wertebereichs
 - Konformitätsergebnis (Metadatenvalidierung)



- Titel
- Datum
- Erklärung
- Bestanden (ja oder nein)
- Herkunft
 - Erläuterung
 - Beschreibung
- Metadaten
 - Metadatensatzidentifikator
 - Sprache (z. B. ger)
 - Zeichensatz (z. B. Utf8)
 - Hierarchieebene (z. B. Datenbestand)
 - Datum der Metadatenerstellung
 - Bezeichnung des Metadatenstandards
 - Version des Metadatenstandards
 - Metadatenkontakt: Verantwortliche Organisation, Email-Adresse, Funktion

Die Erstellung von Metadaten ist Voraussetzung für die Veröffentlichung von Geodaten über das Geoportal Baden-Württemberg (<https://www.geoportal-bw.de/> [letzter Zugriff 01.04.2020]).

Zusätzlich zu den in den GDI der Bundesländer festgelegten Metadaten wird es aufgrund von Erfahrungen aus dem F³-Projekt als wichtig erachtet, weitere Informationen über die forstlichen Strukturdaten an die Nutzenden weiterzugeben. Hierzu gehören Informationen zum jeweils genutzten Berechnungsalgorithmus, den verwendeten Eingangsdaten, Zeitstempel der Datenerfassung (Alter der Daten) sowie Ergebnisse der Validierung und Informationen über die zu erwartende Genauigkeit. Diese Zusatzinformationen helfen die Nutzbarkeit der Daten für geplante Verwendung einzuschätzen. Sie können in die Freitextbereiche des Metadateneditors (z. B. Kurzbeschreibung, Herkunft: Erläuterung und Beschreibung) eingetragen werden. Ein Umsetzungsbeispiel ist in Abschnitt 5 zu finden.

3 Möglichkeiten der technischen Umsetzung

Für die internetbasierte Bereitstellung von Geodaten gibt es verschiedene technische Möglichkeiten. Bekannt sind vor allem internetbasierte Dienste, die es erlauben die bereitgestellten Daten direkt in ein eigenes Geografisches Informationssystem (GIS) einzubinden. Die Dienste unterscheiden sich in der Art der Daten, die übertragen werden.

- „Web Map Service“ (WMS): Beim WMS wird ein Kartenbild üblicherweise als einfaches Raster-Grafikformat übertragen, die Daten selbst werden jedoch nicht übertragen. Dieser (Karten)Dienst eignet sich zur Darstellung der Daten und zur visuellen Interpretation.
- „Web Coverage Service“ (WCS): Ein WCS ist ein Datendienst, der die verfügbaren Daten selbst zusammen mit ihren Metadaten bereitstellt. Daten (z. B. Raster) die über einen WCS geliefert werden, können von Nutzenden maschinell weiter verarbeitet werden.
- „Web Feature Service“ (WFS): Wie beim WCS bietet der WFS direkten Zugriff auf die Geodaten. Der WFS ist jedoch auf Vektordaten beschränkt und eignet sich daher nicht für die Bereitstellung der forstlichen Strukturdaten des F³-Projekts.



WMS, WCS und WFS sind etablierte Methoden der Datenbereitstellung und es existieren entsprechende Standards des „Open Geospatial Consortiums“ (OGC).¹ WMS sind weit verbreitet und werden genutzt, um öffentliche Geodaten bereitzustellen, häufig in Kombination mit einem online „Geodaten-Viewer“. Dieser erlaubt es die Daten in einem Internet-Browser ohne zusätzliche Software zu betrachten. Zudem können auf diese Weise der WMS-Link sowie die Metadaten nutzendenfreundlich bereitgestellt werden. Beispiele für Geodaten-Viewer einzelner Bundesländer sind das Geoportal Baden-Württemberg² und der Bayern Atlas³.

Neben der Einrichtung von Internet-Diensten wie WMS und WCS gibt es auch vermehrt Möglichkeiten Geodaten über cloudbasierte Online-Plattformen bereitzustellen. Neben den Daten können dort auch Werkzeuge bereitgestellt werden, die es den Nutzenden ermöglichen weitergehende Auswertungen in der Cloud durchzuführen. Beispiele hierfür sind die „Copernicus Data and Information Access Services“ (DIAS) Plattformen CODE-DE⁴ und Mundi Web Services⁵.

4 Rechtliche Rahmenbedingungen

4.1 Allgemeines

Bitte beachten: Die in diesem Kapitel dargestellten rechtlichen Rahmenbedingungen basieren auf den Ergebnissen von dritter Seite eingeholter juristischer Beratungen sowie eigener Recherche. Sie sind keinesfalls als juristische Beratung zu sehen noch erheben sie Anspruch auf Vollständigkeit, Richtigkeit und Aktualität. Der Zweck der folgenden Darstellungen ist es, einen ersten Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen der Bereitstellungen von Waldstrukturdaten zu bieten. Sie ersetzen nicht eine eigene, fundierte Überprüfung der Rechtslage.

Bei der flächigen Berechnung und Bereitstellung forstlicher Strukturdaten müssen verschiedene rechtliche Aspekte berücksichtigt werden. Einerseits besteht für jede natürliche oder juristische Person ein Recht auf Zugang zu Umweltdaten nach Umweltinformationsgesetz (UIG)⁶, welches für die informationspflichtigen Stellen des Bundes gilt, beziehungsweise nach entsprechender Gesetzgebung der Bundesländer, welche für die entsprechenden informationspflichtigen Stellen der Länder gelten. Andererseits werden durch die flächige Bereitstellung auch den Privatwald betreffende Informationen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht, wodurch der Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen betroffen sein könnte. Auch können für die datenbereitstellenden Stellen Lizenz- und Datennutzungsaspekte von Bedeutung sein. Zusätzlich muss die Bereitstellung öffentlicher Geodatenätze mit Metadaten gemäß der EU-INSPIRE-Richtlinie erfolgen (siehe Abschnitt 2.2).

Aufgrund der komplexen Lage, war ein Ziel des F³-Projekts die rechtlichen Rahmenbedingungen der Bereitstellung forstlicher Strukturdaten darzustellen. Hierfür wurden juristische Beratungen über die Justizariate der für Forstwirtschaft zuständigen Ministerien der Bundesländer Baden-Württemberg (Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz (MLR), Referat 51) und Niedersachsen

¹ <https://www.ogc.org/> [letzter Zugriff 06.07.2020]. Basierend auf diesen etablierten Standards, werden zurzeit neue Standards—„OGC API“ (API = Application Programming Interface) Standards—entwickelt, die die Vorteile moderner Internet-Entwicklungsmethoden im Zugriff auf Geodaten nutzen sollen (<https://ogcapi.ogc.org/> [letzter Zugriff 06.07.2020]).

² <https://www.geoportal-bw.de/> [letzter Zugriff 06.07.2020]

³ <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/> [letzter Zugriff 06.07.2020]

⁴ <https://code-de.org/> [letzter Zugriff 06.07.2020]

⁵ <https://mundiwebservices.com/> [letzter Zugriff 06.07.2020]

⁶ http://www.gesetze-im-internet.de/uig_2005/index.html [letzter Zugriff 08.07.2020])

(Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML)) eingeholt. Obwohl die einzelnen Bundesländer eigene Ausführungsgesetze bezüglich des Zugangs zu Umweltinformationen⁷ die rechtliche Situation bundesweit vergleichbar. So gab es auch eine Übereinstimmung in der Einschätzung der rechtlichen Lage zwischen MLR Baden-Württemberg und ML Niedersachsen. Auf interne Nachfrage bestätigte das MLR Baden-Württemberg auch, dass die Regelungen der Bundesländer weitestgehend der Regelungen des Bundes (UIG) folgen.

4.2 Beurteilung Datenbereitstellungspflicht

Der folgende Abschnitt basiert vor allem auf den Ergebnissen der juristischen Beratung durch das MLR Baden-Württemberg, zu der ein internes Dokument⁸ vorliegt.

Zur Beurteilung der Datenbereitstellungspflicht muss zuerst geprüft werden, ob es sich bei den Daten um Umweltinformationen im Sinne des § 2 Absatz 3 UIG bzw. der entsprechenden Ländergesetzgebung (z. B. § 23 Absatz 3 Nummer 1 Umweltverwaltungsgesetz Baden-Württemberg (UVwG))⁹ handelt. Umweltinformationen sind alle „Informationen über den Zustand von Umweltbestandteilen, zu denen [...] Luft, Wasser, Boden die Landschaft und natürliche Lebensräume sowie Artenvielfalt und ihre Bestandteile zählen“⁸. Der Wald in Deutschland wird überwiegend als Wirtschaftswald genutzt, ist aber Bestandteil der Landschaft und Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten. Deshalb sind Informationen über den Wald auch Umweltinformationen. Zudem zählen zu Umweltinformationen auch „Maßnahmen oder Tätigkeiten, die sich auf die Umweltbestandteile auswirken“⁸, also auch die Bewirtschaftung des Waldes. Die im F³-Projekt erzeugten forstlichen Strukturparameter digitales Oberflächenmodell, normalisiertes digitales Oberflächenmodell, Waldhöhenstrukturkarte, Kronendachrauigkeit, Überschirmung und Bestandeslücken werden vorbehaltlos zu den Umweltinformationen gezählt, „da hier Informationen über die Zustände der Wälder erfasst werden“⁸. Diese Aussage lässt sich auch übertragen auf die Strukturparameter Waldtyp und lockere Althölzer/Überhälterbestände, die nicht explizit im Rahmen der juristischen Beratung abgefragt wurden. Für die Strukturparameter Holzvorrat und oberirdische Biomasse wird in der juristischen Beratung durch das MLR Baden-Württemberg angemerkt, dass hier die Einordnung anders beurteilt werden könnte, „da es sich dabei um aus den Zustandsdaten abgeleitete Informationen handelt, die bestimmte Berechnungen, Abschätzungen und Wertungen erfordern, um entsprechende Schlussfolgerungen daraus zu ziehen“⁸. Jedoch ist die herrschende Auffassung, dass auch abgeleitete Informationen unter den Begriff des Zustands fallen. Somit gelten auch Holzvorrat und Biomasse als Umweltinformationen. Als Folge daraus hat „jede Person (also natürliche wie juristische Personen), einen rechtsgrundlosen Anspruch auf Zugang zu diesen Informationen“⁸. Voraussetzung ist jedoch, dass diese Informationen bereits erstellt und bei einer „Stelle der öffentlichen Verwaltung des Landes auch verfügbar sind“⁸. Darüber hinaus gelten in Baden-Württemberg auch die Bestimmungen des

⁷ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32003L0004> [letzter Zugriff 15.10.2020]

⁸ von Bülow, W.-D. und Krüger, B.: Juristische Beratung zur Datenbereitstellung von Fernerkundungsbasierten forstlichen Strukturdaten – Ihre Anfrage vom 25.02.2019 mit Auftragsbeschreibung rechtliche Beratung. Internes Dokument. Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, Stuttgart, 2020.

⁹ <http://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&query=UmwVwG+BW&psml=bsbawueprod.psml&max=true> [letzter Zugriff 08.07.2020]



Landesinformationsfreiheitsgesetzes (LIFG)¹⁰ das den Anspruch von natürlichen und juristischen Personen auf Zugang zu amtlichen Informationen festlegt. Es ist zu erwarten, dass in anderen Bundesländern ähnliche Gesetze gelten.

Die datenhaltenden und informationspflichtigen Stellen sollen zudem den Zugang zu den Daten erleichtern und fördern. Dies soll vornehmlich über Datensätze geschehen, die „mit Mitteln der elektronischen Kommunikation“⁸ abrufbar sind. Zusätzlich soll der Informationszugang „u.a. durch die Errichtung öffentlich zugänglicher Informationsnetze und Datenbanken“ unterstützt werden. Die Bereitstellung über WMS oder WCS werden dieser Forderung gerecht. Es besteht allerdings kein Zwang dies umzusetzen, sondern es handelt sich um ein Optimierungsgebot. Die Informationsbereitstellung steht deshalb unter einem Machbarkeitsvorbehalt, es besteht kein subjektiver Anspruch auf Datenbereitstellung im Internet.

4.3 Beurteilung Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen

Der folgende Abschnitt basiert vor allem auf den Ergebnissen der juristischen Beratung durch das MLR Baden-Württemberg, zu der ein internes Dokument⁸ vorliegt.

Der grundsätzlichen Datenbereitstellungspflicht von Umweltinformationen und somit auch der Waldstrukturdaten (siehe Abschnitt 4.2) steht der Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen entgegen. Beispielsweise könnten Privatwaldbesitzende die Bereitstellung von flächigen Holzvorratskarten als Verletzung ihrer Betriebsgeheimnisse empfinden. Nach den entsprechenden Paragraphen der Umweltinformationsgesetzgebung, z. B. § 9 UIG oder § 29 UVwG Baden-Württemberg, kann aus Gründen des Schutzes von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen die Herausgabe von Umweltdaten, also auch von Waldstrukturdaten, abgelehnt werden. Maßgeblich ist hierbei, dass es sich bei den Waldstrukturdaten auch um Betriebs- oder Geschäftsgeheimnisse im Sinne der Gesetzgebung handelt. Diese umfassen nach allgemeiner Ansicht „Tatsachen, Umstände und Vorgänge“ mit Bezug auf ein bestimmtes Unternehmen, „die nicht offenkundig [...] sind und an deren Nichtverbreitung der Rechtsträger ein berechtigtes Interesse hat“⁸. Die nach den F³-Verfahren abgeleiteten Daten haben keinen Bezug zu einzelnen Flurstücken, Waldbesitzenden oder Forstbetrieben und können deshalb nicht direkt einem bestimmten Unternehmen zugeordnet werden. Allerdings kann dieser Bezug mit Hilfe anderer Informationen, wie z. B. Flurstücksdaten, hergestellt werden. Damit wären Rückschlüsse auf Vorräte und verfügbare Biomasse möglich, die als Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse angesehen werden können. Allerdings ist diese Möglichkeit sehr beschränkt, da diese ergänzenden Informationen (z. B. Flurstücksdaten) nicht frei zugänglich sind. Zusätzlich erlaubt es das freie Waldbetreuerrecht jeder Person sich selbst vor Ort über Holzvorrat und Biomasse zu informieren, wodurch diese Information zu einer offenkundigen Information wird. Daraus folgern die Juristen des MLR Baden-Württemberg, dass selbst im Fall von Holzvorräten und Biomasse durch die Datenbereitstellung keine Betriebs- oder Geschäftsgeheimnisse verletzt werden, obwohl die Informationsgewinnung „erheblich erleichtert“⁸ wird.

4.4 INSPIRE

Nach den mit INSPIRE in Verbindung stehenden rechtlichen Grundlagen (siehe Info-Box 1 in Abschnitt 2.2), müssen bei öffentlichen Stellen (Bundesbehörden, Landesbehörden, Landkreise, Städte, Gemeinden und Gemeindeverbände sowie unter ihrer Aufsicht stehenden juristische Personen des öf-

¹⁰ <http://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&query=InfFrG+BW&psml=bsbawueprod.psml&max=true&aiz=true> [letzter Zugriff 09.07.2020]

fentlichen Rechts) vorliegende Geodaten nach den INSPIRE-Durchführungsbestimmungen zugänglich gemacht werden, wenn sie einem der 34 Geodaten Themen in den Anhängen I bis III der Richtlinie zugeordnet werden können¹¹. Diese Geodaten Themen sind unter <https://inspire.ec.europa.eu/Themes/Data-Specifications/2892> [letzter Zugriff 14.07.2020] einsehbar oder auch in den entsprechenden Gesetzestexten des Bundes und der Länder zu finden (z. B. § 4 Absatz 1 Satz 4 GeoZG). Die Waldstrukturdaten die mit den Verfahren des F³-Projekts abgeleitet werden, fallen in die Themenbereiche Höhe („Elevation“; DOM, nDOM, WHSK) und Bodenbedeckung („Land cover“; Waldtyp, Überschirmung, Kronendachrauigkeit, Lockere Althölzer und Überhälter, Holzvorrat, Biomasse). Während die Zuordnung von DOM, nDOM und WHSK zum Geothema „Höhe“ eindeutig ist, ist die Zuordnung der anderen Waldstrukturparameter zum Thema „Bodenbedeckung“ etwas schwieriger. Allerdings ist der Begriff „Bodenbedeckung“ bzw. „Land cover“ in der entsprechenden INSPIRE-Datenspezifikation¹² weit gefasst. Dort ist Bodenbedeckung eine Beschreibung der Erdoberfläche durch ihre (bio-)physikalischen Eigenschaften. Demnach fallen alle Waldstrukturparameter unter die INSPIRE-Richtlinie, wenn sie bei öffentlichen Stellen vorliegen.

