Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.

http://www.ub.tuwien.ac.at



The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.

http://www.ub.tuwien.ac.at/eng



# **DIPLOMARBEIT**

# Brandgutkarten aus Airborne Laserscanningdaten

ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation

Forschungsgruppe Photogrammmetrie und Fernerkundung

der Technischen Universität Wien

begutachtet von

Univ. Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Norbert Pfeifer

unter der Anleitung von

Univ. Ass. Dipl. -Ing. Dr. Markus Hollaus

durch

Anja Meyer, B.Eng.

Starkfriedgasse 15

1180 Wien

Kurzfassung

Anja Meyer

Geodäsie und Geoinformation

Wien, September 2016





# Kurzfassung

# Brandgutkarten aus

# Airborne Laserscanningdaten

Aufgrund von Klima- und Witterungsbedingungen nehmen Waldbrände erheblich zu. Waldbrände können sich bei entsprechenden Bedingungen schnell entwickeln und in kürzester Zeit ganze Landstriche verwüsten und niederbrennen. Erst im Frühjahr 2016 brannten in Kalifornien unzählige Hektar Busch- und Waldflächen nieder, verwüsteten Teile der Region und bedrohten mehrere 1000 Menschen in ihrer Existenz. Aus diesem Grund ist ein systematisches und regelmäßiges Monitoring von waldbrandgefährdeten Gebieten unerlässlich. Nicht nur moderne Satellitensysteme werden für die Überwachung von Waldgebieten eingesetzt, auch das luftgestützte Laserscanning gewinnt immer mehr an Bedeutung, wenn es um die Ableitung waldbrandspezifischer Parameter geht.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Generierung von Brandgutkarten aus Airborne Laserscanningdaten. Die Karten werden für Waldgebiete im Kanton Bern, in der Schweiz abgeleitet. Diese Arbeit gliedert sich in eine *theoretische* (Abschnitt 2 - 4) und in eine *praktische Ausarbeitung* (Abschnitt 5 – 7). Der *theoretische Abschnitt* beinhaltet im Wesentlichen eine Literaturrecherche. Hierbei wird ein repräsentativer Überblick über den Forschungsstand des Waldbrandes, sowie dessen Überwachung und Vorhersage gegeben. Im Anschluss werden strukturelle Waldparameter analysiert und festgelegt, die für die Generierung einer Brandgutkarte von entscheidender Bedeutung sind. Die *praktische Ausarbeitung* beinhaltet die Berechnung der festgelegten Brandgutparameter mit der wissenschaftlichen Laserscanning-Software OPALS. Mit Hilfe der berechneten Brandgutparameter und vorliegender Referenzdaten erfolgt die manuelle Ableitung von Gefahrenstufen, die einen Waldbrand klassifizieren. Anschließend werden die festgelegten Brandstufen in Form einer Brandgutkarte mit der freien Software QGIS visualisiert.

Abstract

Anja Meyer

Geodäsie und Geoinformation

Wien, September 2016





#### **Abstract**

# Derivation of forest fire maps

# from airborne laserscanning data

Based on climate- and weather conditions, forest fires are about to increase extensive in the near future. Forest fires develop rapidly in dry areas to an extent, that whole areas get desolate and vast. In spring 2016, in California, numberless of woodland areas burned down due to extreme dry weather conditions. For this reason, systematic and regular monitoring of forest fire risk areas is indispensable. There are two major procedure to monitor forest areas, the modern satellite systems and the airborne laser scanning, which is becoming increasingly important to determine and deduct forest fires parameters.

The present work deals with the generation of forest fire maps from airborne laserscanning data. This maps are derived and analyzed for forest areas in Kanton Bern in Switzerland. The work is divided in a *theoretical composition* (section 2 until 4) and in a *practical composition* (section 5 until 7). The *theoretical chapter* mainly includes a literature review and theoretical explanation of the state of research in forest fire prediction. The next chapters consist of analyzing forest parameter which are superior to forest fire maps

The *practical part* deals with further calculations of forest fire parameters programmed in the python based laser scanning software OPALS. The relevant parameters are, *tree height, crown length, canopy height, covering grade, consisted gap* and *classification the tree height with the help of grew classes*. Using this parameters and present referent data, the derivation of security levels is carried out, which classifies a forest conflagration. Finally, a visual representation of the forest fire maps with the software QGIS, will be done.

# Inhalt

Kl	KURZFASSUNG			
ABSTRACT				
IN	INHALTII			
1.	Motivation	1		
	1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit	2		
2.	Einleitung	4		
	2.1 Naturwissenschaftliche Grundlagen des Waldbrandes	4		
	2.1.1 Definition Wald	4		
	2.1.2 Definition Waldbrand.	5		
	2.1.3 Waldbrandformen und Einflussfaktoren	5		
	2.1.4 Waldbrandereignisse	7		
	2.1.5 Waldbrandmonitoring mit Hilfe von Satellitenfernerkundung	9		
	2.1.6 Forschungsprojekte zur Thematik Waldbrand	12		
	2.1.7 Meteorologische Verfahren zur Entwicklung von Waldbrandgefahrenstufen	15		
	2.1.8 Waldbrandgefährdungskarten.	20		

