

**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:** 120 (2022)

**Heft:** 9-10

**Artikel:** Der Weg zu einer operationellen Waldstrukturaufnahme in  
grossflächigen Waldinventuren mittels naher Fernerkundung

**Autor:** Kükenbrink, Daniel / Marty, Mauro / Bösch, Ruedi

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1033352>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 02.02.2025

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

# Der Weg zu einer operationellen Waldstrukturaufnahme in grossflächigen Waldinventuren mittels naher Fernerkundung

Der Zustand und die Veränderung von Wäldern sowie deren Funktionen und Leistungen werden häufig im Rahmen von stichprobenbasierten Waldinventuren aufgenommen und analysiert. Die rasante Entwicklung im Bereich der nahen Fernerkundung ermöglicht die Erhebung der dreidimensionalen Struktur des Waldes in einem noch nie dagewesenen Detailreichtum. Dies könnte Verbesserungen und Ergänzungen in der Aufnahme von inventurrelevanten Merkmalen wie auch neue Analysen zu verschiedensten Waldfunktionen, wie z. B. die Schutzwirkung, dem Kohlenstoffspeicher aber auch zur Biodiversität ermöglichen. In dieser Studie wurde das Potenzial unterschiedlicher Technologien der nahen Fernerkundung für einen operationellen Einsatz in grossflächigen, nationalen Waldinventuren überprüft und analysiert.

*L'état et le changement de forêts ainsi que leurs fonctions et rendements sont souvent enregistrés et analysés dans le cadre d'inventaires de forêts par prélèvement. Le développement fulgurant dans le domaine de la télédétection rapprochée permet de relever la structure tridimensionnelle de la forêt dans une richesse de détails encore jamais obtenue. Cela pourrait amener des améliorations et compléments dans la saisie de caractéristiques concernant les inventaires ainsi que de nouvelles analyses des plus diverses fonctions de la forêt telles que l'effet de protection, l'emmagasinement de carbone mais aussi la biodiversité. Dans cette étude on a examiné et analysé le potentiel de différentes technologies de télédétection rapprochée pour une utilisation opérationnelle dans des inventaires forestiers de grandes surfaces nationales.*

Lo stato e i mutamenti delle foreste e delle loro funzioni e prestazioni sono spesso rilevati e analizzati nell'ambito degli inventari forestali, improntati su prove campione. I rapidi sviluppi registrati nel campo del telerilevamento di prossimità consentono di misurare la struttura tridimensionale del bosco con una precisione del dettaglio mai ottenuta finora. Questo consentirebbe anche di apportare miglioramenti e complementamenti nel rilevamento delle caratteristiche fondamentali per l'inventario, come pure ottenere nuove analisi sulle diverse funzioni della foresta, tra cui: l'effetto protettivo, lo stoccaggio il carbonio ma anche la biodiversità. In questo studio si è verificato e analizzato il potenziale delle tecnologie più diversificate di telerilevamento di prossimità per un impiego operativo degli inventari forestali nazionali su vasta scala.

D. Kükenbrink, M. Marty, R. Bösch,  
Ch. Ginzler

## Einleitung

Wälder sind von grosser Bedeutung und erbringen wichtige Leistungen. So dienen sie als Naherholungsgebiete, erfüllen

Schutzfunktionen gegen Naturgefahren, stabilisieren den Boden, sind wichtige Habitatsräume für Tiere und Pflanzen und fungieren als wichtiger Kohlenstoffspeicher im globalen Kohlenstoffkreislauf. Ein wichtiges Werkzeug zur Beurteilung des Zustands und der Dynamik des Waldes auf kantonaler und nationaler Ebene sind Waldinventuren. So werden in der Schweiz

im Rahmen des Schweizerischen Landesforstinventars LFI seit den 1980er-Jahren auf einer regelmässig verteilten Stichprobe mit mehr als 6500 Waldprobenflächen der Zustand sowie die Veränderung des Waldes aufgenommen, interpretiert und analysiert. Die Methoden der Inventuraufnahmen werden stetig anhand der neusten Entwicklungen und wissenschaftlichen Erkenntnissen angepasst und weiterentwickelt.

