

Der Einsatz von Airborne Laserscanning Daten im forstbetrieblichen Informationssystem

MASTERARBEIT

EINGEREICHT VON

ROBERT ZEINER



Universität für Bodenkultur Wien

Institut für Agrar- und Forstökonomie

Betreuer:

A.O. Univ. Prof. DI Dr. Walter Sekot

Wien, April 2012

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt dem Betreuer dieser Diplomarbeit a.o. Univ. Prof. DI Dr. Walter Sekot, für die zahlreichen Anregungen und stets motivierenden Gespräche während der Erstellung des Manuskripts. Bei Ass. Prof. DI Dr. Otto Eckmüllner möchte ich mich für die Unterstützung bei ertragskundlichen und Laserscanning bezogenen Fragen bedanken. DI Dr. Markus Hollaus von der TU-Wien danke ich für den anfangs gegebenen Überblick über den Themenbereich Airborne Laserscanning in der Forstwirtschaft.

Bei den Österreichischen Bundesforsten, sowie den Mitarbeitern der Geoportale der Bundesländer möchte ich mich für die unbürokratische Bereitstellung der Geodaten bedanken.

Abschließend danke ich meinen Eltern für die Ermöglichung dieses Studiums und Julia für ihre Hilfe bei der Durchsicht der Arbeit.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Zielsetzung.....	1
1.2	Methodik und Aufbau der Arbeit	2
1.2.1	Methodik.....	2
1.2.2	Aufbau der Arbeit	3
2	ERWARTUNGEN DER FORSTWIRTSCHAFT AN DIE FERNERKUNDUNG.....	4
3	GRUNDLAGEN DES AIRBORNE LASERSCANNING.....	8
3.1	Funktionsweise.....	8
3.2	Primäre Produkte.....	10
3.2.1	Digitales Geländemodell	11
3.2.2	Digitales Oberflächenmodell.....	11
3.2.3	Normalisiertes digitales Oberflächenmodell.....	12
4	ALS IN DER FORSTEINRICHTUNG	13
4.1	Abgeleitete Parameter	13
4.1.1	Standortsmerkmale	13
4.1.2	Bestandesparameter.....	14
4.1.2.1	Einzelbaum- und flächenbezogener Ansatz	14
4.1.2.2	Baumhöhe.....	16
4.1.2.3	Bestandesvorrat.....	18
4.1.2.4	Wachstumsparameter	23
4.1.2.5	Brusthöhendurchmesser.....	26
4.1.2.6	Baumalter.....	28
4.1.2.7	Bestockungsgrad	29
4.1.2.8	Baumartenanteile	30
4.1.2.9	Bonität.....	31
4.1.2.10	Horizontale Bestandesstruktur	33
4.1.2.11	Vertikale Struktur	36
4.1.2.12	Erkennung von Strukturänderungen.....	41
4.2	Einteilung von Flächen nach Wuchsklassen	42
4.3	Kartografie und GIS.....	48
4.4	Erschließung	51
4.5	Holzernte	53
5	ANALYSERAHMEN.....	56
5.1	Genauigkeit	56
5.1.1	Digitales Geländemodell	58
5.1.2	Einzelbaum- und flächenbezogener Ansatz	58
5.1.3	Baumhöhe.....	59
5.1.4	Bestandesvorrat.....	61
5.1.5	Waldwachstum	64
5.1.6	Brusthöhendurchmesser.....	65
5.1.7	Baumalter.....	66
5.1.8	Bestockungsgrad	67
5.1.9	Baumartenanteile	67
5.1.10	Bonität	68
5.1.11	Horizontale Struktur	68
5.1.12	Vertikale Struktur.....	69
5.1.13	Erkennung von Strukturänderungen	70
5.1.14	Kartierung von Forstwegen.....	70
5.1.15	Erschließung.....	70
5.1.16	Übersicht.....	72

5.2	Kosten	73
5.2.1	Kostenbeeinflussende Faktoren.....	73
5.2.2	Daten und Lizenzen.....	74
5.3	Verfügbarkeit.....	74
5.3.1	Flächenabdeckung	74
5.3.2	Datenformat.....	77
5.4	Technische Voraussetzungen	79
5.5	Praktische Anwendungsversuche	81
5.5.1	Forsteinrichtung.....	81
5.5.2	Forstinventur.....	87
6	DISKUSSION UND AUSBLICK.....	88
6.1	Diskussion.....	88
6.2	Ausblick	91
7	ZUSAMMENFASSUNG	94
8	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	96
9	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	97
10	LITERATURVERZEICHNIS	99

1 EINLEITUNG

In der Forstwirtschaft werden Fernerkundungsmethoden seit den 1960er Jahren eingesetzt. Durch den stetigen Fortschritt der Sensortechnologie in den letzten Jahrzehnten, haben sich die Möglichkeiten der Datenerhebung aus der Fernerkundung stark weiterentwickelt. Luftbilder, Orthofotos, Satellitenbilder, Laserscanning-, Mikrowellen- und Radardaten ermöglichen präzise Aufnahmen des gegenwärtigen Zustandes einer Geländeoberfläche und deren Vegetation. Einhergehend mit den gesteigerten technischen Möglichkeiten, sind die Ansprüche bei den Anwendern der generierten Daten ebenfalls gestiegen. Fernerkundungsdaten und Geoinformationssysteme sind in den vergangenen 20 Jahren zum unumgänglichen Bestandteil jeder forstlichen Planung geworden.

Kenntnisse über die Verhältnisse wichtiger Bestandesparameter wie den Holzvorrat, stellen die Grundlage strategischer und operativer Überlegungen eines Forstbetriebes dar. Die dafür benötigten Daten werden traditionell über zeit- und kostenintensive Stichprobeninventuren und Taxationen erhoben. Diese werden gewöhnlicher Weise im zehnjährigen Rhythmus durchgeführt. Die in den letzten Jahrzehnten immer häufiger auftretenden Wind- und darauf folgenden Käferkalamitäten erfordern oftmals die kurzfristige Aktualisierung der aufgenommenen Daten. Diese Umstände fordern Inventurverfahren, welche eine rasche, kostengünstige und großflächige Datenerhebung ermöglichen.

In diesem Kontext ist die vorliegende Diplomarbeit angesiedelt. Sie zeigt die Einsatzmöglichkeiten von Airborne Laserscanning im betrieblichen Informationssystem und im Speziellen in der Forsteinrichtung.

Sämtliche personenbezogene Bezeichnungen sind geschlechtsneutral zu verstehen.

1.1 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Potential von Airborne Laserscanning (ALS) Daten im betrieblichen Informationssystem ermittelt werden.

In einem ersten Schritt wird die Arbeit in den größeren Kontext der Fernerkundung in der Forstwirtschaft eingebettet. Hier werden Parameter identifiziert, die für forstwirtschaftliche

Akteure von besonderem Interesse sind und potentiell mit Fernerkundungsmethoden erhoben werden könnten.

Im Folgenden konzentriert sich die Arbeit auf jene Parameter, die mittels ALS-Daten für den Bereich der Forsteinrichtung generiert werden können.

Dabei gilt es vor allem folgende forschungsleitende Frage zu beantworten: „Welche primären Produkte werden aus ALS-Daten generiert und welche, für den Forsteinrichtungsprozess relevanten, sekundären Parameter können daraus gewonnen werden?“

Nach der ausführlichen Abhandlung dieser ersten zentralen Forschungsfrage in Kapitel 3 und 4, steht im zweiten Teil der Arbeit die Frage nach der betrieblichen Anwendbarkeit von ALS-Daten im Zentrum des Forschungsinteresses.

Hierbei wird vor allem die Genauigkeit, mit der die Parameter derzeit mittels ALS erhoben werden können, dokumentiert. Außerdem werden Verfügbarkeit, Kosten und technische Voraussetzungen zur Verarbeitung der Daten als Indikatoren für die betriebliche Anwendung analysiert.

1.2 Methodik und Aufbau der Arbeit

1.2.1 Methodik

Die vorliegende Diplomarbeit ist im Wesentlichen eine Literatuarbeit. Mittels einer Kombination aus systematischer und unsystematischer Literatursuche verschaffte sich der Autor zunächst einen repräsentativen Überblick über den Forschungsstand zum Einsatz der ALS Lasertechnologie in der Forstwirtschaft.

Ausgehend von drei thematisch einschlägigen Dissertationen; „Regionalisierung von Waldinventuren mittels aktiver Fernerkundungstechniken“ von Johannes Breidenbach von der Universität Freiburg aus dem Jahr 2008, „Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren“ von Marco Heurich von der Universität München aus dem Jahr 2006 und „Large Scale Applications of Airborne Laser Scanning for a Complex Mountainous Enviroment“ von Markus Hollaus, 2006 an der Technischen Universität Wien, wurde eine

umfassende Literaturrecherche betrieben, die einen möglichst hohen Grad an Vollständigkeit anstrebte.

Dabei wurden unterschiedliche Quellen der Literaturrecherche herangezogen: Bibliotheken, elektronische Online-Datenbanken, einschlägige Journals und diverse Publikationen auf Webseiten universitärer Fernerkundungsinstitute.

Weiters fanden am Anfang der Recherchetätigkeit informelle Gespräche mit Forschenden der BOKU Wien (Institut für Waldwachstum; Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation) der TU-Wien (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) und des BFW (Institut für Waldinventur) statt. In diesen wurde der aktuelle Stand der Forschung zum Thema ALS in Österreich erhoben. Zur Feststellung der Datenverfügbarkeit wurde ein weiteres informelles Gespräch mit einem Mitarbeiter des Geoportals GIS-Steiermark (Abteilungsgruppe Landesbaudirektion – Stabstelle Geoinformation) geführt.

Anhand des Studiums der recherchierten Literaturquellen gelang es, einen breiten Einblick über den aktuellen Forschungsstand des für die Forstwirtschaft relevanten Bereichs des ALS zu gewinnen. In dieser Arbeit soll den Lesern ein Überblick über diesen gegeben werden.

1.2.2 Aufbau der Arbeit

Das erste inhaltliche Kapitel (Kapitel 2) bettet die Arbeit in den größeren Kontext der Fernerkundung in der Forstwirtschaft ein. Hierzu werden zwei Studien vorgestellt, in denen die Anforderungen verschiedener Akteure der Forstwirtschaft an die Fernerkundung qualitativ erhoben wurden. Dies dient als Ausgangspunkt für die Analyse der Möglichkeiten von ALS.

Kapitel 3 widmet sich sodann den Grundlagen des ALS. Hierbei wird kurz auf die technischen Eigenschaften sowie auf die Vorteile gegenüber konventioneller Fernerkundungsmethoden eingegangen. Weiters werden die Funktionsweise des Sensors und die aus den Rohdaten gewonnen Primärprodukte vorgestellt.

Das anschließende Kapitel 4 zeigt Parameter, die mit der ALS-Technologie generiert werden können und die potenziell in der Forsteinrichtung eingesetzt werden. Ausgehend von der einzelbaum- und flächenbezogenen Analyse von ALS-Daten werden die für die

Forsteinrichtung relevanten Standortmerkmale und Bestandesparameter beschrieben. Im Folgenden werden weitere Einsatzmöglichkeiten von ALS-Daten im Rahmen des Forsteinrichtungsprozesses angeführt. Dazu zählen die Einteilung von Betriebsflächen nach Wuchsklassen, die unterstützende Wirkung digitaler Gelände- und Oberflächenmodelle in der Kartografie sowie in der Planung von Erschließung und Holzernte.

Kapitel 5 stellt den Analyserahmen zu den in Kapitel 4 beschriebenen Parametern dar. Darin wird hauptsächlich die Genauigkeit, mit der die einzelnen Parameter mit Hilfe der ALS Technologie erhoben werden können, angeführt. Außerdem werden Kosten von ALS-Daten und deren Verarbeitungsprogrammen, dessen Verfügbarkeit und technische Voraussetzungen für die Anwendung von ALS-Daten im betrieblichen Informationssystem umrissen.

2 ERWARTUNGEN DER FORSTWIRTSCHAFT AN DIE FERNERKUNDUNG

Einleitend werden im ersten inhaltlichen Kapitel dieser Diplomarbeit die Bedürfnisse der modernen Forstwirtschaft an die Fernerkundung dargestellt.

In der vom Fernerkundungsinstitut der Albert-Ludwigs Universität Freiburg veröffentlichten Studie stellen Koch et al. (2008) eine Verlagerung vom Bedarf rein forstlich-ökonomischer Parameter, hin zu einer ganzheitlichen Betrachtung des Ökosystems Wald fest. Als wesentlichen Grund hierfür nennen die Autoren internationale, umweltpolitische Übereinkommen, die durch ihren Einfluss, detailliertes Umweltmonitoring auf nationaler Ebene notwendig machen. Auf nationaler Ebene fordern außerdem die auf den Absatzmarkt der Forstwirtschaft bezogenen Informationen erhöhten Inventurbedarf. Aktuelles Beispiel hierzu ist das Potential der Biomassegewinnung aus heimischen Wäldern, zur Produktion erneuerbarer Energie. Aus allen seitens nationaler und internationaler Stakeholder geforderten Informationen, fassen Koch et al. (2008) die Quantifizierung des Volumens und des Zuwachses nachwachsender Rohstoffe zur Energiegewinnung (Biomassepotential) und die automatische Klassifikation unterschiedlicher Bedeckungsformen (z.B.: Wald, Ackerland,

Gewässer), sowie deren Quantifizierung und räumliche Abgrenzung zueinander, als Bereiche der Forstwirtschaft zusammen, in denen Fernerkundungsdaten gefragt sind. Weiters soll die Fernerkundung Informationen zu biotischen und abiotischen Schadereignissen liefern. Im Bereich des Möglichen sollen die Auswirkungen des anthropogenen Schadstoffeintrags und sein Einfluss auf das Klima (Überschwemmungen, Dürre, Waldbrand, etc.) analysiert werden.

Auf Ebene des Forstbetriebes bedarf es nach Koch et al. (2008) Daten, die ökonomisch-nachhaltiges Wirtschaften gewährleisten. Fernerkundungsdaten sollten weiters zur Strukturierung des Forstbetriebes dienen. Dabei sehen sie vor allem Einsatzmöglichkeiten im Bereich der betrieblichen Raumplanung, also der Einteilung von Betriebsflächen nach deren Funktion (Schutz, Nutzung, Erholung und Wohlfahrt).

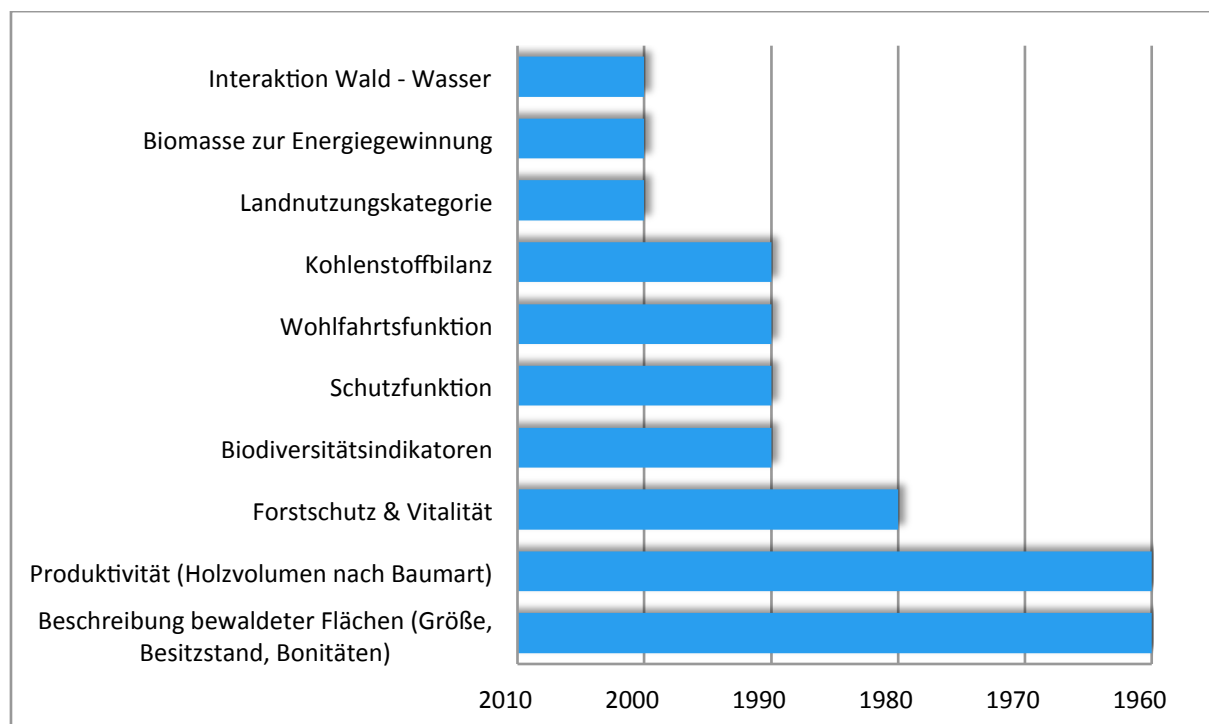


Abb. 1: Informationsbedarf der Forstwirtschaft im Laufe der letzten fünf Jahrzehnte; nach Koch et al. (2008)

Felbermeier et al. (2010) von der Technischen Universität München (Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung), analysieren den Bedarf an Fernerkundungsdaten unter Akteuren der Forstwirtschaft auf regionaler und lokaler Ebene. Auf regionaler Ebene wird von den befragten Personen zu folgenden Themen erhöhter Informationsbedarf festgestellt: Nachhaltigkeit, Forstschutz, forstliche Planung, Naturschutz,

Öffentlichkeitsarbeit, Beratungstätigkeit und Grundlageninformation für finanzielle Förderungen.

Zur Gewährleistung einer nachhaltigen Forstwirtschaft werden Parameter gewünscht, die normalerweise bei konventionellen Inventuren erhoben werden. Diese sind beispielsweise die bestockte Fläche, Kalamitätsflächen, Altersklassenverteilung, Baumartenzusammensetzung, vertikale, sowie horizontale Diversität, Vorratsverhältnisse, Zuwachs, Bestandeshöhe, Bestandesdichte.

Im Bereich des Forstschutzes fordern die Stakeholder Möglichkeiten, Monitoring über große Flächen zu betreiben. Bis dato kann das Forstpersonal aus Zeitgründen den Schädlingsbefall nur stichprobenartig kontrollieren. Hier werden von der Fernerkundung Methoden verlangt, welche ein rasches, flächendeckendes Erkennen von Schädlingsnestern ermöglichen. Des Weiteren sehen die befragten Akteure Potential in der Verwendung von Fernerkundungsdaten als Eingangsdaten für Modelle, zur Darstellung möglicher Befallsszenarien. Dies soll der besseren Prognose und Bekämpfung dienen. Um Massenvermehrungen von Schädlingen zu unterbinden, werden besonders während den kritischen Phasen der Populationsentwicklung, Fernerkundungsdaten im wöchentlichen Intervall benötigt. Diese sollten Auskunft über die Befallsintensität, betroffene Baumarten, Totholzanteil und Belaubungszustand auf Bestandesebene geben.

Um im Fall biotischer und abiotischer Kalamitäten das Schadausmaß ehest möglich erheben zu können, werden schnell generierbare Daten benötigt. Kerninformationen, die dabei geliefert werden sollen, sind die Größe der betroffenen Fläche und das angefallene Holzvolumen.

Im Hinblick auf die forstliche Planung benötigt die Forstwirtschaft Werkzeuge, die das Kartieren bewaldeter und unbewaldeter Flächen, sowie das Erkennen unterschiedlicher Waldstrukturen ermöglichen. Diese sollen zur funktionalen Einteilung von Waldflächen dienen.

Des Weiteren wurde Bedarf an Fernerkundungsdaten im Bereich der Schutzwaldbewirtschaftung festgestellt. Hier werden Daten benötigt, die Aufschluss über Baumartenzusammensetzung, Vitalität, Bodenvegetation, Schneehöhe und Blößen geben. Im Optimalfall sollte die Neuaufnahme der Daten in einem relativ kurzen 5 Jahres Intervall stattfinden.

Auf den Naturschutz bezogen, gibt es Bedarf an Daten über das angefallene Totholzvolumen, sowie topographische und hydrologische Auswertungen. Es werden Fernerkundungsdaten gefordert, welche die Fragmentierung von Biotopen und deren Vernetzung, zum Beispiel durch Windschutzgürtel darzustellen vermögen.

Im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit könnten Fernerkundungsdaten vor allem in der Umgebung von Ballungsräumen dazu behilflich sein, der Bevölkerung die Notwendigkeit forstlicher Maßnahmen (z.B.: Holzernte) quantitativ und visuell näherzubringen.

Ein weiteres Einsatzgebiet wäre die Überprüfung der Rechtmäßigkeit von Förderungsbezügen, wobei hier Fernerkundungsdaten Auskunft über Flächengröße (mit und ohne Bestockung) und Baumartenzusammensetzung liefern sollten.

Auf lokaler Ebene entsteht für größere Forstbetriebe ein gesteigerter Bedarf an Fernerkundungsdaten, vor allem durch das Auftreten großflächiger Kalamitäten sowie durch Beratungstätigkeit für Forstbetriebe kleinerer und mittlerer Größe. Die von Felbermeier et al. (2010) befragten forstlichen Stakeholder sollten aus 63 zur Wahl stehenden Parametern, die für sie interessantesten nennen. Der von 12% der Befragten und somit meistgenannte Parameter ist die Baumart. 11% wünschen sich Auskunft über die Größe von Wald- und Kalamitätsflächen. Von 9% werden Methoden zur automatischen Abgrenzung von Wald- und Kalamitätsflächen gewünscht. Ebenfalls 9% nennen die Bestandeshöhe. Weitere genannte Parameter sind: Holzvorrat, Bestandesalter, Bestandesdichte, Information zur Lage der Erschließung, Erkennung von Laub- und Nadelbaumarten, Sukzessionstypen, Vitalität, Schädlingsbefall durch Insekten, Waldlücken, Verjüngung und Baumartenmischung.

Da die vollständige Analyse aller in diesen Studien geforderten Informationen den Rahmen einer Diplomarbeit sprengen würde, wurde eine notwendige Eingrenzung vorgenommen. In vorliegender Arbeit wird somit vor allem darauf eingegangen, welche der Forsteinrichtung dienlichen Parameter aus den ALS-Daten gewonnen werden können.

3 GRUNDLAGEN DES AIRBORNE LASERSCANNING

Um die, für das Verständnis der Einsatzmöglichkeiten von ALS-Daten in der Forsteinrichtung, notwendige Grundlage zu schaffen, werden im folgenden Kapitel die Funktionsweise des Laserscanner-Systems und die primär aus den Rohdaten erzeugbaren Produkte vorgestellt.

Laserscanning ist eine in der Fernerkundung schon länger unter den Begriffen Lidar (light detection and ranging), bzw. Laser-Radar (radio detection and ranging) bekannte Aufnahmetechnik (Kraus 2004). Laser emittieren einen Lichtstrahl, der von der Erdoberfläche oder sich darauf befindlichen Objekten reflektiert wird, weswegen man sie in der Fernerkundung in die Gruppe der aktiven Sensoren einordnet (Wagner et al. 2003). Das stellt den grundlegenden Unterschied zur klassischen Photogrammetrie dar, bei der passive Sensoren externe Energie in Form von Sonnenlicht zur Bilderstellung benötigen. Flugzeuggetragene Laserscanning-Aufnahmen sind somit zu jeder Tages- und Nachtzeit möglich. Wolken hingegen stellen einen limitierenden Faktor bei der Aufnahme dar, da sie Streuvorgänge in der für das Laserscanning verwendeten nahen Infrarotstrahlung verursachen und somit nicht durchdrungen werden können. Braucht man in der Photogrammetrie noch mindestens zwei, sich überlappende Luftbilder, um ein Geländemodell zu erstellen, so kommt Laserscanning mit einem einzigen Aufnahmestandort aus. Höhenmessungen mit dem Laser setzen diffuse Reflexion an der Geländeoberfläche voraus. Diese Technologie liefert selbst auf relativ texturlosen Oberflächen (z.B. Acker-, Beton-, Sandflächen) verwertbare Höhendaten (Kraus 2004). Generell ermöglicht Laserscanning im Vergleich zu konventionellen Erhebungsmethoden (z.B. terrestrische Vermessung, Stereo-Photogrammetrie) eine rasche und großräumige Datenerhebung mit geringem Zeit- und Kostenaufwand. Seit den 1990er Jahren unterliegt es daher einer rasanten technischen Weiterentwicklung (Pfeifer 2007).

3.1 Funktionsweise

Abtastung, Sende- & Empfangseinheit:

Ein Laserscanner besteht, vereinfacht dargestellt, aus drei Elementen (Abb. 2). Der Steuerungs- und Messeinheit, einem Sender und einem Empfänger. Der Sender, ein Laser,

schickt einen Impuls aus, welcher von der Geländeoberfläche reflektiert wird und dann zurück zum Empfänger, einer Photodiode, gelangt. Mittels einer Ablenkungseinheit, die sich am Sender befindet, wird der Laserstrahl quer zur Flugrichtung gelenkt. Somit wird der sich in Flugrichtung befindliche Geländestreifen abgetastet (Wagner et al. 2003). Um flächendeckende Informationen über große Gebiete zu erlangen, müssen mehrere, parallel verlaufende Geländestreifen beflogen werden. Um Lücken im Datensatz zu verhindern, müssen sich die gescannten Geländestreifen überlappen. Zur Berechnung der Koordinaten reflektierter Objekte und Geländeoberflächen bedarf es der Kenntnis von Strahlrichtung sowie Position des Sensors (Katzenbeisser et al. 2004).

Grundsätzlich gibt es zwei Laserscannersysteme. „*Continuous-Wave*“ Scanner, bei denen die Entfernung zu einer Oberfläche über den Vergleich der ausgesandten zur empfangenen Strahlungsintensität ermittelt wird, und „*Pulsed-Lasers*“, bei denen die Distanzmessung zu einer Oberfläche über die Ermittlung der Laufzeit des Lichtimpulses passiert. Die aktuell für das flugzeuggetragene Laserscanning verwendeten Systeme basieren alle auf dem Prinzip des „*Pulsed-Lasers*“ (Wagner et al. 2003).

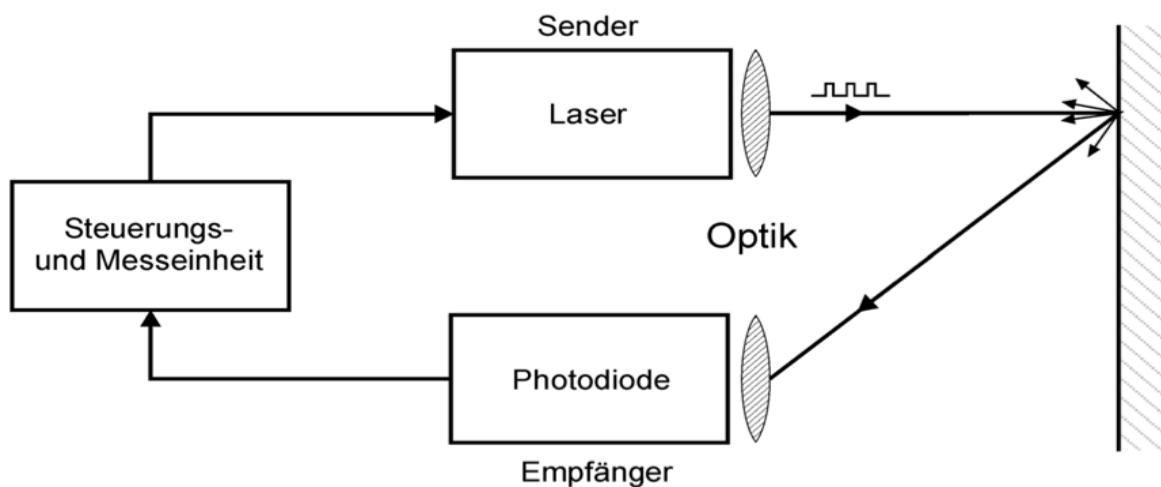


Abb. 2: Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche (Wagner et.al. 2003).

Pulsed-Laser zeichnen mehrere Impulse auf. Der erste Impuls (*First pulse*) stellt Reflexionen der Vegetationsoberfläche oder von Gebäuden dar. Der letzte Impuls (*Last pulse*) wird zur Berechnung von Geländemodellen herangezogen (Abb. 3). Neue „*Full-Waveform*“ Laserscanner können mehrere dazwischenliegende Reflexionen, bis hin zum gesamten Signalverlauf aufzeichnen. Daraus lassen sich neben einem Gelände- und Oberflächenmodell auch Schlüsse auf vertikale Bestandesstrukturen ziehen (Heurich 2006).

Allen Aufnahmesystemen ist gemeinsam, dass sie die Reflexionen als dreidimensionale Rohpunktwolke mit X/Y/Z-Werten aufnehmen. Mit Hilfe von Softwareprogrammen wird aus dieser Punktwolke ein Modell der abgetasteten Oberfläche berechnet (Breidenbach 2008).

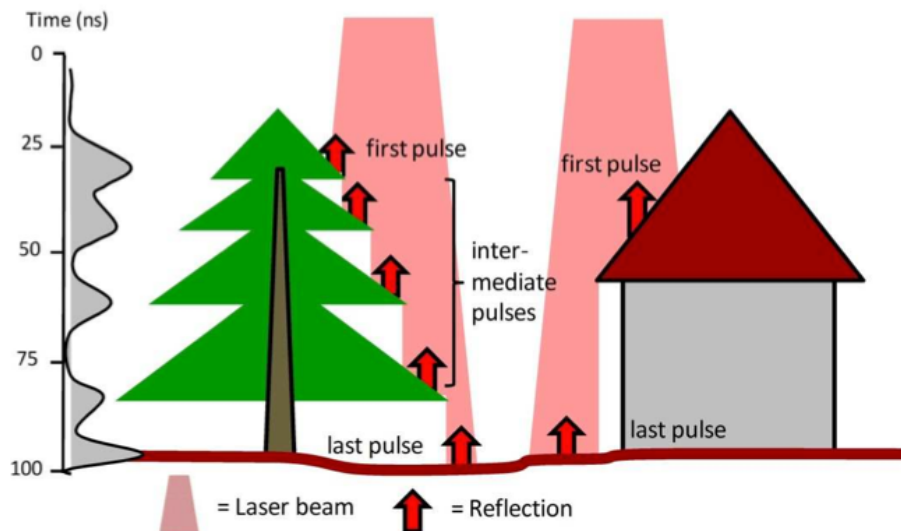


Abb. 3: Schematische Darstellung der Interaktion zwischen Laserstrahl der Erdoberfläche und sich darauf befindlichen Objekten (Heinzel 2011).

3.2 Primäre Produkte

Digitale topographische Modelle:

Laserscanner ermöglichen, wie oben beschrieben, ein digitales Abbild der Oberfläche oder sich darauf befindlicher Objekte zu konstruieren. Je nach Beschaffenheit weisen diese Objekte ein unterschiedliches Reflexionsverhalten auf. Baumkronen neigen dazu, mehrere Rückmeldungen auf einen vom Laser ausgesandten Impuls zu produzieren bzw. manchen Impulsen das Durchdringen des Kronendachs bis auf die Bodenschicht zu ermöglichen. Die Lasersysteme sind in der Lage, Mehrfachreflexionen zu unterscheiden, wodurch sich in bewaldeten Gebieten, Geländemodelle und Oberflächenmodelle errechnen lassen. Wichtig für die Erstellung eines Geländemodells ist zum Beispiel die Durchdringungsrate der Laserimpulse durch das Kronendach. Folglich unterscheidet sich diese je nach Bewuchsdichte, Jahreszeit und Baumartenzusammensetzung (Ackermann 1999). Gerade in bewaldeten Gebieten ist der Winkel, mit dem die Laserstrahlen vom Sender emittiert werden, von großer Bedeutung, da dieser die Durchdringungsrate durch die Vegetation bestimmt. Bei einem spitzeren Scanwinkel erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass die

emittierten Laserstrahlen auf den Boden treffen. Je breiter der Scanwinkel ist, desto mehr Laserstrahlen werden von der Vegetation abgefangen. Somit treffen vor allem Strahlen, die auf der Flugstreifenmitte liegen, die Bodenoberfläche und können zur Berechnung digitaler Geländemodelle herangezogen werden (Heurich 2006). Trifft ein Impuls normal auf eine bewaldete Oberfläche, so liegt die Durchdringungsrate von Nadelwäldern bei 20 – 40%, die von Laubwäldern außerhalb der Vegetationsperiode bei ungefähr 70%. Trotz dieser, vor allem bei Nadelwäldern, eher geringen Durchdringungsrate ist die Laserscanning Technologie über bewaldeten Flächen zur Erstellung von Gelände- und Oberflächenmodellen sehr interessant (Ackermann 1999).

3.2.1 Digitales Geländemodell

Das digitale Geländemodell (DGM, engl. *Digital Terrain Model*, DTM) beschreibt die Geländeoberfläche ohne Kunstbauten und Vegetation (Kraus 2004). Man versteht darunter die digitale Erfassung der Geländeoberfläche mittels räumlicher X/Y/Z-Koordinaten. Die Darstellung erfolgt in Form von Dreiecksnetzen oder Gittern. Das DGM ermöglicht unter anderem die Ableitung von Höhenlinienkarten sowie die Berechnung von Aushiebsmassen und Neigungen (Bill & Zehner 2001). Zu ihrer Erstellung werden die *Last-pulse*-Daten aus der ALS Punktwolke verwendet. Hierbei handelt es sich um jene Punkte, die eine längere Laufzeit aufweisen und somit als Bodenpunkte gewertet werden, während Punkte die auf Bäumen, Gebäuden, etc. liegen aus dem Datensatz eliminiert werden (Kraus 2005).

3.2.2 Digitales Oberflächenmodell

Als digitales Oberflächenmodell (DOM, engl. *Digital Surface Modell*, DSM) bezeichnen Bill und Zehner (2001) die bei Laserscanning-Befliegungen erhobene „äußerste Umhüllende“. Das DOM stellt, im Unterschied zum DGM, die Oberfläche unter Einbeziehung von Kunstbauten und der Vegetation dar. Zu ihrer Erstellung werden die *First-pulse*-Daten aus der ALS-Punktwolke verwendet. (Kraus 2004).

3.2.3 Normalisiertes digitales Oberflächenmodell

Durch Subtraktion des DGM vom DOM erhält man ein digitales Bestandeshöhenmodell, auch normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDOM, engl. Canopy Height Model, CHM) genannt (Breidenbach 2008).

$$nDOM = DOM - DGM$$

Es handelt sich beim nDOM also um einen aus der Differenz von *First-pulse*- zu *Last-pulse*-Werten generierten Datensatz. Um systematische Fehler bei der Berechnung des nDOM zu vermeiden, werden ebene, vegetationslose Flächen, wie beispielsweise Straßen, Flachdächer oder Sportplätze als Referenzpunkte zur Kalibrierung der Daten herangezogen (Hyypä et al. 2008).

