

# Dynamik der Vegetationshöhen im Schweizer Wald

Christian Ginzler<sup>1,\*</sup>, Bronwyn Price<sup>1</sup>, Dominique Weber<sup>1</sup>, Martina Hobi<sup>1</sup>, Mauro Marty<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

## Abstract

Waldstrukturen lassen sich mit Methoden der Fernerkundung über grosse Gebiete erfassen. Dabei haben sich Stereoluftbilder als effiziente Grundlage für die Berechnung von digitalen Oberflächenmodellen erwiesen. Zieht man von diesen Oberflächenmodellen das Geländemodell ab und eliminiert künstliche Objekte, erhält man Vegetationshöhenmodelle. Je nach Auflösung der Luftbilder liefern diese in den Vegetationshöhen mehr oder weniger detaillierte Informationen über die Kronenoberflächen. Um Daten zu früheren Vegetationshöhen zu erhalten, wurden im Schweizerischen Landesforstinventar (LFI) auf Basis analoger Schwarz-Weiss-Luftbilder des Bundesamts für Landestopografie aus den Befliegungskampagnen 1979–1985 und 1990–1998 landesweite digitale Oberflächen- und Vegetationshöhenmodelle erstellt. Anschliessend wurden mit den historischen Vegetationshöhenmodellen (Zeitschnitte 1980 und 1990) und dem aktuellen Vegetationshöhenmodell des LFI (Zeitschnitt 2010) die Höhenveränderungen im Schweizer Wald in einer Auflösung von einer Hektare bestimmt. Anders als im Offenland und im Siedlungsgebiet funktionierte die Bildkorrelation im Wald mit den gescannten Schwarz-Weiss-Luftbildern zufriedenstellend. Über eine Million Hektaren Wald konnten in die Analyse einbezogen werden. Sie zeigt, dass die Vegetationshöhe auf fast einem Drittel der Waldfläche seit den 1980er-Jahren kontinuierlich zugenommen hat. Auf einer nahezu gleich grossen Fläche waren die Höhenveränderungen zwischen den drei Zeitschnitten gegenläufig mit Zunahmen in der einen und Abnahmen in der anderen Periode. Die grössten Höhenveränderungen waren im Mittelland zu verzeichnen, die geringsten auf der Alpensüdseite. Kleinräumige Veränderungen und Änderungen unter dem Kronendach können mit diesen Daten allerdings nicht erkannt werden. Trotzdem erlauben die historischen Vegetationshöhenmodelle einen Blick in die Vergangenheit der Schweizer Waldstrukturen.

**Keywords:** photogrammetry, vegetation height model, time series, forest structure

**doi:** 10.3188/szf.2021.0310

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

Die Erfassung von horizontalen und vertikalen Strukturen von Wäldern erlaubt die Charakterisierung und Modellierung unterschiedlicher Waldfunktionen. So können mit der Höhe der Waldbestände die vorhandenen Ressourcen, insbesondere der Holzvorrat und die Biomasse, grossteils erklärt werden. Für die Beurteilung der Schutzwirkung der Wälder gegen Naturgefahren (z.B. Steinschlag oder Lawinen) sind die Bestandeshöhen und die Bestandeslücken entscheidende Parameter. Der Deckungsgrad der Baumkronen, die Lückigkeit und die Bestandesdichte sowie die Stufigkeit von Waldrändern sind zudem wichtige Eingangsgrössen für die Modellierung von Biodiversität. Die Erholungsfunktion für den Menschen wird

unter anderem von der Lichtverfügbarkeit und der Variabilität der Waldstrukturen beeinflusst.

Mit Methoden der Fernerkundung können Waldstrukturen über grosse Gebiete erfasst werden. Aktive Systeme wie Airborne Laserscanning (ALS) und Synthetic Aperture Radar (SAR) sowie passive Systeme wie multispektrale Sensoren haben sich etabliert, um 2-D- und 3-D-Daten der Erdoberfläche aufzunehmen. Bereits seit einigen Jahren werden in der Schweiz, in Österreich und in manchen deutschen Bundesländern landesweite Oberflächenmodelle aus digitalen Stereoluftbildern oder aus ALS-Daten operationell hergestellt. Diese Daten stehen zum Teil frei zur Verfügung. Durch die regelmässige Wiederholung solcher Fernerkundungsaufnahmen

entstehen Zeitreihen. Diese ermöglichen es nicht nur, den jeweils aktuellen Zustand von Waldstrukturen zu charakterisieren, sondern auch deren Entwicklung zu beschreiben. Forstliche Eingriffe und natürliche Prozesse wie Störungen können erkannt und quantifiziert werden. Mit dem Monitoring dieser Dynamiken können der Schutz und der Erhalt der vielfältigen Funktionen des Waldes unterstützt und Hinweise zur Entwicklung der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern geliefert werden. Mit den Fernerkundungsdaten lässt sich die Waldstruktur flächendeckend beurteilen, sodass diese die klassische Stichprobeninventur ideal ergänzen.

Sind historische analoge Stereoluftbilder vorhanden, kann die Zeitreihe der digitalen Oberflächenmodelle mittels fotogrammetrischer Methoden in die Vergangenheit verlängert werden. Damit stehen dann zusätzliche Informationen für das Verständnis der Walddynamik zur Verfügung. Hier stellen wir einen Arbeitsfluss vor, mit dem wir für die Schweiz landesweite Oberflächenmodelle für die 1980er- und 1990er-Jahre berechnet haben. Diese ergänzen das Oberflächenmodell 2010 aus dem Schweizerischen Landesforstinventar (LFI; Ginzler & Hobi 2015). Mithilfe dieser Zeitreihe zeigen wir die Veränderungen der Vegetationshöhen im Schweizer Wald auf Hektarebene über einen Zeitraum von annähernd 40 Jahren.

