

Zeitschrift:	Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement = Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire = Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio
Herausgeber:	geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und Landmanagement
Band:	121 (2023)
Heft:	9-10
Artikel:	Erfassung von Veränderungen der Waldstruktur mittels multitemporalen Airborne Laser Scanning Daten
Autor:	Gretler, Charis / Kükenbrink, Daniel / Ginzler, Christian
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1050254

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ch. Gretler, D. Kükenbrink, F. Morsdorf,
Ch. Ginzler

Erfassung von Veränderungen der Waldstruktur mittels multitemporalen Airborne Laser Scanning Daten

Wälder sind in der Schweiz von grosser Bedeutung. Da Veränderungen oft graduell erfolgen, wird eine kontinuierliche Überwachung erforderlich, um den Wald nachhaltig zu schützen und dessen wichtige Schutz- und Nutzfunktionen gewährleisten zu können. Dieser Artikel erforscht das Potenzial von wiederholten Airborne Laser Scanning (ALS) Daten für multitemporale Analysen am Beispiel der Vegetationsdichte in Wäldern. Die Arbeit vergleicht drei Methoden zur Ableitung der Vegetationsdichte und untersucht, wie gut sie Veränderungen im Wald wiedergeben können. Die verwendeten Daten stammen aus den Jahren 2014 und 2020 aus dem Kanton Aargau. Die Ergebnisse zeigen, dass die komplexeste Methode, welche einen Raytracing-Ansatz nutzt, robuste und flächendeckende Resultate liefert. Multitemporale ALS Daten haben ein sehr grosses Potenzial für regelmässiges Waldmonitoring. Die Auswahl robuster Metriken ist dabei entscheidend, um präzise Ergebnisse zu erzielen und nachhaltiges 3D-Waldmonitoring zu ermöglichen.

En Suisse les forêts ont une grande importance. Du fait que des changements arrivent souvent graduellement une surveillance continue est nécessaire afin de protéger durablement la forêt et de pouvoir garantir son importante fonction de protection et d'exploitation. Cet article explore le potentiel de données captées par Airborne Laser Scanning (ALS) répété pour des analyses multitemporelles à l'exemple de la densité végétale de forêts. Le travail compare trois méthodes de dérivation de la densité végétale et examine leur qualité du rendu des changements de la forêt. Les données utilisées datent des années 2014 et 2020 dans le canton Argovie. Les expériences montrent que la méthode la plus complexe utilisant le procédé Raytracing fournit des résultats robustes et couvrant toute la surface. Les données ALS multitemporelles présentent un très grand potentiel pour un monitoring forestier régulier. Le choix de métriques robustes est déterminant afin d'atteindre des résultats précis et de permettre un monitoring 3D durable.

Le foreste rivestono una grande importanza in Svizzera. Visto che i cambiamenti sono spesso graduali, si impone un monitoraggio continuato per salvaguardare in modo sostenibile le foreste e garantire le loro importanti funzioni di protezione e utilizzo. Questo articolo esplora il potenziale dei dati ripetuti, ottenuti con l'Airborne Laser Scanning (ALS) per le analisi multitemporali, rifacendosi all'esempio della densità della vegetazione nelle foreste. In sostanza, il documento mette a confronto tre metodi per ricavare la densità della vegetazione e analizza la sua capacità nel rispecchiare i cambiamenti nelle foreste. I dati utilizzati risalgono al 2014 e al 2020 e provengono da canton Argovia. I risultati mostrano che il metodo più complesso, improntato su un approccio di ray tracing, fornisce risultati solidi ed estesi a tutta la superficie. I dati ALS multitemporali racchiudono un potenziale molto elevato per il monitoraggio regolare delle foreste. La scelta di metriche solide è fondamentale per ottenere risultati accurati e consentire un monitoraggio forestale 3D sostenibile.