4.5 Gebühren, Datennutzungsrechte und Haftung

Der folgende Abschnitt baut vor allem auf die Ergebnisse der juristischen Beratung durch das MLR Baden-Württemberg, zu der ein internes Dokument⁸ vorliegt.

Für die Übermittlung von Umweltinformationen können Gebühren und Auslagen erhoben werden, wenn der Bearbeitungsaufwand einen bestimmten Schwellenwert (in Baden-Württemberg drei Stunden) übersteigt. Dabei sind die jeweils geltenden Vorschriften der informationspflichtigen Stelle zu beachten. Mündliche und einfache schriftliche Auskünfte sind jedoch gebühren- und auslagenfrei. Dies gilt auch für „die aktive und systematische Unterrichtung der Öffentlichkeit über die Umwelt“⁸, also beispielsweise die Datenbereitstellung über WMS oder WCS. Wenn die Nutzung der Daten nicht der reinen Information über die Umwelt dient, sondern ihr wirtschaftlicher Wert im Vordergrund steht, so dürfen „behördliche Publikationen mit zielgruppen- und fachspezifischen Zusammenstellungen auch mit Gewinn verkauft werden“⁸.

Bezüglich Datennutzungsrechten wurde vom MLR Baden-Württemberg klargestellt, dass der Abschluss einer Datennutzungsvereinbarung mit der nach Umweltinformationen anfragenden Person nicht möglich ist¹¹. Auch wird beispielsweise bei der Bereitstellung offener Geodaten über das Geoportal Baden-Württemberg konsequent auf Nutzungseinschränkungen verzichtet¹³. Stattdessen werden die Daten und Dienste unter der Datenlizenz Deutschland Version 2.0¹⁴ in der Variante „Namensnennung“ oder der Variante „Zero“ (keine Namensnennung) angeboten. Diese Lizenz wurde gemeinsam von Bund, Ländern und kommunalen Spitzenverbänden entwickelt um die Nutzungsbestimmungen von Verwaltungsdaten in Deutschland zu vereinheitlichen. Daher ist zu erwarten, dass diese Lizenz in gleicher Weise in allen Bundesländern Verwendung findet.

¹¹ M. Streng, Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, persönliche Kommunikation, 24. Februar 2020

¹² <https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/lc> [letzter Zugriff 14.07.2020]

¹³ Sohn, A., Bach, S., 2017. Leitfaden „Lizenzierung von Geodaten und Geodatendiensten in der GDI-BW“. Hrsg: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg. Online: https://www.geoportal-bw.de/documents/20147/0/Leitfaden_Lizenzierung_GDI-BW_V10_170213.pdf/cab5c60d-bd15-4f60-8c55-37df54645537 [letzter Zugriff 14.07.2020].

¹⁴ <https://www.govdata.de/lizenzen> [letzter Zugriff 14.07.2020]



Die Gewährleistung der informationspflichtigen Stelle für die Aktualität, Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Geodaten muss nur „soweit möglich“ gegeben werden. Diese „Bemühungsverpflichtung“ ist in der entsprechenden Umweltinformationsgesetzgebung (z. B. § 26 Absatz 4 UVwG Baden-Württemberg) festgelegt. Das heißt, dass keine allgemeine Prüfpflicht auf inhaltliche Richtigkeit und kein Anspruch auf fortlaufende Kontrolle der Daten auf Aktualität und Vergleichbarkeit bestehen. Als Folge daraus haftet die informationspflichtige Stelle nicht für die Richtigkeit, Aktualität und Vergleichbarkeit der Umweltinformationen. Es wird jedoch empfohlen explizit darauf hinzuweisen, dass keine Gewährleistung übernommen wird.

5 Beispiel: Bereitstellung F³-Projektdateien

Die mit den F³-Verfahren generierten flächendeckenden Waldstrukturdaten, die während der Projektlaufzeit im Zuge der Methodenentwicklung erzeugt wurden, werden als Kartendienst (WMS) bereitgestellt. Hierzu besteht kein Zwang, da Forschungsdaten nicht nach Umweltinformationsgesetzen bereitgestellt werden müssen und auch nicht von der INSPIRE-Richtlinie betroffen sind. Ziel der Datenbereitstellung ist, beispielhaft darzustellen, wie die Bereitstellung von Waldstrukturdaten umgesetzt werden kann, inklusive der INSPIRE-konformen Metadaten. Zusätzlich kann der Kartendienst als Vorschau auf die mit den F³-Verfahren generierten Waldstrukturdaten dienen über die sich Datennutzende über die Eigenschaften der Daten informieren können.

Die Zugangsadressen zu den Kartendiensten werden zentral auf der Projektwebseite (<https://www.waldwissen.net/de/technik-und-planung/waldinventur/f3-fernerkundungsbasierte-walddaten> [letzter Zugriff 15.10.2020]) bereitgestellt. Beispielhaft wird nachfolgend der Arbeitsablauf für die Bereitstellung der baden-württembergischen Projektdateien über das Geoportal Baden-Württemberg (Geoportal-BW)¹⁵ dargestellt. Das Geoportal-BW ist die zentrale Schnittstelle für die Suche nach und den Zugang zu Geodaten innerhalb der GDI Baden-Württemberg. Dort erhalten Nutzende Zugang zu den angebotenen Diensten sowie den Metadaten der Daten und Dienste. Das Geoportal-BW ist auch für die FVA die übliche Schnittstelle, um Kartendienste für Nutzende außerhalb des Landesnetzes anzubieten. Der Vorteil der Datenbereitstellung über das Geoportal-BW (und auch anderer, vergleichbarer Plattformen) ist die effektive Nutzung bereits bestehender Infrastrukturen. Das Geoportal-BW stellt alle behördlichen Geodaten Baden-Württembergs gebündelt bereit und kann somit als zentraler Anlaufpunkt für die Nutzenden dienen. Dadurch können die Waldstrukturdaten im Kontext zu anderen Geodaten betrachtet werden. Für die datenbereitstellenden Behörden wird der Aufwand der Datenbereitstellung verringert, indem kein eigener Geodatenserver betrieben werden muss und mit dem Metadateneditor ein Werkzeug bereitgestellt wird, das die Einhaltung von INSPIRE-Vorgaben erleichtert. Die geforderte Aufnahme der Geodaten in INSPIRE-Datenkataloge erfolgt durch die Nutzung bestimmter Schlüsselwörter in den Metadaten automatisch.

5.1 Vorbereitung der Daten und Generierung des WMS

Bevor ein Kartendienst erstellt wird, müssen die zu bereitstellenden Daten in eine Form gebracht werden, auf die ein Dienst aufgesetzt werden kann. Um die Dienste zu erstellen, wurden die Funktionalitäten von ESRI ArcGIS Server genutzt. Dieser erlaubt es Rasterdaten als „Image Service“ zu veröffentlichen¹⁶. Voraussetzung hierfür ist, dass die Daten als Rasterdatensatz („raster dataset“ in einer

¹⁵ www.geoportal-bw.de [letzter Zugriff 15.07.2020]

¹⁶ <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/manage-data/raster-and-images/key-concepts-for-sharing-an-image-service.htm> [letzter Zugriff 16.07.2020]



„ArcGIS File Geodatabase“ oder als Rasterdatei), ArcGIS Mosaic Dataset oder als „Layer“-Datei, die auf einen Rasterdatensatz verweist, vorliegen. Wenn mehrere Rasterdatensätze als „Layer“ in ein ArcMap-Dokument (*.mxd) geladen werden, kann auch aus diesem heraus ein „Image Service“ aufgesetzt werden. Letztere ist die Herangehensweise, die für die Projektdaten verwendet wurde. Auf diese Art können für jedes Thema (jeder Waldstrukturdatentyp) alle Projektgebiete in einem einzigen Kartendienst angeboten werden. Für jeden Layer im ArcMap-Dokument wird ein entsprechender Layer im Kartendienst gebildet. Da die Abgrenzung der drei baden-württembergischen Projektgebiete über die Ausdehnung kompletter Befliegungslose erfolgte und das Projektgebiet „Südschwarzwald und südlicher Oberrheinebene“ auf drei Befliegungslosen aufbaut, besteht jeder Kartendienst aus fünf Layern.

Die Erstellung der WMS erfolgte mit folgenden Schritten:

1. Transformation der Daten vom Ursprungskoordinatensystem Gauß-Krüger Zone 3 (EPSG 31467) in das UTM-Koordinatensystem (UTM Zone 32 N; EPSG 25832) um den Kartendienst über das Geoportal-BW anbieten zu können:
 - a. Zusammenfassen der einzelnen Rasterkacheln pro Projektgebiet (bzw. Befliegungslos) zu einen ArcGIS Mosaic Dataset.
 - b. Nicht Waldflächen werden mit Hilfe einer Waldmaske über die Mosaic Function „Clip“ (Mosaic Dataset Properties → Functions → Insert Function → Clip Function) ausgeblendet.
 - c. Transformation mit ArcGIS-Funktion „Project Raster“ (Data Management Tools → Projections and Transformations → Raster).
 - d. Ergebnis: für jedes Mosaic Dataset ein einzelner Rasterdatensatz in einer File Geodatabase. Nicht Wald Pixel haben den Wert „NoData“.
2. Erstellung des ArcMap-Dokumentes:
 - a. Öffnen von ArcMap und Hinzufügen aller fünf Rasterdatensets des Themas als einzelne Layer.
 - b. Anpassen der Darstellung entsprechend der im F³-Projekt festgelegten Farbschemas (siehe Dokumentationen M3, M4 und M8) über Kontextmenü → Properties → Symbology: Bei Waldstrukturdaten mit hinterlegter „Colormap“ (WHSK, Waldtyp, lockeres Altholz) sind Farbwerte bereits zugewiesen, bei allen anderen können sie aus den bei der Datenerstellung automatisch generierten Layer-Dateien (*.lyr) übernommen werden (Auswahl „Stretched“, dann über „Import...“-Schaltfläche eine entsprechende Layer-Datei auswählen). Eine Ausnahme bildet hier der Waldstrukturparameter „Überschirmung“, da dieser im F³-Projekt lediglich in Graustufen dargestellt wird. Es bietet sich bei der Anpassung der Darstellung an, auch die Beschriftung der Legende anzupassen, da diese in den Kartendienst übernommen wird. Für kontinuierliche Daten (ohne Colormap) geht dies über die Schaltfläche „Labeling“ (Beispiel in Abbildung 1). Bei klassifizierten Rasterdatensätzen (Waldtyp, lockeres Altholz) wurden die Klassenwerte des Rasters mit den Klassennamen ersetzt (z. B. in Waldtyp: 1 = „offene Bestände“, 2 = „geschlossene Bestände“; Abbildung 2).
 - c. Anpassung des Layer-Namens und der Beschreibung über Kontextmenü → Properties → General: Die Layer-Namen des ArcMap-Dokuments werden auch als Layer-



Namen des Kartendienstes verwendet. Deshalb werden hier eindeutige, sprechende Namen verwendet, die Hinweise auf das Thema sowie das zugrunde liegende Befliegungslos geben (z. B. Waldtyp_2012_Los8). Im Feld „Description“ werden Layer-spezifische Metadaten gespeichert, insbesondere das Befliegungslos, von dem die Waldstrukturdaten abgeleitet wurden, z. B. *„Waldtypenkarte basierend auf dem normalisierten digitalen Oberflächenmodell (nDOM) abgeleitet aus Luftbildern des Landesamtes für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (Befliegungsjahr 2012, Los 8; (<https://www.geoportal-bw.de/geonetwork/srv/ger/catalog.search#/metadata/b0a4c7e5-ed94-36d4-cf3d-b1071f212725>); Der Layer "Waldeigentumsarten" (<https://www.geoportal-bw.de/geonetwork/srv/ger/catalog.search#/metadata/249fbd7-4219-ee48-e306-f9792aeafa60>) wurde als Waldmaske genutzt.“* Diese Beschreibung ist später auch über den Kartendienst in den Eigenschaften („Properties“) der einzelnen Layer abrufbar.

- d. Generierung des Image Services (Kartendienst): Über File → Share As → Service... kann mit Hilfe eines Software-Assistenten der Image Service generiert und publiziert werden. Hierfür ist eine Verbindung zu einem ArcGIS Server mit entsprechenden Rechten nötig. An dieser Stelle kann auch gewählt werden, ob der Image Service als WMS oder als WCS generiert werden soll. Für die F³-Projektdateien wurde WMS gewählt. Am Ende bietet der Software-Assistent die Möglichkeit die Einstellungen auf Fehler zu überprüfen und diese gegebenenfalls zu beheben sowie eine Vorschau auf den Dienst anzuzeigen. Mit Klick auf die Schaltfläche „Publish“ wird der Dienst erstellt und auf dem ArcGIS Server im Verzeichnis „F3“ gespeichert.
- e. Der Link zum erstellten WMS kann im Administrationsbereich des ArcGIS Servers aufgerufen werden. Dieser ermöglicht das Einbinden des Kartendienstes in der eigenen GIS-Umgebung. Aufgrund technischer Restriktionen ist dieser Link jedoch nur im Intranet des Landes Baden-Württemberg abrufbar.

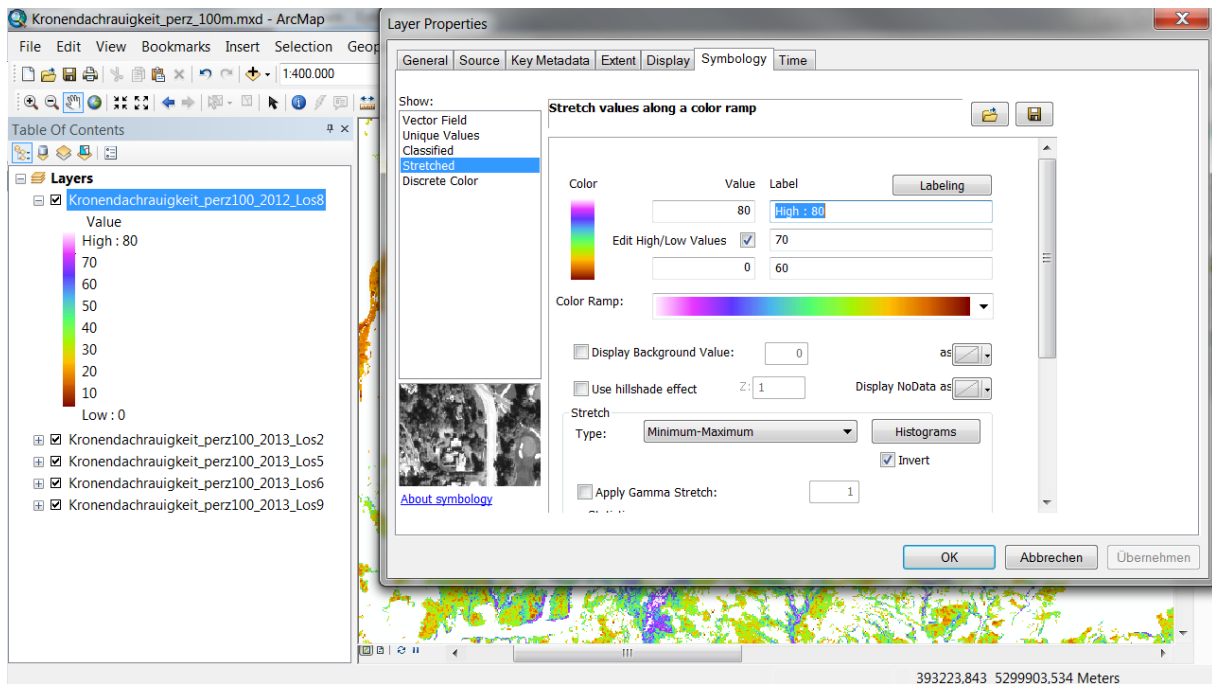


Abbildung 1: ArcMap-Dokument mit Kronenrauigkeit (Perzentilabstand)-Layern vorbereitet für die Veröffentlichung als Kartendienst (WMS).