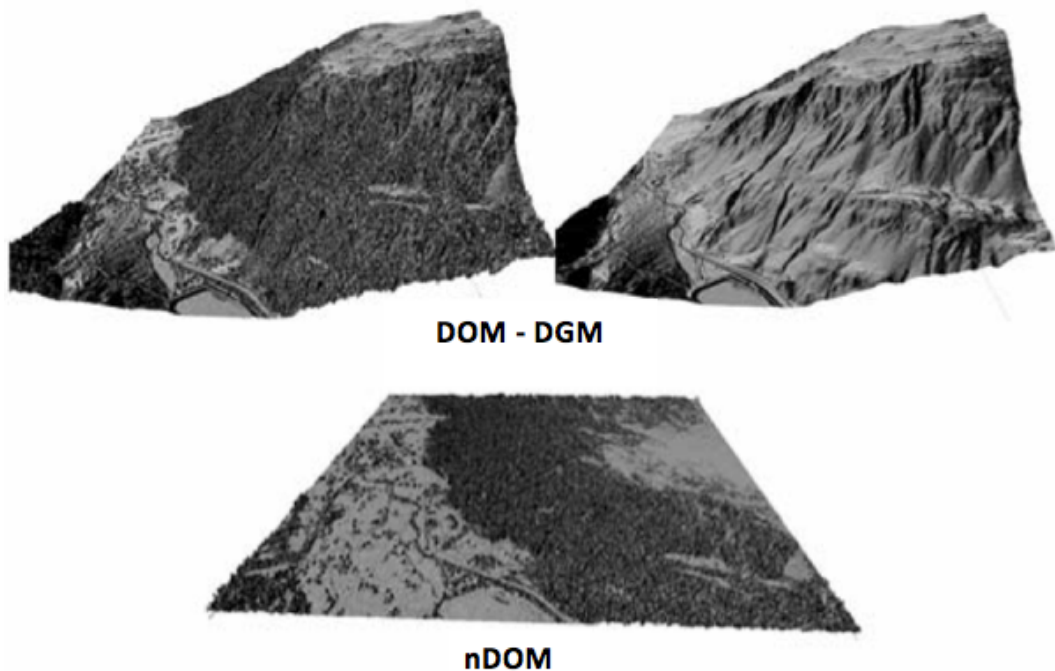


Abb. 4: Darstellung eines digitalen Oberflächenmodells (DOM), digitalen Geländemodells (DGM) und eines normalisierten digitalen Oberflächenmodells (nDOM). Das nDOM errechnet sich aus Subtraktion des DGM vom DOM (Maier et al. 2006).

Laubbaumblätter absorbieren Strahlung im nahen Infrarot sehr stark. Daher ist es günstiger, Daten zur Berechnung eines DGM in den Wintermonaten zu erheben. Soll jedoch ein DOM berechnet werden, so sind Sommerbefliegungen zu bevorzugen, da außerhalb der Vegetationsperiode in Laubwaldbereichen die Laserstrahlen unterschiedlich weit in das Kronendach eindringen und somit die Baumhöhe tendenziell unterschätzen (Heurich 2006).

4 ALS IN DER FORSTEINRICHTUNG

Nachdem die primär aus ALS-Daten erzeugbaren Produkte vorgestellt wurden, ist nun auf die daraus ableitbaren Parameter einzugehen. Diese können, wie im Folgenden gezeigt wird, entweder direkt aus der 3D-Punktwolke oder aus den oben beschriebenen Produkten DGM, DOM und nDOM erzeugt werden.

4.1 Abgeleitete Parameter

Die Qualität der sekundär aus der 3D-Punktwolke und den Rasterdaten (DGM, DOM und nDOM) gewonnenen Parameter ist von der Genauigkeit der angewandten Algorithmen abhängig. ALS-Daten finden seit den 1990er Jahren Verwendung in der skandinavischen Forstwirtschaft. Die im borealen Raum gegebenen Verhältnisse hinsichtlich der vorkommenden Baumarten, deren Durchmischung, der vertikalen und horizontalen Bestandesstruktur sowie der topographischen Gegebenheiten, erleichtern die Erstellung entsprechender Berechnungsmodelle. Aus den oben genannten Gründen stellt sich die Entwicklung passender Algorithmen für den mitteleuropäischen Raum schwieriger dar.

Die für den Forsteinrichtungsprozess relevanten Informationen werden gewöhnlicher Weise anhand von Bestandesinventuren im Rahmen der Taxation erhoben. Ziel der Inventurmaßnahmen und schließlich der Taxation ist es, einen Überblick über den Zustand des Waldes und somit über die vorhandenen Ressourcen zu gewinnen. Im Folgenden werden Parameter beschrieben, die bei gängigen Forstinventuren aufgenommen werden oder diese ergänzen könnten. Bei der Auswahl der Parameter wurde auf die aktuell im Rahmen der Taxation einer Forsteinrichtung aufgenommenen Informationen Bezug genommen und zunächst zwischen Standorts- und Bestandesmerkmalen differenziert.

4.1.1 Standortsmerkmale

ALS-Daten eignen sich zur Generierung von Höhenschichtlinien. Anhand dieser kann auf Seehöhe, Neigungsunterschiede sowie Exposition geschlossen werden. Das DGM liefert allem voran Informationen über Topografie und je nach Auflösung auch über das Kleinrelief. Beispielsweise können anhand der Geländestruktur Hangrutschungen erkannt werden. Eine Besonderheit stellen aus ALS-Daten berechnete Geländeneigungs-Modelle dar, welche

verschieden starke Neigungen in unterschiedlichen Graustufen wiedergeben und somit einen plastischen Eindruck der standörtlichen Gegebenheiten vermitteln können.

Mit Kenntnis der Hangneigung und unter der Berücksichtigung der technischen Grenzwerte der Befahrbarkeit sowie der lokalen Bodenverhältnisse, können mögliche Erschließungslinien geplant werden.

Weiters ermöglichen Geländeneigungsmodelle die ungefähre Einteilung der Betriebsfläche in Schlepper- und Seilgelände. Im Rahmen der Holz- und Biomasseaufkommensstudie (Schadauer und Neumann 2008) werden beispielsweise Flächen mit einer Hangneigung $\leq 40\%$ dem Schleppergelände und Flächen mit einer Hangneigung $> 40\%$ dem Seilgelände zugeordnet.

Kenntnisse über die Exposition lassen wiederum Rückschlüsse über Sonneneinstrahlung, Wasserhaushalt und Prädisposition hinsichtlich Windwurfereignissen zu (vgl. Götz und Schmidtke 2006).

4.1.2 Bestandesparameter

Eingangs sollen die zwei Betrachtungsebenen, der einzelbaum- und der flächenbezogene Ansatz, zur Schätzung von Bestandesparametern aus ALS-Daten erläutert werden. Anschließend ist näher auf die einzelnen Parameter einzugehen.

4.1.2.1 Einzelbaum- und flächenbezogener Ansatz

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, um von den ALS-Rohdaten auf forstlich relevante Parameter zu schließen.

Diese sind das flächenbezogene oder plotweise Verfahren, in der englischsprachigen Literatur auch „*Area-Based-Method*“ genannt und das auf Einzelbaumerkennung abzielende Verfahren, auch „*Individual-Tree-Based-Method*“ genannt (Yu et al. 2010).

Welche Methode angewandt wird, hängt vor allem von der Punktdichte der Rohdaten ab. Dazu werden die Laserdaten in zwei Kategorien aufgeteilt. Die Literatur unterscheidet zwischen hochauflösenden Daten, mit einer Punktdichte von über einer Reflexion/m² und gering auflösenden Daten mit weniger als einer Reflexion/m² (Magnusson et al. 2007).

Hoch auflösende ALS-Daten ermöglichen Auswertungen auf der Einzelbaumebene. Hierbei erfolgt, um die einzelnen Individuen zu separieren, oftmals zuerst eine Segmentierung der einzelnen Baumkronen. Zu den somit abgegrenzten Individuen werden die direkt ableitbaren Parameter - Baumhöhe, Kronendurchmesser und Kronenlänge - berechnet. Diese Werte dienen als Eingangsvariablen zur Schätzung sekundärer Parameter wie Holzvolumen und Brusthöhendurchmesser. Zur Kalibrierung der verwendeten Algorithmen bedarf es einer relativ großen Menge an Referenzbäumen. Ein Umstand, der teure Inventurarbeiten mit sich bringt. Geringer auflösende ALS-Daten werden für flächenbezogene Verfahren herangezogen. In diesem Fall wird die räumliche Verteilung der Baumkronen und ihrer Höhen berechnet, ohne jedoch einzelne Individuen abzugrenzen (Breidenbach 2008).

Eine grundsätzliche Gegenüberstellung beider Ansätze ist in Hyypä et al. (2008) zu finden. Welche der beiden Methoden zur Datenaufbereitung gewählt wird, hängt neben der Punktdichte vom Informationsanspruch des Endnutzers ab.

Während konventionelle Forstinventuren primär auf die Quantifizierung des Holzvorrates abzielen (Sekot 2010, 131), können Auswertungen auf Einzelbaumebene beispielsweise zur Analyse der Konkurrenz zwischen den einzelnen Individuen herangezogen werden. Weiters kann das Bestandesvolumen durch Summieren der Einzelbaumvolumina erhoben werden.

Pretzsch (2002, 263) versteht Forstbestände als räumlich und zeitlich dynamische Systeme, die sich aus einem Mosaik von Einzelbäumen zusammensetzen. Hinsichtlich der Modellierung von Waldbeständen, erwartet er einen Paradigmenwechsel von der Bestandes-bezogenen Betrachtung (Mittelwerte, Summen, Häufigkeitsverteilungen) hin zu Individuen-bezogenen Ansätzen.

Bei Berücksichtigung des Trends zu ungleichaltrigen, heterogenen Beständen und Dauerwaldgesellschaften, sollte den einzelbaumbezogenen Ansätzen besonderes Augenmerk geschenkt werden.

Nach eingehender Literaturrecherche ist allerdings festzustellen, dass im Großteil der aktuellen ALS-Studien der flächenbezogene Ansatz behandelt wird. Eine Ursache hierfür könnte sein, dass die Entwicklung der Lasertechnologie besonders in Skandinavien vorangetrieben wurde. Die dort vorherrschenden Voraussetzungen hinsichtlich Topografie, Baumartenspektrum und Vegetationsstruktur erlauben großflächigere Schätzungen und

somit den Einsatz der auf Bestandesebene bezogenen Verfahren. Mitteleuropäische Wälder gestalten sich vergleichsweise komplexer in ihrem vertikalen Aufbau, sowie der Baumartenvielfalt.

4.1.2.2 Baumhöhe

Die Messung der Baumhöhe ist von zentraler Bedeutung im Forsteinrichtungsprozess.

Zum einen wird im Rahmen von Stichprobeninventuren – in Form von WZP - die Höhe des Zentralstamms von jeder in der WZP vorkommenden Baumart gemessen, um diese dann in die Einheitshöhenkurve einzuhängen. Zum anderen werden Oberhöhen gemessen, um die Bonität eines Standorts festzustellen (Sekot 2010, 147).

Weiters dient in modernen Ertragstafeln nicht mehr das Bestandesalter, sondern die Bestandeshöhe zur Festlegung der Durchforstungsintervalle. Sie ist somit ein Indikator für die Dringlichkeit von Pflegeeingriffen (Kramer 1988).

Folglich ist die korrekte Höhenermittlung von großer Bedeutung für die Vorratsberechnung von Beständen.

Die Baumhöhe stellt den fundamentalen, aus ALS-Daten erhobenen Parameter dar. Der zusammenfassenden Literatur (Hyypä et al. 2008) ist zu entnehmen, dass die Schätzung der Baumhöhe von Beginn der Laserscanning Entwicklung an im Mittelpunkt diverser Untersuchungen stand. Bei diesem Parameter lassen sich mittels ALS sowohl Schätzungen auf Bestandesebene, als auch auf Einzelbaumebene durchführen.

(1) Höhenschätzung auf Einzelbaumebene:

Höhen einzelner Individuen können entweder aus den ALS-Rohdaten, also der Punktwolke mit ihren X/Y/Z-Werten (Buddenbaum 2010) oder den Pixelwerten eines nDOM (Hollaus 2006) gewonnen werden. In einem ersten Schritt müssen bei beiden Methoden die lokalen Maxima identifiziert werden. Diese definieren den obersten Punkt eines Baumes. Bei Verwendung der Punktwolke liefert der Z-Wert den Höhenwert eines Punktes über dem Meeresniveau (NN) (Buddenbaum 2010). Wird die Punktwolke benutzt, so sind naturgemäß die lokalen Maxima bei Nadelbäumen einfacher zu finden, als bei Laubbäumen, bei denen beispielsweise Reflexionen starker Äste die korrekte Identifizierung des Wipfels erschweren können.

Um die Höhe eines Baumes zu schätzen, muss der unter dem Wipfel liegende Bodenpunkt bekannt sein. Der entsprechende Bodenpunkt kann aus der Punktwolke interpoliert werden (Buddenbaum 2010).

Einfacher ist jedoch die, von Hollaus (2006) und Buddenbaum (2010) angewandte Methode, die Geländehöhe unter dem Wipfel aus dem DGM zu entnehmen. Die Baumhöhe errechnet sich dann bei beiden Ansätzen aus der Differenz des Wipfel-Höhenwertes und des Bodenpunkt-Höhenwertes.

Straub (2010) untersucht die Ableitung der Oberhöhe aus Höhenperzentilen. Er stellt dazu einen Vergleich der Feldaufnahmen mit Schätzungen aus der Punktwolke und aus dem nDOM an.

Grundsätzlich ist die Oberhöhe die Grundflächenmittelhöhe einer, je nach Definition variierenden, bestimmten Anzahl stärkster Bäume pro ha.

Kramer und Akça (2008, 118) definieren die Spitzenhöhe als die Grundflächenmittelhöhe der 100 stärksten Bäume pro ha. Straub (2010) geht vereinfachend davon aus, dass die 100 höchsten Individuen pro ha automatisch den stärksten BHD aufweisen. Als Ergebnis zeigt die 90. Höhenperzentile des nDOM die stärkste Korrelation mit den Feldaufnahmen.

(2) Flächenbezogener Ansatz:

Hollaus (2006) untersucht die Abschätzung der Grundflächen-gewichteten Lorey'schen Mittelhöhe aus ALS-Daten. Auch für diese Auswertung kann entweder die Punktwolke oder das nDOM herangezogen werden. Für beide Herangehensweisen wird die Lorey'sche Mittelhöhe anhand von Höhenperzentilen geschätzt.

Auch hier findet somit keine tatsächliche Gewichtung über die Grundflächen statt.

Um einer möglichen Beeinflussung des Baumhöhenmodells durch Felsbrocken oder niedriger Vegetation entgegen zu wirken, legt Hollaus (2006) einen Schwellenwert für die Vegetationsuntergrenze fest. Dazu testet er den Einfluss des Schwellenwerts auf der Höhe von 0 m, 2 m und 4m. Die Besonderheit dieses Verfahrens liegt in der Verwendung von Winkelzählprobeflächen als Referenzflächen.

Damit wird ein bei Stichprobeninventuren und der Forsteinrichtung gängiges Arbeitsverfahren zur Erfassung der terrestrischen Referenzdaten eingesetzt. Problematisch ist jedoch, dass der Durchmesser und die Form der WZP je nach BHD der Bäume variiert. Da

bei gewöhnlichen WZP auch die Koordinaten der Probestämme nicht eingemessen werden, ist schlussendlich nur die Lage des WZP-Mittelpunktes bekannt. Dies erschwert eine exakte Zuordnung der WZP-Bäume zu den im nDOM oder der Punktwolke abgebildeten lokalen Höhenmaxima.

Hollaus (2006) berücksichtigt dieses Problem. Er untersucht, welcher, über das nDOM gelegte Referenzflächen-Durchmesser, die terrestrischen WZP-Werte am besten annähert. Dazu testet er Referenzflächen mit einem Durchmesser von 21 / 23 / 25 / 27 / 29 m.

4.1.2.3 Bestandesvorrat

Der Bestandesvorrat wird in konventionellen Forsteinrichtungen über die Auswertung der Stichprobeninventurdaten errechnet.

Parameter, die in diese Auswertung einfließen, sind Stammzahl, BHD bzw. Grundfläche, Höhe und Formzahl. Zur Vorratsschätzung mit Ertragstafeln sind weiters Kenntnisse über Bestandesalter und Baumartenanteile notwendig (Kramer und Akça 2008, 127 ff).

Zur Schätzung von Volumina auf Bestandesebene mittels ALS wurden mehrere Ansätze entwickelt. Vier davon werden im Folgenden in Anlehnung an Straub (2010) und Hollaus (2006) vorgestellt: (1) multiple Regressionen, (2) nichtparametrische Verfahren, am Beispiel der *k*-nearest neighbour (*k*-NN) Methode (3) ertragstafelbasierte Verfahren sowie (4) lineare Holzvorratsmodelle.

(1) Multiple Regressionsanalyse:

Mit der Regressionsanalyse wird versucht, eine abhängige Variable aus einer oder mehrerer unabhängiger Variablen zu erklären. Dabei wird von einem linearen Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable (in diesem Fall der Bestandesvorrat) und den unabhängigen Variablen ausgegangen. Unabhängige Variablen, die aus den ALS-Daten generiert werden, sind Oberhöhe, mittlere Vegetationshöhe, Nadelholzanteil und Kronenschlussgrad. Zur Kalibrierung der ALS-Daten dienen terrestrische Inventurpunkte. Es wird eine Regressionsfunktion aufgestellt, die den Bestandesvorrat aus den unabhängigen Parametern erklären soll (Straub 2010).

Zur Durchführung der Regressionsanalyse werden in der Literatur zwei Vorgangsweisen erwähnt: Straub (2010) beschreibt die schrittweise Vorwärtsselektion, bei der zunächst jene

unabhängige Variable in die Gleichung aufgenommen wird, welche die größte positive oder negative Korrelation mit der abhängigen Variablen aufweist. Die Aufnahme der unabhängigen Variablen in die Gleichung erfolgt nach der Größe des Korrelationskoeffizienten. Unabhängige Variablen werden nur dann zum Modell hinzugezogen, wenn deren Einfluss auf die abhängige Variable signifikant ist. Naesset (2004) nennt die schrittweise Rückwärtsselektion als das geeignetste Verfahren. Hier enthält die Regressionsgleichung zunächst alle unabhängigen Variablen. Schrittweise werden jene Variablen, deren Signifikanzniveau über 0,05 liegt, aus der Gleichung gestrichen.

Wie der Literatur zu entnehmen ist (Straub 2010, Hollaus 2006), wird diese Methode der Vorratsberechnung vor allem im skandinavischen Raum eingesetzt.

Variablen, die in das Regressionsmodell von Straub (2010) aufgenommen wurden, sind: die mittlere Vegetationshöhe, die Oberhöhe und der Nadelbaumanteil an der Gesamtbestockung. Der Kronenschlussgrad, als Dichteparameter, fand beispielsweise keinen Eingang in das Regressionsmodell.

(2) Nicht parametrische Verfahren (k-NN):

Die k -nächste-Nachbar-Klassifikation wird auch als „parameterfreie Methode“ bezeichnet. Dieser Algorithmus wird in der Literatur unter die „*lazy learner*“ eingeordnet. Der Lernprozess besteht darin, dass bei diesem Lösungsverfahren zunächst Muster einer Trainingsmenge abgespeichert werden, die dann zur Klassifikation eines Zielobjekts dienen. Bei diesem Klassifikationsvorgang werden zunächst die k -nächsten Objekte aus der Trainingsmenge herangezogen, deren Attribute bereits bekannt sind und auf das Zielobjekt übertragen. Die Werte näher gelegener Nachbarn werden dabei höher gewichtet (Cebron 2008).

Im Falle der Vorratsschätzung aus ALS-Daten ergibt sich die Trainingsmenge aus jenen Flächen, deren Vorratswerte aus den ALS-Daten mit Vorratswerten aus terrestrischen Inventuraufnahmen verglichen und kalibriert wurden. Diese Referenzdaten werden schließlich herangezogen, um die Vorratsschätzungen auf die dazwischen liegenden Flächen zu extrapolieren (Straub 2010).

(3) Auf Ertragstafeln basierender Ansatz:

Um multiple Regressionsanalysen und nicht-parametrische-Verfahren anwenden zu können, bedarf es der Erhebung von Referenzwerten zur Kalibrierung der ALS-Daten (vgl. Straub 2010, Hollaus 2006). Diese gestalten sich gewöhnlicher Weise zeit-und kostenintensiv. Der Vorteil des Ertragstafelverfahrens liegt laut Straub (2010) darin, dass zur Schätzung des Bestandesvorrats keine aufwändigen Feldarbeiten notwendig sind.

Zur konventionellen Berechnung des Bestandesvorrats aus WZP-Daten mit Hilfe von Ertragstafeln werden folgende Eingangsvariablen benötigt:

- Bestandesalter und Oberhöhe: zur Feststellung der Ertragsklasse und Auswahl der richtigen Ertragstafel.
- Beobachtete Grundfläche G_{ist} und Ertragstafelgrundfläche G_{ET} : zur Berechnung des Bestockungsgrads.
- Baumartenanteile: da die Ertragstafeln von Reinbeständen ausgehen.

ALS-Daten ermöglichen zwar relativ exakte Höhenmessungen, allerdings keine direkten Rückschlüsse auf das Bestandesalter. Folglich ist es nicht möglich, ausschließlich auf Basis von ALS-Daten die richtige Ertragsklasse zu wählen, um schließlich zur Berechnung des Bestockungsgrades die Ertragstafelgrundfläche aus der entsprechenden Ertragstafel festzustellen. Auch die Erkennung verschiedener Baumarten mittels ALS ist zurzeit noch unausgereift. Somit ist es nicht möglich, aus Kombination von ALS-Daten und Ertragstafeln den Bestandesvorrat als Funktion des Bestandesalters zu schätzen.

Anstelle des Bestockungsgrads bedient sich Straub (2010) des Kronenschlussgrads, der aus ALS-Daten abgeleitet werden kann. Dem bereits erwähnten Problem der Baumartenerkennung mit Laserscanning, begegnet er damit, dass lediglich eine Unterscheidung zwischen Nadel- und Laubwaldflächen aus Farb-Infrarot Orthofotos durchgeführt wird.

Eine Unterscheidung, die generell auch mit ALS-Daten vorgenommen werden könnte.

Straub (2010) entwickelt eine Funktion, die den Bestandesvorrat*ha⁻¹ als Funktion der Oberhöhe für Nadel- und Laubbäume abschätzen soll. Die Koeffizienten (a) , (b) und (c) werden für die regionale Hauptbaumart unter den Nadelbäumen (Rotkiefer) und Laubbäumen (Traubeneiche) aus Werten der Ertragstafeln für Baden-Württemberg hergeleitet. Zur Herleitung der drei Parameter führt Straub (2010) eine Regressionsanalyse

über alle Ertragsklassen der Referenzbaumarten Rotkiefer und Traubeneiche durch. Das Ergebnis ist die Volumenfunktion:

$$V = CC \cdot \left[\left((a_c + b_c H + c_c H^2) \cdot \frac{P_c}{100} \right) + \left((a_d + b_d H + c_d H^2) \cdot \frac{P_d}{100} \right) \right]$$

- V : Volumen ($\text{fm} \cdot \text{ha}^{-1}$)
- H : Oberhöhe aus dem nDOM (m)
- a_c, b_c, c_c : Koeffizienten für Nadelbäume
- a_d, b_d, c_d : Koeffizienten für Laubbäume
- P_c : Nadelbaumanteil
- P_d : Laubbaumanteil
- CC : Kronenschlussgrad (canopy cover)

(4) lineares Holzvorratsmodell:

Hollaus (2006) entwickelt ein Modell, um den Holzvorrat als lineare Funktion des Baumvolumens zu erklären, welches auch im Rahmen der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) getestet wurde (Hollaus et al. 2009a).

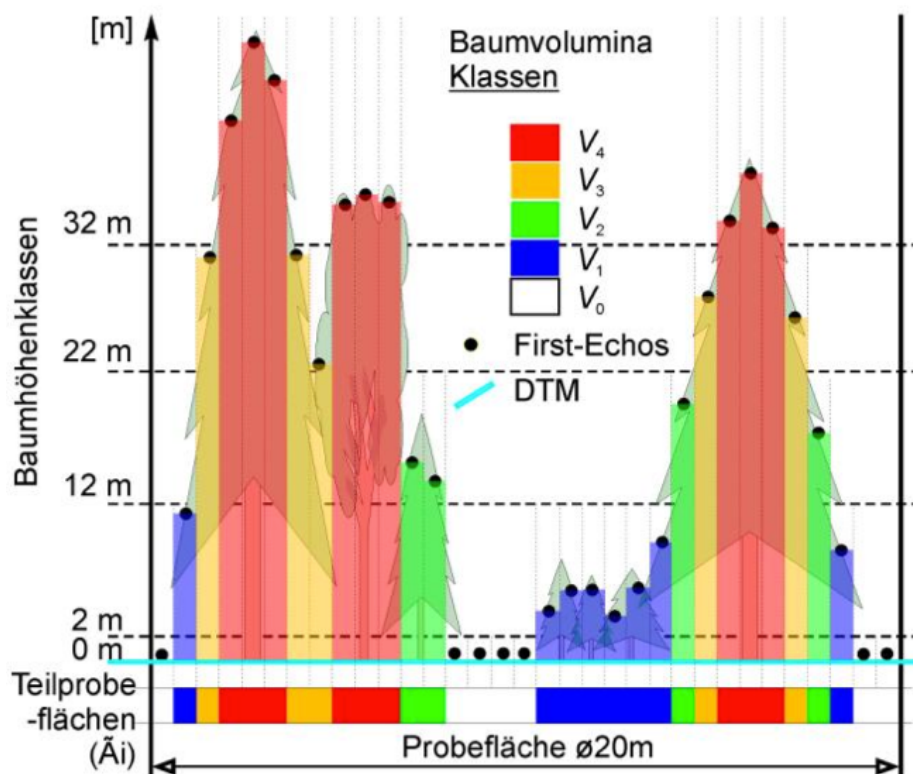


Abb. 5: Schätzung des Baumvolumens. Die schwarzen Punkte symbolisieren „first pulse“ Reflexionen. DTM ist das englischsprachige Synonym für digitales Geländemodell (DGM) (Hollaus et al. 2009 a).

Zunächst erfolgt eine Einteilung der Probeflächen in Höhenklassen mit 10 m Intervallen (2-12, 12-22, 22-32, >32m). Um dem Einfluss größerer Steine sowie niedriger Vegetation auf die Schätzung des Baumvolumens entgegen zu wirken, werden alle Höhenwerte < 2m aus der Analyse ausgeschlossen. Anschließend werden die Flächenanteile der einzelnen Teilprobeflächen ($\tilde{A}_i$) (m^2) mit der folgenden Formel ermittelt:

$$\tilde{A}_i = A * p_{fe,i}$$

Der Faktor ($p_{fe,i}$) beschreibt den Anteil der „First-Pulse“ Reflexionen in jeder Höhenklasse, bezogen auf die Gesamtzahl der auf der Probefläche (A) liegenden „First-Pulse“ Reflexionen. Dieser Faktor kann einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen. Die Summe der $p_{fe,i}$ aller Höhenklassen innerhalb der Probefläche muss schließlich 1 ergeben. Zur Schätzung des Baumvolumens der einzelnen Teilprobeflächen ($V_{can,i}$) (m^3) verwenden Hollaus et al. (2009b) die Formel:

$$V_{can,i} = \tilde{A}_i * ch_{mean,i}$$

Dabei steht (ch_{mean}) (m) für die mittlere Höhe aller „First-Pulse“ Reflexionen innerhalb einer Höhenklasse. Die Summe aller $V_{can,i}$ ergibt folglich das Gesamtvolumen (V_{can}) (m^3) für die Probefläche. Um mit den Referenzwerten der WZP ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) verglichen werden zu können, muss V_{can} noch einen Flächenbezug erhalten. Dies geschieht durch Division mit der Probefläche:

$$v_{can,i} = \frac{V_{can,i}}{A}$$

$v_{can,i}$ hat somit die Dimension $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$. Letztendlich ergibt sich das lineare Holzvorratsmodell mit der Formel:

$$v_{stem,fi} = 10^4 * \sum_{i=1}^m \beta_i * v_{can,i}$$

$v_{stem,fi}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) sind die anhand der WZP erhobenen Volumina. β_i beschreibt das Verhältnis des Baumvolumens zum Holzvorrat. Der Faktor 10^4 dient dazu die Dimension von $v_{can,i}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$) an $v_{stem,fi}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) anzugleichen (Hollaus et al. 2009b).

4.1.2.4 Wachstumsparameter

(1) Höhenzuwachs:

Der Höhenzuwachs eines Baumes während einer Periode der Länge (x) ergibt sich aus der Subtraktion der Höhe zum Zeitpunkt ($t - x$) von der Höhe zum Zeitpunkt (t).

$$\Delta h = h_t - h_{t-x}$$

Mittels ALS-Daten kann auf den durchschnittlichen Höhenzuwachs eines Bestandes geschlossen werden. Dazu werden zwei lagegleiche, normalisierte, digitale Oberflächenmodelle (nDOM) benötigt. Der von Yu (2007) entwickelte Arbeitsablauf gestaltet sich wie folgt: Am Anfang steht die Erkennung einzelner Bäume anhand lokaler Höhen-Maxima. Im selben Zug grenzt ein Algorithmus die zu den erkannten Bäumen gehörenden Kronen voneinander ab. Somit sind die Individuen ausgeschieden. Es folgt die Feststellung der genauen Lage der Stämme über die X/Y/Z-Werte der Höhen-Maxima jedes Segments. Als nächster Schritt wird das sogenannte „*tree-to-tree-matching*“, bei dem die Individuen beider nDOM einander zugeordnet werden, durchgeführt. Dies geschieht über einen Vergleich der Koordinaten der lokalen Höhenmaxima beider nDOM. Liegt die Distanz zwischen den beiden Koordinaten unter 0,5 m, werden Bäume einander zugeordnet. Mit der Erkennung von Baumpaaren wird möglichen Fehlerquellen in der Interpretation vorgebeugt, die sich zum Beispiel durch Durchforstungs- oder Erntemaßnahmen zwischen der Aufnahme der beiden Datensätze ergeben könnten. Schlussendlich erfolgt die Berechnung des Höhenunterschieds beider Höhenmaxima anhand von Subtraktion des älteren vom neueren Höhenwert (Yu 2007).

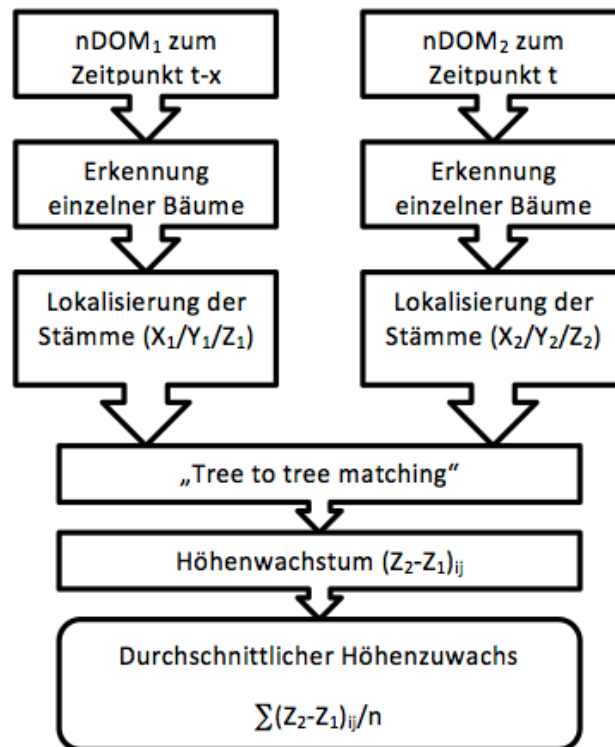


Abb. 6: Schätzung des durchschnittlichen Höhenzuwachses auf Basis normalisierter digitaler Oberflächenmodelle; verändert nach Yu (2007).

(2) Vorratszuwachs:

Der laufende Zuwachs von Beständen ist ein wichtiger Leistungsindikator, der im Rahmen der Forsteinrichtung als Entscheidungshilfe bei der Festlegung des Hiebsatzes dient. Zur Bestimmung des Zuwachses wird üblicherweise die Ertragstafelmethode angewandt (Kramer und Akça 2008, 149).

Untersuchungen zur Schätzung des Vorratszuwachses mit ALS bedienen sich ebenfalls einzelbaum- oder flächenbezogener Ansätze.

Einzelbaumauswertung

Bei dem von Yu et al. (2008) präsentierten Verfahren zur Abschätzung des Vorratszuwachses über Einzelbaum-Auswertungen (engl.: *Individual Tree Top Differencing Method*) wird der Zuwachs einer Fläche während einer Periode (x) über den summierten Zuwachs der darauf stockenden Bäume berechnet. Das Volumen errechnet sich als Funktion von Höhe und BHD der einzelnen Bäume. Als Eingangsdaten werden zwei, zu unterschiedlichem Zeitpunkt (t) aufgenommene, Punktwolken derselben Fläche benötigt. Die Lokalisierung der einzelnen

Bäume in beiden Datensätzen erfolgt anhand der X/Y/Z-Koordinaten der höchstgelegenen Punkte, wobei die Höhe der Individuen aus der Z-Koordinate abgeleitet wird. Wie bereits im Absatz „Höhenzuwachs“ beschrieben, werden auch bei diesem Verfahren die Baumpaare mit der *“tree to tree matching“* Methode einander zugeordnet. Die von Yu et al. (2008) zur Berechnung der Einzelbaumvolumina verwendeten Funktionen benötigen Baumhöhe und BHD als Eingangsvariablen. Der Höhenwert wird, wie bereits beschrieben, direkt aus der jeweiligen Punktwolke bezogen. Den BHD leiten Yu et al. (2008) aus der von Kalliovirta und Tokola (2005) für den skandinavischen Raum festgestellten Beziehung zwischen Höhe und Durchmesser eines Baumes ab:

$$BHD^{1/2} = -1,049 + 1,159 * h^{1/2}$$

Mit Höhe und BHD als Eingangsvariablen werden die Volumina aller Bäume aus der Punktwolke zum Zeitpunkt $t - x$ und jener zum Zeitpunkt t errechnet. Schlussendlich erfolgt die Subtraktion der Volumina der neueren Aufnahme (t) von der älteren ($t - x$) (Yu et al. 2008).

Vergleich zweier DOM

Ein weiterer, von Yu et al. (2008) vorgestellter Ansatz zur Abschätzung der Vorratsänderungen eines Bestandes, basiert auf der Gegenüberstellung zweier digitaler Oberflächenmodelle. Auch bei dieser Methode werden zur Berechnung des Vorratszuwachses einer Fläche während einer Periode (x), zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten (t) aufgenommene Punktwolken derselben Fläche benötigt. Aus den beiden Punktwolken werden zunächst zwei Oberflächenmodelle generiert. Das DOM₁ enthält Höhenwerte der Bestandesoberfläche zum Zeitpunkt ($t - x$), das DOM₂ jene zum Zeitpunkt (t). Yu et al. (2008) verwenden dazu ALS-Daten mit einer Auflösung von 1x1 m. Durch Subtraktion des älteren vom jüngeren Oberflächenmodell (DOM₂ - DOM₁) entsteht ein Differenz-Modell, das die Höhenunterschiede darstellt. Bei diesem Ansatz basiert die Schätzung der Vorratsänderung nicht auf der Summierung des Zuwachses einzelner Individuen. Es wird lediglich zwischen bewaldeten und unbewaldeten Flächen differenziert. Somit fließen nur die, auf den Referenzflächen als Bäume erkannten, Pixel der beiden Oberflächenmodelle (p) und (q) in die Berechnung ein. Der Vorratszuwachs errechnet sich als Funktion der mittleren Höhe (h) und des Höhenzuwachses (Δh). Hier wird die mittlere

Höhe aus dem nDOM der älteren Aufnahme und der Höhenzuwachs aus dem Differenz-Modell gewonnen. Die Variable (n) stellt die Anzahl der Bäume auf der Referenzfläche dar. Zur Schätzung des Vorratzzuwachses auf den Referenzflächen verwenden Yu et al. (2008) die Formel:

$$DOM_{\Delta V} = n * \frac{\sum_i^p \sum_j^q h_{ij}^2 * \Delta h_{ij}}{p * q}$$

Befundeinheit ist somit eine Fläche mit bekannter Stammzahl.