Einleitung

Wälder erfüllen wichtige Schutz-, Nutz- oder Naherholungsfunktionen, leisten aber auch einen grossen Beitrag an die Biodiversität in der Schweiz. Ungefähr 31% der Schweizer Fläche ist bewaldet und bietet Lebensraum für fast 60% aller Schweizer Arten. Diese wichtigen Leistungen können durch menschliche Eingriffe eingeschränkt oder aber auch gefördert werden. Veränderungen durch globalen Wandel oder andere Einflüsse können die Leistungen des Waldes reduzieren, weshalb es wichtig ist, diese zu erfassen, zu analysieren und gegebenenfalls zu reagieren, insbesondere im Fall gradueller Veränderungen. So wird die Grundlage geschaffen, den Wald nachhaltig zu schützen und nutzbar zu machen.

Seit den 1980er-Jahren übernimmt das Schweizerische Landesforstinventar LFI die Aufgabe, den Waldzustand und dessen Veränderungen systematisch zu erfassen und somit eine objektive Grundlage für Politik, Gesellschaft, Wirtschaft und Forschung zu schaffen. Dabei erfolgt die Datenerhebung hauptsächlich durch eine Stichprobeninventur von rund 6500 Probenflächen. Zusätzlich zu diesen statistischen Aussagen basierend auf den kleinen Flächen der Stichproben wäre es von grossem Vorteil, Merkmale zum Wald auch flächendeckend zu erfassen und somit komplementär zu den Feldaufnahmen räumlich explizite Analysen zu machen. Neueste Verbesserungen und Entwicklungen in der Fernerkundung ermöglichen die Ableitung der Waldstruktur aus Airborne Laser Scanning (ALS) Daten. Durch die Befliegung mit einem Flugzeug oder Helikopter und der Abtastung der Oberfläche mithilfe eines LiDAR-Sensors können grosse Flächen aufgenommen werden. Es werden dreidimensionale Punktwolken generiert, die die Oberfläche abbilden und aus denen verschiedenste Merkmale abgeleitet werden können.

In den vergangenen Jahren wurde der Einsatz von ALS immer häufiger. Kantone, aber auch der Bund führen seit den 2000er-Jahren diverse Kampagnen durch. Die bisher nur sehr kurzen, unregelmässigen oder gar noch nicht vorhandenen Zeitreihen sollen in Zukunft ergänzt werden. Swisstopo plant nach Abschluss der Erstaufnahme des SwissSurface3D 2017–2023 regelmässige ALS-Befliegungen der gesamten Schweiz. So wird es erstmals möglich, diese Daten für landesweite Veränderungsdetektionen und ein 3D Waldmonitoring zu nutzen.

In diesem Artikel wird das Potenzial solcher von ALS-Daten abgeleiteten Produkten mit Fokus auf die Vegetationsdichte beleuchtet und auf Herausforderungen bei multitemporalen Daten hingewiesen, um die Möglichkeit über die eventuelle Einbindung dieser Methoden beim Waldmonitoring aufzuzeigen.

Ableitung der Strukturmetriken

Wenn aus ALS-Daten berechnete Merkmale für den Einsatz in Veränderungsdetektion und Monitoring benutzt werden sollen, ist es wichtig, dass die Merkmale robust sind. Das bedeutet, dass sie unabhängig von Befliegungsgeometrie, Sensor oder sonstigen äusseren Einflussfaktoren möglichst immer dieselben Ergebnisse liefern, wenn keine Veränderungen an der Oberfläche aufgetreten sind. Nur so ist gewährleistet, dass die Resultate zwischen verschiedenen Zeitständen vergleichbar sind und dass die festgestellten Veränderungen auch realen Veränderungen entsprechen.

Es gibt eine grosse Palette von Strukturmerkmalen, um den Wald sowie die strukturelle Diversität innerhalb des Waldes umfassend zu beschreiben. Meistens werden unterschiedliche Merkmale abgeleitet, welche verschiedene Aspekte des Waldes beschreiben. In diesem Artikel wird exemplarisch vor allem auf die Vegetationsdichte eingegangen.