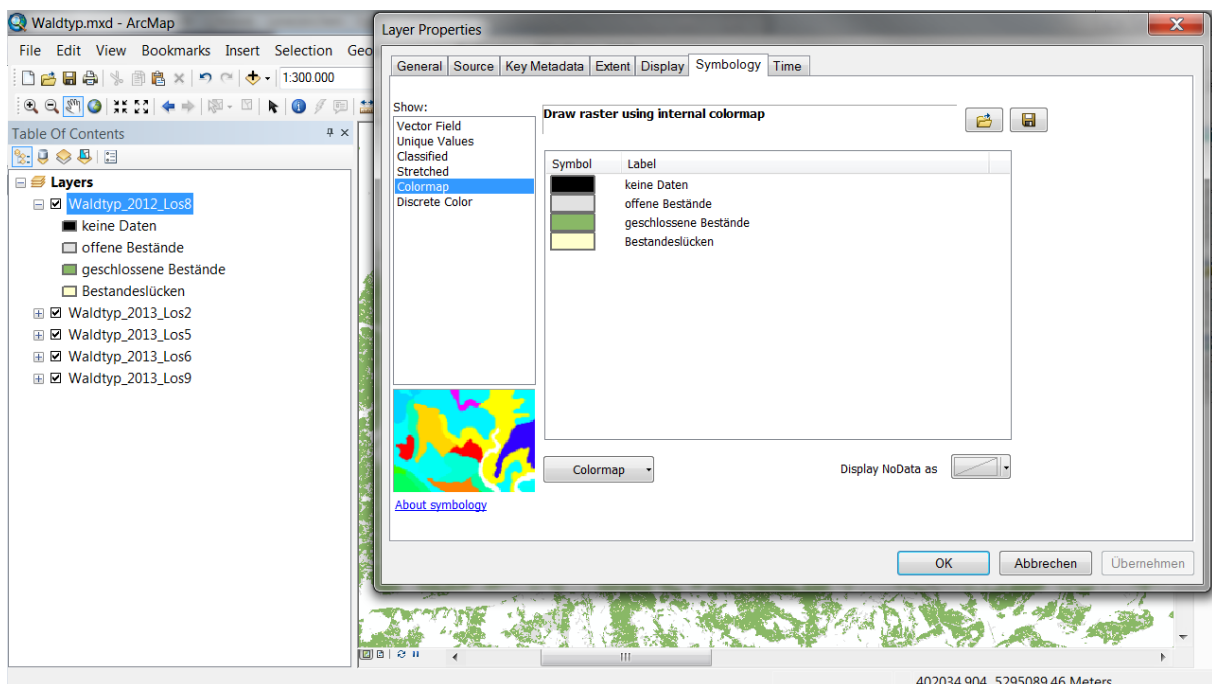


Abbildung 2: ArcMap-Dokument mit Waldtyp-Layern vorbereitet für die Veröffentlichung als Kartendienst (WMS).

5.2 Freischaltung des WMS über das Geoportal-BW

Um den nach der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Vorgehensweise erstellte Kartendienst auch außerhalb des Intranets Baden-Württembergs nutzen zu können, muss er vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL) über ein „Proxy“ auf Antrag freigeschaltet wer-

den. Dies geschieht über das Geoportal-BW. Voraussetzung für die Freischaltung ist das Vorhandensein von Metadaten, die über den Metadateneditor des Geoportal-BW erstellt werden. Der Metadateneditor bietet eine INSPIRE-konforme Metadatenvorlage, deren Inhalt entsprechend angepasst werden kann. Tabelle 2 zeigt beispielhaft die Metadaten für den Strukturparameter Kronendachrauigkeit (Perzentilabstand) mit 100 m horizontaler Auflösung. Die Tabellenstruktur ist angelehnt an die Struktur der INSPIRE-konformen Vorlage des Metadateneditors im Geoportal-BW. In diesem Beispiel wurden zwei INSPIRE-relevante Schlüsselwörter nicht genutzt: (1) „inspireidentifiziert“ und (2) das GEMET – INSPIRE-Thema „Land cover“. Der Grund hierfür ist, dass bei Nutzung dieser Schlüsselwörter die Daten automatisch in INSPIRE-Datenkataloge aufgenommen werden. Da es sich in diesem speziellen Fall jedoch um Forschungsdaten handelt, die nicht unter die INSPIRE-Richtlinie fallen, war dies nicht erwünscht. Generell müssten die mit den im F³-Projekt entwickelten Verfahren abgeleiteten Waldstrukturdaten, sobald sie außerhalb eines Forschungsprojektes erstellt worden sind, jedoch INSPIRE-konform bereitgestellt werden (siehe Abschnitt 4.4). Deshalb sind die Schlüsselwörter „inspireidentifiziert“ und „Land cover“ in Tabelle 2 an entsprechender Stelle in Klammern angegeben.

Tabelle 2: Metadatensatz für den Strukturparameter Kronendachrauigkeit (Perzentilabstand) mit 100 m horizontaler Auflösung. Die Struktur der Tabelle ist an die Struktur des Metadateneditors Geoportal-BW angelehnt. Überschriften in Fettschrift geben die Kategorie an, die Eintragungen in der ersten Spalte die Unterkategorie. In der zweiten Spalte sind die Metadaten angegeben. INSPIRE-relevante aber für Forschungsdaten nicht erforderliche und daher hier nicht angegebene Schlüsselwörter sind in Klammern gesetzt.

Basisinformation	
Titel	FVA Kronendachrauigkeit (Perzentilabstand) 100 m
Datum	Erstellung: 31.03.2020
Identifikator - Code	https://www.fva-bw.de/03ea3208-dab7-4704-84ba-e5e3840b0a82
Kurzbeschreibung	Der Datensatz "Kronendachrauigkeit (Perzentilabstand)" charakterisiert die Unebenheit des Kronendachs eines Waldes. Als Maßzahl für die Quantifizierung der Kronendachrauigkeit wird der Abstand zwischen dem 5. und dem 95. Perzentil der Höhenwerte auf einer Bezugsfläche von 100 x 100 m verwendet. Da die Kronendachrauigkeit nicht nur von der Höhe der Bäume, sondern auch von der Reliefierung des Geländes abhängig ist, werden die Rauigkeitsmaßzahlen aus dem digitalen Oberflächenmodell (DOM) abgeleitet. Die Kronendachrauigkeit wird in Metern angegeben und liefert Hinweise auf die horizontale sowie vertikale Struktur von Waldbeständen. Sie kann wichtige Informationen für verschiedene forstliche Fragestellungen liefern. Sie ist unter anderem von Interesse in Analysen bezüglich des Sturmwurftrisikos, der Biodiversität und der Interaktion des Waldes mit der Atmosphäre. Flächen außerhalb des Waldes wurden mit Hilfe einer Waldkarte maskiert. Dieser Datensatz wurde im Rahmen des Verbundprojekts F ³ - "Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten" erstellt. Verbundpartnerinnen dieses Projekts waren die Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) und die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA). Das F ³ -Projekt wurde durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) gefördert. Förderkennzeichen: 22025014 (FVA), 22024816 (NW-FVA).
Bearbeitungsstatus	Abgeschlossen
Kontakt für die Ressource:	
	<i>Person:</i> Petra Adler
	<i>Organisation:</i> Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
	<i>Adresse:</i> Wonnhaldestraße 4
	<i>Ort:</i> Freiburg



<i>Verwaltungseinheit:</i> Abteilung Biometrie und Informatik	
<i>PLZ:</i> 79100	
<i>E-Mail:</i> petra.adler@forst.bwl.de	
<i>Funktion:</i> Ansprechpartner	
Schlüsselwörter	opendata (inspireidentifiziert), Bodenbedeckung, Forstwirtschaft, Waldstruktur
GEMET - INSPIRE themes: Schlüsselwort	(Land cover)
Ressourceneinschränkungen: Anwendungseinschränkung	Die Daten dürfen entsprechend der "Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0" verwendet werden. Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 (https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0). Die Namensnennung hat in folgender Weise zu erfolgen: "Datenquelle: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (http://www.fva-bw.de)"
gmd:spatialRepresentation	Raster, Gitter
Räumliche Auflösung: Distanz	100 m
Sprache	ger
Thematik	Oberflächenbeschreibung
Ausdehnung: Geografisches Begrenzungsrechteck	7,5 W; 10,2 E; 47,5 S; 48,5 N
Vertriebsinformation	
Abgabeformat:	
<i>Format – Bezeichnung:</i> TIFF	
<i>Version:</i> n/a (default)	
Quality	
Geltungsbereich: Bezugsebene	Datenbestand
Herkunft: Erläuterung	Basierend auf dem mit 1 m Auflösung vorliegenden digitalen Oberflächenmodell (DOM) wird für jede Pixelfläche von 100 x 100 m das 5. bzw. das 95. Perzentil der Höhenwerte bestimmt. Anschließend wird die Differenz zwischen den beiden Perzentilen gebildet. Eine detaillierte Beschreibung des Berechnungsalgorithmus finden Sie unter https://www.waldwissen.net/de/technik-und-planung/waldinventur/ableitung-von-kronendachrauigkeit . Der Datensatz wurde im Gauß-Krüger Koordinatensystem (Zone 3: EPSG 31467) erstellt und nach der Anwendung einer Waldmaske in das UTM Koordinatensystem (Zone 32N: EPSG 25832) transformiert. Eine Validierung des Datensatzes fand nicht statt. Die Methoden zur Erstellung des Datensatzes wurden im Rahmen des Verbundprojektes "F ³ - Flächendeckende, Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten" entwickelt. Im Zuge der Methodenentwicklung fanden Validierungsstudien statt, um die erreichbare Genauigkeit in Testgebieten zu ermitteln. Die in diesen Studien erzielten Genauigkeiten liefern Anhaltspunkte zur Genauigkeit des Datensatzes: Im Vergleich mit luftgestützten Laserscannerdaten (nomineller Punktabstand 40 cm) ergab sich ein MAE (Mean Absolute Error) von bis zu 7 m und ein RMSE (Root Mean Square Error) bis zu 8 m. Detaillierte Informationen zur Validierung finden Sie unter https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip .
Referenzsystem	
Identifikator des Bezugssystems:	
<i>Code:</i> 25832	
<i>Namensraum:</i> urn:ogc:def:crs:EPSG	



Metadata	
Metadatensatzidentifikator	03ea3208-dab7-4704-84ba-e5e3840b0a82 (<i>automatisch erstellt</i>)
Sprache	ger
Zeichensatz	Utf8
Hierarchieebene	Datenbestand
Bezeichnung des Metadatenstandards	ISO 19115:2003 (GDI-BW)
Version des Metadatenstandards	2.0
Metadatenkontakt:	
<i>Person:</i>	Petra Adler
<i>Organisation:</i>	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
<i>Adresse:</i>	Wonnhaldestraße 4
<i>Ort:</i>	Freiburg
<i>Verwaltungseinheit:</i>	Abteilung Biometrie und Informatik
<i>PLZ:</i>	79100
<i>E-Mail:</i>	petra.adler@forst.bwl.de
<i>Funktion:</i>	Ansprechpartner

Im Zuge der Freischaltung des Kartendienstes müssen auch für den Dienst selbst Metadaten angelegt werden. Dies geschieht auch über den Metadateneditor des Geoportal-BW.

Aufgrund abweichender organisatorischer und struktureller Voraussetzungen bei anderen Behörden und Organisationen, können die benötigten Arbeitsschritte und genutzte Software für die Bereitstellung der Kartendienste von der Beschreibung oben abweichen.

5.3 Nutzbarkeit der bereitgestellten F³-Daten

In den oben beschriebenen Herangehensweisen zur Datenbereitstellung werden ausschließlich Kartendienste (WMS) bereitgestellt. Diese eignen sich lediglich für Visualisierungszwecke und zur Weitergabe von Hintergrundinformationen, da nur eine Abbildung der Daten übermittelt wird. Weitergehende, automatisierte Auswertungen sind damit nicht möglich. Hierfür müssen Datendienste angeboten werden, die die tatsächlichen Geodaten übermitteln. Für Rasterformate kann dies mit einem WCS erreicht werden, der den Nutzenden Zugriff auf die tatsächlichen Pixelwerte der Raster erlaubt. Zum Beispiel ließe sich mit den Funktionalitäten von ESRI's ArcGIS Server der WCS analog zur Erstellung des WMS (siehe Abschnitt 5.1) aufbauen. Anstatt „WMS“ müsste dann „WCS“ als Art des Image Services gewählt werden.

6 Empfehlungen aus dem F³-Projekt

Dieses Projekt kann grundsätzlich keine starre, für alle Situationen passende Lösung für die Datenbereitstellung anbieten. Vielmehr ist das Ziel, den Nutzenden der Projektergebnisse Informationen bereitzustellen, die helfen eine für die eigene Organisation und die eigenen Umstände passende Lösung auf dem aktuellen Stand der Technik und unter Beachtung der rechtlichen Lage zu entwickeln. Nachfolgend werden Empfehlungen zur Datenbereitstellung aufgeführt, die auf den im F³-Projekt gemachten Erfahrungen und gewonnenen Informationen basieren.

6.1 Empfehlungen zur Bereitstellungstechnik

Für die Datenbereitstellung sollten nach Möglichkeit bereits bestehende Infrastruktur und Online-Plattformen genutzt werden. Dies war auch ein Ergebnis der Diskussionen während des F³-Statuskolloquiums, das am 17. September 2019 in Freiburg i.Br. stattfand. Wie bereits in Abschnitt 5 dargestellt, sind damit einige Vorteile verbunden. Hierzu zählen die erleichterte Kombinierbarkeit der Waldstrukturdaten mit anderen, auf der entsprechenden Plattform befindlichen Geodaten sowie die Vermeidung zusätzlichen Aufwands durch den Aufbau und die Unterhaltung einer eigenen Plattform. Besonders im Hinblick auf eine INSPIRE-konforme Metadatenhaltung kann die Datenbereitstellung über vorhandene Geodatenportale der Bundesländer effektiv umgesetzt werden.

6.2 Empfehlungen die rechtliche Lage betreffend

Die Ergebnisse der im Rahmen des F³-Projekts eingeholten juristischen Beratung können explizit nur als erste Orientierung für die Umsetzung einer Datenbereitstellung dienen. Es wird ausdrücklich empfohlen jeden konkreten Fall der Datenbereitstellung juristisch beurteilen zu lassen.

