

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 164 (2013)

**Heft:** 4

**Artikel:** Stand und Perspektiven einer landesweiten Baumartenklassifikation mit digitalen Luftbildern

**Autor:** Waser, Lars T.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1097609>

### **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:** 01.05.2026

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

# Stand und Perspektiven einer landesweiten Baumartenklassifikation mit digitalen Luftbildern

Lars T. Waser Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (CH)\*

## Status and perspectives of country-wide tree species classification based on digital aerial images

There is an increasing interest on area-wide and high-resolution data of forest composition. In Switzerland, tree species distribution will be considered periodically by the Swiss National Forest Inventory (NFI), but the claims will be only partly fulfilled by the existing forest type maps since they are relatively poor regarding spatial accuracy, updating, and reproducibility. Providing consistent, reproducible and up-to-date information on various forest parameters is the main advantage of using the latest remote sensing data and methods. New possibilities are given by the airborne digital sensor ADS80, which records the entire country during the vegetation season every six years. This paper presents a robust methodology of classifying tree species in different study areas. The obtained accuracies for beech, ash, Norway spruce, Scots pine, larch, willow and silver fir are in average 71–85%, but lower for other deciduous tree species. These are mainly less dominant tree species within a study area such as maple and birch. A small sample data set and shadows of other neighboring trees seem to be the main reasons for this. Based on the experiences made in this study, a country-wide classification of tree species has become more feasible. The usage of airborne digital sensor ADS80 data in combination with a high degree of automation from the developed methods will enable the generation of country-wide products on the distinction of coniferous and deciduous tree species until 2015.

**Keywords:** ADS80, airborne remote sensing, large area, logistic regression models, tree species

**doi:** 10.3188/szf.2013.0095

\* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail lars.waser@wsl.ch

Methoden aus der Fernerkundung erlauben die Erstellung von flächigen Datensätzen aus Luftbildern und werden in der Schweiz im Waldbereich schon seit den 1980er-Jahren eingesetzt, anfänglich insbesondere zur Waldplanung, Kartierung von Waldschäden, Luftbildinterpretation im Schweizerischen Landesforstinventar (LFI) oder zur Aufnahme von Naturereignissen. Die Nachfrage nach flächenhaften und hochaufgelösten Daten zum Schweizer Wald hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. Regelmässig erhobene, aktuelle Informationen zur Baumartenzusammensetzung und zum daraus abgeleiteten Mischungsgrad auf landesweiter, regionaler oder betrieblicher Ebene haben dabei eine grosse praktische und wissenschaftliche Relevanz. Flächenhafte Informationen zu den Baumarten dienen als Ergänzung zu den Stichprobedaten aus dem LFI, zur Berechnung des Mischungsgrades oder als Eingangsgrösse für das Ableiten anderer wichtiger forstlicher Kenngrössen wie Biomasse, Holzvorrat oder auch Artenvielfalt. Auf

kantonalen Ebene besteht momentan eine grosse Nachfrage nach aktuellen und räumlich hochaufgelösten Informationen zur Baumartenverteilung und zum Mischungsgrad.

Gegenwärtig können für grössere Regionen Informationen zur Verteilung der Hauptbaumarten entweder statistisch aus dem Stichprobenetz des LFI abgeleitet werden, oder sie beschränken sich auf eine relative grobe Unterscheidung von Laub- und Nadelgehölzen aus nicht mehr aktuellen Datensätzen wie dem Waldmischungsgrad Schweiz des Bundesamtes für Statistik (BFS 2003).

Seit 2008 stehen qualitativ hochwertige und hochaufgelöste digitale Luftbilder vom Zeilensensor ADS80 mit den Kanälen Rot, Grün, Blau und Nahinfrarot, die während der Vegetationsperiode (Juni–September) aufgenommen wurden, im 6-Jahres-Rhythmus für die gesamte Schweiz zur Verfügung. Seit dieser landesweiten Umstellung von gescannten analogen Stereoluftbildern auf digitale Luftbilder und der gleichzeitigen Verfügbarkeit von 3-D-Daten

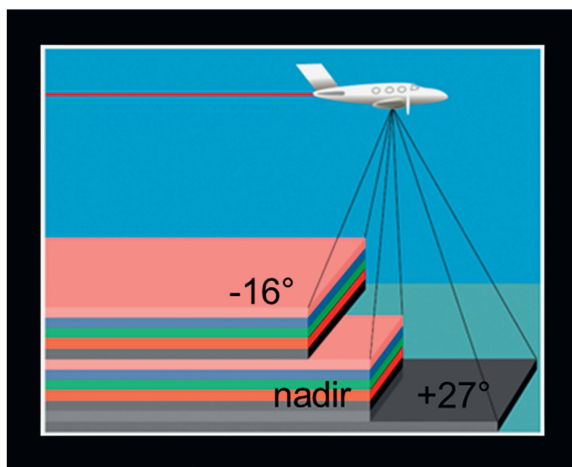
(Oberflächenmodelle, Vegetationshöhenmodelle) erlebt die forstliche Fernerkundung eine kleine Renaissance. Nicht nur auf Ebene der Aufnahmesensoren und -verfahren fand in den letzten Jahren eine Reihe von Entwicklungen statt, sondern auch im Bereich der Methodik (Bildaufbereitung, Klassifikationsverfahren und Auswertungsmethoden) und Automatisierung (halb- bis vollautomatische Verfahren). Insbesondere eine Verknüpfung von optischen Daten (Luftbilder) mit Oberflächendaten aus Stereoluftbildern oder Airborne Laserscanning (ALS) zeigt einen Mehrwert bei der Auswertung von forstlichen Kenngrößen wie beispielsweise Gehölzen (Waser et al 2008) oder Baumarten (Heinzel & Koch 2011, Holmgren et al 2008, Waser et al 2011).

Mittels Fernerkundungsmethoden und den digitalen Luftbildern vom Zeilensensor ADS80 bietet sich jetzt die Gelegenheit, Datensätze zu Baumartenzusammensetzung und Mischungsgrad relativ einfach zu aktualisieren und in einem regelmässigen Turnus (alle 6 Jahre) neu zu generieren. In Waser (2012) wurden robuste Methoden zur halbautomatischen Gehölzausscheidung und Baumartenklassifikation mittels logistischer Regressionsmodelle für verschiedene Untersuchungsgebiete der Schweiz entwickelt und optimiert.

Im vorliegenden Beitrag werden die Möglichkeiten und Grenzen von halbautomatischen Verfahren (im Sinne von überwachter Klassifikation mit Trainings- und Referenzdaten) zur Klassierung der Hauptbaumarten und deren Anwendung im klein- und grossräumigen Einsatz im Wald aufgezeigt.

## Datengrundlage und Methode

Zur Klassifikation der Baumarten wurden die digitalen Luftbilder des Zeilensensors ADS80 verwendet sowie daraus berechnete digitale Oberflächenmodelle beziehungsweise Kronenhöhenmo-



**Abb 1** Aufnahmeprinzip des ADS80-Zeilensensors mit den Kanälen NIR, Rot, Grün, Blau und Panchromatisch (senkrecht und rückwärts, Letzterer auch vorwärts). Quelle: Leica Geosystems (2011)

delle, Letztere unter zusätzlicher Verwendung des digitalen Geländemodells swissAlti3D von Swisstopo. Als Referenzdaten zur Klassifikation der Baumarten wurden Daten zu Laub-/Nadelgehölzen aus der Luftbildinterpretation des LFI (Ginzler et al 2005) sowie Feldkartierungen von verschiedenen Baumarten verwendet.

