

Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich

Christian Ginzler
Martina L. Hobi

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft; Landschaftsdynamik (CH)*
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft; Landschaftsdynamik (CH)

Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich

Im vergangenen Jahr war es in der Schweiz zum ersten Mal möglich, ein nationales Modell der Vegetationshöhe aus digitalen Luftbildern zu berechnen. Informationen über die Vegetationshöhe von Wäldern können aus ADS80-Stereoluftbildern, welche routinemässig vom Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) aufgenommen werden, gewonnen werden. Dazu wird in einem ersten Schritt ein digitales Oberflächenmodell (DOM) mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung von 1×1 m aus den Luftbildern errechnet. In einem zweiten Schritt wird dieses DOM mithilfe eines bestehenden, auf Laserdaten basierenden digitalen Geländemodells (DGM) für die Berechnung der aktuellen Vegetationshöhe normalisiert, und Gebäudeflächen werden maskiert. Daraus resultiert ein Höhenmodell der Vegetation (VHM). Im Rahmen des Schweizerischen Landesforstinventars konnte ein solches Modell mit konsistenten Methoden und einem noch nie da gewesenen Detaillierungsgrad gerechnet werden. Um die ganze Schweiz abdecken zu können, wurden Sommer-Luftbilder aus den Jahren 2007 bis 2012 verwendet. Das VHM weist mit einer Abdeckung von 98% der Landesfläche eine hohe Vollständigkeit auf. Problematische Gebiete für die Berechnung des Modells waren steile Bergflanken und sehr helle Gletscherflächen, sodass das Modell in diesen Gebieten Lücken aufweist. Die gewonnenen Vegetationshöheninformationen eignen sich besonders für Analysen von ganzen Beständen; für Einzelbaumauswertungen sind die Daten hingegen räumlich zu wenig aufgelöst. Das VHM erlaubt eine grosse Vielfalt von Anwendungen, wie in diesem Artikel an den drei Beispielen 1) Generierung von Waldmasken, 2) Extraktion von Bestandeslücken und 3) Detektion von Veränderungen innerhalb der bestockten Fläche erläutert wird.

Keywords: canopy height, photogrammetry, DSM, forest mapping
doi: 10.3188/szf.2016.0128

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail christian.ginzler@wsl.ch

Informationen zur Vegetationshöhe in Wäldern sind von Relevanz für die Analyse und Bewertung von verschiedenen Waldfunktionen wie zum Beispiel Nutzung (Berechnung des Holzvorrates), Biodiversität (Charakterisierung der Bestandsstruktur) oder Schutz vor Naturgefahren (Abschätzung von Kronendeckungsgrad und Lückengrössen). So können Holzvorrat und oberirdische Biomasse zu einem grossen Teil durch die Höhe der Vegetation erklärt werden (Hollaus et al 2009). Horizontale und vertikale Waldstrukturen sind wichtige Variablen für die Modellierung von Habitaten verschiedener Tierarten (Graf et al 2009, Zellweger et al 2015). Und die Art, Grösse und Verteilung von Bäumen sind entscheidende Parameter für die Beurteilung der Schutzfunktion von Wäldern (Dorren et al 2006).

Daten zur Vegetationshöhe werden im Wald meist terrestrisch anhand von Probeflächen einer Stichprobe erhoben, wo neben dem Brusthöhen-durchmesser auch die Höhe von Einzelbäumen gemessen wird. Diese Messungen sind aufwendig und in dichten Beständen oft sehr schwer durchzuführen. Zudem sind solche Messungen meist auf kleine Stichproben – Probeflächen und einzelne Bäume – beschränkt. Methoden der Fernerkundung erlauben hingegen eine effiziente und in vielen Fällen ausreichend genaue Erfassung von «3-D-Information» über grosse Flächen.

Grundsätzlich kann bei Fernerkundungsdaten zwischen aktiven Systemen wie Laser oder Radar und passiven Systemen wie optischen Kameras unterschieden werden (Gao 2007). Laserscanning und Stereoluftbilder eignen sich besonders, um Höheninfor-

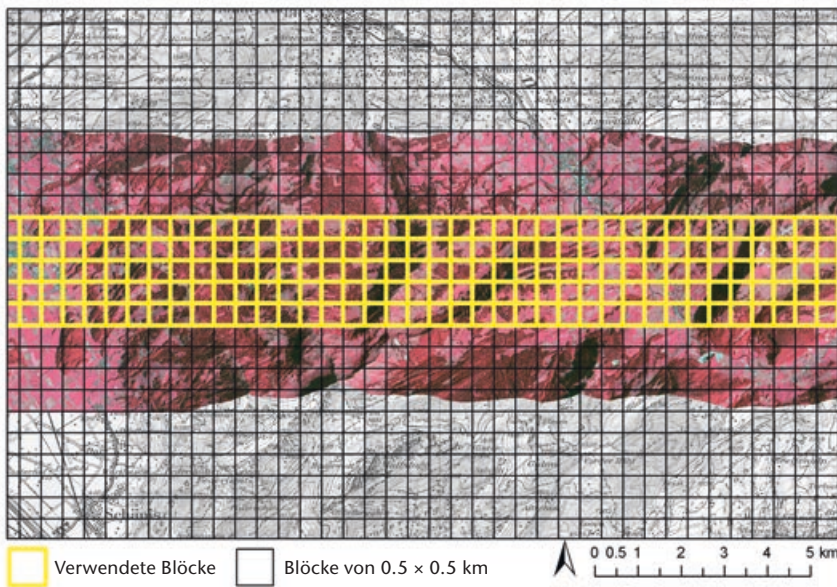


Abb 1 Unterteilung der Schweiz in Blöcke von 0.5×0.5 km. Für die Bildkorrelation werden nur die zentralsten der möglichen Blöcke pro Luftbildstreifen (gelbe Blöcke) verwendet, um Verkippungen im Modell zu vermeiden.

mationen über grosse Flächen zu gewinnen. Im forstlichen Bereich hat sich in den letzten Jahren das aktive System Airborne Laserscanning (ALS) durchgesetzt. Die Laserstrahlen dringen durch Lücken in die Vegetation ein und werden an der Vegetationsoberfläche und, im optimalen Fall, vom bewachsenen Boden reflektiert. Es können somit die Vegetationsoberfläche und die Bodenoberfläche gleichzeitig erfasst werden (Morsdorf 2011). In verschiedenen Ländern werden aktuell landesweite ALS-Kampagnen durchgeführt, vor allem um nationale digitale Geländemodelle (DGM) zu erstellen (Bohlin et al 2012). Für die Erstellung von präzisen DGM in bewaldeten Gebieten sind ALS-Daten unumgänglich, da nur sie die Erfassung des Bodens unter dem Waldbestand erlauben.