Bei den oben beschriebenen Arten, Wachstumsparameter aus den ALS-Daten zu ziehen, ist es wichtig, auf die Vergleichbarkeit der Daten zu achten. Insbesondere muss auf die Vegetationsperiode, in der die Befliegungen stattgefunden haben, geachtet werden. Die Gegenüberstellung von ALS-Daten aus Winter- und Sommermonaten führt, vor allem in laubholzreichen Beständen, unweigerlich zu Fehlern in den Werten der Wachstumsparameter (Hyypä et al. 2008).

4.1.2.5 Brusthöhendurchmesser

Der Brusthöhendurchmesser (BHD) stellt neben der Baumhöhe einen der grundlegenden, bei Forstinventuren erhobenen, Parameter dar. Er wird im Rahmen von Stichprobeninventuren erhoben und dient zur Ableitung der Grundfläche.

Schardt et al. (2002) beschäftigen sich mit der Herleitung des Baumdurchmessers aus ALS-Daten.

Dieses Verfahren geht von einem normalisierten digitalen Oberflächenmodell aus, aus dem Informationen über Höhe und Kronenschirmfläche einzelner Bäume generiert werden. Der erste Schritt ist das Filtern des Datensatzes nach einem bestimmten Höhenschwellenwert (α). Schardt et al. (2002) wählen einen Schwellenwert von 6 Metern. Das bewirkt, dass Pixel die einen Höhenwert kleiner als 6 Meter aufweisen und somit Jungwuchs und Strauchschicht repräsentieren könnten, aus den weiteren Arbeitsschritten ausgenommen sind. Es folgt eine Glättung des verbliebenen nDOM, bei der kleinere Erhebungen entfernt werden, wie sie zum Beispiel durch starke Äste entstehen. Bei der anschließenden Feststellung der lokalen Maxima wird Position und Höhe (h) der einzelnen Individuen eruiert. Ist der Standort des Stammes bekannt, kann rund um diesen die Baumkrone mit einer sogenannten

Wasserscheidensegmentierung deliniert werden. Dazu wird ein Algorithmus eingesetzt, der die Höhenwerte der einzelnen Bildpixel des nDOM analysiert. Die Wasserscheidensegmentierung errechnet, welchen Weg ein Wassertropfen einschlägt, wenn er gravitationsbedingt von einem lokalen Höhenmaximum zu einem lokalen Höhenminimum fließt. Pixel, von denen mehrere lokale Höhenminima erreicht werden können, sind dann Wasserscheidenpixel und delinieren den Kronenrand der einzelnen Individuen. Somit ist die Kronenschirmfläche (c) ermittelt (Abb. 26) (Scharadt et al. 2002).

Für die Versuchsfläche „Hohentauern“ mit 165 Referenzbäumen und 94 % Fichtenanteil entwickelten Scharadt et al. (2002): folgendes Modell:

$$BHD = -31,96 + 1,33 * h + 5,19 * c$$

Am Institut für Waldwachstumsforschung der BOKU fanden zeitgleich Untersuchungen zur Herleitung des BHDs bei der Baumart Fichte auf der Fläche des BOKU Lehrforsts statt.

Bei Anwendung des oben beschriebenen Arbeitsablaufes konnte aus 562 Referenzbäumen folgendes Modell erstellt werden (Ziegler et al. 2001):

$$BHD = 11,0178 + 1,10059 * h + 4,5258 * c$$

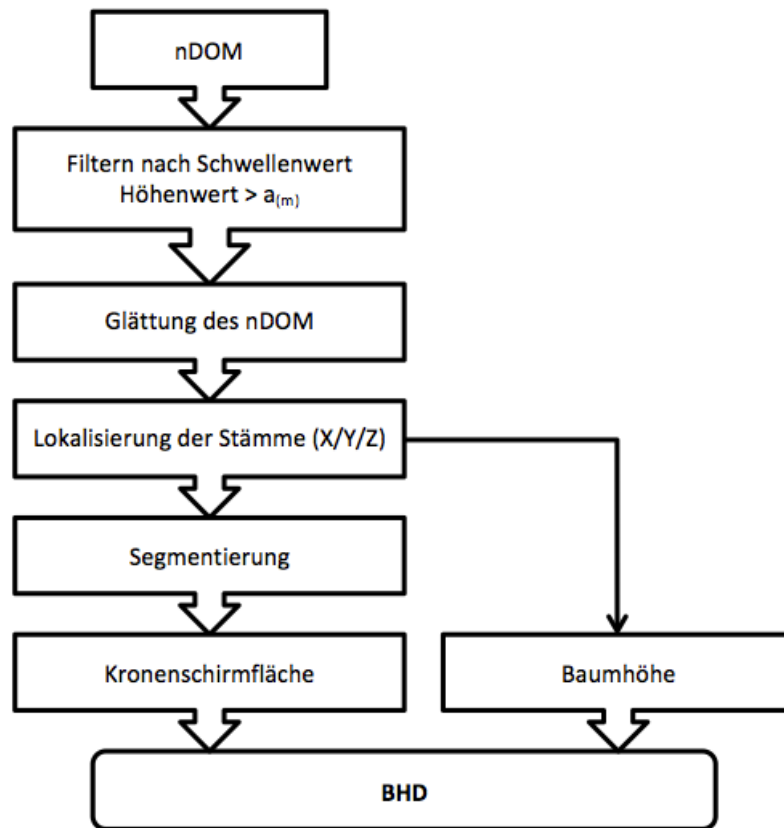


Abb. 7: Ableitung des Brusthöhendurchmessers auf Basis eines normalisierten digitalen Oberflächenmodells nach Schardt et al. (2002).

4.1.2.6 Baualter

Das Alter der Bestockung ist ein weiterer, grundlegender Parameter, der zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Standortes herangezogen wird. Dabei werden Kenntnisse über das Bestandesalter vor allem zur Schätzung des Vorrats mittels Ertragstafeln benötigt.

Auch die, in den Ertragstafeln enthaltenen, Angaben zur Entwicklung des Vorratszuwachses beziehen sich stets auf ein bestimmtes Bestandesalter bzw. auf eine bestimmte Altersperiode. Das Alter einzelner Bäume kann beispielsweise durch Zählen der Jahrringe am Stock, Bohrung oder Zählen der Jahreshöhentriebe festgestellt werden. Auskünfte über das Bestandesalter können aus fortgeschriebenen Operatsdaten gewonnen werden. Komplexer stellt sich die Altersangabe in ungleichaltrigen Beständen dar. Hier erfolgt die Altersangabe als flächengewichtetes, mittleres Bestandesalter. Die Angabe (10 – 40) / 35 bedeutet etwa, dass in einem Bestand, Flächen mit einem Alter zwischen 10 und 40 Jahren vorkommen.

Durch Gewichtung der einzelnen Alter mit ihrem Flächenanteil, wird das mittlere Bestandesalter, im obigen Fall 35 Jahre, errechnet (Kramer und Akça 2008, 139).

Grundsätzlich gibt es keine Möglichkeit, von ALS-Daten direkte Rückschlüsse auf das Bestandesalter zu ziehen. Dies macht die klassische Feststellung der Bonität eines Standortes mit dem Wertepaar Alter und Oberhöhe, rein anhand von ALS-Daten praktisch unmöglich.

Eine Studie zur Herleitung des Baumalters ist dennoch in Kalliovirta und Tokola (2005) zu finden. Sie führen Regressionsanalysen zur Schätzung des Baumalters der Baumarten Rotkiefer, Fichte und Birke aus den Parametern Höhe und Kronendurchmesser durch. Das Ergebnis der Studie ist, dass das Baumalter mit einer Standardabweichung von 30 Jahren erklärt werden kann.

4.1.2.7 Bestockungsgrad

Der Bestockungsgrad (BG) ist in der Forstwirtschaft als das Verhältnis der tatsächlichen Grundfläche (G_{ist}) in $m^2 ha^{-1}$ zum Referenzwert, aus der Ertragstafel für eine Ertragsklasse bei gegebenem Alter (G_{ET}), definiert. Er wird zunächst für jede Baumart einzeln berechnet. Die Summe der Einzelwerte aller Baumarten (i) ergibt dann den BG des Mischbestandes.

$$BG = \sum_{i=1}^n G_{ist,i} / G_{ET,i}$$

Dieser Parameter gibt Aufschluss über die Bestandesdichte. Der BG ist nicht direkt aus ALS-Daten ableitbar. Grund dafür ist, dass aus ALS-Daten nicht auf das Baumalter geschlossen werden kann. Folglich kann die Soll-Grundfläche der Ertragstafel nicht ermittelt werden. Alternativ zum BG verwendet Straub (2010) den Kronenschlussgrad als Maß der Bestandesdichte.

Dieser hat jedoch den Nachteil, dass er im Vergleich zum BG keine Werte größer 1 annehmen kann.

4.1.2.8 Baumartenanteile

Die in der Forsteinrichtung verwendeten Ertragstafelmodelle gehen von Reinbeständen aus. Sollen Auswertungen von Mischbeständen anhand der Ertragstafelmethode erfolgen, dann müssen diese Bestände in ideelle Reinbestände aufgeteilt werden. Zur Feststellung der Baumartenanteile wird berechnet, welchen Anteil der BG jeder Baumart an der Summe des BG über alle Baumarten aufweist (Sekot 2010, 246).

Die Identifikation verschiedener Baumarten mittels ALS-Daten stellt immer noch ein Problem dar. Die Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen hingegen zeigt bereits gute Ergebnisse, wie unter anderen Heurich (2006), Koch et al. (2009) und Heinzl (2011) beweisen.

Heurich (2006) vergleicht ALS-Daten aus Sommer- und Winterbefliegungen. Für seine Untersuchungen werden zuerst einzelne Baumkronen im Datensatz segmentiert und dieser danach einer Klassifikation unterzogen.

Bei einer Klassifikation bekommen Flächen, deren Pixel sich gleichen, dieselben Attribute zugewiesen.

Aus den im Winter aufgenommenen ALS-Daten lassen sich die Nadelbäume (ausg. Lärche) besonders gut von den unbelaubten Laubbäumen abgrenzen (Heurich 2006). Dieser Umstand wird auch von Koch et al. (2009) genutzt. Sie bedienen sich der unterschiedlichen Durchdringungsrate der Laserimpulse durch Laub- und Nadelbaumkronen außerhalb der Vegetationsperiode. Dadurch, dass die Laserimpulse die unbelaubten Laubbaumkronen stärker durchdringen können als die Nadelbaumkronen, sind vor allem die „*Last Pulse*“ Werte, also jene Laserimpulse die näher oder direkt am Boden liegen, sehr aussagekräftig und werden zur Isolation von Nadelbäumen verwendet. Aus den „*First Pulse*“ und „*Last Pulse*“ Werten werden jeweils ein nDOM erstellt (Abb. 8), die schließlich zur automatischen Klassifikation der Bewuchsklassen Nadelwald, Laubwald und Jungwuchs, bzw. Waldboden dienen. Zwischen Jungwuchs und Bodenfläche erfolgt keine Differenzierung.

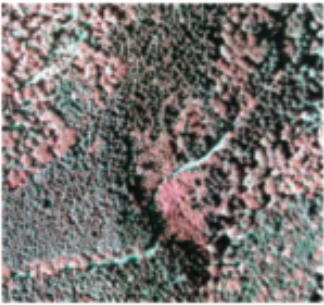
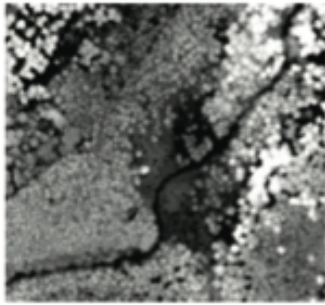
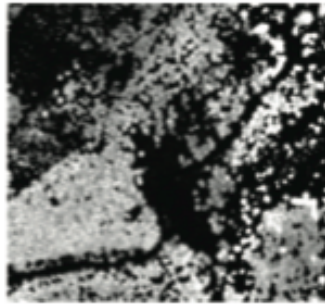
CIR	nDSM_[fp_w]	nDSM_[lp_w]
		
		Isolation of conifers

Abb. 8: Vergleich zwischen einem aus „first pulse“ Werten ($nDSM_{fp_w}$) (Mitte) und einem aus „last pulse“ Werten ($nDSM_{lp_w}$) (rechts) generierten nDOM. nDSM ist dabei das englischsprachige Synonym für normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDOM). Die Nadelbaumregionen stechen besonders in dem aus „last pulse“ Werten generierten nDOM (rechts) hervor. Im Vergleich dazu ein Infrarot-Bild (links), in dem die Nadelbäume (dunkelgrün) und die Laubbäume (rötlich) gefärbt sind (Koch et al. 2009).

Im Gegensatz zu Heurich (2006) verzichtet Heinzel (2011) auf die Segmentierung einzelner Kronen, da dieser Prozess vor allem in dichten Beständen Probleme mit sich bringt. Heinzel (2011) erstellt zunächst ein Rastermodell, in das er, neben der Informationen aus der 3D-Punktwolke, statistische Parameter einfließen lässt. Zur Analyse des Rastermodells mit seinen 231 Eingangsparametern bedient er sich der linearen Diskriminanzanalyse. Aus den Eingangsparametern werden die aussagekräftigsten Parameter herausgefiltert und schließlich einer Klassifikation unterzogen. Heinzel (2011) untersucht dabei in einem mehrstufigen Verfahren die detaillierte Erkennung einzelner Baumarten bis hin zur groben Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelbaumflächen.

4.1.2.9 Bonität

Die Bestimmung der Bonität eines Standortes bedeutet die Beurteilung seiner Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Produktion von Holzmasse pro Flächen- und Zeiteinheit. Als Maßeinheit dafür wird die auf ein gegebenes Bestandesalter bezogene Gesamtwuchsleistung (GWL) eines Standortes verwendet (Gadow 2003).

Die Einschätzung der GWL erfolgt auf Basis von Ertragstafeln, die aus statistischen Beobachtungsdaten erstellt wurden und auf folgenden drei Beziehungen basieren:

1. $Höhe = f(Alter)$
2. $GWL = f(Höhe)$
3. $GWL = f(Alter)$

Die erste Beziehung wird zur Erstellung eines Höhenfächers verwendet. Sie wird auch die Einordnungsbeziehung genannt, da sie der Einteilung eines Bestandes in die jeweilige Bonitätsstufe dient. Die GWL als Funktion der Mittelhöhe wird auch als Hilfsbeziehung bezeichnet. Sie ermöglicht die Abschätzung der GWL von Beständen, deren Alter und Mittelhöhe bekannt ist. Die resultierende Endbeziehung ist die GWL als Funktion des Alters (Pretzsch 2002).

Auf den ersten Blick würde die zweite genannte Beziehung die Vermutung nahelegen, dass die Schätzung der GWL über die Höhenwerte aus ALS-Daten möglich wäre. Das grundlegende Problem bei der Bonitierung von Beständen mit Hilfe von Ertragstafeln und ALS-Daten liegt aber auch hier, wie bereits beschrieben wurde, in der Feststellung des Bestandesalters.

Dieses muss wie bereits beschrieben wurde, entweder terrestrisch erhoben (Bohrung, Quirlzählung, Jahrringzählung) oder sofern plausibel, den Operatsdaten entnommen werden (Fortschreibung, Kulturnachweis) (Sekot 2010, 246).

Besonders die Fortschreibung des Bestandesalters aus vertrauenswürdigen Operatsdaten erscheint für Bonitierungsversuche über ALS praktikabel.

4.1.2.10 Horizontale Bestandesstruktur

Gadow (2005) nennt drei Gruppen von Variablen, die der Analyse von Waldstrukturen dienen (Abb. 9). Diese beschreiben die Positionsdiversität, die Baumartendiversität und die Dimensionsdiversität.

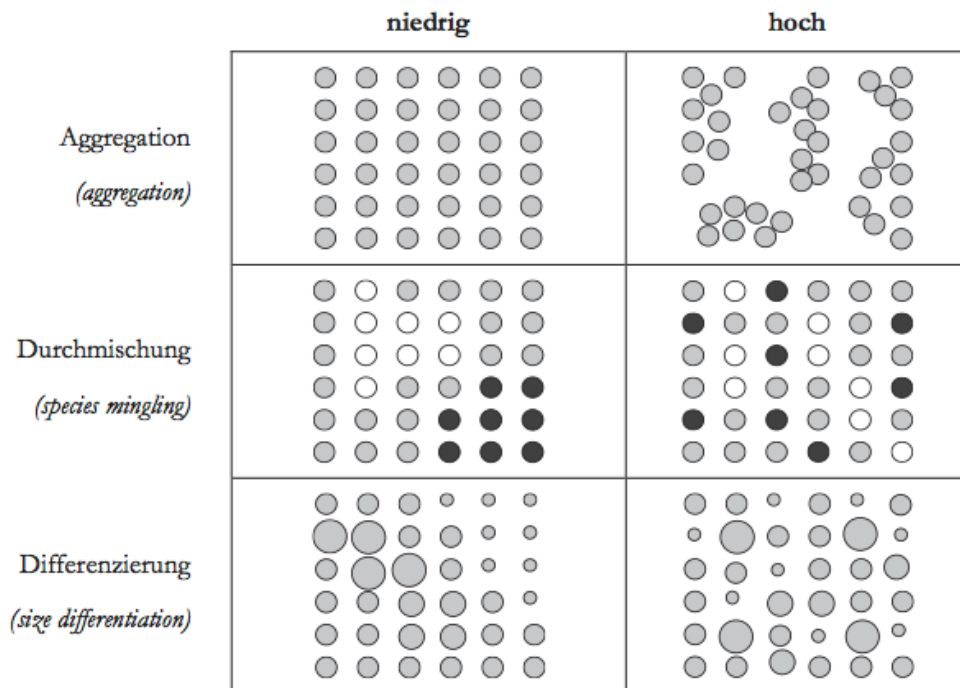


Abb. 9: Verwendung von Positions-, Arten- und Dimensionsdiversität zur Beschreibung von Waldstrukturen (Gadow 2005).

Mit ALS-Daten kann direkt auf die Position von Individuen und dadurch auf die Aggregation geschlossen werden. Hinsichtlich der Baumartendiversität können nur Unterscheidungen zwischen Laub- und Nadelbäumen getroffen werden. Hierbei stellt sich jedoch die Frage, wie grob- oder kleinflächig diese Differenzierung mittels ALS vorgenommen werden kann. Die derzeit zur Verfügung stehenden Laserscanning-Metriken eignen sich jedenfalls nicht als Diversitätsindikator. Die Durchmesserdiversifizierung kann zu einem bestimmten Grad ebenfalls, wie bereits im Unterkapitel BHD beschrieben wurde, aus Laserscanning-Metriken abgeleitet werden.

Im Folgenden werden jene Parameter der horizontalen Bestandesstruktur beschrieben, zu denen es bereits Laserscanning-Untersuchungen gibt. Diese sind die Stammzahl, der Schlussgrad und die Erkennung von Waldlücken zur Abschätzung des Blößenanteils.

Stammzahl:

Die Schätzung der Stammzahl kann anhand der Feststellung lokaler Maxima, wie sie beispielsweise zur Schätzung der Baumhöhe angewandt wird, erfolgen (vgl. Buddenbaum 2010 und Hollaus 2006).

Verhältnisse, die eine korrekte Erkennung der einzelnen Individuen erschweren, sind:

- Mehrschichtige Bestände
- Dichtstand (Dickung, Stangenholz)
- Laubholzbestände

Mehrschichtige Bestände weisen einen komplexen, vertikalen Aufbau auf, bei dem hauptsächlich Bäume von der vorherrschenden bis zur mitherrschenden Schicht korrekt identifiziert werden. Bei Dichtstand kommt es oftmals zur „Verschmelzung“ von Kronen, wodurch mehrere Bäume zusammengefasst werden (vgl. 4.1.2.11 Vertikale Struktur). Bei Laubbäumen können einerseits starke Äste zu einer quantitativen Überschätzung beitragen, andererseits führen überlappende Kronen zu einer Unterschätzung der Stammzahl. Insgesamt kommt es tendenziell zu einer Unterschätzung der Stammzahl (Buddenbaum 2010). Mit Hilfe eines GIS kann die Stammzahl pro Flächeneinheit bestimmt werden.

Schlussgrad:

Means et al. (1999) beschreiben bereits eine Möglichkeit, den Kronenschlussgrad aus ALS-Daten herzuleiten. Dazu setzen sie die von der Vegetation reflektierten Laserimpulse in Verhältnis zur Gesamtzahl der reflektierten Impulse.

$$\text{Schlussgrad} = \frac{\text{Vegetationspunkte}}{\text{Vegetationspunkte} + \text{Bodenpunkte}} * 100$$

Straub (2010) schätzt den Schlussgrad mit Hilfe eines nDOM und setzt diesen als Dichtemaß anstatt des Bestockungsgrads ein. Der Schlussgrad definiert den Flächenanteil, den die Baumkronen im Verhältnis zur Gesamtfläche einnehmen. Für diesen Ansatz wird aus allen Pixel des nDOM, die eine Höhe über einem gewissen Schwellenwert (a) aufweisen, ein neues $\text{nDOM}_{(>a)}$ berechnet. Somit wird sichergestellt, dass die Bodenvegetation und Strauchschicht nicht in das Modell einfließen. Straub (2010) hält den Höhen-Schwellenwert (a) dynamisch, indem er diesen aus der ALS-Oberhöhe anhand der Formel (a) = Oberhöhe *

0,5 ableitet. Wird schließlich die Fläche von $nDOM_{(>a)}$ in Verhältnis zur Gesamtfläche gesetzt, ergibt sich daraus ein geschätzter Schlussgrad. Überlappungen der Kronen finden bei diesem Ansatz keine Berücksichtigung. Auch kann der Kronenschlussgrad im Vergleich zum Bestockungsgrad den Wert 1 nicht überschreiten.

Waldlücken:

Die Erfassung von Waldlücken liefert einen wichtigen Beitrag zur Beurteilung der Bestandesstruktur. Auf natürliche Weise entstehen diese zum Beispiel durch Windwürfe und Forstschädlinge. Anthropogen entstehen sie durch Holzernte- und Erschließungsmaßnahmen. Eysn et al. (2010) führen im Rahmen des Forschungsprojektes „*Laser Wood*“, Untersuchungen zur automatisierten Erfassung von Waldlücken aus ALS-Daten durch. Waldlücken konnten zwar bislang auf Orthofotos manuell oder halb-automatisch abgegrenzt werden, jedoch bringen Orthofotos den Nachteil mit sich, dass an Bestandesrändern, je nach Baumhöhe und Sonnenstand bei der Bildaufnahme, verschieden lange Schatten abgebildet sind. Diese erschweren die Interpretation und Abgrenzung des Bestandesrandes.

Ein Problem, das bei ALS-Daten nicht auftritt, da es als aktives Fernerkundungssystem ohne Sonnenlicht auskommt.

Zur automatischen Erkennung von Waldlücken erzeugen Eysn et al. (2010) zunächst ein $nDOM$, aus dem sie eine Waldmaske ableiteten. Die in der Waldmaske enthaltenen Flächen müssen dabei eine Mindestgröße von 500 m^2 und einen Schlussgrad von mindestens 30% aufweisen. Dieser Mindestbeschirmungsgrad wird anhand einer Beziehung zwischen Baumhöhe und Abstand zwischen den Bäumen analysiert. Aus dem $nDOM$ können für diese Analyse die lokalen Höhenmaxima festgestellt und daraus Baumhöhe (Z-Koordinate) und Standplatz (X/Y-Koordinate) hergeleitet werden. Weiters wird das $nDOM$ nach potentiellen Waldlückenpixel gefiltert. Dies sind alle Pixel, die einen Höhenwert kleiner 3 m aufweisen. Abschließend findet eine Verschneidung der Waldmaske mit den potentiellen Waldlückenpixel statt. Die Ergebnisse werden in drei Klassen unterteilt:

- $50 - 500 \text{ m}^2$
- $500 \text{ m}^2 - 1 \text{ ha}$

- >1 ha

Erwartungsgemäß steigt die Größe der Waldlücken mit der Seehöhe. Das automatisierte Verfahren zeigt seine Vorzüge vor allem bei kleineren Waldlücken, deren korrekte manuelle Digitalisierung aus Orthofotos wesentlich mehr Erfahrung voraussetzt (Eysn et al. 2010).

Dieses Verfahren könnte einen wesentlichen Beitrag zur Feststellung des Blößenanteils in Waldbeständen liefern. Es wäre eine Aufschlüsselung des betrieblichen Blößenanteils im Wirtschafts- und im Schutzwald denkbar. Anhand dieser Analyse, könnten potentielle Aufforstungsflächen automatisch lokalisiert und quantifiziert werden. Für den Wirtschaftswald könnte dies eine Steigerung der Produktivität bedeuten. In Schutzwaldgebieten wäre an die frühzeitige Erkennung überalteter bzw. sich auflösender Bestandesstrukturen zu denken.

Waldbesitzer sind gesetzlich zur Wiederbewaldung von Kahlflächen und Räumen im Schutzwald verpflichtet (§ 13 Abs. 1 Forstgesetz 1975).

4.1.2.11 Vertikale Struktur

Gerade in ungleichaltrigen Beständen sind Informationen über den vertikalen Bestandaufbau von Interesse. Diese sollten bestenfalls Aussagen über die Anzahl der Schichten, deren jeweilige Höhe und die Baumartenanteile liefern.

Durch den technischen Fortschritt der letzten 20 Jahre auf dem Sektor der Sensortechnik ist es mittlerweile möglich geworden, einen detaillierteren Eindruck der vertikalen Bestandesstruktur zu gewinnen. Besonderen Einfluss auf den Informationswert der ALS-Daten hatte die Steigerung der vom Lasersystem ausgesandten Pulsrate und der Messgeschwindigkeit. Schlussendlich führte die Entwicklung zu „Full-Waveform“ Laserscannern, die das gesamte von der Vegetation reflektierte Signal mit allen seinen Impulsen aufzeichnen (Abb.10) (Reitberger et al. 2009).

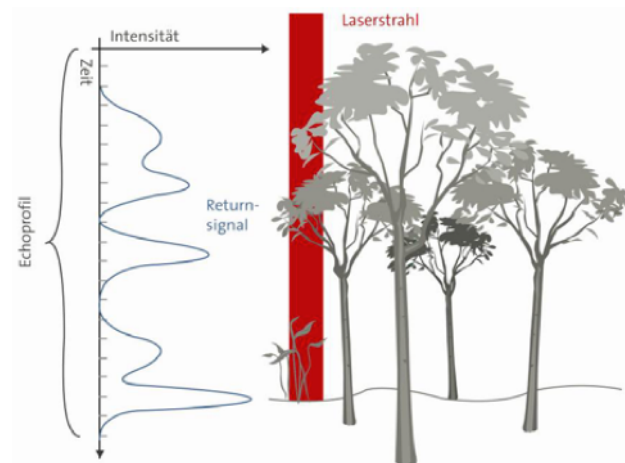
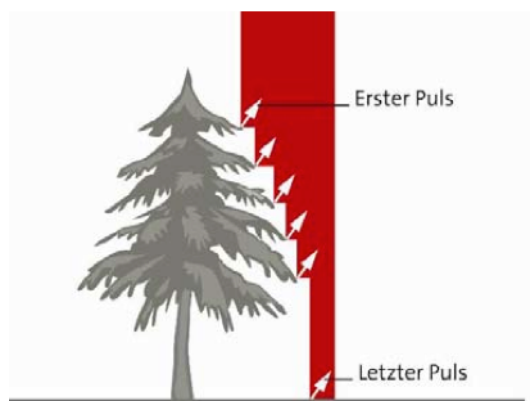


Abb. 10: Konventionelle „First-Last-Pulse“ Aufnahme (links) und „Full-Waveform“ Aufnahme (rechts) aus Reitberger et al. (2009).

Daten aus konventionellen „*First-Last-Pulse*“ Aufnahmen sind in ihren Einsatzmöglichkeiten beschränkt. Wie bereits anfangs dieser Arbeit beschrieben wurde, dient der „*Last Pulse*“ zur Erstellung des DGM. Der „*First Pulse*“ wird zur Generierung des DOM herangezogen.

Der Nachteil dieser Aufnahmemethode ist, dass nur eine vergleichsweise geringe Anzahl an dazwischen liegenden Reflexionen aufgezeichnet wird, die zur Analyse vertikaler Strukturen herangezogen werden kann (Abb. 11). „*First-Last-Pulse*“-Daten fanden deswegen in der Vergangenheit vor allem bei flächenbezogenen Analysemethoden Anwendung (Reitberger et al. 2009). Durch verbesserte Aufnahmeverfahren, gestiegene Datenqualität und „*Full-Waveform*“ Technologie ist in der Literatur eine generelle Tendenz zu Einzelbaumbezogenen Analysemethoden bemerkbar.

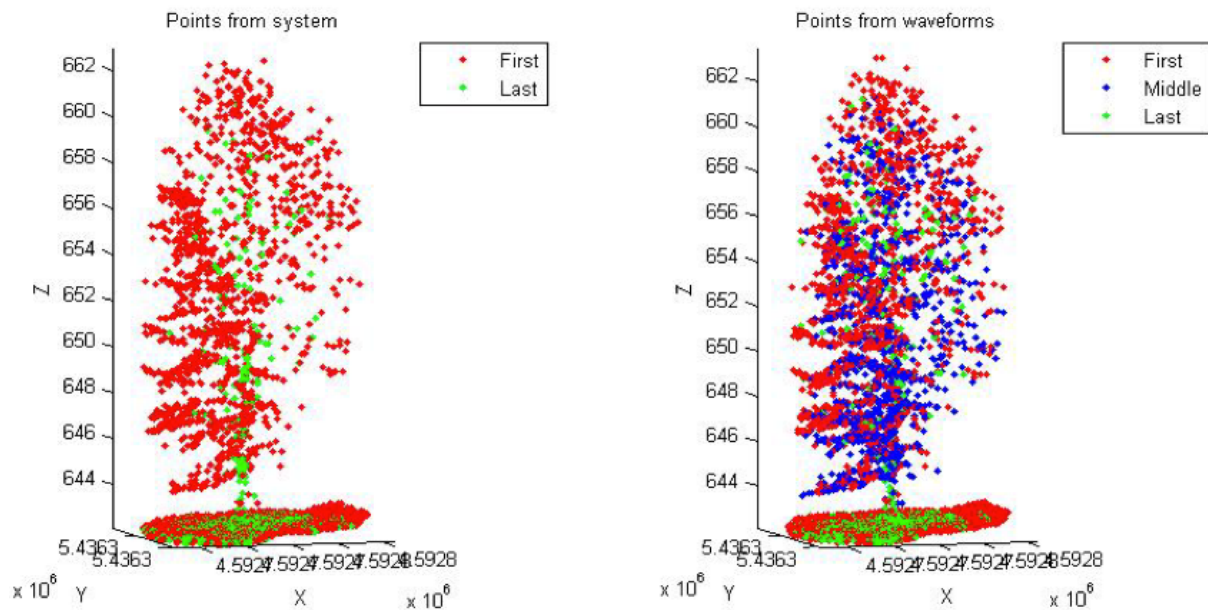


Abb. 11: Punktwolke eines Einzelbaumes aus einer First-Last-Pulse Aufnahme (links) und einer Full-Waveform Aufnahme (rechts) aus (Reitberger et al. 2009).

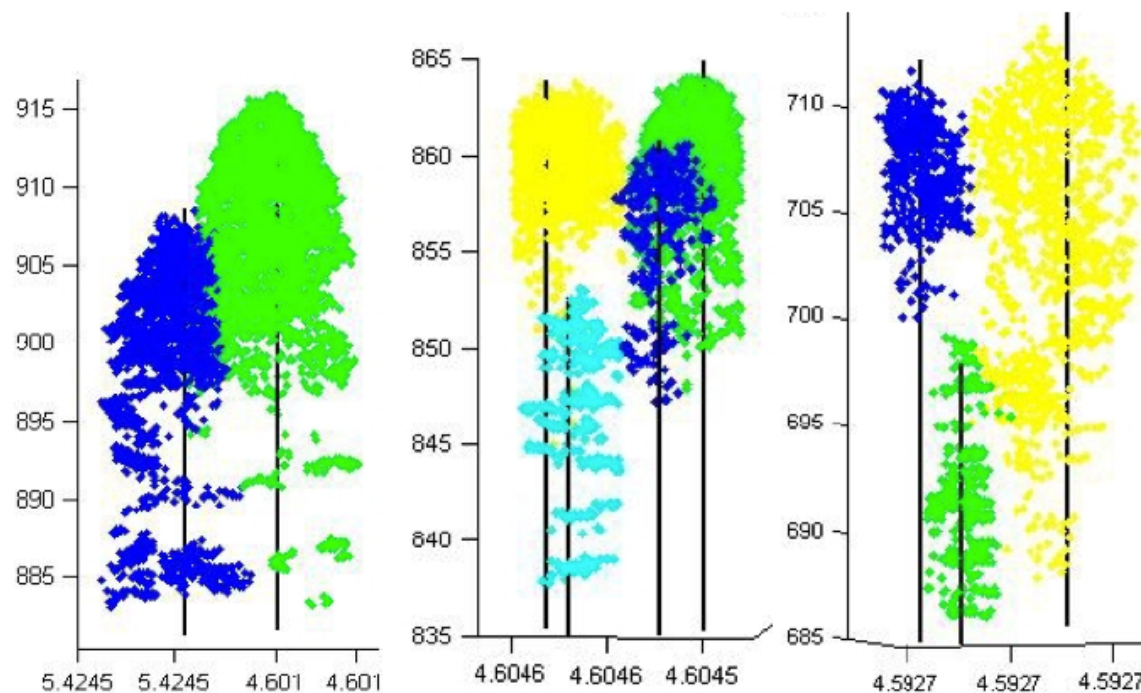


Abb. 12: Punktwolken verschiedener Baumgruppen nach einer 3D-Segmentierung. Einzelne Individuen können aus der Kombination von „Full-Waveform“-Daten und der 3D Segmentierung differenziert werden; aus (Stilla et al. 2009).

Zur Bestimmung vertikaler Strukturparameter entwickeln Reitberger et al. (2009) eine Methode, Einzelbäume dreidimensional zu segmentieren (Abb. 12). Die sogenannte 3D-Segmentierung bedient sich im Gegensatz zur konventionellen 2D-

Wasserscheidensegmentierung, neben den X/Y/Z-Werten, auch der Pulsbreite und Pulsenergie der einzelnen Punkte aus der Punktwolke. Zur Verbesserung der Trefferquote der 3D-Segmentierung, erfolgt eine Lokalisierung der Stämme und eine Wasserscheidensegmentierung vor der 3D-Segmentierung. Damit erzielen sie nicht nur Erfolge beim Segmentieren von Kronen vorherrschender Bäume sondern auch von unterdrückten Individuen. Stilla et al. (2009) unterstreichen, dass dieses Ergebnis nicht mit der 2D-Wasserscheidensegmentierung eines DOM erzielt werden kann.