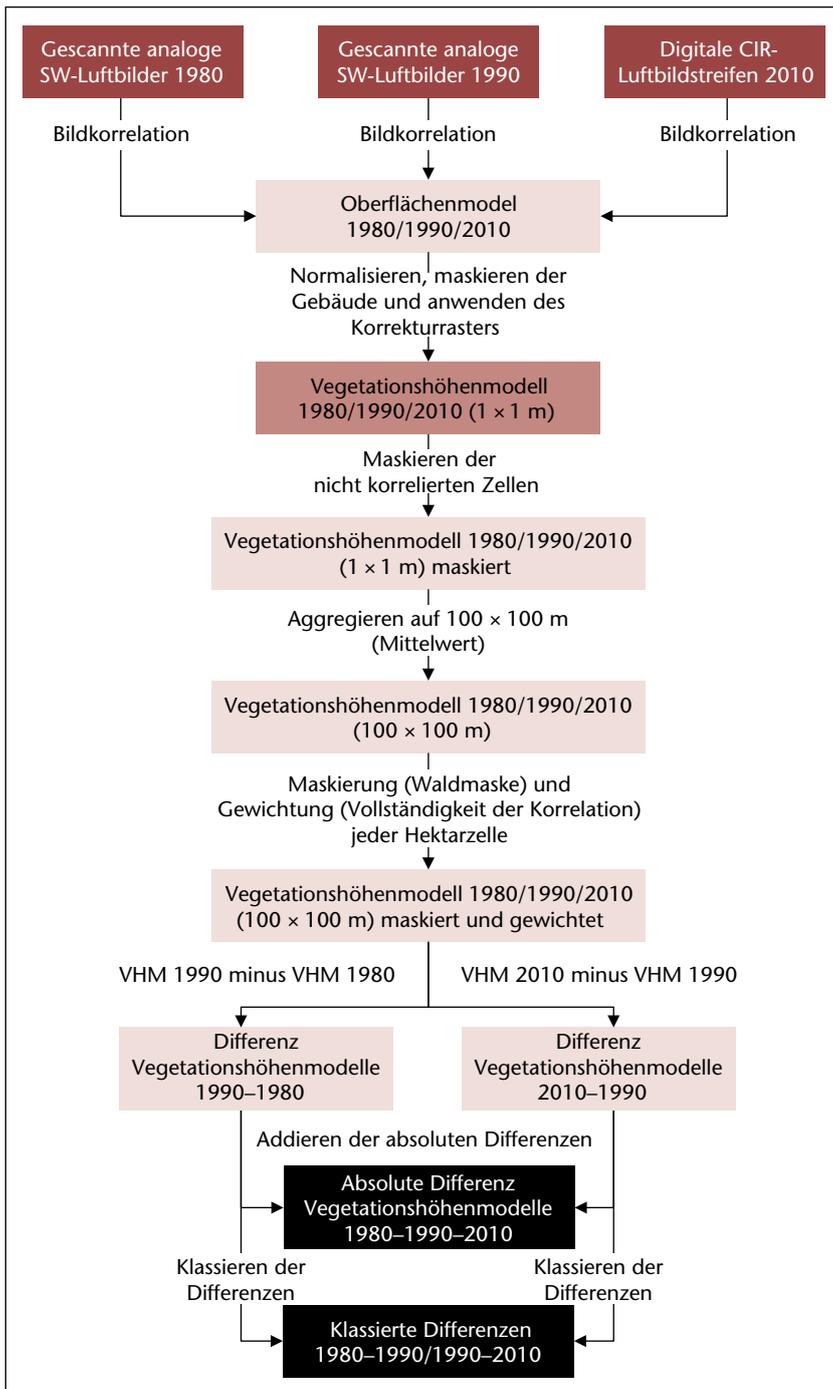


Abb 1 Arbeitsfluss zur Erstellung der Vegetationshöhenmodelle zu den drei Zeitschnitten und zur Berechnung der Höhendifferenzen. SW-Luftbilder: Schwarz-Weiss-Luftbilder, VHM: Vegetationshöhenmodell

## Methoden und Daten

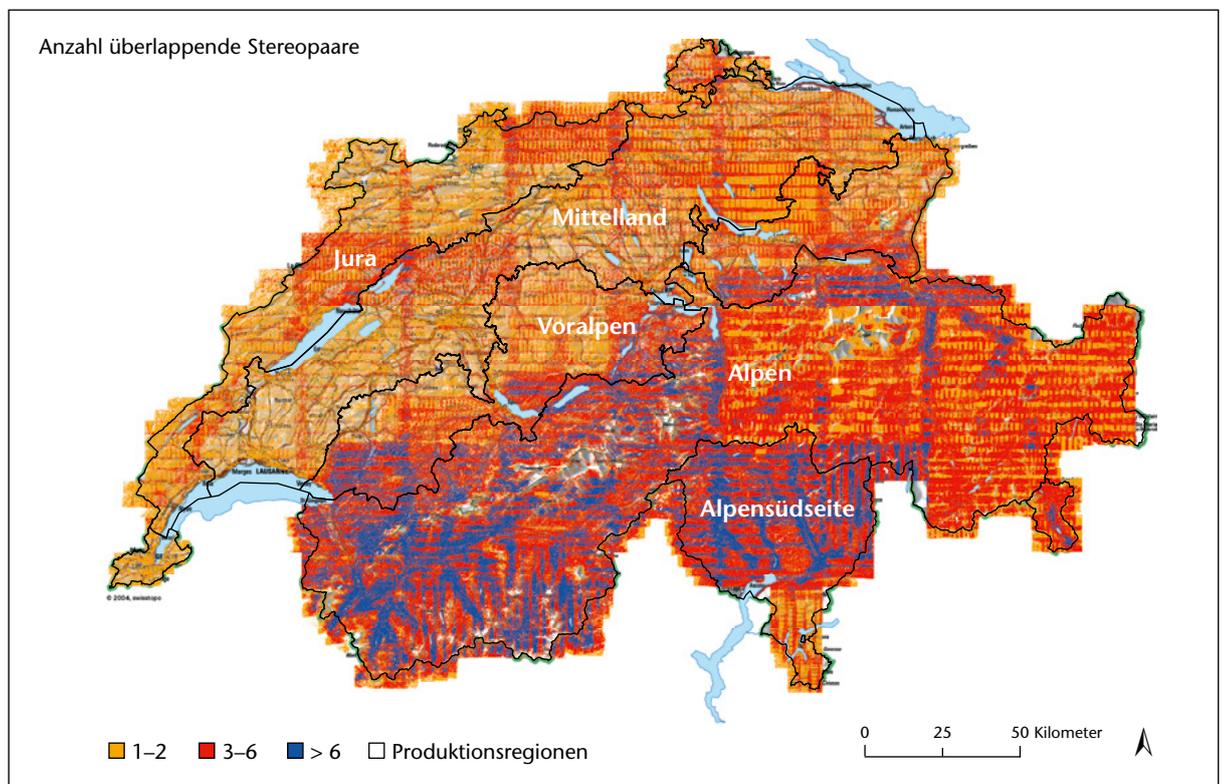
### Erstellung der Oberflächen- und Vegetationshöhenmodelle

Für die Arealstatistik des Bundesamts für Statistik wurden vom Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) die analogen Schwarz-Weiss-Stereoluftbilder der landesweiten Befliegungen von 1979 bis 1985 und 1990 bis 1998 gescannt und orientiert. Ihr Massstab liegt im Mittel bei etwa 1:25 000, und die Auflösung der Scans beträgt 14 µm, was einer Auflösung am Boden von etwa 35 cm entspricht.