Bei terrestrischen Erhebungen werden sowohl Messungen durchgeführt (Stammpositionen, Brusthöhendurchmesser, Baumhöhe, Verjüngungsinventur, Totholz etc.) als auch Informationen zur Waldstruktur, Bodenbeschaffenheit, Schäden etc. gutachterlich erhoben (Fischer & Traub, 2019). Messungen können aufgrund zeitlicher Restriktionen oft nur auf einem kleineren Teilgebiet oder mittels statistischen Samplingmethoden (z.B. Line Intersect Methode für die Totholzinventur) erfolgen. Es wäre von grossem Vorteil, diese Merkmale auf einem grösseren Gebiet erheben zu können und gutachterliche mit quantitativen Aufnahmen zu ergänzen. So könnte zum Beispiel die Kenntnis der Baumpositionen und die Dimensionen der Bäume auf grösseren Flächen (¼ ha und mehr) wichtige Informationen zur Schutzwirkung des Waldes erbringen.

Die neuesten Entwicklungen im Bereich der nahen Fernerkundung ermöglichen eine Erhebung der dreidimensionalen Waldstruktur mit einem noch nie dagewesenen Detailreichtum bei relativ geringem Zeitaufwand. Dieser Artikel soll das Potenzial dieser Aufnahmetechniken erläutern sowie den Weg zu einer möglichen, operationellen Einbindung in grossflächigen Waldinventuren aufzeigen.

## Multisensor Vergleich

Für die dreidimensionale (3D) Erfassung der Waldstruktur kommen hauptsächlich zwei Technologien in Frage. Mittels der Laserscanning Technologie (Light Detection and Ranging LiDAR) wird die 3D Waldstruktur mittels einem Laser vermessen, wobei die Distanz zwischen dem



	Aufnahmezeitpunkt	Zeitaufwand Datenerhebung	Punktdichte [pts/m <sup>2</sup> ]
FARO Focus 3D	Januar 2020	6 Tage (für 1 ha)	869'862
Leica BLK360	September 2020	6 Stunden	1'203'548
Riegl VUX1	März 2020	≈ 2 Stunden (für 52 ha)	4'372
Riegl miniVUX2	September 2020	12 Minuten (für 1 ha)	1'888
GeoSLAM ZebRevo	Oktober 2020	≈ 15 min	15'777
GeoSLAM ZebHorizon	Juli 2022	≈ 15 min	28'604
GoPro Hero 8 Black (12 MP)	September 2020	≈ 20 min	29'523

Tab. 1: Aufnahme sowie Punktdichte Informationen zu den aufgenommenen Punktwolken. Das Mittel über alle drei analysierten Flächen ist gegeben. Falls keine genaueren Angaben, sind die Zeitangaben pro Fläche (50 × 50 m<sup>2</sup>) gegeben.

Sensor und dem reflektierenden Objekt für mehrere Tausende bis Millionen von Laserpulsen gemessen wird. Es können aber auch 3D Punktwolken mittels einfacher digitaler Kameras erstellt werden, wobei hierfür auf die Technik der Photogrammetrie zurückgegriffen wird. Aufgrund überlappender Bilder können so 3D Punktwolken aus den 2D Aufnahmen gerechnet werden.

Verschiedene boden- sowie luftgestützte Aufnahmetechniken zum Vermessen der 3D Waldstruktur (3D Punktwolken) wurden getestet. Die Aufnahmen fanden im Jahr 2020 zwischen Januar und Oktober statt. Insgesamt wurden zwei terrestrische Laserscanning (TLS) Instrumente (FARO Focus3D S120 und Leica BLK360), zwei drohnengestützte Laserscanning (UAVLS) Instrumente (Riegl VUX1-UAV und Riegl miniVUX2-UAV) und ein mobiler Laserscanner (MLS, GeoSLAM ZebRevo) getestet. Im Jahre 2022 konnte eine weitere Aufnahme mit dem Nachfolgemodell des ZebRevo, dem GeoSLAM ZebHorizon durchgeführt werden. Zusätzlich wurde ebenfalls mit der GoPro Hero 8 Black eine kleine und günstige Action-Kamera getestet, um das Potenzial der terrestrischen Photogrammetrie zur Berechnung von 3D Punktwolken zu evaluieren. Abgesehen von den Aufnahmen mittels des FARO TLS sowie mit dem Riegl VUX1-UAV UAVLS fanden alle Aufnahmen bei belaubtem Vegetationszustand statt. Die Aufnahmen im unbelaubtem Zustand dienten als Referenz für die boden- sowie luftgestützten Aufnahmen, wobei das

fehlende Blätterdach die Abschattung innerhalb des Bestandes verringert und somit eine genauere 3D Rekonstruktion der Waldstruktur ermöglicht (Kükenbrink et al., 2017).