<b>3.</b>	Airborne Laserscanning	23
	<b>3.1 Einleitung</b>	23
	3.2 Historie von Airborne Laserscanning	26
	3.2.1 Laser Profiler.	26
	3.2.2 Luftgestütztes Laserscanning.	26
	3.2.3 Weltraumgestütztes Laserscanning.	27
	3.2.4 Terrestrisches Laserscanning.	27
	3.3 Physikalische Grundlagen des Airborne Laserscanning	28
	3.3.1 Systemkomponenten	28
	3.3.2 Das Messprinzip	29
	3.3.3 Der "Fußabdruck" des Laserstrahls	29
	3.3.4 Die Energie des Laserstrahls.	30
	3.3.5 Primäre Produkte	31
	3.3.6 Verfahren zur Generierung primärer Produkte	33
	3.4 Airborne Laserscanning versus Photogrammetrie	35
4.	Stand der Wissenschaft – Schätzung der Brandgutparam	eter.37
	4.1 Einleitung	37
	4.1.1 Schätzung Baumhöhe	37
	4.1.2 Schätzung der Kronenuntergrenze und der Kronenlänge	38
	4.1.3 Schätzung des Kronenschlussgrades	41
	4.1.4 Schätzung von Waldlücken	42

	4.1.5 Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen	44
	4.1.6 Einteilung von Bestandsflächen nach Wuchsklassen	46
	4.2 Schätzung von Waldparameter für verschiedene Anwendung	gen50
5.	Testgebiete und Daten	51
	5.1. Aufgabenstellung	51
	5.2. Testgebiet und Daten	51
6.	Methoden	57
	6.1 Qualitätskontrolle	57
	6.2 Ableitung der Oberflächenmodelle	57
	6.3 Schätzung der Baumhöhe	59
	6.4 Schätzung der Brandgutparameter	59
	6.6 Ableitung der Waldbrandgefahrenstufen (WBGS)	64
	6.7 Ableitung der Brandgutparameter nach WBGS	70
7.	Ergebnisse und Diskussion	72
	7.1 Qualitätskontrolle	72
	7.2 Ableitung der Oberflächenmodelle	77
	7.3 Schätzung der Baumhöhe	98

	7.4 Schätzung der Brandgutparameter	102
	7.5 Ableitung der Waldbrandgefahrenstufen	127
	7.6 Visuelle Darstellung der Brandgutkarten	148
8.	Zusammenfassung und Ausblick	152
9.	Abbildungsverzeichnis	153
10.	. Tabellenverzeichnis	159
11.	. Abkürzungsverzeichnis	160
12.	Literaturverzeichnis	163
13.	. Internetquellen	172
14.	. Anhang	179

Motivation 1

# 1. Motivation

Täglich berichten die Medien über schwere Naturkatastrophen, wie Erdbeben, Tsunamis, Hurrikans oder Überschwemmungen. Im Fokus der Öffentlichkeit stehen hierbei Katastrophen, wie zum Beispiel das verheerende Erdbeben von Ecuador im April 2016, wodurch innerhalb von Minuten große Teile der Region zerstört und unzählige Menschen getötet, verletzt und obdachlos wurden. Weitere Beispiele stellen unter anderem die schweren Überschwemmungen in Malawi Anfang 2015 dar, oder der gewaltige Hurrikan Patrica, der im Oktober 2015 über Mexiko hinweg zog und große Teile der Region verwüstete. Die Mitteilung über einen Waldbrand in einer bestimmten Region erfolgt meist ohne ein großes Medienspektakel. Aufgrund von Klima- und Witterungsänderungen, aber auch durch den Einfluss des Menschen, nehmen Waldbrände erheblich zu. Nicht nur in Kalifornien oder Australien treten regelmäßig große Waldbrände auf, auch in Europa nehmen Waldbrände beachtlich zu. In den mediterranen Regionen Europas wie zum Beispiel in Portugal, Spanien oder Italien kommt es aufgrund langanhaltender Hitze- und Trockenperioden, gerade in den Sommermonaten oftmals zu verherrenden Waldbränden. Aber auch in Österreich, Deutschland und der Schweiz kommt es aufgrund zunehmender Trockenperioden immer wieder zu größeren Waldbränden. Erst im Sommer 2015 brannte eine beträchtliche Anzahl Hektar Wald- und Vegetationsflächen in Österreich nieder, außerdem bestand für das Land über mehrere Wochen ein erhebliches Waldbrandrisiko.

Die Ursachen von Waldbränden können unterschiedlicher Natur sein. Waldbrände können sich bei entsprechenden Bedingungen schnell entwickeln und in kürzester Zeit unzählige Hektar Wald- und Vegetationsfläche vernichten und somit Menschen und Tiere in ihrer Existenz bedrohen. Aus diesem Grund ist ein systematisches und regelmäßiges Monitoring von waldbrandgefährdeten Gebieten unerlässlich. Moderne Satellitenverfahren bieten heutzutage eine weltweite Überwachung von waldbrandgefährdeten Gebiete an. In Österreich wird zum Beispiel die aktuelle Waldbrandgefahr mit Hilfe meteorologischer Modelle von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) berechnet. Die aktuellen Ergebnisse werden in Form einer Waldbrandgefahrenkarte auf der ZAMG-Onlineplattform zur Verfügung gestellt.