Für deren Berechnung wurde der Plant Area Index (PAI) verwendet. Der PAI gilt als wichtiges Merkmal für das Mikroklima

im Wald und die biologische Vielfalt, da es die Photosynthese, die Transpiration und Regenabsorption beeinflusst. Er ist definiert als die Hälfte der Gesamtfläche von Blättern und holzigem Material pro Flächeneinheit.

Die Berechnung des PAI ist eine Herausforderung. ALS zeigt vielversprechende Ergebnisse, verglichen mit optisch bildgebenden (z. B. Luftbilder) oder Radar-Systemen. Es gibt verschiedene Methoden, um den PAI anhand von ALS-Daten zu berechnen, welche alle ihre Vor- und Nachteile haben.

In dieser Arbeit werden drei Methoden zur Ableitung des PAIs verglichen. Alle berechnen zuerst die Vegetationsdichte in einem Voxelgitter (dreidimensionale Pixel), welche dann innerhalb jeder vertikalen «Voxelsäule» aufsummiert wird. Das resultierende horizontale Raster repräsentiert den PAI.

Die erste und einfachste Methode (a) verwendet nur die 3D Lage der Laserpunkte und basiert auf der vereinfachten Annahme, dass alle Laserpulse vertikal ausgesendet wurden. Somit müssen die Laserpulse nur innerhalb jeder vertikalen

Voxelsäule nachvollzogen werden (de Almeida et al., 2019). Die zweite Methode (b) wurde von Arnqvist et al. (2020) eingeführt und verwendet neben den 3D Koordinaten auch die Intensitätswerte (Mass für die Rückstreuungsintensität eines Laser-Echos) für die Berechnung des PAI. Die dritte Methode (c) wird mittels eines Raytracing-Ansatzes im Tool AMAP-Vox durchgeführt. Das Tool rekonstruiert den Weg von jedem ausgesendeten Puls im dreidimensionalen Voxelgitter, woraus in einem zweiten Schritt der PAI berechnet wird. Dafür werden zusätzlich zur 3D Punktwolke auch noch die Trajektorien, also die Flugpfade, benötigt, welche die genauen Positionen des Sensors zu jedem gesendeten Laserpuls beinhalten. Diese Berechnung ist rechen- und zeitintensiv. Genaue Angaben zur Berechnung des PAI mit AMAPVox sind in Vincent et al. (2017) zu finden.

Daten und Studiengebiet

Für die Berechnung der Vegetationsdichte wurden die Daten aus den ALS-Kampagnen des Kantons Aargau 2014 sowie der SwissSurface3D-Kampagne von swisstopo aus dem Jahr 2020 verwendet. Beide Aufnahmen wurden im unbelaubten Zustand gemacht. Dennoch gibt es Unterschiede in den Aufnahmezeitpunkten: Die Aufnahmen von 2014 wurden im März/April durchgeführt, während diejenigen von 2020 aus den Monaten Februar/März stammen. Daher sind 2014 bereits erste Blattaustriebe zu erwarten. Die Daten wurden mit unterschiedlichen Sensoren und unter verschiedenen Befliegungsgeometrien aufgenommen. So können die Resultate auf ihre Robustheit überprüft werden.

Für diesen Artikel wurden ein Studiengebiet in der Region Unterwald sowie die Swissgrid-Schaltanlage «Stern von Laufenburg» ausgewählt (siehe Abbildung 1). Da die ALS-Aufnahmen zwar im unbelaubten Zustand, aber dennoch mit etwas anderen Aufnahmezeitpunkten gemacht wurden, wurde ein Studiengebiet ausgewählt, das neben Laubwald auch grosse Flächen mit einem hohen Nadelbaumanteil aufweist.