Neben dem aktiven ALS können auch aus Stereoluftbildern Höheninformationen gewonnen werden. Die Messung von einzelnen Baumhöhen mit Methoden der Fotogrammetrie reicht bis weit ins letzte Jahrhundert zurück. Digitale Bilddaten, effiziente Algorithmen und schnelle Prozessoren erlauben heute die Berechnung von räumlich dichten Höhenmessungen über grosse Gebiete. Viele Länder führen regelmässige operationelle Befliegungen mit flugzeuggetragenen optischen Kameras durch. Mit solchen Befliegungen werden meist zweierlei Ziele verfolgt: die Produktion von Orthobildern und die Nachführung von topografischen Karten. Damit ist eine Aktualisierung der Luftbilddaten in einem kontinuierlichen Zyklus garantiert. Mithilfe dieser Luftbilddaten können zusätzlich digitale Oberflächenmodelle (DOM) mit hoher räumlicher Auflösung gerechnet werden. Durch Differenzbildung zwischen einem DOM und einem bestehenden DGM kann ein Modell der Vegetationshöhe (VHM) abge-

leitet werden. Wenn man davon ausgeht, dass sich das Gelände über die Zeit nicht sehr stark verändert und bei grossen Veränderungen das DGM nachgeführt wird, kann ein einmal erstelltes DGM für die Berechnung von VHM zu verschiedenen Zeitpunkten verwendet werden. Somit stellen die Stereoluftbilddaten eine effiziente Alternative zu wiederholten Laserbefliegungen für die Gewinnung von flächendeckenden Informationen über die Vegetationshöhe dar. Der kontinuierliche Zyklus der Bilddatengewinnung sowie die hohe Automatisierbarkeit der Berechnungsschritte stellen eine zeitnahe Aktualisierung der DOM sicher. Diese Aktualisierung ist vor allem dann wichtig, wenn die Veränderung von Waldbeständen von Interesse ist, und sie erlaubt, Veränderungen über mehrere Zeitschritte zu quantifizieren (Wang et al 2015).

Im vergangenen Jahr war es zum ersten Mal möglich, ein VHM für die ganze Schweiz mithilfe von digitalen Stereoluftbildern (Abbildung 1) zu rechnen. Die Verfügbarkeit von flächendeckendem digitalem Bildmaterial von hoher Qualität, effiziente Bildkorrelationsverfahren und Neuerungen in der Computertechnologie waren Voraussetzungen, die diese Entwicklung möglich machten. Ziel dieses Artikels ist es, die Arbeitsprozesse zur Generierung des schweizweiten VHM zu erläutern, die zu erwartenden Genauigkeiten zu untersuchen und das breite Anwendungspotenzial dieses Datensatzes anhand der drei Beispiele 1) Generierung von Waldmasken, 2) Extraktion von Bestandeslücken und 3) Detektion von Veränderungen innerhalb der bestockten Fläche aufzuzeigen.

Material und Methoden

Studienggebiet

Studienggebiet ist die ganze Schweiz mit einer Fläche von 41 285 km² und Höhenlagen zwischen 200 und 4600 m ü. M. Die Schweiz zeichnet sich durch eine grosse Vielfalt an Landnutzungstypen und Wäldern aus, was sie als Untersuchungsgebiet für eine solche Studie spannend macht. Gemäss dem Waldbericht 2015 sind die Wälder der Schweiz zu 43% reine Nadelwälder, zu 19% gemischte Nadelwälder, zu 13% gemischte Laubwälder und zu 25% reine Laubwälder (Rösli et al 2015). Diese Mischung von verschiedenen Waldtypen ist für diese Studie von Relevanz, da sich die Genauigkeit von Höhenmessungen in Nadelwäldern von derjenigen in Laubwäldern unterscheidet.

Bilddaten

Für die Berechnung des VHM wurden operationell erhobene ADS80-Stereoluftbildstreifen vom Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) verwendet. Der Sensor nimmt simultan Bildstreifen aus

unterschiedlichen Blickwinkeln (Nadir und Rückwärts) auf und erlaubt so eine stereoskopische Betrachtung der aufgenommenen Objekte (Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpretieren 2012). Swisstopo hat zwei verschiedene Flugprogramme, eines zur Aktualisierung des Topografischen Landschaftsmodells (TLM), wofür hauptsächlich in der laubfreien Saison geflogen wird, und eines für die Orthofotoproduktion, wofür die Bilder während der Vegetationsperiode aufgenommen werden. Mit dieser Strategie wird die Schweiz mindestens alle sechs Jahre im belaubten Zustand befliegen.

Um die ganze Schweiz für diese Studie abzudecken, wurden Bilder aus den Jahren 2007 bis 2012 verwendet. Die räumliche Auflösung der Luftbilder beträgt etwa 0.25 m für die Gebiete Jura, Mittelland und Voralpen; in den Gebirgsregionen beträgt sie etwa 0.50 m. Die Stereoluftbildstreifen weisen eine Länge von bis zu 90 km und eine Querüberlappung von benachbarten Bildstreifen von etwa 50% auf. Die Kamerakalibrierung und die absolute Bildorientierung wurden durch swisstopo durchgeführt.