Das Studiengebiet liegt im Ramerenwald, nahe der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf. Es wurden drei Flächen von 50 × 50 m<sup>2</sup>, entsprechend der Grösse der Interpretationsflächen des Schweizerischen LFI's ausgewiesen. Die drei Flächen wurden so ausgewählt, dass sie einen starken Gradienten bezüglich Baum- sowie Unterwuchsdichte aufweisen.

Die Aufnahmeeigenschaften der verwendeten Sensoren sowie deren mittleren Punktdichten sind unterschiedlich (vgl. Tabelle 1 und Abbildung 1). Der zeitliche Aufwand zwischen den Methoden unterscheidet sich stark. Vor allem bei den TLS Aufnahmen, welche nach wie vor als der Goldstandard für die 3D Vermessung von Wäldern gelten, muss eine signifikant längere Aufnahmezeit verbucht werden.

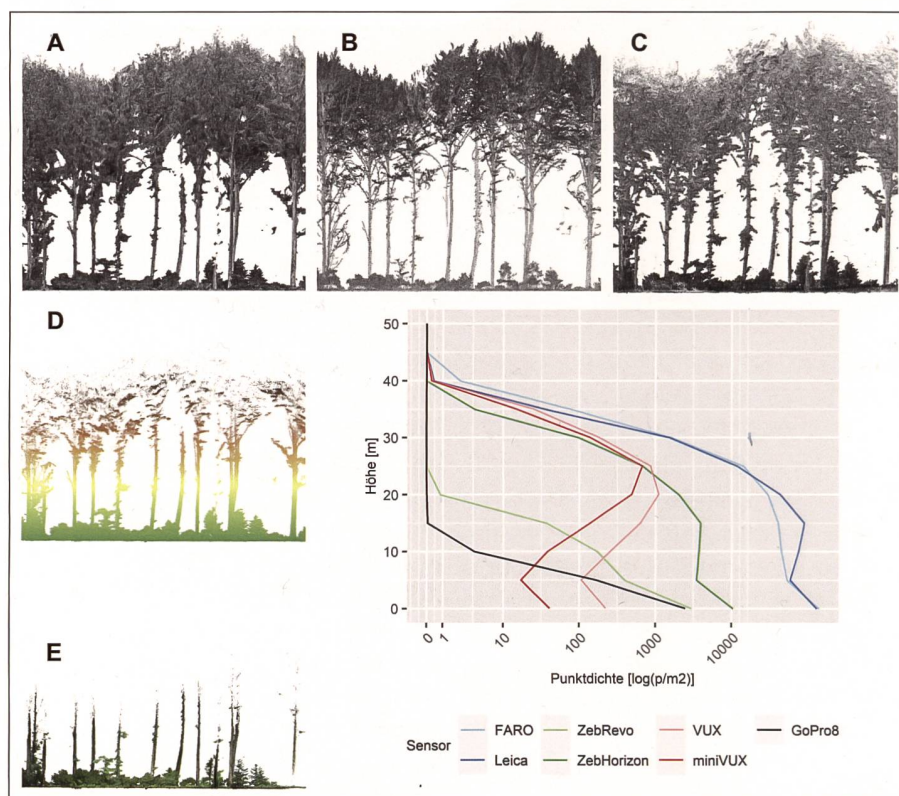


Abb. 1: Vertikale Punktdichte Verteilung für die getesteten Sensoren sowie vertikale Querschnitte durch Punktwolken, aufgenommen mittels Leica BLK360 TLS (A), VUX1-UAV UAVLS (B), GeoSLAM ZebRevo mobilem Laserscanner (C), GeoSLAM ZebRevo (D) und GoPro (E). (A) bis (C) sind eingefärbt anhand der Laser Rückstreuungsintensität, (D) anhand der Höhe über Grund und (E) anhand der Kamera RGB Informationen. Der Querschnitt hat eine Tiefe von 10 m. Alle aufgenommenen Punktwolken können unter <https://point-clouds.wsl.ch/> betrachtet werden.