Wälder stellen schon seit einem langen Zeitraum einen wichtigen Aspekt in der Fernerkundung dar. In Ländern mit sehr großen Waldflächen wie zum Beispiel Schweden, Finnland oder den USA werden Forstinventuren mit Hilfe von Satellitenbilddaten durchgeführt.

Motivation 2

Zahlreiche Studien beschäftigen sich mit der Ableitung von forstwirtschaftlichen Parametern [Buddenbaum, 2010]. Autoren wie zum Beispiel Walsh (1980) der Landsat-TM-Daten verwendete, um Nadelbaumklassen zu kartieren, Lee et al. (2004) die mit Hilfe von Fernerkundungsdaten den Blattflächenindex berechneten oder Ghiyamat und Shafri (2010) die mit abbildender Spektroskopie die Biodiversität in Wäldern beurteilten, seien hier zu nennen.

Eine immer größere Bedeutung im Bereich der Forstfernerkundung erlangt das luftgestützte Laserscanning (ALS). Diese Technik hat sich in den letzten Jahren schnell entwickelt und gilt im Bereich der topographischen Geländeerfassung, Photogrammetrie und Forstinventur als etabliert. Mit Hilfe von Laserscannern wird die dreidimensionale Struktur bei der Aufnahme der Objekte erfasst. Somit können aus Befliegungen im Forst, Daten gewonnen werden, die u.a. für die Charakterisierung des Ökosystems, der Wachstumsmodellierung, der Erosionsabschätzung, oder für Erfassung topographischer Merkmale in einem Waldgebiet herangezogen werden können [Buddenbaum, 2010].

Ziel dieser Arbeit ist es nun, mit Hilfe von Laserscanningdaten geeignete Waldparameter abzuleiten, die für die Erstellung einer Brandgutkarte von entscheidender Bedeutung sind und somit eine Unterstützung in der Waldbrandprävention leisten können.

# 1.2 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich grundlegend in 8 *Kapitel*, wobei hier anzumerken sei, dass sich die Arbeit in eine *theoretische* (*Abschnitt 2 - 4*) und in eine *praktische Ausarbeitung* (*Abschnitt 5 - 7*) unterteilt.

Die *theoretische Ausarbeitung* ist im Wesentlichen eine Literaturarbeit. Es werden für die Literatursuche unterschiedliche Quellen wie zum Beispiel Bibliotheken, Fachjournals, Online-Datenbanken, oder diverse Publikationen, die sich umfassend mit dem dieser Arbeit beinhaltenden Themenkomplex beschäftigten, herangezogen. Einleitend soll ein repräsentativer Überblick über den Forschungsstand des Waldbrandes, dessen Monitoring und Vorhersage. (*Abschnitt 2*) vermittelt werden. Im *Kapitel 3* erfolgt ein historischer Überblick über die Laserscanning-Technik, eine kurze Einführung in die Grundlagen des ALS, sowie ein kurzer Vergleich zwischen den beiden Fernerkundungstechniken Laserscanning und Photogrammetrie. Im *Abschnitt 4* werden insbesondere strukturelle Waldparameter analysiert und festgelegt, die für die Generierung einer Brandgutkarte von entscheidender Bedeutung sind.

Motivation 3

In der *praktischen Bearbeitung* werden zu Beginn die vorliegenden Testgebiete und Daten (*Abschnitt 5*) genauer dargestellt und beschrieben. Im Anschluss erfolgt die Darstellung der Berechnungsmethoden der festgelegten Brandgutparameter

- Baumhöhe
- Kronenansatzhöhe und Kronenlänge
- Kronenschlussgrad
- Waldlücken
- Einteilung der Bestandshöhe nach Wuchsklassen.

Die Ableitung der oben genannten Brandgutparameter erfolgt mit der wissenschaftlichen Laserscanning-Software Opals (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data), die am Department für Geodäsie und Geoinformation der Technischen Universität Wien (TU Wien) entwickelt wurde. Mit Hilfe der berechneten Brandgutparameter und vorliegender Referenzdaten erfolgt die manuelle Ableitung von Gefahrenstufen, die einen Waldbrand klassifizieren.

Im *Abschnitt* 7 werden die gewonnenen Ergebnisse dargestellten und diskutiert. Das *Kapitel* 8 fasst diese Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick. Im Anhang befinden sich zusätzliche Informationen, sowie der Programmiercode.

# 2. Einleitung

# 2.1 Naturwissenschaftliche Grundlagen des Waldbrandes

Laut einer aktuellen Statistik der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) werden ungefähr 30 % der Landesoberfläche der Erde mit Wald bedeckt [Internetangabe: FAO, 2005]. Rund um den Globus unterteilen sich die vorhandenen Waldflächen in zwei große Waldgebiete. Die Abgrenzung erfolgt in einer groben Gliederung in einen Tropen- und Subtropengürtel, die jeweils durch die beiden Breitenkreise begrenzt werden, sowie durch die gemäßigte und boreale Zone, die sich entlang der Nordhalbkugel erstrecken [Herkendell und Pretzsch, 1995].