Berechnung des Oberflächen- und des Vegetationshöhenmodells

Die Methoden und Arbeitsläufe zur Erstellung des DOM wurden in den letzten Jahren an der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL entwickelt und optimiert, sodass heute von einem halbautomatischen Prozess gesprochen werden kann. Um die Berechnungen auf verschiedene Computer zu verteilen, wurde die Schweiz in 165 500 Blöcke von je 0.5×0.5 km unterteilt. Da sich die Luftbilddaten zu etwa 50% überlappen, standen jeweils zwei Luftbildstreifen pro Block zur Verfügung. Der Bildstreifen, der am zentralsten über dem Block lag (der Nadir-nächste Streifen), hatte die höchste Priorität für die Berechnung, da die Verkippung von Objekten gegen den Bildrand hin durch die Zentralperspektive zunimmt (Abbildung 1). Der zweite Bildstreifen wurde nur in Fällen verwendet, wo die Bildkorrelation auf dem ersten Streifen nicht erfolgreich war. Mit einer zentralen Datenbank wurden die einzelnen Berechnungen verwaltet, und insgesamt standen 16 parallele Prozessoren auf zwei HP-Computern zur Verfügung.

Die Bildkorrelation wurde mit dem «Next Generation Automatic Terrain Extraction» (NGATE)-Modul der Software SocetSet 5.6 von der Firma BAE Systems realisiert. Um einen hohen Grad der Vollständigkeit zu erreichen, wurden zwei verschiedene Korrelationsstrategien verwendet. Die Strategie «ADS steil» war spezialisiert auf steile Gebiete mit topografisch sehr heterogenen Oberflächen. Die Strategie «ADS flach» eignete sich vor allem für homogene Flächen mit wenig Kontrast. Insgesamt standen also vier Kombinationen von Bildstreifen und Korrelationsstrategien zur Verfügung (Ginzler

& Hobi 2015a). Die Berechnungszeit pro Block und Strategie betrug 16 Minuten, und innerhalb von 320 Tagen (inklusive ca. 10% für Datenbank-Updates und Netzwerkarbeiten) konnte ein landesweites DOM in Form eines Rasterdatensatzes mit einer Auflösung von 1×1 m berechnet werden. Zur Normalisierung, das heisst zur Berechnung der aktuellen Höhe der Objekte durch die Subtraktion der Höhe über Meer von der jeweiligen Objekthöhe, wurde das DGM «swissALTI^{3D}» der swisstopo (Artuso et al 2003) verwendet. Mithilfe des TLM von swisstopo wurden Gebäude ausmaskiert, sodass ein VHM resultierte.

Genauigkeitsabschätzungen

Um die Genauigkeit des DOM für unterschiedliche Bodenbedeckungen abzuschätzen, wurden manuelle Stereomessungen des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) verwendet. Bei der Luftbildinterpretation im LFI werden auf dem Netz der terrestrischen Probeflächen auf der Interpretationsfläche von 50×50 m in einem regelmässigen Raster 25 Höhenmessungen und Bodenbedeckungsansprachen in elf Klassen durchgeführt (Ginzler et al 2005). Für die Genauigkeitsabschätzung standen 162 559 Messungen zur Verfügung, die auf denselben Stereoluftbildstreifen durchgeführt wurden wie die Bildkorrelation für das DOM. Es wurden nur Messungen mit dem Attribut «sicher» für die Auswertung verwendet. Als Genauigkeitsmasse wurden der Median, das 68%- und das 95%-Quantil sowie die Normalized Absolute Median Deviation (NMAD) – ein robustes Mass für die Streuung – berechnet. Zusätzlich wurden unabhängige terrestrische Vermessungspunkte ($n=198$) der swisstopo mit den Höhenwerten des DOM verglichen.

Baumhöhenmessungen als Referenzdaten

Im Rahmen des LFI wird die Höhe von ausgewählten Bäumen pro Stichprobe terrestrisch mittels des Baumhöhenmessgerätes Vertex gemessen (Keller 2013). Als Referenzdaten wurden Baumhöhenmessungen aus der ganzen Schweiz der Jahre 2009 bis 2013 herangezogen. Die Koordinaten der Bäume wurden mittels Polarmessungen zum Stamm (auf der Höhe des Brusthöhendurchmessers) von den Probeflächenzentren (PFZ) aus gemessen. Die absoluten Positionen der PFZ wurden mit einem Navigationssystem des Typs Trimble GeoXH GNSS mit einer Genauigkeit von ± 1 m bestimmt. Die terrestrisch gemessenen Baumhöhen wurden mit den Maximalwerten des VHM in einem Radius von 5 m rund um die Stammposition verglichen. Für den Vergleich wurden nur diejenigen Messungen verwendet, wo die terrestrische Messung der Baumhöhe zu einem späteren Zeitpunkt als die Bildaufnahme stattfand und die Bäume der Oberschicht angehörten ($n=3109$).

Resultate

Vollständigkeit und Genauigkeit von Oberflächen- und Vegetationshöhenmodell

Das DOM über die Schweiz konnte mit einer sehr hohen Vollständigkeit von 97.7% gerechnet werden (Ginzler & Hobi 2015a). Die grössten Probleme traten in sehr steilem Gelände, auf hellen Gletschern und in Gebieten mit lockeren Nadelwäldern mit sehr schmalen Kronen auf. Das normalisierte Oberflächenmodell aus der Differenz von DOM und swiss-ALTI^{3D} zeigt in steilen Gebieten mit abrupten Übergängen Fehler. Geringe Unterschiede in der Lage wirken sich bei der Differenz sehr stark aus. Diese Fehler können mehrere Meter betragen. Für das VHM bedeutet das, dass bei grasigen Felskanten fälschlicherweise sehr hohe Vegetation berechnet wird. Bei überhängenden Kronen an Geländekanten kann die Baumhöhe ebenfalls stark überschätzt werden.

Die Differenzen des DOM zu den (meist in flachem Gelände vorhandenen) Vermessungspunkten der swisstopo ergaben einen Median von 0.04 m mit einer mittleren Variation von 0.32 m (NMAD). Die Variation entsprach etwa der Bodenauflösung der Luftbilder, welche rund ein Pixel beträgt.