Die verwendete Methodik basiert auf der Ableitung von geeigneten Informationen aus den Fernerkundungsdaten, die zur Klassifikation der Hauptbaumarten in verschiedenen Testgebieten notwendig sind (Waser 2012). Für die Anwendung auf grössere Gebiete, mit Blick auf eine landesweite Erfassung, wurden einzelne Arbeitsschritte optimiert und weiter automatisiert.

## ADS80-Luftbilder

Der ADS80-Zeilensensor zeichnet Flugstreifen in fünf spektralen Kanälen auf. Relevant für Vegetationsstudien sind jene im roten, grünen und blauen sowie im nahen Infrarot(NIR)-Bereich. Das Aufnahmeprinzip ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Bodenauflösung der ADS80-Luftbilder beträgt im Jura, im Mittelland und in den Voralpen circa 25 cm und in den Alpen circa 50 cm. Die in dieser Arbeit verwendeten Luftbilder stammen aus den Jahren 2008 und 2009.

Stereoaufnahmen zur Gewinnung von 3-D-Informationen, so auch zur Generierung von Orthobildern, werden durch eine senkrecht nach unten gerichtete und eine gleichzeitig nach hinten versetzte Aufnahme erzielt. Orthobilder sind lagerichtige und massstabsgetreue Luftbilder, welche aus den zentralperspektivischen Luftbildern mithilfe eines Höhenmodells entzerrt werden. Mittels Bildkorrelation werden digitale Oberflächenmodelle aus den jeweiligen stereoskopischen Bildstreifen in einer Auflösung von 1 m × 1 m (basierend auf einer Bodenauflösung der Luftbilder von 25 cm) beziehungsweise 2 m × 2 m (Bodenauflösung der Luftbilder von 50 cm) hergestellt. Seit 2008 befliegt die Swisstopo in der Hauptvegetationsperiode (Juni bis September) die ganze Schweiz im 6-Jahres-Rhythmus, wodurch hochaufgelöste, digitale Daten flächendeckend zur Verfügung stehen.<sup>1</sup>

## Kronenhöhenmodell

Das Kronenhöhenmodell (KHM) wird für alle forstlichen Parameter verwendet, in welche die Kronenhöhe beziehungsweise die Baumhöhe einfließt.

<sup>1</sup> Bis heute sind mehr als 75% der Landesfläche befliegen worden. Weitere Informationen zum Stand der Befliegung finden sich unter <http://map.lubis.admin.ch> (4.2.2013).

	Name	Fläche (km <sup>2</sup> )	m ü. M.	Topografie	Hauptbaumarten	Referenzdaten (Total)
Kleingebiete	Bremgarten (AG)	10.8	350–450	flach	Ah, Bu, Ei, Es, Fi, Fö, Lä, Wei, WeTa	Polygon (1750)
	Chasseral (BE)	12.5	900–1400	hügelig–steil	Ah, Bu, Es, Fi, WeTa,	Polygon (452)
	Lägern (AG/ZH)	11.6	400–750	hügelig–steil	Ah, Bu, Ei, Es, Fi, Fö, Lä, WeTa	Polygon (1238)
	Tarasp (GR)	2.9	1350–2000	hügelig–steil	Bi, Lä, Fi, Fö	Polygon (325)
	Tesserete (TI)	1.8	800–1300	hügelig	Bi, Bu, Fi	Polygon (340)
	Uetliberg (ZH)	3.2	450–800	hügelig	Ah, Bu, Es, Lä, Fi, Fö, WeTa	Polygon (387)
	Urnäsch (AR)	1.9	900–1300	hügelig	Ah, Bi, Bu, Es, Fi, WeTa	Polygon (359)
Grossgebiete	Appenzell (AI/AR)	~240	600–1750	hügelig–steil	Ah, Bu, Es, Fi, WeTa	Polygon (1174)
	Berner Jura (BE)	~850	400–1600	hügelig–steil	Nadel-/Laubgehölze	LFI (825)

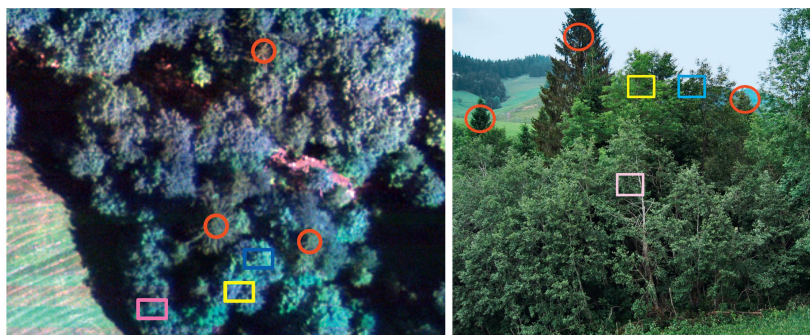
**Tab 1** Übersicht über die neun Testgebiete mit ihren geografischen Eigenschaften, den am häufigsten vorkommenden Baumarten sowie der Anzahl digitalisierter Polygone bzw. interpretierter LFI-Punkte. Ah: Ahorn, Bi: Birke, Bu: Buche, Ei: Eiche, Es: Esche, Fi: Fichte, Fö: Föhre, Lä: Lärche, Wei: Weide, WeTa: Weisstanne.

Es berechnet sich aus der Differenz zwischen der Oberfläche (DOM) und dem Gelände (digitales Geländemodell). Das digitale Geländemodell swiss-Alt3D ist das Produkt einer ALS-Befliegung in den Jahren 2000 bis 2008, welche im Rahmen des Projektes «Landwirtschaftliche Nutzflächen» für die ganze Schweiz bis auf 2000 m ü. M. durchgeführt wurde.

### Testgebiete und Referenzdaten

Die Klassifikation wurde in den sieben kleineren Testgebieten Bremgarten (AG), Chasseral (BE), Lägern (AG/ZH), Tarasp (GR), Tesserete (TI), Uetliberg (ZH) und Urnäsch (AR) mit Flächen zwischen 1.8 km<sup>2</sup> und 12.5 km<sup>2</sup> durchgeführt. Als grössere Testgebiete wurden die Kantone Appenzell Auser- und Innerrhodens (240 km<sup>2</sup>) sowie der Berner Jura (850 km<sup>2</sup>) ausgewählt.

Wie die Tabelle 1 veranschaulicht, variieren die einzelnen Gebietsgrössen stark, und das Gelände ist mit Ausnahme von Bremgarten hügelig bis steil. In allen Gebieten treten Fichten auf, Ahorn, Buche, Birke, Esche und Weisstanne sind etwas weniger vertreten, noch seltener Eiche, Föhre, Lärche und Weide. Eine Ausnahme bildet der Berner Jura, wo aufgrund fehlender Feldkartierungen die Laub- und Nadelgehölze nicht weiter unterschieden werden konnten.