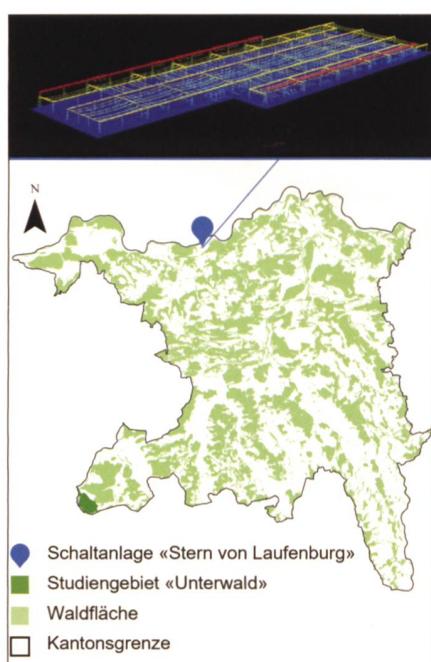


Abb. 1: Übersicht über den Kanton Aargau und die Studiengebiete der Region Unterwald und der Schaltanlage «Stern von Laufenburg» (oben).

Nadelbäume zeigen viel weniger grosse Dichteschwankungen zwischen Sommer und Winter und sind somit auch weniger anfällig auf unterschiedliche Aufnahmemonate als Laubbäume. So sollte das Studiengebiet etwas weniger anfällig auf den Aufnahmezeitpunkt sein. Unterwald hat laut Waldmischungsgradkarte LFI besonders im Südwesten einen Nadelbaumanteil von fast 100%.

Um einen Anhaltspunkt über die Robustheit der Methode zu bekommen, wurde eine Kontrollfläche gewählt, die sich zwischen den beiden Zeitständen nicht verändert hatte. Zu diesem Zweck wurde die Swissgrid Schaltanlage gewählt. Sie weist mit ihren Leitungsmasten baumähnliche Strukturen auf und veränderte sich zwischen den Aufnahmezeitpunkten 2014 und 2020 nicht. Eine robuste Methode sollte also auf der Schaltanlage dieselben Resultate liefern.

Resultate und Diskussion

Abbildung 2 zeigt die Resultate der Vegetationsdichte-Berechnungen von allen drei Methoden. Es fallen einige Unterschiede zwischen den Methoden auf. Aufgrund der Voraussetzungen für die Berechnung des PAI mittels Methode a und b können auf grösseren Flächen keine PAI-Werte abgeleitet werden (schwarze Flächen in Abbildung 2). Die Methode b weist viele Flächen auf, wo der PAI nicht berechnet werden konnte, da die Methode mindestens einen klassierten Bodenpunkt innerhalb des Pixels verlangt. Wenn das nicht gegeben ist, kann kein Wert berechnet werden. Im dichten Wald, wo die höchsten Vegetationsdichten zu erwarten sind, wird also kein PAI-Wert ermittelt. Dies führt somit zu einer Unterschätzung der Gesamtdichte. Der Raytracing-Ansatz der Methode c benötigt keine Bodenpunkte und zeigt über das gesamte Studiengebiet Dichtewerte.

Die Verteilungen der PAI-Werte sind je nach Berechnungsmethode anders. Die Verteilung bei Methode c zeigt neben dem auch in den beiden anderen Methoden sichtbaren Peak (bei 0.1–0.2) einen grösseren Anteil mit hohen Dichtewerten.

Die Gebiete mit höheren Dichtewerten entsprechen mehrheitlich den Flächen, bei welchen die Methoden a und b keine Werte ableiten konnten, da durch die hohe Dichte keine Bodenpunkte klassiert werden konnten.

Neben diesen Unterschieden zeigen alle Methoden zur Dichteberechnung ähnliche Muster im Studiengebiet Unterwald. Ab- und Zunahmen der PAI-Werte wurden an gleichen Orten im Studiengebiet verzeichnet. Dennoch ist schwer abzuschätzen, wie genau diese Ergebnisse