Mit dem entwickelten Arbeitsfluss (Abbildung 1) wurden jeweils aus zwei benachbarten Luftbildern (= Stereopaar) mit dem Softwarepaket SocetSet5.6 Oberflächenmodelle mit einer räumlichen Auflösung von 1 m berechnet. Insgesamt wurden mehr als 10 000 solcher Stereopaare für die landesweiten Oberflächenmodelle verarbeitet (Abbildung 2).

Die ursprünglichen Zwecke der Luftbilder – die Aktualisierung der Landeskarten und die Erfassung der Bodenbedeckung und der Bodennutzung für die Arealstatistik – erforderten eine hohe Genauigkeit in der Lage, die vertikale Genauigkeit war sekundär. Daher weisen die Bilder in manchen Gebieten eine hohe vertikale Ungenauigkeit von 1 bis 5 m auf, die korrigiert werden musste. An Orten, die sowohl in der Arealstatistik von 1979/85 als auch in derjenigen von 2004/09 als Bodenbedeckungsklassen ohne Höhen (Gras-/Krautvegetation oder versiegelte Flächen) aufgeführt waren, wurde dazu die Differenz der Oberflächenmodelle zum aktuellen digitalen Geländemodell swissAlti3D von swisstopo berechnet. Aus diesen Differenzen wurden Korrekturraster abgeleitet und auf die Oberflächenmodelle angewendet.

Um die Höhe der Vegetation über dem Boden zu erhalten, wurden die Oberflächenmodelle normalisiert. Dafür wurde die Höhendifferenz zwischen dem Oberflächenmodell und dem digitalen Gelän-



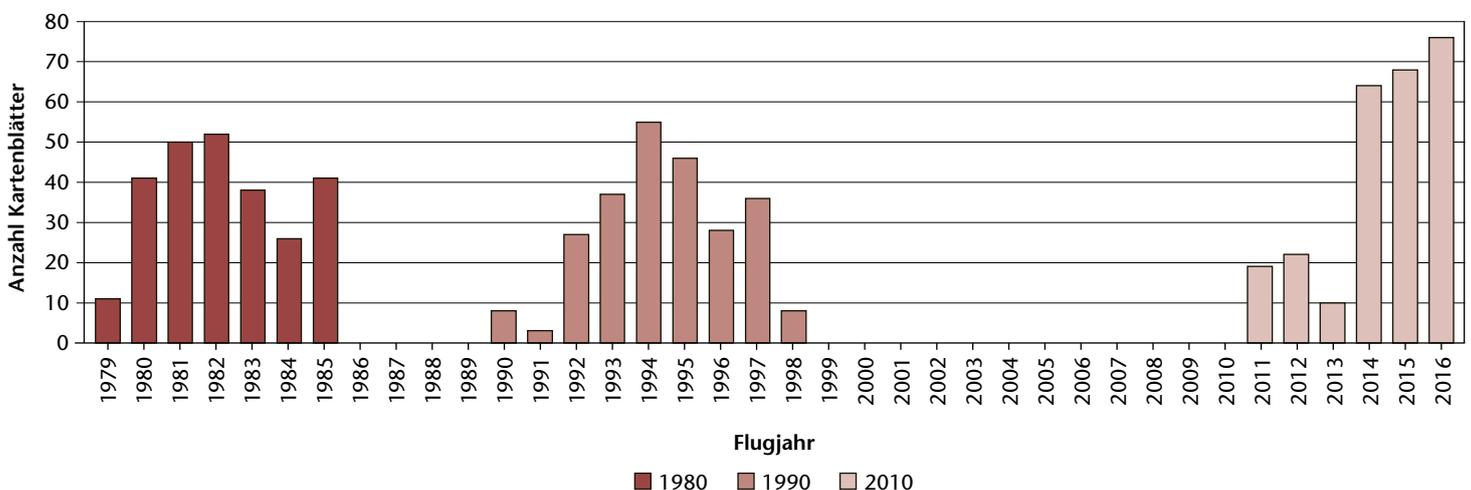
**Abb 2** Stereopaare der Luftbilder aus den Flugjahren 1979–1985, die für die Berechnung des digitalen Oberflächenmodells zum Zeitschnitt 1980 verwendet wurden. Einige Gebiete in den Alpen und auf der Alpensüdseite sind mit mehreren Stereopaaren überdeckt. Überdeckung: bis zweifach = orange, dreifach bis sechsfach = rot, über sechsfach = blau

demodell swissAlti3D berechnet. Für die Eliminierung der Gebäude wurde die Gebäudemasken des Topografischen Landschaftsmodells (TLM) aus dem Jahr 2015 von swisstopo verwendet, die schon für die Erstellung des Vegetationshöhenmodells 2016 des LFI eingesetzt wurde (Ginzler 2018). Der mögliche Fehler in den historischen Vegetationshöhenmodellen durch Maskierung von erst später entstandenen Gebäuden wurde in Kauf genommen, da sich die weiteren Analysen auf die Waldgebiete beschränken.

In manchen Gebieten konnten die Zellen mit den Schwarz-Weiss-Bildern nicht korreliert werden. Diese Zellen wurden maskiert und von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen. Ebenfalls ausge-

schlossen wurden Zellen mit unrealistisch grossen Vegetationshöhen von über 60 m.

Die Befliegungen von swisstopo für die Luftbildkampagnen 1979–1985, 1990–1998 und 2011–2016 waren zeitlich und räumlich regelmässig über die Schweiz verteilt. Für die Planung diente die Einteilung der Kartenblätter 1:25 000 (Abbildung 3). Im Folgenden wird das Vegetationshöhenmodell aus der ersten Luftbildkampagne mit Zeitschnitt 1980, dasjenige aus der zweiten Kampagne mit Zeitschnitt 1990 und das der letzten Kampagne mit Zeitschnitt 2010 bezeichnet. Die mittlere zeitliche Differenz zwischen Zeitschnitt 1980 und 1990 beträgt 12 Jahre (Standardabweichung 0.5 Jahre), diejenige zwischen



**Abb 3** Verteilung der Aufnahmejahre der verwendeten Luftbilder für die Zeitschnitte 1980, 1990 und 2010

Veränderung	Symbol	Wertebereich
Abnahme	-	< -1 m
Keine Änderung	=	+/- 1 m
Zunahme	+	> 1 m

**Tab 1** Klassierung der Differenzen der Vegetationshöhe zwischen zwei Zeitschnitten in Abnahme (-), keine Änderung (=) und Zunahme (+). Die Vegetationshöhen sind jeweils die Mittelwerte pro Hektare.