○ Fichte □ Ahorn □ Erle □ Esche

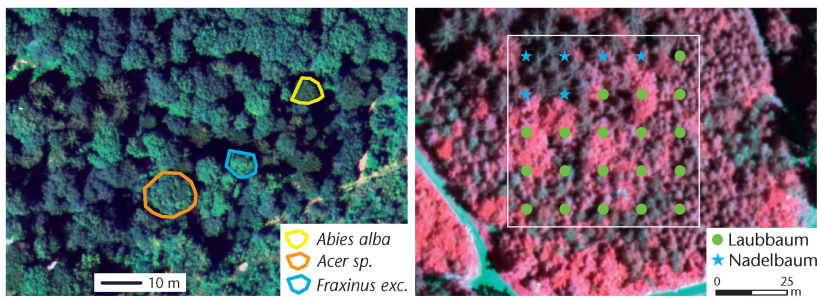
**Abb 2** Erscheinungsbild von Baumarten in der Echtfarbluftbildaufnahme (links) und im Gelände, Testgebiet Urnäsch (AR).

Die verwendeten Referenzdaten zur Klassifikation der Baumarten basieren auf zwei unterschiedlichen Datenquellen (Tabelle 1). Der erste Referenzdatensatz besteht aus Polygonen von verschiedenen Baumkronen, die auf den Orthobildern digitalisiert wurden. Als Vorlage dienten die Baumartenkartierungen auf den jeweilig ausgedruckten Orthobildern im Rahmen von Feldaufenthalten in allen Testgebieten ausser im Berner Jura (1 bis 3 Feldtage pro Testgebiet). Um eine einigermaßen ausgeglichene Stichprobe pro Testgebiet zu erhalten, wurden nur die häufigsten Baumarten kartiert. In Gebieten mit einer grösseren Artenvielfalt wie Bremgarten oder Lägern waren dies bis zu neun verschiedene. Abbildung 2 zeigt die zwei unterschiedlichen Perspektiven zur Lokalisierung der zu kartierenden Baumarten im Testgebiet Urnäsch.

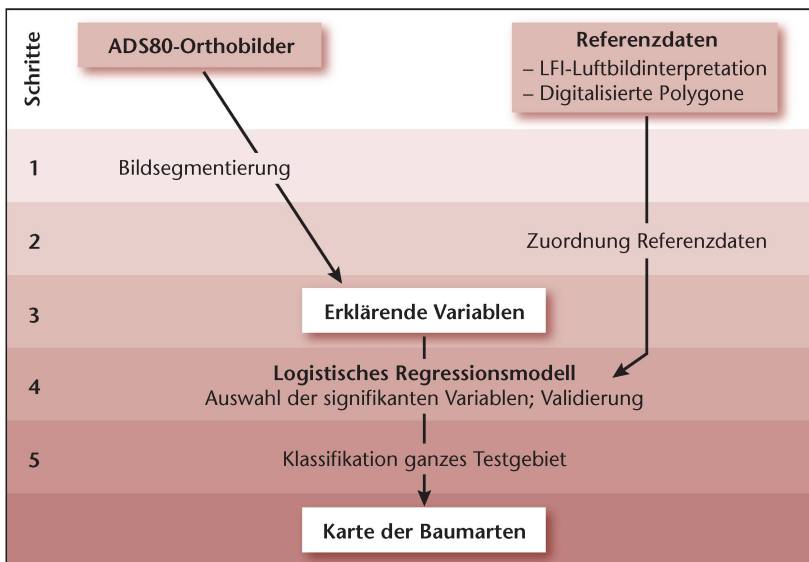
Der zweite Referenzdatensatz, welcher im Berner Jura Anwendung fand (Tabelle 1), besteht aus Rasterpunkten mit Angaben zu Laub- oder Nadelgehölz, aber keiner weiteren Unterscheidung in Baumarten ausser der Lärche. Ihm zugrunde liegt die Stereoluftbildinterpretation des LFI, welche die Bodenbedeckung auf einem regelmässigen Stichprobennetz erfasst (Ginzler et al 2005). Jede LFI-Stichprobe besteht aus einer quadratischen Probefläche mit einer Ausdehnung von 50 m × 50 m, auf welcher jeweils 5 × 5 Rasterpunkte im Abstand von 10 m liegen. Bei der Interpretation wird jedem dieser 25 Rasterpunkte eine von elf Bodenbedeckungsklassen zugeordnet, wovon die Klassen Nadelbaum und Laubbaum hier von Interesse sind. Für die bereits prozessierte Fläche von 850 km<sup>2</sup> des Berner Juras wurden 825 interpretierte Rasterpunkte (Nadel- bzw. Laubbäume) aus der Luftbildinterpretation verwendet. Die zwei unterschiedlichen Methoden zur Aufnahme der Referenzdaten sind in Abbildung 3 dargestellt.

### Überblick über das Klassifikationsverfahren

Die Klassifikation der Hauptbaumarten durchläuft verschiedene Prozessschritte, die hier nicht



**Abb 3** Beispiele von verwendeten Referenzdaten zur Klassifikation der Baumarten (basierend auf digitalisierten Polygonen im Rahmen der Feldarbeit; links) und zur Unterscheidung von Laub- und Nadelgehölzen (basierend auf der Stereoluftbildinterpretation des LFI; rechts).



**Abb 4** Methodischer Ablauf des Klassifikationsverfahrens.

im Detail erläutert werden, aber in Waser (2012) ausführlich beschrieben sind. Sie basiert auf dem Prinzip, dass mithilfe von logistischen Regressionsmodellen die Beziehung der Zielvariablen (hier Baumarten) von einer Auswahl erklärender Variablen (hier abgeleitete statistische Werte der ADS80-Reflektanzkanäle) bestimmt wird. Im Folgenden werden die in Abbildung 4 dargestellten fünf Hauptschritte kurz erläutert.

Als Klassifikationsverfahren wurde ein objektorientierter Ansatz ausgewählt, da er gegenüber pixelbasierten Ansätzen verschiedene Vorteile bietet. Beim pixelbasierten Ansatz wird jedes Pixel einer bestimmten Klasse zugeordnet, beim objektorientierten Ansatz hingegen jedes einzelne Bildsegment, d.h. die Objekte, die von Interesse sind. In einem ersten Schritt wurden die Orthobilder daher in homogene Bildsegmente unterteilt. Mit diesem Verfahren ist es möglich, alle Bildsegmente (hier in etwa die Baumkronen) mit ähnlichen Eigenschaften bezüglich Form und Reflektanzwert automatisch zu extrahieren.

In einem zweiten Schritt wurden die Referenzdaten, d.h. die im Rahmen der Luftbildinterpretation des LFI interpretierten Nadel-/Laubgehölze respektive die digitalisierten Polygone der Baumarten

aus der Feldarbeit, den jeweiligen Bildsegmenten zugeordnet.