Bodenbedeckung	GSD (m)	Stichprobe	Median (m)	NMAD (m)	68%-Quantil (m)	95%-Quantil (m)
Laubbaum	0.25	21 918	-0.82	1.78	-0.06	4.82
	0.50	5936	-1.24	2.30	-0.24	4.10
Nadelbaum	0.25	10961	-1.03	3.02	0.24	7.21
	0.50	8574	-2.04	3.99	-0.37	7.41
Kraut/Gras	0.25	48 381	-0.01	0.46	0.20	1.50
	0.50	30 741	-0.01	0.86	0.39	1.82

Tab 1 Differenz zwischen den mit manueller Stereomessung (Luftbildinterpretation) ermittelten und den aus dem digitalen Oberflächenmodell resultierenden Höhen nach Bodenbedeckung. GSD (Ground sampling distance) entspricht der räumlichen Auflösung der Luftbilder. NMAD steht für den normalisierten Median der absoluten Abweichung.

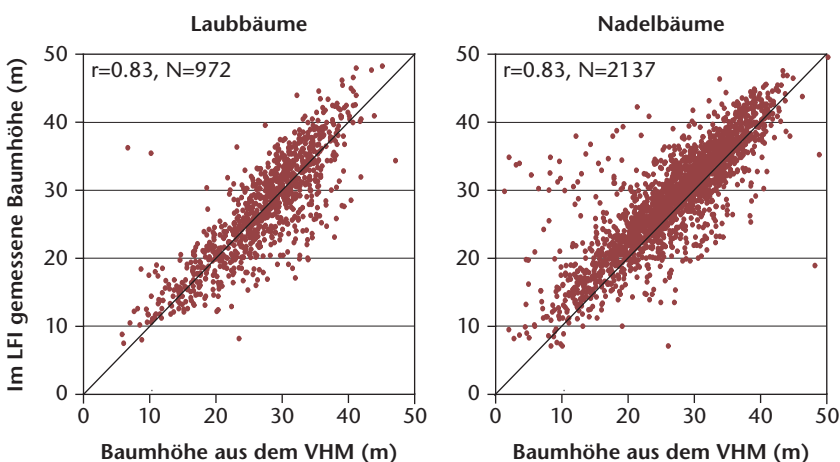


Abb 2 Korrelation zwischen der aus dem Vegetationshöhenmodell (VHM) ermittelten und der im Schweizerischen Landesforstinventar (LFI4b) terrestrisch gemessenen Baumhöhe für Laubbäume (links) und Nadelbäume (rechts). r: Korrelationskoeffizient, N: Anzahl terrestrische Messungen.

Der Vergleich der manuellen Stereomessungen mit dem DOM zeigte eine mittlere Variation der Höhendifferenzen (NMAD) zwischen 0.46 und 3.99 m (Tabelle 1), wobei Kraut-/Grasflächen die kleinsten und Baummessungen die grössten Unterschiede zeigten (Ginzler & Hobi 2015b). Da auch manuelle Stereomessungen nicht fehlerfrei sind, wurden 6157 Doppelmessungen an fixen Rasterpunkten auf Stereobildern mit 25 cm Bodenauflösung von unterschiedlichen Interpreten analysiert. Die Streuung (NMAD) betrug bei Laubbäumen (n=2858) 2.06 m und bei Nadelbäumen (n=3299) 2.92 m. Die Höhenmessung an fixen Rasterpunkten ist bei Nadelbäumen schwieriger als bei Laubbäumen. Diese Streuungen sind mit dem NMAD des DOM und den Stereomessungen vergleichbar.

Vergleich von Einzelbaumhöhen

Die Höhe aus dem VHM korrelierte gut mit der terrestrisch gemessenen Baumhöhe aus dem LFI (Abbildung 2). Es gibt wenige Ausreisser, diese stammen vor allem aus Gebieten, wo die Bildkorrelation zur Erstellung des Modelles nicht erfolgreich war.

Anwendungsbeispiele

Generierung von Waldmasken

Daten über die Vegetationshöhe eignen sich sehr gut, um Waldmasken unter Verwendung unterschiedlicher Walddefinitionen zu erstellen (Waser et al 2015). Die wichtigsten Parameter zur Definition von Wald sind die Höhe, der Deckungsgrad und die Breite beziehungsweise die Fläche eines bewaldeten Gebietes. Ein weiterer Parameter, der allerdings mit Methoden der Fernerkundung nicht automatisch bestimmbar ist, ist die Bodennutzung. Bäume, die nicht forstlich genutzt werden (z.B. Obstbäume oder Bäume in Parkanlagen), zählen gemäss LFI nicht zur Waldfläche. Die messbaren Parameter können aus dem VHM abgeleitet werden.

Waser et al (2015) haben die Charakteristiken der LFI-Walddefinition aus dem VHM extrahiert und eine nationale Waldmaske erstellt. Mit einem Hörschwellenwert von 3 m wurde zuerst eine binäre Maske gerechnet. Um den Deckungsgrad zu erhalten, wurde auf der Interpretationsfläche von 51 × 51 m der Anteil der Pixel mit ≥3 m Höhe berechnet. Mittels «moving window»-Technik wurde dies für jeden Quadratmeter der Schweiz wiederholt. Jeder Quadratmeter, bei welchem mindestens 20% der Pixel auf der Interpretationsfläche von 51 × 51 m eine Vegetationshöhe von ≥3 m aufwiesen, wurde der Kategorie «Wald» zugeordnet. Da mit dieser Methode die Waldfläche an Waldrändern überschätzt wird (auch für einen Punkt im Offenland kann in der Interpretationsfläche von 51 × 51 m noch ein Deckungsgrad von ≥20% erreicht werden), wurde an Waldrändern die

Höhe (m ü.M.)	Waldfläche			Waldrand- länge VHM (km/km ²)	Laubbaumanteil am Waldrand LFI4b (%)
	Waldmaske VHM (ha)	LFI4b (ha)	Abweichung (%)		
>1800	87 033	95 761	-9.1	0.04	0
1400–1800	235 080	247 184	-4.9	0.06	11
1000–1400	333 980	311 760	7.1	0.08	33
600–1000	386 354	360 329	7.2	0.14	53
<600	251 598	223 975	12.3	0.31	80
Schweiz	1 294 046	1 239 008	4.4	0.09	45

Tab 2 Waldfläche gemäss der aus dem Vegetationshöhenmodell (VHM) ermittelten Waldmaske und gemäss LFI4b (2009–2013) sowie Waldrandlänge pro Quadratkilometer Wald gemäss VHM und Laubbaumanteil am Waldrand gemäss LFI4b nach Höhenlage.