Zeitschnitt 1990 und 2010 beträgt 20 Jahre (Standardabweichung 2.4 Jahre).

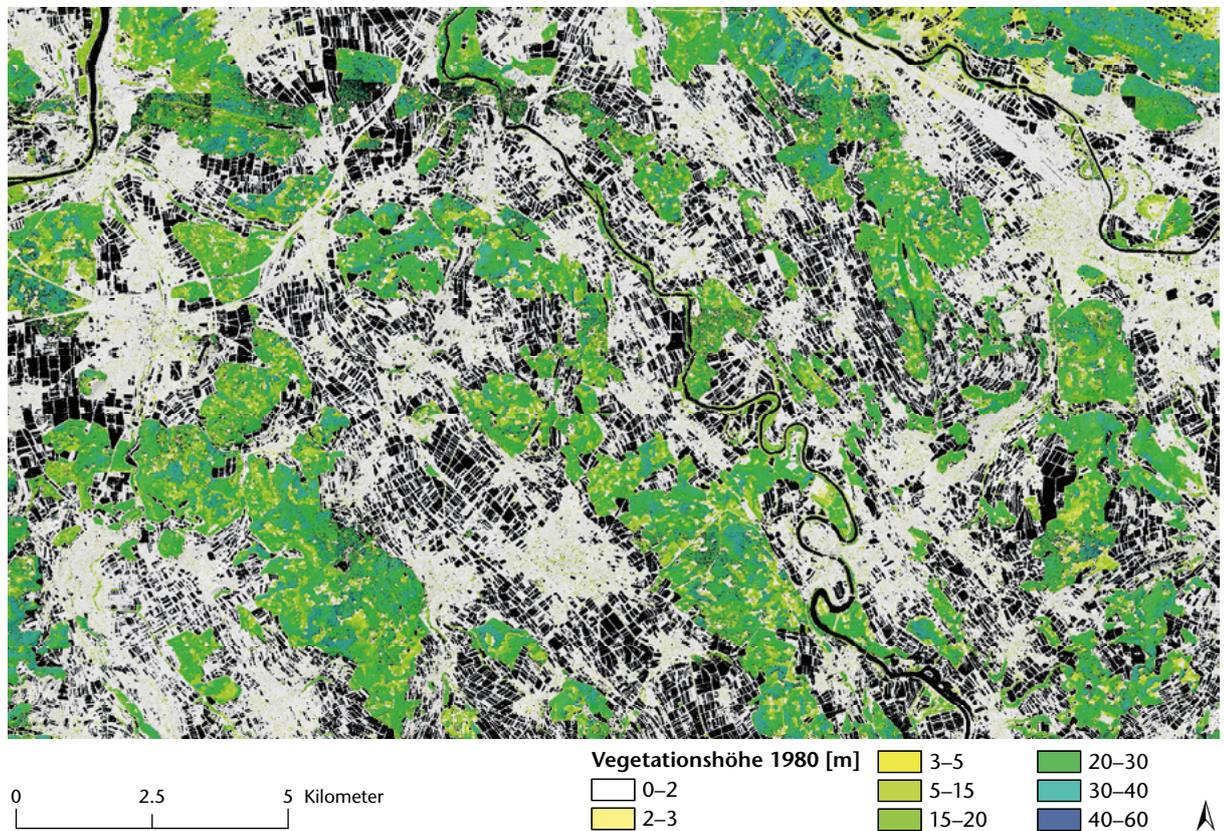
### Statistik der Höhendifferenzen

Aus den Vegetationshöhenmodellen der Zeitschnitte 1980, 1990 und 2010 wurden Mittelwerte der Vegetationshöhen pro Hektare berechnet. Die Berechnungen wurden auf Hektarzellen beschränkt, die sich mindestens zu 75% innerhalb der Waldmaske des LFI (Waser et al 2015) befanden. Als Mass für die Veränderungen dienten die Differenzen der Vegetationshöhen zwischen zwei Zeitschnitten, also sowohl Zunahmen als auch Abnahmen. Da die Bildkorrelation nicht überall vollständig war, wurden die Differenzen mit den Anteilen der erfolgreich korrelierten Pixel pro Hektare gewichtet. Wenn zum Beispiel in einer Hektarzelle die Bildkorrelation nur auf 10% der Fläche erfolgreich durchgeführt werden konnte, wurde die Hö-

hendifferenz mit 0.1 multipliziert, um die Differenz für diese Zelle nicht zu stark zu gewichten.

Die Dynamik der Vegetationshöhen über den gesamten Zeitraum ist die Summe der absoluten Differenzen zwischen den Zeitschnitten 1980 bis 1990 und 1990 bis 2010. Dabei wird allerdings nicht unterschieden zwischen zwei Zunahmen von zum Beispiel jeweils 10 m und einer Zunahme von 10 m mit darauffolgender Abnahme von 10 m. Beide Veränderungen haben als Summe der absoluten Differenzen 20 m. Um zwischen kontinuierlicher Zunahme, kontinuierlicher Abnahme und vertikaler Dynamik unterscheiden zu können, wurden die Differenzen zwischen den Zeitschnitten 1980, 1990 und 2010 zusätzlich in die drei Klassen «Abnahme», «Keine Änderung» und «Zunahme» eingeteilt (Tabelle 1). Für die Auswertungen standen somit zwei Datensätze zur Verfügung: erstens die summierten absoluten Höhenänderungen (m) zwischen den drei Zeitschnitten und zweitens die klassierte Veränderung zwischen den drei Zeitschnitten.