Zudem ist es wichtig zu beachten, dass trotz juristischer Prüfung und Freigabe eventuell politische Bedenken gegen eine weitreichende Bereitstellung mancher Datensätze sprechen. Dies war ein Ergebnis der Diskussionen aus dem F³-Statuskolloquium. Interne Nachfragen bei Mitarbeitenden der FVA, die Erfahrung mit der Online-Bereitstellung forstlicher Daten haben, ergaben jedoch keine Hinweise auf zu erwartende Schwierigkeiten aufgrund politischer Bedenken innerhalb der zuständigen Landesverwaltung. Eine an der NW-FVA durchgeführte Literaturrecherche zu den Sicht- und Handlungsweisen forstlicher Akteure zum Thema Bereitstellung forstlicher Strukturdaten ergab keine klare Linie. Waldbesitzende befürchten Nachteile, wenn z. B. Informationen über Holzvorräte auf ihren Flächen bekannt werden. Naturschutzverbände fordern einen Zugang zu den Daten aus Landeswäldern. Allgemein herrscht Unsicherheit darüber welche Daten wie bereitgestellt werden können oder müssen, das wird auch in Diez (2012)¹⁷ festgestellt. Besonders das Betriebs- und Geschäftsgeheimnis in Bezug auf Forstbetriebsdaten wird von den Akteuren unterschiedlich interpretiert. So stellt sich der Bund Deutscher Forstleute Nordrhein-Westfalen die Grundsatzfrage, ob die Ergebnisse einer Forsteinrichtung öffentlich oder Betriebsgeheimnisse sind.¹⁸ In den Grundsatzpositionen des Hessischen Waldbesitzerverbandes wird folgende Position vertreten: „Auf die forstbetriebliche Flächeneinteilung des Waldes bezogene Daten jeglicher Art sind Betriebsgeheimnisse, die vor dem Zugriff Dritter rechtlich wirksam zu schützen sind“¹⁹. Und in Rheinland-Pfalz stellt der Landesbeauftragte für Datenschutz und die Informationsfreiheit klar, dass der Begriff der Umweltinformationen sehr weit gefasst ist und auch Inventurdaten der Forsteinrichtung informationspflichtig sind.²⁰

¹⁷ Diez, D. (02 2012). Ist der Datenschutz Finis Terrae auf unserer Reise in einen offenen Geodatenmarkt? zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 2/2012. <Online: https://geodaesie.info/zfv/heftbeitrag/783/zfv_2012_2_Diez.pdf [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

¹⁸ BDF NRW (2015). Stellungnahme des BDF NRW zum Entwurf des Landesnaturschutzgesetz NRW. BDF-Ticker 06/2015. <Online: <https://sbc7e2bc2e6abf267.jimcontent.com/download/version/1544434122/module/11548862998/name/Ticker%2006.2015.pdf> [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

¹⁹ Hessischer Waldbesitzerverband e.V. (2016). Grundsatzpositionen des Hessischen Waldbesitzerverbandes. Butzbach: Hessischer Waldbesitzerverband e.V. <Online: <https://www.hesswald.de/wp-content/uploads/2012/11/Beschlossene-Grundsatzpositionen-HWV-13.10.2016.pdf> [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

²⁰ Kugelmann, D. (2020). Informationsbogen zu den Veröffentlichungspflichten von Umweltinformationen. Stand 26.06.2020. <Online:

Im Jahr 2011 forderte Greenpeace mit Berufung auf Umweltinformationsgesetze von den 13 Flächenbundesländern umfassende Informationen zum Zustand und zur Bewirtschaftung alter Buchenwälder. Diese haben unterschiedlich auf die Anfrage reagiert. Während einige Länder die Daten umgehend herausgegeben haben, verweigerten andere Länder zumindest die Herausgabe bestimmter Daten. So haben die Niedersächsischen Landesforsten (NLF) zunächst einen Teil der Daten geliefert, aber die Planungsdaten mit Berufung auf das Betriebsgeheimnis zurückgehalten. Hessen-Forst hat unter anderem digitale Bestandeskarten (mit der Begründung der Verletzung von Rechten am geistigen Eigentum), Planungsdaten (unter Berufung auf das Geschäftsgeheimnis) und Daten zum vermarkteten Holz (da es sich nicht um Umweltinformationen handele) nicht herausgegeben.²¹ Auch die Bayerischen Staatsforsten (BaySF) verweigerten die Herausgabe bestimmter Daten mit der Begründung, dass die Daten so nicht vorlägen. Daraufhin hat Greenpeace eine Klage gegen die NLF, die BaySF und Hessen-Forst eingereicht. Mit den NLF einigte sich Greenpeace durch Vermittlung des Landwirtschaftsministeriums außergerichtlich auf einen Kompromiss, woraufhin die Klage zurückgezogen wurde. Hessen-Forst hat die Daten übergeben, nachdem das Land Hessen sich in einem Vergleich mit Greenpeace über die Bereitstellung der Daten verständigt hat.²² Im Fall der BaySF folgte das Gericht dem Ablehnungsgrund und wies die Klage in erster Instanz ab. Greenpeace lehnte es im anschließenden Berufungsverfahren ab eine Verpflichtungserklärung abzugeben, in der sie zusagen gegen rechtswidrige Aktionen vorzugehen. Daraufhin stellte der Verwaltungsgerichtshof eine Ablehnung der Klage in Aussicht, mit Verweis auf negative Auswirkungen für die öffentliche Sicherheit. Begründet wurde dies damit, dass Aktivisten die Daten nutzen könnten, um die Waldwirtschaft zu behindern.²³ Gleichzeitig stellte das Gericht aber auch klar, dass die Daten andernfalls bereitgestellt werden müssten. Bei den geforderten Daten stünden weder das Geschäfts- oder Betriebsgeheimnis noch die Rechte an geistigem Eigentum entgegen. Zusätzlich wurde aufgeführt, dass selbst wenn diese Bedingungen erfüllt sein sollten, das öffentliche Interesse überwiege. Greenpeace hat daraufhin die Klage zurückgenommen.²⁴

Neben der rechtlichen Perspektive gibt dieser Fall auch Aufschluss darüber, dass unterschiedliche Forstakteure verschiedene Sichtweisen auf das Thema der Datenveröffentlichung haben. So nennt der Präsident der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Waldbesitzerverbände die Herausgabe der niedersächsischen Daten einen „beispiellosen Kniefall vor den grünen Lobbyisten“ und auch der Präsident der niedersächsischen Waldbesitzer fordert, dass Betriebsdaten wirksam geschützt werden müs-

<https://www.datenschutz.rlp.de/fileadmin/lfdi/Dokumente/Publikationen/Informationsbogen20072020.pdf> [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

²¹ Hessischer Landtag (2012). Kleine Anfrage der Abg. Martina Feldmayer (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN) vom 01.08.2012 betreffend Auskunft über den Zustand wertvoller alter Buchenwälder an Greenpeace und Entwicklung in Bayern und Antwort der Ministerin für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Hessischer Landtag - Drucksache 18/05987. <Online: <http://starweb.hessen.de/cache/DRS/18/7/05987.pdf> [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

²² Hessischer Landtag (2017). Antwort der Landesregierung auf die Große Anfrage der Fraktion der FDP betreffend: Zukunft der Forstwirtschaft in Hessen, Drucksache 19/4781. Hessischer Landtag - Drucksache 19/5137. <Online: <http://starweb.hessen.de/cache/DRS/19/7/05137.pdf> [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

²³ Spieth, W. F., und Hellermann, N. (2019). Umweltverbände: Mit Macht kommt Verantwortung. Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht, 11/2019, S. 745-751. <Online: https://pswp.de/wp-content/uploads/2019/06/NVwZ_2019_11.pdf [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

²⁴ Nebel, S. D. (2017). Zugang zu Umweltinformationen eines Staatsforstunternehmens. VGH München, Beschluss v. 08.02.2017 – 22 B 14.2304. <Online: <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/Y-300-Z-BECKRS-B-2017-N-103816> [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

sen.²⁵ Greenpeace dagegen vergleicht die Datenverweigerung Bayerns und Hessens mit dem „preußischen Amtsgeheimnis aus der Kaiserzeit“²⁶.

Wohl auch wegen solcher Konflikte fordert der Baden-Württembergische Forstverein e.V. für die Landschaftsplanung im Rahmen der Forsteinrichtung alle Grundlagendaten offenzulegen, sowohl von forstlicher als auch naturschutzfachlicher Seite.²⁷ Und in einer Antwort der Bundesregierung auf eine Kleine Anfrage seitens der FDP zum Thema der Entwicklungspotenziale digitaler Systeme in der Forstwirtschaft heißt es, dass datenschutzrechtliche Vorgaben umzusetzen und bei den Akteuren eine entsprechende Akzeptanz für den Austausch von Daten bzw. die gemeinsame Datennutzung zu schaffen sei.²⁸ Zudem können gerade auch (Klein-)Privatwaldbesitzende von der Bereitstellung von Waldstrukturdaten profitieren, da deren Erstellung durch die Waldbesitzenden selbst aufgrund mangelnder Ressourcen nur schwer durchführbar ist.

Aufgrund dieser Recherche und Erfahrungen aus dem F³-Projekt und anderen Projekten wird empfohlen, die Datenbereitstellung grundsätzlich in Abstimmung mit der der eigenen Behörde übergeordneten Stellen durchzuführen. Dadurch können frühzeitig mögliche politische Bedenken erkannt und abgebaut werden. Dies ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung der F³-Projektziele.

Die im F³-Projekt entwickelten Verfahren bauen auf die Nutzung von Daten der Landesvermessungsinstitutionen, vor allem digitale Luftbilder und Geländemodelle. Entsprechende Nutzungsbedingungen, die sich auch auf abgeleitete Daten auswirken können, müssen deshalb auch bei der Bereitstellung der Datensätze berücksichtigt werden. Beispielsweise könnte die Nennung der Herkunft der Datengrundlage (digitale Luftbilder) in den Nutzungsbedingungen vorgeschrieben sein. Zudem können sich die mit den Verfahren des F³-Projekts abgeleiteten Datensätze mit Datensätzen überschneiden, die gegen Entgelt von den Landesvermessungsinstitutionen selbst angeboten werden. Dies ist z. B. für das digitale Oberflächenmodell (DOM) und das normalisierte Digitale Oberflächenmodell (nDOM) zu erwarten. Es wird empfohlen dies vor der Datenbereitstellung zu prüfen und sich mit der entsprechenden Landesvermessungsinstitution abzustimmen. Möglicherweise muss dann auch auf die Bereitstellung dieser Datensätze verzichtet werden.

²⁵ AGDW. (2013). Waldbesitzer kritisieren Herausgabe von Betriebsinterna an Greenpeace. Online-Artikel 02.10.2013. <Online: <https://www.forstpraxis.de/waldbesitzer-kritisieren-herausgabe-von-betriebsinterna-an-greenpeace/> [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

²⁶ Greenpeace. (2013). Bayern, Hessen und Niedersachsen verweigern Auskunft über Wälder. Presseerklärung 12.04.2013. <Online: <https://www.greenpeace.de/presse/presseerklaerungen/bayern-hessen-und-niedersachsen-verweigern-auskunft-ueber-waelder> [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

²⁷ AG Wald BW. (2011). Stellungnahme zur Naturschutzstrategie 2020, Stand: 26.09.2011. <Online: <https://www.forstverein.de/bwfv/positionen/naturschutzstrategie-2020.html> [letzter Zugriff 16.10.2020]>.

²⁸ Deutscher Bundestag (2019). Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Karlheinz Busen, Frank Sitta, Dr. Gero Clemens Hocker, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/6554 – Forst- und Waldwirtschaft 4.0. Deutscher Bundestag - Drucksache 19/7162. <Online: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/071/1907162.pdf> [letzter Zugriff 16.10.2020]>.



Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten

Verbundvorhaben „Entwicklung von Methoden und Verfahren zur flächendeckenden und homogenen Generierung von Waldparametern auf der Basis digitaler Oberflächenmodelle aus Luftbilddaten (F³)“

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)
Wonnhaldestr. 4, 79100 Freiburg

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Förderkennzeichen: 22025014 (FVA), 22024816 (NW-FVA)

Dokumentation zu Meilenstein 8

„Verfahren zur Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse“



Meilenstein 8

Verfahren zur Modellierung von Holzvorrat und oberirdischer Biomasse

A	Einleitung.....	1
B	Referenzdaten	2
C	Aufbereitung der Rasterdaten	3
C.1	Strukturmetriken aus Oberflächenmodellen	3
C.2	Topographiemetriken aus dem digitalen Geländemodell (DGM1).....	4
C.3	Klimadaten (Niederschlag und Temperatur).....	5
C.4	Bodendaten	6
C.5	Baumarten.....	7
D	Modellierung / Erstellen von Holzvorrats- und Biomassekarten	8
E	Modellierung von Holzvorrat und Biomasse in den Testgebieten des F ³ -Projekts.....	9
E.1	Nordwestdeutsche Testgebiete	9
E.2	Südwestdeutsche Testgebiete	13

A Einleitung

Für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung sind Daten über die räumliche Verteilung von Holzvorräten eine wichtige Basis. Insbesondere in Zeiten häufig auftretender Kalamitäten durch Sturm und Insekten (z. B. Borkenkäfer) stellen sie eine wertvolle Grundlage für die Planung von Maßnahmen der Holzernte, der Verjüngung, des Waldschutzes und des Naturschutzes dar. Daten über die Verteilung und Höhe von Biomassevorräten spielen ebenfalls eine große Rolle, insbesondere im Rahmen der Erfassung der Kohlenstoffspeicherleistung der Wälder. Um flächendeckende Daten bezüglich Holzvorrat und Biomasse abzuleiten, stellen wir ein Verfahren zur Verfügung, welches basierend auf Oberflächenmodellen, Baumartenkarten und Standortdaten Vorräte von Holz und oberirdischer Biomasse modelliert.

Das Verfahren wurde in einem R-Skript implementiert, welches Daten aus verschiedenen Quellen integriert und für die Modellierung verwendet. Die wichtigsten Eingangsdaten sind Daten zur Struktur der Waldbestände, die aus normalisierten Oberflächenmodellen abgeleitet werden. Weitere Datensätze, welche die Baumartenzusammensetzung, die Bodeneigenschaften, die Topographie und das Klima beschreiben, haben das Potential die Vorhersage zu verbessern, wenn sie in die Modellierung eingebunden werden. Im Folgenden zeigen wir anhand von Datensätzen zu Boden, Klima, Topographie und Baumartenzusammensetzung, wie die Modellierung durch diese Datensätze unterstützt werden kann. Die verwendeten Daten liegen deutschlandweit als Rasterdaten vor und sind zum größten Teil frei zugänglich. Daten zur Baumartenzusammensetzung können mit frei verfügbaren Sentinel-2-Satellitendaten generiert werden (siehe Meilenstein M5¹). Daten zur Topographie können bei den Landesvermessungsinstitutionen bezogen werden, sind jedoch nicht immer kostenfrei. Kostenfreie Klimadaten werden z. B. vom Deutschen Wetterdienst (DWD) mit einer Auflösung von 1 x 1 km bereitgestellt. Bodendaten können aus der globalen Datenbank soilgrids.org mit einer Auflösung von 250 x 250 m bezogen werden. Die hier verwendeten Datensätze dienen als Beispiele, um zu illustrieren, wie ihre Einbindung in das Verfahren erfolgt. Die deutschlandweite Verfügbarkeit und der freie Zugriff auf die Daten spielten bei der Auswahl eine wichtige Rolle. Sollten den Nutzenden höher aufgelöste bzw. qualitativ höherwertigere Daten zur Verfügung stehen oder sollten andere bzw. zusätzliche Parameter für wichtig erachtet werden, können auch diese Datensätze in das Verfahren integriert und für die Modellierung verwendet werden. Es ist darauf zu achten, dass alle Datensätze in einer gemeinsamen Projektion und gleicher horizontalen Auflösung (20 x 20 m) vorliegen. Aufgrund der Verwendung eines Random Forest-Modells, das problemlos weitere Datensätze bei der Modellierung berücksichtigen kann, ist das Verfahren flexibel erweiterbar bzw. bei nicht Vorhandensein einzelner Datensätze reduzierbar.

Für die Modellierung unabdingbar sind Referenzdaten, z. B. aus forstlichen Inventuren, aus denen Informationen über Holzvorrat und oberirdische Biomasse pro Stichprobeneinheit abgeleitet und einem bestimmten Geländeausschnitt zugeordnet werden können. Solche Daten werden benötigt um die Modelle zur Vorhersage von Holzvorräten und Biomasse zu trainieren und zu validieren.

Im Folgenden erläutern wir das Verfahren zur Modellierung von Holzvorrat und Biomasse unter Verwendung der oben angesprochenen Datensätze. Die Aufbereitung der Eingangsdaten, die

¹ M5 – „Verfahren zur Ableitung von Baumarteninformationen aus Fernerkundungsdaten“:
https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

Modellierung und die Validierung der Ergebniskarten werden exemplarisch dargestellt. Wir möchten jedoch darauf hinweisen, dass die Qualität der Modellierung mitunter stark von der Qualität der verwendeten Daten abhängig ist. Die von den Referenzdaten erfasste Variabilität der Waldstrukturen, die Anzahl und Qualität der Referenzdatenpunkte sowie die Genauigkeit der Oberflächenmodelle, Baumartenkarten und Standortdaten spielen eine nicht zu unterschätzende Rolle. Da die Referenzdaten im Rahmen einer Kreuzvalidierung ebenfalls zur Validierung genutzt werden, ist darauf hinzuweisen, dass die daraus abgeleiteten Maßzahlen zur Einschätzung der Modellgenauigkeit sich auch nur auf die hierin abgebildeten Waldzustände beziehen. Wenn z. B. der Referenzdatensatz keine Daten aus Auwäldern enthält, werden die für diese Wälder modellierten Holz- bzw. Biomassevorräte hinsichtlich ihrer Güte nicht abgebildet. Wenn der Referenzdatensatz nur Inventurpunkte beinhaltet, die in Beständen mit einem Alter > 50 Jahre aufgenommen wurden, wird es nicht möglich sein, die Güte der Modellierung für Bestände jüngeren Alters zu quantifizieren. Die Abhängigkeit der Modellierungs- und der Validierungsergebnisse von den verwendeten Eingangsdaten sollte der Nutzer bei der Interpretation der Karten bzw. der Qualitätsangaben bedenken.