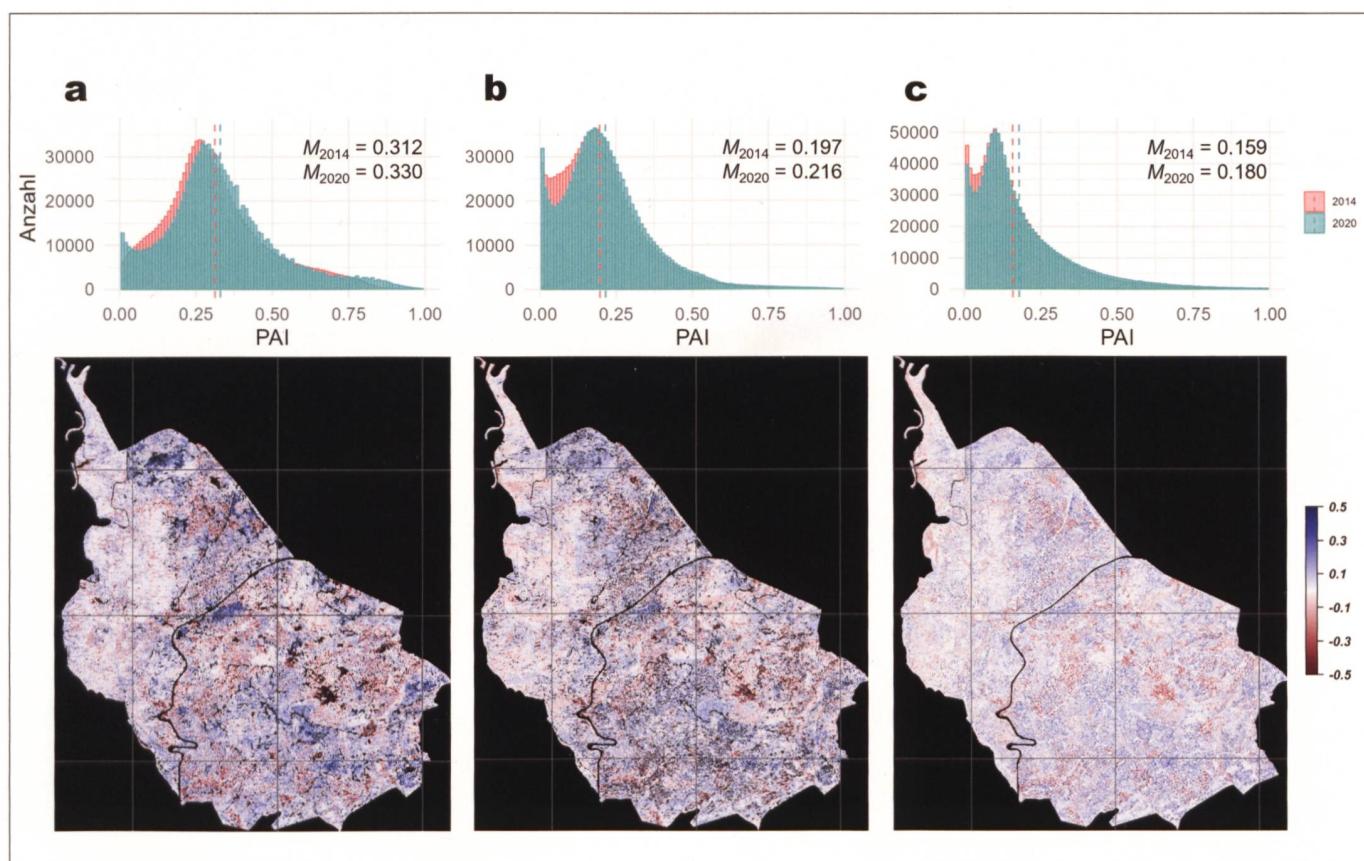


Abb. 2: Verteilungen der PAI-Werte im Studiengebiet Unterwald mit eingezeichneten Mittelwerten (oben) und die räumliche Darstellung der Differenzen der PAI-Werte zwischen 2014 und 2020 (unten). Blaue Pixel repräsentieren eine Zunahme und rote Pixel eine Abnahme des PAI zwischen 2014 und 2020. Die Kolonnen zeigen die Resultate der drei Methoden a, b und c. Die Pixelgrösse beträgt 2×2 m.

