

## Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten von amtlichen Laserscannerdaten für den Wald-Forst-Bereich

### Entwicklung von Methoden für forstliche Inventur- und Monitoringaufgaben im Rahmen der FFH Kartierung

*Investigations on the Use of Low Density Laser Scanner Data for Mapping of Forest Areas*

*Development of Methods for Forest Inventory and Monitoring Tasks in Respect to FFH Mapping*

Barbara Koch, Helge Walentowski, Matthias Dees, Rudolf Seitz

#### Abstract

*The present article outlines the possible use of public Airborne Laserscanning (ALS) data, furnished by the Bavarian Land Survey Administration for the assessment, evaluation and monitoring of FFH areas (Special Areas of Conservation SAC). First of all, the different information levels of importance for a characterization of FFH areas are defined. On the basis of this definition, for each described information level the availability of information out of ALS data is tested. In this context, different methods of information assessment are investigated. FFH areas in the pre-alpine area of Bavaria, offering a maximum of ecological heterogeneity, have been used as test sites. The investigation included topographical structures like inclination of forest stands and the semi-automatic mapping of canyons and ditches. In the process of the assessment of forest structures, special emphasis was laid on the mapping of old-growth trees and gaps as well as on the detection of forest stand types, the percentage of deadwood and habitat trees. Whereas the detection of deadwood and habitat trees proved to be impossible using public ALS data of low point density, the assessment of stand types offered poor results. The use of ALS data for the assessment of topographic and forest structures however proved to be very successful.*

**Keywords:** *Special Areas of Conservation (SAC), Habitat Directive, laser scanner data, remote sensing, mapping, evaluation, monitoring*

#### Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden Möglichkeiten zur Nutzung von amtlichen Laserscannerdaten zur Erfassung, Beobachtung und Bewertung von FFH-Gebieten beschrieben. Dabei werden zunächst verschiedenen Informationsebenen definiert, die für die Charakterisierung von FFH-Gebieten von Bedeutung sind. Basierend auf dieser Definition wird für jede beschriebene Informationsebenen geprüft, inwieweit die Information aus Laserscannerdaten abgegriffen werden kann. Hierbei werden verschiedene Methoden der Informationsableitung getestet. Untersuchungsgebiete waren FFH-Gebiete im voralpinen Raum, die eine möglichst vielseitige Ausstattung ausweisen. Untersucht wurde sowohl die Erfassung

von Geländestrukturen, wie die Kartierung der Hangneigung unter Wald und die automatische Erfassung von Schluchten als auch Gräben. Bei der Erfassung der Waldstrukturen war vor allem die Ausweisung homogener und inhomogen strukturierter Bereiche, die Kartierung von Überhängern und Lücken, aber auch die Erfassung von Bestandestypen, Totholzanteil und Biotopbäumen von Bedeutung. Während Aussagen zum Totholzanteil und zu Biotopbäumen mit den gering aufgelösten amtlichen Daten nicht möglich waren und die Erfassung von Bestandestypen nur grob erfolgen konnte, hat die Nutzung von Laserscannerdaten zur Erfassung von Geländestrukturen und Waldstrukturen sehr gute Ergebnisse erbracht.

**Schlüsselworte:** FFH-Gebiete, Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie, Laserscannerdaten, Fernerkundung, Erfassung, Bewertung, Monitoring

## 1 Einführung

Der Einsatz von flugzeuggetragenen Laserscannerdaten (ALS) für Inventuren im Wald erfährt zunehmendes Interesse, da auf der Basis von ALS Daten Strukturen erfasst werden können, die für die Ableitung forstlicher Kennwerte von großer Bedeutung sind. Die Einsatzbereiche für Informationen aus ALS Daten reichen dabei von der Verwendung abgeleiteter hochaufgelöster Geländemodelle z. B. für Modellierung im Naturgefahrensektor (Rutschungen) bis hin zur Ableitung von Strukturparametern von Waldhabitaten wie Baumhöhen, Übershirmungsgrad und vertikale Schichtung. Bei Natura2000 spielen Habitatstrukturen eine Schlüsselrolle bei der Erfassung und bei der Bewertung des Erhaltszustandes der in den Anhängen der Fauna-Flora-Richtlinie (FFH-RL) und der Vogelschutz-Richtlinie (VS-RL) gelisteten Schutzobjekte (EUROPEAN COMMISSION 2005). Auch für das Natura2000-Monitoring, d. h. die Überwachung des günstigen Erhaltungszustandes gem. Art. 17 FFH-RL bietet sich die Nutzung von ALS Daten zur Informationserfassung an. Dabei können in die Auswertungen außer den ALS-Daten auch weitere Fernerkundungsinformationen (z. B. CIR-Luftbilder) sowie Informationen aus terrestrischen Aufnahmen (z. B. Forsteinrichtung und -inventur) eingebunden werden. Die Fernerkundungsinformationen bzw. ALS Daten können dabei aus eigens auf Untersuchungsziel und -gebiet abgestimmte Befliegungen gewonnen werden, mit dem Vorteil, den Zeit-

punkt und die technischen Rahmenbedingungen der Befliegung optimal setzen zu können (Wetterlage, Blattaustrieb etc.). Aus Kostengründen ist solch ein optimales Vorgehen oft nicht möglich. Als kostengünstige Alternative bietet sich die Verwendung amtlicher Daten an, die in vielen Bundesländern flächendeckend erhoben werden oder worden sind. Die kurzfristig verfügbaren Daten können von Verwaltungen vielfach im Rahmen von Ressortvereinbarungen im Paket mit anderen amtlichen Daten in standardisierter Form genutzt werden.

Die Forstverwaltungen haben die Aufgabe, eine vorbildliche und verantwortungsvolle Bewirtschaftung des Waldes und die Erfüllung von Gemeinwohlleistungen sicher zu stellen. Zu diesem Zweck müssen außer den erforderlichen Rechtsvorschriften auch Instrumente vorhanden sein, um die Bewirtschaftungs- und Aufsichtspflichten erfüllen zu können. Solche Instrumente bedingen die Verfügbarkeit von Daten über den Wald (z. B. aus Inventuren oder Monitoring) und die fachlichen Kompetenzen der Mitarbeiter, um diese richtig und bedarfsbezogen einzusetzen und auszuwerten.

Eine besondere Aufgabe in diesem Rahmen ist die Verantwortlichkeit der Forstverwaltung für Erfassung, Bewertung, Gebietsmanagement und Monitoring v. a. der Wald-Lebensraumtypen nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL), waldbewohnender Tier- und Pflanzenarten gemäß Anhang II der FFH-RL und gemäß Artikel 4 (1), (2) der Vogelschutz-Richtlinie (VS-RL). Diese Verantwortlichkeit wurde in Bayern in einer „Gemeinsamen Bekanntmachung vom 04.08.2000 zum Schutz des Europäischen Netzes NATURA2000-Fläche ist Wald. Mit der Notwendigkeit diese Aufgaben nachvollziehbar, transparent und ressourcenschonend zu erfüllen (BURKHARDT et al. 2004), kann der Einsatz neuer Technologien in der Datenerhebung (hier vor allem Fernerkundung) sowie in der Dateninterpretation (hier vor allem Einsatz von GIS und Modellierungen) einen wichtigen Beitrag leisten. Für Bayern hat in diesem Zusammenhang der Alpenraum eine besondere Bedeutung (BINNER et al. 2005, FÖRSTER et al. 2005, EWALD & BINNER 2007), da hier der Einsatz von Fernerkundungsmethoden für die Kartierung, die Bewertung und das Monitoring wegen der großen FFH-Gebiete und der generell sehr aufwändigen, auf Teilflächen nicht realisierbaren terrestrischen Erhebungen besonders große Vorteile hätte.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes in Zusammenarbeit zwischen der Bay-

erischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) und der Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme an der Universität Freiburg generelle und grundlegende Auswertungsmöglichkeiten der amtlichen ALS-Daten für Erfassung von Wald-Lebensraumtypen in FFH-Gebieten untersucht, um darauf aufbauend Erkenntnisse für die Möglichkeiten eines Einsatzes bei Natura2000-Monitoringaufgaben zu erhalten (DEES et al. 2007).

## 1.1 Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden im Raum Ober- und Ostallgäu durchgeführt, da hierfür zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits Laserdaten im Bereich des Alpenvorlandes vorlagen. Darüber hinaus liegen im Ober- und Ostallgäu sehr vielseitig ausgestattete FFH-Gebiete, so dass hinsichtlich wichtiger Kartieraspekte eine Übertragbarkeit auf andere Natura2000-Gebiete in Bayern gegeben ist:

- Das Untersuchungsgebiet umfasst die FFH-Gebiete
- 8227-373 Kürnacher Wald (Fläche 2.760 ha; Meereshöhe von 759 bis 1.128 m ü. NN; vorherrschender LRT: 9130 – Waldmeister-Buchenwald),
- 8329-301 Wertachdurchbruch (Fläche 876 ha; Meereshöhe von 746 – 911 m ü. NN; vorherrschender LRT: 9130 – Waldmeister-Buchenwald) und
- 8329-303 Sulzschneider Moore (Fläche 1.795 ha; Meereshöhe von 730 – 886 m ü. NN; vorherrschender LRT: \*91D0 – Moorwald).

Alle 7 in den Gebieten vorkommenden Wald-Lebensraumtypen sind in Tabelle 1 dargestellt.

## 1.2 Datenquellen

Die Untersuchung nutzt als primäre Informationsquelle die Laserscannerdaten des Landesamts für Vermessung und Geoinformation Bayern (LVG Bayern) in der Standardpunktdichte für Lagen unter 2000 m ü. NN. Die Befliegung erfolgte am 15.05.2006 mit dem Laser Optech ALTM-3100 mit einer Pulsrate von 70 kHz und einer Scanrate von 33 Hz (Hersteller des Lasers: Optech, Befliegungsfirma: BSF Luftbild GmbH). Aufgrund konstanter Befliegungshöhe und differenzierter Geländehöhen lagen die Daten differenziert nach Gebieten mit einer durchschnittlichen Punktdichten von 1,3 – 3,0 pro Quadratmeter vor. Die Daten wurden als First- und Lastpuls-

**Tab. 1:** Die Ausstattung der FFH-Gebiete 8227-373 Kürnacher Wald, 8329-301 Wertachdurchbruch und 8329-303 Sulzschneider Moore gem. Standard-Datenbogen. Der Flächenanteil des Lebensraumtyps im Gebiet ist in Prozent angegeben. Es bedeuten: 9110 – Hainsimsen-Buchenwald, 9130 – Waldmeister-Buchenwald, 9180 – Hangmischwälder, 91 D0 – Moorwälder, 91E0 – Erlen- und Erlen-Eschenwälder an Fließgewässern, 9410 – Bodensaurer Fichtenwald. Die mit \* gekennzeichneten Lebensraumtypen sind im Anhang I der FFH-RL als „prioritär“ eingestuft.

**Tab. 1:** Percentage of present Annex I habitats 9110 *Luzulo-Fagetum* beech forests, 9130 *Asperulo-Fagetum* beech forests, 9150 *Medio-European limestone beech forests of the Cephalanthero-Fagion*, 9180 \* *Tilio-Acerion* forests of slopes, screes and ravines, 91D0 \* *Bog woodland*, 91E0 \* *Alluvial forests with Alnus glutinosa and Fraxinus excelsior (Alno-Padion, Alnion incanae, Salicion albae)*, 9410 *Acidophilous Picea forests of the montane to alpine levels (Vaccinio-Piceetea)* within the SACs 8227-373, 8329-301, 8329-303.