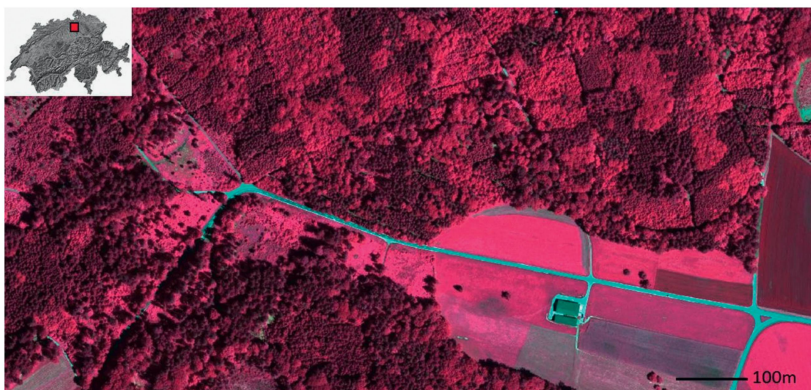
In einem dritten Schritt wurde der Informationsgehalt der Fernerkundungsdaten (Abbildung 5) weiter erhöht, indem nebst der Verwendung der vier Originalkanäle (NIR, rot, grün, blau) als erklärende Variablen noch weitere Variablen abgeleitet wurden. Es sind dies Kombinationen von Bildkanälen beziehungsweise von Bildkanal und Kronenhöhenmodell (Abbildung 6), Verhältnisse der Bildkanäle zueinander (z.B. NIR/[NIR + blau + grün + rot]), Transformation der Bildkanäle in andere Farbräume (z.B. IHS-Transformation mit Intensität [intensity], Farbton [hue] und Farbsättigung [saturation]) sowie der häufig für Vegetationsmodellierungen verwendete Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Weiterführende Informationen hierzu finden sich beispielsweise in Jensen (2005).

In einem vierten Schritt wurde für die verschiedenen Baumarten pro Testgebiet ein logistisches Regressionsmodell mit multinomalem Verteilungstyp verwendet (da nicht nur eine Baumart, sondern gleich mehrere klassiert werden). In verschiedenen Auswahlverfahren wurden diejenigen erklärenden Variablen bestimmt, welche am meisten zur Unterscheidung der einzelnen Baumklassen beitrugen. Mittels automatischer Selektionsverfahren, Diskriminanz- und Hauptkomponentenanalyse wurden die Modelle schrittweise statistisch optimiert, d.h. die nicht signifikanten Variablen eliminiert. Anschliessend wurde die Qualität der Modelle durch Kreuzvalidierung getestet. Dabei wird die Vorhersagegenauigkeit jedes Modells anhand von Durchläufen mit Teststichproben, aus denen das Modell selbst entwickelt worden ist, bestimmt. Bei der zehnfachen Kreuzvalidierung werden die Referenzdaten zufällig in etwa zehn gleich grosse Stichproben aufgeteilt. Anschliessend wird in jedem der zehn Durchläufe eine Stichprobe ( $1/10$  der gesamten Referenzdaten) als Validierungsdatensatz verwendet, die restlichen neun ( $9/10$ ) werden als Trainingsdatensatz zur Kalibrierung des Modells verwendet.

In einem fünften und letzten Schritt wurde die Klassifikation, basierend auf den entwickelten und validierten Modellen, auch ausserhalb der Referenzdaten, d.h. auf das jeweilige gesamte Testgebiet, ausgeweitet.

### Automatisierung für grosse Testgebiete

Für die Anwendung auf grosse Testgebiete von mehreren hundert Quadratkilometern und für eine spätere landesweite Ausdehnung wurden die einzelnen Arbeitsschritte des obigen Ablaufs grösstenteils automatisiert. Für die einzelnen Arbeitsschritte werden Skripts verwendet, und die Prozessierung der



**Abb 5** Falschfarb-Infrarot-Orthobild eines heterogenen Waldgebietes in Bremgarten (AG). Laubgehölze erscheinen heller als Nadelgehölze, was sie von blossem Auge unterscheidbar macht.



**Abb 6** Erhöhung des Informationsgehalts der Fernerkundungsdaten durch Multiplikation des Kronenhöhenmodells mit dem Nahinfrarotkanal als Möglichkeit zur Unterscheidung von Laub- und Nadelgehölzen.

Testgebiet	$\kappa$	CCR	Übereinstimmung nach Baumart in %
Bremgarten (AG)	0.71	0.77	Bu (35), Ei (51), Es (61), Ah (64), Fö (64), WeTa (68), Lä (77), Fi (90) Wei (90)
Chasseral (BE)	0.82	0.87	Es (64), Ah (83), Bu (87), WeTa (88), Fi (90)
Lägern (AG/ZH)	0.73	0.80	Es (22), Ah (28), Ei (60), Lä (71), WeTa (81), Bu (87), Fi (92), Fö (92)
Tarasp (GR)*	0.73	0.85	Fi (47), Bi (72), Fö (84), Lä (96)
Tesserete (TI)	0.76	0.82	Bu (72), Bi (88), Fi (89)
Uetliberg (ZH)*	0.60	0.71	Ah (28), Fö (57), Bu (58), WeTa (64), Lä (65), Es (72), Fi (81)
Urnäsch (AR)*	0.70	0.78	Ah (9), Bi (45), WeTa (81), Es (82), Bu (88), Fi (89)
Appenzell (AI/AR)*	0.68	0.77	Ah (36), Es (65) Bu (69), WeTa (76), Fi (91)
Berner Jura (BE)	0.91	0.95	Nadel (95), Laub (95)

**Tab 2** Übersicht über die erzielten Klassifikationsgenauigkeiten basierend auf dem Kappa-Koeffizienten ( $\kappa$ ), der korrekten Klassifikationsrate (CCR) und dem Anteil richtig zugeordneter Baumarten. Quellen: \*Waser et al (2011), Waser (2012). Hervorgehoben ist die Baumart mit der jeweils höchsten bzw. niedrigsten Übereinstimmung.

Inputdaten (Orthobildgenerierung, Erstellen des digitalen Oberflächenmodells und Berechnen der erklärenden Variablen) wird dabei auf mehrere Rechner verteilt. In Regionen, für welche keine oder zu wenige Referenzdaten aus Feldkartierungen vorliegen, werden die luftbildinterpretierten Rasterpunkte aus dem LFI verwendet – mit der Einschränkung, dass nur eine Unterscheidung in Laub- und Nadelgehölze möglich ist (siehe Beispiel Berner Jura). Aus Perfor-

mancegründen wird als Zuordnungsgrösse für die Klassifikation gegenwärtig keine Bildsegmentierung durchgeführt, sondern es werden regelmässige Kacheln mit einer Ausdehnung von 5 m  $\times$  5 m verwendet. Handhabung und Verwaltung der Daten werden über eine Datenbank gesteuert. Die Klassifikation der Hauptbaumarten beziehungsweise der Laub-/Nadelgehölze beginnt mit der Auswahl des zu berechnenden Kartenblatts (z.B. 1 : 25 000-Kartenblatt 1125 «Le Chasseral», ein Teil des Berner Juras) und durchläuft wiederum die folgenden fünf Arbeitsschritte:

- Beschränkung des infrage kommenden Bildmaterials auf die Sommermonate Juni bis August, Segmentierung und Bereitstellen der benötigten erklärenden Variablen aus den ADS80-Bilddaten (Schritt 1)
- Datenbankabfrage zur Auswahl der Referenzdaten (interpretierte LFI-Rasterpunkte) und Zuordnung zu den 5-m $\times$ 5-m-Kacheln (Schritt 2)
- Modellerstellung zur Klassifikation der Hauptbaumarten mit Validierung (Schritte 3 und 4)
- Darstellung der Hauptbaumarten für das gesamte Untersuchungsgebiet (Schritt 5)

## Genauigkeiten der Baumartenklassifikationen

Zur Abschätzung der Qualität der einzelnen Klassifikationsmodelle wurden zwei herkömmliche statistische Masse verwendet: der Kappa-Koeffizient ( $\kappa$ ) und die korrekte Klassifikationsrate (CCR). Dabei werden die Polygone der klassierten Baumarten mithilfe einer Kreuztabelle den beobachteten Referenzdaten gegenübergestellt. Der Kappa-Koeffizient (Cohen 1960) ist ein verbreitetes Mass, welches die Übereinstimmung zweier Datensätze (hier Referenzbaumarten und klassierte Baumarten) anhand einer Kontingenzmatrix mit einer zufälligen Übereinstimmung, wie sie anhand der A-priori-Wahrscheinlichkeiten der Baumartenklassen zu erwarten wäre, vergleicht. Dabei bedeutet ein  $\kappa$ -Wert von 1 eine perfekte Übereinstimmung und ein Wert von 0 eine zufällige Übereinstimmung. Der CCR-Wert beschreibt den Anteil der korrekt klassierten Polygone der Baumarten.