B Referenzdaten

Referenzdaten für den Holzvorrat und die Biomasse stammen üblicherweise aus forstlichen Stichprobeninventuren, wie z. B. der Betriebsinventur der Niedersächsischen Landesforsten oder auch der Bundeswaldinventur (BWI). Diese Daten enthalten Informationen zu Brusthöhendurchmesser (BHD) und Baumhöhe der an den Stichprobenpunkten ausgewählten Bäume. Aus diesen Einzelbaummessungen kann für jeden Baum mittels geeigneter Modelle das Holzvolumen bzw. die Biomasse modelliert werden. Für die Modellierung dieser Einzelbaumwerte sollten regional angepasste Modelle verwendet werden, um möglichst akkurat Holzvorrat und oberirdische Biomasse pro Baum bestimmen zu können. Sollten keine regional angepassten Modelle zur Verfügung stehen, kann z. B. auf Biomassemodelle zurückgegriffen werden, die für die dritte Bundeswaldinventur (BWI 3) entwickelt wurden² und im R-Paket *rbdapro*³ implementiert sind. Die ermittelten Werte für Holzvorrat und Biomasse der Einzelbäume müssen anschließend unter Berücksichtigung der Größe der Probestfläche pro Stichprobenpunkt aggregiert und auf Schätzungen pro Hektar (ha) hochgerechnet werden. Pro Stichprobenpunkt muss außerdem die Höhe des höchsten Baumes bestimmt und in einer Spalte der Attributtabelle gespeichert werden. Die Inventurdaten sollten als Punkte in einer Shape-Datei abgespeichert werden, deren Attributtabelle für jeden Stichprobenpunkt die folgenden Angaben enthält:

1. Holzvorrat (m³/ha)
2. Oberirdische Biomasse (t/ha)
3. Höhe des höchsten Baumes

² Kändler, G., Bösch, B., 2012. Methodenentwicklung für die 3. Bundeswaldinventur: Modul 3 Überprüfung und Neukonzeption einer Biomassefunktion. Abschlussbericht Version 2b. Online: [https://gitlab.com/vochr/rbdapro/-/blob/809449728a9af21aa9f3a850645dd2dda4908d64/inst/doc/BDAT References/KaendlerBoesch2012_BiomassFunction_german.pdf](https://gitlab.com/vochr/rbdapro/-/blob/809449728a9af21aa9f3a850645dd2dda4908d64/inst/doc/BDAT%20References/KaendlerBoesch2012_BiomassFunction_german.pdf) [letzter Zugriff 01.12.2020].

³ R-Paket *rbdapro*: <https://gitlab.com/vochr/rbdapro> [letzter Zugriff 30.11.2020]

C Aufbereitung der Rasterdaten

C.1 Strukturmetriken aus Oberflächenmodellen

Python Skript: *Metriken_Holzvolumen_F3.py*

*Bevor das Python Skript *Metriken_Holzvolumen_F3.py* gestartet werden kann, muss in **Zeile 196** der Pfad zum Eingabeordner, der die normalisierten Oberflächenmodelle im LAZ-Format enthält, spezifiziert werden. In **Zeile 198** der Pfad zum Ausgabeordner, der die generierten Metriken enthalten soll, angegeben werden. Der Ausgabeordner muss zuvor manuell angelegt werden. In **Zeile 202** muss das Koordinatenreferenzsystem (UTM Zone 32N oder Gauß-Krüger Zone 3) spezifiziert werden, in dem die Daten vorliegen. Dies geschieht über die Angabe des entsprechenden EPSG-Codes: 25832 (UTM Zone 32 N), 25833 (UTM Zone 33 N) oder 31466 / 31467 / 31468 (GK 2 / 3 / 4). Außerdem muss in **Zeile 205** der Pfad zum „bin“-Ordner der LAStools spezifiziert werden.*

Die Berechnung der Strukturmetriken basiert auf normalisierten Oberflächenmodellen (nDOM) im LAZ-Format, wie sie durch das in Meilenstein M3⁴ beschriebene Verfahren bereitgestellt werden. Mittels des Python-Skripts *Metriken_Holzvolumen_F3.py*⁵ werden unter Verwendung der Software LAStools⁶ aus den nDOM-Dateien Statistiken abgeleitet, die die Struktur des Waldes pro 20 x 20 m-Flächen beschreiben. Die Auswahl der mittels des Python-Skripts berechneten Metriken orientiert sich maßgeblich an den von Schumacher et al. (2019)⁷ für die Modellierung des Holzvorrats in Baden-Württemberg verwendeten Metriken. Das Skript berechnet kachelweise die folgende Metriken und legt sie in Unterordnern ab:

- Mittlere Höhe des nDOM pro 20 x 20 m-Pixel
 - o LAStools „lasgrid“
 - o Ordner: mean_20

- Maximale Höhe des nDOM pro 20 x 20 m-Pixel
 - o LAStools „lasgrid“
 - o Ordner: max_20

- Standardabweichung der Höhenwerte des nDOM pro 20 x 20 m-Pixel
 - o LAStools „lasgrid“
 - o Ordner: std_20

⁴ M3 – „Standardisiertes Verfahren zur Ableitung normalisierter Oberflächenmodelle (nDOM) aus Luftbildern“: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

⁵ Python-Skript *Metriken_Holzvolumen_F3.py*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

⁶ LAStools: <https://rapidlasso.com/lastools/> [letzter Zugriff 30.11.2020]

⁷ Schumacher, J., Rattay, M., Kirchhöfer, M., Adler, P., Kändler, G. 2019. Combination of Multi-Temporal Sentinel 2 Images and Aerial Image Based Canopy Height Models for Timber Volume Modelling. *Forests* 2019, 10, 746.

- 95. Perzentil der Höhenwerte des nDOM pro 20 x 20 m-Pixel
 - o LAStools „lascanopy“
 - o Ordner: perc95_20
- 75. Perzentil der Höhenwerte des nDOM pro 20 x 20 m-Pixel
 - o LAStools „lascanopy“
 - o Ordner: perc75_20
- Prozentualer Anteil der Fläche (20 x 20 m), die mit Höhenwerten > 6 m überschirmt ist
 - o LAStools „lascanopy“
 - o Ordner: cctot6_20
- Prozentualer Anteil der Fläche (20 x 20 m), die mit Höhenwerten > 20 m überschirmt ist
 - o LAStools „lascanopy“
 - o Ordner: cctot20_20

Nachdem die Metriken berechnet wurden, müssen die Kacheln zu Mosaiken zusammengefügt werden. Hierzu kann die Software ArcGIS (Tool: Mosaic To New Raster) oder QGIS (Tool: Verschmelzen) oder das R-Skript *„mosaic_tiles_F3.R“*⁸ verwendet werden. Bei Verwendung des R-Skripts muss lediglich in Zeile 24 der Pfad zum Verzeichnis, das die Ordner mit den zuvor erzeugten Strukturmetriken enthält, angepasst werden (dieser entspricht dem im Python-Skript *„Metriken_Holzvolumen_F3.py“*⁵ spezifizierten Ausgabeordner). Das R-Skript erstellt in diesem Verzeichnis ein neues Unterverzeichnis mit dem Namen „Mosaike“, innerhalb dessen die zu einem Mosaik zusammengefügt Dateien abgelegt werden.

C.2 Topographiemetriken aus dem digitalen Geländemodell (DGM1)

Zur Ableitung topographischer Parameter wird das digitale Geländemodell DGM1 im LAZ-Format verwendet. Um die Auflösung des DGM von 1 m an die benötigte Auflösung von 20 m anzupassen und um die Parameter mittlere Geländehöhe und Standardabweichung (Indikator für die Steigung des Geländes) zu berechnen, wird das LAStools Modul lasgrid verwendet. Das Geländemodell ist im Normalfall keinen Änderungen unterworfen, sodass die Ableitung der genannten Parameter nur einmalig durchgeführt werden muss. Daher wird hierfür kein Software-Skript zur Verfügung gestellt. Die Berechnung kann über das GUI der Software LAStools durch die Wahl der folgenden Einstellungen erfolgen:

Mittlere Geländehöhe:

1. Auswahl der zu prozessierenden DGM1.laz-Dateien
2. Anwahl der Option „merge files into one“
3. Spezifikation des Ausgabeordners
4. Spezifikation des Dateinamens
5. Spezifikation „pixel/step size“ = 20
6. Spezifikation „item“ = elevation
7. Spezifikation „op“ = average (Berechnung der mittleren Geländehöhe)
8. Spezifikation „fill n pixels“ = 3

⁸ R-Skript *„mosaic_tiles_F3.R“*: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

9. Spezifikation „format“ = tif

Standardabweichung der Höhenwerte

Zur Berechnung der Standardabweichung sind dieselben Einstellungen zu wählen, wie zur Berechnung der mittleren Geländehöhe (siehe oben), einzig die unter Punkt 7 genannte Einstellung für „op“ muss angepasst werden. Hier muss „op“ = **stddev** gewählt werden.

C.3 Klimadaten (Niederschlag und Temperatur)

Flächendeckende Daten zur Beschreibung der klimatischen Bedingungen liegen deutschlandweit in einer Auflösung von 1 x 1 km vor und können kostenfrei vom DWD bezogen werden. Folgende Datensätze wurden im Rahmen des F³-Projektes für die Modellierung verwendet:

- Das 30-jährige Mittel (1981 – 2010) der Niederschlagshöhe
 - o Abgeleitet unter Berücksichtigung der langjährigen Klimatologie aus Daten der DWD-Stationen und qualitativ gleichgestellten Partnernetzstationen in Deutschland.
 - o https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/precipitation [letzter Zugriff 30.11.2020]
 - Datei: grids_germany_multi_annual_precipitation_1981-2010_17.asc.gz
- Das 30-jährige Mittel (1981 – 2010) des monatlich gemittelten täglichen Lufttemperaturmaximums (in 2 m Höhe)
 - o Abgeleitet unter Berücksichtigung der Höhenabhängigkeiten aus Daten der DWD-Stationen und qualitativ gleichgestellten Partnernetzstationen in Deutschland.
 - o https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/air_temperature_max [letzter Zugriff 30.11.2020]
 - Datei: grids_germany_multi_annual_air_temp_max_1981-2010_17.asc.gz

Nach dem Entpacken der ZIP-Archive liegen die Datensätze in einer Gauß-Krüger-Projektion (EPSG: 31467) im ASC-Dateiformat vor. Um sie für die weitere Verarbeitung aufzubereiten, muss ihre Auflösung auf 20 m geändert werden sowie die Projektion gegebenenfalls an die der übrigen Rasterdaten angepasst werden. Außerdem müssen die Dateien im TIF-Format abgespeichert werden. Alle nötigen Prozessierungen lassen sich in einem Schritt mit dem ArcGIS-Tool „Project Raster“ durchführen. Nach dem Aufrufen des Tools müssen das zu prozessierende Raster ausgewählt und die Projektion des Rasters spezifiziert werden (z. B. EPSG: 31467). Bei der Spezifikation der Ausgabedatei muss darauf geachtet werden, dass die Dateiendung „.tif“ verwendet wird. Die gewünschte Projektion der Ausgabedatei sowie die geographische Transformation müssen ebenfalls angegeben werden, z. B. Projektion = EPSG: 25832 und Transformation = DHDN_To_ETRS_1989_8_NTv2. Als „Resampling Technique“ sollte die Option „BILINEAR“ gewählt werden und als gewünschte Pixelgröße X = 20 und Y = 20. Um sicherzustellen, dass die Lage der Pixel der erzeugten Datei exakt der Lage der Pixel der anderen Daten entspricht, muss am unteren Rand des Dialogfensters die Schaltfläche „Environments...“ angeklickt werden. Im sich daraufhin öffnenden Dialogfenster „Environment Settings“ muss der Eintrag „Processing Extent“ geöffnet und ein „Snap Raster“ ausgewählt werden. Als „Snap Raster“ sollte eines der Strukturparameter-Raster (z. B. die Datei mean_20_mosaic.tif) aus Abschnitt C.1 ausgewählt werden. Schließen Sie nun das Fenster „Environment Settings“ durch klicken auf „OK“ und klicken Sie im Fenster „Project Raster“ ebenfalls „OK“, um die Prozessierung zu starten.

C.4 Bodendaten

Um Bodeneigenschaften in der Modellierung von Holzvorrat und Biomasse berücksichtigen zu können, kann auf Daten von ISRIC – World Soil Information⁹ („Soilgrids-Daten“) zurückgegriffen werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es sich bei diesen Daten um einen globalen Datensatz handelt, der nach einem global konsistenten Verfahren basierend auf globalen Kovariaten und global angepassten Modellen erzeugt wurde. Es wird daher empfohlen, für nationale bzw. regionale Anwendungen Datensätze zu verwenden, die besser an die lokalen Gegebenheiten angepasst sind. Da unseres Wissens kein deutschlandweit nach einem einheitlichen Verfahren generierter Datensatz bezüglich der Bodeneigenschaften verfügbar ist, ist im Folgenden die Verarbeitung von Soilgrids-Daten erläutert. Es sei aber darauf hingewiesen, dass bei Verfügbarkeit von akkurateren Daten die Verwendung selbiger in Betracht gezogen werden sollte.

Soilgrids-Daten können über das Webportal www.soilgrids.org kostenfrei heruntergeladen werden. Die verfügbaren Datenkacheln haben eine Ausdehnung von 200 x 200 km und eine Auflösung von 250 m. Alternativ kann auf die Daten auch über einen Web Coverage Service (WCS)¹⁰ zugegriffen werden. Um die potentielle Kationenaustauschkapazität, den Stickstoffvorrat (Indikatoren für die Nährstoffversorgung/Bodenfruchtbarkeit) sowie die Lagerungsdichte als Indikator für die Durchwurzelbarkeit aus den Soilgrids-Daten berechnen zu können, müssen folgende Daten-Layer für alle 6 verfügbaren Bodentiefen (0 – 5 cm, 5 – 15 cm, 15 – 30 cm, 30 – 60 cm, 60 – 100 cm, 100 – 200 cm) über das Portal heruntergeladen werden:

- Bulk Density (cg/cm³)
- Coarse Fragments (cm³/dm³)
- Cation Exchange Capacity (at pH7) (mmol(c)/kg)
- Nitrogen (cg/kg)

Die Dateien müssen nach dem Herunterladen umbenannt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Dateien entsprechend ihrer Bodentiefe einen Indexwert erhalten. Dieser Indexwert muss so vergeben werden, dass der Bodentiefe 0 – 5 cm der Wert 1 zugewiesen wird, der Bodentiefe 5 – 15 cm der Wert 2 usw. bis zur Bodentiefe 100 – 200 cm, der der Wert 6 zugewiesen wird.