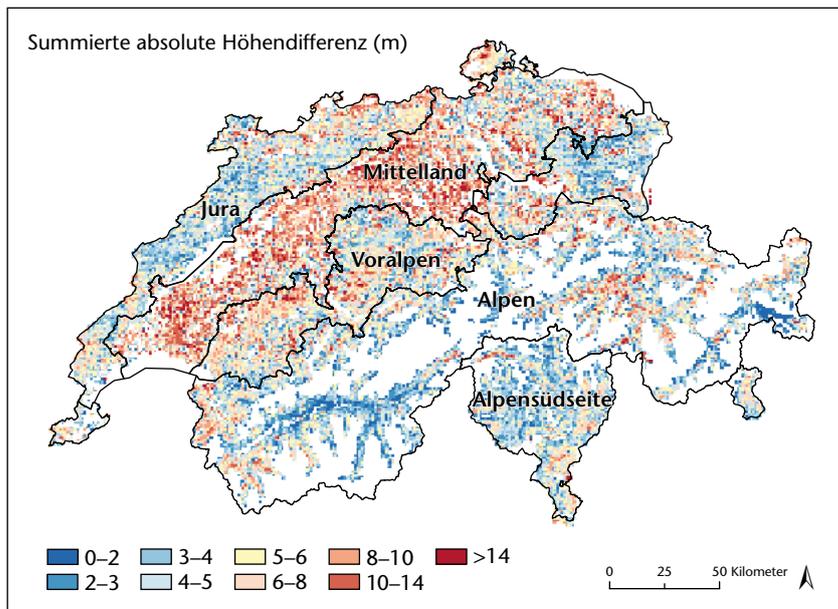
Für die Analyse der Veränderungen wurden die Differenzen der Vegetationshöhen mit den Angaben der Revierförsterinnen und Revierförster zur Art des letzten Eingriffs verglichen, wie sie im Rahmen des LFI2 und des LFI4 erfasst wurden. Dabei wurden nur die Eingriffsarten «Durchforstung», «Räumung», «Plenterung» und «Kein Eingriff» einbezogen. Die Daten aus dem LFI2 beziehen sich auf die Höhendifferenzen zwischen den Zeitschnitten



**Abb 4** Kartenblatt LK25 1090, Wohlen, mit dem Vegetationshöhenmodell zum Zeitschnitt 1980. Die nicht korrelierten Gebiete sind schwarz dargestellt.

	Vegetationshöhenmodell		LFI4		VHM/LFI4 (%)
	Wald (ha)	Anteil (%)	Wald ohne Gebüschwald (ha)	Anteil (%)	
Jura	175 717	17	201 100	16	87
Mittelland	187 402	19	229 600	18	81
Voralpen	176 116	17	228 500	18	77
Alpen	321 552	32	414 300	33	78
Alpensüdseite	151 743	15	171 600	14	88
Schweiz	1 012 530	100	1 245 000	100	81

**Tab 2** Vergleich der im Vegetationshöhenmodell (VHM) analysierten Waldfläche mit der Waldfläche ohne Gebüschwald gemäss LFI4 (Cioldi et al 2020) für die Produktionsregionen und die Schweiz



**Abb 5** Summierte absolute Differenzen der Vegetationshöhen zwischen den Zeitschnitten 1980, 1990 und 2010 auf der analysierten Waldfläche von 1 012 530 ha. Zur besseren Visualisierung wurden aus den Höhenänderungen pro Hektarzelle die Mediane pro Quadratkilometer gebildet.

Kennwert	Jura	Mittel-land	Vor-alpen	Alpen	Alpen-südseite	Schweiz
Mittelwert (m)	7.0	9.6	7.7	6.7	5.9	7.3
Standardabweichung (m)	5.0	6.5	5.5	5.0	3.6	5.4
Median (m)	5.7	7.9	6.3	5.5	5.3	5.9

**Tab 3** Statistische Kennwerte der summierten absoluten Differenzen der Vegetationshöhen pro Hektarzelle Wald für die Produktionsregionen und die Schweiz.

1980 und 1990. Die Daten aus dem LFI4 wurden für die Interpretation der Differenzen zwischen den Zeitschnitten 1990 und 2010 verwendet. Verglichen wurden die Veränderungen auch mit dem Sturmschadeninventar, das nach dem Orkan Lothar (1999) durchgeführt wurde (Scherrer 2001).

## Resultate

### Bildkorrelation

Aus den digitalisierten Schwarz-Weiss-Luftbildern der Zeitschnitte 1980 und 1990 konnten Ober-

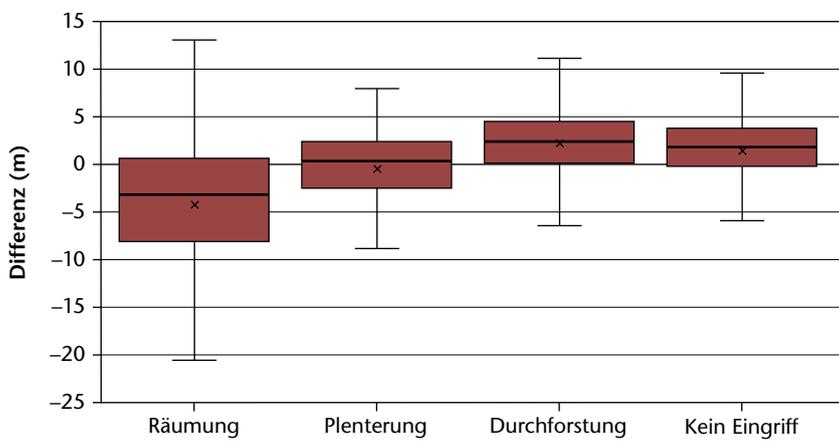
flächenmodelle und Vegetationshöhenmodelle hergestellt werden. Allerdings war die Bildkorrelation nicht vollständig (Abbildung 4). Während mit den aktuellen digitalen Luftbildstreifen 95% der Höhenpunkte berechnet werden konnten, gelang das mit den digitalisierten Schwarz-Weiss-Luftbildern nur in 68 von 100 Fällen. Probleme gab es vor allem im Landwirtschaftsgebiet und auf Grasflächen, die auf den Luftbildern sehr wenig Kontrast aufwiesen. Im Wald konnten dagegen im Mittel 83% der möglichen Punkte korreliert werden (Ginzler et al 2020). Die nicht korrelierten Pixel wurden nicht interpoliert und nicht in die weiteren Berechnungen einbezogen.