Bereits in den frühen griechischen und römischen Kulturen spielte das Ökosystem Wald eine zentrale Rolle, um die Gewinnung des Rohstoffes Holz für neue Wohngebäude und Bauwerke sicherzustellen, die Versorgung der Bevölkerung durch Nahrungsmittel zu garantieren und den Schutz der Städte und Dörfer vor Naturgefahren zu gewährleisten. Auch heute haben die Funktionen des Waldes noch ähnliche Aufgaben, jedoch werden diese inzwischen in zwei Kategorien eingeteilt. Die ökonomische Funktion des Waldes unterstellt die Bereitstellung von Roh- und Brennstoffen, sowie die Versorgung von Nahrungsmitteln. Die ökologische Funktion sieht im Ökosystem Wald einen Kohlenstofflieferanten, Trinkwasserversorger, Beschützer vor Naturgefahren und einen Erholungs- und Lebensraum für Mensch, Tier und Pflanzen [Internetangabe: IUFRO, 1995].

#### 2.1.1 Definition Wald

Der Begriff *Wald* ist nach eingehender Literaturrecherche nicht klar abgegrenzt. Vielmehr findet sich eine Vielzahl unterschiedlichster Definitionen, beginnend mit einer international anerkannten Darlegung der FAO (2005), über ökonomische, ökologische, vegetationskulturelle und juristische Darlegungen, wie diese zum Beispiel bei Helms (2002) oder bei der deutschen Forstwirtschaft [Burschel und Huss, 1987] zu finden sind. Die Unterschiede der Bezeichnung *Wald* unterliegen Faktoren wie der Flächengröße, Mindestgröße, Kronenfläche, Deckungsgrad und Nutzungs- und Standortfaktoren, um hier nur einige Differenzierungen der Begriffsbestimmungen zu nennen.

In Österreich wird der Begriff Wald auf juristischer Ebene im österreichischen Forstgesetz von 1975 klar konkretisiert. Die Definition nach § 1a des österreichischen Forstgesetzes (1975) beschreibt den Begriff Wald als: "Wald im Sinne dieses Bundesgesetztes sind mit Holzgewächsen der im Anhang angeführten Arten (forstlicher Bewuchs) bestockte Grundflächen, soweit die Bestockung mindestens eine Fläche von 1000 m² und eine durchschnittliche Breite von 10 m erreicht" [Internetangabe: Forstgesetz 1975, Fassung 06.08.2015, Begriffsbestimmung § 1a].

#### 2.1.2 Definition Waldbrand

Im Bereich der Chemie wird der Begriff der Verbrennung als eine Oxidation eines brennbaren Materials unter einer Lichterscheinung und Wärmeabgabe angesehen. Für die Entstehung eines Feuers muss ein vorhandener brennbarer Stoff, Luftzufuhr, sowie das Erreichen einer bestimmten Temperatur des zu entzündeten Stoffes, gegeben sein [Warnatz und Maas, 1993].

Laut einer Definition des Bundesamts für Bevölkerungsschutz (BABS) in der Schweiz, ist jedes unkontrollierte Feuer in einem Waldgebiet als ein Waldbrand anzusehen [Internetangabe: BABS, 2015]. Andere Begriffsbezeichnungen wie beispielsweise von Lex (1996) beschreiben einen Waldbrand, als einen Vegetationsbrand in einem bewaldeten Gebiet, der während Trockenperioden entsteht. In Australien wird auch der Begriff des Buschfeuers verwendet, die als unkontrollierte Brände von niedriger Vegetation wie Gras, Gestrüpp und Gebüsch, aber auch von Wald angesehen werden.

#### 2.1.3 Waldbrandformen und Einflussfaktoren

Laut Angaben des Umweltbundesamts in Deutschland, sind die Faktoren, die einen Waldbrand auslösen, unterschiedlicher Natur. Gemäß der Waldbrandstatistik der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung in Deutschland, liegen natürliche Faktoren wie beispielsweise Blitzschlag, vulkanische Aktivität oder Selbstentzündung, nur bei etwa 4 %. Vielmehr werden Waldbrände durch vorsätzliche Brandstiftung, wie Brandrodung oder durch fahrlässiges Verhalten, wie beispielsweise ein außer Kontrolle geratenes wildes Lagerfeuer oder eine unachtsam weggeworfene Zigarette, durch den Menschen, ausgelöst. Hierbei stellen Klimaund Witterungsbedingungen ebenfalls einen gewissen Einflussfaktor dar.

Fährlässiges oder vorsätzliches Verhalten waren im Jahr 2014, in 44 % der Fälle der Grund für den Ausbruch eines Waldbrandes in Deutschland [Internetangabe: Umweltbundesamt Deutschland, 2016, Ursachen Waldbrand; Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung Deutschland, 2014, Waldbrandstatistik].