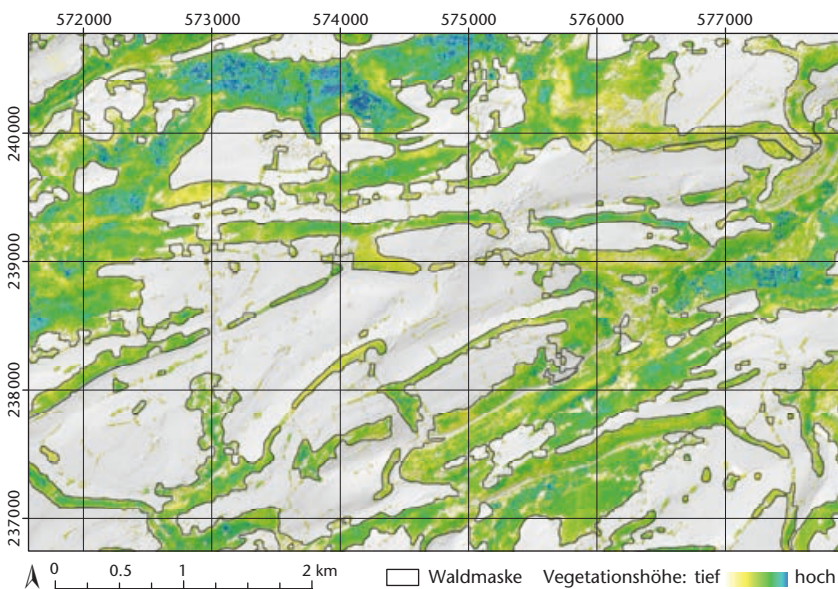


Abb 3 Kartenausschnitt, der sowohl die aus dem Vegetationshöhenmodell (VHM) mit der LFI-Walddefinition berechnete Waldmaske als auch die Vegetationshöhe selbst zeigt.

resultierende Waldfläche um 30% der Seitenlänge der Interpretationsfläche reduziert. Mittels morphologischer Filter wurden Flächen mit einer Breite von weniger als 20 m verworfen. Zum Auffüllen von als Folge von Holzschlägen oder Störungen temporär nicht bestockten Flächen und zum Eliminieren von nicht der Bodennutzungskategorie «Wald» angehörenden Flächen wurden die Informationen des TLM von swisstopo verwendet.

Das Ergebnis zeigt, dass die aus dem VHM generierte Waldmaske zu einer um 4.4% grösseren Waldfläche für die Schweiz führt, als im LFI4b (2009–2013) ausgewiesen wird (Tabelle 2; Waser et al 2015). Je nach Höhenstufe sind die Unterschiede aber verschieden. Im LFI wird die Waldbegrenzungslinie durch die Position der Stämme festgelegt. Der Waldrand der Waldmaske liegt hingegen am Kronentrauf. Dies kann gerade bei Laubbäumen zu Unterschieden von mehreren Metern führen. Die Waldfläche in den tieferen Lagen wird mit der auf dem VHM basierenden Waldmaske stärker überschätzt als im schweizweiten Durchschnitt, dies deshalb, weil hier sowohl der Laubbaumanteil am

Waldrand als auch der relative Anteil von Waldrändern an der Waldfläche hoch sind. In den oberen Lagen hingegen wird die Waldfläche mit der Waldmaske unterschätzt. Grund dafür ist, dass in den oberen Lagen für die 3-D-Bildkorrelation nur Luftbildstreifen mit 50 cm räumlicher Auflösung zur Verfügung standen. Nadelbäume mit schmalen Kronen wurden mit diesem Bildmaterial zum Teil falsch korreliert und fehlen somit im VHM wie auch in der Waldmaske.

Die Einsatzmöglichkeiten der automatisch generierten Waldmaske sind vielfältig. So können unterschiedliche Schwellenwerte angewendet und Waldflächen für verschiedene Walddefinitionen gerechnet werden. Die Klassifikation in Wald und Feldgehölze (zu kleine und zu schmale Flächen für Wald) erlaubt die Analyse von Vernetzungen (Abbildung 3). Die Verschneidung der Waldmaske mit anderen Geodaten lässt weitere Auswertungen zu. So erlaubt beispielsweise die Verschneidung mit dem Waldstrassen-Datensatz die räumliche Quantifizierung der Erschliessung (Brändli et al 2016, dieses Heft).

Extraktion von Bestandeslücken

Mit einem ähnlichen generellen Ansatz wie für die Waldmaskengenerierung wurden aus dem VHM die Bestandeslücken innerhalb der Waldmaske extrahiert (Abbildung 4). Die Lückendefinition wurde vom LFI übernommen (Keller 2013). Die Mindestbreite der Lücke muss an der schmalsten Stelle, von Kronentrauf zu Kronentrauf gemessen, mindestens 10 m betragen. Der Kronendeckungsgrad in der Lücke muss tiefer als 20% sein. Der Höhenschwellenwert für ein Baumpixel im VHM wurde wieder mit 3 m gewählt. Die Fenstergrösse für die «moving window»-Technik betrug hier 11 × 11 m.

Der Vergleich der aus dem VHM extrahierten Lücken mit den im Stereoluftbild kartierten ergibt eine Gesamtgenauigkeit von 69.2%. Insgesamt wurden mithilfe des VHM 20% mehr Probeflächen mit Lücken ausgewiesen. Es wurden 28.0% der Probeflächen mit im Luftbild kartierten Lücken im VHM nicht detektiert (omission error), und 40.2% der Probeflächen mit im VHM detektierten Lücken wurden im Luftbild nicht kartiert (commission error; Tabelle 3).