### Summierte absolute Höhendifferenzen zwischen den drei Zeitschnitten

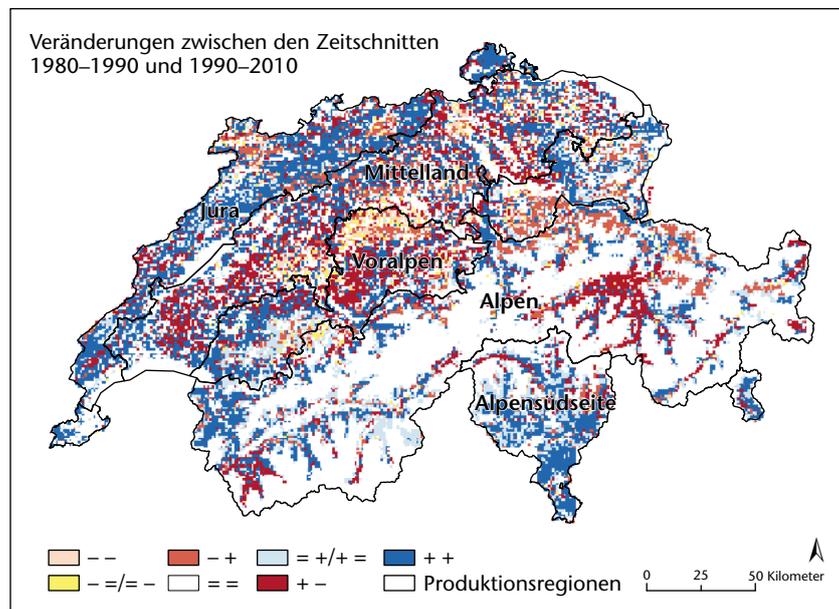
Insgesamt wurden 1 012 530 ha Wald analysiert (Tabelle 2). Das entspricht 81% der Fläche des Waldes ohne Gebüschwald des LFI4 (Cioldi et al 2020). Die Differenz ist mit der verwendeten Waldmaske (Waser et al 2015) und der Einschränkung zu erklären, dass nur diejenigen Hektarzellen in die Analyse einbezogen wurden, die zu mindestens 75% innerhalb dieser Waldmaske lagen.

Im Mittelland sind die summierten absoluten Differenzen in der Vegetationshöhe zwischen den drei Zeitschnitten im Vergleich zum Rest der Schweiz sehr gross (Abbildung 5). Im Mittel betragen sie 9.6 m pro Hektarzelle bei einer Standardabweichung von 6.5 m (Tabelle 3). Grosse Höhenänderungen sind auch im nördlichen Teil der Produktionsregion Jura und in manchen Gebieten der Voralpen erkennbar. Auf der Alpensüdseite sind die Höhenänderungen dagegen mit einem Mittelwert von 5.9 m und einer Standardabweichung von 3.6 m sehr gering.

Die Analyse der Höhendifferenzen nach der Art des letzten Eingriffs brachte ans Licht, dass von den vier ausgewählten Eingriffsarten einzig die Räumung in den Vegetationshöhenmodellen erkennbar ist (Abbildung 6). Unter Räumung wird im LFI die flächige Nutzung des Bestandes verstanden. Die Höhendifferenz zwischen den Zeitschnitten 1980 und 1990 beziehungsweise zwischen 1990 und 2010 liegt bei der Räumung im Durchschnitt bei  $-4.3$  m. Bei der Plenterung (einzelstammweise Nutzung) und bei der Durchforstung (Eingriff in Stangen- und Baumhölzern) liegt sie dagegen bei  $-0.6$  m und  $2.1$  m. In der Klasse «Kein Eingriff» beträgt die Höhendifferenz im Mittel  $1.3$  m. Die Schwankungsbreite ist in allen Nutzungsklassen sehr hoch. Dies ist ein deutlicher Hinweis dafür, dass nur starke Eingriffe wie Räumungen in den Differenzen der Vegetationshöhenmodelle zuverlässig detektiert werden können. Feinere Behandlungen wie Plenterung oder Durchforstung sind nicht von der Nutzungsklasse «Kein Eingriff» unterscheidbar.



**Abb 6** Variabilität der Differenzen der Vegetationshöhen in verschiedenen Nutzungsklassen. Die Nutzungsklassen beruhen auf den Angaben der Revierförsterinnen und Revierförster zur Art des letzten Eingriffs gemäss LFI2 und LFI4. Dargestellt sind der Mittelwert (Kreuz), der Median ( $Q_{0.50}$ ; Strich), die Quartile ( $Q_{0.25}$ ,  $Q_{0.75}$ ; Boxbegrenzung) sowie Maximum und Minimum. Nicht dargestellt: Ausreisser



**Abb 7** Verteilung der Klassen mit unterschiedlicher Veränderung der Vegetationshöhe. Erstes Symbol in der Farblegende: Veränderung zwischen den Zeitschnitten 1980 und 1990, zweites Symbol: Veränderung zwischen den Zeitschnitten 1990 und 2010. – Abnahme, = Keine Änderung, + Zunahme. Zur besseren Visualisierung ist die häufigste Klasse pro Quadratkilometer dargestellt.

### Klassierte Höhenveränderungen zwischen den drei Zeitschnitten

Auf etwa einem Drittel (31.4%) der analysierten Waldfläche der Schweiz hat die Vegetationshöhe sowohl zwischen 1980 und 1990 als auch zwischen 1990 und 2010 zugenommen (Tabelle 4). Diese Klasse mit kontinuierlicher Zunahme der Vegetationshöhe (+/+) hat nicht nur landesweit, sondern auch in allen Produktionsregionen den grössten Anteil (Abbildung 7). Die Spannweite reicht von 26.6% in den Alpen bis 41.4% auf der Alpensüdseite.

Je nach Region hatten die verschiedenen Dynamiken unterschiedliche Anteile (Tabelle 4). So ist auf der Alpensüdseite der Waldanteil mit zunehmenden Vegetationshöhen (Klassen =/+ und +/+) mit 63.1% überproportional hoch. Das bedeutet, dass hier in der untersuchten Zeitperiode Wald eingewachsen ist und kaum grossflächige natürliche Störungen und kaum grosse Nutzungen stattgefunden haben. Abnahmen in beiden Perioden (Klasse –/–) kommen auf der Alpensüdseite mit 0.8% unterdurchschnittlich häufig vor. In den Alpen sind die Waldanteile mit hoher Dynamik (Klassen –/+ und +/-) mit 14.5% und 16.9% relativ gross. Eine hohe Dynamik findet man auch im Mittelland und in den Voralpen, wobei der Anteil der Klasse +/- mit 24.1% im Mittelland und 19.5% in den Voralpen deutlich höher ist als in den Alpen und im Landesdurchschnitt. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die Schäden durch den Orkan Lothar im Jahr 1999.