- Bulk Density → `bulkdensity_1.tif` bis `bulkdensity_6.tif`
- Coarse Fragments → `coarse_fragments_1.tif` bis `coarse_fragments_6.tif`
- Cation Exchange Capacity (at pH7) → `cation_exchange_capacity_1.tif` bis `cation_exchange_capacity_6.tif`
- Nitrogen → `nitrogen_1.tif` bis `nitrogen_6.tif`

Nachdem die Datenlayer heruntergeladen und umbenannt wurden, kann das R-Skript `soilgrids_F3.R`¹¹ verwendet werden um die Daten zu prozessieren. Das R-Skript berechnet aus den Datenlayern:

1. Maximale Bodendichte des Hauptwurzelraums (kg/dm³)
 - a. Dateiname: `bulkdensity_max.tif` (Hauptwurzelraum 0 – 100 cm)

⁹ International Soil Reference and Information Centre (ISRIC): <https://www.isric.org/> [letzter Zugriff 30.11.2020]

¹⁰ soilgrids WCS URLs: <https://maps.isric.org/> [letzter Zugriff 23.11.2020]

¹¹ R-Skript `soilgrids_F3.R`: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

2. Stickstoffvorrat (t/ha)
 - a. Dateiname: nitrogen1.tif (Oberboden 0 – 30 cm)
 - b. Dateiname: nitrogen2.tif (Hauptwurzelraum 0 – 100 cm)
 - c. Dateiname: nitrogen3.tif (Gesamtes Profil 0 – 200 cm)
3. Potentielle Kationenaustauschkapazität (kmol(c)/ha)
 - a. Dateiname: cec1.tif (Oberboden 0 – 30 cm)
 - b. Dateiname: cec2.tif (Hauptwurzelraum 0 – 100 cm)
 - c. Dateiname: cec3.tif (Gesamtes Profil 0 – 200 cm)

R-Skript: `soilgrids_F3.R'`

*Bevor das R-Skript `soilgrids_F3.R'` gestartet werden kann, muss in **Zeile 55** der Pfad zum Eingabeordner, der die heruntergeladenen Soilgrids-Daten enthält, spezifiziert werden. In **Zeile 57** muss der Pfad zum Ausgabeordner, der die prozessierten Daten enthalten soll, angegeben werden. Der Ausgabeordner muss zuvor manuell angelegt werden.*

Um die Daten für die weitere Verarbeitung aufzubereiten, muss ihre Auflösung auf 20 m erhöht sowie die Projektion der Soilgrids-Daten (Homolosine WGS84¹²) an die Projektion der übrigen Daten angepasst werden. Hierzu kann abermals das ArcGIS-Tool „Project Raster“ Verwendung finden. Nach dem Aufrufen des Tools muss das zu prozessierende Raster ausgewählt und die Ausgabedatei (Dateiendung „.tif“) spezifiziert werden. Die gewünschte Projektion der Ausgabedatei ist ebenfalls anzugeben. Als „Resampling Technique“ sollte die Option „BILINEAR“ gewählt werden und als gewünschte Pixelgröße X = 20 und Y = 20. Um sicherzustellen, dass die Lage der Pixel der erzeugten Datei exakt der Lage der Pixel in den anderen Dateien entspricht, muss am unteren Rand des Dialogfensters die Schaltfläche „Environments...“ gedrückt werden. Im sich daraufhin öffnenden Dialogfenster „Environment Settings“ muss der Eintrag „Processing Extent“ geöffnet und anschließend ein „Snap Raster“ ausgewählt werden. Als „Snap Raster“ sollte eines der Strukturparameter-Raster (z. B. die Datei `mean_20_mosaic.tif`) ausgewählt werden. Schließen Sie nun das Fenster „Environment Settings“ durch klicken auf „OK“ und klicken Sie im Fenster „Project Raster“ ebenfalls „OK“ um die Prozessierung zu starten. Wiederholen Sie diesen Vorgang für alle sieben Daten-Layer.

C.5 Baumarten

Sollte die Ihnen zur Verfügung stehende Baumartenkarte (z. B. erzeugt nach dem in Meilenstein M5¹³ beschriebenen Verfahren) nicht in derselben Projektion und Auflösung wie die übrigen für die Modellierung verwendeten Datensätze vorliegen, muss auch sie mit dem ArcGIS-Tool „Project Raster“ prozessiert werden. Nach dem Aufrufen des Tools muss das zu prozessierende Raster ausgewählt und die Ausgabedatei (Dateiendung „.tif“) spezifiziert werden. Die gewünschte Projektion der Ausgabedatei ist ebenfalls anzugeben. Als „Resampling Technique“ sollte die Option „NEAREST“ gewählt werden und als gewünschte Pixelgröße X = 20 und Y = 20. Um sicherzustellen, dass die Lage der Pixel der erzeugten Datei exakt der Lage der Pixel in den anderen Dateien entspricht, muss am

¹² Homolosine WGS84 Koordinatensystem: <https://www.isric.org/explore/soilgrids/faq-soilgrids#How can I use the Homolosine projection> [letzter Zugriff 23.11.2020]

¹³ M5 – „Verfahren zur Ableitung von Baumarteninformationen aus Fernerkundungsdaten“: https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik und Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation und Skripte 01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

unteren Rand des Dialogfensters die Schaltfläche „Environments...“ gedrückt werden. Im sich daraufhin öffnenden Dialogfenster „Environment Settings“ muss der Eintrag „Processing Extent“ geöffnet und anschließend ein „Snap Raster“ ausgewählt werden. Als „Snap Raster“ sollte eines der Strukturparameter-Raster (z. B. die Datei mean_20_mosaic.tif) ausgewählt werden. Schließen Sie nun das Fenster „Environment Settings“ durch Klicken auf „OK“ und klicken Sie im Fenster „Project Raster“ ebenfalls „OK“ um die Prozessierung zu starten.

D Modellierung / Erstellen von Holzvorrats- und Biomassekarten

Wenn alle für die Modellierung benötigten Datensätze (Referenzdaten als Shape-Datei, Prädiktoren als Rasterdateien) entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweise aufbereitet wurden, kann die Erstellung der Holzvorrats- und Biomassekarten mit Hilfe des R-Skripts *modellierung_volumen_biomasse_F3.R*¹⁴ durchgeführt werden.

R-Skript: *modellierung_volumen_biomasse_F3.R*

Bevor das R-Skript modellierung_volumen_biomasse_F3.R gestartet werden kann, müssen folgende Anpassungen vorgenommen werden:

Zeile 51 *Definition des Arbeitsverzeichnisses (Working Directory)*

Zeilen 55 & 56 *Pfad und Dateiname unter dem die Ausgabedateien (Holzvolumen- und Biomassekarte) gespeichert werden sollen*

Zeile 61 *Pfad zum Referenzdatensatz (Shape-Datei)*

Zeile 65 *Name der Spalte der Referenzdaten-Attributtabelle, die das Holzvolumen enthält*

Zeile 66 *Name der Spalte der Referenzdaten-Attributtabelle, die die Biomasse enthält*

Zeile 67 *Name der Spalte der Referenzdaten-Attributtabelle, die die Höhe des höchsten Baumes pro Stichprobenpunkt enthält*

Zeilen 72 – 78 *Pfade zu den aus dem Oberflächenmodell abgeleiteten Strukturparametern: cctot6, cctot20, mean20, perc75, perc95, std20 und max20*

Zeile 82 *Dateiname des Rasters „max20“ ohne Dateierweiterung .tif*

Zeilen 89 & 90 *Pfade zu den aus dem DGM abgeleiteten Topographiemetriken*

Zeile 95 *Pfad zur Baumartenkarte*

Zeile 97 *Dateiname der Baumartenkarte*

Zeilen 100 – 106 *Pfade zu den Bodendaten: bulk density, cation exchange capacity 1 bis 3, nitrogen 1 bis 3*

Zeilen 111 & 112 *Pfade zu den Klimadaten: Temperatur und Niederschlag.*

¹⁴ R-Skript *modellierung_volumen_biomasse_F3.R*:
https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip

Das Skript liest die aufbereiteten Prädiktoren (Rasterdateien) sowie Referenzdaten (Shape-Datei) ein und führt die folgenden Schritte durch:

- 1.) Maskieren aller Pixel mit einer Kronenüberschirmung < 25%.
- 2.) Zuschneiden aller Rasterdaten auf eine gemeinsame Ausdehnung.
- 3.) Auslesen der Pixelwerte der Rasterdaten an den Koordinaten der Referenzdatenpunkte (Stichprobenpunkte).
- 4.) Detektion und Löschen von Ausreißern: Weicht die höchste Baumhöhe eines Stichprobenpunktes der Referenzdaten um 25% von der höchsten Höhe des Oberflächenmodells an diesem Punkt ab, gilt dieser Datenpunkt als Ausreißer und wird aus dem Datensatz entfernt.
- 5.) Trainieren je eines Random Forest-Modells zur Modellierung von Holzvorrat und Biomasse.
- 6.) Anwendung der Modelle auf die Rasterdaten zur Erzeugung von Holzvorrats- und Biomassekarten.
- 7.) Berechnung der Vorhersagefehler (totaler und relativer RMSE) der Modelle basierend auf den Out-Of-Bag-Samples des Random Forest-Modells. Graphische Ausgabe eines Scatterplots (vorhergesagte vs. beobachtete Werte) inklusive der Vorhersagefehlerwerte.

Anders als bei der Erstellung der Waldstrukturparameter (siehe Meilenstein M4¹⁵), wird den erstellten Holzvorrats- und Biomassekarten kein Farbschema automatisch zugewiesen. Soll ein bestimmtes Farbschema, z. B. das in Abschnitt E dargestellte, Verwendung finden, muss dies durch die Nutzenden zugewiesen werden, z. B. in ArcGIS oder QGIS.

E Modellierung von Holzvorrat und Biomasse in den Testgebieten des F³-Projekts

E.1 Nordwestdeutsche Testgebiete

Für die Testgebiete des F³-Projekts in Nordwestdeutschland in Solling und Harz wurden unter Verwendung der oben beschriebenen Daten und des dargestellten Verfahrens Holzvorrats- und Biomassekarten erstellt. Für das Testgebiet in der Heide wurde keine Modellierung durchgeführt, da hier keine geeigneten Oberflächenmodelle zur Verfügung standen. Dies liegt daran, dass die Luftbildbefliegung des Gebiets Heide zu einem Zeitpunkt im Frühjahr (5. Mai 2016) stattfand, zu dem die Laubbäume noch nicht ausgetrieben hatten. Aufgrund der fehlenden Belaubung ist in den Luftbildern der Waldboden durch die Äste der Laubbäume zu sehen, was während des Image-Matchings dazu führt, dass die abgeleiteten Höhen der Höhe des Waldbodens, also der Geländehöhe, entsprechen und nicht der Vegetationshöhe.

Als Referenzdaten wurden für die Modellierung in den Testgebieten in Solling und Harz Stichprobendaten der Betriebsinventur der Niedersächsischen Landesforsten (NLF) aus den Jahren 2011 und 2012 verwendet. An den Stichprobenpunkten ($n = 2.133$) wurden auf konzentrischen Probekreisen mit Radien von 6 bzw. 13 m alle Bäume mit einem BHD von 7 – 30 cm resp. BHD > 30 cm aufgenommen. Die in den Jahren 2011 und 2012 gemessenen Baumhöhen und BHD wurden mit dem

¹⁵ M4 – „Methodenbeschreibung zur Ableitung von Waldstrukturparametern aus Oberflächenmodellen“:
https://www.waldwissen.net/assets/FVA/Technik_und_Planung/F3-Projekt/F3_Dokumentation_und_Skripte_01.zip [letzter Zugriff 11.01.2021]

Waldwachstumssimulator ForestSimulator (Hansen und Nagel 2014¹⁶) auf das Jahr der Luftbildbefliegung 2016 fortgeschrieben. Die Modellierung des Derbholzvorrats jedes Baumes erfolgte ebenfalls mit dem ForestSimulator. Die Modellierung der oberirdischen Biomasse jedes Baumes erfolgte mit Hilfe des R-Paket *rbdatpro*³. Auf Grundlage dieser Daten wurde für jeden Stichprobenpunkt eine Schätzung des Derbholzvorrats pro ha und der oberirdischen Biomasse pro ha ermittelt.

Unter Verwendung des R-Skripts *modellierung_volumen_biomasse_F3.R* wurden die Referenzdaten mit den Rasterdaten verschnitten und ein Random Forest-Modell trainiert, das zur flächigen Modellierung von Derbholzvorrat bzw. Biomasse auf die Rasterdaten angewendet wurde. Die Daten der Testgebiete in Solling und Harz wurden zu einem Datensatz zusammengefügt und es wurde ein globales Modell erstellt, das für beide Testgebiete anwendbar ist.

Die Kreuzvalidierung des Random Forest-Modells ergab, dass das Modell in der Lage ist den Derbholzvorrat mit einem Vorhersagefehler von 117,2 m³/ha (RMSE) bzw. 30,9% (rel. RMSE) zu modellieren (vgl. Abbildung 1). Die mittels des Modells kartierten Derbholzvorräte der Testgebiete in Solling und Harz sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt. Das Modell für die Vorhersage der oberirdischen Baumbiomasse (BHD > 7 cm) weist einen Vorhersagefehler von 69,4 t/ha (RSME) bzw. 31,2% (rel. RMSE) auf (vgl. Abbildung 1). Die mittels des Modells kartierten Vorräte oberirdischer Biomasse der Testgebiete in Solling und Harz sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt.

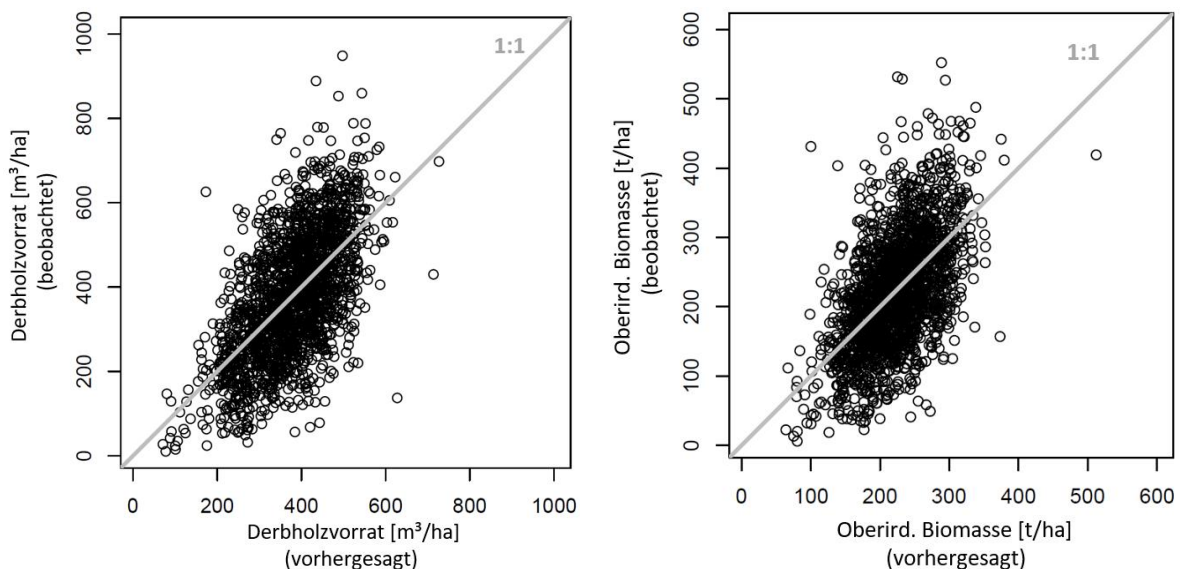


Abbildung 1: Darstellung der in den Testgebieten in Solling und Harz beobachteten Derbholz- bzw. Biomassevorräte, abgetragen gegen die mit dem Random Forest-Modell vorhergesagten Werte.