Detektion von Änderungen der bestockten Fläche im Wald

Hochaufgelöste VHM eignen sich als Datengrundlage für die Detektion von Änderungen in der bestockten Fläche innerhalb des Waldes, zum Beispiel nach Sturmschäden (Honkavaara et al 2013) oder im Zuge der Holzernte. Die Schweiz wird in einem regelmässigen, langfristig angelegten Rhythmus von drei Jahren flächendeckend von der swisstopo befliegen. Mindestens alle sechs Jahre sind

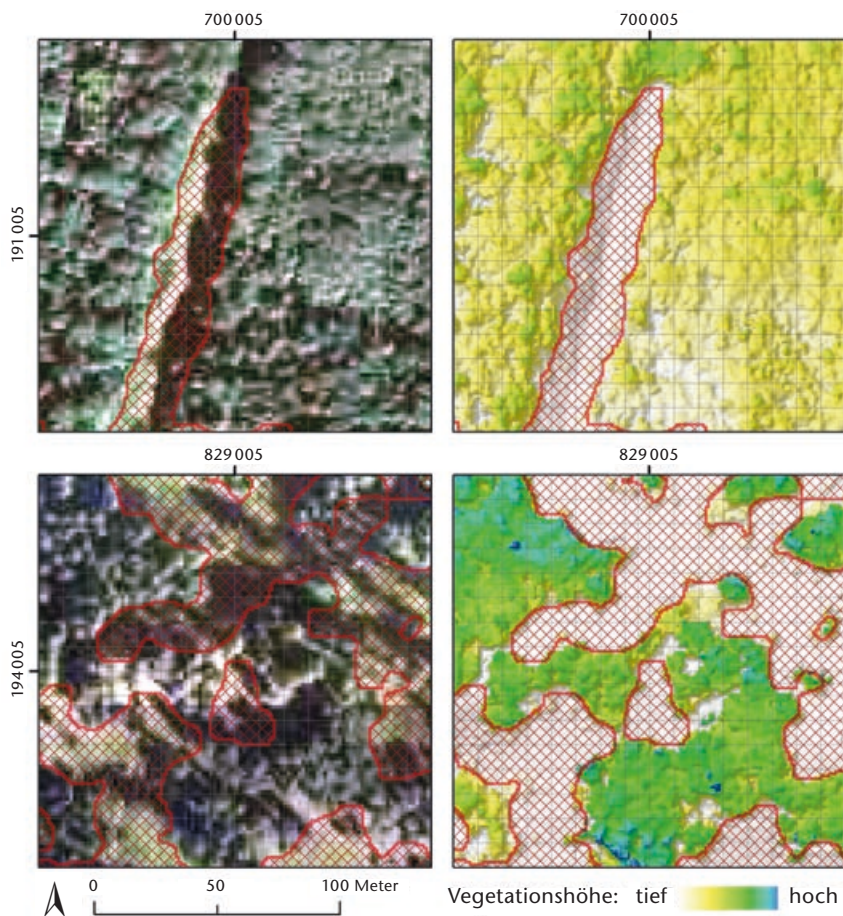


Abb 4 Zwei Beispiele der Extraktion von Bestandeslücken (rot schraffiert) auf den Interpretationsflächen des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI). Links das Orthobild mit den im Stereoluftbild kartierten Lücken, rechts das Vegetationshöhenmodell (VHM) mit den daraus extrahierten Lücken.

		LFI4-Luftbildinterpretation			
		Probeflächen mit Lücke	Probeflächen ohne Lücke	Summe	Commission Error
Vegetationshöhenmodell	Probeflächen mit Lücke	980	658	1638	40.2%
	Probeflächen ohne Lücke	381	1357	1738	
	Summe	1361	2015	3376	
	Omission Error	28.0%			

Tab 3 Vergleich der aus dem Vegetationshöhenmodell (VHM) extrahierten Bestandeslücken mit den im Stereoluftbild kartierten Lücken auf den Probeflächen des LFI4b und Schätzung der Genauigkeit der VHM-Methode.

Testgebiet	Commission Error	Omission Error	Gesamtgenauigkeit
Mittelland (LK 1090)	17%	24%	93%
Alpen (LK 1287)	47%	58%	98%

Tab 4 Schätzung der Genauigkeit von mittels Differenz zweier Vegetationshöhenmodelle (VHM) detektierten Änderungen in der bestockten Fläche im Wald im Vergleich zur manuellen Referenzinterpretation auf dem Stereoluftbild.

aktualisierte Bilder während der Vegetationsperiode verfügbar. Somit bietet es sich an, wiederholt gerechnete VHM für Veränderungsauswertungen zu verwenden. Unterschiedliche Berechnungsmethoden der Modelle und unterschiedliche Eingangsdaten müssen dabei allerdings berücksichtigt werden. Die

aus den operationellen Stereoluftbildern berechneten DOM bilden generell jedoch eine vergleichbare Datengrundlage. Eine Methode zur Veränderungsdetektion wurde letztes Jahr von Wang et al (2015) an der WSL entwickelt. Dabei werden Verdachtsgebiete für Änderungen in der Bestockung mithilfe der Analyse der Differenzen zweier VHM auf Flächen von 50 × 50 m bestimmt. Für diejenigen Verdachtsflächen, in welchen ein definierter Schwellenwert überschritten wird, wird eine feinere Analyse durchgeführt. Dabei werden die Höhendifferenzen in 5-m-Klassen eingeteilt, und es wird eine Häufigkeitsverteilung erstellt. Wenn die Verteilung kontinuierlich abnimmt, werden die Differenzen als Rauschen und nicht als echte Veränderungen interpretiert. In allen anderen Fällen wird davon ausgegangen, dass sich die bestockte Fläche durch Nutzung oder natürliche Störungen verändert hat und Bäume verschwunden sind.