	9110	9130	9150	*9180	*91D0	*91E0	9410
8227-373		34 %		4 %		< 1 %	
8329-301	< 1 %	29 %	1 %	2 %		10 %	
8329-303	3 %	4 %			14 %	6 %	2 %

rohdaten zur Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Als Referenzdaten standen zur Verfügung:

- Informationen aus der Forsteinrichtung und Standortserkundung
- Sonderkartierungen (Amtl. Biotopkartierung, Auenkartierung, Moorkartierung).
- Eine im Rahmen der terrestrischen FFH-Kartierung erstellte abgeschlossene Lebensraumtypen-Kartierung für das FFH Gebiet Kürnacher Wald
- Digitale Echtfarben-Orthofotos der Bayernbefliegung (Aufnahmen vom 17.04.2003)

## 2 Operative Zielsetzung

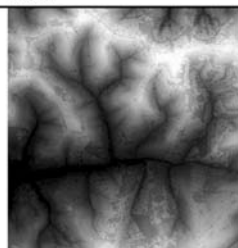
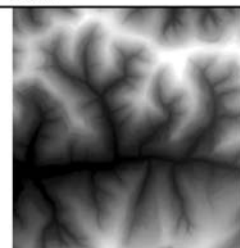
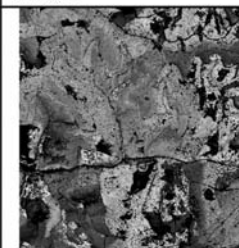
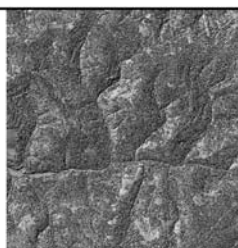
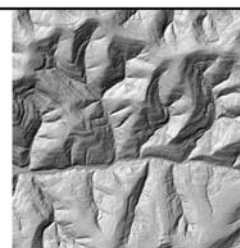
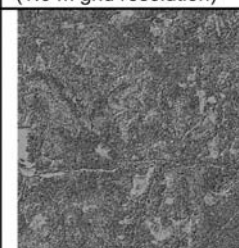
Im Hinblick auf eine großräumige Wald- und Landschaftsstrukturanalyse stand, um finanzierbare Lösungen anbieten zu können, die Entwicklung von automatisierten Auswerteverfahren im Vordergrund. Für einige Informationsebenen, bei denen derzeit mit automatisierten Methoden zwar eine weitgehende, aber nicht vollständige Erfassung von Objekten und Informationen zu Objekten möglich ist, werden Verfahren aufgezeigt, die die automatisierte Auswertung mit einer anschließenden visuellen Nachbearbeitung verbinden.

In Zusammenarbeit mit der LWF wurden folgende Informationsebenen als wichtig definiert und hierfür die Entwicklung von voll- bzw. teilautomatisierten Verfahren auf Grundlage von Laserdaten durchgeführt:

- Wald-Nichtwaldabgrenzung

- Erfassung der Waldrandlänge
- Erfassung von Überhängern
- Durchführung einer Bestandesstratifizierung und Typisierung der ausgewiesenen Strata nach Höhe, Struktur und Baumartenzusammensetzung
- Laub-Nadelwaldanteil
- Erfassung von Blößen, Kultur- und Jungwuchsflächen
- Erfassung von Lücken im Bestand
- Erfassung der vertikalen Struktur von Waldbeständen
- Erfassung von Steilhängen im Wald
- Erfassung von Schluchten im Wald
- Erfassung von Gräben im Moor und unter Wald
- Erstellung von DOM, DGM und nDOM

Als Basis für die später durchgeführten Arbeiten wurden in einem ersten Verarbeitungsschritt ein digitales Oberflächenmodell (DOM), digitales Geländemodell (DGM) und ein normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDOM), manchmal auch als Vegetationshöhenmodell bezeichnet, aus den gelieferten Rohdatenpunkten berechnet. Für die Berechnungen wurde der „Active Surface Algorithm“ verwendet, welcher in der an der Abteilung FeLis entwickelten Software TreesVis1 implementiert ist (WEINACKER et al. 2004). Die Modelle wurden

DOM	DGM	nDOM
		
Oberflächenmodell (1.0 m Rasterweite)	Geländemodell (1.0 m Rasterweite)	Normalisiertes Oberflächenmodell (Vegetationshöhenmodell) (1.0 m Rasterweite)
Digital Surface Model (DSM) (1.0 m grid resolution)	Digital Terrain Model (DTM) (1.0 m grid resolution)	Normalised DSM; nDSM (Vegetation Model) (1.0 m grid resolution)
		
Reliefbild des Oberflächenmodells Relief image of the DSM	Reliefbild des Geländemodell Relief image of the DTM	Reliefbild des Oberflächenmodells Relief image of the nDSM

**Abb. 1:** Digitales Oberflächenmodell (DOM), Digitales Geländemodell (DGM), Normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDOM) des Testgebiets Kürnacher Wald.

**Fig. 1:** Digital surface model (DOM), digital terrain model (DTM), normalised surface model (nDSM) and corresponding relief models.

1 TreesVis ist eine Software zur Prozessierung und 3D Visualisierung von Laserscannerdaten (entwickelt von FeLis, Universität Freiburg)

mit Rasterweite 0,5 m und 1 m berechnet. Für die Abgrenzung von Wald zu Nicht-Wald und für die Bestandesstratifizierung wurde die Rasterweite 1 m ausgewählt, da sich hier die höhere Mittelung in der Abgrenzung der Wald-Nichtwaldflächen und der Strata innerhalb des Waldes als vorteilhaft erwies.

Beispielhaft sind für den Kürnacher Wald das digitale Oberflächenmodell (DOM), das digitale Geländemodell (DGM) und das normalisierte digitale Oberflächenmodell (nDOM), das als Vegetationshöhenmodell dient in Abbildung 1 dargestellt. Der Kürnacher Wald liegt am Südrand der Vorlandmolasse (Ungefaltete Molasse). Bei den am Oberhang in situ aufgeschlossenen Schichten handelt es sich um mehr oder weniger mächtige Konglomeratbänke, die von tonig-mergeligen Zwischenschichten unterbrochen werden. Letztere zeigen die für weiche Gesteine üblichen morphologischen Äußerungen wie Quellhorizontbildung und Rutschungsfreudigkeit. Die tonig-mergeligen Schichten sind weniger verwitterungsresistent. Die tonigen Anteile verhindern ein Einsickern der Niederschläge, so dass das oberflächennah abfließende Wasser zahlreiche Tobel in die Hänge geschnitten hat.

### 3 Laserbasierte Wald-Nichtwald Abgrenzung

Bevor naturschutzrelevante Parameter innerhalb des Waldes errechnet werden können, muss die Waldfläche bzw. baumbestandene Fläche abgegrenzt werden. Für diese automatisierte Abgrenzung von Wald zu Nichtwaldflächen ist zunächst eine für die technische Umsetzung in einem automatisierten Verfahren geeignete Definition notwendig. Diese Definition weicht in Details von der gesetzlichen Definition einer Waldfläche ab, da nur messbare, physikalische Kriterien für ein automatisiertes Verfahren auf der Basis von ALS Daten verwendbar sind. Diese Definition wurde von der LWF wie folgt vorgenommen:

Flächen: Bestockt mit Bäumen und niedrigwüchsigem Gehölzaufwuchs (Spirke)

Mindestfläche 0,25 ha

Schlussgrad 0,3

Linien an Gewässern:

Bestockt mit Bäumen

Keine Mindestbreite

Keine Mindestfläche

Linien im Offenland ohne Gewässerbezug (Feldgehölze):

Bestockt mit Bäumen

Mindestbreite 50 m

Offenland innerhalb von Waldflächen

Mindestfläche 0,1 ha

Die laserbasierte Wald-Nichtwald Abgrenzung erfolgte basierend auf dem normalisierten digitalen Oberflächenmodell (dem Vegetationshöhenmodell) mit 1 m-Auflösung. Die verwendeten Kriterien sind die Höhe, Rauheit, Mindestflächen und Flächenform. Die Schwellwerte für Rauheit werden empirisch an Referenzflächen ermittelt, der Schwellwert für die Höhe wurde auf 3 m gesetzt. Da Waldflächen per Definition

einerseits auch baumfreie Bereiche innerhalb des Waldes sein können und andererseits baumbestandene Flächen, wie Parks oder Obstbaumflächen, außerhalb des Waldes auf der Basis der Kriterien als Wald definiert werden können, erhöht die Übernahme der Waldgrenzen aus vorliegenden Datensätzen, wie die ATKIS Waldflächengrenzen, die Sicherheit der automatisierten Ausweisung von baumbestandenem Waldflächen.

Anschließend kann eine visuelle Überprüfung des Ergebnisses erfolgen, um eventuell nicht erfasste Kulturflächen noch in die baumbestandenem Waldflächen mit einzubeziehen.

Das Ergebnis der Auswertung kann dann als GIS-Layer ausgelesen werden. Ob die Waldflächen als „normale“ Waldflächen oder als Wald entlang von Fließgewässern kartiert wurden, wird in einem Attributfeld festgehalten.

Eine Verifizierung auf Grundlage einer Überprüfung an Rasterpunkten im Luftbild zeigen eine sehr große Übereinstimmung zwischen der automatisiert ausgewiesenen Waldfläche und der tatsächlichen baumbestandenem Waldfläche (Tab. 2).

Da mit einem Höhenschwellwert von 3 m zwar die meisten baumbestandenem Flächen erfasst werden, aber Probleme bei niedrigen Bäumen, wie im Jugendstadium forstlicher Kulturflächen, auf initialen Gehölzsukzessionsflächen oder in Waldmooren mit dauerhaft niedrigem Gehölzaufwuchs aus Moor-Bergkiefer entstehen, kann die automatisierte Waldfläche auch mit niedrigeren Höhen berechnet werden. Dies ist vor allem dann ein sehr erfolgreicher Ansatz, wenn Waldaußengrenzen aus anderen Datensätzen schon verfügbar sind (z. B. ATKIS). Das in Abbildung 2 wiedergegebene FFH-Gebiet „Sulzschneider Moore“ ist ein zwischen Lech- und Wertachtal gelegener Moorkomplex mit einer Vielzahl an Moor-Lebensraumtypen und -subtypen. Im zentralen Bereich finden sich stellenweise offene Hochmoorvegetation mit Bult-Schlenkenstrukturen (LRT \*7110) und mit niedrigwüchsigem Spirken-Moorwald (LRT \*91D3), in den Randzonen finden sich u. a. hochwaldartiger Fichten-Moorwald (LRT \*91D4), bodensaurer Fichten-Tannenwald (LRT 9410) und großflächige Streuwiesenbereiche. Es handelt sich um ein nahezu unerschlossenes, moortypologisch reichhaltiges Moorgebiet Schwabens, das eine bayernweit bedeutsame Enklave für Eiszeitrelikte darstellt. In Abbildung 2 ist der Berechnungsansatz mit unterschiedlichen Höhenschwellwerten dargestellt. Die Verwendung des Schwellwertes „2m Höhe“ bildet, dies zeigt ein synoptischer visueller Vergleich, die Waldflächen in Moorgebieten am besten ab.