Die Einflussfaktoren eines Waldbrandes sind unter den Überbegriffen *Gefahrenquellen* (Beschaffenheit des Waldbodens, Exposition, Naturgefahren), *Zeitpunkt* (Jahreszeit, Wetterperiode, Luftfeuchtigkeit), *Ort und Ausdehnung* (Geländeform, Größe, Zugänglichkeit des Brandgebietes) und *Ereignisablauf* (Zeitpunkt der Brandentdeckung, Reaktion und Vorgehensweise der Einsatzkräfte, Witterungsbedingungen) zu finden. Eine detaillierte Auflistung der Einflussfaktoren ist in einer nationalen Gefährdungsanalyse zum Thema Waldbrand vom BABS zu entnehmen [Internetangabe: BABS, 2015].

Die Art des Waldbrandes ist abhängig von der Vegetation, der Topographie des Geländes, wie zum Beispiel Hangausrichtung oder Neigung, sowie der meteorologischen Verhältnisse wie Temperatur, Wind und Luftfeuchtigkeit. Im Folgenden werden die in Mißbach (1982) beschriebenen Waldbrandformen, genauer dargestellt. Weitere Beschreibungen von Waldbrandarten und Einflussfaktoren sind beispielsweise in Arno und Allison-Bunnell (2002), Fuller (1991), König, (2007) oder in Omi (2005) zu finden.

#### 2.1.3.1 Bodenbrände

Der Kategorie Bodenbrände gehören 75 % aller Waldbrände an. Bodenbrände sind Brände, bei denen niedrige Vegetation wie Gras, Laub, Unterholz, Nadelgehölz, Dickicht, Sträucher und Jungwuchs auf der Bodenoberfläche verbrennen. Das Feuer läuft als schmaler Saum über den Boden, da die niedrige Vegetation sehr schnell abbrennt. Massive Gehölze wie Stöcke, Äste, oder die Rohhumusschichten können länger glimmen. Die Laufgeschwindigkeit des Bodenfeuers wird beeinflusst von der Windgeschwindigkeit, der Menge der Vegetation, die als Brennmaterial dient, der Luftfeuchtigkeit, sowie der Geländeform [Mißbach, 1982].

#### 2.1.3.2 Vollbrände

Einer der gefährlichsten Formen des Waldbrandes sind Vollbrände. Diese Brandart kann über eine Feuerbrücke, die aus trockene Äste, Baumkronen des Unterstandes oder über verharzte Baumrinden besteht, entstehen. Vollbrände entwickeln sich meist aus vorangehenden Bodenbränden. Dabei besteht die Möglichkeit, dass durch Hitzeentwicklung, die Blätter oder Nadeln ohne Feuerbrücke verbrennen. Vollbrände vernichten meist jüngere und dicht geschlossene Bestände. Starke Windverhältnisse verstärken die Laufgeschwindigkeit des Feuers erheblich [Mißbach, 1982].

#### 2.1.3.3 Moorbrände

Moorbrände entwickeln sich durch das Glühen unterirdische organische Schichten, wie zum Beispiel Kohle- oder Torfschichten. Der Torf wird durch die Bodenoberfläche eines vorangehenden Waldbrandes entzündet. Diese Schichten verbrennen fast vollständig bis auf den Mineralboden oder das Grundwasser. Moorbrände können oftmals tage- sogar wochenlang nachglimmen [Mißbach, 1982].

#### 2.1.3.4 Stammbrände

Bei einem Stammbrand entzünden sich trockene oder hohle Einzelbäume. In der Regel werden diese Brände durch Fahrlässigkeit des Menschen oder durch Blitzschlag verursacht, jedoch hat diese Form von Waldbrand kaum Bedeutung im Mitteleuropäischen Raum [Mißbach, 1982].

#### 2.1.4 Waldbrandereignisse

Die oben aufgezeigten Ursachen und Einflussfaktoren, die zur Auslösung eines Waldbrandes führen, zeigen deutlich, dass ein Waldbrand eine Naturgefahr darstellt, die sich schnell entwickelt und in kürzester Zeit einen erheblichen Schaden für Mensch und Natur anrichtet. Weltweit ereignen sich über 200 000 Waldbrände im Jahr und zerstören dabei 3.5 – 4.5 Millionen km² Landfläche [Shi und Kasperson, 2015].

Die folgende Abbildung 1 zeigt die weltweite Feueraktivität für den Monat März 2016 [Internetangabe: MODIS, 2016].

Die Aufnahme stammt vom Sensor MODIS (Moderate Resolution Image Spectroradiometer), der für das globale Feuermonitoring eingesetzt wird. Deutlich sind hier große Wald- und Buschbrände in Teilen Brasiliens, Kolumbiens, Mexikos, Afrikas und Chinas zu erkennen.