¹⁶ Hansen, J., Nagel, J., 2014. Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS – Anwendung und theoretische Grundlagen. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt Band 11. Göttingen: Universitätsverlag. DOI: 10.17875/gup2014-757

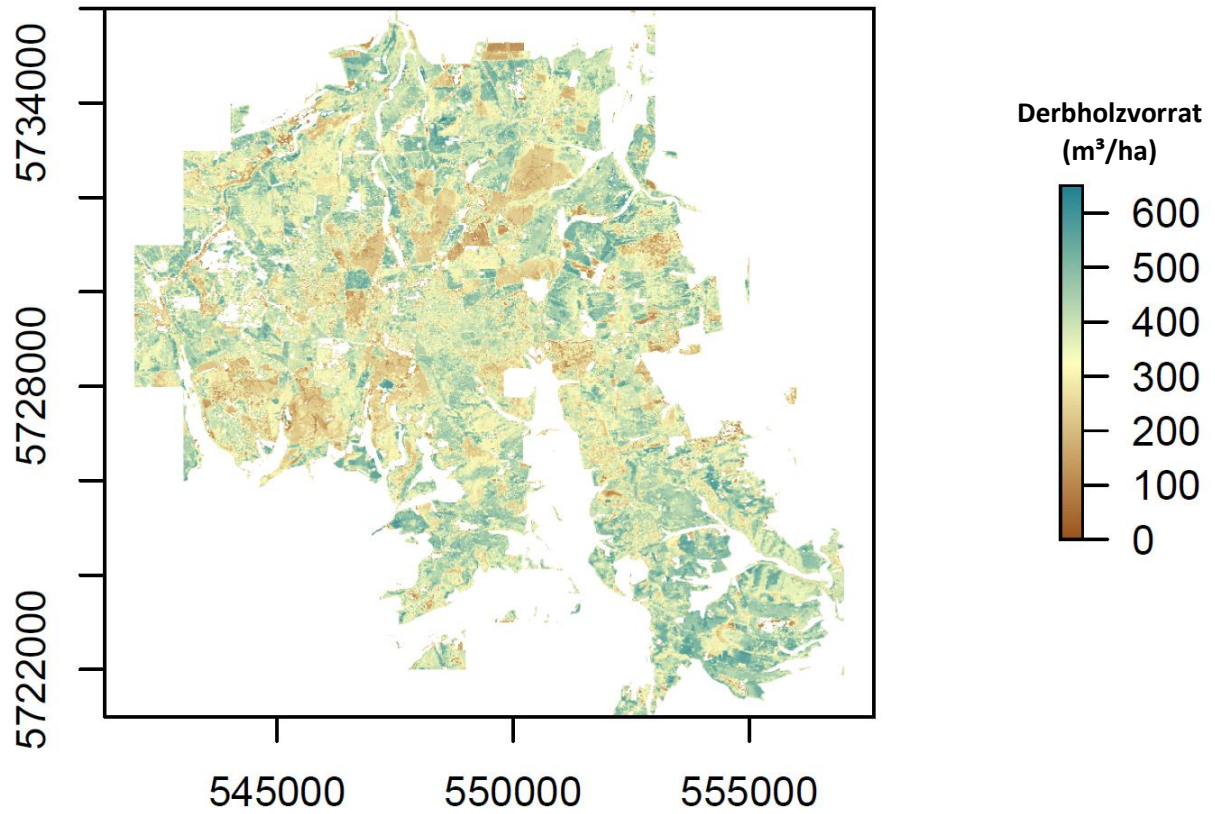


Abbildung 2: Verteilung der Derbholzvorräte (m³/ha) im Testgebiet Solling.

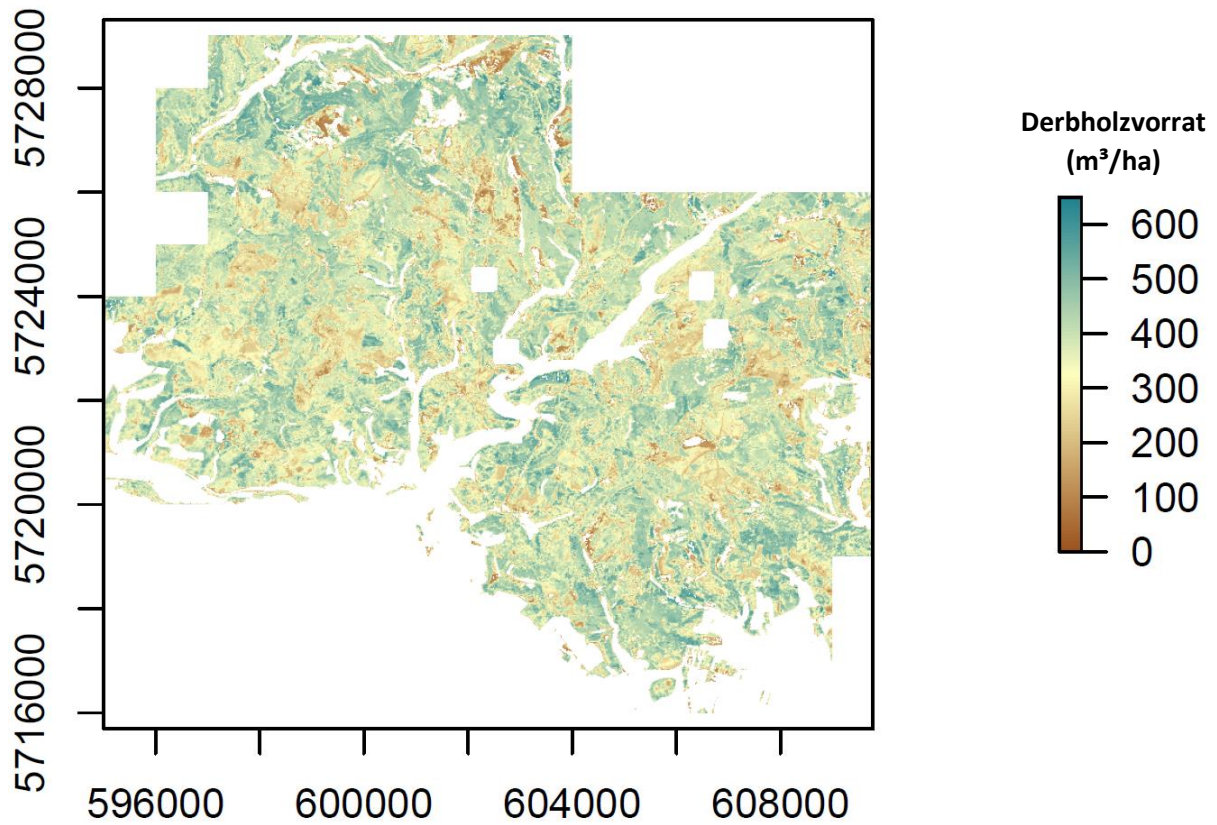


Abbildung 3: Verteilung der Derbholzvorräte (m³/ha) im Testgebiet Harz.

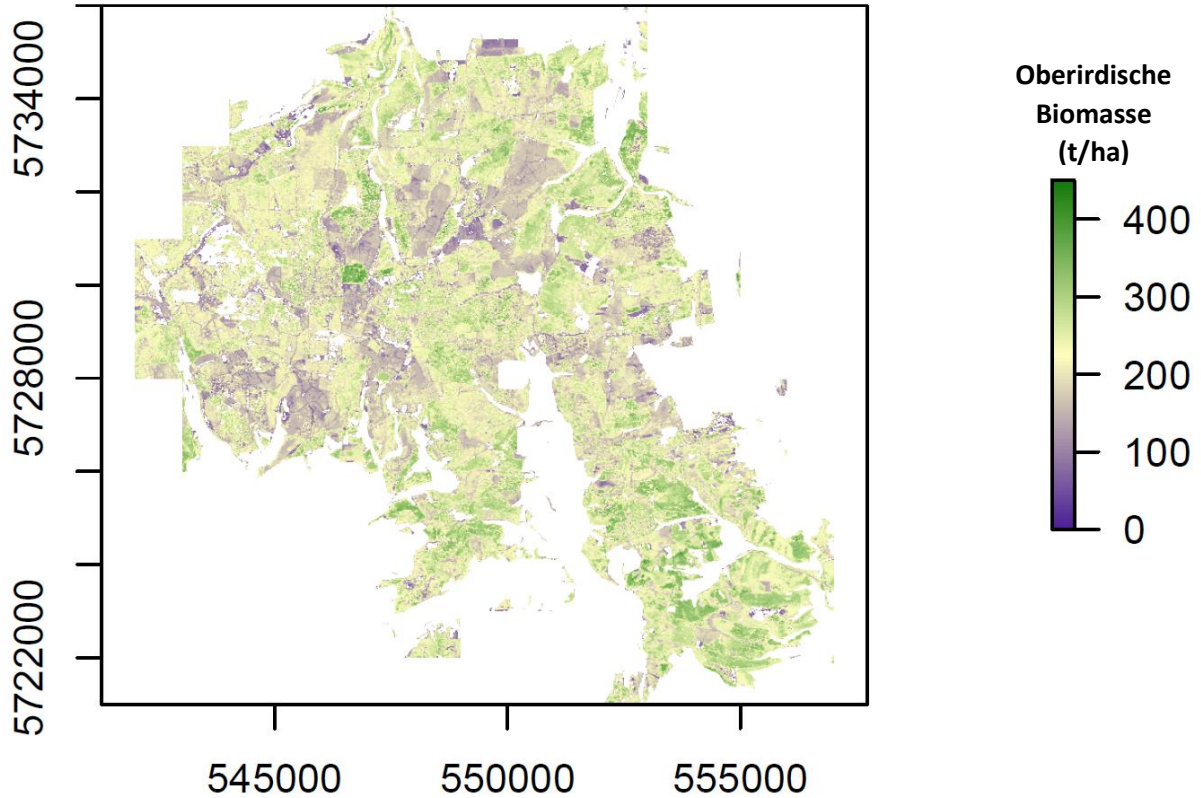


Abbildung 4: Verteilung der oberirdischen Biomasse (t/ha) im Testgebiet Solling.

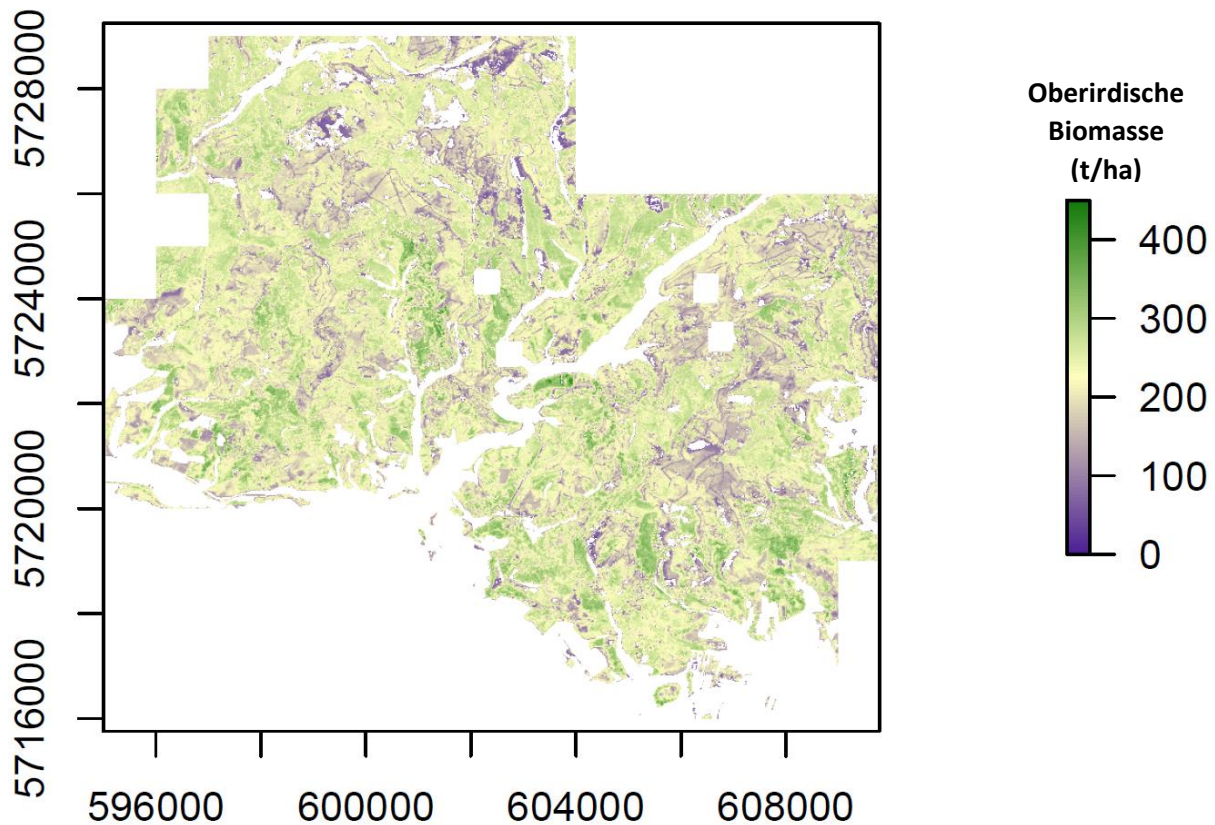


Abbildung 5: Verteilung der oberirdischen Biomasse (t/ha) im Testgebiet Harz.

E.2 Südwestdeutsche Testgebiete

Die F³-Testgebiete in Südwestdeutschland liegen in den Bereichen Südschwarzwald und südliche Oberrheinebene, Schwäbische Alb sowie Südwestdeutsches Alpenvorland. Für alle drei Testgebiete wurden mit dem oben beschriebenen Verfahren Holzvorrats- und Biomassekarten erstellt. Als Referenzdaten wurden hierfür Daten der BWI 3 genutzt, die von 2011 bis 2012 durchgeführt wurde. Die Auswahl der Probestämme bei der BWI 3 wurde mit der Winkelzählprobe (Zählfaktor 4) durchgeführt¹⁷. Für die Ableitung der Oberflächenmodelle wurden Luftbilddaten der regelmäßigen Befliegungen aus den Jahren 2012 und 2013 verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Baumartenzusammensetzung innerhalb weniger Jahre nicht wesentlich ändert, weshalb es vertretbar ist, eine auf Sentinel-2-Satellitendaten aus dem Jahr 2017 basierende Baumartenkarte in der Modellierung zu verwenden. Gleiches gilt für die Bodendaten.

Der genutzte BWI 3-Datensatz beinhaltet Werte für Holzvorrat und oberirdische Biomasse pro Probestamm, sodass diese nicht gesondert modelliert werden mussten. Unter Nutzung der Information „Stammzahl pro ha“ wurden Vorrat und oberirdische Biomasse für jeden Probestamm auf einen Hektar hochgerechnet und anschließend pro Traktecke der BWI Stichprobenpunkte aggregiert. Im Rahmen dieses Prozesses wurde auch die maximale Höhe der Probestämme pro Traktecke bestimmt. Mit den Vorrats- bzw. Biomassedaten der n = 2.164 Traktecken des BWI-Datensatzes sowie den dort extrahierten Prädiktoren wurde je ein Random Forest-Modell trainiert.

¹⁷ Die dritte Bundeswaldinventur BWI 2012. Inventur- und Aufnahmemethoden: https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Downloads/BWI_Methodenband_web.pdf [letzter Zugriff 30.11.2020]

Die Ergebniskarten der Holzvorrats- und Biomassemodellierung der südwestdeutschen Testgebiete sind in Abbildung 6 bis Abbildung 11 dargestellt. Mit Random Forest wurde der Derbholzvorrat in den Südwestdeutschen Testgebieten mit einem Vorhersagefehler von 198,7 m³/ha (RMSE) bzw. 43,7% (rel. RMSE) modelliert. Das Modell für die Vorhersage der oberirdischen Baumbiomasse (BHD > 7 cm) weist einen Vorhersagefehler von 103,3 t/ha (RMSE) bzw. 41,7% (rel. RMSE) auf (Vgl. Abbildung 12).