Beachtlich ist, dass die bei der 3D-Segmentierung im Gegensatz zur 2D-Wasserscheidensegmentierung die delinierten Baumkronen ineinander greifen (Abb. 13), was einer vergleichsweise realistischeren Darstellung der natürlichen Gegebenheiten entspricht. Bei der 2D-Wasserscheidensegmentierung grenzen die delinierten Kronenflächen hingegen scharf aneinander an. Die 3D-Segmentierung könnte durch diese Überlappungen als Konkurrenzindikator herangezogen werden.

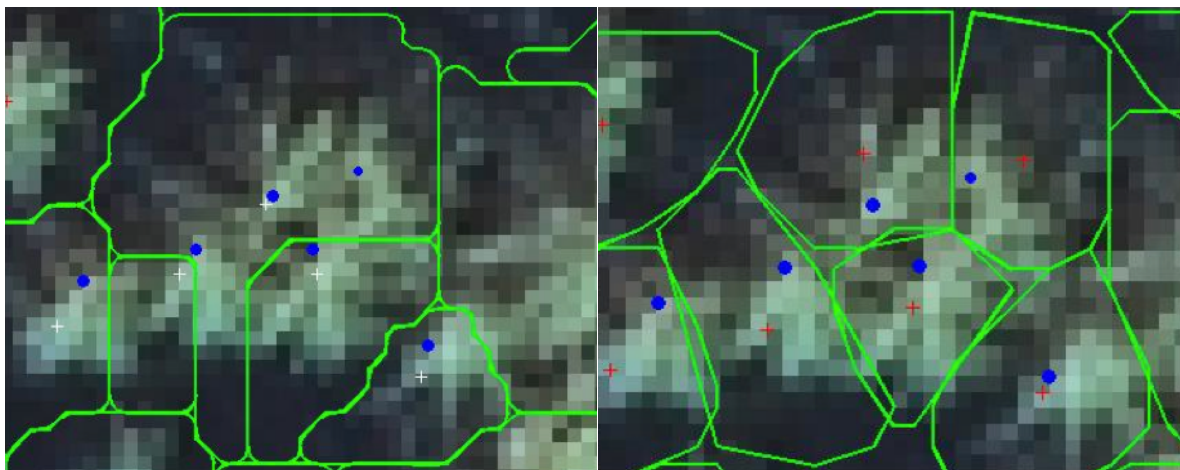


Abb. 13: Segmentierung derselben Baumgruppe mittels Wasserscheidensegmentierung (links) und der 3D Segmentierung (rechts). Die verglichenen Daten stammen aus einer Full-Waveform Aufnahme; aus Reitberger et al. (2009).

Eine weitere Einsatzmöglichkeit von ALS-Daten zur Analyse der vertikalen Struktur ist die Ermittlung der Kronenlänge. Buddenbaum (2010) sieht beispielsweise Potential hinsichtlich Biomasseschätzungen oder bei Verwendung der Kronenlänge und des Kronenradius zur Berechnung des Kronenvolumens. Für seine Untersuchungen zur Kronenlänge der Baumarten Fichte und Buche, bedient sich Buddenbaum einer von Riaño et al. (2003) entwickelten Methode. Als Grundlage verwendet er „Full-Waveform“ Daten. Um einen

möglichen Einfluss auf die Analyse durch den Unterwuchs zu vermeiden, wurde die Kronenuntergrenze als das 10. Perzentil der Energieverteilung über einer Höhe von 2 m definiert. Das 10. Perzentil wurde gewählt, da es auf dieser Bestandeshöhe auf den untersuchten Flächen zu einem deutlichen Abfall der reflektierten - und in den ALS-Daten gespeicherten - Intensität kommt. Dies kann als Indiz für die Kronenuntergrenze herangezogen werden (Abb. 14). Die Kronenlänge errechnet sich schlussendlich durch Subtraktion der Kronenuntergrenze von der Baumhöhe. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass bei Jungwuchsbeständen, deren Kronen unter den 2 m Schwellenwert reichen, die Kronenlänge systematisch unterschätzt wird (Buddenbaum 2010). Die vorhin erwähnte Intensität ist ein Maß der reflektierten Energie eines Impulses und wird standardmäßig mit den X/Y/Z-Werten aufgenommen (Wagner et al. 2008).

Buddenbaum (2010) leitet seine Methode von Riaño et al. (2003) ab. Sie verwenden auf einem vergleichbaren Testgebiet wiederum das erste Perzentil über 4 m Höhe als Kronenuntergrenze, ohne jedoch Genauigkeitswerte zu dieser spezifischen Untersuchung anzugeben. Der Bereich, indem der Abfall der reflektierten Intensität stattfindet, hängt vom Verhältnis der Kronenlänge zur Baumhöhe ab, weshalb die Verwendung des 10. Perzentils wahrscheinlich nicht auf alle Entwicklungsstufen eines Bestandes übertragbar ist.

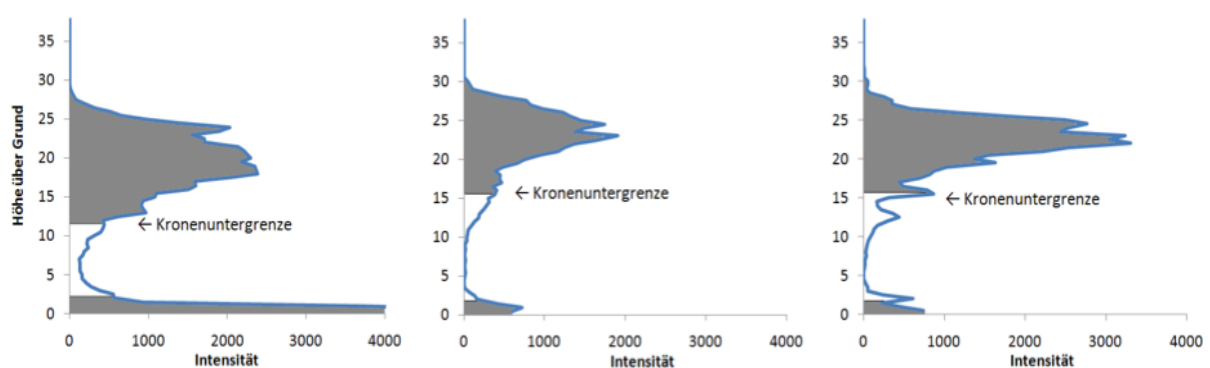


Abb. 14: Ermittlung der Kronenuntergrenze. Der obere graue Bereich stellt die Krone dar, unter dem es zu einem starken Abfall der Intensität kommt. Der untere graue Bereich reicht bis zu einer Höhe von 2 m und stellt den Unterwuchs dar (Buddenbaum 2010).

Besonders bei immergrünen Nadelbäumen liefern Kronenform und -länge wichtige Informationen über die Bestandessicherheit. Hier kann die Disposition von Nadelholzbeständen gegenüber Schneebruch angesprochen werden (Kramer 1988, 25).

Generell könnten auch verschiedene, die Baumkrone charakterisierende, Parameter aus „Full-Waveform“ Daten abgeleitet werden (vgl Kramer 1988, 17):

$$\text{Kronenprozent} = \frac{\text{Kronenlänge}}{\text{Baumhöhe}}$$

$$\text{Kronenverhältnis} = \frac{\text{Kronenlänge}}{\text{Kronenbreite}}$$

$$\text{Plumpheitsgrad} = \frac{\text{Kronenbreite}}{\text{Kronenlänge}}$$

$$\text{Spreitungsgrad} = \frac{\text{Kronenbreite}}{\text{Baumhöhe}}$$

4.1.2.12 Erkennung von Strukturänderungen

Der derzeitige Stand der Technik ermöglicht Überlegungen über die Erkennung von Veränderungen der Bestandesstruktur. Yu (2007) beschreibt eine Methode zur Feststellung von Änderungen der Bestandesoberfläche, wie sie beispielsweise durch Erntemaßnahmen oder natürlichen Einfluss entstehen.

Als Eingangsvariablen benötigt der Algorithmus zwei, zu unterschiedlichen Zeitpunkten ($t - x, t$) aufgenommene 3D-Punktwolken derselben Fläche, aus denen normalisierte digitale Oberflächenmodelle generiert werden. Es folgt die Berechnung der Differenz zwischen den Höhenwerten der beiden nDOM. Hierbei wählt Yu (2007) den Ansatz, das jüngere nDOM₂ vom älteren nDOM₁ zu subtrahieren. Anschließend werden die Pixelwerte der beiden Modelle verglichen. Beträgt die Differenz Null, so hat es im entsprechenden Pixel keine Änderung im Höhenwert gegeben. Negative Werte beziffern den Höhenzuwachs während der Periode (x). Positive Höhenwerte im Ergebnis stellen die Pixel von Bäumen dar, welche im jüngeren nDOM₂ nicht mehr vorhanden sind. Die positiven Werte durchlaufen einen Filter, der die positiven Höhenwerte in „kleinere“ oder „größere“ Veränderungen einteilt. Yu (2007) gibt als Schwellenwert (α) für diese Einteilung sieben Meter an. Wird

dieser Schwellenwert überschritten, zählt das Pixel als größere Veränderung, sonst als kleinere Veränderung. Der letzte Schritt ist die Segmentation der positiven Pixel mit einem Wert $> (a)$ aus dem Ergebnis von $(nDOM_1 - nDOM_2)$. Somit sind die einzelnen Bäume ausgeschieden und können quantifiziert werden.

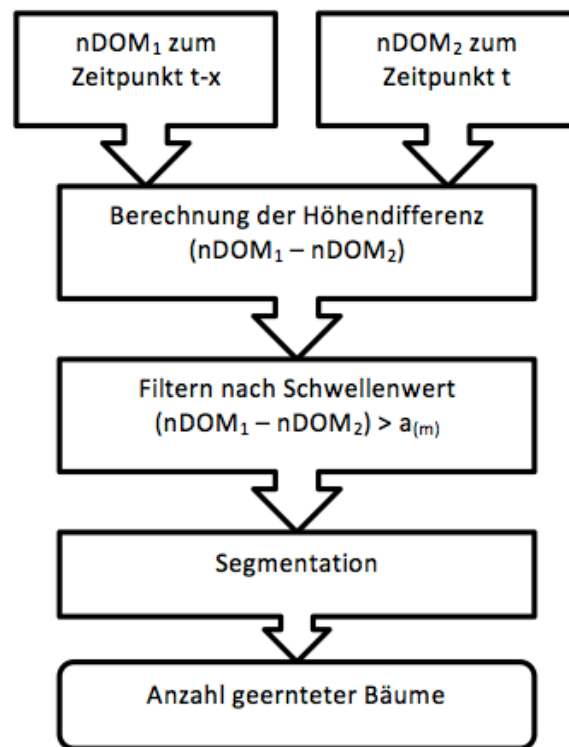


Abb. 15: Erkennung von Bestandeslücken anhand zweier zu unterschiedlichem Zeitpunkt aufgenommener Datensätze. Die Variable (a) beschreibt einen in Metern angegebenen, variablen Schwellenwert, (x) die Periode, die zwischen den beiden Befliegungen liegt, verändert nach Yu (2007).

4.2 Einteilung von Flächen nach Wuchsklassen

In der Praxis erfolgt die Einteilung von Betriebsflächen gewöhnlicher Weise anhand des Bestandesalters. Dazu werden die Bestände einer Altersklasse zugeteilt (z.B.: 1-20, 21-40, 41-60 Jahre,...). Alternativ dazu können Wuchsklassen verwendet werden, in denen die Betriebsflächen nicht nach deren durchschnittlichem Alter, sondern anhand des Entwicklungsstadiums eingeteilt werden. Im folgenden Unterkapitel wird ein neuer, von Koch et al. (2009) entwickelter, Ansatz zur automatischen Einteilung von Waldflächen vorgestellt, in den die Wuchsklassen einfließen. Zuvor werden, um einen Eindruck über die

Einteilungsmöglichkeiten nach Wuchsklassen zu gewinnen, die in der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) angewandten Definitionen präsentiert.

Die Einteilung von Flächen in Wuchsklassen erfolgt am Beispiel der ÖWI prinzipiell anhand ihrer Zugehörigkeit zu einer Höenschicht innerhalb der vertikalen Struktur. Ein weiteres Kriterium bei der Einteilung in eine Wuchsklasse stellt der BHD dar. Die ÖWI unterscheidet zwischen folgenden Wuchsklassen (Hauk und Schadauer 2009):

Blöße:

Dabei handelt es sich um Waldböden ohne forstlichen Bewuchs oder Flächen mit einer Überschirmung zwischen lediglich $1/10$ und $\leq 3/10$ beides ab einer Fläche von 500 m^2 .

Bestandeslücke:

Sind als Lücken im Kronendach, mit einer Größe zwischen 50 und 500 m^2 , oder einer Überschirmung unter $3/10$ definiert. Ferner wird zwischen Bestandeslücken mit und ohne Sträuchern differenziert.

Jugend I:

Beschreibt Flächen mit einer durchschnittlichen Baumhöhe bis $1,3 \text{ m}$. Diese Klasse wird nur vergeben wenn sie eine Fläche $> 500 \text{ m}^2$ aufweist. Weist ein Altholzbestand Lücken auf, deren Bewuchs in diese Klasse fallen, jedoch $< 500 \text{ m}^2$ sind, dann werden diese Flächen als „Sonderfall der Jugend I“ klassifiziert. Schirmverjüngung findet in dieser Wuchsklasse keine Berücksichtigung.

Jugend II:

Bei dieser Klasse kommt der BHD als Einteilungskriterium hinzu. Sie definiert Flächen mit einer Baumhöhe $> 1,3 \text{ m}$ und einem BHD $\leq 104 \text{ mm}$. Dabei können Flächen der Klasse Jugend II entweder freistehend oder unter Schirm stehen.

Kommen auf Flächen $< 500 \text{ m}^2$ die Klassen Jugend I und Jugend II gemischt vor, dann entscheidet die der Fläche nach dominantere Wuchsklasse über die Zuteilung.

Die weitere Einteilung erfolgt nach BHD-Klassen. Dabei entscheidet der mittlere BHD der Bestandesglieder aus der Oberschicht über die Einteilung des Bestandes in eine der folgenden Wuchsklassen:

Stangenholz:

BHD zwischen 105 und 204 mm.

Baumholz I:

BHD zwischen 205 und 354 mm.

Baumholz II:

BHD von 355 bis 504 mm.

Starkholz:

Bestände mit einem BHD > 505 mm.

Wie oben gezeigt wurde, verwendet die ÖWI ab der Klasse Stangenholz lediglich den BHD zur Einteilung der Bestockung in Wuchsklassen. Grundsätzlich wäre dies, wie im Unterkapitel BHD bereits erläutert wurde, auch mit Hilfe von ALS-Daten möglich. Der Umstand, dass die aus ALS-Daten gewonnenen BHD-Schätzungen von der Genauigkeit der Höhenschätzung und der korrekten Delinierung der Baumkronen abhängig ist, spricht jedoch dagegen. Alternativ dazu könnte die Klassifizierung von Wuchsklassen mit der Baumhöhe als alleinigem Einteilungskriterium vorgenommen werden.

Bei Betrachtung der von der ÖWI definierten Wuchsklassen, erscheint die Erfassung von Blößen und Bestandeslücken, wie Eysn et al. (2010) zeigen, als durchaus realistisch. Auch die Erkennung der Wuchsklasse „Jugend I“ könnte noch mittels Höhen- und Flächenabfragen gelöst werden. Komplexer stellt sich die Situation ab der Klasse „Jugend II“ dar, bei der zum ersten Mal der BHD in die Klassifikation einfließt. Ab dieser Klasse könnte die Einteilung alleine nach der Baumhöhe vorgenommen werden. Die im Folgenden vorgenommene Klassifizierung soll als Anregung dienen:

- Blöße: Flächen > 500 m²
- Bestandeslücke: Flächen < 500 m²
- Jugend I: < 2m
- Jugend II: 2 – 10m
- 10 – 15m
- 15 – 20m
- 20 – 25m
- usw.

Koch et al. (2009) liefern ein neuartiges Konzept zur Einteilung forstlicher Betriebsflächen auf der Basis von ALS-Daten. Dabei weisen sie darauf hin, dass prinzipiell eine kombinierte Verwendung von photogrammetrischen Daten (Orthofotos) und ALS-Daten in der Praxis anzudenken ist. Um das Potential von ALS-Daten in diesem Bereich zu ergründen, wurde deren Verwendungsmöglichkeit jedoch isoliert betrachtet. Der von Koch et al. (2009) entwickelte Prozess ist in Abb. 16 dargestellt und soll im Folgenden erläutert werden. Das Kartografische Ergebnis der Einteilung ist in Abb. 17 zu sehen.

1. Topografische Aufteilung:

Konventionell erfolgt die Abgrenzung von Abteilungen anhand der topografischen Gegebenheiten (z.B.: Gräben, Bäche, Geländekuppen). In Regionen mit weniger ausgeprägtem Relief werden auch Erschließungslinien zur räumlichen Einteilung hinzugezogen. Koch et al. (2009) setzen Algorithmen ein, die das Geländemodell (DGM) auf die oben genannten topografischen Gegebenheiten sowie auf vorhandene Erschließungslinien absuchen und diese als Abteilungsgrenzen festlegen.

2. Festlegung eines Erhebungsrasters:

Als zweiter Schritt wird ein Raster über das Untersuchungsgebiet gelegt. Im konkreten Beispiel haben die Rasterzellen eine Kantenlänge von 20 m. Innerhalb dieser Zellen erfolgt die weitere Analyse.

3. Verschneidung:

Durch die Verschneidung der Ergebnisse aus der topografischen Aufteilung (1) und dem Erhebungsraaster (2) findet eine Zuweisung der Rasterzellen zu den einzelnen Abteilungen statt. Verläuft beispielsweise eine topografische Einteilungslinie durch eine Rasterzelle, dann wird diese in zwei Teile getrennt, die jeweils einer anderen Abteilung zugewiesen werden.

4. Klassifikation der Waldtypen:

In diesem Schritt erfolgt die Einteilung der Rasterzellen in vier Kategorien. Rasterzellen mit einem Mindestanteil von 70% Nadelholz werden dem Typ „Nadelwald“, jene mit mindestens 70% Laubholzanteil dem Typ „Laubwald“

zugeschrieben. Rasterzellen die zu mindestens 70% unbestockt sind, zählen als „Bodenfläche“. Jene Rasterzellen, auf die die genannten Attribute nicht zutreffen, werden als „gemischte Zellen“ eingestuft. Diese Klassifikation erfolgt anhand eines aus einer Winterbefliegung erstellten nDOM, in dem die Koniferen (ausg. Lärche) besonders gut abgegrenzt werden können.

5. Einteilung nach der Oberflächenrauigkeit:

Diese Klassifikation dient der Unterscheidung von gleichaltrigen und ungleichaltrigen („vertikal stark strukturierten“) Rasterzellen. Die Rauigkeit wird über die Höhenverteilung innerhalb der Rasterzellen ermittelt. Dabei weisen gleichaltrige Erhebungszellen eine geringere Rauigkeit auf.

6. Einteilung nach Höhenklassen:

Rasterzellen denen das Attribut „gleichaltrig“ zugewiesen wird (5), werden im folgenden Analyseschritt in Höhenstufen eingeteilt. In Abhängigkeit von den lokalen Höhen-Maxima jeder Rasterzelle werden folgende Kategorien unterschieden:

- unter 3 m: Jungwuchs
- 3 – 10 m: Dickung
- 10 – 15 m: Stangenholz
- 15 – 25 m: Baumholz
- über 25 m: Altholz

7. Berechnung von Beständen:

In diesem Arbeitsschritt werden alle Rasterzellen mit identen Attributen zu Beständen zusammengefasst.

8. Feststellung einer Mindestgröße:

Dieser Arbeitsschritt stellt sicher, dass die in Punkt (7) zusammengefassten Flächen eine gewisse Mindestgröße (z.B.: 0,5 ha) aufweisen.

9. Zuteilung kleiner Flächen:

Benachbarte Flächen die dieser Mindestgröße nicht entsprechen, werden zu „horizontal stark strukturierten“ Beständen zusammengefasst. Rasterzellen, die aufgrund ihrer örtlichen Isolation nicht zusammengefasst werden können, werden jenem benachbarten Bestand zugeteilt, dem sie der Höhe nach am ähnlichsten sind.

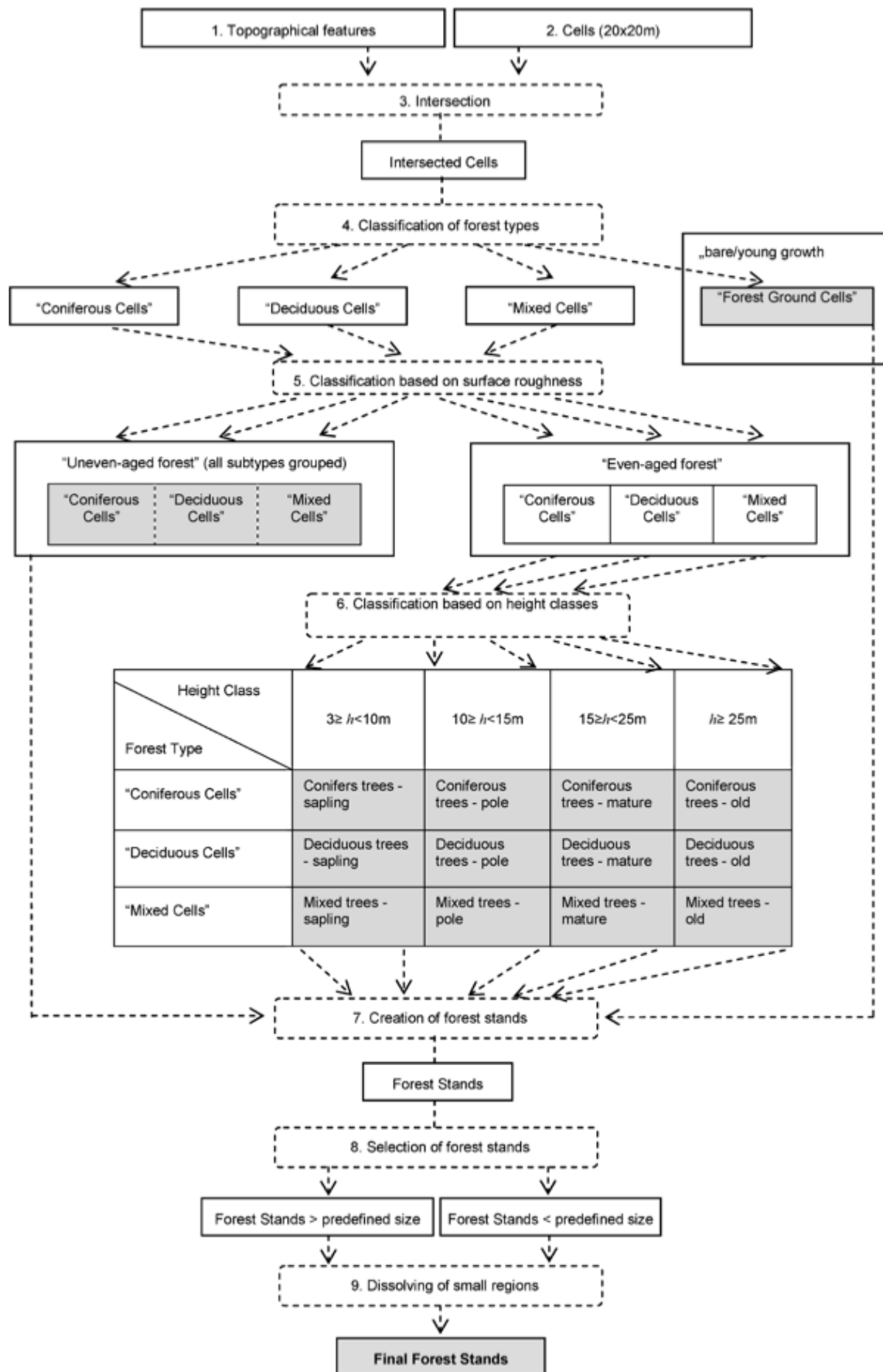


Abb. 16: Arbeitsablauf zur Erstellung von Wuchsklassenkarten mit ALS-Daten (Koch et al. 2009).

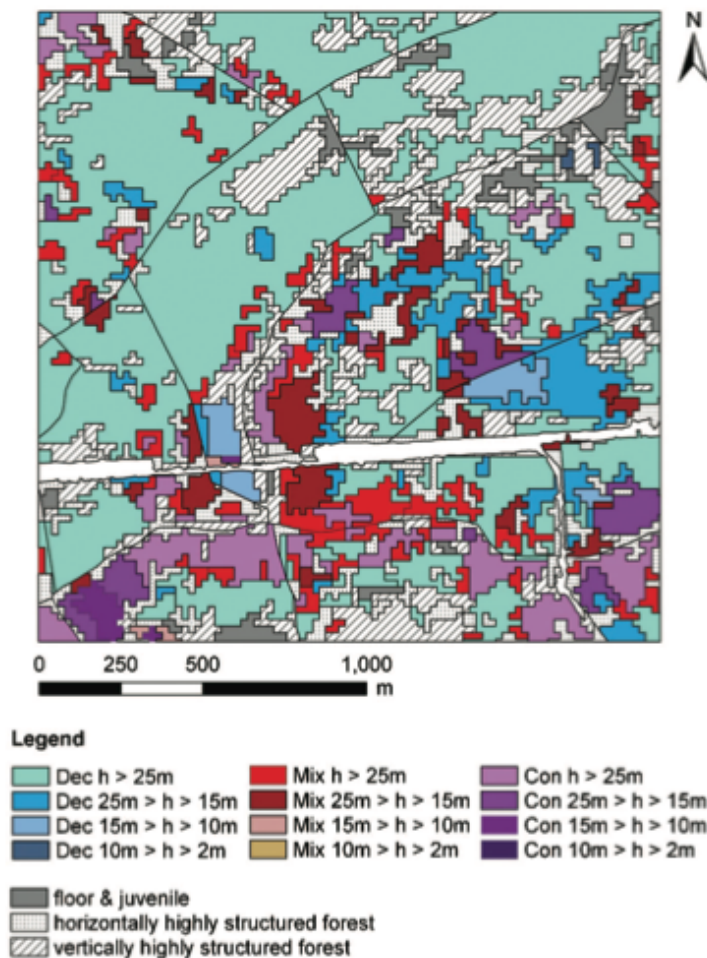


Abb. 17: Kartografisches Ergebnis der automatischen Bestandesdelinierung nach Struktur und Höhenklassen. Erläuterung der Legende: Dec = Laubwald, Mix = gemischte Fläche, Con = Nadelwald (Koch et al. 2009).

4.3 Kartografie und GIS

Wesentliche Grundfunktionen einer Forstkarte sind nach Moser (1970): Darstellung der Grenzen, Flächenbestimmung, Darstellung der räumlichen Lage von Waldbeständen und örtlichen Lage von Zustandsklassen (z.B. Altersklassen). Weiters dient sie zur Fixierung von Nutzungsplanungen und als Orientierungshilfe für die Durchführung von Arbeitsanweisungen.

Um diese Grundfunktionen einer Forstkarte zu wahren, muss sie im Zuge der Forsteinrichtung aktualisiert werden. Hierbei bieten ALS-Daten diverse Möglichkeiten, die im Folgenden erläutert werden.

Kartierung von Forstwegen:

Die Kartierung der forstlichen Erschließung stellt einen wichtigen Teilbereich der Forsteinrichtung dar. Bis dato erfolgt deren primäre Erfassung mittels Digitalisierung in Geoinformationssystemen auf Basis von Orthofotos. Ergänzungen oder Änderungen finden dann statt, wenn im Zuge der Außenaufnahmen dem Forsteinrichter ein Missstand auffällt. Die Digitalisierung von Forstwegen aus Orthofotos birgt den Nachteil, dass vor allem bei dichtem Kronenschluss die darunter liegende Erschließung nicht ersichtlich ist (Bsp.: Buchen-Hallenbestände). Mit der Verwendung digitaler Geländemodelle kann diesem Problem entgegengesteuert werden.

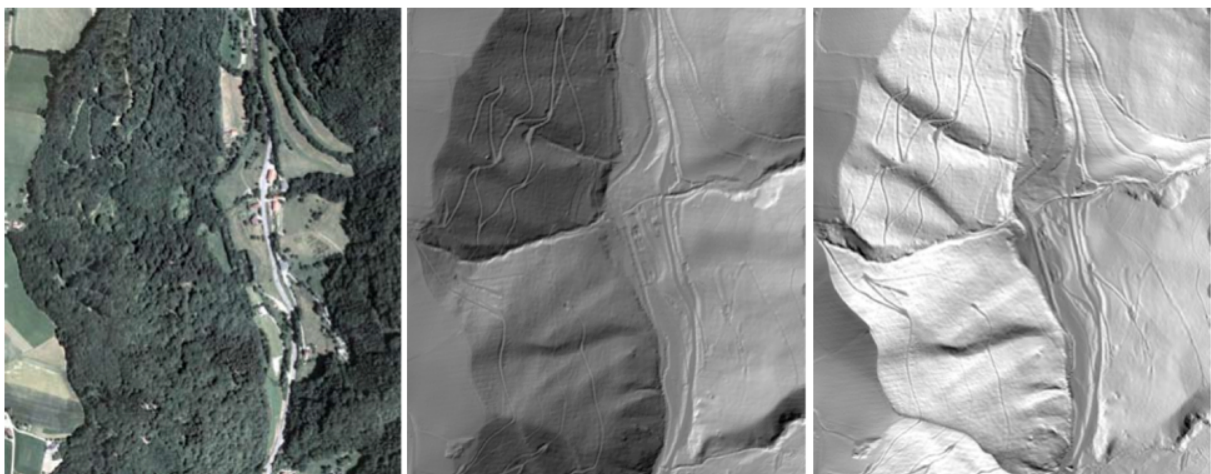


Abb. 18: Darstellungen derselben Fläche auf einem Orthofoto (links) einem von Nord-West beleuchteten DGM (Mitte) und einem von mehreren Richtungen beleuchteten DGM (rechts); aus Attwenger (2005).

Das DGM ermöglicht einen Blick unter die überschirmte Fläche. Um einen besseren Kontrast zwischen Berg und Tal zu erreichen, wird das DGM beleuchtet. Konventionell passiert das in der Fernerkundung aus nord-westlicher Richtung. Problematisch sind nach Attwenger (2005) vor allem Bereiche eines DGM, die im Eigenschatten liegen oder zu stark bestrahlt werden. Zu Kartierungszwecken empfiehlt Attwenger (2005) in solchen Fällen die Beleuchtung aus mehreren Richtungen, da dadurch das DGM kontrastreicher erscheint (Abb. 18).

Der größere Kontrast steigert zwar den Informationsgehalt, erschwert allerdings die Unterscheidung zwischen Gipfeln und Tälern.

Bereits Rieger et al. (1999) untersuchen auf der Fläche des BOKU Lehrforstes Möglichkeiten, Forststraßen automatisch zu digitalisieren. Dazu werden die Höhenwerte der einzelnen

Rasterpunkte eines DGM festgestellt. Nach Berechnung der Höhenunterschiede zwischen den Rasterpunkten generieren sie ein Modell, das die Geländeneigung darstellt. Anhand der Neigungswinkel werden dann Geländekanten extrahiert. Diese Geländekanten treten nicht nur entlang der Fahrbahn­ränder, sondern beispielsweise auch am Bankett und der Wasserabzugskante auf (Abb. 19) und erfordern daher eine manuelle Nachbearbeitung der Ergebnisse.

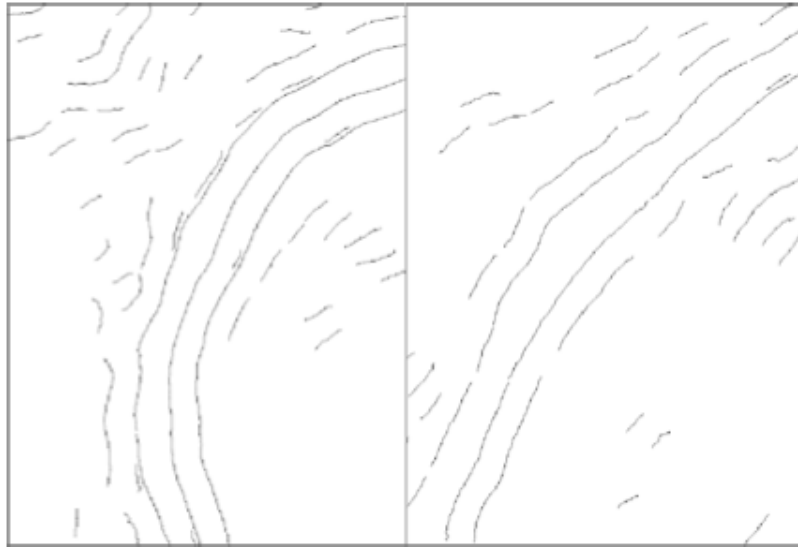


Abb. 19: Aus einem Geländeneigungs-Modell digitalisierte Geländekanten entlang einer Forststraße (Rieger et al. 1999).

Straub et al. (2009) und Koch et al. (2009) befassen sich ebenfalls mit der automatischen Digitalisierung forstlicher Erschließung. Dazu gehen sie wie Rieger et al. (1999) von einem Geländeneigungs-Modell aus. Jede Geländeneigung bekommt einen eigenen Grauwert zugeteilt. Im konkreten Fall werden Pixel im flachen Gelände schwarz dargestellt, während Pixel im steileren Gelände hell erscheinen (Abb. 20). Anhand eines Algorithmus werden potentielle Straßenpixel zusammengefasst. Beträgt die Distanz zwischen zwei erkannten Straßenteilen weniger als 10 m, werden diese verbunden. Potentielle Straßenteile mit einer Länge unter 100 m werden gelöscht. Straub et al. (2009) erwähnen, dass die Möglichkeit besteht, Form und Gefälle einer Forststraße mittels Quer- und Längsprofilen zu analysieren. White et al. (2010) empfehlen das Geländeneigungs-Modell auch für die manuelle Digitalisierung von Forstwegen zu verwenden, da dieses leichter zu interpretieren ist als das von Attwenger (2005) vorgeschlagene, aus mehreren Richtungen beleuchtete DGM.

Derzeit werden Forststraßen anhand von Orthofotos manuell digitalisiert. Um Informationen über den Anteil der Straßenfläche an der Gesamtfläche eines Reviers zu bekommen und die Fläche der Bestände nicht zu überschätzen, werden die digitalisierten Straßenmittellinien zu einem Polygon mit einer Breite von 10 m gepuffert. Diese Pufferbreite ist ein Durchschnittswert und beinhaltet Bankett, Wasserabzugskante und Straßenböschung. Das von Rieger et al. (1999) entwickelte Verfahren erkennt zwar die Fahrbahnbreite relativ genau, hat jedoch den Nachteil, dass auch andere Geländekanten (Wasserabzugskante, Bankett, Felsen) automatisch erfasst werden und hernach manuell aus dem Datensatz eliminiert werden müssen. Die von Straub et al. (2009) und Koch et al. (2009) vorgestellte Methode könnte das manuelle Digitalisieren der Straßenmittellinie insofern beschleunigen, als nur mehr die nicht erkannten Straßenteile ergänzt werden müssten.