In den Schadenflächen, die nach Lothar kartiert wurden (Scherrer 2001), dominiert die Klasse +/--. Sie hat in den Regionen Jura, Mittelland und Voralpen einen Anteil von zum Teil deutlich über 50% (Tabelle 4). Betrachtet man nur die Veränderungen zwischen den Zeitschnitten 1990 und 2010, dann zeigt sich, dass mit den Vegetationshöhenmodellen auf 90% der Lothar-Schadenflächen und auf 27% der gesamten Waldfläche Höhenabnahmen registriert wurden. Das bedeutet, dass sich die kartierten Lothar-Schäden in der Differenz der

Änderungen		Jura		Mittelland		Voralpen		Alpen		Alpensüdseite		Schweiz	
1980 bis 1990	1990 bis 2010	G	L	G	L	G	L	G	L	G	L	G	L
–	–	4.3	18.0	8.3	16.1	6.9	22.6	3.6	29.8	0.8	–	4.7	19.9
–	=	2.0	0.6	2.4	0.3	3.1	1.3	2.8	1.7	1.1	–	2.4	1.6
–	+	10.5	1.3	12.5	0.8	13.5	1.2	14.5	0.5	9.3	–	12.5	1.9
=	–	4.6	16.9	7.2	16.2	6.5	19.9	4.2	26.6	1.6	–	4.8	17.2
=	=	3.7	0.7	2.3	0.1	3.5	0.2	5.2	0.2	4.1	–	3.9	0.7
=	+	10.3	0.1	6.4	0.1	11.2	0.1	16.7	0.2	21.7	–	13.5	0.6
+	–	15.2	59.5	24.1	64.3	19.5	54.2	16.9	39.6	9.9	–	17.4	53.7
+	=	11.3	1.9	7.9	0.9	8.7	0.3	9.5	1.0	10.1	–	9.5	2.1
+	+	38.2	0.9	29.1	1.2	27.0	0.2	26.6	0.3	41.4	–	31.4	2.2
Total		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	–	100.0	100.0

**Tab 4** Verteilung der Klassen mit unterschiedlicher Veränderung der Vegetationshöhen in den Produktionsregionen und der Schweiz (G = Gesamt, L = Lothar-Schadenflächen gemäss Scherrer 2001), getrennt nach den Perioden 1980–1990 und 1990–2010 und klassiert nach Abnahme (–), Keine Änderung (=) und Zunahme (+). Auf der Alpensüdseite wurden keine Lotharschäden erfasst.

berechneten Vegetationshöhenmodelle gut abbilden.

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Aus den historischen Schwarz-Weiss-Luftbildern liessen sich mit Bildkorrelation Vegetationshöhenmodelle herstellen. Allerdings konnten mit der ursprünglichen Auflösung der Modelle (1 × 1 m) keine Analysen durchgeführt werden. Aufgrund des kleinen Bildmassstabs sind kleinräumige Höhenänderungen nicht zuverlässig ermittelbar. Daher wurde als Berechnungseinheit eine Auflösung von 100 × 100 m (eine Hektare) gewählt. Eventuell sind kleinere Berechnungseinheiten noch zulässig, dies müsste jedoch speziell untersucht werden. Als Folge der gewählten Berechnungseinheit konnten kleine Bestandeslücken (1–2 Aren) nicht erfasst werden. Das Verschwinden von Einzelbäumen oder kleinen Baumgruppen ist ebenfalls nicht erkennbar. Nicht abgebildet werden in den Differenzen der Vegetationshöhenmodelle zudem Eingriffe unter der Ober-schicht und Einzelbaumentnahmen.

Generell sind Veränderungen besser erkennbar, wenn sie kurz vor statt kurz nach einer Bildaufnahme stattfanden. Sie sind dann noch «frisch». Fanden die Veränderungen kurz nach einer Bildaufnahme statt, ist die Gefahr gross, dass sie in der nächsten Bildaufnahme nicht mehr erkannt werden können, weil das Kronendach wieder zugewachsen ist. Veränderungen lassen sich zudem nicht direkt bestimmten Ursachen zuordnen. So können natürliche Störungen, zum Beispiel Windwürfe, in der Regel nicht von Nutzungen unterschieden werden. Weiter könnte die Quantifizierung der Veränderungen durch die unterschiedlichen Abstände zwischen den Zeitschnitten und durch Unterschiede bei den verwendeten Sensoren und Flughöhen beeinflusst sein.

Auch wenn einzelne Kronen nicht erkannt werden können, erlaubt die hochautomatisierte Bildkorrelation historischer und aktueller Stereoluftbilder die Erstellung von Zeitreihen digitaler Vegetationshöhenmodelle. Mit diesen können Veränderungen in den Bestandeshöhen und damit ablaufende Dynamiken im Wald beschrieben und quantifiziert werden. Sie dienen als Grundlagendaten, die Rückschlüsse auf die Entwicklung von Waldfunktionen und -leistungen im Lauf der Zeit ermöglichen (Matasci et al 2018).

Erste Anwendungen haben bereits gezeigt, dass mit den hier vorgestellten historischen Vegetationshöhenmodellen unter Beizug von Daten aus terrestrischen Erhebungen Modelle zur Vorhersage der oberirdischen Baumbiomasse erstellt werden können (Price et al 2020). Für die Güte der Modelle war dabei nicht die Qualität des Luftbilds, sondern der zeitliche Abstand zwischen den Luftbildaufnah-

men und der terrestrischen Aufnahme entscheidend. Je kleiner der Abstand war, desto besser war der Zusammenhang zwischen den berechneten Vegetationshöhen und den Biomasseschätzungen der terrestrischen Aufnahmen.

Mit der Zeitreihe könnten zudem die Waldgebiete identifiziert werden, in denen über längere Zeit keine grösseren Nutzungen oder Störungen aufgetreten sind. Würde dabei die räumliche Form und Ausdehnung von Höhenveränderungen miteinbezogen, könnte zwischen Nutzungen und natürlichen Störungen unterschieden werden. Das würde es erlauben, die vom Menschen unberührten Waldgebiete zu lokalisieren.