### 4 Stratifizierung von homogenen Waldstrukturbereichen

Nach Ausscheidung der baumbestandenem Waldflächen werden innerhalb dieser Flächen auf der Basis von ALS Daten Teilflächen des Waldes, die sich hinsichtlich bestimmter Eigenschaften von umgebenden Waldflächen erkennbar unterscheiden, ausgeschieden. Dabei werden folgende Eigenschaften berücksichtigt:

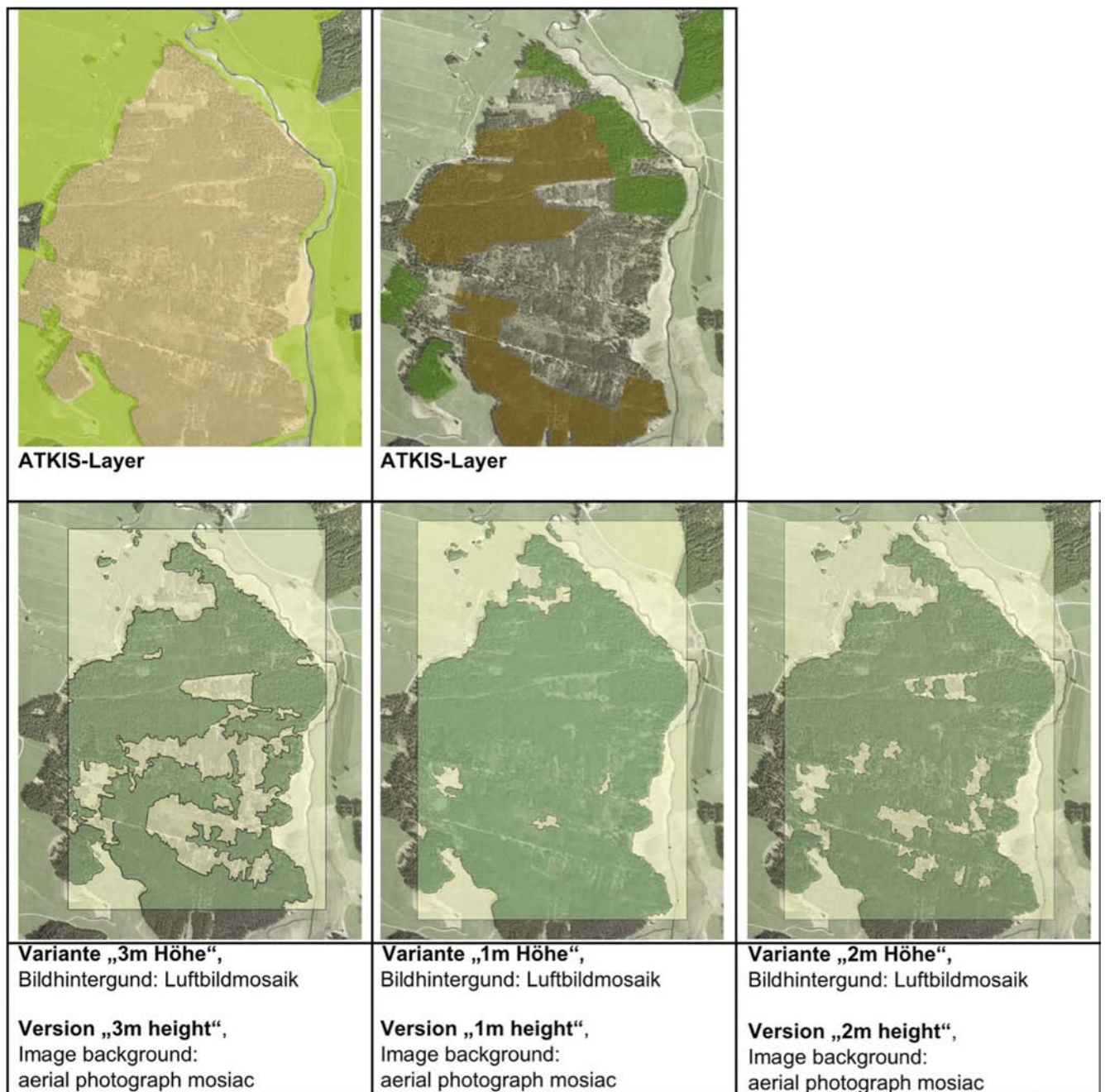
**Tab. 2:** Verifizierung der automatisch abgegrenzten Waldflächen mit 5 m Lagegenauigkeit.

**Tab. 2:** Verification of the automatically delineated forest areas with an accuracy of 5 m.

	W (Lubi/Gelände)	NW (Lubi/Gelände)	
W (Laserkartiert)	234	2	236
NW (Laserkartiert)	0	270	
	234		

(W = Wald, NW = Nicht Wald, Lubi = Luftbild; Spalten: Waldeigenschaft im Luftbild/Geländer; Zeilen: Waldeigenschaft bei der Laserkartierung). Die Werte geben jeweils die Anzahl der Rasterpunkte der Verifizierungsstichprobe wieder, bei denen Übereinstimmung bzw. Nicht-Übereinstimmung vorliegt.

(W = Forest, NW = Non-forest, Lubi = aerial photograph; columns: forest assessed in aerial photographs/field; Rows: forest assessed by laser mapping). The values show the number of raster points of the verification sample that either coincide or differ.



**Abb. 2:** Beispiele zur Waldabgrenzung am Beispiel des FFH-Gebietes 8329-303 Sulzscheider Moore. (Nord)Automatisierte Stratifizierung der Waldflächen.

**Fig. 2:** Examples of forest delimitation, based on automated mapping with differing minimum height definitions, demonstrated for the SAC area 8329-303 Sulzscheider Moore.

- Topographie
  - (Gewässerlinien und Hangrücken dienen als Trennlinien)
- Baumartenmischung nach Laub-, bzw. Nadelbaumanteil
  - Klassen: Laub-, Nadel-, Mischbestand
- Vertikale und horizontale Struktur (Gleichförmig oder vielgestaltig)
  - Klassen Homogen, vertikale Strukturvielfalt, horizontale Strukturvielfalt
- Oberhöhe bei gleichförmiger vertikaler und horizontaler Struktur
  - Klassengrenzen 3 m, 10 m, 15 m, 25 m (somit 4 Klassen)
- Mindestflächengröße: 0,2 ha

Das Verfahren basiert zunächst auf einer groben Einteilung des Waldes, z. B. auf Grundlage von topographischen Linien oder einer vorgegebenen Waldeinteilung. Das gesamte Bild wird anschließend in ein gleichmäßiges Raster unterteilt. Die Rastergröße kann beliebig gesetzt werden. In verschiedenen Tests hat sich ein Gitterraster von 20x20 m als geeignet erwiesen, da mit kleineren Rasterflächen die Bestandescharakteristika in vielen Fällen nicht mehr typisch ausgeprägt sind, während größere Rasterflächen eine Grenzziehung entlang natürlicher Grenzen sehr einschränken.

Innerhalb der groben Waldeinteilung wird, basierend auf dem Gitterraster, eine Charakterisierung für jede Rasterfläche nach Waldtyp, vertikaler Struktur (Variationskoeffizient der gemessenen Höhen innerhalb des Rasters) und Vegetationsoberhöhe (höchste gemessene Baumhöhe innerhalb des Rasters) vorgenommen. Diese Eigenschaften bilden die Grundlage für die Stratifizierung auf der Basis von ALS Daten. Eine genaue Beschreibung des Verfahrens kann in Koch et al. (2008) nachgelesen werden. Die Rasterflächen mit identischen Eigenschaften werden nach der Klassifizierung der Raster zu Teilflächen gruppiert. Bereiche mit Rastern, die eine intensive kleinräumige Mischung verschiedener Waldtypen aufweisen, werden als Teilflächen mit vielgestaltiger horizontaler Struktur zusammengefasst. Teilflächen die unter

0,2 ha liegen, werden den benachbarten Teilflächen oder umschließenden Teilflächen zugeordnet. Grenzen zwei oder mehr Teilflächen verschiedenen Typs an Kleinstflächen unter 0,2 ha an, erfolgt die Zuordnung über das Kriterium Höhe.

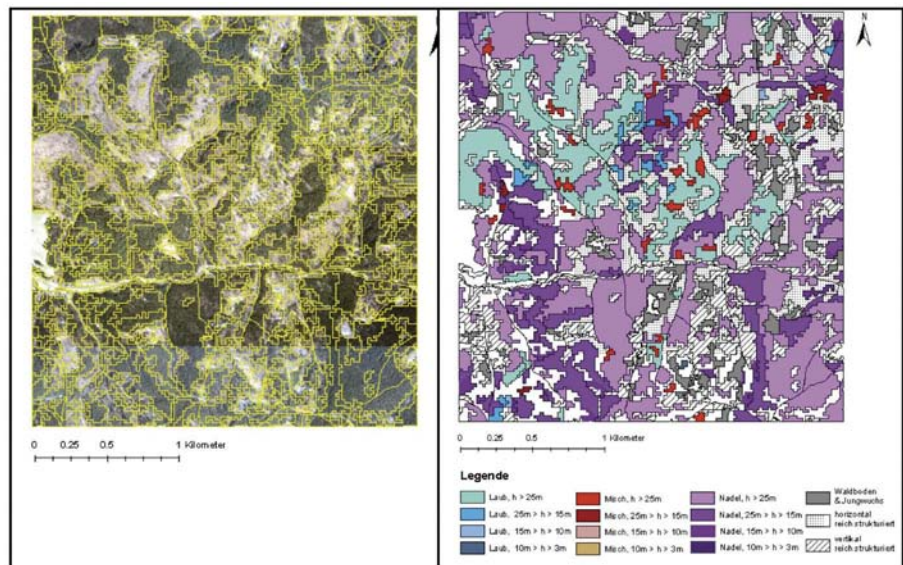
Prinzipiell ist es möglich, dieses Verfahren einzig auf Grundlage der Laserdaten durchzuführen. Voraussetzung dafür ist die Aufzeichnung der Laserdaten in der vegetationsfreien Zeit. Wesentlich ist dabei, dass die Laubbäume sich im laubfreien Zustand befinden, da für die Trennung von Nadel- und Laubwald die Differenz zwischen First- und Lastpulsdaten genutzt wird. Für Bäume im laubfreien Zustand unterscheidet sich der Differenzwert von dem für laubtragende Bäume. Deshalb kann dieser Ansatz, mit Ausnahme der Lärche, in Mitteleuropa für die Trennung von Laub- und Nadelwald herangezogen werden. Liegen keine Winterbefliegungen mit ALS vor, dann kann die Trennung der Waldtypen nur auf der Basis von Multispektraldaten durchgeführt werden. Die weitere Stratifizierung nach Höhe und vertikaler Struktur ist aber wieder mit ALS Daten möglich.

In Abbildung 3 ist das Ergebnis einer Waldflächenstratifizierung für den Kürnacher Wald dargestellt. Ein Vergleich mit Luftbildern und den aus ALS hergeleiteten Strata zeigt, dass Flächen gleicher Waldtypen, gleicher Höhenklassen oder solche die vertikal oder horizontal stark strukturiert sind mit großer Sicherheit erfasst werden können. Da bisher nur ein visueller Abgleich im digitalen Orthophoto für das Untersuchungsgebiet Kürnach möglich war, können keine quantitativen Angaben zur Genauigkeit gemacht werden. Allerdings zeigen statistische Auswertungen, in einem anderen im Schwarzwald gelegenen Untersuchungsgebiet, dass die automatisierte Einteilung mit den Werten, die im Gelände auf der Basis von Stichproben erhoben wurden hoch korreliert (Tab. 3).