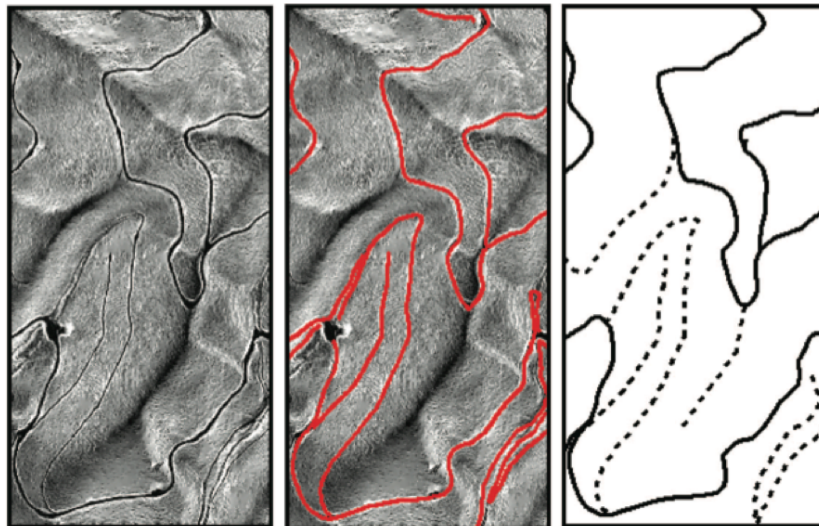


Abb. 20: (Links): Geländeneigungs-Modell. Rasterzellen mit geringer Neigung werden dunkler dargestellt. (Mitte): Geländeneigungs-Modell. Die roten Linien zeigen die automatisch extrahierte Erschließung. (Rechts): GIS Referenzdaten. Die schwarzen Linien zeigen zwei in den GIS-Daten eingetragene Erschließungstypen (Koch et al. 2009).

4.4 Erschließung

Im folgenden Unterkapitel wird auf die Einsatzmöglichkeiten von ALS bei der Festlegung von Erschließungslinien eingegangen. Ausgehend von der Tatsache, dass forstliche Erschließung größtenteils auf Grundlage photogrammetrisch erstellter Höhenschichtlinien geplant wird, beschäftigen sich Schiess und Krogstad (2003) sowie Krogstad und Schiess (2004) mit den Anwendungsmöglichkeiten von ALS-Daten in der Erschließungsplanung. Dazu wird eine

Straßenachse auf Basis eines aus ALS-Daten generierten DGM und Geländeneigungs-Modell mit Hilfe eines GIS entworfen, im Gelände verifiziert und mit konventionellen photogrammetrischen Höhenschichtlinien verglichen.

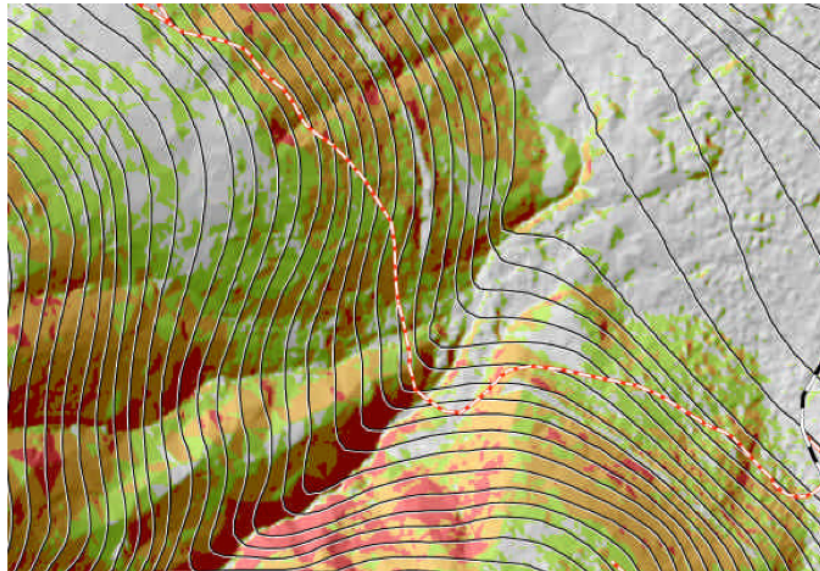


Abb. 21: Darstellung eines DGM (grau) basierend auf einem Raster von 1,8 x 1,8 m (6 x 6 Fuß). Auf Grundlage des DGM wurden mehrere Geländeneigungs-Klassen definiert die farblich dargestellt sind. Rot steht für steileres, grau für flacheres Gelände. Die Höhenschichtlinien wurden photogrammetrisch generiert, zeigen einen Höhenunterschied von 6,1 m (20 Fuß) an und wurden dargestellt, um die höhere Aussagekraft der ALS-Daten zu verdeutlichen. Die rot-weiße Linie stellt eine geplante Straßenachse dar (Schiess und Krogstad 2003, Krogstad und Schiess 2004).

Vor allem die aus dem Geländeneigungs-Modell gewonnene Information erweist sich nach Krogstad und Schiess (2004) als sehr nützlich für die Planung forstlicher Erschließung und ist sogar aus ALS-Daten gewonnenen Höhenschichtlinien vorzuziehen. Die photogrammetrisch erzeugten Höhenschichtlinien liefern gerade im sensiblen Gelände (Grabeneinhang) Daten, die stark von den Geländeaufnahmen abweichen. Problematisch ist auch, dass Höhenschichtlinien keine Information über das Kleinrelief liefern und somit im GIS entworfene Straßenachsen aufgrund von grobblockigem Gelände oft vor Ort verworfen werden müssen. Sie kommen zum Schluss, dass ALS-Daten die Außenaufnahmen zwar nicht ersetzen können, diese sich jedoch aufgrund der detaillierteren Ausgangsdaten effizienter gestalten lassen.

Digitale Geländemodelle können bei der Planung neuer forstlicher Erschließungen auch zur Abschätzung anfallender Erdbewegungen verwendet werden. Für gerade verlaufende Straßenstücke wurden bereits Anfang der 2000er Jahre Methoden zur Schätzung der

Erdbewegungen beim Straßenbau entwickelt. Aruga et al. (2005) entwickelten ein Modell, dass die Abschätzung der Erdbewegungen nunmehr auch auf kurvigen Forststraßen ermöglicht. Auf Basis eines DGM müssen zuerst positive und negative Kardinalpunkte sowie die horizontale Linienführung der Straßenachse in einem GIS oder CAD festgelegt werden. Vom Modell wird hernach die vertikale Trassierung geplant und alle 3 m ein Querprofil gesetzt. Anhand dieser Werte können die Größe der notwendigen Erdbewegungen sowie die Konstruktions- und Erhaltungskosten abgeschätzt werden. Bei der Kostenkalkulation für den Straßenbau werden beispielsweise Kosten für Trassierung, Rodung, Erdbewegungen, Drainage, Mauerwerke sowie Begrünung der Straßenböschung berücksichtigt. Die modellierten Erhaltungskosten beinhalten das Entfernen größerer Steine, Gräberarbeiten, sowie die Erhaltung der Wasserabzugskanten und Durchlässe. Das Modell führt automatisch ein Variantenstudium durch und wählt die kostengünstigste Lösung aus.

4.5 Holzernte

ALS-Daten können im Bereich der Holzernte in vielerlei Hinsicht Anwendung finden. Beispiele dafür sind die Lokalisierung erntereifer Bestände, die Positionierung von Seilgeräten oder die Analyse der vorhandenen Erschließung. Ein Fallbeispiel, das diese Thematik behandelt, findet sich in Monnet et al. (2011). Anhand eines DGM und eines Modells, das den aus ALS-Daten geschätzten Holzvorrat darstellt, zeigen sie die Einsatzmöglichkeiten von Laserscanning-Produkten zur Positionierung von Seiltrassen auf. Das DGM liefert hierzu Informationen über Geländeneigung, vorhandene Erschließung, Breite der Erschließung und potentielle Holzlagerplätze. Über das Holzvorratsmodell können Flächen mit hohem Holzvorrat identifiziert werden. Mit Hilfe dieser Eingangsdaten ist ein Variantenstudium zur Positionierung der Seilgeräte möglich. Monnet et al. (2011) legen noch einen Puffer um die im GIS festgelegten Seiltrassen. Dieser kennzeichnet den Arbeitsbereich des Seilgeräts. Jede Rasterzelle des Holzvorratsmodells repräsentiert ein bestimmtes Volumen.

Im GIS kann die unter dem Puffer liegende Fläche schließlich aus dem Holzvorratsmodell gestanzt werden. Nach Summierung der Volumenwerte der ausgestanzten Rasterzellen ergibt sich eine Schätzung des Holzvolumens, das im Zuge des Holzernteeinsatzes geerntet werden könnte.

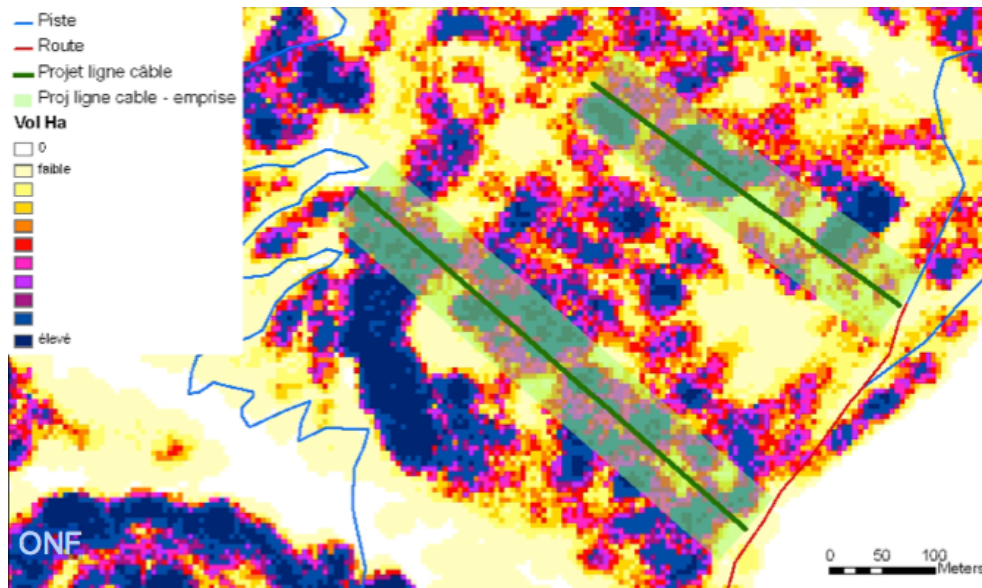


Abb. 22: Holzvorratsmodell aus ALS-Daten (Rasterdaten mit 5 x 5 m Auflösung). Dunkle Farbtöne deuten auf höhere Vorratsdichte, hellere Farbtöne auf geringere Vorratsdichte hin. Blaue Linien stellen einen Steig, die rote Linie stellt eine Forststraße dar. Die zwei dunkelgrünen Linien sind mit Hilfe eines GIS eingezeichnete Seiltrassen. Der Einflussbereich des Seilgeräts wird hellgrün dargestellt (Monnet et al. 2011).

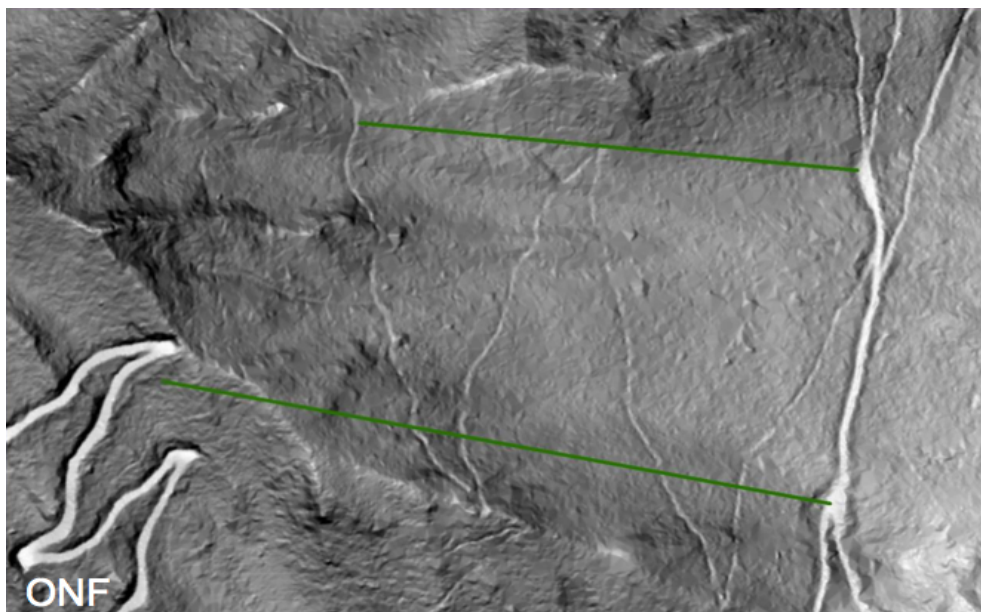


Abb. 23: Digitales Geländemodell mit zwei potentiellen Seiltrassen (dunkelgrüne Linien). Das DGM lässt die vorhandene Erschließung, sowie potentielle Lagerplätze erkennen. Am linken und rechten Bildrand sind zwei Forststraßen zu erkennen. Zwischen den dunkelgrünen Linien verläuft ein Steig. (Monnet et al. 2011).



Abb. 24: Orthofoto das die Oberfläche des oben abgebildeten DGM darstellt. Es soll den Informationsgehalt des DGM hervorheben (Monnet et al. 2011).

Aus ALS-Daten können auch Höhenschichtlinien berechnet werden. Diese sind genauer als die derzeit in Österreich aus der Photogrammetrie gewonnenen, kommerziell erhältlichen Höhenschichtlinien. Das DGM liefert im Vergleich zu Höhenschichtlinien ein detaillierteres Abbild der Topografie. Für ein Variantenstudium ist eine Kombination von DGM und aus ALS-Daten generierten Höhenschichtlinien vorteilhaft. Ein Beispiel dazu findet sich in Krogstad und Schiess (2004).

Kato und Schiess (2007) untersuchen ebenfalls das Potential von ALS-Daten als Planungsgrundlage für Seiltrassen. Grundsätzlich gehen sie von der Überlegung aus, dass bei Endnutzungen, vor allem aber bei Durchforstungen die mit einem Seilgerät durchgeführt werden, Stammzahl, BHD und Position von Bäumen ausschlaggebend für die Rentabilität des Ernteeingriffs sind. Die Dimension der benötigten Anker- und Mastbäume definieren sie als eine Funktion von BHD der zu erntenden Bäume, Topografie und Länge der Seiltrasse. Mit ALS-Daten sehen Kato und Schiess (2007) auch die Möglichkeit potentielle Anker- und Mastbäume aufzufinden. Anhand eines nDOM werden Position und Höhe der einzelnen Individuen festgestellt. Diese Analyse soll Auskunft über die Quantität der zu erntenden Bäume geben. Dabei können vor allem vorherrschende Individuen befriedigend genau erkannt werden. Zur Ableitung des BHDs, welcher zur Erkennung von Anker- und Mastbäumen wichtig wäre, liegen allerdings keine Angaben vor.

5 ANALYSERAHMEN

Der vorliegende Analyserahmen behandelt jene Aspekte des ALS, die für eine etwaige Implementation dieser Technologie in das forstbetriebliche Informationssystem, ausschlaggebend sein werden.

In Anlehnung an Wirnsberger (2011, 76 f) werden im Sinne einer summativen Evaluation Kriterien untersucht, die den betrieblichen Nutzen von ALS beeinflussen. Die von Wirnsberger (2011) beschriebene summative Evaluation hat den Charakter einer nutzenorientierten Evaluation, deren Ergebnis die Beurteilung des praktischen Nutzens des Evaluationsgegenstandes für den Nutzer hat.

Als Evaluationsgegenstände werden die Genauigkeit, Kosten, Verfügbarkeit, technische Voraussetzungen und die Ergebnisse praktischer Anwendungsversuche herangezogen.

Die mit ALS erzielbaren Genauigkeiten sind vor allem für den Einsatz der Daten im Rahmen der Forsteinrichtung wichtig. Ein Aspekt, der nicht vernachlässigt werden darf, sind die mit der Einführung der ALS-Technologie verbundenen Kosten. Hierzu werden Faktoren, welche die Kosten der Datenaufnahme beeinflussen, aufgezeigt. Es sind vor allem der Preis der Daten und der Preis der für die Datenverarbeitung notwendigen Programme bzw. Lizenzen ausschlaggebend. Weiters wird die Verfügbarkeit der Daten untersucht. Dabei soll dem Leser ein Eindruck vermittelt werden, für welche Regionen in Österreich bereits ALS-Daten vorhanden sind und in welchem Datenformat diese erworben werden können. Zuletzt werden die Ergebnisse zweier im Bereich der Forsteinrichtung angesiedelter, praktischer Anwendungsversuche präsentiert.

5.1 Genauigkeit

Die Vielzahl der für diese Arbeit zusammengetragenen Studien bringt mit sich, dass unterschiedliche statistische Maße angegeben werden. Diese sind der Korrelationskoeffizient (R), das Bestimmtheitsmaß (R^2), der Root Mean Square Error (RMSE) und die Standardabweichung (SA).

R beschreibt den Zusammenhang zwischen zwei Messwertreihen und kann Werte im Bereich $-1 \leq R \leq 1$ annehmen. Je näher R an -1 oder 1 liegt, desto stärker ist dieser

Zusammenhang. Bei $R = 0$ besteht kein linearer Zusammenhang (Sachs und Hedderich 2006, 103).

R^2 errechnet sich aus dem Quadrat von R und beschreibt den Anteil der Streuung einer Variable y , der durch lineare Regression aus der Variable x erklärt wird (Sachs und Hedderich 2006, 110).

Um dem Leser einen besseren Überblick zu verschaffen, wurde in dieser Arbeit, sofern in der Quellliteratur der Korrelationskoeffizient angegeben war, dieser stets quadriert.

Das Fehlermaß RMSE wird aus der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers berechnet. Er dient zur Bestimmung des Fehlers einer Vorhersage und ist von der Standardabweichung (Fehlerstreuung) zu unterscheiden (GeoDataZone 2012). Der RMSE und die SA berechnen sich wie folgt (Kessler 2007):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$
$$SA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i - BIAS)^2}{n - 1}}$$

Der BIAS steht für eventuell vorhandene systematische Fehler und errechnet sich als Mittelwert aller Residuen (Kessler 2007).

Die Genauigkeit von Laserscanning-Produkten hängt von deren Punktdichte/ m^2 ab. Diese wird vor allem von den technischen Eigenschaften des Sensors und der Flughöhe über der Geländeoberfläche beeinflusst. Beim derzeitigen Stand der Technik werden bei einer Flughöhe von 1000 m Punktdichten zwischen 1 und 4 Punkten/ m^2 erreicht. Dieser Wert hängt von der Fluggeschwindigkeit und dem Öffnungswinkel des Scanners ab. Helikopter getragene Sensoren erreichen Punktdichten von über 20 Punkten/ m^2 (Hollaus 2006).

Der technische Fortschritt im Bereich der Lasertechnologie wird auch in den kommenden Jahren eine Steigerung der emittierten Pulsfrequenz bringen. Werden mehr Impulse ausgesandt, so erhöht sich die Zahl der von der Vegetationsoberfläche reflektierten Impulse. Folglich können einzelne Baumkronen genauer voneinander unterschieden werden, was die Qualität des Oberflächenmodells verbessert (Koch et al. 2008).

5.1.1 Digitales Geländemodell

Die Genauigkeit des DGM ist von fundamentaler Bedeutung für viele der im Folgenden behandelten Parameter.

Die Genauigkeit des DGM hat beispielsweise direkten Einfluss auf die Genauigkeit der geschätzten Baumhöhen (Hyypä et al. 2008) und somit auf alle Parameter, in welche die Baumhöhe einfließt.

Die Präzision eines DGM hängt von der Durchdringungsrate der Laserimpulse durch die Vegetation ab. Gerade in bewaldeten Gebieten kann diese, bedingt durch unterschiedliche Bestockungsdichten, sowie Laub- und Nadelbaumarten, stark variieren. Reutebuch et al. (2003) untersuchen dazu die Genauigkeit eines DGM unter vier verschiedenen dicht bestockten Teilen eines 70 jährigen Nadelwaldes. Sie kommen zu folgendem Ergebnis:

Behandlungszustand	Mittlere Abweichung (m)	Standardabweichung (m)
Kahlschlag	0,16	0,23
Stark durchforstet	0,18	0,14
Leicht durchforstet	0,18	0,18
Undurchforstet	0,31	0,29

Tabelle 1: Genauigkeit eines digitalen Geländemodells unter einem 70 jährigen Nadelwaldbestand mit verschieden dichten Kronenschluss (Reutebuch et al. 2003).

5.1.2 Einzelbaum- und flächenbezogener Ansatz

Ein ausführlicher Vergleich der auf Bestandes- und Einzelbaumebene bezogenen Verfahren hat laut Hyypä et al. (2008) auf streng wissenschaftlicher Basis noch nicht stattgefunden. Sie geben an, dass bis dato noch keine Studie vorliegt, in der beide Ansätze auf identer Fläche mit gleicher Genauigkeit verglichen wurden. So wurden beispielsweise auf den Bestand bezogene Auswertungen stets mit terrestrischen Inventurpunkten kalibriert, während bei Überprüfung der Einzelbaumverfahren auf den gleichen Flächen, bei den vorgenommenen Untersuchungen, keinerlei Kalibrierung stattgefunden hat. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist somit nicht möglich. Erwartungsgemäß sollte aber das Einzelbaumverfahren geringere systematische Fehler bei der Höhenmessung aufweisen (Hyypä et al. 2008). Die Genauigkeit bei der Höhenmessung sollte sich schließlich auf die

Genauigkeit der Vorratsschätzung auswirken. Ein grober Überblick über die Vor- und Nachteile beider Ansätze wird in Tabelle 2 dargestellt:

Ansatz	+	-
Einzelbaumebene	Gute Ergebnisse bei der Schätzung von Vorratswerten.	Kostspieligere ALS-Daten notwendig.
	Geringe Anzahl an terrestrischen Kalibrierungspunkten notwendig.	Aufwändigere Datenaufbereitung und –verarbeitung.
	Hoher Informationsgewinn.	
Bestandesebene	Verwendung kostengünstiger ALS-Daten.	Kostspielige terrestrische Inventurpunkte werden zum Kalibrieren benötigt.
	Kombination mit bereits bestehenden, terrestrischen Betriebsinventuren.	
	Verwendung statistischer Methoden bei der Berechnung der Parameter.	Ohne genaue Referenzdaten ergeben sich entsprechend ungenaue Vorratsschätzungen.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile einzelbaum- und bestandesbezogener Auswertungsmethoden; nach Hyyppä et al.(2008)

5.1.3 Baumhöhe

(1) Einzelbaumbezogener Ansatz:

Buddenbaum (2010) wendet zwei Methoden an, um die Baumhöhen aus der Punktwolke zu schätzen. Diese sind die Normalverteilungsmethode und die Baumhöhenschätzung mit dem 95. und dem 99. Perzentil. Mit der Normalverteilungsmethode, die sich der Tatsache bedient, dass die Verteilung der Höhenwerte im Kronenbereich ähnlich einer Normalverteilung ist, wurde eine Schätzung der Baumhöhen mit einem R^2 von 0,93 und einem RMSE von 2,1 m erzielt. Die Schätzung der Baumhöhen aus Perzentilen der Höhenverteilung gestaltet sich laut Buddenbaum (2010) weniger aufwändig. Bei Verwendung des 95. Perzentils erreicht er bei einer tendenziellen Unterschätzung der Baumhöhen ein R^2 von 0,93 und RMSE von 2,2 m. Die Auswertungen des 99. Perzentils liefern bei einer tendenziellen Überschätzung der Baumhöhen ein R^2 von 0,91 und einen RMSE von 2,4 m (Buddenbaum 2010).

Hollaus (2006) stellt in seiner Studie einen direkten Vergleich der Punktwolken- und nDOM-Methode in einem von der Baumart Fichte dominierten Gebiet an. Dabei erzielt er auf Basis der Punktwolke ein R^2 von 0,89 und einen RMSE von 2,4 m. Auf Basis des nDOM erzielen seine Schätzungen ein R^2 von 0,87 und einen RMSE von 2,6 m. Weiters untersucht er den Einfluss der Hangneigung auf die Höhenschätzung und stellt fest, dass es vor allem im steileren Gelände zu einer Unterschätzung der Baumhöhen kommt.

Buddenbaum (2010) fasst die Erkenntnisse mehrerer Studien zur Baumhöhenmessung mit ALS zusammen. Diese bestätigen den von Hollaus (2006) dokumentierten Einfluss der Hangneigung auf die Höhenschätzung. Weiters führt Buddenbaum (2010) an, dass bei starker Hangneigung die Höhe von Bäumen die zum Hang geneigt sind, unterschätzt wird, während die Höhe von Bäumen die vom Hang weggeneigt sind, überschätzt wird. Ein weiterer von Buddenbaum (2010) erwähnter Faktor, der die Genauigkeit der Höhenmessung beeinflusst, ist die Trefferquote der Laserimpulse auf die Kronenspitze. Somit kommt es tendenziell bei Nadelbäumen zu einer Unterschätzung der Höhe.

Folglich sollten bei Baumhöhenmessungen mit ALS im weniger stark geneigten Gelände und bei Baumarten mit flacheren Kronen höhere Genauigkeiten erzielt werden können.

Bei der von Straub (2010) durchgeführten Untersuchung zur Schätzung der Oberhöhe zeigt die 90. Höhenperzentile des nDOM mit $R^2 = 0,75$ ($p < 0,01$) die höchste Korrelation mit den Feldaufnahmen.

(2) Flächenbezogener Ansatz:

Die Untersuchungen von Hollaus (2006) zur Schätzung der Lorey'schen Mittelhöhe berücksichtigen mehrere Durchmesser der Referenzflächen (21 – 29 m) sowie verschiedene Schwellenwerte für die Vegetationsuntergrenze (0 / 2 / 4 m). Hollaus (2006) stellt fest, dass bei Verwendung der Punktwolke im besten Fall ein R^2 von 0,79 mit einem RMSE von 3,04 m erzielt werden kann (84. Höhenperzentil / Referenzflächendurchmesser 25 m / Vegetationsuntergrenze 4 m). Bei dem, auf dem nDOM basierenden Modell ergibt sich ein R^2 von 0,70 mit einem RMSE von 3,90 m (92. Höhenperzentil / Referenzflächendurchmesser 23 m / Vegetationsuntergrenze 2 m). Gewöhnlicher Weise wird von einer tendenziellen Unterschätzung der Baumhöhen ausgegangen. Diese ergibt sich aus dem Umstand, dass relativ wenige Laserimpulse direkt auf einen Wipfel treffen (Hollaus 2006).

Ein weiterer Faktor, der die Genauigkeit der Höhenschätzungen beeinflusst, ist die Genauigkeit des DGM, welche vornehmlich von der Durchdringungsrate der Laserimpulse durch die Vegetation bestimmt wird. Aus den Bodentreffern unter den Laserimpulsen wird das DGM interpoliert. Je weniger Impulse also auf den Boden treffen, desto ungenauer ist das DGM. Deshalb empfehlen sich, vor allem in laubwaldreichen Gebieten, ALS-Daten aus Winterbefliegungen. Für Nadelwald konnte Hollaus (2006) eine Durchdringungsrate der Vegetation von 12% bei Sommerbefliegung und 22% bei Winterbefliegung feststellen.

Untersuchungen von Eckmüllner (1999) zeigen, dass mittels ALS die Höhe von Nadelbäumen auf $\pm 1,39$ m und die von Laubbäumen auf $\pm 1,66$ m genau bestimmt werden kann. Im Vergleich dazu, kann bei terrestrischer Höhenermittlung die Höhe von Nadelbäumen auf $\pm 1,23$ m (Vertex) bzw. $\pm 1,57$ m (Relaskop, Suunto) und bei Laubbäumen auf $\pm 1,64$ m (Vertex) bzw. $\pm 1,78$ m (Relaskop, Suunto) genau ermittelt werden.

5.1.4 Bestandesvorrat

(1) Multiple Regressionsanalyse:

Die Referenzdaten, zu den von Straub (2010) durchgeführten Untersuchung, stammen aus fixen Probekreisen ($n=300$) mit einem Radius von 12m. Dadurch können die Ergebnisse der Multiplen Regressionsanalyse, der k -NN Methode und der an die Ertragstafeln angelehnten Methode direkt verglichen werden. Das Regressionsmodell mit schrittweiser Vorwärtss Selektion validiert er mit der Leave-One-Out-Kreuzvalidierung. Diese dient dazu, die Qualität des Modells zu bewerten. Dabei wird aus der Summe der Probeflächen (hier $n=300$) eine ausgewählt, die als Testdatensatz fungiert. Dem Testdatensatz, der zur Validierung des Modells dient, werden dann die verbleibenden (hier 299) Datensätze als Trainingsdatensatz gegenübergestellt. Straub (2010) errechnet für sein Modell ein $R^2 = 0,56$, sowie einen RMSE von $79,79 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ hervor. Das entspricht einem RMSE von 31%

(2) Nicht parametrische Verfahren:

Mit der k -NN Methode erreicht Straub (2010) ein $R^2 = 0,53$ und einen RMSE von $81,93 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ oder 31%. Die Herausforderung dieser Methode besteht in der Wahl der passenden Anzahl an k -nächsten Nachbarn / Beobachtungen zur Schätzung des Zielparameters

(Holzvorrat). Dazu werden von Straub (2010) k -Werte von $k = 1$ bis 60 ebenfalls einer Leave-One-Out-Kreuzvalidierung unterzogen. Er berechnet den RMSE für jeden k -Wert und wählt schließlich den am besten passenden ($k = 35$) aus (Abb. 25).

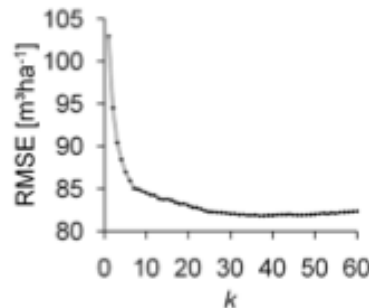


Abb. 25: RMSE ($m^3 \cdot ha^{-1}$) des geschätzten Holzvorrats in Abhängigkeit der Anzahl an k -nächsten Nachbarn, die zur Schätzung des Parameters herangezogen werden (Straub 2010).

(3) Auf Ertragstafeln basierender Ansatz:

Mit der vorgestellten Formel erreicht Straub (2010) ein R^2 von 0,53 und einen Schätzfehler RMSE von $81,78 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, was 31% entspricht. Die Genauigkeit dieser Schätzung setzt sich naturgemäß aus der Genauigkeit der in die Volumsformel einfließenden Variablen zusammen. Dabei kann die Oberhöhe, bei Verwendung der 90. Perzentile, mit $R^2 = 0,76$ aus dem nDOM bestimmt werden. Straub (2010) benutzt den Kronenschlussgrad als Ersatz für den Bestockungsgrad.

Es darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass der Kronenschlussgrad im Gegensatz zum Bestockungsgrad den Wert „1“ nicht übersteigen kann. Ein Umstand, der sich vor allem auf die Volumsschätzung undurchforsteter Bestände, sowie von Beständen in geneigtem Gelände auswirken dürfte.

Die Schätzung der Laub- und Nadelbaumanteile führt Straub (2010) mit Hilfe von Infrarot-Bildern durch. Seine Ergebnisse erzielen $R^2 = 0,76$.

Dadurch, dass lediglich zwischen Laub- und Nadelbäumen, nicht jedoch zwischen den einzelnen Baumarten unterschieden wird, stellt die Wahl des adäquaten Ertragstafelsets eine wichtige Komponente dar. In Gebieten mit einer heterogenen Baumartenzusammensetzung gestaltet sich dies naturgemäß schwerer als in Gebieten mit beispielsweise nur einer Laub- und einer Nadelbaumart.

Straub (2010) bezieht sich in seinen Überlegungen auf das Eichhorn'sche Gesetz. Dieses beschreibt den altersunabhängigen Zusammenhang zwischen der Mittelhöhe eines Bestandes und seiner Gesamtwuchsleistung. Diese bereits im Jahre 1902 von Eichhorn vorgestellte Beziehung beschränkt sich allerdings auf wenig bis unbehandelte Bestände und wurde im Laufe des 20. Jahrhunderts mehrmals überarbeitet und konkretisiert. Beispielsweise durch Gerhardt, der hinzufügte, dass es für jede Höhenbonität eine spezifische Beziehung zwischen der Mittelhöhe und der Gesamtwuchsleistung eines Bestandes gibt. Und schließlich von Assmann, der feststellte, dass selbst bei Beständen die hinsichtlich des Alters und der Mittelhöhe ident sind, die Standortsbedingungen die Gesamtwuchsleistung um $\pm 15\%$ variieren lassen (Pretzsch 2002). Deshalb unterteilt Assmann seine Ertragstafeln in Ertragsniveaustufen, die diese unterschiedlichen Gesamtwuchsleistungen bei gleicher Höhe berücksichtigen (Gadow 2003).

(4) lineares Holzvorratsmodell:

Die Referenzwerte zur Erstellung des Modells beziehen Hollaus (2006), sowie Hollaus et al. (2009 a, b, c) aus Winkelzählproben. Das Problem dabei ist der je nach BHD variierende, WZP-Durchmesser. Deshalb untersucht Hollaus (2006) bei welchem Probeflächen-Durchmesser die Vorratsschätzungen aus den WZP am besten angenähert werden. Das beste Ergebnis liefern mit einem R^2 von 0,87 und einer Standardabweichung zwischen 90 und 91,9 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ Probeflächen mit einem Durchmesser von 20 m. Hollaus et al. (2009 c) kommen auch zum Ergebnis, dass Probeflächen mit einem Durchmesser von 20 m die besten Ergebnisse liefern ($R^2 = 0,79$, Standardabweichung = 107,4 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ bzw. 31,5%). Die Untersuchungen zum linearen Holzvorratsmodell finden in Hollaus (2006) auf einem Gebiet statt, das zu 96% von Fichte und zu 3% von Tanne bestockt ist. Das verbleibende Prozent teilen sich Lärche, Buche und andere Laubbaumarten. Hollaus et al. (2009 c) wenden das Modell auf das gesamte Bundesland Vorarlberg an. Dies bringt einen gestiegenen Laubholzanteil mit sich (63% Nadelholz, 23,9% Laubholz, 13,1% Blößen), der die Genauigkeit der Holzvorratsschätzung negativ beeinflusst.

Bei der derzeit gängigen Methode der Schätzung des Holzvorrates mittels Stichprobeninventuren in Form von WZP, hängt die Genauigkeit der erhobenen Vorratswerte von der Anzahl der Stichprobenpunkte auf der Fläche ab.

Nach Eckmüllner (2012) kann mit konventionellen Inventurmethode der Vorrat auf Betriebsebene zwischen ± 5 und ± 10 % genau bestimmt werden. Auf Revierebene (3000 – 4000 ha) kann mit einer Genauigkeit von ± 10 bis ± 15 % gerechnet werden.

5.1.5 Waldwachstum

(1) Höhe:

Bei der Schätzung des Höhenunterschieds einzelner Baumpaare anhand zweier, zu verschiedenen Zeitpunkten aufgezeichneten, nDOM erzielt Yu (2007) ein R^2 von 0,86 mit einer Standardabweichung von 0,15 m. Ungenauigkeiten ergeben sich hier beispielsweise, wenn die Wipfel der Bäume zum Aufnahmezeitpunkt durch den Wind bewegt werden. Weiters muss je nach Wüchsigkeit die Periode zwischen den beiden Befliegungen lange genug gewählt sein.