Tabelle 2 veranschaulicht, dass die erzielte Gesamtgenauigkeit je nach Testgebiet und Anzahl verwendeter Baumarten variiert. Die korrekte Klassifikationsrate beläuft sich für eine Laub-/Nadelgehölzklassifikation auf 95% und bewegt sich zwischen 71 und 85%, wenn nach weiteren Baumarten unterschieden wird.

Die Übereinstimmung der korrekt klassierten Baumarten ist unterschiedlich und fällt für die Nadelbaumarten generell etwas höher aus als für die Laubbaumarten. Mit der Ausnahme des Testgebiets Tarasp (GR) ist die Fichte am häufigsten korrekt klassiert worden, Ahorn, Esche und Buche am wenig-

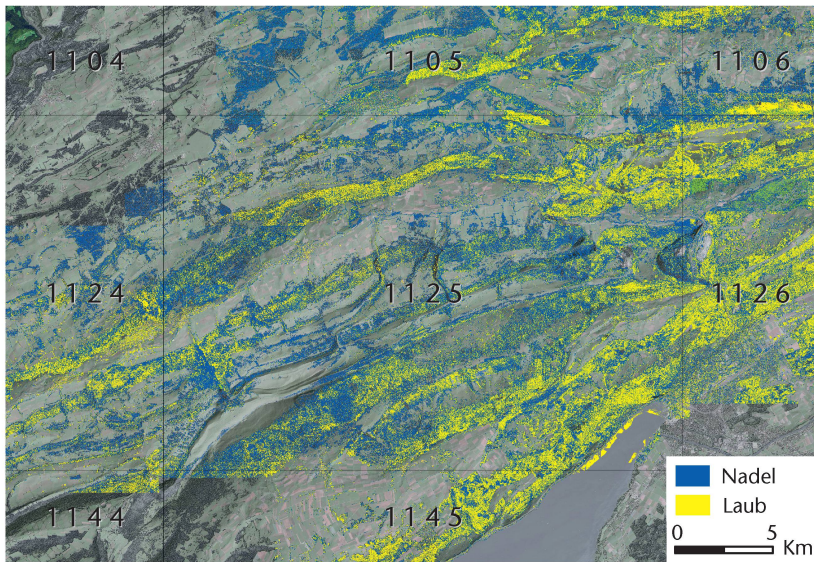


Abb 7 Klassifikation der Laub-/Nadelgehölze im Berner Jura. © 2006 Swisstopo JD052552

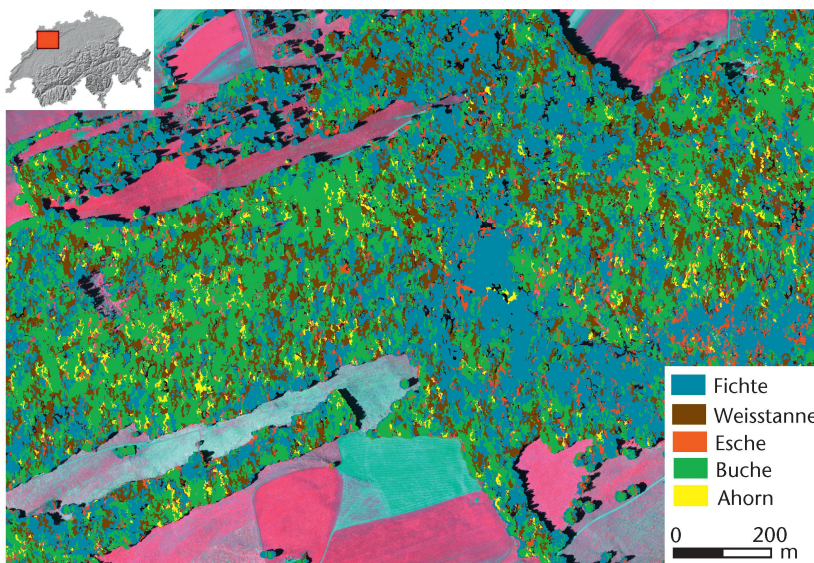


Abb 8 Klassifikation der fünf Hauptbaumarten Ahorn, Buche, Esche, Fichte und Weissstanne im Gebiet des Chasseral (BE).

ten – wobei Letztere eigentlich nur für das Testgebiet Bremgarten (AG) durchfällt. Probleme bei der Zuordnung treten vor allem bei gemeinsamem Auftreten von Ahorn, Buche, Eiche und Esche auf (Testgebiete im Mittelland). Die erzielten Genauigkeiten für eine Laubgehölz-Nadelgehölz-Unterscheidung für den Berner Jura betragen durchwegs 95%. In Waser (2012) wurde gezeigt, dass die Unterteilung in regelmässige 5-m×5-m-Kacheln und der objektorientierte Ansatz (Bildsegmente) ähnlich hohe Genauigkeiten liefern. Nebst den statistischen Auswertungen der Resultate wurde auch eine visuelle Qualitätsbeurteilung auf den jeweiligen Orthobildern durchgeführt. In wenigen Fällen war wegen Unklarheiten eine zusätzliche Abklärung vor Ort erforderlich, dazu zählten auch Interviews mit lokalen Förstern. Auf mögliche Ursachen für falsch klassierte Baumarten und die aufgetretenen Probleme wird im Kapitel «Einschränkungen» eingegangen.

Verglichen mit Resultaten anderer Studien, welche auf digitalen Luftbildern basieren, sind die hier erzielten Genauigkeiten durchaus im oberen Bereich einzuordnen. Ähnlich hohe Genauigkeiten wurden nur in Studien erzielt, die nebst den digitalen Luftbildern auch Informationen aus ALS-Daten verwenden (Holmgren et al 2008, Heinzel & Koch 2011) oder lediglich drei verschiedene Baumarten unterscheiden (Korpela et al 2011). Eine ausführliche Übersicht hierzu findet sich in Waser (2012). Robustheit und auch praktische Relevanz der entwickelten Methode wurden durch zwei Studien in Deutschland untermauert. Für die erste wurde im Rahmen eines Projektes der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF) für ein Testgebiet in der Nähe von Stuttgart auch eine Klassifikation der Baumarten, basierend auf vier verschiedenen Luftbildsensoren, durchgeführt (Waser et al 2010). Für die zweite wurde im Gebiet Traunstein (Bayern) ebenfalls eine Klassifikation der Baumarten basierend auf digitalen Luftbildern erfolgreich getestet (Straub et al, in preparation).<sup>2</sup>