Die Methode wurde in einem Gebiet im Mittelland und in einem in den Alpen getestet. Die Genauigkeit der Detektion von Veränderungen war im Mittelland höher als in den Alpen (Tabelle 4). Die Gesamtgenauigkeit im Mittelland (n=263) war mit 93% hoch. Im Vergleich zur manuellen Referenzinterpretation im Luftbild wurde auf 17% der Flächen fälschlicherweise eine Veränderung ausgewiesen (commission error), und auf 24% der Flächen wurde eine Veränderung nicht erfasst (omission error). Die Gesamtgenauigkeit im Testgebiet in den Alpen (n=838) war mit 98% höher, es wurden allerdings 58% der mit der manuellen Referenzinterpretation erfassten Veränderungsflächen nicht erkannt (omission error). Vor allem kleine Veränderungen (<100 m²) wurden nicht detektiert. Zukünftige Untersuchungen fokussieren darauf, zu eruieren, ab welcher Flächenausdehnung Veränderungen in der Bestockungsfläche robust ausgewiesen werden können.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Erstmals konnte für die ganze Schweiz ein 3-D-Datensatz mit sehr hoher räumlicher Auflösung von 1 × 1 m aus operationellen Stereoluftbildern berechnet werden. Der Datensatz ist sehr homogen, basiert auf einer einheitlichen Methode und kann jährlich für mindestens einen Sechstel der Schweiz mit den neuen Bilddaten aktualisiert werden. Die Aufteilung der Berechnungen in kleine Blöcke, das schrittweise Füllen der Lücken bei der Bildkorrelation durch den Nachbarstreifen sowie die Verwendung von unterschiedlichen Korrelationsmethoden machen den Arbeitsfluss sehr robust und die Ergebnisse nachvollziehbar. Es konnten 98% der möglichen Höhenpunkte erfolgreich berechnet werden. Problematische Gebiete waren steile Bergflanken und sehr helle Gletscherflächen. Das VHM, berech-

net aus dem DOM und dem DGM swissALTI^{3D}, ist sehr detailliert und plausibel. Die Korrelation zwischen terrestrisch gemessenen Höhen von Laub- und Nadelbäumen und den Werten aus dem VHM ist hoch. Das VHM bietet vor allem ein Potenzial für Auswertungen und Analysen von Waldkomplexen und Beständen. Der räumliche Detaillierungsgrad ist allerdings zu gering, als dass einzelne Kronen extrahiert werden könnten.

Die Anwendungsbeispiele zeigen das Potenzial des Datensatzes. Die hochaufgelöste Information zur Vegetationshöhe bietet die Grundlage, um aktuelle Waldmasken mit unterschiedlichen Walddefinitionen sehr effizient zu rechnen. Die aus dem VHM mit LFI-Definition erstellte Waldmaske zeigt noch eine leichte Überschätzung der im Rahmen des LFI4b ermittelten Waldfläche. Die flächendeckende Information bietet aber erstmals die Möglichkeit, Waldflächen nach LFI-Definition mit anderen Geodatensätzen zu verschneiden. Innerhalb der Waldmaske wurde das VHM analysiert, und es wurden Lücken extrahiert. Durch die Zentralperspektive der Luftbildstreifen werden Lücken im Wald von verkippten Bäumen verdeckt. Dies ist umso ausgeprägter, je grösser der Abstand der untersuchten Lücke von der Bildmitte ist. Umso entscheidender ist die Verwendung möglichst zentraler Luftbildausschnitte für die Berechnung des VHM. Die Berechnung von Veränderungen innerhalb des Waldes mit VHM unterschiedlichen Datums führt im Mittelland, wo die VHM-Daten auf Luftbildstreifen mit 25 cm Bodenauflösung beruhen, zu akzeptablen Ergebnissen. Für Gebiete mit anspruchsvoller Topografie und Luftbildmaterial mit schlechterer Bodenauflösung wird an der WSL aktuell an robusteren Methoden geforscht.

Die Berechnung von VHM aus aktuellen Stereoluftbildstreifen der swisstopo läuft operationell. Ein möglichst zeitnaher, räumlich hochaufgelöster Zustand der Vegetationsoberflächen der Schweizer Wälder ist ein wertvoller Datensatz sowohl für die Wissenschaft als auch für die Praxis. In der Forschung werden VHM zum Beispiel für die Modellierung von Habitaten verschiedener Tierarten, für Biomasseabschätzungen sowie für die Modellierung der Walddynamik verwendet. Der Praxis bieten die VHM Zustandsdaten, auf die bei Schadenereignissen rasch zugegriffen werden kann. So erlaubt eine zeitnahe Sonderbefliegung beispielsweise, das Schadenausmass bei Windwurf, Borkenkäferbefall oder auch von gravitativen Naturereignissen durch den Vergleich mit einem bestehenden VHM abzuschätzen. ■