(2) Vorrat:

Einzelbaumauswertung:

Genau betrachtet, verwendet der von Yu et al. (2008) entwickelte Ansatz die Baumhöhe als alleinige Eingangsgröße zur Schätzung des Vorratszuwachses, da selbst der BHD der Bäume als Funktion der Baumhöhe angenähert wird (vgl. Kalliovirta und Tokola 2005).

Die Funktion zur Schätzung des BHD sowie die Funktion zur Berechnung der Einzelbaumvolumina, wurde speziell für die im Probestand häufigsten Baumarten Fichte, Kiefer und Birke entwickelt und ist nicht direkt auf mitteleuropäische Waldverhältnisse übertragbar.

Yu et al. (2008) stellen beim Vergleich mit den terrestrischen Referenzpunkten ein R^2 von 0,56 fest. Die Standardabweichung liegt bei $8,92 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$; das entspricht 35,5%.

Vergleich zweier DOM:

Beim Vergleich mit den auf der Referenzfläche im terrestrischen Inventurverfahren aufgenommenen Werten erhalten Yu et al. (2008) ein R^2 von 0,56. Die Standardabweichung beträgt in diesem Fall $8,39 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$; das entspricht 35,7%.

5.1.6 Brusthöhendurchmesser

Die Genauigkeit des BHD spielt eine wichtige Rolle, da dieser zur Berechnung der Grundfläche und - in weiterer Folge - auch des Bestandesvorrats quadriert wird. Fehler bei der Messung des BHD, wie sie z.B. durch Anlegen der Kluppe auf falscher Höhe, zu starkes Zusammendrücken der Schenkel, fehlerhafte Ablesung oder Rundungsfehler entstehen können, haben große Auswirkungen auf die Genauigkeit der daraus abgeleiteten Parameter. Bei praxisüblichen Vollkluppungen beträgt der Grundflächenfehler $\pm 1\%$ (Kramer und Akça 2008).

Das von Schardt et al. (2002) entwickelte Modell erreicht ein R^2 von 0,72, jenes von Ziegler et al. (2001) ein R^2 von 0,86. Die Genauigkeit des Modells zur Herleitung der Brusthöhendurchmesser setzt sich aus den Genauigkeiten der Höhendaten und jenen der Kronenschirmfläche zusammen. Der primär einflussreichste Faktor hinsichtlich der Genauigkeit der Kronenschirmfläche ist die korrekte Erkennung der einzelnen Kronen. Dazu müssen zuerst die Stämme über lokale Höhen-Maxima identifiziert werden, von denen aus die Segmentierung der Kronen erfolgt (Abb. 26). Fehler bei der Segmentierung der Kronen entstehen beispielsweise

(1) durch mehrere lokale Höhen-Maxima innerhalb einer Baumkrone, wie es bei Laubbaumarten häufig der Fall ist. Hier kommt es zur Aufteilung der eigentlichen Krone, also einer Übersegmentierung und somit zur Unterschätzung der Kronenschirmfläche.

(2) durch Verschmelzung mehrerer Kronen. In diesem Fall liegt eine Untersegmentierung vor, die vor allem bei fehlenden lokalen Höhen-Maxima oder Dichtstand auftritt. Es kommt zur Überschätzung der Kronenschirmfläche (Schardt et al. 2002).

Die bei diesem Ansatz verwendete Wasserscheidensegmentierung des nDOM lässt keine Erkennung von Individuen zu, die von vorherrschenden Bäumen verdeckt sind (Reitberger et al. 2009).

Bei den vorgestellten Modellen zur Schätzung des BHD von Fichten zeigt sich, dass die Höhe das Modell zu 2/3 und die Kronenschirmfläche nur zu 1/3 beeinflusst. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da die Höhenwerte aus ALS-Daten genauer bestimmt werden können als die Kronenschirmflächen (Schardt et al. 2002).

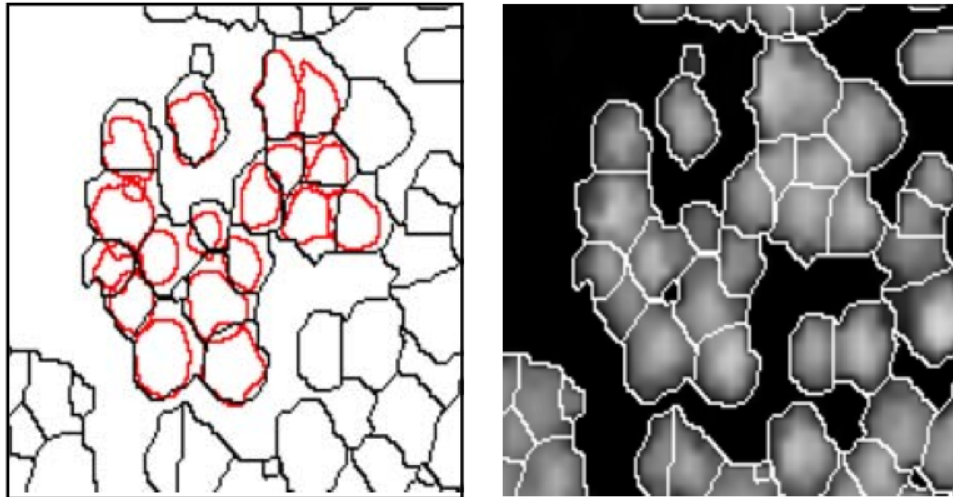


Abb. 26: Ergebnis einer Wasserscheidensegmentierung. Links: direkter Vergleich des Segmentierungsergebnisses (schwarz) mit den Verifizierungsbäumen (rot) mit deutlich sichtbarer Verschmelzung zweier Kronen (oben). Rechts: Segmentierungsergebnis mit nDOM im Hintergrund (Schardt et al. 2002).

5.1.7 Baumalter

Kalliovirta und Tokola (2005) versuchen in Ihrer Studie das Baumalter als abhängige Variable von Baumhöhe und Kronendurchmesser zu erklären. Über alle drei Baumarten gerechnet, ergeben Modelle, bei denen der Kronendurchmesser als alleinige unabhängige Variable verwendet wird, Altersschätzungen mit einer Standardabweichungen von 30 Jahren. Bei Modellen, welche die Baumhöhe als alleinige unabhängige Eingangsvariable haben, sind es 26 Jahre. Kombinierte Modelle aus Baumhöhe und Kronendurchmessern liefern Standardabweichungen von 27 Jahren. Bei den Nadelbaumarten wird die Baumhöhe als wichtigere unabhängige Variable erkannt. Für Birke empfehlen die Autoren den Kronendurchmesser als alleinige unabhängige Eingangsvariable. Generell liefern Modelle für die Nadelbaumarten Kiefer und Fichte bessere Ergebnisse als für die Birke (Kalliovirta und Tokola 2005).

Es sollte jedoch angemerkt werden, dass selbst bei den in Finnland gegebenen und von den Autoren unterstrichenen, homogenen und lockeren Bestandesaufbau, die Altersschätzungen extrem ungenau sind. In Mitteleuropa dürfte sich die Herleitung des Baumalters aus ALS-Daten noch unrealistischer gestalten.

5.1.8 Bestockungsgrad

Der BG wird aus dem bereits beschriebenen Unvermögen der Altersbestimmung aus ALS-Daten durch den Kronenschlussgrad angenähert.

Laut Eckmüllner (2012) ergibt die Korrelation der Parameter BG und Kronenschlussgrad ein R^2 von 0,8. Bei Gegenüberstellung des BG im Bereich zwischen 0 und 0,8 und des Kronenschlussgrades, ebenfalls im Bereich zwischen 0 – 0,8 liegt eine straffe Korrelation vor ($R^2 = 0,6$). Bei Betrachtung des Bereiches $BG > 0,8$ bzw. $Kronenschlussgrad > 0,8$ kann kein Zusammenhang zwischen den beiden Parametern festgestellt werden.

Für Bestände die einen $BG \leq 0,8$ aufweisen, kann somit der Kronenschlussgrad als Ersatz für den BG verwendet werden.

5.1.9 Baumartenanteile

Zur Angabe der Genauigkeit der Baumartenerkennung mittels ALS-Daten wird das Ergebnis der Klassifikation mit terrestrisch erhobenen Referenzdaten verglichen. Der Grad der Übereinstimmung wird dann als Trefferquote angegeben.

Heurich (2006, 187) berichtet von einer Trefferquote von bis zu 97% bei der Klassifikation von Laub- und Nadelbäumen aus ALS-Daten. Dieses Ergebnis wurde mit Daten aus einer Winterbefliegung erreicht. Die von ihm behandelten Untersuchungsgebiete weisen einen Nadelholzanteil zwischen 67 und 94% auf.

Ein hoher Nadelholzanteil steigert die Genauigkeit der Segmentierung einzelner Kronen, was die hohe Trefferquote erklären könnte. Ein höherer Lärchenanteil könnte sich negativ auf das Klassifikationsergebnis auswirken.

Heinzel (2011) betont, dass die Kronensegmentierungsmethode vor allem in dichten Beständen Probleme zeigt. Er konnte bei einer über die sechs Baumarten (Rotkiefer, Eiche, Buche, Fichte, Hainbuche, Vogelkirsche) geführten Klassifikation eine durchschnittliche Trefferquote von 57% über alle Baumarten erzielen. Auf die drei Hauptbaumarten (Rotkiefer, Eiche, Buche) inklusive Fichte reduziert, verbessert sich die Trefferquote auf 78%. Wurde lediglich zwischen Laub- und Nadelbäumen unterschieden, so verbessert sich das Ergebnis auf 91%.

5.1.10 Bonität

Wie bereits erwähnt wurde, stellt das Fehlen der Altersinformation als Eingangsvariable in den Bonitierfächer das Hauptproblem bei der Kombination von Ertragstafeln mit ALS-Parametern dar. Eine klassische Bestimmung der Bonität, ausschließlich anhand von ALS-Daten, ist folglich nicht möglich. Zur Gewinnung von Höheninformation eignet sich ALS jedoch sehr gut. Es bietet sich an, die Bonität anhand eines kombinierten Ansatzes zu bestimmen, der sich aus der Verwendung von ALS-Höhendaten und fortgeschriebenen Alterswerten zusammensetzt. Mit ALS lässt sich die Mittelhöhe genauso wie die Oberhöhe von Beständen bestimmen. Die Feststellung der Oberhöhenbäume mithilfe von ALS-Daten wird allerdings nicht über die stärksten BHD sondern über die höchsten Individuen eines Bestandes vorgenommen.

Fehler bei der Schätzung der Bonität entstehen beispielsweise, wenn bei Beständen mit großen Altersunterschieden das mittlere Bestandesalter und die Oberhöhe der - je nach Definition - stärksten oder höchsten Bäume verwendet wird.

Der generelle Nachteil der Produktivitätsbeurteilung über Ertragstafeln ist, dass sie nur auf den Altersklassenwald angewandt werden kann, bei dem das Alter jedes Bestandes bekannt ist. Plenterwälder und ungleichaltrige Mischwälder sind somit von der konventionellen Form der Bonitierung ausgenommen (Gadow 2003).

In diesem Bereich liegt das Potential der Vorratsbestimmung mittels Laserscanning.

5.1.11 Horizontale Struktur

Stammzahl

Buddenbaum (2010) erreicht bei der Schätzung der Stammzahl aus ALS-Daten ein R^2 von bis zu 0,76 ($p < 0.001$) erreichen. Weitere Genauigkeiten aus den Studien von Kato und Schiess (2007), Reitberger et al. (2009) sind im Unterkapitel „vertikale Struktur“ aufgeführt.

Schlussgrad

Die Genauigkeit dieses Parameters hängt von der vom Laser emittierten und schließlich reflektierten Punktdichte/ m^2 ab. Je höher diese ist, desto aussagekräftiger ist der Wert. Das gilt sowohl für den von Means et al. (1999) als auch für den von Straub (2010) entwickelten Ansatz. Zur Festlegung des geeigneten Höenschwellenwerts (a) und zur Verifizierung seiner

Ergebnisse, vergleicht Straub (2010) die aus dem $nDOM_{(>a)}$ gewonnenen Überschirmungswerte mit Ergebnissen einer Luftbildinterpretation. Das beste Ergebnis für den Zusammenhang zwischen ALS-Kronenschlussgrad und Luftbilddauswertung (RMSE = 9,28% , Bias = -5,13%) erzielt seine Methode bei der Berechnung des Schwellenwerts (a) mit $Oberhöhe \cdot 0,5$.

Waldlücken

Für ihre Untersuchungen verwenden Eysn et al. (2010) ein $nDOM$ mit 1 m Auflösung, das aus ALS-Daten mit einer Punktdichte von 5,4 Punkten/m² gewonnen wurde. Fehlinterpretationen treten vor allem aufgrund von Latschenfeldern und anthropogenen Objekten auf, die den Höhen-Schwellenwert von 3 m überschritten. Lokale Maxima auf solchen Flächen werden fälschlicherweise als Bäume identifiziert.

5.1.12 Vertikale Struktur

Zur Untersuchung der Vorteile der 3D-Segmentierung gegenüber der 2D-Wasserscheidensegmentierung wurden von Reitberger et al. (2009) auf 18 Testflächen bei einer Kluppschwelle von 7 cm folgende Referenzbäume zur Analyse herangezogen: 688 Fichten, 812 Buchen, 70 Tannen, 71 Bergahorne, 21 Spitzahorne und 2 Linden. Die Untersuchungen beziehen sich auf drei Höhenschichten und „Full-Waveform“ Aufnahmen von Beständen in belaubtem und unbelaubtem Zustand. Mit der 3D-Segmentierung können bis zu 87% der Individuen aus der oberen Schicht, 38% der mittleren Schicht und 26% der unteren Schicht erkannt werden. Über alle Schichten hinweg können zwischen 58% und 65% der Bäume richtig erkannt werden. Als größte Herausforderung für die Zukunft sehen Reitberger et al. (2009) die Erkennung der Verjüngung.

Kato und Schiess (2007) erreichen vergleichsweise in ihrer Studie zur Erkennung einzelner Bäume aus einem $nDOM$ eine Trefferquote von 85% bei den vorherrschenden Bäumen und 65% bei den herrschenden Bäumen. Aus der Gruppe der mitherrschenden können 51% und aus der Gruppe der unterdrückten Individuen 47% identifiziert werden. Für Ihre Untersuchungen verwenden sie ALS-Daten mit einer Punktdichte von 6,5 Punkten/m².

Die von Buddenbaum (2010) nach Riaño et al. (2003) modifizierte Methode zur Ermittlung der Kronenuntergrenze liefert im Zuge der Regressionsanalyse baumartenübergreifend

(Fichte, Buche) ein R^2 von 0,81. Für die Baumart Fichte wird ein R^2 von 0,88 und für Buche ein R^2 von 0,56 erzielt. Die Kronenlänge wird baumartenübergreifend mit einem R^2 von 0,69 bestimmt. Für die Kronenlänge der Fichte wird ein R^2 von 0,66 und für Buche ein R^2 von 0,79 erzielt.

5.1.13 Erkennung von Strukturänderungen

In der von Yu (2007) durchgeführten Studie können von den 83, auf den Probeflächen aufgenommenen, geernteten oder umgefallenen Bäumen, 61 in der ALS-Auswertung als solche erkannt werden. Alle ehemals zur vorherrschenden Schicht gehörenden, geerntete oder umgefallene Individuen werden identifiziert. Die Fehlerquote ergibt sich aus unterständigen Bäumen, die in den ALS-Daten unerkannt bleiben.

5.1.14 Kartierung von Forstwegen

Rieger et al. (1999) stellen fest, dass bei der von ihnen untersuchten Methode zur automatischen Erfassung von Forstwegen, die Straßenbreite mit befriedigender Genauigkeit festgestellt werden kann, während vor allem die Breite des Banketts aufgrund der weniger deutlich ausgeprägten Geländekanten überschätzt wird. Die automatisch aus den ALS-Daten digitalisierten Forstwege weisen, im Vergleich zu den geodätisch aufgenommenen Referenzdaten, eine Abweichung der Straßenbreite von lediglich 1 – 2 m auf.

Bei der von Straub et al. (2009) und Koch et al. (2009) vorgestellten Methode zur automatischen Digitalisierung von Forstwegen kann es durch Wasserläufe und Drainagelinien zu Fehlinterpretationen kommen. Des Weiteren beschränkt sich die Anwendbarkeit dieser Methode auf gebirgige Regionen, da Neigungsunterschiede zur Erstellung eines entsprechenden Geländeneigungs-Modells benötigt werden.

5.1.15 Erschließung

Das von Schiess und Krogstad (2003), sowie Krogstad und Schiess (2004) verwendete DGM hat mit 1,8 x 1,8 m ein relativ großes Raster und liefert deswegen für die Erkennung des Kleinreliefs noch zu ungenaue Daten. Durch die Verwendung von „Full-Waveform“-ALS konnte mittlerweile auch in diesem Bereich ohne großen Aufwand eine Steigerung der

Auflösung auf 0,5 x 0,5 m erreicht werden (vgl. Doneus und Briesse 2006). Die derzeit in Österreich von den Ländern erhältlichen DGM weisen vergleichsweise eine Auflösung von 1 x 1 m auf. Ein bisher ungelöstes Problem auf das Schiess und Krogstad (2003) aufmerksam machen ist, dass ALS-Daten keine Information über den Wasserhaushalt des Bodens (z.B.: Nassgallen) liefern, was für die Straßenplanung durchaus interessant wäre.

Die Genauigkeit des von Agura et al. (2005) erstellten Modells zur Schätzung von Erdbewegungen und Kosten beim Straßenbau hängt grundsätzlich von der Genauigkeit des DGM ab. Stärkeren Einfluss auf das Ausmaß der geschätzten Erdbewegungen hat jedoch die Anzahl der vom Modell automatisch gesetzten Querprofile. Als Referenzwerte für das entwickelte Modell wurden die Volumina einer im Straßenbau üblicherweise verwendeten, relativ zeitaufwändigen Monte-Carlo-Simulation herangezogen. Hierbei wurde ein Abstand zwischen den Querprofilen von 1 m gewählt, um das exakte Erdvolumen zu berechnen. Wird der Abstand zwischen den Querprofilen in dem von Agura et al. (2005) entwickeltem Modell von derzeit 3 m verkürzt, so steigt die Genauigkeit. Der dafür notwendige Rechenaufwand steigt allerdings überproportional.

5.1.16 Übersicht

In Tabelle 3 werden die in den verschiedenen Studien, für die einzelnen Parameter, erreichten Genauigkeitswerte zusammenfassend dargestellt.

	R^2	RMSE	SA	%
Höhe		(m)		
Einzelbaum	0,87 / 0,93	2,6 / 2,1		
Flächig	0,70 / 0,79	3,9 / 3,0		
Vorrat		($m^3 \cdot ha^{-1}$)	($m^3 \cdot ha^{-1}$)	
Regressionsanalyse	0,56	79,8		
k-NN	0,53	81,9		
Ertragstafel-basiert	0,53	81,8		
Lineares Modell	0,79 / 0,87		107 / 90	
Wachstum				
Höhe	0,86		0,15 m	
Vorrat	0,56		8,39 $m^3 \cdot ha^{-1}$	
BHD	0,72 / 0,86			
Baumartenanteile Laub-/ Nadelholz				91 – 97
Stammzahl	0,76			
Vertikale Struktur				
Erkennung von Einzelbäumen			Oberschicht	85 - 87
			Mittelschicht	38 - 51
			Unterschicht	26 - 47
Kronenansatz	0,56 – 0,88			
Kronenlänge	0,66 – 0,79			

Tabelle 3: Übersicht über die in den verschiedenen Studien zu den Parametern erreichten Genauigkeiten.

5.2 Kosten

5.2.1 Kostenbeeinflussende Faktoren

Laserscanning-Befliegungen sind bis dato relativ kostspielig. Die Auflösung und folglich auch der Informationsgehalt der Daten hängen von der Flughöhe ab. Um hochauflösende Rohdaten zu erzeugen, wird gewöhnlicher Weise eine Flughöhe zwischen 500 und 1000 m über der Oberfläche gewählt. Niedrigere Flughöhen ergeben zwar dichtere Punktwolken, allerdings auch schmalere Befliegungsstreifen. Die Befliegung einer Fläche dauert dadurch länger und lässt somit den Preis für die generierten Daten steigen. Um die Preise für großflächige Aufnahmen zu senken, käme eine größere Flughöhe oder eine schnellere Fluggeschwindigkeit in Frage. Beide Optionen haben allerdings geringer auflösende Daten zur Folge (Magnusson et al. 2007).

Die Kostspieligkeit der Daten ist ein Problem, das der Forschung durchaus bewusst ist. Hollaus (2006) untersucht in dieser Hinsicht wie sich die Punktdichte von ALS-Daten auf die Genauigkeit der daraus geschätzten Parameter auswirkt. Er empfiehlt bei großflächigen Analysen der Baumhöhen die auf dem nDOM basierende Schätzung, jener der Punktwolkenauswertung vorzuziehen. Als Hauptargument nennt er den geringeren Rechenaufwand, der sich kostenminimierend auswirkt.

Ein Faktor, der sich auch in diesem konkreten Fall kostensenkend auswirkt ist, dass Rasterdaten (DGM, DOM, nDOM) vergleichsweise günstiger erworben werden können als die 3D-Punktwolken.

Ein weiterer Punkt der zur Kostendegression bei der Gewinnung forstlich relevanter Informationen beitragen könnte, ist das hohe Automatisierungspotential der ALS-Technologie. Eine Senkung von Kosten im Rahmen des Forsteinrichtungsprozesses könnte vor allem durch die Zeitersparnis erreicht werden, den automatisierte oder semiautomatisierte Arbeitsabläufe bringen. Ein Beispiel dafür ist die von Eysn et al. (2010) entwickelte Methode zur automatischen Erkennung von Waldlücken, welche im Vergleich zur manuellen Digitalisierung der Waldlücken mit Hilfe von Orthofotos zu bedeutend niedrigeren Auswertungskosten führte. Weitere Beispiele sind die automatische Delinierung homogener Bestandesflächen (Koch et al. 2009), die Erkennung von vorhandener Erschließung, oder Variantenstudien im Rahmen der Holzernte-Planung.

5.2.2 Daten und Lizenzen

In Österreich haben vor allem die Länder einen großen Anteil bei der flächigen Generierung von ALS-Daten geleistet. Die Daten können von diesen entweder als Rohdaten in Form einer 3D-Punktwolke oder als Rasterdaten in Form eines vorprozessierten DGM, DOM und nDOM bezogen werden. Der Preis variiert je nach Bundesland leicht. Dabei sind die Rohdaten für ungefähr 200 €/km^2 (2€*ha^{-1}) und die Rasterdaten um ungefähr 100 €/km^2 (1€*ha^{-1}) erhältlich. Der höhere Preis der Rohdaten dürfte sich aus der weitaus höheren Datenmenge, die behandelt werden muss, ergeben. Die höhere Datenmenge lässt wiederum detailliertere Analysen zu.

Ein weiterer Aspekt, der nicht vernachlässigt werden darf, sind die Kosten der für die Verarbeitung der ALS-Daten notwendigen Software. Diese gliedern sich in den meisten Fällen in Lizenz- und Wartungskosten. Im Falle von ArcGIS, einem gängigen Softwareprodukt in diesem Fachgebiet, betragen die Kosten für die erste von einem Betrieb gekaufte Lizenz 3.310 €. Die Wartungskosten für diese beziffern sich auf 1.008 € pro Jahr (geomarketing.at 2012). Je mehr Lizenzen pro Betrieb gekauft werden, desto günstiger werden gewöhnlicher Weise die vom Vertreiber für Lizenz und Wartung veranschlagten Kosten. Alternativ sollten kleinere Forstbetriebe die Verwendung von Open Source GIS-Programmen andenken. Dabei handelt es sich um frei zugängliche Geoinformationssysteme, bei denen die vorhin erwähnten Gebühren nicht anfallen.

5.3 Verfügbarkeit

Die Daten werden sowohl von privaten als auch von öffentlichen Anbietern vertrieben. Größter öffentlicher Anbieter sind die GIS-Abteilungen der Bundesländer mit ihrem Geodatenpool. Im folgenden Teil der Arbeit wird ein Überblick gegeben, für welche Teile Österreichs bereits ALS-Daten vorliegen. Weiters wird analysiert, in welchem Datenformat die ALS-Daten verfügbar sind.

5.3.1 Flächenabdeckung

Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung, ob die Verwendung der ALS-Technologie für einen Forstbetrieb in Frage kommt, stellt die Verfügbarkeit der Daten dar.

Die im Folgenden vorgestellten Zahlenwerte wurden aus Shapefiles, welche von den neun GIS-Abteilungen der Bundesländer zur Verfügung gestellt wurden, berechnet. Dabei wurde der Anteil der beflogenen Fläche in Verhältnis zur Gesamtfläche der jeweiligen Bundesländer gesetzt.

Die Bundesländer Wien, Burgenland, Niederösterreich, Tirol und Vorarlberg wurden bereits vollständig beflogen. Lücken in der Befliegung gibt es im Zentralteil Österreichs. So liegen in den Bundesländern Oberösterreich zu 88%, Salzburg zu 76%, Steiermark zu 62% und Kärnten zu lediglich 25% der gesamten Landesfläche ALS-Daten vor (Abb. 27 bzw Tab. 4). Insgesamt sind bis dato 80% der österreichischen Staatsfläche beflogen worden (Stand 2011).

Die verbleibenden unbeflogenen Flächen der Bundesländer Oberösterreich und Salzburg wurden bereits im Jahr 2011 beflogen. Das Land Steiermark plant den Abschluss der flächendeckenden Datenaufnahmen im Jahr 2012. Für Kärnten liegt keine Information über den Fortlauf der Befliegungen vor. Damit die neu erhobenen Daten an Dritte abgegeben werden können, müssen diese noch einer Qualitätsüberprüfung unterzogen werden.

In Vorarlberg hat 2011 bereits eine flächendeckende Folgebefliegung stattgefunden. Somit wird es im Laufe des Jahres 2012 möglich sein, einen direkten Vergleich der Daten mit der Erstbefliegung vorzunehmen. Im Bereich des digitalen Geländemodells könnten etwa durch Erschließungsmaßnahmen entstandene Veränderungen oder geänderte Anlandungszonen von Gewässern entdeckt werden. Informationen über die Entwicklung der Vegetationshöhe können durch die Subtraktion des alten nDOM vom neuen nDOM erlangt werden. Aus forstlicher Perspektive besonders interessant, stellt sich die Entwicklung des Vorratsniveaus dar, welches, wie in vorliegender Arbeit bereits beschrieben wurde, aus ALS-Daten geschätzt werden kann.

Bundesland	Fläche (km ²)	ALS-Fläche (km ²)	%
Wien	415	415	100
Burgenland	3.962	3.962	100
Niederösterreich	19.186	19.186	100
Oberösterreich	11.979	10.545	88
Steiermark	16.401	10.217	62
Kärnten	9.538	2.431	25
Salzburg	7.156	5.450	76
Tirol	12.640	12.640	100
Vorarlberg	2.601	2.601	100
Gesamtfläche	83.879	67.447	80

Tabelle 4: Flächen zu denen ALS-Daten vorhanden sind, aufgeteilt auf die einzelnen Bundesländer Österreichs. Quelle: Eigenverarbeitung. Flächenberechnung anhand GIS-Daten der Bundesländer (geoland.at) (Stand: August 2011)

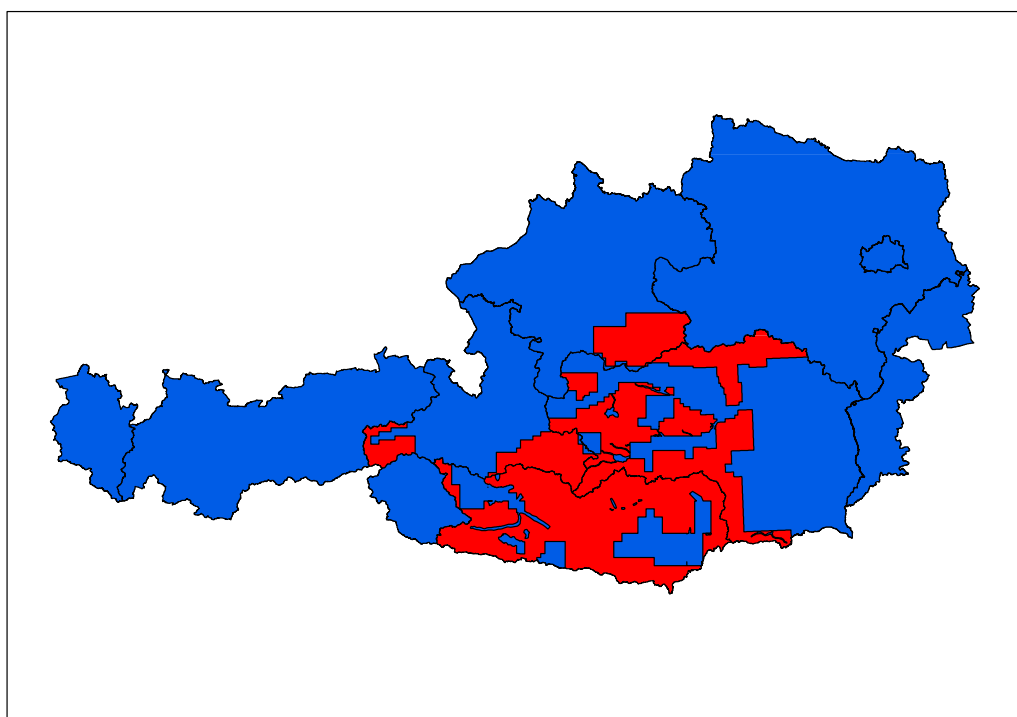


Abb. 27: Flächen der Republik Österreich, zu denen ALS-Daten vorliegen (blau) und unbeflogene Gebiete (rot) Quelle: Eigenverarbeitung von Daten der Bundesländer (geoland.at) (Stand 2011).

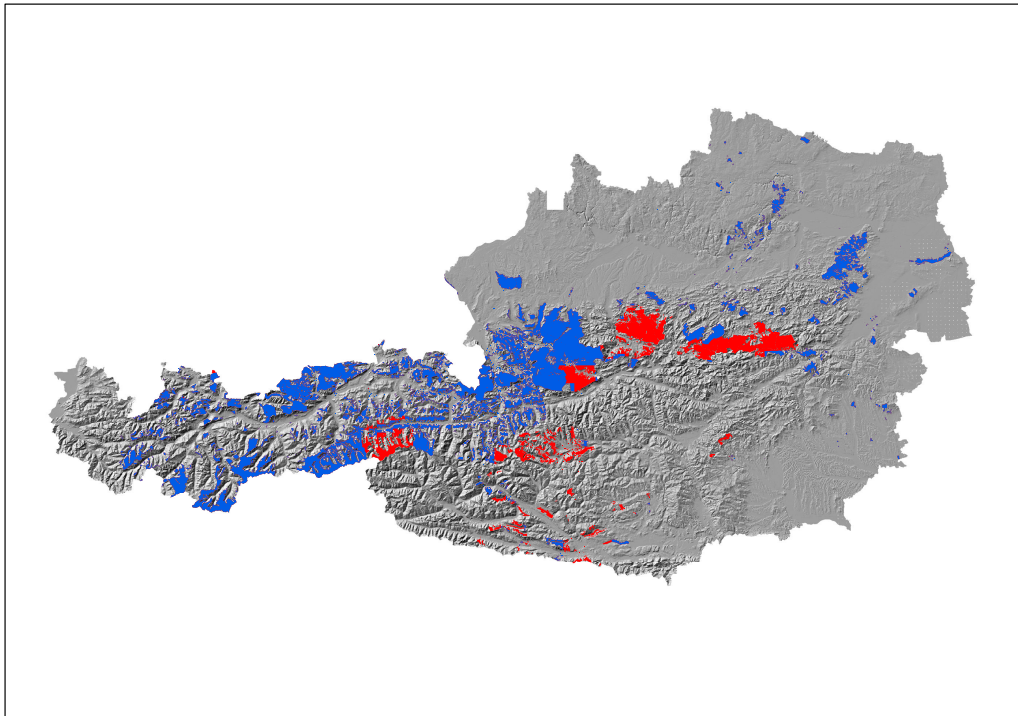


Abb. 28: Darstellung beflogener (blau) und unbeflogener Regionen (rot) auf dem Gebiet der Österreichischen Bundesforste. Quelle: Eigenverarbeitung. Verschneidung der Bundesländer-Shapefiles mit den ÖBf Flächen (Stand 2011).

Aus der Verschneidung der beflogenen und unbeflogenen Bundesländerflächen mit Flächen der Österreichischen Bundesforste ergab sich ein ähnliches Bild wie bei der Betrachtung Gesamt-Österreichs (Abb. 28). 76% der Betriebsfläche sind beflogen, zu 24% gibt es noch keine aktuellen Daten. Die größten, noch unbeflogenen, zusammenhängenden Flächen befinden sich im Südosten Oberösterreichs und in der nördlichen Steiermark (Stand 2011).

5.3.2 Datenformat

Wie bereits erwähnt wurde, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten ALS-Daten anzukaufen. Als Rohdaten in Form einer sogenannten Punktwolke, bestehend aus X/Y/Z-Werten oder in Form von vorprozessierten Endprodukten (DGM, DOM, nDOM) in Form von Rasterdaten. Die zwei Formate sollen im Folgenden erläutert werden.

(1) Punktwolke:

Forstbetriebe, die über entsprechende Hard- und Softwareressourcen verfügen, können ASCII-Daten (American Standard Code for Information Interchange), oder Daten im Format

LAS erwerben und diese betriebsintern zum gewünschten Produkt prozessieren. Daten im ASCII und LAS Format haben den Vorteil, dass sie die Rohdaten mit ihren X/Y/Z-Werten in jedes beliebige Format umwandeln können. Laut Angaben des Entwicklers des Dateiformats LAS, ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) wurde das LAS Format, nach Anregung der Entwickler von Fernerkundungssensoren (Optech, Leica GeoSystem, u.a.), explizit für die Verwendung und den Austausch von ALS-Daten entwickelt. Das LAS Format ist vergleichsweise schneller zu prozessieren und speichert zugleich mehr Laserscanning-spezifische Information als ASCII (ASPRS 2011).

Beim Kauf von Rohdaten mit X/Y/Z-Werten hat der Forstbetrieb die Möglichkeit, detailliertere Auswertungen eigenständig durchzuführen. Der höhere Informationsgehalt dieser Daten setzt allerdings höheres Knowhow beim Anwender hinsichtlich deren Verarbeitung und Interpretation voraus.

(2) Rasterdaten:

Forstbetriebe, denen die entsprechende Software fehlt, können vorstrukturierte ALS-Daten als DGM, DOM, oder nDOM beziehen. Rasterdatenmodelle setzen sich aus einzelnen Bildpunkten, den sogenannten Pixel zusammen, in denen Farbinformationen gespeichert sind. Je größer ein Pixel, desto größer ist die Auflösung des Bildes und umso kleiner ist der dafür benötigte Speicherplatz. Folglich verkleinert sich der Informationsgehalt eines Rasterdatenmodells, je größer seine Auflösung ist. Die gängige Auflösung der von den Ländern vertriebenen Rasterdaten, beträgt 1x1m. Der Vorteil von Rasterdaten ist, dass der logistische Aufwand, hinsichtlich der transferierten Datenmenge und deren Speicherung geringer ist. Als logische Konsequenz ergibt sich, dass nur ein Bruchteil der Information die ursprünglich in den Punktwolken enthalten ist, zur weiteren forstlichen Analyse der Daten vorliegt.