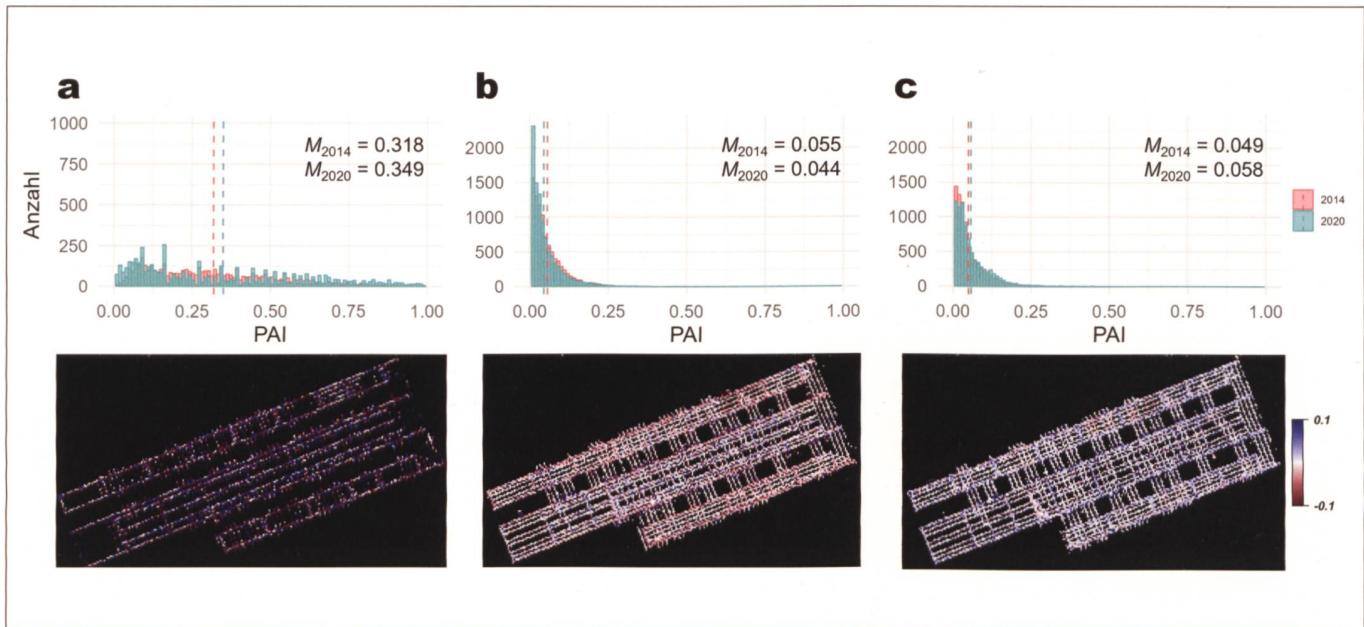


Abb. 3: Verteilungen der PAI-Werte in der Schaltanlage «Stern von Laufenburg» mit eingezeichneten Mittelwerten (oben) und die räumliche Darstellung der Differenzen der PAI-Werte zwischen 2014 und 2020 (unten). Blaue Pixel repräsentieren eine Zunahme und rote Pixel eine Abnahme des PAI zwischen 2014 und 2020. Die Kolonnen zeigen die Resultate der drei Methoden a, b und c. Die Pixelgrösse beträgt 2×2 m.

sind. Alle Methoden zeigen 2014 in den Verteilungen einen hohen Anteil von tieferen Werten. Wir erklären das mit dem leicht späteren Aufnahmezeitpunkt 2014. So ist 2014 zu erwarten, dass bereits erste Blätter in der ALS-Aufnahme zu leicht höheren Dichten führten, während 2020 noch kein Blattaustrieb vorhanden war (PAI nahe oder gleich null).