In Abbildung 1 sind die vertikalen Punktdichteverteilungen sowie fünf vertikale Querschnitte durch die Punktwolken dargestellt. Die TLS Aufnahmen weisen hierbei die dichtesten Punktwolken auf, mit der grössten vertikalen Abdeckung und einem hohen Detailreichtum bis zum Kronendach. Unterschiede in der vertikalen Punktdichteverteilung zwischen den beiden TLS Instrumenten (Leica und FARO) können mehrheitlich auf die unterschiedlichen Aufnahmezeiten zurückgeführt werden (belaubt vs. unbelaubt). Bei Aufnahmen unter belaubten Bedingungen muss mit mehr Abschattung durch das vorhandene Blätterwerk gerechnet werden, womit eine höhere Punktdichte im unteren Bereich des Bestandes erreicht wird, was aber auch zu einer geringeren Punktdichte im oberen Kronenbereich aufgrund der Abschattung resultiert. Die Punktdichten für die GoPro und ZebRevo Aufnahmen sind in den ersten, unteren Metern vergleichbar. Jedoch ändert dies mit zunehmender Höhe stark. Die vertikale Abdeckung des ZebRevos ist grösser und erreicht eine maximale Höhe von bis zu 20 m. Die Punktwolke aus den GoPro Aufnahmen weist eine deutlich geringere vertikale Abdeckung auf, mit sehr geringen Punktdichten ab 10 m über Grund. Die Aufnahmen mittels drohnen-gestütztem Laserscanning haben mit Abstand die geringsten Punktdichten, wobei der Detailreichtum speziell im unteren Bereich des Bestandes stark abnimmt. Dies ist besonders ausgeprägt unter belaubten Bedingungen (wie bei den miniVUX2 Aufnahmen). Alle für diesen Sensorenvergleich erhobenen Punktwolken können auf der Website <https://pointclouds.wsl.ch/> unter der Rubrik «Ramerenwald Benchmark» interaktiv betrachtet und verglichen werden.

## Extraktion inventur-relevanter Merkmale

Die unterschiedlichen Eigenschaften der erhobenen Punktwolken resultieren auch in unterschiedlichen Ergebnissen bei der Extraktion von inventurrelevanten Merkmalen. Um die Performance der unterschiedlichen Sensoren zu testen, wurde

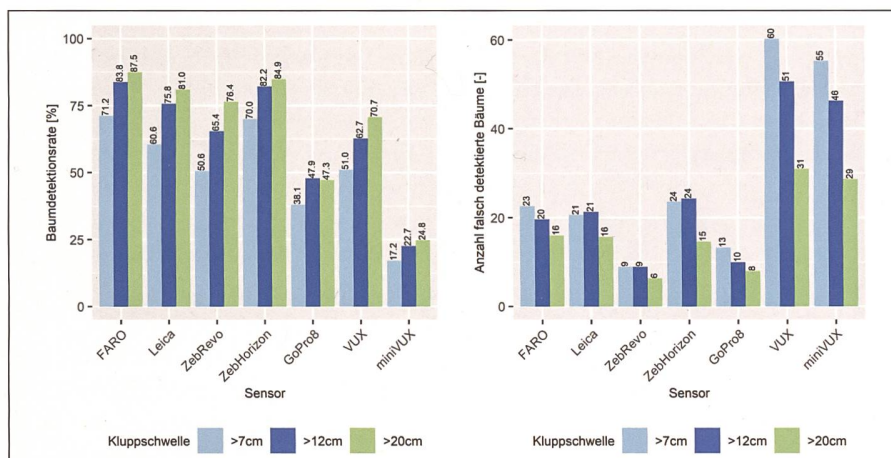


Abb. 2: Baumdetektionsrate (links) und Anzahl falsch detektierter Bäume (rechts) für die verschiedenen getesteten Sensoren sowie für drei getestete Kluppschwellen von 7, 12 und 20 cm.

hier auf die Berechnung von Baumpositionen sowie der Brusthöhendurchmesser (BHD) innerhalb einer vergrösserten Aufnahme fläche (50 × 50 m<sup>2</sup>) fokussiert. Für das gesamte Untersuchungsgebiet sind Baumpositions- und BHD Informationen vorhanden, welche mittels Tachymeter und Kluppe für alle Bäume ab BHD 7 cm gemessen wurden.