Im Rahmen der naturschutzfachlichen Betreuung von Gebieten birgt die Stratifizierung den Vorteil, dass gezielt solche Bereiche herausgefiltert werden können, die aufgrund ihrer Strukturvielfalt von großem Interesse sind. Neben dem naturschutzfachlichen Aspekt können die Strata auch für differenzierte waldbauliche Behandlungen und im Hinblick auf eine Regionalisierung von Stichprobendaten von Vorteil sein.

**Abb. 3:** Ergebnis der automatisierten Bestandesabgrenzung und -kartierung im FFH-Gebiet 8227-373 Kürnacher Wald. Links: Darstellung des Luftbildmosaiks mit Grenzlinien der Teilflächen. Das Luftbild wurde zur Erfassung der Waldtypenmischung bei der Abgrenzung verwendet, da keine Winterdaten vorlagen. Rechts: Karte der Teilflächen.

**Fig. 3:** Result of the automated delineation and mapping of forest stand in the SAC 8227-373 Kürnacher Wald. Left: Aerial photograph with lines outlining subareas. For winter ALS data were unavailable, aerial photographs were used for the differentiation of stand types. Right: Map of the subareas.



## 5 Erhebung von naturschutzrelevanten Parametern

### 5.1 Durchschnittliche Steigung je Bestand

Die durchschnittliche Steigung je Bestand wurde im Rahmen der Untersuchung exemplarisch für das Arbeitsgebiet Kürnacher Wald errechnet. Die Auswertung wurde GIS-basiert mit Hilfe der Software ArcGIS 9.0 der Firma ESRI durchgeführt. Unter der durchschnittlichen Steigung wird hier das statistische Mittel aller Steigungswerte der Pixel eines Hangneigungsbildes verstanden. Die durchschnittliche Steigung wird dabei jeweils für eine Bestandeseinheit aus den ALS Daten berechnet. Als Bestandesgrenzen können die auf der Basis der ALS Daten berechneten Teilflächen oder auch die Bestandesgrenzen aus der Forsteinrichtung herangezogen werden. Die durchschnittliche Steigung wird in Prozent ausgedrückt.

Als Ausgangsdaten gehen die Bestandes- oder Teilflächen-grenzen als Shapefile sowie das DGM aus den ALS Daten als Rasterdatei, in diesem Fall mit einer Pixelauflösung von 1 m, ein. Die durchschnittliche Steigung wird aus einem Hangneigungsbild hergeleitet. Die Hangneigung wird aus dem DGM abgeleitet, in dem die maximale Höhendifferenz zu den umgebenden Nachbarn berechnet und als Prozent der Hangneigung ausgegeben wird.

Basierend auf dem Neigungsbild ist es dann möglich, für jede Teilfläche oder Bestand, die durchschnittliche Steigung in

**Tab. 3:** Korrelation zwischen den automatisch gebildeten Strata auf Basis der ALS Daten und den im Gelände aufgenommenen Daten, Untersuchungsgebiet im Bereich des Berges Kandel nahe Waldkirch (Koch et al 2008).

**Tab. 3:** Correlation between attributes of forest stands, measured from field samples and automatic, laser based assessed attributes on a forest site near the Kandel hill, close to the town of Waldkirch (Koch et al. 2008).

	Korrelationskoeffizient
	Correlation coefficient
Anteil der Nadelbäume auf Stichprobenebene	78,2**
Proportion coniferous at sample level	
Anteil der Laubbäume auf Stichprobenebene	81,6**
Proportion deciduous at sample level	
Oberhöhe gemessen im Stichprobenkreis	84,1**
Top height in the sample plots	

Korrelationskoeffizient Signifikanz bei 99 %  
Anzahl der Stichproben 265

Correlation coefficient significance of 99 %  
Sample size 265

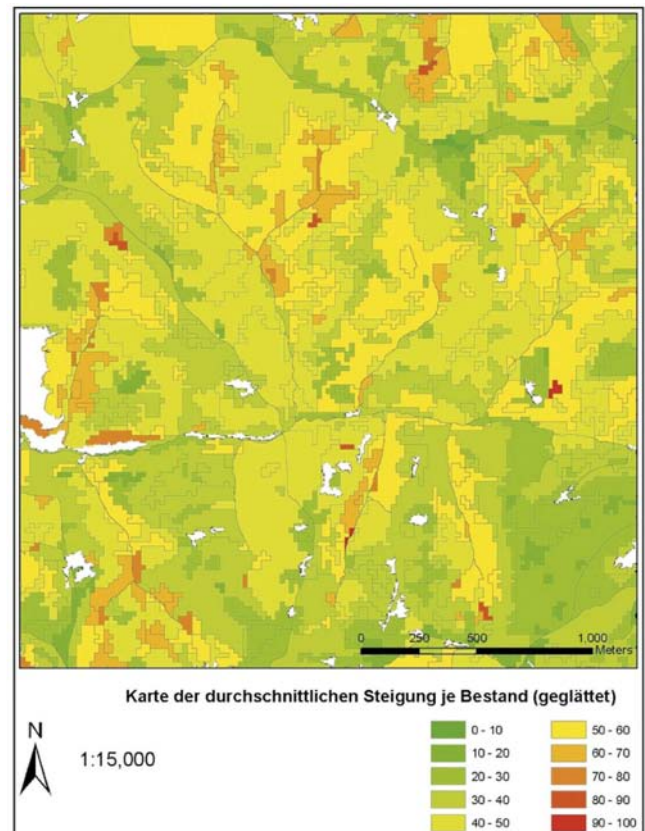
Tabellenform oder als Karte (Abb. 4) darzustellen.

### 5.2 Vertikaler Aufbau der Bestände

Die Kenntnis der vertikalen Bestandesstruktur ist von großem Interesse für die Beurteilung von Verjüngungsentwicklungen und Biodiversitätsaspekten. Die Möglichkeit mit LIDAR hochgenaue dreidimensionale Messungen durchzuführen, prädestiniert diese Technik für die Reproduktion und Modellierung solcher vertikaler Bestandesstrukturen in Waldgebieten.

Die wichtigste Aufgabe der vertikalen Strukturanalyse ist die Erkennung von Hauptbestandesschichten sowie deren Höhenabgrenzung. Dies wurde hier exemplarisch am Arbeitsgebiet Kürnacher Wald durchgeführt. Ausgangsdaten für die Analysen sind die Rohpunktewolken. Jedoch ist es aufgrund der enormen Datenmengen nicht möglich, alle Rohpunkte eines Arbeitsgebietes der vorliegenden Größe auf einmal zu verarbeiten. Aus diesem Grund wird das Gebiet zunächst wie schon bei den vorhergehenden Verfahren in ein Raster segmentiert. In der vorliegenden Auswertung hat jede der zu untersuchenden Einzelzellen im Raster eine Größe von 20 m x 20 m = 400 m<sup>2</sup>. Die Analysen werden dann für jede Zelle getrennt durchgeführt. Zum Schluss werden die Ergebnisse der Einzelzellen zusammengefügt.

Die Berechnung des vertikalen Bestandaufbaus erfolgt in mehreren Schritten. Im ersten Schritt wird die Punktwolke normalisiert, das heißt, der Geländeeinfluss herausgerechnet (Abb. 5).



**Abb. 4:** Karte der durchschnittlichen Steigung je Bestand für das FFH-Gebiet 8227-373 Kürnacher Wald. Die Klassenbildung der Karte erfolgte nach 10er Stufen der Steigung (in %).

**Fig. 4:** Map of the average slope per stand in the SAC 8227-373 Kürnacher Wald. The different colours represent 10 classes of slope (in %).

Im zweiten Schritt werden dann Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Höhenverteilung errechnet und auf dieser Basis die Grenzen für die Bestandesschichten hergeleitet (WANG et al. 2007). Dies ist möglich, da über die Verteilung der reflektierten Punkte im Raum (Abb. 5) die Schichtung widerspiegelt wird. Über die zweite Ableitung können dann die Bereiche in der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Höhenverteilung identifiziert werden, in denen gehäuft Reflexionen auftreten und somit Bestandesschichten kennzeichnen.

Die Anzahl der Bestandesschichten in jeder Untersuchungseinheit sowie der Höhenbereich jeder Bestandesschicht stellen die von der vertikalen Strukturanalyse abgeleiteten Hauptattribute dar. Der Bereich einer Bestandesschicht beginnt bei der Höhe der stärksten Zunahme der Punktzahl und endet mit der Höhe der stärksten Abnahme der Punktzahl (Abb. 6 (b)).

Wie aus Abb. 6 (a) ersichtlich, kann die räumliche Verteilung der vertikal dargestellten Bestandesschichten verschieden sein, ohne dass dies über die Höhenverteilung der normalisierten Punkte innerhalb des Rasters erkennbar ist (Abb. 6 (b)). In dem linken Bild überlappen sich die Bestandesschichten, so dass hier tatsächlich ein zweischichtiger Aufbau vorliegt, während im rechten Bild die unterschiedlichen Höhenbereiche horizontal versetzt sind. Es handelt es sich dabei um einen Bestandesausschnitt mit nebeneinander stehenden, unterschiedlich hohen Bäumen. Um die räumliche Beziehung zwischen den im ALS Bild identifizierten vertikalen Schichten zu überprüfen werden deshalb vertikale Schichten auf eine Ebene projiziert. Mit Hilfe dieser Projektion kann dann festgestellt werden, ob die vertikalen Schichten überlappen oder nebeneinander liegen.