Obwohl 2014 mehr tiefe bis mittlere Dichten ermittelt wurden, ist eine Zunahme des Gesamt-PAI berechnet worden: Die Histogramme sowie die Mittelwerte (in Abbildung 2 mit M bezeichnet) zeigen, dass alle Methoden einen leichten Anstieg zwischen 2014 und 2020 über das Gesamtgebiet erfasst haben. Das ist kein Widerspruch zur vorherigen Beobachtung. Die aufgezeichneten höheren PAI-Werte 2014 durch möglicherweise ersten Laaustrieb sind zwar im Histogramm erkennbar, spielen auf die Gesamtfläche aber nur eine geringe Rolle, da vor allem mehr hohe PAI-Werte aufgezeichnet wurden. Dennoch ist schwer abschätzbar, ob die Vegetationsdichte zwischen den beiden Zeitsäulen tatsächlich zugenommen hat oder ob die verzeichnete Zunahme durch die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte

oder Sensoreinstellungen resp. -geometrien beeinflusst wurde.

Um zu überprüfen, wie verlässlich sich die Methoden verhalten, wurde das Kontrollgebiet der Schaltanlage «Stern von Laufenburg» verwendet (siehe Abbildung 3). Hier sind die Unterschiede zwischen den Methoden viel deutlicher als im Studiengebiet Unterwald.

Die Verteilung der Dichtewerte sind in Methoden b und c relativ ähnlich, aber sehr verschieden zu a. Diese zeigt über die gesamte Dichtespanne Werte mit einzelnen Peaks, vor allem im Jahr 2020. Außerdem sieht man bei Methode a sehr grosse Differenzen zwischen den beiden Aufnahmejahren. Keine der Methoden zeigt gleiche Werte in den beiden Aufnahmejahren, aber trotzdem scheinen die Methoden b und c etwas robuster zu sein als Methode a, da die Differenzen viel geringer sind und die Verteilungen sich relativ gut decken. Die Mittelwerte sind bei Methode c sogar noch etwas ähnlicher als bei b.

Vergleicht man die Resultate mit der sehr robust zu berechnenden Höhe über Boden – dies entspricht in Wäldern der Vegetationshöhe – für den «Stern von

Laufenburg», so wird deutlich, dass der PAI keiner Methode gleich robust wie die Vegetationshöhenableitung ist (Abbildung 4). Die Vegetationshöhe ist ein wichtiges Mass für strukturelle Diversität und lässt sich einfach und mit hoher Genauigkeit aus ALS-Punktwolken ableiten. Diese Metrik gilt als sehr robust, ist also

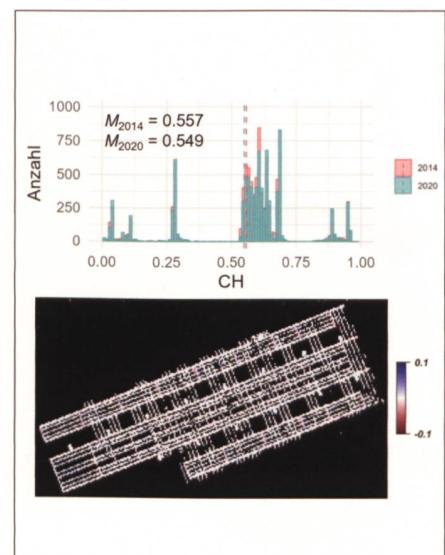


Abb. 4: Verteilung und Differenzbild der «Vegetationshöhe» im Kontrollgebiet «Stern von Laufenburg».

unabhängig von Sensor und Aufnahmegeometrie (Gretler, 2022). Auch wenn die verschiedenen Methoden der PAI-Berechnung nicht gleich robust sind wie die Vegetationshöhe, zeigt vor allem die komplexe Raytracing-Methode c gut verlässliche und flächendeckende Resultate.