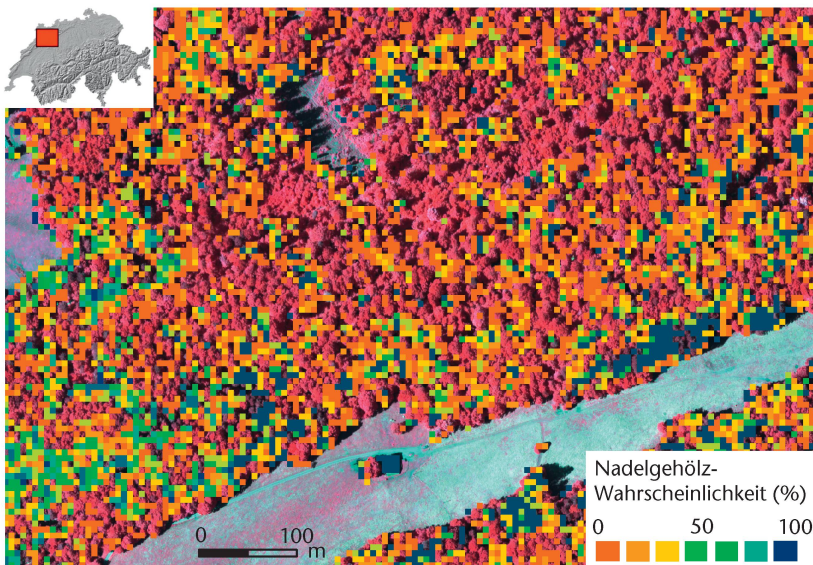
## Anwendungsbeispiele und Nutzen für die Praxis

Im fünften Arbeitsschritt wurden die Hauptbaumarten für das gesamte Untersuchungsgebiet dargestellt, d.h., alle Bildsegmente beziehungsweise alle 5-m×5-m-Kacheln eines Testgebietes werden derjenigen Baumart zugeordnet, welche gemäss Klassifikationsmodell die höchste Wahrscheinlichkeit erhält. Die für die Gesamtfläche durchgeführte Baumartenklassifikation wird in Form einer Baumartenverteilungskarte dargestellt. Abbildung 7 zeigt als erstes Anwendungsbeispiel eine Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelgehölzen im Berner Jura, wobei eine weitere Unterscheidung nach einzelnen Baumarten aufgrund fehlender Referenzdaten (digitalisierte Polygone aus der Feldarbeit) für dieses Gebiet nicht möglich ist. Als Folgeprodukt und direkter Nutzen für die Praxis kann daraus der Mischungsgrad für verschiedene Aussageeinheiten (Bestandeskarten, Hektarraster etc.) abgeleitet werden.

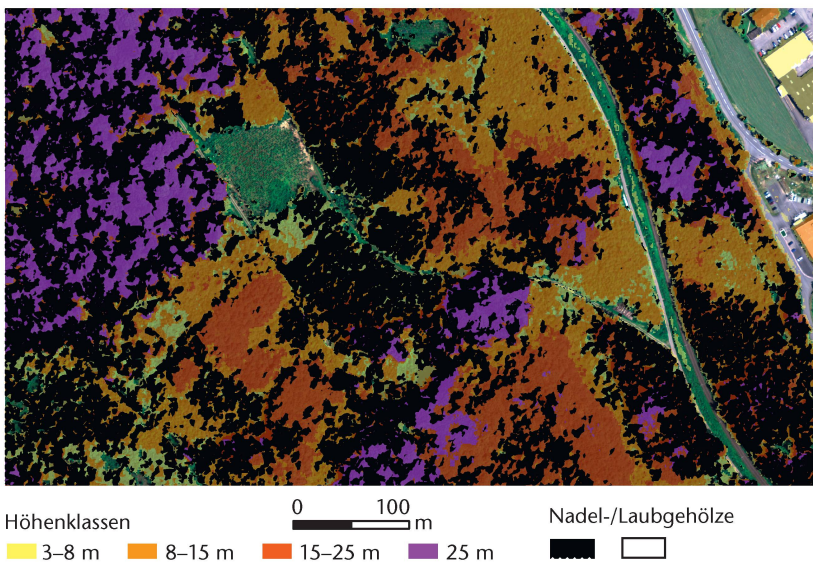
Ein zweites Anwendungsbeispiel ist die Unterteilung in verschiedene Baumarten. Abbildung 8 zeigt exemplarisch die Klassifikation der fünf häufigsten Baumarten im Testgebiet Chasseral (BE). Aktuelle Kenntnisse zur Verteilung der Baumarten in grösseren und kleineren Gebieten sind durch solche Produkte einfach zu gewinnen.

Die Berechnung und Darstellung von Wahrscheinlichkeiten von Laub-/Nadelgehölzen ist ein

<sup>2</sup> STRAUB C, STEPPE, C, SEITZ R, WASER LT (IN PREPARATION) Stratified estimation of forest attributes based on dense image matching and a classification of coniferous and deciduous trees. Eur J For Res.



**Abb 9** Darstellung der Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Nadelgehölzen im Testgebiet Chasseral (BE). Laubgehölze (niedrige Nadelholzwahrscheinlichkeit) sind auf dem Falschfarb-Orthobild deutlich erkennbar.



**Abb 10** Unterscheidung von Laub- und Nadelgehölzen in Kombination mit vier Höhenklassen aus dem Kronenhöhenmodell im Testgebiet Bremgarten (AG).

weiteres Anwendungsprodukt. Dabei werden nicht diejenigen Baumarten mit der höchsten Wahrscheinlichkeit dargestellt, sondern die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer bestimmten Baumart pro Bildsegment beziehungsweise pro 5-m×5-m-Kachel. Es handelt sich dabei nicht um eine scharfe Abgrenzung, sondern vielmehr um eine kontinuierliche Darstellung. Der Hauptvorteil für den Anwender liegt vor allem in einer grösseren Flexibilität, d.h., es ist eine auf die spezifischen Bedürfnisse abgestimmte Einteilung einer Baumart möglich. Abbildung 9 zeigt dies exemplarisch mit der berechneten Wahrscheinlichkeit für Nadelgehölze im Gebiet des Chasserals.

Durch eine Kombination von einzelnen Produkten lassen sich auch andere forstliche Kenngrößen ableiten, oder zumindest erlaubt sie eine

Annäherung daran. So können aus der Höhenvariabilität (Verknüpfung der Waldmaske des LFI [Ginzler 2012] mit den Daten aus dem Kronenhöhenmodell) und aus der Laubgehölz-Nadelgehölz-Unterscheidung Informationen auf Bestandesebene abgeleitet werden. Abbildung 10 zeigt ein Beispiel, das als Hilfe zur Aktualisierung von Bestandeskarten verwendet werden könnte.