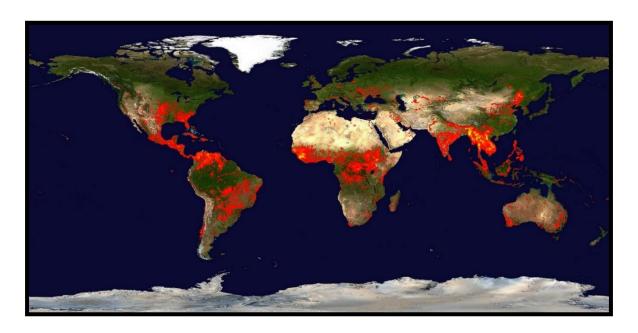


Abbildung 1: globale Feueraktivität, März 2016, Sensor MODIS

Im Mai 2016 berichteten die Medien über schwere Waldbrände in Kanada, die durch eine langanhaltende Trockenperiode ausgelöst wurden. 1000ende Menschen mussten zum Schutz vor der Feuergewalt evakuiert werden. Unzählige Hektar Waldfläche wurden durch das Feuer vernichtet. Eine Studie des Internationalen Instituts für angewandte Systemanalyse (IIASA) in Wien zeigt auf, dass die Schäden durch Waldbrände aufgrund höherer Temperaturen und langanhaltender Trockenperioden auch in Europa drastisch ansteigen werden. [Khabarov et al., 2014].

Bereits im August 1975 kam es in Deutschland aufgrund einer beständigen Hitzewelle zu einem Großwaldbrand, bei dem mehr als 8000 Hektar Wald- Moor- und Heidefläche zerstört wurden und einige Menschen ums Leben kamen [Lex, 1975]. Ein weiteres Beispiel stellt der Waldbrand im Kanton Wellis in der Schweiz dar. Im August 2003 brannten hier mehr als 300 Hektar Wald an einem Berghang nieder, wobei ein Teil des Waldes als Schutzwald diente. Mehrere angrenzende Gemeinden in diesem Gebiet mussten evakuiert werden [Gimmi et al. 2004].

Bei den aufgezeigten Beispielen hatten extreme klimatische- und witterungsbedingte Ursachen zu Waldbränden geführt.

Jedoch stellt der Einfluss des Menschen ebenfalls einen erheblichen Faktor für das Auslösen eines Waldbrandes dar. In Österreich, im Bundesland Kärnten entstanden im Zeitraum 1885 – 1925 von 260 registrierten Waldbränden, 203 Waldbrände durch den Menschen [Jahn, 1955]. 2014 brannten durch eine weggeworfene Zigarette viele Hektar Schutzwald in Österreich im Bundesland Tirol nieder [Internetangabe: Boku, 2016, Waldbrand-Statistik]. Weitere Waldbrandereignisse und Statistiken im Speziellen für Österreich sind u. a. auf dem Internetportal der Universität für Bodenkultur (Boku) des Instituts für Waldbau zu finden [Internetangabe: Boku, 2016, Waldbrandinformation].

#### 2.1.5 Waldbrandmonitoring mit Hilfe von Satellitenfernerkundung

Die in Abschnitt 2.1.4 aufgezeigten Waldbrandereignisse zeigen deutlich, wie wichtig es ist, waldbrandgefährdete Gebiete regelmäßig zu überwachen und eine schnelle Reaktionszeit zu fördern. Satellitenverfahren können bei der Überwachung von Waldbränden einen entscheidenden Beitrag leisten. Nicht nur die räumliche, zeitliche und spektrale Auflösung, sondern auch die Flächenabdeckung, die Verfügbarkeit und die Datenkosten spielen eine zentrale Rolle. Im Idealfall sollte eine operationelle satellitengestützte Detektierungsmethode entwickelt werden, die in nahezu Echtzeit die verantwortlichen Institutionen über ein Waldbrandereignis in einer bestimmten Region informiert und somit eine schnelle Reaktionszeit fördert. Die aktuell eingesetzten Satellitenverfahren genügen dieser Anforderung noch nicht. [Internetangabe: Potenzial von Fernerkundungsdaten, 2016] Im Folgenden sollen die gängigen Satellitensysteme die für das Waldbrandmonitoring eingesetzt werden, kurz beschrieben werden.

#### 2.1.5.1 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)

Im Jahr 1979 startet der Sensor AVHRR der NOAA-Satellitenserie ins All. Der Sensor war ursprünglich nicht für die Detektion von Bränden entwickelt worden, jedoch stellte sich heraus, dass sich der Sensor auf Grund seiner Bandkonstellation gut für das Feuermonitoring eignete.

Die räumliche Auflösung des Sensors liegt bei 1,1 km, die zeitliche Auflösung liegt bei einem Tag. Aktuell besitzt der Sensor 6 Bänder in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen. Für die Überwachung und Erfassung von Wärmestrahlung aktiver Feuern sind im Besonderen die beiden Kanäle 3 (Wellenlänge von 3,55  $\mu$ m – 3,93  $\mu$ m / mittleres Infrarot) und 4 (Wellenlänge von 10,3  $\mu$ m – 11,3  $\mu$ m / thermales Infrarot) geeignet. Diese Bänder liegen in einem Wellenlängenbereich, innerhalb des Maximums der Strahlungsemission von Feuer, sowie in einem Bereich geringer terrestrischer und solarer Strahlung. Mit Hilfe des Bandes 1, welches im sichtbaren Wellenlängenbereich (0,58  $\mu$ m – 0,68 $\mu$ m) arbeitet, können beispielsweise Dunstund Rauchentwicklungen von Bränden detektiert werden [Flannigan und Vonder Haar 1986; Sukhinin et al., 2004].