Fazit

Die wiederkehrenden ALS Aufnahmen, die von swisstopo geplant sind, ermöglichen es, Zeitreihen aufzubauen. So können kontinuierliche Karten von Waldstrukturparametern und deren Veränderungen erstellt werden. Mit einer sorgfältigen Auswahl von Metriken, welche die Waldstruktur repräsentieren, kann im Idealfall ein Waldstrukturmonitoring aufgebaut werden. Die sorgfältige Untersuchung von verwendeten Metriken hinsichtlich deren Abhängigkeiten von Aufnahmezeitpunkt, Aufnahmegeometrie und verwendeten Sensoreinstellungen ist die Voraussetzung für die zuverlässige Berechnung von Veränderungen. Nicht alle Algorithmen, die zur Verfügung stehen, liefern gleich verlässliche Resultate. So konnten wir am Beispiel der Vegetationsdichte zeigen, wie unterschiedlich anfällig die Methoden auf äussere Einflüsse wie Aufnahmezeitpunkte oder Sensoreigenschaften und -geometrien sind. Weniger rechenintensive Metriken liefern zwar schneller Resultate, die in

einer multitemporalen Analyse aber mit Vorsicht zu verwenden sind, da sie unter verschiedenen Kampagnenumständen teilweise nicht gut vergleichbar sind. Grundsätzlich gilt jedoch, dass je mehr Flug- und Sensorparameter in der Methode berücksichtigt werden, desto robuster die Resultate dann auch abgeleitet werden können. So zeigt der Raytracing-Ansatz von AMAPVox das grösste Potenzial für eine robuste, lückenlose Ableitung der Vegetationsdichte. Neben einer umfangreichen Projektdokumentation der ALS Aufnahmen sollten daher immer auch detaillierte Sensorangaben und -einstellungen sowie die Flugpfade zu den Punktdaten mitgeliefert werden. Erst damit kann das volle Potenzial dieser hochaufgelösten 3D Daten über Wälder und die Bodenbedeckung im Allgemeinen für Veränderungsanalysen ausgeschöpft werden.

Quellen:

Arnqvist, J., Freier, J., & Dellwik, E. (2020). Robust processing of airborne laser scans to plant area density profiles. *Biogeosciences*, 17(23), 5939–5952. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5939-2020>.

Charis Moana Gretler. (2022). Mapping change of functional forest traits and diversity using airborne laser scanning in the canton Aargau 2014–2019.

de Almeida, D. R. A., Stark, S. C., Shao, G., Schiatti, J., Nelson, B. W., Silva, C. A., Gorgens, E. B., Valbuena, R., Papa, D. de A., & Brancalion,

P. H. S. (2019). Optimizing the remote detection of tropical rainforest structure with airborne lidar: Leaf area profile sensitivity to pulse density and spatial sampling. *Remote Sensing*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.3390/rs11010092>.

Vincent, G., Antin, C., Laurans, M., Heurtebize, J., Durrieu, S., Lavalle, C., & Dauzat, J. (2017). Mapping plant area index of tropical evergreen forest by airborne laser scanning. A cross-validation study using LAI2200 optical sensor. *Remote Sensing of Environment*, 198, 254–266. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.05.034>.

Charis Gretler

Daniel Kükenbrink

Christian Ginzler

Forschungseinheit Landschaftsdynamik

Eidg. Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL

Zürcherstrasse 111

CH-8903 Birmensdorf

charis.gretler@wsl.ch

christian.ginzler@wsl.ch

daniel.kuekenbrink@wsl.ch

Felix Morsdorf

Remote Sensing Laboratories

Universität Zürich

Winterthurerstrasse 190

CH-8057 Zürich

felix.morsdorf@geo.uzh.ch



 **Topnet Live**

GNSS – Positionierungsdienst

Topnet Live ist ein europaweit nutzbarer Zugang zum GNSS-Echtzeitreferenznetz für hochwertige Korrekturen aller aktuell verfügbaren Satellitensysteme. Er ist mit Rovern aller Hersteller nutzbar, die Netzwerkkorrekturen unterstützen.

FIELDWORK

Maschinenkontroll- und Vermessungssysteme AG
Bleichelistrasse 22, CH-9055 Bühler, www.fieldwork.ch

 **TOPCON**
AUTHORIZED DEALER