Aktuelle Fernerkundungsdatensätze, wie sie mittels LiDAR erhoben werden können, liefern Punktwolken mit 20 und mehr Punkten pro Quadratmeter. Diese Datensätze ermöglichen viel kleinräumigere und detailliertere Berechnungen der Waldstruktur. So können einzelne Kronen im Kronendach meist erkannt werden (Menk et al 2017). Auch werden kleine Lücken in LiDAR-Datensätzen viel zuverlässiger abgebildet als in fotogrammetrischen Oberflächenmodellen (White et al 2018). LiDAR-Daten geben darüber hinaus Informationen zur Situation unter dem Kronendach, sodass es möglich sein sollte, neben den Räumungen auch noch andere Bewirtschaftungsformen zu erkennen. Voraussetzung dafür ist allerdings die regelmässige Datenerhebung mit LiDAR. Dies ist in manchen Kantonen bereits der Fall. Für die Schweiz ist aktuell eine landesweite Erhebung im Gange, und es besteht die Hoffnung, dass es wie bei der Luftbildbefliegung eine regelmässige Aktualisierung geben wird. Bis dahin sind Vegetationshöhenmodelle, die mittels Bildkorrelation aus Luftbildern gewonnen wurden, eine wertvolle Zeitreihe, um Veränderungen in den Schweizer Waldstrukturen zu berechnen. ■

*Eingereicht: 22. Dezember 2020, akzeptiert (mit Review): 18. Mai 2021*

## Literatur

- CIOLDI F, BRÄNDLI UB, DIDION M, FISCHER C, GINZLER C ET AL (2020) Waldressourcen. In: Brändli UB, Abegg M, Allgaier Leuch B, editors. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. pp. 35–119.
- GINZLER C, HOBI ML (2015) Countrywide stereo-image matching for updating digital surface models in the framework of the Swiss National Forest Inventory. *Remote Sens* 7: 4343–4370.
- GINZLER C (2018) Vegetation Height Model NFI. National Forest Inventory (NFI). doi: 10.16904/1000001.1.
- GINZLER C, MARTY M, WASER LT (2020) Countrywide surface models from historical panchromatic and true color stereo imagery – a retrospective analysis of forest structures in Switzerland. EGU General Assembly 2020, online, 4–8 May 2020, EGU2020-12741, doi: 10.5194/egusphere-egu2020-1274.
- MATASCI G, HERMOSILLA T, WULDER MS, WHITE JC, COOPS NC ET AL (2018) Three decades of forest structural dynamics over Canada's forested ecosystems using Landsat time-series and lidar plots. *Remote Sens Environ* 216: 697–714.

- MENK J, DORREN L, HEINZEL J, MARTY M, HUBER M (2017) Evaluation automatischer Einzelbaumerkennung aus luftgestützten Laserscanning-Daten. *Schweiz Z Forstwes* 168: 151–159. doi: 10.3188/szf.2017.0151.
- PRICE B, WASER LT, WANG Z, MARTY M, GINZLER C ET AL (2020) Predicting biomass dynamics at the national extent from digital aerial photogrammetry. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 90: 102116.
- SCHEFFER (2001) Sturmschadeninventar Lothar 1999, Bericht über die Ergebnisse der Sturmschadenerfassung vom Orkan Lothar anhand von normalfarbigen Luftbildern. Nesslau: Scherrer Ingenieurbüro AG. 50 p.
- 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.
- WHITE JC, TOMPALSKI P, COOPS NC, WULDER MA (2018) Comparison of airborne laser scanning and digital stereo imagery for characterizing forest canopy gaps in coastal temperate rainforests. *Remote Sens Environ* 208: 1–14.

## Dynamique des hauteurs de végétation dans la forêt suisse

Les méthodes de télédétection permettent de saisir sur de grandes surfaces la structure des forêts. Les photos aériennes stéréoscopiques ont fait leur preuve comme base efficiente pour le calcul des modèles de surface numériques. Lorsque l'on soustrait du modèle de surface le modèle de terrain et que l'on élimine les objets artificiels, on obtient le modèle de hauteur de végétation. Selon leur résolution, les photos aériennes fournissent des informations plus ou moins détaillées concernant la surface des houppiers. Pour obtenir des données historiques, on a établi, dans le cadre de l'Inventaire forestier national (IFN), des modèles de surface et de hauteur de végétation couvrant tout le territoire, sur la base de photos aériennes noir-blanc analogues provenant de l'Office fédéral de la topographie, pour les campagnes de vol 1979–1985 et 1990–1998. Par la suite, nous avons déterminé, en comparant les modèles de hauteur de végétation historiques (périodes 1980 et 1990) avec le modèle actuel de l'IFN (2010), l'évolution des hauteurs de la forêt suisse avec une résolution d'un hectare. Contrairement aux terrains découverts ou urbanisés, la corrélation d'images en forêt fonctionne de manière satisfaisante avec les photos aériennes noir-blanc scannées. L'analyse a pu se faire sur plus d'un million d'hectares de forêt. Elle montre que sur presque un tiers de la surface forestière la hauteur de végétation a augmenté de façon continue depuis les années 1980. Sur une surface presque aussi grande, les évolutions entre les trois périodes était inverses avec pour une période une augmentation et pour l'autre une diminution. Les plus grandes différences de hauteur se situent sur le Plateau, les plus faibles au Sud des Alpes. Des petites modifications et des changements sous la couronne des arbres ne peuvent toutefois pas être reconnus avec ces données. Les modèles de végétation historiques offrent néanmoins un regard sur le passé des structures forestières suisses.

## Dynamics of vegetation heights in the Swiss forest

Forest structure can be captured over large areas using remote sensing methods. Stereo aerial images have proven to be an effective basis for the calculation of digital surface models. If the terrain model is subtracted from these surface models, and artificial objects are eliminated, vegetation height models are obtained. These vegetation height models provide information about the canopy surfaces in forest areas, with a level of detail dependant on the spatial resolution. To obtain data on past forest surfaces, nationwide digital surface and vegetation height models were created in the context of the Swiss National Forest Inventory (NFI) based on analogue black-and-white aerial photographs from the Federal Office of Topography from the 1979–1985 and 1990–1998 aerial campaigns. Subsequently, the historical vegetation height models (time periods 1980 and 1990) and the current vegetation height model of the NFI (time period 2010) were used to determine change in Swiss forest height at a resolution of one hectare. Unlike in open landscapes and settlement areas, the image correlation in forest areas was satisfactory with the scanned black-and-white aerial images. Over one million hectares of forest were included in the analysis. The results show that over almost one third of the forest area vegetation height has continuously increased since the 1980s. Over a nearly equal area, height changes over the two change periods were opposite, with increases in one period and decreases in the other. The largest height changes occurred in the Plateau, the smallest in the Southern Alps. However, small-scale changes and changes under the canopy cannot be detected with these data. Nevertheless, the historical vegetation height models provide a view of past Swiss forest structures.