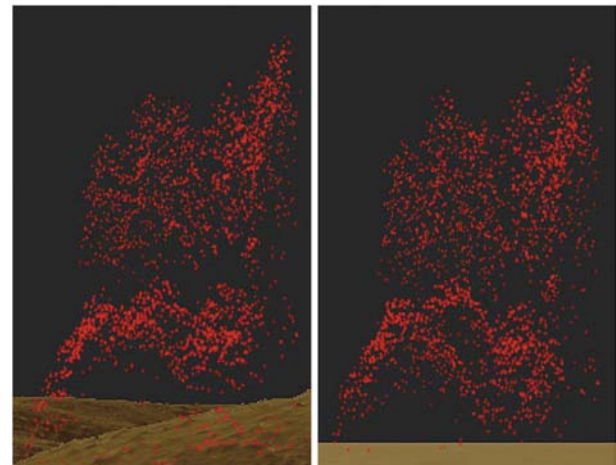
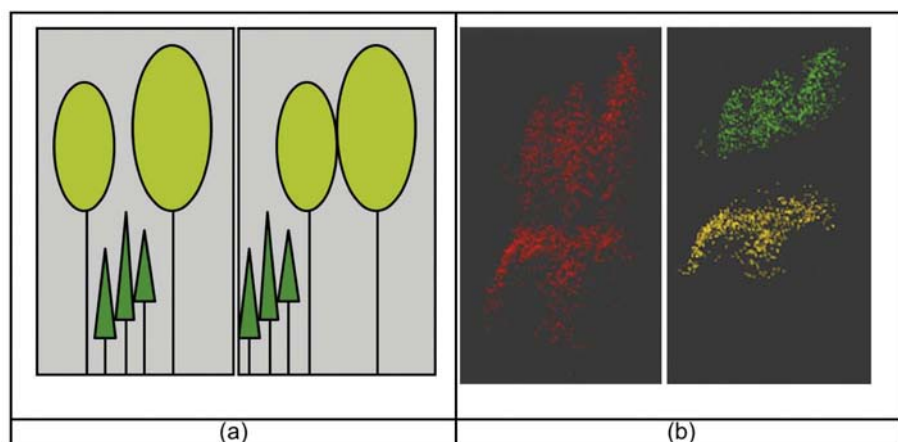
Das Ergebnis kann in Form einer Rasterkarte oder als Shapefile mit Informationen über die vertikale Bestandesstruktur für jedes Raster oder jede Fläche ausgegeben werden (Abb. 7). Für jede Fläche (Raster oder Polygon) können Informationen zur Anzahl der vertikalen Bestandesschichten, räumlichen Verteilung sowie zur maximalen und minimalen Höhe jeder Bestandesschicht abgerufen werden. Die Methode zur Erkennung von Bestandesschichten und deren Höhe scheint in Bezug auf erste visuelle Überprüfungen im digitalen Orthophoto effizient und sicher zu funktionieren. Zur Überprüfung des Raumbezuges der erkannten Bestandesschichten wurde die horizontale Verteilung von Laserrohpunkten in verschiedenen Höhenbereichen herangezogen. Eine erste Überprüfung im Gelände auf der Basis von 18 Stichproben ergab 14 Übereinstimmungen. Dabei zeigte sich, dass alle Bestände,

**Abb. 6:** Schichtbereiche

(a) Zwei verschiedene Waldbestände mit der gleichen Höhenverteilungswahrscheinlichkeits-Dichte-Funktion; links: zweischichtiger Waldbestand; rechts: einschichtiger Waldbestand mit Bäumen gemischter Höhe.

(b) Punkte innerhalb der erkannten Schichtbereiche im Vergleich zur Originalpunktwolke; links: normalisierte Punkt wolke; rechts: Punkte innerhalb erkannter Bestandesschichten.

**Fig. 6:** Scheme of forest layers (left) and according laser point cloud (right).



**Abb. 5:** Vergleich zwischen originaler Lidar-Rohpunkt wolke und normalisierter Punkt wolke (8227-373 Kürnacher Wald) Links: originale Lidar Rohpunkt wolke und DTM; rechts: normalisierte Punkt wolke über eingeebnete Oberfläche mit der Höhe 0 m.

**Fig. 5:** Comparison of Lidar point cloud (left) and normalize cloud (right).

die als zwei- oder mehrschichtig mit dem laserbasierten Verfahren ausgewiesen wurden, auch im Gelände aus zwei oder mehr Bestandesschichten bestanden. Allerdings gab es 4 Abweichungen dahin gehend, dass über das laserbasierte Verfahren Zweischichtigkeit ausgewiesen wurde, dies aber im Gelände nicht bestätigt werden konnte. Da bisher von Seiten der Forstverwaltung nur wenige Aufnahmen im Gelände für die Verifizierung erfolgen konnten, wären sowohl für eine statistische Absicherung als auch für eine genauere Fehleranalyse weitere Aufnahmen im Gelände notwendig.

### 5.3 Erfassung von Lücken

Als Lücken werden Bereiche bezeichnet, die von Wald umschlossen sind und einen deutlichen Höhenunterschied zum umgebenden Kronendach aufweisen. Es handelt sich somit um Öffnungen im Kronendach, wobei innerhalb der Lücke eine Blöße oder eine Kultur mit einer Höhe kleiner 2 m sein kann. Die Erfassung der Lücken erfolgt völlig automatisch und ist im Gegensatz zu den Ansätzen, die mit dem Luftbild bekannt sind, genau definiert bezüglich der maximalen Vegetationshöhe innerhalb der Lücke. Die Definition der Lücke ist wie folgt festgelegt,



- Vegetationshöhe < 2 m innerhalb der Waldmaske
- Mindestflächengröße: 0,1 ha
- Form „kompakt“ (Verhältnis aus Umfang zu Fläche relativ klein).

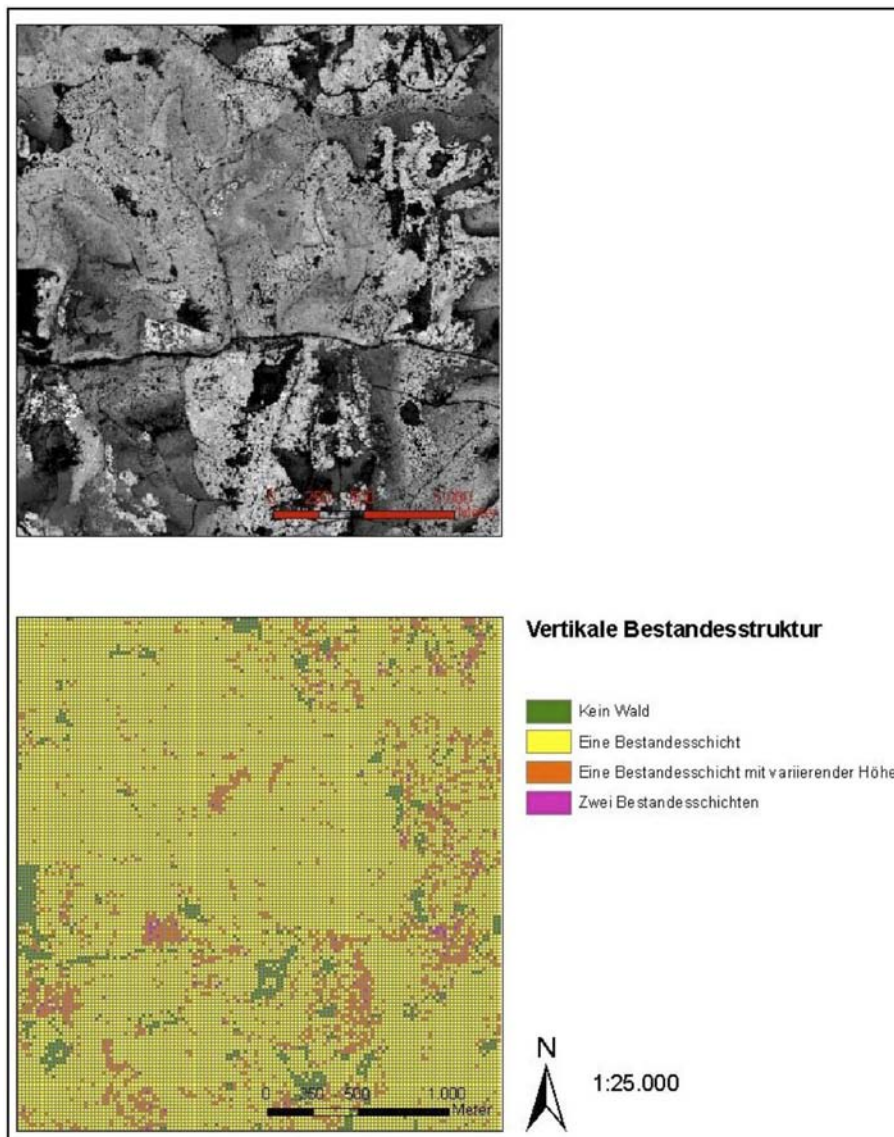
Des Weiteren wurde die durchschnittliche Höhe der umgebenden Vegetation als Attribut in 2 Klassen:  $\geq 15$  m;  $< 15$  m erfasst. Die hier vorgelegte Definition kann beliebig abgeändert werden und so der Ansprache im Gelände schrittweise angepasst werden, bis eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Geländeansprache und automatisierter Auswertung im Untersuchungsgebiet erreicht ist. Die wesentlichen Schritte bei der Berechnung der Lücken sind die Berechnung eines nDOM, welches die Abfrage von Höhen erlaubt. Darauf aufbauend können alle Flächen, die innerhalb der Waldmaske liegen, kleiner als 2 m sind und eine zusammenhängende Region größer 0,1 ha abdecken herausgefiltert werden. Mit Hilfe des „Shape Factors C“ (FRAGSTATS 2008) kann dann noch die Kompaktheit der Fläche bestimmt werden. Durch die Festlegung eines Schwellenwertes, welcher empirisch ermittelt wird, kann dann eine endgültige Klassifizierung in Lücke oder sonstige Fläche erfolgen. Durch die gleichzeitige Erfassung der Höhe des um die Lücke vorkommenden Waldes in einem bestimmten Radius (10 m) Abb. 8a können dann

Angaben über die Höhendifferenz zwischen Kronendach und der Messung in der Lücke gemacht werden. In Abb. 8b ist eine automatisierte Berechnung von Lücken dargestellt, wobei grün eingerahmte Flächen Lücken umgeben von Vegetationshöhen kleiner 15 m und die rot eingerahmten Flächen für Lücken umgeben von Vegetationshöhen größer 15 m stehen.

Eine Verifizierung der Lücken konnte nur okular auf der Basis von digitalen Orthophotos durchgeführt werden. Der erste Eindruck bestätigt, dass Lücken, die im Luftbild erkannt werden, auch mit Hilfe der ALS Daten ausgeschieden werden. Allerdings gibt es Abweichungen, da im Luftbild Lücken detektiert werden, die aufgrund der Definition keine Lücken bei der laserbasierten Auswertung sind, z. B. wenn Jungwuchs in Kronendachlücken höher als 2 m vorhanden ist oder wenn die Lücke aufgrund von Verschattungen im Luftbild nicht vollständig erfasst wird.

### 5.4 Erfassung von Überhältern

Die Erfassung von Überhältern erfolgt vollständig automatisiert auf der Basis von ALS Daten. Hierbei werden Überhälter als Einzelbäume oder Baumgruppen definiert, die innerhalb von Verjüngungsflächen und Blößen stehen. Nach der hier gewählten Definition können Überhälter-

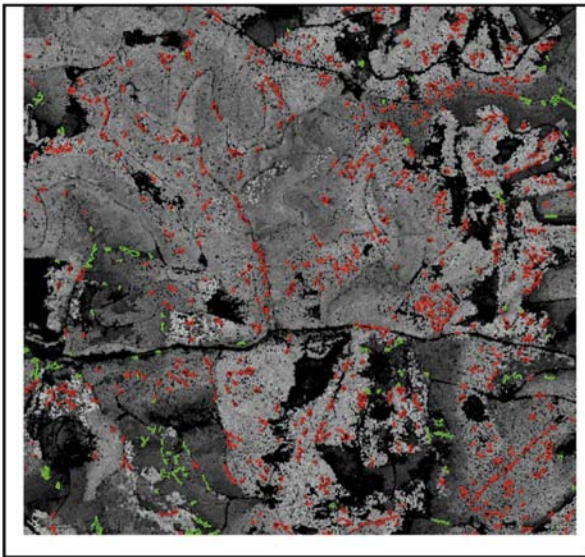
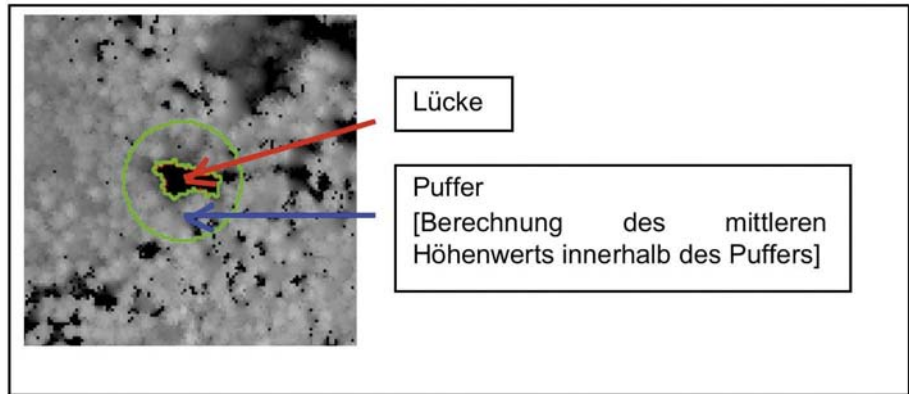


**Abb. 7:** Ergebnis der vertikalen Bestandesstruktur.

**Fig. 7:** Result: Illustration of the vertical stand structure.

**Abb. 8a:** Beispielhafte Darstellung der Klassifizierung von Lücken über eine Bestimmung der mittleren Höhe innerhalb einer kreisförmigen Pufferregion.