Die TLS Aufnahmen weisen die höchste Baumdetektionsrate bei einer geringen Anzahl falsch detektierter Bäume auf (Abbildung 2), wobei der FARO Sensor etwas besser abschneidet als der Leica Sensor. Dies ist aber hauptsächlich auf jahreszeitliche Unterschiede im Wald zurückzuführen und weniger auf die Sensoreigenschaften. Der mobile Laserscanner ZebRevo zeigt eine ähnlich hohe Baumdetektionsrate auf wie die TLS Aufnahmen, bei gleichzeitig niedriger Anzahl falsch detektierter Bäume. Dieses gute Abschneiden des ZebRevos ist vor allem auf die geringe Abschattung aufgrund des dichten mobilen Aufnahmestusters zurückzuführen. Aufgrund der stationären «Multi-Station» Aufnahme der TLS Sensoren muss immer mit einer gewissen Abschattung innerhalb der Fläche gerechnet werden. Dies kann sich schlussendlich auf die Baumdetektion auswirken. Die schlechtere Performance des ZebRevos im Vergleich zu den TLS Aufnahmen bei kleineren Bäumen ist auf das erhöhte Rauschen in der Punktwolke

zurückzuführen. Aber auch dichter Unterwuchs kann sich negativ auf die Detektionsrate auswirken. Dies ist aber bei allen Sensoren zu beobachten. Die niedrige Detektionsrate der GoPro Aufnahme ist zu einem grösseren Teil auf die verkleinerte Abdeckung der Probefläche aufgrund eines zirkularen Aufnahmestusters zurückzuführen (Flächenabdeckung zwischen 68 und 85% auf den getesteten Flächen). Die luftgestützten Aufnahmen weisen aufgrund der niedrigen Punktdichte über die gesamte Vertikale eine niedrigere Baumdetektion auf. Zudem war bei den UAVLS Aufnahmen die Anzahl falsch detektierter Bäume höher.

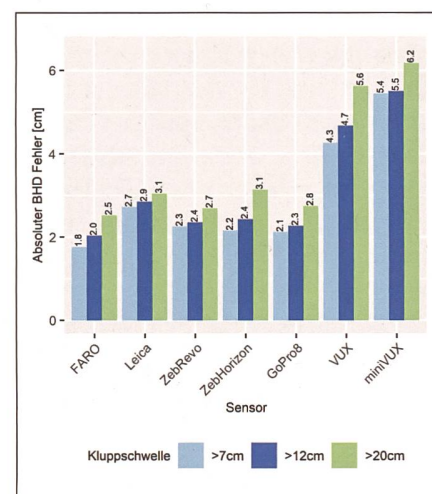


Abb. 3: Fehler in der BHD Abschätzung für die verschiedenen getesteten Sensoren und analysierten Flächen.



Ein ähnliches Bild wie bei der Baumdetektion ergibt sich auch bei den Genauigkeiten der automatisch abgeleiteten BHD Informationen (Abbildung 3). Die beiden TLS Instrumente weisen eine sehr hohe Genauigkeit auf, wobei die Durchmesser aus im Winter aufgenommenen FARO Messungen etwas näher an den Referenzwerten liegen und die Daten der Leica Messungen den BHD tendenziell überschätzen. Diese Überschätzung kann mit dem erhöhten Vorhandensein von Blättern im Unterwuchs begründet werden. Der ZebRevo zeigt im Mittel sogar etwas tiefere Fehler im abgeleiteten BHD im Vergleich mit dem Leica TLS. Speziell hervorzuheben ist die Genauigkeit der erhobenen BHD Werte aufgrund der GoPro Aufnahmen. Diese weisen ähnlich tiefe Werte wie die TLS und ZebRevo Daten auf. Jedoch muss hier beachtet werden, dass aufgrund der zirkulären Aufnahmemuster die erkannten Bäume im Vergleich zu den TLS und MLS Aufnahmen nicht identisch sind. Wie zu erwarten, zeigen die luftgestützten Sensoren jeweils die grössten Fehler in der BHD Abschätzung auf.

## Fazit aus dem Sensorenvergleich

Für eine Einbindung dieser neuen Technologien in eine nationale Waldinventur stehen vor allem die benötigte Zeit für die Datenaufnahme, geringer Materialaufwand sowie die Robustheit der Datenaufnahme im Fokus. Die erweiterten Aufnahmen mittels 3D Technologien sollten möglichst in laufenden Feldaufnahmen integriert werden können und den zeitlichen Aufwand auf den Flächen nicht signifikant verlängern. Somit können Aufnahmen mittels TLS Sensoren momentan nicht als operationell anwendbar betrachtet werden. Zwar existieren heute bereits Systeme, welche mehrere Scanaufnahmen hochautomatisiert verknüpfen können, der Zeit- und Materialaufwand liegt aber immer noch deutlich höher als beim mobilen Laserscanning. Die Drohnenaufnahmen bestechen zwar mit einer kurzen Aufnahmezeit. Aufgrund der Performance