Eingereicht: 19. Oktober 2015, akzeptiert (mit Review): 15. Februar 2016

Literatur

- ARBEITSGRUPPE FORSTLICHER LUFTBILDINTERPRETEN (2012)** Das digitale Luftbild: ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich. Göttingen: Universitätsverlag. 84 p.
- ARTUSO R, BOVET S, STREILEIN A (2003)** Practical methods for the verification of countrywide terrain and surface models. ISPRS Working Group III/3 Workshop «3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data», Dresden (Germany), 8–10 October 2003. *Int Arch Photogramm Remote Sens* 34: 3/WG13
- BOHLIN J, WALLERMAN J, FRANSSON JES (2012)** Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. *Scand J For Res* 27: 692–699.
- BRÄNDLI UB, FISCHER C, CAMIN P (2016)** Stand der Walderschliessung mit Lastwagenstrassen in der Schweiz. *Schweiz Z Forstwes* 167: 143–151. doi: 10.3188/szf.2016.0143
- DORREN LKA, BERGER F, PU S (2006)** Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6: 145–153.
- GAO J (2007)** Towards accurate determination of surface height using modern geoinformatic methods: possibilities and limitations. *Prog Phys Geogr* 31: 591–605.
- GINZLER C, BÄRTSCHI H, BEDOLLA A, BRASSEL P, HÄGELI M ET AL (2005)** Luftbildinterpretation LFI3 – Interpretationsanleitung zum dritten Landesforstinventar. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. 87 p.
- GINZLER C, HOBI ML (2015A)** Erstellung eines landesweiten digitalen Oberflächenmodells aus operationellen Stereo-Luftbildern. *Geomatik Schweiz* 9: 332–335.
- GINZLER C, HOBI ML (2015B)** Countrywide stereo-image matching for updating digital surface models in the framework of the Swiss National Forest Inventory. *Remote Sens* 7: 4343–4370.
- GRAF RF, MATHYS L, BOLLMANN K (2009)** Habitat assessment for forest dwelling species using LiDAR remote sensing: Capercaillie in the Alps. *For Ecol Manage* 257: 160–167.
- HOLLAUS M, WAGNER W, SCHADAUER K, MAIER B, GABLER K (2009)** Growing stock estimation for alpine forests in Austria: a robust lidar-based approach. *Can J For Res* 39: 1387–1400.
- HONKAVAARA E, LITKEY P, NURMINEN K (2013)** Automatic storm damage detection in forests using high altitude photogrammetric imagery. *Remote Sens* 5: 1405–1424.
- KELLER M, EDITOR (2013)** Schweizerisches Landesforstinventar. Feldaufnahme-Anleitung 2013. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. 214 p.
- MORSDDORF F (2011)** Erfassung struktureller Waldparameter mithilfe von flugzeuggetragenem Laserscanning. *Schweiz Z Forstwes* 162: 164–170. doi: 10.3188/szf.2011.0164
- RÖÖSLI B, CIOLDI F, CAMIN P (2015)** Waldfläche. In: Rigling A, Schaffner HP, editors. *Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes*. Bern: Bundesamt Umwelt. pp. 29–41.
- WANG Z, GINZLER C, WASER LT (2015)** A novel method to assess short-term forest cover changes based on digital surface models from image-based point clouds. *Forestry* 88: 429–440.
- WASER LT, FISCHER C, WANG Z, GINZLER C (2015)** Wall-to-wall forest mapping based on digital surface models from image-based point clouds and a NFI forest definition. *Forests* 6: 4510–4528.
- ZELLWEGER F, BRAUNISCH V, MORSDDORF F, BALTENSWEILER A, ABEGG M ET AL (2015)** Disentangling the effects of climate, topography, soil and vegetation on stand-scale species richness in temperate forests. *For Ecol Manage* 349: 36–44.

Quellen

Abegg M, Brändli UB, Cioldi F, Fischer C, Herold-Bonardi A et al (2014) Viertes Schweizerisches Landesforstinventar – Ergebnistabellen und Karten im Internet zum LFI 2009–2013 (LFI4b). Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. www.lfi.ch/resultate (11.2.2016).

Swisstopo. Orthobilder. Bern: Bundesamt Landestopografie. www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/images/ortho.html (10.10.2015).

Swisstopo. Topografisches Landschaftsmodell TLM. Bern: Bundesamt Landestopografie. www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/topics/geodata/TLM.html (10.10.2015).

Le modèle actuel de la hauteur de la végétation suisse: applications spécifiques dans le domaine forestier

L'année dernière, il a été possible pour la première fois en Suisse de calculer à partir de photos aériennes numériques un modèle national de la hauteur de la végétation. Des informations sur la hauteur de la végétation des forêts peuvent être déduites de photos aériennes ADS80 stéréoscopiques prises régulièrement par l'Office fédéral de topographie (swisstopo). A cet effet, on procède dans un premier temps à la création d'un modèle numérique de surface (MNS) avec une résolution spatiale très élevée de 1 × 1 m à partir des vues aériennes. Dans une seconde phase, ce MNS est normalisé à l'aide du modèle numérique de terrain (MNT) existant qui se fonde sur des données laser pour calculer la hauteur actuelle de la végétation, les zones occupées par des bâtiments étant masquées. On obtient ainsi un modèle de la hauteur de la végétation (MHV). Dans le cadre de l'Inventaire forestier national suisse, il a été possible de développer un modèle de ce type par des méthodes cohérentes et avec un degré de détail encore jamais atteint. Pour pouvoir couvrir toute la Suisse, on a utilisé des vues aériennes prises en été au cours des années 2007 à 2012. Le MHV est assez complet avec une couverture de 98% de la superficie du pays. Les zones problématiques pour le calcul du modèle étaient les flancs raides de montagne et les surfaces de glacier très lumineuses; pour ces zones, le modèle présente des lacunes. Les informations récoltées par cette technique concernant la hauteur de la végétation permettent tout particulièrement des analyses de peuplements entiers. En revanche, pour les analyses d'arbres isolés, la résolution spatiale des données est insuffisante. Le MHV présente un large éventail de possibilités d'utilisation comme l'illustre cet article avec trois exemples concrets: 1) création de masques forestiers, 2) extraction de trouées dans les peuplements et 3) détection de modifications dans la surface boisée.

Current model of canopy heights in Switzerland: specific applications in forestry

A national vegetation height model was calculated for Switzerland for the first time last year using digital aerial images. The ADS80 stereo aerial images, which were routinely gathered by the Swiss Federal Office of Topography (swisstopo), contain information about the height of vegetation in forests. We used the stereo aerial images to first calculate a digital surface model (DSM) with a very high spatial resolution (1 × 1 m). The DSM was then normalized to obtain the actual vegetation heights using a digital terrain model (DTM) based on laser data with the buildings masked out, and to produce a vegetation height model (VHM). Such a model could be calculated in the framework of the Swiss National Forest Inventory (NFI) with consistent methods and a very high level of detail. For covering the whole of Switzerland, we used summer aerial images from the years 2007 to 2012. The VHM reached almost nationwide coverage (98% of the country's surface area). Some areas, such as steep mountainsides or very bright glaciers, were problematic for calculating the model, and appear in it as gaps. Vegetation height information collected with this method is most useful for analyzing entire forest stands, but the data do not have a high enough spatial resolution for single-tree-based analyses. The VHM can be applied in a wide variety of ways. Here, we describe three of these: 1) generating forest masks, 2) extracting forest canopy gaps, and 3) detecting changes in the stocking of a forested area.