Typische Dateiformate in denen Rasterdaten gespeichert und ausgetauscht werden können sind: TIFF, GIF, PNG, JPEG und das von der Firma ERDAS entwickelte Format ECW. Durch die Komprimierung der Daten zu einem der vorhin genannten Dateiformate, können Informationen im ursprünglichen Datensatz verloren gehen. Am größten ist dieser Informationsverlust bei Dateien des Typs JPEG, am geringsten bei TIFF (Geoinformatik-Service 2011).

Zur Auswertung forstlich relevanter Parameter ist grundsätzlich die Punktwolke mit den dreidimensionalen X/Y/Z-Werten den Rasterdaten vorzuziehen. Besonders schlagend wird der Unterschied zwischen Daten des Typs ASCII oder LAS und jenen im Rasterformat bei der Analyse von Bestandesstrukturen. Hier können mittels Auswertung der X/Y/Z-Werte Rückschlüsse auf den vertikalen Bestandesaufbau gezogen werden, was bei Rasterdaten durch ihren bildartigen Aufbau nicht möglich ist (Mandlbürger et al. 2010).

5.4 Technische Voraussetzungen

Entschließt sich ein Forstbetrieb, ALS-Daten in sein Informationssystem zu implementieren, gilt es zunächst die EDV Infrastruktur auf die Bedürfnisse der Software abzustimmen. Auf die Voraussetzungen im Bereich der Hardware wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da sie je nach verwendeter Software variieren und ihre Aktualität nur von kurzer Dauer ist. Generell dienen die Anforderungen der Software als Kriterium für die Wahl der Computer, die für die Prozessierung und letztendlich die betriebliche Anwendung der Daten benötigt werden. Im Bereich der ALS-verarbeitenden Software gibt es eine breite Produktpalette, aus der je nach Bedarf gewählt werden kann. Grundsätzlich muss bei der Wahl auf den Verwendungszweck Bedacht genommen werden. Es stellt sich somit die Frage, ob ein Forstbetrieb die Daten aus Punktwolken aufbereiten und analysieren möchte oder bereits verarbeitete Daten in Form von Rasterdaten ankauft.

Die Entwicklung von Software zur Bearbeitung von ALS-Daten wurde vor allem in den Vereinigten Staaten und in Deutschland vorangetrieben, zwei Staaten, die derzeit einen Forschungsschwerpunkt in diesem Bereich setzen. Grundsätzlich gibt es zwei Typen ALS-Daten-verarbeitender Software. Eigenständige Programme und sogenannte Extensions, also Programme, die eine andere Software als Grundlage benötigen. Tabelle 5 stellt die gängigsten Programme vor.

Programmart	Name	Prozessierbare Punktemenge	Basis Software	Hersteller
Eigenständig	QT Modeler	100 Mio.		Applied Imagery
	LasTools	unbegrenzt		FpiFuchs Ingenieure
	TopPIT	unbegrenzt		TopoSys GmbH
	MARS	unbegrenzt		Merrick & Company
	LIDAR Box	50 Mio.		Trimble
	Geocode WF	unbegrenzt		GeoLas Consulting
	TLiD	k.A.		Tiltan
	LIDAR Suite	100 Mio.		Virtual Geomatics
	OPALSforest	1 Mrd.		TU Wien
Ergänzend	LIDAR Analyst	5 Mio.	ArcGIS, Erdas- Imagine	Visual Learning Systems
	LiDAR Explorer	unbegrenzt	ArcGIS mit 3D Analyst	ProLogic
	LP 360	k.A.	ArcGIS, Erdas- Imagine	QCoherent

Tabelle 5: Eigenständige und auf Basis-Programme aufbauende Software zur Verarbeitung von ALS Punktwolken. Modifiziert nach Lemmens (2007, 2010).

Als regionales Produkt ist das vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU-Wien entwickelte Programm OPALS zu erwähnen, welches zur Verarbeitung von Punktwolken entwickelt wurde. Zu dieser Software wurden verschiedene Module erarbeitet. Unter anderem wird an einem auf die Bedürfnisse der Forstwirtschaft abzielenden Modul programmiert, anhand dessen auch Analysen auf der Einzelbaumebene durchgeführt werden können. Derzeit befinden sich Teile des Moduls *opalsForest* noch in der Testphase (IPF TU-Wien, 2012). Verfolgenswert ist dieses Projekt nicht zuletzt weil das IPF, in themenverwandten Untersuchungen in Zusammenarbeit mit dem BFW steht (siehe Hollaus et al. 2009a, ÖWI-Regio).

Wie bereits erwähnt wurde, sollte auch die Verwendung von Open Source GIS-Software in Betracht gezogen werden. Diese bieten meist dieselben Bearbeitungs- und Analysemöglichkeiten für ALS-Daten wie kommerzielle Programme. Sie sind oftmals allerdings komplizierter aufgebaut und bedürfen daher mehr Knowhow in der Anwendung.

Beispiele für Open Source GIS-Software sind QGIS (Quantum GIS) und GRASS (Geographic Resources Analysis Support System).

An dieser Stelle soll auf die Arbeit von Lemm und Thees (2009) verwiesen werden. Sie definieren die Wahl einer Unternehmenssoftware als komplexen Vorgang, der strukturiertes und systematisches Vorgehen erfordert. Deswegen entwickelten sie eine Methode zur Evaluation von Unternehmenssoftware, die bei der Entscheidungsfindung für ein passendes Produkt unterstützend wirkt. Dabei bedienen sie sich einer multikriteriellen Entscheidungsmethode, bei der funktionelle Anforderungen, technische und finanzielle Kriterien, genauso wie die Betrachtung von Kriterien für Kosten und Nutzen, Berücksichtigung finden.

In Zukunft wird die Herausforderung bei den technischen Voraussetzungen vor allem bei der Verwaltung der großen Datenmengen liegen. So muss im Rahmen der Verwendung von ALS-Daten an das Vorhandensein adäquater Speicherkapazitäten gedacht werden. Besonders die Bearbeitung und Analyse von 3D-Punktwolken erfordert ein großes Speichervolumen. Rasterdaten sind in dieser Hinsicht mit geringeren Mitteln handzuhaben. Eignen sich bei kleineren Forstbetrieben noch Festplatten zur Speicherung der Daten, so sollte bei großen Forstbetrieben an die Möglichkeit der Auslagerung der Daten auf externe Server gedacht werden. Eine Überlegung die sich daraus ergibt, dass größere Betriebsflächen ein größeres Datenvolumen bei der Bildaufnahme erzeugen und die Server spezialisierter Firmen Daten-Rücksicherungssysteme verwenden. Dies würde erstens die kontinuierliche Anschaffung neuer Speichermedien ersetzen und gleichzeitig das Risiko von Datenverlusten minimieren.

5.5 Praktische Anwendungsversuche

5.5.1 Forsteinrichtung

Erfahrungsberichte zur praktischen Anwendung von ALS-Daten in der Forsteinrichtung aus dem mitteleuropäischen Raum kommen vor allem aus dem deutschen Bundesland Sachsen. Die Ergebnisse zu den jeweiligen Anwendungsversuchen wurden im Jahr 2008 auf einer vom Staatsbetrieb Sachsenforst initiierten Fachtagung mit dem Titel „Laserscanning – ein Werkzeug für die Forsteinrichtung“ präsentiert.

Es ist anzumerken, dass sich die vorgestellten Ergebnisse auf Sachsen beziehen, einem Bundesland dessen Waldfläche zu 70% mit Reinbeständen bestockt ist (Polaczek 2008).

Homogene Bestandesstrukturen erleichtern natürlich die Anwendung der zur Auswertung von ALS-Daten verwendeten Methoden.

Polaczek (2008) betrachtet die Herleitungsmöglichkeiten von Standortmerkmalen aus ALS-Daten, die gewöhnlicher Weise im Rahmen des Taxationsverfahrens des Staatsbetriebs Sachsenforst erhoben werden. Er kommt zu dem Schluss, dass Hangrichtung, Exposition, Hangneigung (Inklination) und Geländeform aus den ALS-Daten entnommen werden können. Auf die Befahrbarkeit und eventuelle Standortgefahren (z.B.: Erosion, Überflutung, Schnee-/ Eisbruchlage) kann nur teilweise geschlossen werden. Im Rahmen der Beschreibung des Bestandeszustands kann allem voran die Oberhöhe unproblematisch aus den ALS-Daten gewonnen werden. Indirekt ableitbar sind die Parameter Durchmesser und Vorrat. Zur Schätzung des Vorrats wird die *k*-NN Methode vorgeschlagen. Die größten Probleme stellen allerdings die Bestimmungen der Baumart und deren Flächenanteile, sowie die Bestimmung des Bestandesalters dar. Auch über etwaige Schäden an den Bäumen kann anhand der ALS-Daten keine Aussage getroffen werden (Polaczek 2008).

Vor allem das Bestandesalter ist ein Parameter, auf den auch in Zukunft nicht aus ALS-Daten geschlossen werden kann.

Die für den praktischen Anwendungsversuch aus ALS-Daten geschätzten Vorräte wurden mit Hilfe eines GIS auf die Bestandesflächen der vorhergehenden Einrichtungsperiode bezogen. Dies stellte sich als problematisch heraus, da die „alten Bestandesflächen“ oftmals nicht exakt auf die ALS-Daten passten (Polaczek 2008).

Dies ist ein Problem, das beispielsweise durch Digitalisierung von Beständen aus Orthofotos auftritt, auf denen die Bäume starke Schatten werfen. Dadurch werden Bestände die am Waldrand liegen oft größer digitalisiert als sie tatsächlich sind. Bei Laserscanning-Aufnahmen, welche ohne Sonnenlicht funktionieren, gibt es keine Schattenbildung. Somit kann die Bestandesfläche korrekt abgegrenzt werden. Ein weiterer Faktor, der die Deckungsgleichheit der Bestandesflächen mit dem neuen Orthofoto beeinflusst, ist die Lagegenauigkeit des aktuellen Orthofotos und die Lagegenauigkeit des Orthofotos auf dem die Bestandesflächen in der vorhergehenden Einrichtungsperiode digitalisiert wurden.

Zur besseren Implementierung der Laserscanning-Technologie in den Forsteinrichtungsprozess schlägt Polaczek (2008) vor, im Vorfeld der Taxation eine automatisierte Bestandesabgrenzung durchzuführen. Diese Neueinteilung würde innerhalb

der gegebenen Abteilungsgrenzen stattfinden. Dabei sollen Flächen nach den Kriterien Oberhöhe, Bestandeszustandstyp und Standort voneinander abgegrenzt werden und einen sogenannten „Geometrievorschlag“ liefern, der schließlich vom Forsteinrichter im Gelände nur mehr überprüft werden muss.

Wie bereits erwähnt, ist die Baumhöhe ein Parameter der mittels Laserscanning sehr genau bestimmt werden kann. Weshalb die Forsteinrichter im Praxisversuch eine Baumhöhenkarte, die über die Bestandeskarte gelegt wurde, zur Verfügung hatten. Somit konnten die Höhenmessungen eingespart werden. Während der Außenaufnahmen ergänzten die Forsteinrichter diese mit Informationen über die räumliche Anordnung der unterschiedlichen Baumarten. Die zusätzliche Information wurde dabei auf einem Personal Digital Assistant (PDA) festgehalten, das über eine mobile GIS-Lösung (ArcPad) verfügt (Polaczek 2008). Dies ermöglicht eine einfache Datenübertragung auf den Stand-PC im Büro. Die Einschätzung der am Praxisversuch beteiligten Forsteinrichter ergab, dass die aus ALS-Daten geschätzten Vorräte im Vergleich zu den terrestrisch erhobenen Daten, vor allem in jüngeren Beständen unterschätzt werden. Im Allgemeinen wichen die ALS-Vorratsschätzungen um ca. 20% von den Forsteinrichtungswerten ab. Die Testpersonen weisen darauf hin, dass aus Laserscanning nicht auf die Verjüngungssituation oder auf die Überprüfung getroffener waldbaulicher Maßnahmen geschlossen werden kann und somit eine flächige Begehung unabdingbar bleibt. Zusammenfassend halten sie eine Zeitersparnis von über 30% bei dem vom Staatsbetrieb Sachsenforst durchgeführten Forsteinrichtungsverfahren für möglich. Nicht unerwähnt lassen die Testpersonen jedoch, dass dabei von einer verminderten Datenqualität im Endprodukt der Forsteinrichtung ausgegangen werden muss. Des Weiteren gibt es noch keine Untersuchungen über die Kosten und den Zeitaufwand, der für die Vorbereitung der Daten notwendig ist (Polaczek 2008).

Weidenbach (2008 a, b, c) führte ebenfalls praktische Anwendungsversuche von ALS-Daten in der Forsteinrichtung im Bundesland Sachsen durch. Auch er (Weidenbach 2008 a, b) beschreibt das Problem, dass die Bestandesflächen der vorhergehenden Einrichtung nicht der Lagegenauigkeit aktueller Orthofotos und ALS-Daten entsprechen (Abb.29). Er sieht dabei vor allem ein Problem, wenn die ungenauen Bestandesgrenzen bei der automatisierten Auswertung von ALS-Daten auf Einzelbaumebene verwendet werden. Das

von Weidenbach (2008a) angeführte Extrembeispiel wären Bäume eines Altholz-Bestandes, die im GIS-Datensatz auf einer benachbarten Kultur- oder Kahlfläche stehen. Hier würde die Oberhöhe der Kultur- oder Kahlfläche aus den Bäumen des eigentlich benachbarten Altholzbestandes errechnet werden.



Abb. 29: Lageungenauigkeit einer Bestandesfläche aus dem GIS (weiße Linie) in Bezug auf das aktuelle Orthofoto. Die Lageungenauigkeit kann besonders an der nördlichen Bestandesgrenze beobachtet werden (Weidenbach 2008 b).

Bei dem von Weidenbach (2008 a) vorgestellten Verfahren, werden hochauflösende Infrarot-Orthofotos zur Abgrenzung des Kronenraums der einzelnen Individuen verwendet. Die Höhe der somit delinierten Bäume wird aus einem nDOM bezogen. Alternativ kann der Standraum der einzelnen Bäume auch anhand der Analyse lokaler Höhenmaxima, auf einem nDOM bestimmt werden. Daraufhin erfolgt die Bestimmung der Oberhöhe, indem die mittlere Höhe der hundert höchsten Bäume*ha⁻¹ berechnet wird.

Zur Bonitierung wird schließlich, neben der Oberhöhe, das aus den fortgeschriebenen Operatsdaten entnommene Bestandesalter als Eingangsvariable in das Ertragstafelwerk verwendet. Anstatt der Feststellung der Baumartenanteile, differenziert Weidenbach (2008 a) bei diesem Verfahren, auf der Basis von Infrarot-Orthofotos, lediglich zwischen den Laub-

und Nadelbaumanteilen (vgl. Straub 2010). Zur Bonitierung wird dann das Ertragstafelwerk der entsprechenden Hauptbaumart für Laub- bzw. Nadelholz verwendet.

Werden die ALS-Daten und Orthofotos zeitgleich zu einem günstigen Zeitpunkt im Frühjahr aufgenommen, an dem die Lärchen im Gegensatz zum Laubholz bereits ausgetrieben haben, könnten in Verbindung von Infrarot-Orthofotos (Spektralinformation) mit ALS-Daten (Erkennung der Kronenform) auch die Lärchen erkannt werden (Weidenbach 2008 c). Dies würde zu einer Genauigkeitssteigerung führen.

Sind die Laub- und Nadelbaumanteile ausgeschieden, dann lässt sich auch die Oberhöhe gezielt für diese errechnen. Als Blößen werden alle jene Flächen innerhalb einer Bestandesfläche definiert, die keine Vegetation aufweisen oder deren Vegetation eine Höhe von 2 m nicht übersteigt (Weidenbach 2008 c). Er gibt jedoch keine Mindestfläche an, ab der eine Blöße als solche erfasst wird.

Den Bestockungsgrad berechnet Weidenbach (2008 c) aus der Gesamtfläche eines Bestandes, dividiert durch die Summe der von Laub- und Nadelbäumen bestockten Fläche. Auch hier wird also der Kronenschlussgrad als Annäherung an den Bestockungsgrad verwendet. Mit Hilfe der Ertragstafeln kann somit der Vorrat für das Laub- und Nadelholz berechnet werden.

Als Voraussetzung für die bestmögliche Anwendung der von Weidenbach (2008 a, b, c) präsentierten Methode, nennt der Autor die korrekte Wahl der Bezugsfläche. Als wichtigstes Kriterium, um der von den Ertragstafelmodellen getroffenen Annahme des Altersklassenwaldes entgegen zu kommen, gilt die Ausscheidung homogener Bestandesflächen. Da das Baumalter nur terrestrisch erhoben werden kann, wird auf die Möglichkeit zurückgegriffen, homogene Flächen anhand der Baumhöhen zu erkennen (Weidenbach 2008 a). Hier empfiehlt Weidenbach (2008 a), wie auch Polaczek (2008), die Einteilung homogener Flächen im Vorfeld der Forsteinrichtung automatisch durchzuführen.

Abb.30 zeigt beispielsweise einen inhomogenen Bestand, dessen Nebenbestände vormals zwar im Bestandesdatenblatt verbal beschrieben, jedoch nicht in der Forstkarte eingezeichnet wurden. Weidenbach (2008 b) analysierte ein nDOM nach lokalen Höhenmaxima, wodurch er die einzelnen Bäume erfasste und unterteilte diese dann in drei Wuchsklassen. Damit soll erreicht werden, dass die Oberhöhe auf die jeweiligen

Teilbestände bezogen werden kann und die hernach errechneten Werte besser der tatsächlichen Situation entsprechen.

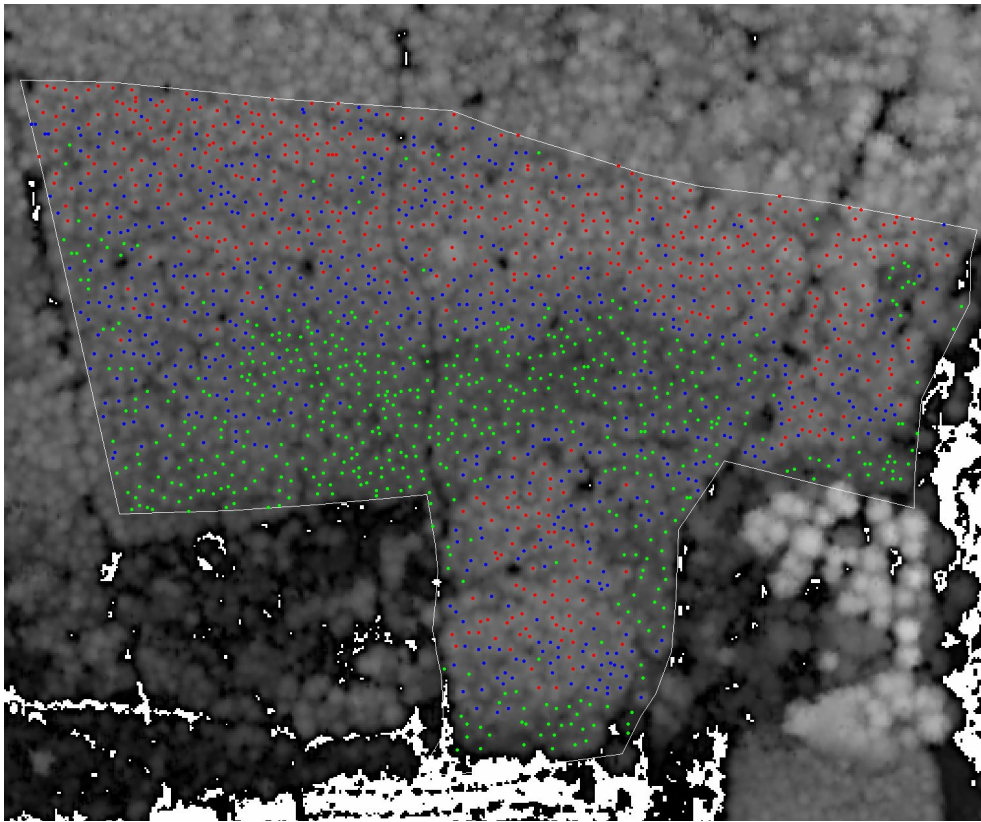


Abb. 30: Symbolisierung der innerhalb der Bestandesfläche vorkommenden Baumhöhenklassen: 6,26 – 20,82 m (grün), 20,82 – 23,61 m (blau), 23,61 – 32,05 m (rot) auf Basis eines nDOM (Weidenbach 2008 b).

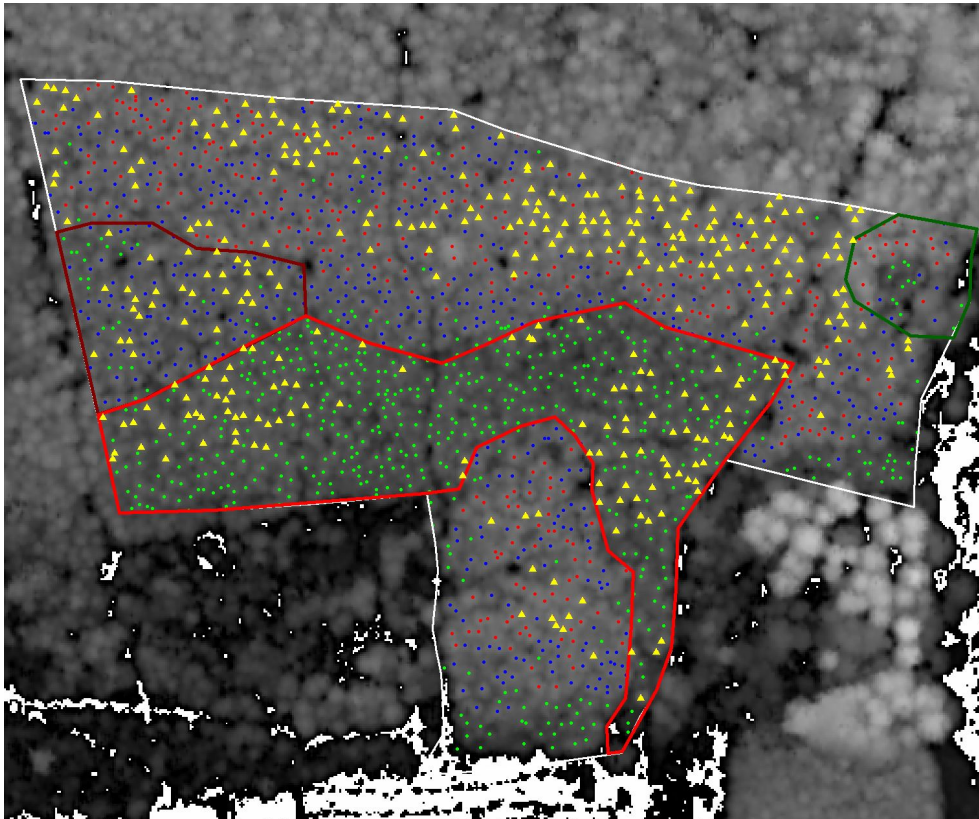


Abb. 31: Ergebnis der Delinierung der homogenen Teilbestände. Baumhöhenklassen: 6,26 – 20,82 m (grün), 20,82 – 23,61 m (blau), 23,61 – 32,05 m (rot). Die gelben Dreiecke zeigen die aus der Analyse des nDOM ausgewählten Oberhöhenbäume (Weidenbach 2008 b).

Resümierend stellt Weidenbach (2008 a) die Verwendung der auf Ertragstafelmodellen basierenden Vorratsberechnung in der modernen Forstwirtschaft in Frage. Viel eher sieht er Chancen in der Schätzung des Holzvorrats als Funktion von Baumhöhe und Kronenfläche, bzw. über das H/D-Verhältnis. Gleichzeitig erwähnt er, dass die Anwendbarkeit dieses Ansatzes zurzeit auf ältere, einschichtige Nadelholzbestände beschränkt ist.

5.5.2 Forstinventur

Im Rahmen der Österreichischen Waldinventur 2007 – 2009 wurde in einer Kooperation des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) und des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der Technischen Universität Wien, die Regionalisierung von Waldinventurdaten mit Hilfe von ALS untersucht. Ergebnisse dazu sind im ÖWI-Regio-Endbericht (Hollaus et al. 2009 a) zu finden.

6 DISKUSSION UND AUSBLICK

6.1 Diskussion

Für die betriebliche Anwendung scheinen sich vor allem die primären ALS Produkte DGM, DOM und nDOM, sowie Parameter, die ohne großen Rechenaufwand aus diesen generierbar sind, zu eignen.

Das DGM, das als Grundlage für die Berechnung der Baumhöhe dient, kann mit einer SA zwischen 0,14 und 0,29 m sehr präzise erstellt werden.

Die Höhe einzelner Bäume kann mit vergleichsweise hoher Genauigkeit mit ALS gemessen werden. Die aus ALS-Daten geschätzte Oberhöhe könnte theoretisch zur Bonitierung von Beständen herangezogen werden. Als einfaches und effektives Hilfsmittel bei der Taxation könnten Karten eingesetzt werden, in denen die Baumhöhen erkenntlich sind.

Die Erkennung einzelner Bäume funktioniert derzeit vor allem bei den dominanten Individuen gut. Probleme gibt es noch bei der Erkennung unterdrückter Individuen. Es bleibt abzuwarten, ob sich diese Situation mit der Einführung der „Full-Waveform“ Technologie verbessern wird.

Im Vergleich zu konventionellen Stichprobeverfahren sind die Volumsschätzungen anhand von ALS noch sehr ungenau. Bei großflächigen Stichprobeninventuren werden Genauigkeiten zwischen ± 5 und $\pm 10\%$ erreicht, wohingegen die ALS Modelle derzeit noch Abweichungen von bis zu 30% aufweisen. Es muss erwähnt werden, dass die Untersuchungen zur Vorratsschätzung aus ALS-Daten in Gebieten vorgenommen wurden, in denen Nadelbäume den Großteil der Bestockung darstellen. Es handelt sich somit um relativ homogene Bestände. Trotz der Unschärfen in der Vorratsermittlung ist der Einsatz dieser Daten, zumindest während der Taxation, denkbar. Diese könnten dazu dienen, vorratsstarke Bestände in einem GIS oder auf einer Forstkarte, deutlich erkennbar zu machen, weshalb sie sich zum Variantenstudium bei der Planung von Erntemaßnahmen eignen.

Die Situation bei den Vorratszuwachsmodeellen stellt sich ähnlich dar. Die Standardabweichungen betragen hier an die 35%. Es ist zu betonen, dass der vorgestellte

Ansatz, den Vorrat alleine aus der Baumhöhe ableitet, wohingegen die zur Vorratsschätzung vorgestellten Modelle komplexer aufgebaut sind.

Die Berechnung von Wachstumsparametern aus ALS-Daten ist zwar noch relativ ungenau, aber generell möglich. In der Praxis würde sie derzeit allerdings am Preis und vor allem an der Verfügbarkeit der Daten (mangels Folgebefliegungen) scheitern.

Der Brusthöhenmesser wird aus der Baumhöhe und der Kronenschirmfläche abgeleitet. Diese Modelle zeigen ein hohes R^2 , können aber den bei Vollkluppungen üblichen, extrem niedrigen Grundflächenfehler von $\pm 1\%$ nicht erreichen.

Das Baumalter kann nicht aus ALS-Daten hergeleitet werden. Die Bonitierung mit Höhendaten aus ALS und fortgeschriebenen Alterswerten ist aber durchaus - wenn auch nur für Folgetaxationen - möglich.

Als Ersatz für den BG kann - mit Einschränkungen - der Kronenschlussgrad verwendet werden. Der Kronenschlussgrad sollte nur als Ersatz herangezogen werden, wenn der Bestand einen Kronenschluss bzw. BG von 0,8 nicht überschreitet. Darüber hinaus besteht kein Zusammenhang mehr zwischen den beiden Parametern.

Problematisch stellt sich auch die Erkennung verschiedener Baumarten dar. Hier wird auf die methodisch einfachere Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelbaumflächen ausgewichen, die mit einem hohen Genauigkeitsgrad durchgeführt werden kann. Zur Erkennung unterschiedlicher Baumarten sehen Koch et al. (2008) die Zukunft in der Kombination von ALS mit den Aufnahmen von Multispektralsensoren. Auch von den mit Laserscanning-Sensoren aufgezeichneten Intensitätswerten erwarten sie Potential bei der Erkennung von Baumarten. Es sollte überlegt werden, ob es nicht aus Genauigkeits- und Kostengründen besser wäre, diese Informationen aus der klassischen Fernerkundung über den Weg der Photogrammetrie zu gewinnen.

Ein nicht lösbares Problem ist die Darstellung der Altersklassenverteilung anhand von ALS-Daten. Alternativ hierzu kann eine Einteilung der Flächen nach Wuchsklassen erfolgen. Primär sticht beim Betrachten des Ergebnisses der automatischen Bestandesdelinierung von Koch et al. (2009) in Abb. 17. die Form der ausgewiesenen Bestände ins Auge. Diese kantige

Form hängt von der Größe der analysierten Rasterzellen ab. Je weitmaschiger das Netz angelegt wird, desto gröber wird sich das Ergebnis zeigen.

Prinzipiell könnte die Einteilung in Wuchsklassen anhand der Höhewerte des nDOM angedacht werden. Die derzeit gängigen Rasterdaten werden, beispielsweise von den Bundesländern, mit einer Auflösung von 1 x 1 m, an den Endverbraucher weitergegeben. Bei einer Kompromisslösung könnten etwa die Höhenklassen direkt anhand des nDOM eingeteilt und auf die Analyse der Baumarten verzichtet werden, was ein weniger stark segmentiertes Bild mit abgerundeten Bestandesgrenzen ergeben würde.

Im Bereich der Kartografie, bei der Erfassung von Forststraßen, bringen ALS-Daten in Form von digitalen Geländemodellen besonders in laubholzreichen Beständen eine enorme Arbeitserleichterung bei gleichzeitiger Genauigkeitssteigerung. Hangneigungsmodelle und aus ALS-Daten abgeleitete Höhenschichtlinien können beispielsweise bei der Erschließungsplanung sinnvoll Verwendung finden.

Abschließend soll auf die in Kapitel 2 vorgestellten Studien zu den Erwartungen der Forstwirtschaft an die Fernerkundung eingegangen werden.

Bei den in Felbermeier et al. (2010) geforderten Fernerkundungsprodukten zur Sicherung einer nachhaltigen Forstwirtschaft handelt es sich ausschließlich um Bestandesparameter, wie sie im Rahmen einer Forsteinrichtung aufgenommen werden und bereits oben behandelt wurden.

Zu der in Koch et al. (2008) angesprochenen Quantifizierung des Biomassepotentials zu Energiegewinnungszwecken gibt es Studien im Bereich der ALS-Technologie. In dieser Diplomarbeit wurde ausschließlich auf den Holzvorrat und nicht auf den Biomassevorrat, welcher genaugenommen auch das Astderbholz und Astreisholz umfassen würde, eingegangen.

Anhand von ALS-Daten kann nur bedingt die von Koch et al. (2008) geforderte, automatische Klassifikation von Bodenbedeckungsformen realisiert werden. Es ist zum Beispiel möglich, Wald- von Nicht-Waldflächen zu unterscheiden und diese automatisch zu delinieren. Die Einschränkung der ALS-Daten dürfte in der Differenzierung der unterschiedlichen Nicht-Wald-Bedeckungsformen liegen. Auf die Klassifikation unterschiedlicher Bedeckungsformen wurde allerdings im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht näher eingegangen. An dieser Stelle

sei auf die Arbeit von Straub (2010), der das Thema der automatischen Delinierung und Klassifizierung bewaldeter Flächen und Offenlandgehölze behandelt, verwiesen.

Die Ansätze von Eysn et al. (2010) und Straub (2010) könnten auch die Lösung für die in Felbermeier et al. (2010) für den Naturschutz geforderte Analyse der Fragmentierung von Biotopen und der von Forstbetrieben erwünschten, automatischen Erfassung von Kalamitätsflächen sein. Soll bei Kalamitäten allerdings nur das Ausmaß der Schadfläche beurteilt werden, erfüllen vor allem hinsichtlich der anfallenden Kosten, auch Orthofotos diesen Zweck. Weiters ist der Einsatz von ALS für die Überprüfung der Rechtmäßigkeit ausbezahlter Förderungen denkbar. Mit ALS-Daten könnte beispielsweise die Feststellung der geförderten Fläche (Wald / Nicht-Wald) durchgeführt werden.

Zur Beurteilung der Bestandesstabilität soll an dieser Stelle auf die Arbeit von Götz und Schmidtke (2006) verwiesen werden, die sich mit der Beurteilung der Sturmstabilität von Waldbeständen beschäftigen. Als Basis für die zukünftige Schadensprävention werden sogenannte Sturmstabilitätskarten erstellt, in denen die Vulnerabilität der einzelnen Bestände optisch ersichtlich gemacht wird. Hierbei kommen DGM und DOM aus ALS-Aufnahmen zum Einsatz. Auch die von Koch et al. (2008) geforderte Analyse von Waldflächen hinsichtlich der Vulnerabilität gegenüber Überschwemmungen könnte auf ähnliche Weise durchgeführt werden.

Zur Beurteilung von Gefahrenzonen könnten ALS-Daten bei der Evaluierung von Schutzwäldern verwendet werden. Monnet et al. (2011) liefern hierzu eine Studie, die sich mit der Beurteilung der Schutzfunktion von Gebirgswäldern hinsichtlich Steinschlags beschäftigt.

6.2 Ausblick

Hinsichtlich der Bestandesparameter wäre etwa die Schätzung des Bestandesvorrats mehrschichtiger Bestände aus der Summe der Einzelbaum-Volumina denkbar. Hier stellt sich die weiterführende Frage, ob bei einer solchen Schätzung des Bestandesvorrats auf die Erkennung der Individuen aus der Unterschicht verzichtet werden könnte, da diese wahrscheinlich nur einen geringen Einfluss auf den Gesamtvorrat haben.

Die Generierung der in Felbermeier et al. (2010) für den Fachbereich Forstschutz geforderten Fernerkundungsdaten ist mittels ALS eher unwahrscheinlich. Generell ist es vorstellbar, den Totholzanteil vor allem bei nadelholzreichen Beständen über ALS-Daten aus Sommerbefliegungen herzuleiten. Das Problem stellt jedoch die geforderte Aktualität der Daten dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass es hinsichtlich der finanziellen Möglichkeiten eines Forstbetriebs nicht sinnvoll ist, Fernerkundungsdaten im wöchentlichen Intervall anzukaufen. Zur Herleitung der für die Schutzwaldbewirtschaftung geforderten Parameter Vitalität, Bodenvegetation und Schneehöhe sind ALS-Daten ebenfalls nicht geeignet.

Zur Feststellung, welche Vorratsmengen mobilisiert werden könnten bzw. welche vorratsreichen Flächen eines Betriebes unzureichend erschlossen sind, könnten GIS-Analysen durchgeführt werden, bei denen ein aus Laserscanning errechnetes Holzvorratsmodell mit den vorhandenen Erschließungslinien verschnitten wird. In weiterer Folge könnten auf Basis des DGM, der Höhenschichtlinien und des Hangneigungsmodells potentielle Erschließungslinien entworfen werden.