## Einschränkungen

Obwohl die angewendete Klassifikationsmethode in den unterschiedlichen Testgebieten durchwegs zu hohen Genauigkeiten führte und plausible Karten der Baumarten generiert werden konnten, sind folgende Einschränkungen hervorzuheben:

Je nach Testgebiet sind einige Baumarten seltener vertreten. In diesem Kontext spricht man von nicht dominanten Arten in einem Testgebiet, wobei es sich meistens um Erle und Weide, oftmals aber auch um Ahorn und Birke handelt. Demzufolge ist auch die Grösse der Stichprobe dieser Arten im Vergleich zu derjenigen der im Testgebiet häufig vorkommenden Arten klein. Gerade aber für die Anwendung des Klassifikationsverfahrens in grösseren Gebieten (oder zu einem späteren Zeitpunkt für die ganze Schweiz) sollten für jede einzelne Baumart Referenzdaten in genügender Anzahl zur Verfügung stehen. Durch gezielte Feldeinsätze und anschließende Digitalisierung der erhobenen Baumarten kann dies für kleinere Gebiete bereits jetzt problemlos und in vernünftiger Zeit erreicht werden. Für landesweite Anwendungen müssen neben weiteren punktuellen Feldeinsätzen auch national einheitlich erhobene terrestrische Daten beigezogen werden, wie sie derzeit im LFI aufgenommen werden. Momentan stehen aus den terrestrischen LFI-Stichproben allerdings noch zu wenige Referenzdaten bereit, welche auch geometrisch mit den Luftbilddaten übereinstimmen. Mit der laufenden GPS-Einmessung des Stichprobenzentrums werden diese aber bis zum Jahr 2016 vorhanden sein. Ob und wie weit diese zusätzlichen Referenzdaten dann auch verwendbar sind, wird momentan für alle LFI-Probleflächen getestet. Probleme bei der Baumartenbestimmung können vor allem bei der Zuordnung des im Gelände eingemessenen Stammes zur entsprechenden Baumkrone im Luftbild auftreten, da dessen Position auf Brusthöhe eingemessen wurde und nicht die Baumspitze.

Ein weiterer Aspekt ist, dass sowohl die Kronengrösse als auch die Baumhöhe die Klassifikation einiger Baumarten einschränken können. Abbildung 11 zeigt exemplarisch, dass der auf dem Bild vorhandene Ahorn im Feld schwierig zu erkennen ist, weil er von zwei benachbarten Föhren und einer Eiche verdeckt wird. Auf dem entsprechenden Luft-

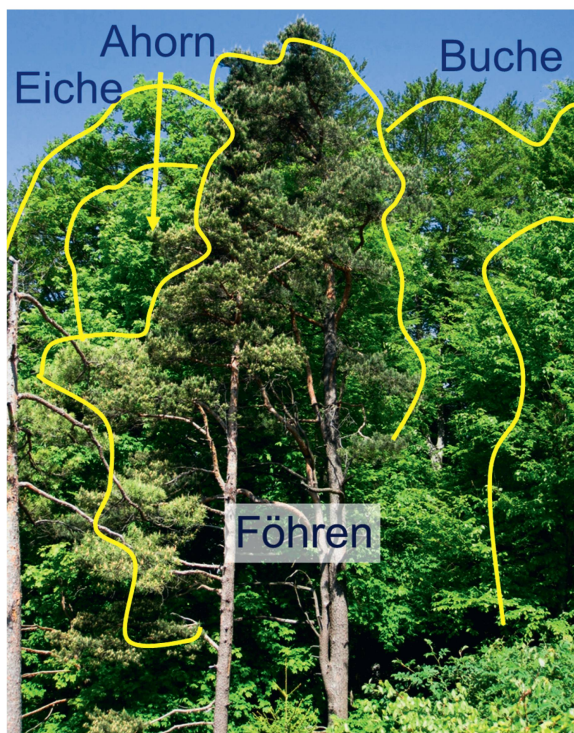


Abb 11 Gegenseitige Verdeckung durch benachbarte Kronen und Schattenwurf im Testgebiet Uetliberg (ZH).

bild wird die Krone des Ahorns dadurch teilweise abgeschirmt beziehungsweise beschattet, was dessen Klassifikation negativ beeinflusst. Keine Probleme dagegen sind für die Eiche, die Föhre und die Buche zu erwarten.

Des Weiteren kann der reliefbedingte Schattenwurf, wie er im nicht direkt besonnten, steileren Gelände nicht nur im Gebirge, sondern auch im Mittelland anzutreffen ist, die Baumartenklassifikation beeinträchtigen. Eine visuelle Qualitätskontrolle dieser Gebiete brachte eine Tendenz zur Überschätzung der Nadelgehölze zum Vorschein. Daneben können auch Wolken und deren Schatten die Klassifikation beeinträchtigen. Der unterschiedliche Aufnahmezeitpunkt der Luftbilder innerhalb eines Testgebietes führt ebenfalls zu Problemen in der Erkennung einzelner Baumarten. Nebst den unterschiedlichen Einstrahlungsverhältnissen spielt insbesondere auch die Phänologie eine grosse Rolle.

An dieser Stelle muss auch darauf hingewiesen werden, dass das Verfahren nicht darauf ausgerichtet ist, die Baumarten auf Einzelbaumniveau zu klassifizieren. Einzelne Studien (z.B. Holmgren et al 2008) befassten sich zwar ausführlich mit diesem Thema, kamen aber zum Schluss, dass grosse Probleme in dicht bewaldetem Gebiet und bei der Kronenabgrenzung von Laubbäumen auftreten.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Vergleich mit anderen Datensätzen. Obwohl die erzielten Genauigkeiten aus Sicht der Fernerkundung als hoch einzustufen sind, sollten Vergleiche mit anderen Datensätzen (andere Referenzdaten, andere Aufnahmeverfahren [z.B. terrestrische LFI-Aufnahmen], unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte) nur mit Vorbehalt angestellt werden.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Abschliessend kann festgehalten werden, dass mit dem vorgestellten Klassifikationsverfahren die Hauptbaumarten für jedes Gebiet der Schweiz effizient und halbautomatisch bestimmt werden können, sofern ausreichend Referenzdaten vorhanden sind. Aktuelle Informationen zu Mischungsgrad, Baumartenverteilung und Kronenhöhe sind nicht nur bei der Aktualisierung von Bestandeskarten, sondern auch für die Ableitung weiterer forstlicher Kenngrössen von Bedeutung. Eine Studie mit der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) in Freising hat gezeigt, dass die Baumartenverteilung neben der Höheninformation eine wichtige erklärende Grösse bei der Berechnung des Holzvorrates ist (Straub et al, in preparation).

Flächige Daten zur Verteilung der Hauptbaumarten sind als Ergänzung zu den terrestrischen LFI-Datensätzen zu verstehen und schaffen dadurch einen Mehrwert. Sie eignen sich insbesondere als Informationsquelle (Hauptbaumart, Mischungsgrad) pro Flächeneinheit (Hektare, Bestandesklasse etc.), zur flächigen Darstellung oder zur Übersicht. Zudem sind sie vielseitig einsetzbar und auch für primär nicht forstliche Fragestellungen in anderen Projekten wertvoll (z.B. für den Biotopschutz oder im Landschaftsmanagement). Hauptinteressenten und potenzielle Abnehmer sind Ämter auf nationaler, kantonaler und kommunaler Ebene.