**Fig. 8a:** Example for the assessment of forest gaps, based on the measuring of mean heights within a circular buffer region.



**Abb. 8b:** Automatisiert erfasste Lücken im Vegetationshöhenmodell am Beispiel „Kürnacher Wald“.

rote Lücken umgeben von Vegetationshöhen über 15 m.

grüne Lücken umgeben von Vegetationshöhen kleiner gleich 15 m.

**Fig. 8b:** Automatically assessed forest gaps in the SAC „Kürnacher Wald“.

gruppen oder Überhälter eine Fläche von 20 m<sup>2</sup> bis 450 m<sup>2</sup> einnehmen, die Fläche darf einen maximalen Durchmesser von 96 m haben und die minimale Höhendifferenz zwischen Überhälter und umgebender Blöße muss mindestens 15 m betragen. Diese Vorgaben wurden für die Entwicklung des Verfahrens festgesetzt und können aber jederzeit modifiziert werden, um die Ansprache im Gelände an die automatisierte Erfassung anzupassen. Zur Erfassung der Überhälter bzw. Überhältergruppen werden zunächst zwei verschiedene DOM gerechnet. Eines mit der üblichen Auflösung von 1 m und ein zweites in dem innerhalb eines recht großen „moving windows“ mit einem Minimumfilter die niedrigen Werte herausgefiltert werden (DEES et al. 2006). Über die Differenz der beiden DOM werden die potenziellen Überhälterbereiche mit einer Höhendifferenz von mehr als 5 m herausgefiltert. Erfüllen diese gefilterten Flächen die Bedingungen an die Flächengröße, dass eine zusammenhängende Fläche von mindestens 20 – 450 m<sup>2</sup> und ein maximaler Durchmesser von 96 m vorliegt, dann wird in einem abschließenden Schritt die Höhendifferenz zwischen der maximalen Höhe innerhalb der potenziellen Überhälterregion und der umliegenden Region errechnet. Beträgt diese Höhendifferenz 15 m und mehr dann

wird die Fläche als Überhälter bzw. Überhältergruppe ausgeschieden. In Abbildung 9 wird ein Beispiel für die Ausweisung von Überhältern nach der oben genannten Definition für das Testgebiet Kürnacher Wald dargestellt.

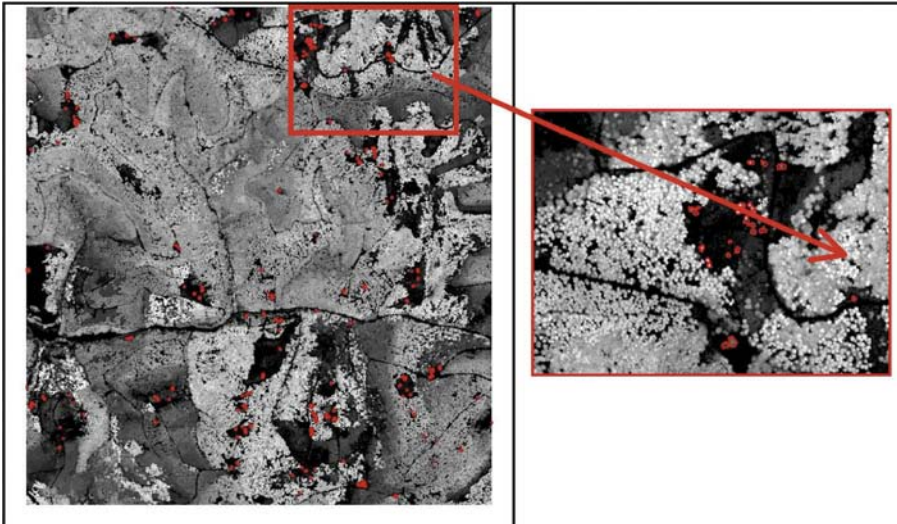
Eine erste Überprüfung im Gelände hat ergeben, dass die Anzahl der Überhälter durch das Verfahren unterschätzt wird. Von 18 Stichproben wurden in der Hälfte der Fälle die Überhälter bestätigt. In weiteren neun Stichproben wurden die im Gelände gefundenen Überhälter mit dem Verfahren nicht kartiert. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass Überhälter nur dort automatisiert ausgewiesen werden, wo auch welche vorhanden sind. Andererseits ist das Verfahren noch nicht sensibel genug um alle oder den größten Teil der Überhälter zu erfassen. Um die Definition den Bedingungen im Gelände besser anzupassen, bedarf es einer genaueren Fehleranalyse und einer höheren Anzahl von Geländestichproben. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Schwellwert für die Höhendifferenz und die Definition der Flächengröße einen entscheidenden Einfluss nehmen. Es muss deshalb Ziel sein, diese beiden Schwellwerte auf der Basis einer umfangreichen Testreihe besser anzupassen.

### 5.5 Erfassung der Waldrandlänge

Die Waldrandlänge wurde exemplarisch auf der Basis der ALS Daten für das Untersuchungsgebiet Kürnacher Wald berechnet. Hierbei wird als Waldrand die Länge der Grenzlinie von Wald- zu Nichtwaldflächen definiert. Zur Berechnung der Waldrandlänge gibt es dabei zwei Möglichkeiten: einmal die Berechnung der Grenzlinie aufgrund der Projektion auf eine horizontale Ebene, wie sie z. B. in Karten vorliegt oder die Projektion der Grenzlinien auf ein Geländeoberflächenmodell um den tatsächlichen Verhältnisse im Gelände besser Rechnung zu tragen. Die Motivation beide Varianten zu untersuchen gründet in der Annahme, dass die Länge im Gelände für ökologische Fragestellungen die angemessene Maßzahl darstellt, aus Karten und 2-dimensionalen GIS Systemen jedoch mit einfacher Methodik lediglich die horizontale Entfernung ableitbar ist.

Im Rahmen dieser Studie wurden beide Verfahren miteinander verglichen. Die Messung wurde als GIS-Analyse in der Software ArcGIS der Firma ESRI durchgeführt.

Die Berechnung der planimetrischen Länge, also in horizontaler Projektion kann im GIS mit einer einfachen Berechnung der Linienlängen erfolgen, da dort die Linien in horizontaler Projektion dargestellt sind. Die gesamte Waldrandlänge für das Untersuchungsgebiet Kürnacher Wald beträgt demnach 15.662,59 m.



**Abb. 9:** Automatisiert erfasste Überhälter (rote Flächen) im Vegetationshöhenmodell am Beispiel „Kürnacher Wald“.

**Fig. 9:** Automatically assessed old growth (red areas) in the vegetation height model of the SAC „Kürnacher Wald“.

Die Berechnung der Oberflächenlänge erfolgt mit Hilfe des DGMs. Die dreidimensionale Distanz muss entweder größer oder gleich der planimetrischen Distanz zwischen zwei Punkten sein, da die Varianz des z-Wertes (Höhe) mit in Betracht genommen wird.

Die Linien werden an ihren Vertices und zusätzlich in bestimmten Abständen nach ihrer zugehörigen Höhe abgetastet. Je kleiner diese Abstände gewählt werden, desto genauer wird die Linie an das Geländemodell angepasst und desto größer wird ihre Länge. Bei der hier vorliegenden Rasterweite des DTMs von 1 m wurde ein Abstand von 0,5 m gewählt. Ein kleinerer Abstand bringt keine weiteren Verbesserungen (vgl. ESRI Inc. 2004). Die Waldrandlänge auf der Geländeoberfläche beträgt für das Gebiet Kürnacher Wald 15.929,66 m.

Die Differenz der Ergebnisse beider Verfahren beträgt 267,07 m (vgl. Tab. 4). Dies entspricht bezogen auf die planimetrischen Länge von 15.662,59 m 1,71 %.

In dem hier betrachteten Gebiet lässt sich der geringe Unterschied auf die überwiegend hangparallel oder in der Ebenen verlaufende Waldgrenzen zurückführen. Bei Grenzen, die in sehr steilem Gelände in Hangrichtung verlaufen, kann der Unterschied jedoch beträchtlich sein, so dass in bewegtem oder steilen Gelände, unter der Prämisse, dass die Länge im Gelände für ökologische Fragestellungen die angemessene Maßzahl darstellt, das komplexere Berechnungsverfahren für die Entfernung im Gelände empfohlen wird.

**Tab. 4:** Waldrandlänge im Gebiet Kürnacher Wald.

**Tab. 4:** Forest border length in the SAC „Kürnacher Wald“.

	planimetrische Länge (m)	Oberflächenlänge (m)	Differenz (m)	Differenz (% von pl. Länge)
	Planimetric length (m)	Surface area length (m)	Difference (m)	Difference (% from pl. length)
<b>Kürnacher Wald</b>				
<b>Kürnacher Forest</b>	15.662,59	15.929,66	267,07	1,71

### 5.6 Erfassung von Steilhängen und Schluchten unter Wald

Zweck der Erfassung von Steilhängen ist die Erfassung von potenziellen Standorten von prioritären Schlucht- und Hangmischwäldern (LRT \*9180). Schlucht- und Hangmischwälder kommen auf labilen Steilhängen, auf Schuttkegeln unterhalb von Felsabbrüchen, auf Hangfüßen mit Bodenrutschung sowie auf unkonsolidierten Blockstandorten vor. Um die potenziellen Standorte der Schlucht- und Hangmischwälder auf der Basis von ALS-Daten zu kartieren, werden mit Hilfe des DGMs Hang- und Schluchtbereiche kartiert. Dazu ist es zunächst notwendig, eine Definition für Hang- und Schluchtbereiche zu erstellen. Im Rahmen des Projektes wurden folgende Definitionen gefunden:

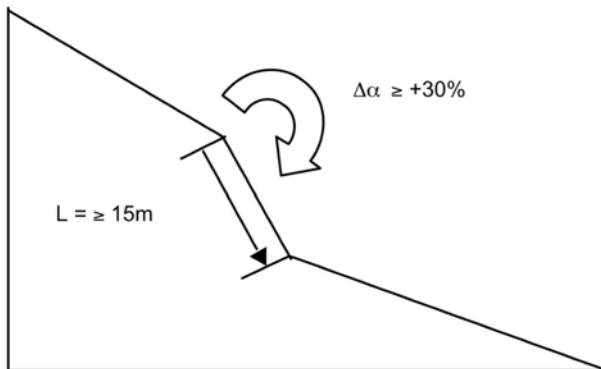
- a) Hangneigung / minimaler Steigungswinkel: (entscheidend für die im Untersuchungsgebiet an zutreffenden Ausprägungen des FFH-LRT \*9180 sind steile Hanglagen)

**Minimaler Steigungswinkel:  $\alpha_{\min} = 60\%$**

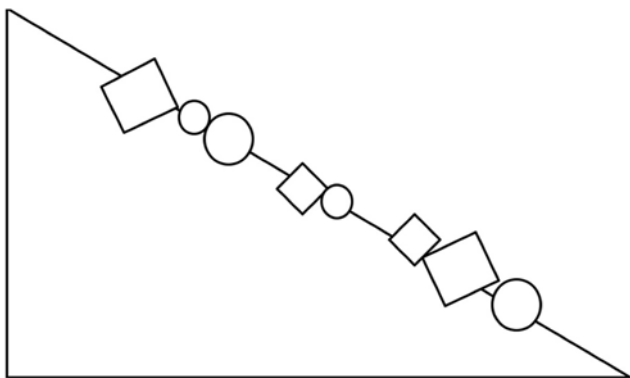


- b) Bruchkanten:  
Unterbrechung des kontinuierlichen Hangverlaufs.