Prinzipiell könnten ALS-Daten auch als Eingangsvariablen für Waldwachstumsmodelle fungieren. Für das an der BOKU Wien entwickelte, auf dem Einzelbaumwachstumsmodell MOSES basierende Modell MosesFramework, können beispielsweise über Taxation, WZP oder Vollaufnahme gewonnene Eingangsdaten eingebracht werden. Dabei handelt es sich um die Parameter BHD, Baumhöhe, Höhe des Kronenansatzes, Baumart und die X/Y-Koordinaten jedes Individuums. Bei Aufnahme der Eingangsdaten über WZP wird weiters das Alter und die Oberhöhe, zur Berechnung eines „Site Indizes“ benötigt (Klopf et al. 2011). Wie in dieser Arbeit beschrieben wurde, stellt zurzeit die Erkennung von Baumarten noch eine große Herausforderung für die Forschung dar. Da bis auf Alter und Baumart alle weiteren Parameter grundsätzlich mit ALS beschrieben werden können, wäre der Versuch einer Modellierung mit einer Annäherung dieser beiden Parameter, über das Operatsalter und die Hauptbaumart für Laub- und Nadelbäume denkbar. Dabei sollte jedoch die mangelnde Genauigkeit mancher ALS-Parameter bedacht werden.

Für die Umsetzung aller oben abgehandelten Überlegungen und zur Berechnung der bereits ausgereiften Parameter, sind Daten notwendig. Zum Kauf von Daten empfiehlt es sich aus Kostengründen auf vorhandenes Datenmaterial wie beispielsweise aus den Geodatenpools der Länder zurückzugreifen. Bei Betrachtung des Gültigkeitszeitraums von ALS-Daten können diese in zwei Kategorien eingeteilt werden. Auf der einen Seite steht das DGM, dessen Aktualität im Laufe der Jahre nur durch den Bau neuer Erschließungslinien oder anderweitiger Erdbewegungen gemindert wird. Auf der anderen Seite stehen DOM und nDOM, deren Aussagekraft durch das Wachstum der Vegetation bereits nach wenigen Jahren abnimmt. Aufgrund der potentiell langen Verwendungsdauer empfiehlt es sich daher ein DGM mit hoher Qualität anzukaufen. Im Falle von DOM und nDOM wäre eine Aktualisierung der Daten im Rhythmus der Einrichtungsperioden notwendig. Durch die Ungleichmäßigkeit der derzeitigen Flächenabdeckung Österreichs mit ALS-Daten lässt sich vermuten, dass es in naher Zukunft seitens der Länder keine flächendeckenden, regelmäßigen Aktualisierungen geben wird. Es sollte daher ein einmaliger Ankauf eines DOM aus ALS-Daten überlegt werden, über das in der nächsten Einrichtungsperiode ein DOM aus kostengünstigeren Photogrammetrie-Daten gelegt wird. Somit kann ein nDOM zur Feststellung der Veränderungen aus zwei verschiedenen Fernerkundungsquellen errechnet werden.

Eine Möglichkeit um die Kosten für Befliegungen zu senken, wäre die Kooperation mit anderen Interessentengruppen. Hier ist an die Fachbereiche Wildbach und Lawinenverbauung, Kulturtechnik, Wildökologie und Archäologie zu denken.

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit lagen noch keine Informationen über die ungefähren Implementierungskosten der für die ALS-Verarbeitung notwendigen Betriebsmittel vor.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von den in Kapitel 2 dargestellten Studien zu den Anforderungen forstwirtschaftlicher Akteure an die Fernerkundung, wurde erhoben, welche der für die Forsteinrichtung erforderlichen Parameter mit ALS-Daten abgedeckt werden können bzw. bereits abgedeckt werden.

Bei den primär aus Laserscanning gewonnenen Produkten, sind das digitale Geländemodell (DGM) und das normalisierte digitale Oberflächenmodell (nDOM) hervorzuheben. Ersteres kann im Rahmen der Forsteinrichtung zur Beschreibung standortsspezifischer Merkmale wie Exposition, Hangneigung und Seehöhe dienen. Das nDOM liefert mit der Vegetations- und somit auch Baumhöhe, einen in der Forstwirtschaft grundlegenden Parameter, der unter anderem zur Beurteilung der Güte eines Standortes herangezogen wird.

Die Berechnung und Analyse von Bestandesparametern kann mit Hilfe von ALS auf zwei grundlegend verschiedene Arten durchgeführt werden. Diese werden in der vorliegenden Arbeit „einzelbaum“- und „flächenbezogener“-Ansatz genannt.

Beim einzelbaumbezogenen Ansatz erfolgt die Berechnung der Parameter aus den Rohdaten des Laserscanning, der sogenannten 3D-Punktwolke. Die dreidimensionalen Werte ermöglichen eine Berechnung der Parameter Baumhöhe, Kronendurchmesser und Kronenlänge, aus denen dann sekundäre Parameter wie BHD und Holzvorrat geschätzt werden. Wie im Unterkapitel „vertikale Struktur“ beschrieben wird, können durch die Auswertung von „*Full-Waveform*“-Daten auf Einzelbaumebene auch die Kronen einzelner Individuen voneinander getrennt werden.

Flächenbezogene Auswertungsverfahren arbeiten zumeist auf Basis eines nDOM. Der Hauptgrund dafür ist die besonders bei flächigen Verfahren große, zu verarbeitende Datenmenge sein. DGM, DOM und nDOM werden in Form von Rasterdaten gespeichert, welche nur einen Bruchteil des Speicherplatzes von 3D-Punktwolken verbrauchen und dadurch auch einfacher zu verarbeiten sind. Die Auswertungsmöglichkeiten von Rasterdaten sind hingegen begrenzt. Es können beispielsweise keine Aussagen über die vertikalen Strukturverhältnisse eines Bestandes getroffen werden. Für Analysen auf horizontaler Ebene können jedoch auch Rasterdaten verwendet werden. Über die Feststellung lokaler

Höhenmaxima in einem nDOM, ist die Erkennung einzelner Individuen und somit auch die Quantifizierung der Stammzahl möglich. Die Analyse beschränkt sich hier allerdings auf Individuen der vorherrschenden bis herrschenden Klasse. Rasterdaten dienen ebenso gut der Erkennung von Bestandeslücken und Blößen, wie in Eysn et al (2010) gezeigt wird.

Wie den Kapiteln 4 und 5 zu entnehmen ist, gibt es bereits Untersuchungen zu den meisten für die Forsteinrichtung relevanten Parametern. Die im Kapitel 5.1 beschriebenen Genauigkeiten weisen darauf hin, dass einfach ableitbare Parameter bereits in der Praxis eingesetzt werden könnten, die Algorithmen komplexerer Parameter allerdings teilweise noch nicht ausgereift genug sind, um die abgeleiteten Parameter standardmäßig im Forsteinrichtungsprozess einzusetzen.

Das Ziel für die Zukunft bleibt die Verbesserung der Genauigkeiten der einzelnen Parameter.

Soll das konventionelle Verfahren der Vorratsberechnung über Ertragstafeln beibehalten werden, so stößt das System wegen der Unmöglichkeit der Altersbestimmung über Laserscanning hier an seine Grenzen. In diesem Fall kann ALS im Rahmen der Bonitierung zur Höhenbestimmung als eine sinnvolle Ergänzung für den Forsteinrichtungsprozess gesehen werden. Die derzeit über Laserscanning generierbaren Parameter geben auch keine Auskunft über Quantität und Qualität der vorhandenen Verjüngung, sowie über etwaige Schäden am Bestand. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Fernerkundungsdaten den Forsteinrichtungsprozess sinnvoll ergänzen, den Gang in den Wald allerdings auch in Zukunft nicht ersetzen werden können.

8 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ALS	Airborne Laserscanning
BG	Bestockungsgrad
BHD	Brusthöhendurchmesser
DGM	Digitales Geländemodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
GIS	Geoinformationssystem
GWL	Gesamtwuchsleistung
G_{ist}	beobachtete Grundfläche
G_{ET}	Ertragstafel-Grundfläche
ha	Hektar
k-NN	k-nächste-Nachbarn-Algorithmus
NN	Normalnull
ÖBf AG	Österreichische Bundesforste AG
ÖWI	Österreichische Waldinventur
R	Korrelationskoeffizient
R^2	Bestimmtheitsmaß
RMSE	Root-Mean-Square Error
SA	Standardabweichung
WZP	Winkelzählprobe

9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Informationsbedarf der Forstwirtschaft im Laufe der letzten fünf Jahrzehnte; nach Koch et al. (2008).....	5
Abb. 2: Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche (Wagner et.al. 2003).	9
Abb. 3: Schematische Darstellung der Interaktion zwischen Laserstrahl der Erdoberfläche und sich darauf befindlichen Objekten (Heinzel 2011).	10
Abb. 4: Darstellung eines digitalen Oberflächenmodells (DOM), digitalen Geländemodells (DGM) und eines normalisierten digitalen Oberflächenmodells (nDOM). Das nDOM errechnet sich aus Subtraktion des DGM vom DOM (Maier et al. 2006).	12
Abb. 5: Schätzung des Baumvolumens. Die schwarzen Punkte symbolisieren „first pulse“ Reflexionen. DTM ist das englischsprachige Synonym für digitales Geländemodell (DGM) (Hollaus et al. 2009 a).	21
Abb. 6: Schätzung des durchschnittlichen Höhenzuwachses auf Basis normalisierter digitaler Oberflächenmodelle; verändert nach Yu (2007).	24
Abb. 7: Ableitung des Brusthöhendurchmessers auf Basis eines normalisierten digitalen Oberflächenmodells nach Schardt et al. (2002).	28
Abb. 8: Vergleich zwischen einem aus „first pulse“ Werten (nDSM_fp_w)(Mitte) und einem aus „last pulse“ Werten (nDSM_lp_w)(rechts) generierten nDOM. nDSM ist dabei das englischsprachige Synonym für normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDOM). Die Nadelbaumregionen stechen besonders in dem aus „last pulse“ Werten generierten nDOM (rechts) hervor. Im Vergleich dazu ein Infrarot-Bild (links), in dem die Nadelbäume (dunkelgrün) und die Laubbäume (rötlich) gefärbt sind (Koch et al. 2009).	31
Abb. 9: Verwendung von Positions-, Arten- und Dimensionsdiversität zur Beschreibung von Waldstrukturen (Gadow 2005).	33
Abb. 10: Konventionelle „First-Last-Pulse“ Aufnahme (links) und „Full-Waveform“ Aufnahme (rechts) aus Reitberger et al. (2009).	37
Abb. 11: Punktwolke eines Einzelbaumes aus einer First-Last-Pulse Aufnahme (links) und einer Full-Waveform Aufnahme (rechts) aus (Reitberger et al. 2009).	38
Abb. 12: Punktwolken verschiedener Baumgruppen nach einer 3D-Segmentierung. Einzelne Individuen können aus der Kombination von „Full-Waveform“-Daten und der 3D Segmentierung differenziert werden; aus (Stilla et al. 2009).	38
Abb. 13: Segmentierung derselben Baumgruppe mittels Wasserscheidensegmentierung (links) und der 3D Segmentierung (rechts). Die verglichenen Daten stammen aus einer Full-Waveform Aufnahme; aus Reitberger et al. (2009).	39
Abb. 14: Ermittlung der Kronenuntergrenze. Der obere graue Bereich stellt die Krone dar, unter dem es zu einem starken Abfall der Intensität kommt. Der untere graue Bereich reicht bis zu einer Höhe von 2 m und stellt den Unterwuchs dar (Buddenbaum 2010).	40
Abb. 15: Erkennung von Bestandeslücken anhand zweier zu unterschiedlichem Zeitpunkt aufgenommener Datensätze. Die Variable (a) beschreibt einen in Metern angegebenen, variablen Schwellenwert, (x) die Periode, die zwischen den beiden Befliegungen liegt, verändert nach Yu (2007).	42
Abb. 16: Arbeitsablauf zur Erstellung von Wuchsklassenkarten mit ALS-Daten (Koch et al. 2009).	48
Abb. 17: Kartografisches Ergebnis der automatischen Bestandesdelinierung nach Struktur und Höhenklassen. Erläuterung der Legende: Dec = Laubwald, Mix = gemischte Fläche, Con = Nadelwald (Koch et al. 2009).	48
Abb. 18: Darstellungen derselben Fläche auf einem Orthofoto (links) einem von Nord-West beleuchteten DGM (Mitte) und einem von mehreren Richtungen beleuchteten DGM (rechts); aus Attwenger (2005).	49
Abb. 19: Aus einem Geländeneigungs-Modell digitalisierte Geländekanten entlang einer Forststraße (Rieger et al. 1999).	50
Abb. 20: (Links): Geländeneigungs-Modell. Rasterzellen mit geringer Neigung werden dunkler dargestellt. (Mitte): Geländeneigungs-Modell. Die roten Linien zeigen die automatisch extrahierte Erschließung. (Rechts):	

GIS Referenzdaten. Die schwarzen Linien zeigen zwei in den GIS-Daten eingetragene Erschließungstypen (Koch et al. 2009).	51
Abb. 21: Darstellung eines DGM (grau) basierend auf einem Raster von 1,8 x 1,8 m (6 x 6 Fuß). Auf Grundlage des DGM wurden mehrere Geländeneigungs-Klassen definiert die farblich dargestellt sind. Rot steht für steileres, grau für flacheres Gelände. Die Höhenschichtlinien wurden photogrammetrisch generiert, zeigen einen Höhenunterschied von 6,1 m (20 Fuß) an und wurden dargestellt, um die höhere Aussagekraft der ALS-Daten zu verdeutlichen. Die rot-weiße Linie stellt eine geplante Straßenachse dar (Schiess und Krogstad 2003, Krogstad und Schiess 2004).	52
Abb. 22: Holzvorratsmodell aus ALS-Daten (Rasterdaten mit 5 x 5 m Auflösung). Dunkle Farbtöne deuten auf höhere Vorratsdichte, hellere Farbtöne auf geringere Vorratsdichte hin. Blaue Linien stellen einen Steig, die rote Linie stellt eine Forststraße dar. Die zwei dunkelgrünen Linien sind mit Hilfe eines GIS eingezeichnete Seiltrassen. Der Einflussbereich des Seilgeräts wird hellgrün dargestellt (Monnet et al. 2011).	54
Abb. 23: Digitales Geländemodell mit zwei potentiellen Seiltrassen (dunkelgrüne Linien). Das DGM lässt die vorhandene Erschließung, sowie potentielle Lagerplätze erkennen. Am linken und rechten Bildrand sind zwei Forststraßen zu erkennen. Zwischen den dunkelgrünen Linien verläuft ein Steig. (Monnet et al. 2011).	54
Abb. 24: Orthofoto das die Oberfläche des oben abgebildeten DGM darstellt. Es soll den Informationsgehalt des DGM hervorheben (Monnet et al. 2011).	55
Abb. 25: RMSE ($m^3 \cdot ha^{-1}$) des geschätzten Holzvorrats in Abhängigkeit der Anzahl an k-nächsten Nachbarn, die zur Schätzung des Parameters herangezogen werden (Straub 2010).	62
Abb. 26: Ergebnis einer Wasserscheidensegmentierung. Links: direkter Vergleich des Segmentierungsergebnisses (schwarz) mit den Verifizierungsbäumen (rot) mit deutlich sichtbarer Verschmelzung zweier Kronen (oben). Rechts: Segmentierungsergebnis mit nDOM im Hintergrund (Schardt et al. 2002).	66
Abb. 27: Flächen der Republik Österreich, zu denen ALS-Daten vorliegen (blau) und unbeflogene Gebiete (rot) Quelle: Eigenverarbeitung von Daten der Bundesländer (geoland.at) (Stand 2011).	76
Abb. 28: Darstellung beflogener (blau) und unbeflogener Regionen (rot) auf dem Gebiet der Österreichischen Bundesforste. Quelle: Eigenverarbeitung. Verschneidung der Bundesländer-Shapefiles mit den ÖBf Flächen (Stand 2011).	77
Abb. 29: Lageungenauigkeit einer Bestandesfläche aus dem GIS (weiße Linie) in Bezug auf das aktuelle Orthofoto. Die Lageungenauigkeit kann besonders an der nördlichen Bestandesgrenze beobachtet werden (Weidenbach 2008 b).	84
Abb. 30: Symbolisierung der innerhalb der Bestandesfläche vorkommenden Baumhöhenklassen: 6,26 – 20,82 m (grün), 20,82 – 23,61 m (blau), 23,61 – 32,05 m (rot) auf Basis eines nDOM (Weidenbach 2008 b).	86
Abb. 31: Ergebnis der Delinierung der homogenen Teilbestände. Baumhöhenklassen: 6,26 – 20,82 m (grün), 20,82 – 23,61 m (blau), 23,61 – 32,05 m (rot). Die gelben Dreiecke zeigen die aus der Analyse des nDOM ausgewählten Oberhöhenbäume (Weidenbach 2008 b).	87

10 LITERATURVERZEICHNIS

- ACKERMANN F. (1999). *Airborne laser scanning – present status and future expectations*; ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (1999); S. 64 – 67.
- AGURA K., SESSIONS J., AKAY A. E. (2005). *Application of airborne laser scanner to forest road design with accurate earthwork volumes*; in: Journal of Forest Research Vol. 10/2; S. 113 – 123.
- ATTWENGER M., KRAUS K. (2005). *Aufnahmen flugzeuggetragener Laserscanner als Grundlage zur Erfassung von Straßen und Wegen in bewaldeten Gebieten*; in: Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie; Band 36 (2005); S. 7 – 12.
- BILL R., ZEHNER M. (2001). *Lexikon der Geoinformatik*, Wichmann Verlag, 2001
- BREIDENBACH J. (2008). *Regionalisierung von Waldinventuren mittels aktiver Fernerkundungstechniken*; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg.; Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften; Dissertation (2008)
- BUDDENBAUM H. (2010). *Charakterisierung von Forstbeständen mit Hilfe von Laserscanning und Reflexionsmodellierung*; Universität Trier; Fachbereich VI; Dissertation (2010).
- CEBRON N. (2008). *Aktives Lernen zur Klassifikation großer Datenmengen mittels Exploration und Spezialisierung*; Universität Koblenz; Fachbereich für Informatik und Informationswissenschaft; Dissertation (2008); S. 77 ff.
- DONEUS M., BRIESE C. (2006). *Digital terrain modelling for archeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning*; in: Ionnides M., Arnold D., Niccolucci F., Mania K. (Editors); The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST; S. 155 – 162.
- ECKMÜLLNER O., MÜLLER H., REITER T., RIEGER W. (1999). *Forstbestandeshöhen aus Laser-Scanner-Daten*; Poster AGIT 99 Salzburg.
- ECKMÜLLNER O. (2012). *Mündliche Auskunft*; am 27.03.2012.
- EYSN L., HOLLAUS M., MÜCKE W., VETTER M., PFEIFER N. (2010). *Waldlückenerfassung aus ALS-Daten mittels α -Shapes*; in: DGPF Tagungsband 19/2010 – Dreiländertagung OVG, DGPF und SGPF; TU Wien, IPF Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung; S. 552 – 560.
- FELBERMEIER B., HAHN A., SCHNEIDER T. (2010). *Study on User Requirements for Remote Sensing Applications in Forestry*; in: „W. Wagner, B. Székely (eds.): ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5 – 7, 2010, IAPRS, Vol. XXXVIII, part 7B“; S. 210 – 212.
- GADOW K. v. (2003). *Waldstruktur und Wachstum*; Institut für Waldinventur und Waldwachstum der Universität Göttingen; Universitätsdrucke Göttingen; S. 31 ff.
- GADOW K. v. (2005). *Forsteinrichtung: Analyse und Entwurf der Waldentwicklung*; Institut für Waldinventur und Waldwachstum der Universität Göttingen; Universitätsdrucke Göttingen; S. 106 f.

GÖTZ M., SCHMIDTKE H. (2006). *Projekt Sturmstabilität, Verfahren zur Bestimmung der Sturmstabilität von Waldbeständen als Basis für die Schadensprävention*; Forschungsprojekt Schlussbericht; SILVACONSULT AG.

HEINZEL J. (2011). *Combined use of high resolution LiDAR and multispectral data for automated extraction of single trees and tree species*; Albert–Ludwigs–Universität Freiburg im Breisgau; Fakultät für Forst – und Umweltwissenschaften; Dissertation (2011).

HEURICH M. (2006). *Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren*; Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan; Dissertation.

HOLLAUS M. (2006). *Large Scale Applications of Airborne Laser Scanning for a Complex Mountainous Environment*; Technische Universität Wien, Fakultät für Mathematik und Geoinformation; Dissertation.

HOLLAUS M., DORIGO W., WAGNER W., SCHADAUER K., REGNER B., BAUERNHANSL C. (2009a). *Regionalisierung von Waldinventurdaten mit Hilfe von Methoden des luftgestützten Laserscannings (ÖWI-Regio). Endbericht zum Forschungsprojekt Nr. 100187*; Eigenverlag Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.

HOLLAUS M., WAGNER W., SCHADAUER K., MAIER B., GABLER K. (2009b). *Growing stock estimation for alpine forests in Austria: a robust lidar based approach*; Canadian Journal of Forest Research Vol. 39; S 1387 – 1400.

HOLLAUS M., DORIGO W., WAGNER W., SCHADAUER K., HÖFLE B., MAIER B. (2009c). *Operational wide-area stem volume estimation based on airborne laser scanning and national forest inventory data*; International Journal of Remote Sensing Vol. 30, No. 19; S. 5159 – 5175.

HYYPÄÄ J., HYYPÄÄ H., LECKIE D., GOUGEON F., YU X., MALTAMO M. (2008). *Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests*; International Journal of Remote Sensing; Vol 29. No. 5, 1339-1366.

KALLIOVIRTA J., TOKOLA T. (2005); *Functions for Estimating Stem Diameter and Tree Age Using Tree Height, Crown Width and Existing Stand Database Information*; Silva Fennica 39/2; 227 – 248.

KATO A., SCHIESS P. (2007). *LiDAR-Derived Tree Parameters for Optimal Cable Logging System Design*; in: Sessions J., Havill Y. (Editors); Proceedings of the International Mountain Logging and 13th Pacific Northwest Skyline Symposium; S. 173 – 179.

KATZENBEISSER R., KURZ S. (2004). *Airborne Laser-Scanning, ein Vergleich mit terrestrischer Vermessung und Photogrammetrie*; Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 3/2004; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, 2004; S. 179 – 187.

KESSLER W. (2007). *Multivariate Datenanalyse für die Pharma-, Bio- und Prozessanalytik*; Ein Lehrbuch; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim.

KLOPF M., THURNHER Ch., HASENAUER H. (2011). *MosesFramework Benutzerhandbuch*; Institut für Waldbau; Department für Wald- und Bodenwissenschaften; Universität für Bodenkultur Wien; S. 9ff.

KOCH B., DEES M., BRUSSELEN J.v., ERIKSSON L., FRANSSON J., GALLAUN H., LEBLON B., MCROBERTS R.E, NILSSON M., SCHARDT M., SEITZ R., WASER L. (2008). Forestry applications; in: Z. Li, J. Chen, E. Baltsavias: *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information – 2008*; ISPRS Congress Book. Taylor & Francis Group; London; S 439 – 465.

KOCH B., STRAUB C., DEES M., WANG Y., WEINACKER H. (2009). *Airborne laser data for stand delineation and information extraction*; in: *International Journal of Remote Sensing*; 30/4; S. 935 – 963.

KRAMER H. (1988). *Waldwachstumslehre: Ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistungen und die Bestandessicherheit*; Verlag Paul Parey; S. 79 ff.

KRAMER H., AKÇA A. (2008). *Leitfaden zur Waldmesslehre*; J.D. Sauerländer's Verlag; Frankfurt am Main.

KRAUS K. (2004). *Photogrammetrie Band 1 – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen* (7. Aufl.). Berlin, New York: Walter de Gruyter, S 449 ff.

KRAUS K. (2005). *Laserscanning und Photogrammetrie im Dienste der Geoinformation*, Talk: AGIT 2005 Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XVII, Salzburg 2005-07-06 - 2005-07-08; in: "*Angewandte Geoinformatik 2005 - Beiträge zum 17. AGIT-Symposium Salzburg*", J. Strobl, T. Blaschke, G. Griesebner (ed.); Wichmann Verlag; S. 386 - 396.

KROGSTAD F., SCHIESS P. (2004). *The Allure and Pitfalls of Using LiDAR Topography in Harvest and Road Design*; in: Joint Conference of IUFRO 3.06 Forest Operations under Mountainous Conditions and the 12th International Mountain Logging Conference, Vancouver, B.C.; Juni 13 – 16.

LEMM R., THEES O. (2009). *Evaluation von IT-Systemen für forstliches E-Business mittels Analytic Hierarchy Process (AHP)*; in: Thees O., Lemm R. (2009). *Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente*; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag; S 469 - 498.

MAGNUSSO M., FRANSSON J. E. S., HOLMGREN J. (2007). *Effects on Estimation Accuracy of Forest Variables Using Different Pulse Density of Laser Data*; in: *Forest Science* 53: 6, S 619-626.

MAIER B., TIEDE D., DORREN L. (2006). *Assessing Mountain Forest Structure using Airborne Laser Scanning and Landscape Metrics*; in: ISPRS Vol. Nr. XXXVI – 4/C42; S. 1682 – 1777.

MANDLBURGER G., BRIESE C., OTEPKA J., HÖFLE B., PFEIFER N. (2010). *Verwaltung landesweiter Full Waveform Airborne Laser Scanning Daten*; in: DGPF Tagungsband 19/2010 – Dreiländertagung OVG, DGPF und SGPF; S. 356 – 365.

MEANS J.E., ACKER S.A., HARDING D.J., BLAIR J.B., LEFSKY M.A., WARREN C.B., HARMON M.E., MCKEE W.A. (1999). *Use of Large-Footprint scanning Airborne Lidar To Estimate Forest Stand Characteristics in the Western Cascades of Oregon*; in: Remote Sensing of Environment 67; S. 298 – 308.

MONNET J.-M., MERMIN E., CHANUSSOT J., BERGER F. (2010). *Using Airborne Laser Scanning to Assess Forest Protection Function against Rockfall*; in: Interpraevent International Symposium in Pacific Rim, Taipei: Taiwan, Province of China; Version 1.

MONNET J.-M., MUNOZ A., MERMIN E., CLOUET N., BERGER F. (2011). *Forest mapping and harvest planning with airborne laser scanning: an operational experiment in the French Alps*; 1st EARSeL SIG Forestry workshop: Operational remote sensing in forest management; Juni 2 – 3; Prag; Tschechische Republik.

MOSER W. (1970). *Wie genau muss eine Forstkarte sein?*; Allgemeine Forstzeitung; 81. Jahrgang; S 205 ff.

NAESSET E. (2004). *Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne laserscanning laser*; Scandinavian Journal of Forest Research; 19/2 (2004); S. 164-179.

PFEIFER N., BRIESE C. (2007). *Laser Scanning – Principles and Applications*; Talk: Geo-Sibir, Nowosibirsk, 25-27 April 2007 (invited); 2007-04-25 - 2007-04-27; in: "III International Scientific Conference", S. 93 - 112.

PRETZSCH H. (2002). *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*; Parey Buchverlag; Berlin; S. 309f.

REITBERGER J., KRZYTEK P., STILLA U. (2009). *First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern*; DGPF Tagungsband 18/ 2009.

REUTEBUCH S. E., MCCAUGHEY R.J., ANDERSEN H-E., CARSON W.W. (2003). *Acuracy of high-resolution lidar terrain model under conifer forest canopy*; in: Canadian Journal of Remote Sensing; Vol. 29/5; S. 527 – 535.

RIANO D., MEIER E., ALLGÖWER B., CHUVIECO E., USTIN S.L. (2003). *Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling*; in Remote Sensing of Environment; Vol. 86, Issue 2; S. 177 – 186.

RIEGER W., KERSCHNER M., REITER T., ROTTENSTEINER F. (1999). *Roads and Buildings from Laser Scanner Data within a Forest Enterprise*; in: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; ISPRS Workshop; Vol. 32; Part 3-W14; La Lolla; California; 9. – 11. Nov. 1999; S. 185 – 191.

SACHS L., HEDDERICH J. (2006). *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*; Dreizehnte Aktualisierte und erweiterte Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

SCHARDT M., ZIEGLER M., WIMMER A., WACK R., HYPPÄ J. (2002). *Assessment of Forest Parameters by Means of Laser Scanning*; in: Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium: Photogrammetric Computer Vision (peer reviewed paper)

SCHADAUER K., NEUMANN M. (2008). *Holz-und Biomasseaufkommensstudie für Österreich*; Forschungsprojekt Nr. 100203; Endbericht; Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW).

SCHIESS P., KROGSTAD F. (2003). *LiDAR-Based Topographic Maps Improve Agreement between Office-Designed and Field-Verified Road Locations*; in: Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Council on Forest Engineering, Bar Harbor, Maine, USA; Sept. 7 – 10.

SEKOT W. (2010). *Forsteinrichtung, Studienunterlage zur Lehrveranstaltung im SS 2010*; Universität für Bodenkultur Wien; Institut für Agrar- und Forstökonomie; S 244 ff.

STILLA U., JUTZI B., REITBERGER J., YAO W., KRZYTEK P. (2009). *Full Waveform Laserscanning-Auswertemethoden und Anwendungen*; in: Terrestrisches Laserscanning TLS 2009; Vol. Schriftreihe des DVW; Nr. Band 60; S. 49 – 67.

STRAUB C., WANG Y., IERCAN O. (2009). *Airborne Laser Scanning: Methods for Processing and Automatic Feature Extraction for Natural and Artificial Objects*; in: Laser Scanning for the Environmental Sciences; Blackwell Publishing Ltd.; S. 115 – 132.

STRAUB C. (2010). *Erfassung des Energieholzpotentials und seiner Verfügbarkeit im Wald und im Offenland mit neuen Fernerkundungsmethoden*; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau; Fakultät für Forst – und Umweltwissenschaften; Dissertation.

WAGNER W., ULLRICH A., BRIESE C. (2003). *Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche*, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang, 4; S 223 - 235.

WAGNER W., HOLLAUS M., BRIESE C., DUCIC V. (2008). *3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners*; in: International Journal of Remote Sensing; 29/5; S. 1433 – 1452.

WHITE R. A., DIETTERICK B. C., MASTIN T., STROHMAN R. (2010). *Forest Roads Mapping Using LiDAR in Steep Forested Terrain*; in: Remote Sensing 2010/2; S. 1120 – 1141.

WIRNSBERGER J. (2011). *Evaluierung von Alternativen der Ertragsregelung zur Förderung von Innovationen*; Universität für Bodenkultur Wien; Department für Agrar- und Forstökonomie; Dissertation.

YU X., HYYPPÄ J., HOLOPAINEN M, VASTARANTA M. (2010). *Comparison of Area-Based and Individual Tree-Based Methods for Predicting Plot-Level Forest Attributes*; in: Remote Sensing 2010, 2, S. 1481-1495

YU X., HYYPPÄ J., KAARTINEN H., MALTAMO M., HYYPPÄ H. (2008). *Obtaining plotwise mean height and volume growth in boreal forests using multi-temporal laser surveys and various change detection techniques*; in: International Journal of remote Sensing 2008, Vol. 29, No. 5, S 1367-1386.

YU X. (2007). *Methods and Techniques for Forest Change Detection and Growth Estimation using Airborne Laser Scanning Data*; Helsinki University of Technology; Department of Surveying; Dissertation.

ZIEGLER M., WIMMER A., SCHARDT M., ECKMÜLLNER O., HOFRICHTER J. (2001). *Hochauflösende Gelände- und Oberflächenmodelle aus Laserscannerdaten – ein Anwendungsbeispiel aus der Forstinventur*; in: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation VGI 1/01; S 18 – 25.

Onlinequellen:

ASPRS (2009): *Common Lidar Data Exchange Format - .LAS Industry Initiative*; online im Internet: www.asprs.org/a/society/committees/lidar/lidar_format.html ; Abfrage am 24.11.2011

FORSTGESETZ (1975): *Gesamte Rechtsvorschrift für Forstgesetz 1975*; online im Internet: <http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010371&ShowPrintPreview=True> ; RIS Bundeskanzleramt Rechtsinformationssystem; Abfrage am 29.03.2012

GEODATAZONE (2012): RMSE; online im Internet: <http://www.geodsz.com/deu/d/rmse> ; Lexikon Geografie, Lexikon Geologie, Lexikon Geodäsie, Topologie & Geowissenschaften; Abfrage am 30.03.2012.

GEOINFORMATIK-SERVICE (2011): *Rasterdatenformate*; online im Internet: <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=1864001315> ; Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik; Abfrage am 24.11.2011

GEOMARKETING (2012): *Lizenz- und Wartungskosten für ArcGIS ArcView 10*; online im Internet: www.geomarketing.at/index.php?option=com_content&view=article&id=124&Itemid=178 ; GeoMarketing GmbH; Abfrage am 16.01.2012.

HAUK E., SCHADAUER K. (2009): *Instruktion für die Feldarbeit der Österreichischen Waldinventur 2007 – 2009*; BFW Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft; online im Internet: http://bfw.ac.at/700/pdf/DA_2009_Endfassung_klein.pdf ; Abfrage am 11.01.2012.

IPF TU-WIEN (2012): *OPALS, Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning Data*; Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien; Package opalsForest; online im Internet: http://www.ipf.tuwien.ac.at/opals/opals_docu/pkg_opalsForest.html ; Abfrage am 07.02.2012.

LEMMENS M. (2007): *Airborne Lidar Processing Software*; Product Survey; online im Internet: http://www.gim-international.com/files/productsurvey_v_pdfdocument_12.pdf ; GIM International; Abfrage am 25.11.2011

LEMMENS M. (2010): *Airborne Lidar Processing Software*; Product Survey; online im Internet: http://www.gim-international.com/productsurvey/id37-Airborne_Lidar_Processing_Software_February.html ; GIM International; Abfrage am 25.11.2011

POLACZEK K. (2008): *Ansätze zur Implementierung von LiDAR in das sächsische Forsteinrichtungsverfahren*; Vortrag anlässlich der Sachsenforst Tagung „Laserscanning – ein Werkzeug für die Forsteinrichtung“; online im Internet: <http://www.smul.sachsen.de/sbs/6405.htm> ; Abfrage am 23.12.2011.

WEIDENBACH M. (2008a): *Generierung von Informationen für die Forsteinrichtung auf Basis von Airborne Laser Scanning Daten (ALS) und digitalen Farbinfrarotbildern (CIR) am Beispiel von zwei Untersuchungsflächen in Sachsen*; Teil I; Vortrag anlässlich der Sachsenforst Tagung „Laserscanning – ein Werkzeug für die Forsteinrichtung“; online im Internet: <http://landconsult.de/segmentation/download> ; Abfrage am: 04.02.2012.

WEIDENBACH M. (2008b): *Generierung von Informationen für die Forsteinrichtung auf Basis von Airborne Laser Scanning Daten (ALS) und digitalen Farbinfrarotbildern (CIR) am Beispiel von zwei Untersuchungsflächen in Sachsen*; Teil II; Vortrag anlässlich der Sachsenforst Tagung „Laserscanning – ein Werkzeug für die Forsteinrichtung“; online im Internet: <http://landconsult.de/segmentation/download> ; Abfrage am: 04.02.2012.

WEIDENBACH M. (2008c): *Generierung von Informationen für die Forsteinrichtung auf Basis von Airborne Laser Scanning Daten (ALS) und digitalen Farbinfrarotbildern (CIR) am Beispiel von zwei Untersuchungsflächen in Sachsen*; Vortrag anlässlich der Sachsenforst Tagung „Laserscanning – ein Werkzeug für die Forsteinrichtung“; lanConsult (Teil 1); online im Internet: <http://www.smul.sachsen.de/sbs/6405.htm> ; Abfrage am 23.12.2011.