Nach der erfolgreichen Klassifikation der Hauptbaumarten in den verschiedenen Testgebieten wird nun die landesweite Anwendung realisiert – bis genügend Referenzdaten vorhanden sind vorerst nur mit einer Laubgehölz-Nadelgehölz-Unterteilung. Der hohe Automatisierungsgrad der Datenprozessierung erlaubt bis zum Jahr 2015 die effiziente Erstellung von flächigen Produkten zum Mischungsgrad, welche dann über den wissenschaftlichen Dienst des LFI bezogen werden können. Mit der Verwendung der Baumarteninformation aus den terrestrischen LFI-Daten (unter Vorbehalt der genauen geometrischen Zuordnung zu den Baumkronen) und punktuellen Feldaufnahmen kann zu einem späteren Zeitpunkt auch die Erstellung von flächigen Produkten zu den Hauptbaumarten sowie zum Holzvolumen in Erwägung gezogen werden. Falls sich die Rahmenbedingungen bezüglich Luftbildbefliegung der Schweiz nicht grundsätzlich ändern, werden diese Produkte landesweit alle sechs Jahre aktualisiert. ■

Eingereicht: 13. Dezember 2012, akzeptiert (mit Review): 30. Januar 2013

## Literatur

- BFS (2003) Arealstatistik Schweiz: Laubwald – Mischwald – Nadelwald. Walddifferenzierung mit digitalen Satellitendaten. Neuenburg: Bundesamt Statistik. 116 p.
- COHEN J (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. Educ Psychol Measurement 20: 37–46.

- GINZLER C ET AL (2005)** Luftbildinterpretation LFI3. Interpretationsanleitung zum dritten Landesforstinventar. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 85 p.
- GINZLER C (2012)** Vom Punkt in die Fläche. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL, LFI Info 14. pp. 1–4.
- HEINZEL JN, KOCH B (2011)** Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification. *Int J Appl Earth Obs* 13: 152–160.
- HOLMGREN J, PERSSON Å, SÖDERMAN U (2008)** Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multispectral images. *Int J Remote Sens* 29: 1537–1552.
- JENSEN JR (2005)** Introductory digital image processing: A remote sensing perspective. New York: Prentice Hall. 526 p.
- KORPELA I, HEIKKINEN V, HONKAVAARA E, ROHRBACH F, TOKOLA T (2011)** Variation and directional anisotropy of reflectance at the crown scale. Implications for tree species classification in digital aerial images. *Remote Sens Environ* 115: 2062–2074.
- LEICA GEOSYSTEMS (2011)** ADS80 sensor. Heerbrugg: Leica Geosystems. 8 p. [www.leica-geosystems.de/downloads123/zz/airborne/ads80/brochures/ADS80\\_Brochure\\_en.pdf](http://www.leica-geosystems.de/downloads123/zz/airborne/ads80/brochures/ADS80_Brochure_en.pdf) (29.1.2013).
- WASER LT ET AL (2008)** Assessing changes of forest area and shrub encroachment in a mire ecosystem using digital surface models and CIR-aerial images. *Remote Sens Environ* 112: 1956–1968.
- WASER LT, KLONUS S, EHLERS M, KÜCHLER M, JUNG A (2010)** Potential of digital sensors for land cover and tree species classifications. A case study in the framework of the DGPF-Projekt. *Photogramm Fernerkund Geoinf* 2: 141–156.
- WASER LT, GINZLER C, KUECHLER M, BALTSAVIAS E, HURNI L (2011)** Semi-automatic classification of tree species in different forest ecosystems by spectral and geometric variables derived from Airborne Digital Sensor (ADS40) and RC30 data. *Remote Sens Environ* 17: 76–85.
- WASER LT (2012)** Airborne remote sensing data for semi-automated extraction of tree area and classification of tree species. Zürich: ETH Zürich, PhD-thesis. 153 p.

## Stand und Perspektiven einer landesweiten Baumartenklassifikation mit digitalen Luftbildern

Das Interesse an flächenhaften und hochaufgelösten Daten zum Schweizer Wald allgemein, aber auch an spezifischen Parametern wie der Baumartenverteilung wurde in den letzten Jahren stets grösser. Landesweite Informationen zur Baumartenverteilung können gegenwärtig entweder statistisch aus dem Stichprobennetz des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) abgeleitet werden, oder sie beschränken sich auf eine relative grobe Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelgehölzen aus den nicht mehr aktuellsten Datensätzen wie dem Mischungsgrad Schweiz des Bundesamts für Statistik. Die neuesten Daten und Methoden der Fernerkundung erlauben es, aktuelle, konsistente und reproduzierbare Waldparameter abzuleiten. Der flugzeuggestützte, digitale Zeilensensor ADS80 eröffnet hierzu neue Perspektiven, da die erforderlichen Daten nun im 6-Jahres-Rhythmus schweizweit zur Verfügung stehen. Im Beitrag wird eine robuste Methodik zur Klassifikation von Baumarten vorgestellt, welche in verschiedenen Gebieten erfolgreich getestet wurde. Die erzielten Genauigkeiten liegen für Buche, Esche, Fichte, Föhre, Lärche, Weide und Weissanne durchschnittlich zwischen 71 und 85%, für andere Laubbaumarten sind sie jedoch niedriger. Hierbei handelt es sich meistens um in den entsprechenden Testgebieten weniger häufig vorkommende Arten wie Ahorn und Birke. Die Ursachen sind zu wenige Referenzdaten sowie Beschattung durch andere Baumkronen. Mit der erfolgreichen Klassifikation der Baumarten in den verschiedenen Testgebieten steht nun der landesweiten Anwendung nichts mehr im Wege. Der digitale Zeilensensor ADS80 der Swisstopo und der hohe Automatisierungsgrad bei der Datenprozessierung erlauben bis zum Jahr 2015 die effiziente Erstellung von flächigen Produkten zum Mischungsgrad, zu einem späteren Zeitpunkt zur Verteilung der Hauptbaumarten.

## Etat et perspectives d'une classification des essences au niveau national à l'aide de photographies aériennes numériques

L'intérêt pour les données à vaste échelle et à haute résolution sur la forêt suisse en général, mais aussi pour les paramètres spécifiques comme la répartition des essences, n'a cessé de croître ces dernières années. Les informations sur la répartition des essences à échelle nationale peuvent être dérivées statistiquement du réseau d'échantillonnage de l'Inventaire forestier national (IFN), ou on se limite à une distinction relativement vague entre bois de feuillus et bois de résineux à partir de jeux de données plutôt anciennes, tel le degré du mélange au niveau national fourni par l'Office fédéral de la statistique. L'utilisation des données et méthodes récentes issues de la télédétection permet la déduction de paramètres forestiers actuels, cohérents et reproduisibles. Dans ce contexte, le capteur linéaire numérique aéroporté ADS80 ouvre des perspectives nouvelles car les données nécessaires sont désormais disponibles tous les six ans dans toute la Suisse. Cette contribution présente une méthodologie solide pour classifier les essences, celle-ci ayant été appliquée avec succès dans différentes zones tests. Les taux de précision obtenus s'élèvent en moyenne à 71–85 % pour le hêtre, le frêne, l'épicéa, le pin, le mélèze, le saule et le sapin blanc. Ils sont toutefois nettement inférieurs pour les autres essences de feuillus, généralement plus rares dans les zones tests, à l'image de l'érable et du bouleau. Cette précision moindre s'explique par le manque, ou le plus souvent la présence trop limitée, de jeux de données d'apprentissage, ainsi que par l'ombrage causé par le houppier d'autres arbres. Grâce à la classification réussie des essences dans les différentes zones tests, plus rien ne s'oppose désormais à une application dans toute la Suisse. Le capteur linéaire numérique ADS80 de Swisstopo et le degré élevé d'automatisation lors du traitement des données permettront, d'ici 2015, la réalisation efficace de produits à vaste échelle sur le degré du mélange et, ultérieurement, sur la répartition des essences principales.