**Neigungszunahme  $\Delta\alpha \geq +30\%$ ; Länge  $\geq 15$  m**



Des Weiteren sollten auch auffällige Felsblock-/Gesteinschutt-Ansammlungen unterhalb von Steilwänden erfasst werden. Dies konnte über die Einführung eines Rauheitsparameters für Lastpulsdaten erreicht werden.



Für die Erfassung der Rauheit wurde für jeden Punkt des digitalen Geländemodells (DGMs) die Beziehung zu allen benachbarten untersucht. Dadurch soll herausgefunden werden, ob es Punkte gibt, die mit dem DGM-Punkt einen Steigungswinkel von mehr als 60 % bilden. Sofern das der Fall ist, werden Linien festgelegt, die von dem jeweiligen DGM-Punkt ausgehen und die in dem vorangegangenen Schritt gefundenen Punkte durchlaufen. Jede einzelne dieser Linien wird solange über benachbarte Punkte verlängert, bis ein Punkt gefunden wird, der unmittelbar neben der Linie liegt und mit dem untersuchten DGM-Punkt einen Steigungswinkel von weniger als 60 % bildet. Alle auf diese Weise entstandenen Linien werden in zusammenhängende Bereiche gruppiert. Abschnitte von Linien, deren Steigung größer als 80 % ist, werden entsprechend markiert. Weiterhin werden die Bereiche anhand ihrer Größe (3 m x 3 m) herausgefiltert. Um die Rauheit der Steilhänge zu bestimmen, wird das DGM geglättet und für alle Punkte, die innerhalb der Steilhänge liegen, der Variationskoeffizient in der „Fünf – Punkte – Umgebung“ bestimmt. Anhand eines empirisch gefundenen Schwellenwertes dieses Koeffizienten (gewählter Wert: 3,2), werden die Bereiche entweder als „Bereiche hoher Rauheit“ oder „Bereiche niedriger Rauheit“ klassifiziert. In Abbildung 10 ist beispielhaft die automatisierte Kartierung von Steilhängen im Kürnacher Wald dargestellt.

Eine weitere Möglichkeit die Rauheit zu berechnen, ist über die Erfassung des Höhenunterschiedes zwischen dem vorhandenen Hang und dem idealen Hang, der eine durchschnittliche Neigung hat, möglich. Diese Variante wurde aber im Rahmen des Projektes nicht untersucht. Eine Verifizierung der Ergebnisse im Gelände konnte nur über Höhenlinienkarten erfolgen. Der Vergleich zeigt, dass die Steilheit der Flächen mit dem vorgestellten Verfahren im Testgebiet korrekt erfasst werden konnte.

Für die Erfassung der Schluchten musste wie für die Erfassung der Steilhänge und Schutt-/Blockböden zunächst eine eindeutige Definition erfolgen. Als Schlucht wird ein enger Taleinschnitt bezeichnet. Auf der Basis dieser Überlegung wurden die Schluchten wie folgt definiert:

- |                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 1) Maximale obere Breite (B0) | 100 m |
| 2) Minimaler Steigungswinkel  | 60 %  |
| 3) Minimale Tiefe             | 20 m  |
| 4) Minimale Länge             | 10 m  |

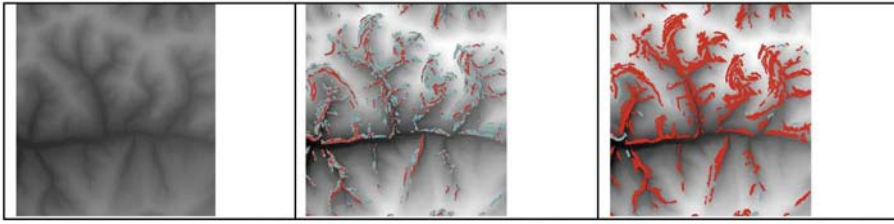
Um auf der Basis dieser Definition eine Abgrenzung mit ALS-Daten zu erhalten wird innerhalb des DGMs nach zwei Punkten gesucht, deren Höhenunterschied größer ist als die minimale Tiefe und deren Abstand nicht größer ist als das Verhältnis (Quotient) zwischen der minimalen Tiefe und dem minimalen Steigungswinkel. Hat man ein solches Punkte-Paar gefunden, wird eine Linie festgelegt, die vom höheren Punkt zum niedrigeren verläuft und deren Länge gleich oder kleiner der maximalen Breite ist.

Daraufhin werden DGM-Punkte identifiziert, die sich in der unmittelbaren Nachbarschaft der so gefundenen Linie befinden. Dabei wird untersucht, ob es ein weiteres Punkte-Paar gibt, das die gleiche räumliche Beziehung hat wie das erste. Falls es dieses gibt, wird untersucht, ob die niedrigeren Punkten zwischen den höheren liegen. Wenn das zutrifft, wird die Linie als potenzieller Teil der Schlucht eingestuft. So entstandene Linien werden in zusammenhängende Bereiche zusammengefasst. Für jeden Bereich wird dessen Länge untersucht. Ist sie länger als die minimale Länge, wird der Bereich als Schlucht identifiziert. In Abbildung 11 ist ein Beispiel für den Kürnacher Wald dargestellt.

Insgesamt können die Schluchten mit diesem automatisierten Verfahren zuverlässig erfasst werden. Schwierig ist es, Schluchten in Überschneidungsbereichen automatisiert zu erfassen oder wenn häufige Richtungswechsel vorliegen. In diesen Fällen muss die automatisierte Erfassung durch interaktive Nachkartierung ergänzt werden.

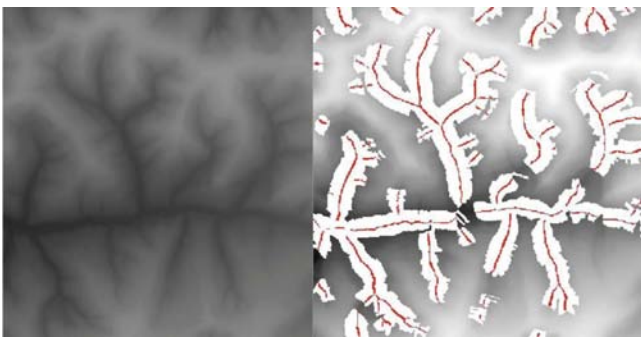
## 5.7 Erfassung von Gräben im Moor und unter Wald

Eine weitere wichtige Information für die naturschutzfachliche Arbeit ist die Erfassung von Gräben in Mooren und unter Wald. Auch dieser Ansatz wurde auf der Basis von ALS Daten geprüft. Dabei war es wiederum zunächst notwendig, eine formale Definition für Gräben vorzunehmen. In Zusammenarbeit mit der LWF wurde für die Ausweisung von Gräben folgendes festgelegt:



**Abb. 10:** Steilhängige Kerbtälchen (Tobel) im Kürnacher Wald.  
 Links: DTM  
 Mitte: Delinierte Steilhänge; Neigung: blau- = 60 – 80 %, gelb = 80 – 100 % und rot > 100 %  
 Rechts: Rauheit der Steilhänge; blau Variationsfaktor < 3.2 (Rauheit gering), rot > 3.2 (Rauheit hoch)

**Fig. 10:** Mapping of steep valleys in the SAC „Kürnacher Wald“.  
 Left: DTM  
 Centre: Unevenness delineated steep slopes: blue- = 60 – 80 %, yellow = 80 – 100 % and red > 100 %  
 Right: Unevenness of the slopes; blue: variation factor < 3.2 (low unevenness), red: > 3.2 (high unevenness)



**Abb. 11:** Delinierte Schluchten Kürnacher Wald (weiß – Seitenflanken der Schluchten, rot – Mittellinie).

**Fig. 11:** Delineiated canyons of the Kürnacher forest (white – side of the canyon, center – line).

- eine minimale Tiefe von 50 cm
- zwei annähernd geradlinigen Seiten, die eine Distanz von 2,5 – 5 m haben können aber parallel verlaufen
- Mindestlänge von 10 m

Für die Umsetzung dieser Definition wurde innerhalb des DGMs nach zwei Punkten gesucht, deren Höhenunterschied größer als die minimale Tiefe ist und deren Abstand der Hälfte der maximalen Breite der Seiten entspricht. Hat man ein solches Punkte-Paar gefunden, wird eine Linie festgelegt, die vom höheren Punkt zum niedrigeren verläuft und deren Länge gleich oder kleiner der maximalen Breite ist. Ausgehend von diesen Punktpaaren werden die DGM-Punkte identifiziert, die sich in der unmittelbaren Nachbarschaft befinden. Die so gefundenen Linien werden in zusammenhängende Bereiche zusammengeführt. Für jeden Bereich wird die Länge untersucht. Ist diese länger oder gleich der minimalen Länge, wird der Bereich als Graben identifiziert. Über die Bestimmung eines maximalen Innenrechtecks wird für jeden Graben die Geradlinigkeit überprüft. In Abbildung 12 ist eine Beispielskartierung im Sulzschneider Moor dargestellt.

Die Abbildung zeigt, dass Gräben nur sehr bruchstückhaft auf der Basis der Vorgaben automatisiert erfasst werden. Dies liegt weniger an der Definition als an den Daten und den Algorithmen. Die Daten der Vermessungsämter haben keine ausreichend hohe Auflösung für diese anspruchsvolle Aufgabe und für eine annähernd vollständige Erfassung der Gräben mit automatisierten Methoden müssten sehr aufwän-

dige Algorithmen, die die gefundenen Abschnitte automatisch verbinden, entwickelt werden. Diese Weiterentwicklung war im Rahmen des Projektes nicht möglich. Allerdings kann durch eine visuelle Nachbearbeitung der DGMs ein Großteil der Gräben bei entsprechender Aufbereitung manuell kartiert werden (Abb. 13).