#### **2.1.5.2 MODIS (Moderate Resolution Image Spectroradiometer)**

Der Sensor MODIS von der NASA war der erste Sensor, der für das Monitoring von Waldbränden aufgrund seiner Bandkonstellation (36 Bänder) entwickelt wurde, und mit dem Satelliten TERRA (Start 1999) und AQUA (Start 2000), ins All startete.

Die Kanäle 21 und 22 (räumliche Auflösung von 1 km) werden für die Detektion aktiver Feuerherde eingesetzt. Die beiden Bänder detektieren Feuerquellen im mittleren Infrarotbereich (Wellenlängenbereich 3,929  $\mu$ m – 3,989  $\mu$ m). Das Band 31 (räumliche Auflösung von 1 km), welches im thermalen Infrarotbereich (10,8  $\mu$ m – 11,3  $\mu$ m) aufnimmt, wird ebenfalls zur Feuerdetektion angewendet. Mit dem Sensor können lodernde Brände als auch Schwelbrände mit einer Fläche von 1 km² überwacht werden. Die zeitliche Auflösung dieses Systems liegt bei 1 – 2 Tagen. Eine detaillierte Beschreibung des Sensors, sowie dessen Datenprodukte sind in Giglio et al. (2003) oder in Justice et al. (2002) zu finden.

#### 2.1.5.3 BIRD (Bi-spectral InfraRed Detection)

Der Kleinsatellit BIRD, der am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt wurde, war von 2001 bis 2006 im Einsatz und stellte das erste *Frühwarnsystem* für die Überwachung und Erkennung von Feueraktivitäten auf der Erdoberfläche dar. Mit Hilfe von BIRD sollen neue Sensor-Technologien getestet werden, um Waldbrände aus dem All schneller und leichter zu beobachten und zu erfassen.

Der Sensor besteht aus 2 Infrarotkanälen, mit denen Waldbrände über Wärmestrahlung beobachtet werden, sowie aus 3 optischen Bändern, die für die Bildbeschreibung und Raucherkennung wichtig sind.

Der Satellit konnte Brände bereits ab einer Größe von 4 m² erkennen, was bis diesem Zeitpunkt mit keinem anderen System möglich war. Diese Möglichkeit erreichten die Forscher am DLR, indem sie die beiden Infrarotkanäle miteinander verknüpften [Briess et al., 2002]. Die räumliche Auflösung dieses Systems liegt bei 185 m² x 185 m². Eine detaillierte Beschreibung über den Kleinsatelliten ist unter anderen in Zhukov et al., (2005) zu finden. Nach der erfolgreichen Testserie des Kleinstsatelliten BIRD startete 2012 sein Nachfolger TET-1 (Technologieerprobungsträger), um das *Frühwarnsystem* der Feuererkennung weiter zu verbessern.

#### 2.1.5.4 BIROS (Berlin InfraRed Optical System)

Ein weiterer Kleinsatellit namens BIROS soll im Jahr 2016 folgen, um gemeinsam mit TET-1 eine *FireBird-Mission* darzustellen und Hoch-Temperatur-Ereignisse mit Hilfe von Infrarotbändern, auf der Erdoberfläche zu detektieren. Die beiden Kleinsatelliten werden auf leicht versetzten Umlaufbahnen alle 90 Minuten die Erde umkreisen und somit optimale Feuerund Emissionsbeobachtungen liefern. BIROS wird mit einer räumlichen Auflösung im sichtbaren und mittleren Infrarotbereich von 50 m und im mittleren und thermalen Infrarotbereich von 350 m aufnehmen.

TET-1 umkreist den Äquator bei lokaler Ortszeit um 11:30 UTC und BIROS wird zukünftig um 13:30 UTC folgen. Dies sind optimal gewählte Zeitpunkte, da die Feuerintensität um diese Zeit tendenziell am höchsten ist. Die beiden amerikanischen Satelliten TERRA und AQUA des Sensor MODIS überfliegen ebenfalls, mit einer Stunde Zeitversatz zu TET-1 und BIROS, den Äquator. So soll in Zukunft eine optimale Feuerüberwachung der amerikanischen und deutschen Satellitensysteme ermöglicht werden. BIROS soll die aufgenommenen Feuerparameter, *Temperatur, Energie, Fläche* und *Position* an mobile Endgeräte der Einsatzkräfte weiterleiten, um eine schnelle Reaktion zur Feuerbekämpfung zu ermöglichen. [Internetangabe: DLR, 2016; Rücker, 2011]

Nicht nur Satellitenverfahren, sondern auch flugzeug- und bodengestützte Verfahren werden unterstützend bei der Waldbrandfrüherkennung und –überwachung eingesetzt. Mit Hilfe von Kleinflugzeugen, Helikoptern, Feuerwachtürmen, oder dem rechnergestützten Frühwarnsystem *Fire-Watch* soll eine räumliche und zeitliche Entwicklung eines Waldbrandes schneller und effizienter erkannt und beobachtet werden. In Frankreich und in der USA wird u. a. ein spezielles Simulationsprogramm Names *Firetec* für das Waldbrandmonitoring entwickelt [Patzelt, 2008].

#### 2.1.6 Forschungsprojekte zur Thematik Waldbrand

Im Folgenden sollen Forschungsprojekte verschiedener Institutionen vorgestellt werden, die sich im speziellen mit der Thematik Waldbrand auseinandersetzen.