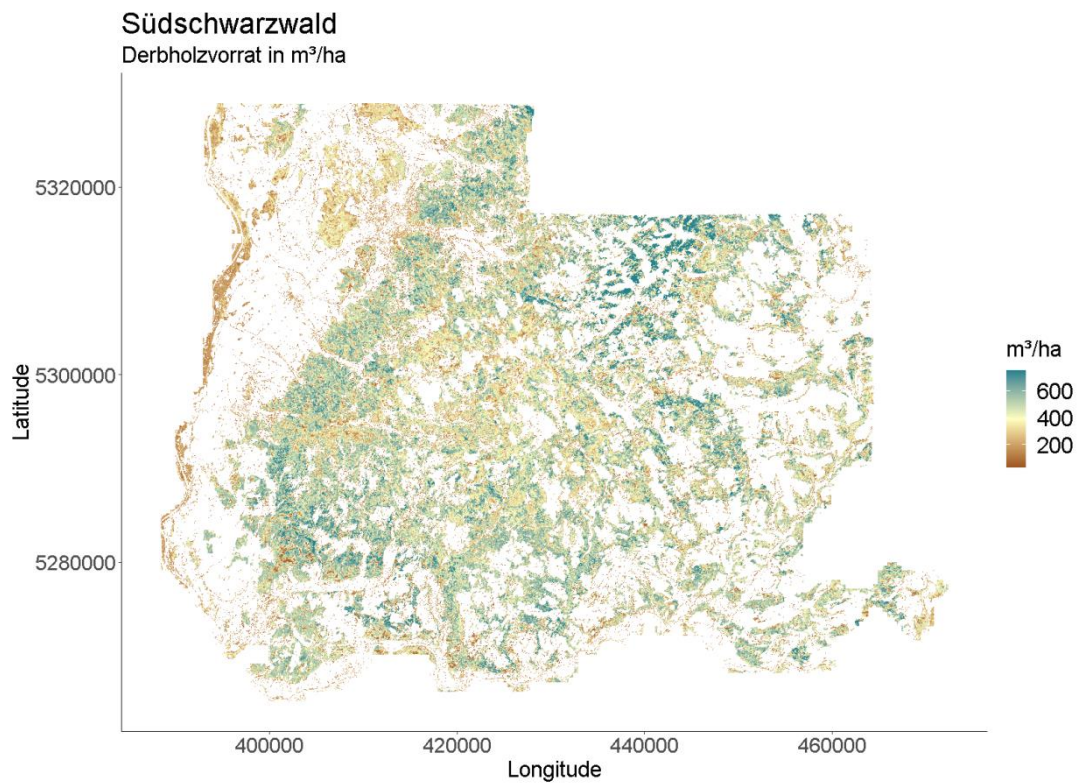


Abbildung 6: Verteilung der Derbholzvorräte (m³/ha) im Testgebiet „Südschwarzwald und südliche Oberrheinebene“.

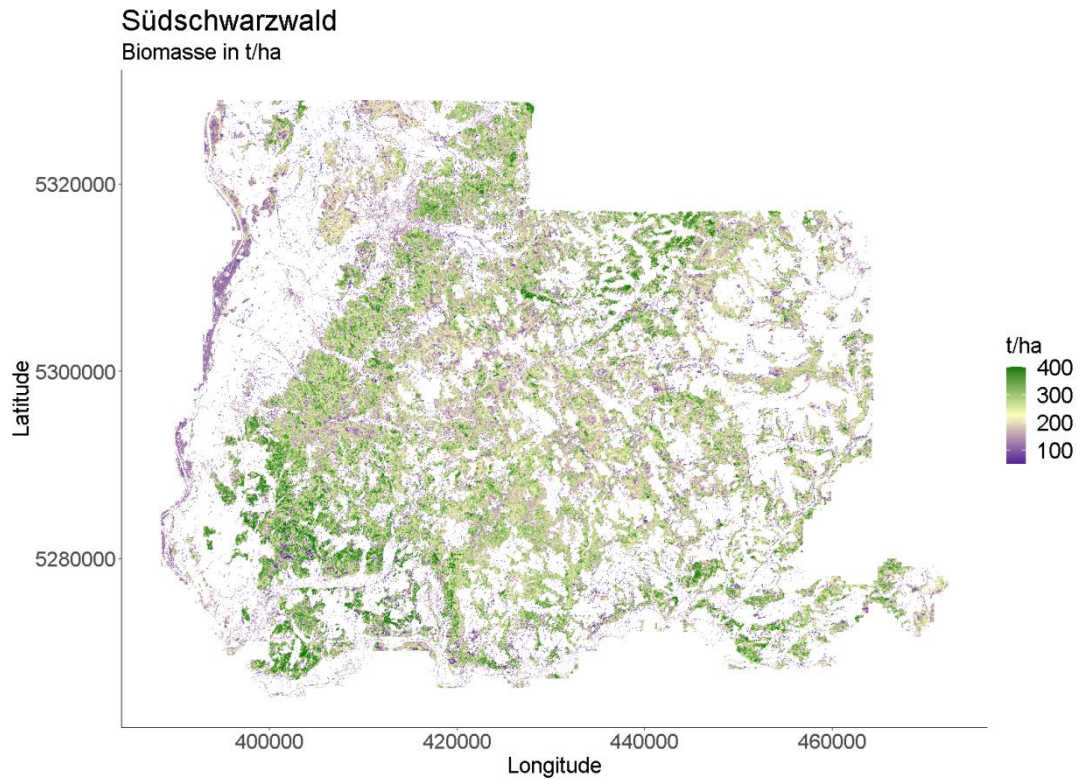


Abbildung 7: Verteilung der oberirdischen Biomasse (t/ha) im Testgebiet „Südschwarzwald und südliche Oberrheinebene“.

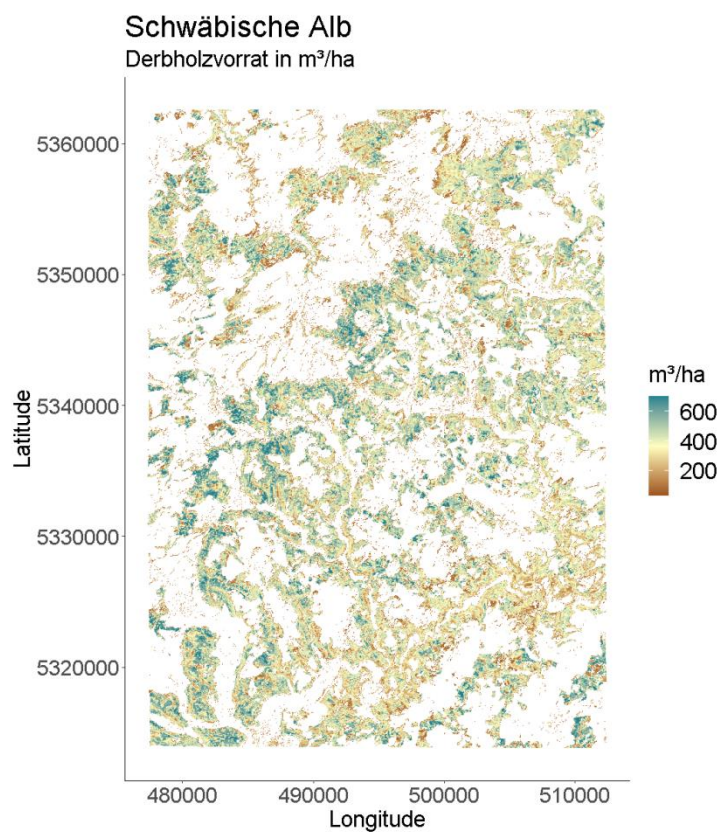


Abbildung 8: Verteilung der Derbholzvorräte (m³/ha) im Testgebiet „Schwäbische Alb“.

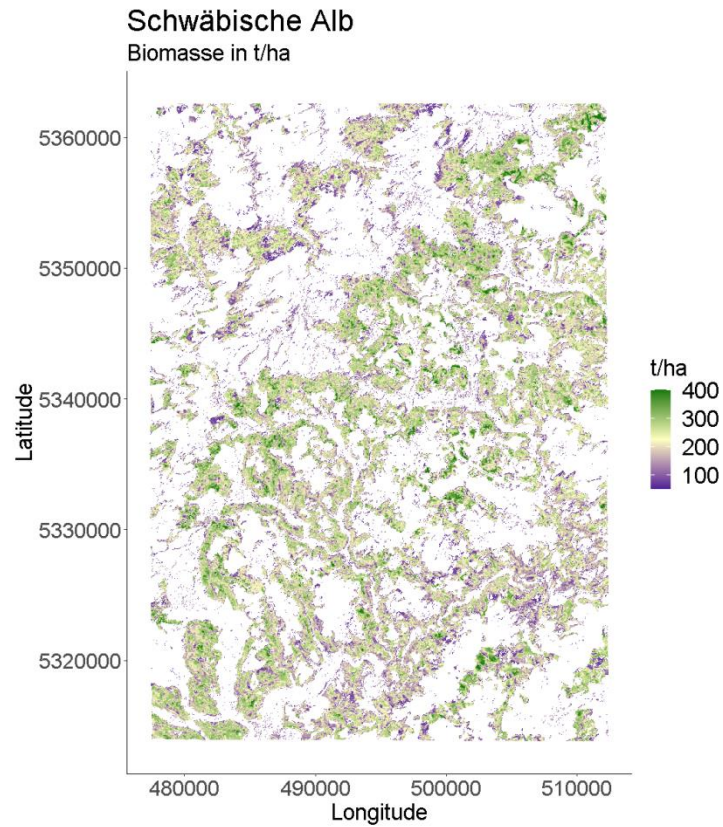


Abbildung 9: Verteilung der oberirdischen Biomasse (t/ha) im Testgebiet „Schwäbische Alb“.

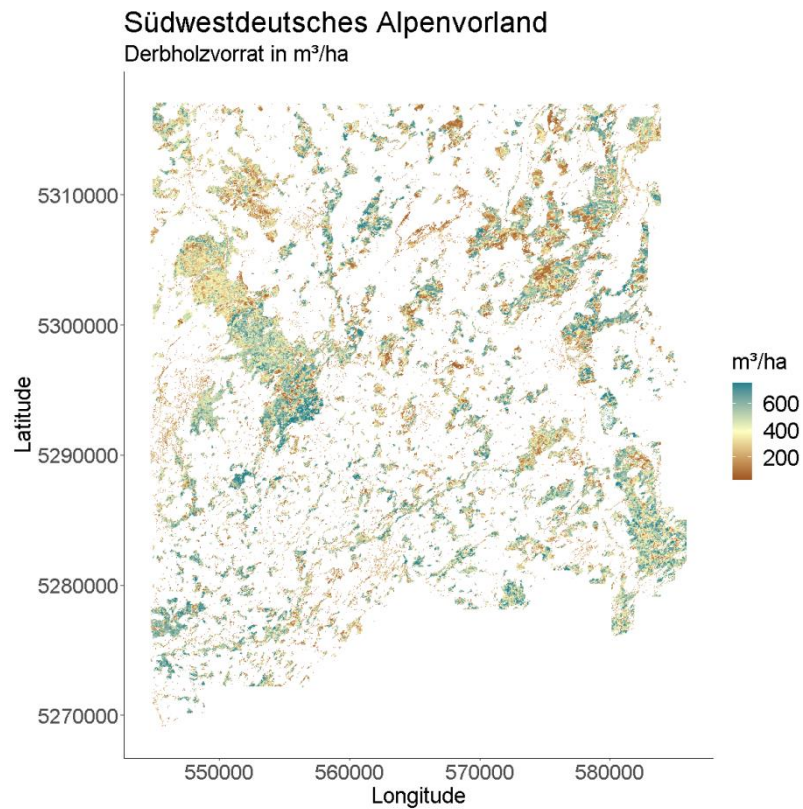


Abbildung 10: Verteilung der Derbholzvorräte (m³/ha) im Testgebiet „Südwestdeutsches Alpenvorland“.

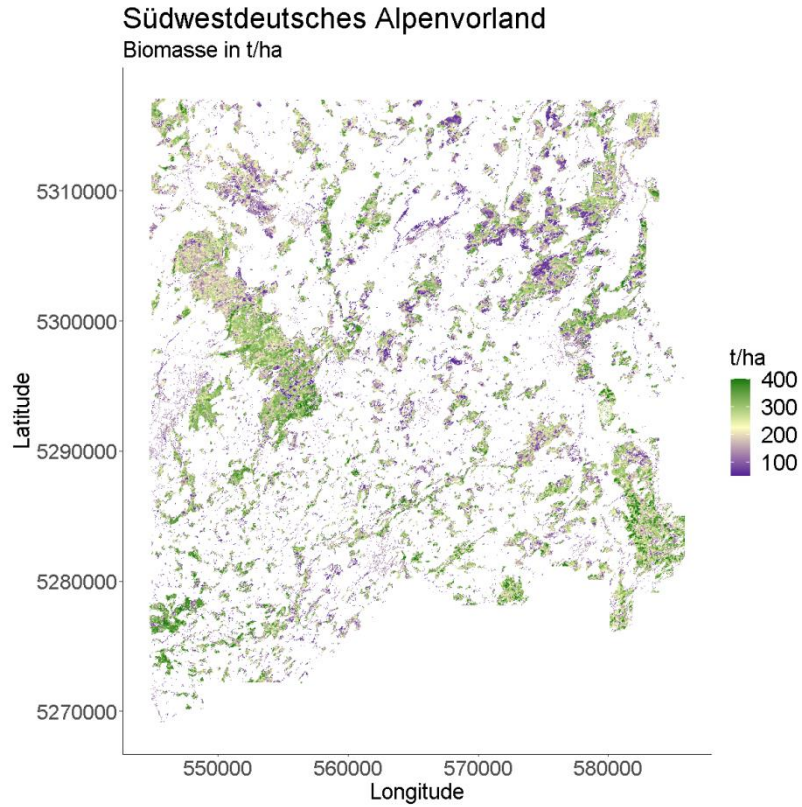


Abbildung 11: Verteilung der oberirdischen Biomasse (t/ha) im Testgebiet „Südwestdeutsches Alpenvorland“.

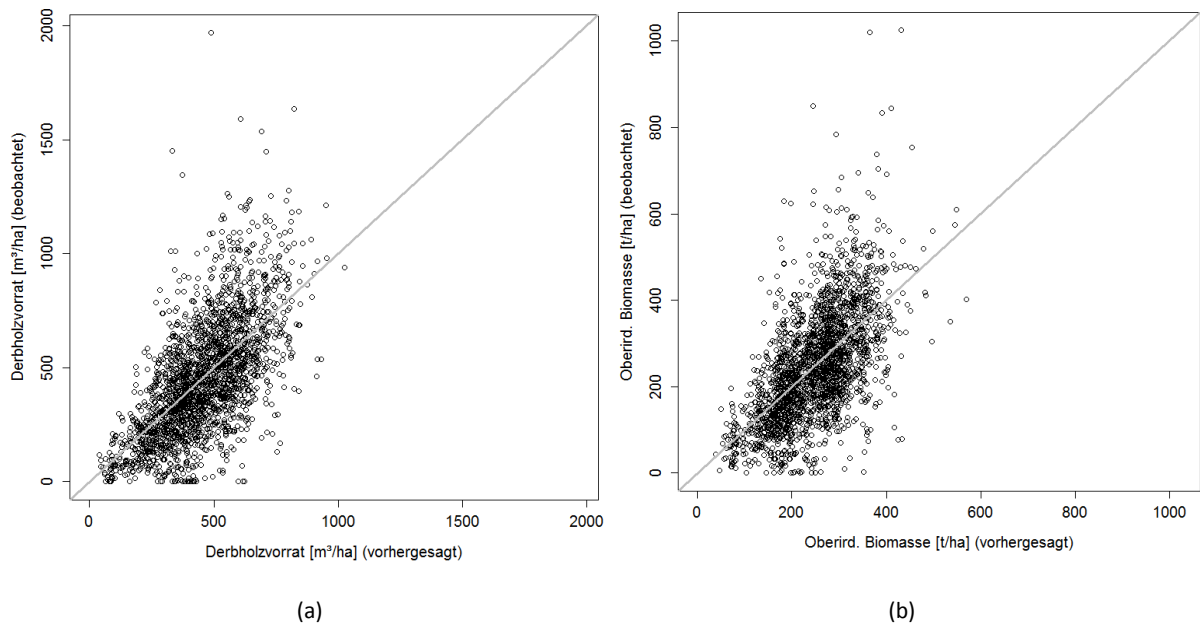


Abbildung 12: Darstellung der beobachteten (a) Derbholzvorrats- bzw. (b) Biomassewerte, abgetragen gegen die vorhergesagten Werte in den südwestdeutschen Testgebieten.

Um die Auswirkungen einer Erhöhung der Trainingsdatenmenge auf die erzielbare Genauigkeit zu untersuchen wurde der baden-württembergische Datensatz mit den entsprechenden Daten aus den



niedersächsischen Projektgebieten (Abschnitt E.1) kombiniert. Mit diesem kombinierten Datensatz wurden weitere Random Forest-Modelle trainiert. Im Vergleich zu den Modellen, die nur mit den baden-württembergischen Daten trainiert wurden, weisen die Modelle, die auf dem kombinierten Datensatz basieren, einen etwas geringeren Vorhersagefehler auf. So wurde beim Holzvorrat ein RMSE von 164,7 m³/ha (RMSE%: 39,3) und bei der oberirdischen Biomasse ein RMSE von 88,4 t/ha (RMSE%: 37,5) erreicht.