## 6 Schlussfolgerung zum Anwendungspotenzial aus naturschutzfachlicher Sicht und Ausblick

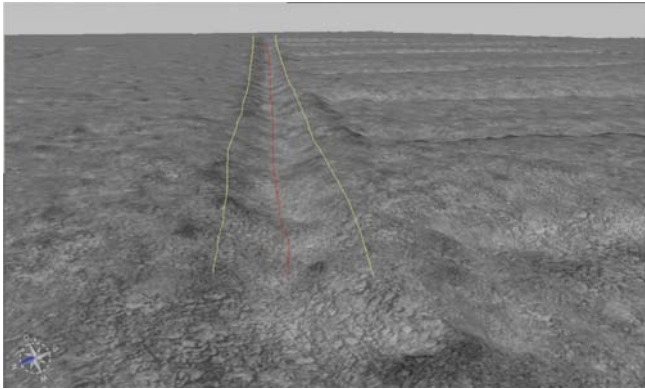
Die diversen Auswertungsmodule haben vielseitige Einsatzmöglichkeiten und das große Entwicklungspotenzial von Laserscanning-Daten bei Natura2000-Aufgaben aufgezeigt.

Die laserbasierten Geländemodelle liefern aufgrund ihrer



**Abb. 12:** Kartierte Gräben im Testgebiet Sulzschneider Moor.

**Fig. 12:** Mapped ditches in a bog within the SAC “Sulzschneider Moor”.



**Abb. 13:** Visuelle Erfassung von Gräben mit TreesVis.

**Fig. 13:** Visual mapping of ditches in a bog with the software package TreesVis.

im Vergleich zu herkömmlichen DGM wesentlich höheren Auflösung eine sehr wichtige standörtliche Kartiergrundlage bei der Modellierung des Naturpotenzials. Im Rahmen des Projektes konnte damit eine wertvolle **Suchraumkulisse** für potenzielle Vorkommen des prioritären Lebensraumtyps **9180\*** Schlucht- und Hangmischwälder erarbeitet werden. Nach demselben Verfahren könnte auch die semi-automatische Ableitung der gesetzlichen Schutzwaldflächen erfolgen. Aufgrund der Erfahrungen aus dem Projekt ergeben sich auch Einsatzmöglichkeiten der laserbasierten Geländemodelle bezüglich einer Erfassung und Bewertung der Standorte bzw. der Standortsqualität anderer prioritärer Wald-Lebensraumtypen. So können bspw. intakte von durch Torfabbauflächen, Entwässerungsgräben und Rillenerosion hydrologisch beeinträchtigten Mooroberflächen unterschieden werden. Konkretere Einsatzmöglichkeiten bei der **Moorrenaturierung** bedürfen allerdings noch einer Weiterentwicklung. Hier werden weitere Detailstudien angeregt, z. B. im Kontext mit dem Projekt „DSS-WAMOS Eine ‚Decision Support System‘-gestützte Managementstrategie für Waldmoore“ (<http://www.dss-wamos.de/>) und dem **Naturschutz-Großprojekt „Allgäuer Moor-Allianz“**. Bekannt und an anderer Stelle erfolgreich getestet ist auch die Einsatzmöglichkeit von laserbasierten Geländemodellen für die Erfassung von rezent überschwemmten Auen, von Altarmen, Flutmulden etc. und im Bereich der **Auendynamisierung**.

Die laserbasierten Oberflächenmodelle ermöglichen eine sichere Feinabgrenzung von Wald zu Offenland. Dies bedingt jedoch das Vorliegen einer fernerkundungstauglichen Walddefinition für alle relevanten Landschaftsformen. Innerhalb der Wälder können Parameter wie **Laub- und Nadelholzanteile** zuverlässig detektiert werden, wenn die Daten aus einer Winterbefliegung vorliegen. Auch **Schichtigkeit und Waldentwicklungsstadien** können zuverlässig angesprochen werden. Kaum geeignet sind die ALS Daten zur Erfassung der Baumarten, für Totholz und Biotopbäume. Zwar kann in Kombination mit hochauflösenden Spektraldaten (z. B. aus digitalen Luftbildkameras) auch hier eine verbesserte Erkennung erwartet werden, doch bedarf die Kombination der Daten von aktiven und passiven Fernerkundungssensoren noch intensiver Forschung, bevor erste Anwendungen getestet werden können. Abgesichert durch eine umfangreichen Testreihe wäre es bereits heute möglich, freistehende **Überhälter** zu erfassen. Die laserbasierten Oberflächenmodelle können auch eine wichtige Funktion bei der **Überwachung des günstigen Erhaltungszustandes** nach Art. 17 FFH-RL von Schutzobjekten übernehmen. Ihre Stärke liegt in der Ob-

jektivität hinsichtlich der quantitativen Erfassung von Veränderungen. So können z. B. Veränderungen von wesentlichen Bestandes- und Gebietsstrukturen wie z. B. nutzungs- oder klimawandelbedingte Veränderungen der Anteile von Laub- und Nadelholz und Lückigkeit und Schichtigkeit der Bestände quantifiziert werden. Durch ihre Verwendbarkeit bei der Herleitung von Landschaftsstrukturmaßen wie Waldrandlängen, oder Dichte und Länge der Walderschließung können Laserscanningdaten ebenfalls wertvolle Indikatoren für das Biodiversitäts-Monitoring liefern.

## Danksagung

Grundlage der Publikation sind die Untersuchungen des Projekt „Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten von amtlichen Laserscannerdaten für den Wald-Forst-Bereich – Entwicklung von Methoden zur Parametrisierung zur Beantwortung von Fragestellungen aus forstlichen Inventur- und Monitoringaufgaben“. Neben den Autoren haben seitens der Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme an dem Projekt maßgeblich mitgewirkt: Christoph Straub, Johannes Heinzl, Dr. Nebojsa Balic, Dr. Yunsheng Wang, und Fabian Fassnacht. An der LWF haben neben den Autoren an dem Projekt maßgeblich mitgewirkt: Frau Gudrun Faißt (Antragstellung / Projektskizze), sowie Herr Stefan Binner und Herr Armin Troycke bei der Verifizierung.

Von Seiten des Amtes für Landwirtschaft und Forsten in Krumbach sei Herrn FOR Peter Böhm für die Begleitung des Projektes sowie Herrn FAM Boris Mittermeier und Herrn FAM Andreas Walter für die Verifizierung der Ergebnisse im Gelände gedankt.

Für die Förderung des Projektes ST 189 möchten wir dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten danken.

## Literatur

- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT & BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2007): Handbuch der Lebensraumtypen nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie in Bayern: 162 S. + Anhang, Augsburg + Freising-Weihenstephan.  
[http://www.lfu.bayern.de/natur/fachinformationen/natura\\_2000\\_ffh/kartieranleitungen/doc/handbuch\\_lrt.doc](http://www.lfu.bayern.de/natur/fachinformationen/natura_2000_ffh/kartieranleitungen/doc/handbuch_lrt.doc)
- BINNER, S., EWALD, J., ROGG, S. (2005): Die ökologische Interpretation geologischer Karten mit Hilfe der Datenbank bayerischer Bergwälder und terrestrisch kartierter Standortskarten. Waldökologie online 2: 114-125.  
[http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online\\_heft-2-10.pdf](http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft-2-10.pdf)
- BURKHARDT, R., ROBISCH, F., SCHRÖDER, E. (2004): Umsetzung der FFH-Richtlinie im Wald - Gemeinsame bundesweite Empfehlungen der Länderarbeitsgemeinschaft Naturschutz (LANA) und der Forstchefkonferenz (FCK). Natur und Landschaft, **79** (7): 316-323.
- DEES, M., STRAUB, C., LANGAR, P., KOCH, B. (2006): Remote sensing based concepts utilising SPOT 5 and LIDAR for forest habitat mapping and monitoring under the EU Habitat Directive. In: Lamb, A., Hill, R., Wilson, D., Bock, M., Ivits, E., Dees, M., Hemphil, S. and Koch, B.: ONP 10 Test & Benchmarks Report. Part of the geoland project reporting dossier, [www.geoland-gmes.info](http://www.geoland-gmes.info).
- DEES, M., STRAUB, CHR., HEINZEL, J. BALIC, N. WANG, Y., WEINACKER, H. FASSNACHT, F., KOCH, B., FAISST, G., WALENTOWSKI, H. SEITZ, R. (2007): Untersuchung der Nutzungsmögli-

chkeiten von amtlichen Laserscannerdaten für den Wald-Forst-Bereich – Entwicklung von Methoden zur Parametrisierung zur Beantwortung von Fragestellungen aus forstlichen Inventur- und Monitoringaufgaben. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Bericht. 69 S.

ESRI Inc. (2004): ArcGIS 9.0 Desktop Help, How Slope Works.

EUROPEAN COMMISSION (2005): Assessment, monitoring and reporting of conservation status – Preparing the 2001-2007 report under Article 17 of the Habitats Directive. DG Env. B2/AR D(2004), Brussels.

EWALD, J., BINNER, S. (2007): Werkzeuge zur Bestimmung der Waldtypen im bayerischen Hochgebirge. Waldökologie online 5:

[http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online\\_heft-2-10.pdf](http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft-2-10.pdf)

FÖRSTER, M., KLEINSCHMIT, B., WALENTOWSKI, H. (2005): Comparison of three modelling approaches of potential natural forest habitats in Bavaria, Germany. Waldökologie online 2: 114-125.

[http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online\\_heft-2-11.pdf](http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft-2-11.pdf)

FRAGSTATS (2008): Fragstats documentation. URL: [http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats\\_documents.html](http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats_documents.html) (6.8.2008).

KOCH, B., STRAUB, C., DEES, M., WANG, Y. & WEINACKER, H. (2009): Airborne laser data for stand delineation and information extraction. ISPRS (accepted, in print).

LANG, A., WALENTOWSKI, H., LORENZ, W. (2004): Kartieranleitung für die Lebensraumtypen nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie in Bayern: 5. Auflage, 233 S. München und Freising. [http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online\\_heft-2-10.pdf](http://www.afsv.de/download/literatur/waldoekologie-online/waldoekologie-online_heft-2-10.pdf)

WEINACKER, H., KOCH, B. & WEINACKER, R. (2004): TreesVis – A software system for simultaneous 3D-real-time visualization of DTM, DSM, Laser raw data, multispectral data, simple tree and building models, In: Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, 8/W2, Freiburg.

submitted: 10.09.2008

reviewed: 15.01.2008

accepted: 03.02.2009

#### Autorenanschrift:

Prof. Dr. Barbara Koch  
Steinbeis-Transferzentrum FeLis  
Tennenbacherstrasse 4, D-79106 Freiburg  
Email: [Barbara.Koch@felis.uni-freiburg.de](mailto:Barbara.Koch@felis.uni-freiburg.de)

Dr. Helge Walentowski  
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft  
Am Hochanger 11, D-85354 Freising  
Email: [Helge.Walentowski@lwf.bayern.de](mailto:Helge.Walentowski@lwf.bayern.de)

PD Dr. Matthias Dees  
Steinbeis-Transferzentrum FeLis  
Tennenbacherstrasse 4, D-79106 Freiburg  
Email: [Matthias.Dees@felis.uni-freiburg.de](mailto:Matthias.Dees@felis.uni-freiburg.de)

Rudolf Seitz  
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft  
Am Hochanger 11, D-85354 Freising  
Email: [Rudolf.Seitz@lwf.bayern.de](mailto:Rudolf.Seitz@lwf.bayern.de)