im hier dargestellten Sensorenvergleich sowie den logistischen und rechtlichen Limitationen (Flugbewilligungen, rechtliche Auflagen) ist diese Technologie jedoch aktuell weniger geeignet für einen operationellen Einsatz in nationalen Waldinventuren. Die Aufnahmezeit sowie Performance der GoPro Aufnahmen sind zwar interessant, aufgrund der limitierten vertikalen (vgl. Abbildung 1) wie auch horizontalen Abdeckung jedoch ebenfalls weniger geeignet. Zusätzlich fehlt es dieser Technik noch an Robustheit, wobei vor allem bei komplexeren Flächen mit viel Unterwuchs die Erstellung von 3D Punktwolken erschwert wird. Aufgrund des Sensorenvergleichs weist der Einsatz von mobilem Laserscanning das grösste Potenzial auf. Durch mittlerweile weitere Entwicklungen in dieser Technologie konnte auch die vertikale Abdeckung stark verbessert werden, womit mit der neuesten Generation dieses Sensors (GeoSLAM ZebHorizon) mehrheitlich die gesamte vertikale Struktur der Probeflächen abgedeckt werden kann (vgl. Abb. 1). Zusätzlich überzeugt die neue Sensorgeneration auch bei der automatischen Baumdetektion sowie BHD Abschätzung (vgl. Resultate zu «ZebHorizon» in Abb. 2 und 3).

## Wie robust sind die Aufnahmen?

Auch wenn das mobile Laserscanning im aufgezeigten Sensorenvergleich das grösste Potenzial aufweist, muss die operationelle und landesweite Einsatzfähigkeit dieser Technologie geprüft werden. Hierfür werden zurzeit mehrere Versuche und Tests durchgeführt, um eine Aussage über die Robustheit der Aufnahmen machen zu können. Dazu werden verschiedene Probeflächen des Schweizerischen LFI mittels mobilem Laserscanning vermessen. Hierbei wird versucht, eine möglichst grosse Bandbreite der schweizerischen Waldbilder abzudecken. Ein grosser Einfluss auf die Güte der Aufnahme (z.B. horizontale sowie vertikale Abdeckung) kann der aktuelle Vegetationszustand selbst haben. Die Aufnahmen im Wald finden zwischen März und Oktober statt, womit die be-

suchten Flächen in unterschiedlichen Vegetationsstadien aufgefunden werden. Inwiefern die Phänologie die Datenerhebung und Analyse beeinflusst, wird ebenfalls untersucht. Letztlich wird auch abgeklärt, wie weit verschiedene Operateure die Datenqualität sowie die daraus abgeleiteten Merkmale beeinflussen.

## Fazit

Mit den neuesten Entwicklungen im Bereich der nahen Fernerkundung rückt die operationelle Einbindung dieser Technologien zur Erfassung der 3D Waldstruktur in grossflächigen, nationalen Waldinventuren näher. So weist vor allem das mobile Laserscanning aufgrund seiner schnellen sowie robusten Datenaufnahme ein sehr grosses Potenzial dafür auf. Zurzeit finden verschiedenste Tests und Versuche im Rahmen des Schweizerischen Landesforstinventars statt, um die Robustheit dieser Technologie intensiv zu untersuchen. Mit diesen neuen Technologien können Datensätze geschaffen werden, welche es erlauben, die Waldstruktur und dessen Veränderung in einem noch nie dagewesenen Detailgrad zu analysieren und zu quantifizieren. Dies wird weitere relevante Arbeiten z. B. zur Schutzwirkung des Waldes, zur Biodiversität oder zur gespeicherten Biomasse im Schweizer Wald ermöglichen.

### Referenzen:

- Fischer, C., Traub, B., 2019. Swiss national forest inventory: methods and models of the fourth assessment, *Managing Forest Ecosystems*.
- Kükenbrink, D., et al., 2017. Quantification of hidden canopy volume of airborne laser scanning data using a voxel traversal algorithm. *Remote Sens. Environ.* 194.

Daniel Kükenbrink  
Mauro Marty  
Ruedi Bösch  
Christian Ginzler  
Forschungseinheit Landschaftsdynamik  
Eidg. Forschungsanstalt für Wald,  
Schnee und Landschaft WSL  
Zürcherstrasse 111  
CH-8903 Birmensdorf