#### 2.1.6.1 Globale Waldbrandforschung

Mittels Literaturrecherche zum Thema globale Waldbrandforschung wurden die Onlineportale: Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), Worldview (Modis Rapid Response System) und Fire Information for Ressource Management System (FIRMS) ermittelt. Die Portale stellen Feuerinformationen in Form von Kartenmaterial, Satellitenbilddaten oder Web-Applikationen verschiedener Satellitensensoren zur Verfügung, bieten aber auch Informationen zur Thematik Waldbrandforschung an. Eine genauere Beschreibung, der einzelnen Internetportale, sowie weitere Informationen zur globalen Waldbrandforschung sind unter den folgenden Internetangaben zu finden: Modis Rapid Response System (2016), FIRMS (2016), LP DAAC (2016), USFS (2016), Remote Sensing Applications Center (2016), National Interagency Fire Center (2016) oder University of Maryland, Department of Geography (2016).

#### 2.1.6.2 Das europäische Waldbrandinformationssystem (EFFIS)

Auf EU-Ebene wurde das *europäische Waldbrandinformationssystem (EFFIS)* für die Waldbrandvorhersage und -bekämpfung ins Leben gerufen. Es handelt sich hierbei um ein Gemeinschaftsprojekt des Joint Research Centers (JRC) und dem Directorate General of Environment (DG ENV) der Europäischen Kommission.

Das System besteht aus einer webbasierenden Anwendung, mit deren Hilfe Informationen über die Waldbrandgefahr in Europa und angrenzenden Nachbarländern eingeholt werden können. Ein Team aus Wissenschaftlern setzt sich mit dem Thema Waldbrandforschung intensiv auseinander. [Barbosa et al. 2009]. Detaillierte Informationen über das europäische Informationssystem sind zum Beispiel unter der Internetangabe: EFFIS (2016) zu finden.

Ein weiteres EU-Projekt, das bereits abgeschlossen ist, aber der Vollständigkeit halber genannt werden soll, stellt das *Alpine Forest Fire Warning System* (ALP FFIRS) dar. Ziel dieses Projektes war es, eine schnellere und präzisere Vorhersage von Waldbränden zu ermöglichen, tagesaktuelle Prognosen und Analysen des Waldbrandrisikos zu erstellen und somit ein alpenweites Warnsystem zu implementieren. Eine detaillierte Beschreibung zu diesem Projekt ist unter der Internetangabe: ALP FFIRS (2016) zu finden.

Eine alpenweite Waldbrandüberwachung wird durch die europaweite Zusammenarbeit über das Projekt *Euro-Alpine Netzwerk* am Global Fire Monitoring Center (GFMC) in Freiburg, sichergestellt. Weitere Details zu diesem Projekt sind unter der Internetangabe: International Strategy for Disaster Reduction (2016), zu finden.

#### 2.1.6.3 Die Schweizer Waldbranddatenbank Swissfire

Die Schweizer Waldbranddatenbank *Swissfire*, wurde im Jahr 2008 in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landwirtschaft (WSL) der Schweiz, dem Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) und den Forstdiensten der einzelnen Kantone des Landes entwickelt. Das Ziel dieser Datenbank ist die systematische, lückenlose und zentrale Erfassung von Waldbranddaten mit Hilfe eines standardisierten Protokolls [Pezzatti et al. 2010]. Die Datenbank soll für die ansässigen Forstdienste und Feuerwehren eine unterstützende Funktion bei der Waldbrandprävention und Brandbekämpfung darstellen. Die Daten dieser Webapplikation sind jedoch nur für kantonale und eidgenössische Verantwortlich zugänglich. Detaillierte Informationen über dieses Forschungsprojekt sind in Pezzatti et al. (2005) oder über die Internetangabe: Swissfire database Switzerland (2016) zu finden.

Ein weiteres Frühwarnsystem, das ebenfalls in der Schweiz zum Einsatz kommt, ist das System Fireless 2. Hierbei wird der Feuchtigkeitsanteil in der Streu- und Humusschicht gemessen und somit das Waldbrandrisiko erfasst. Weitere Details zu diesem neuartigen Frühwarnsystem sind unter der Internetangabe: WSL, Fireless 2 Switzerland (2016) zu finden.

#### 2.1.6.4 Die Österreichische Forschungsinitiative Waldbrand (AFFRI)

Im Rahmen der Österreichischen Forschungsinitiative Waldbrand (Austrian Forest Fire Research Initiative, AFFRI) wurde an der BOKU, in Kooperation mit verschiedenen Instituten und der ZAMG, von 2008 – 2012, die Verteilung, Häufigkeit und die Gefahr von Waldbränden näher untersucht und der Einfluss unterschiedlicher Faktoren modelhaft beschrieben [Internetangabe: BOKU AFFRI 2016]. Es wurden Hotspot-Waldbrandgebiete in Österreich in den Bundesländern Kärnten, Tirol und Niederösterreich aufgrund der Faktoren Vegetation, Klima und Lage untersucht und modelliert. Die Ergebnisse der Studien werden in Vacik (2013) näher dargestellt. Das Forschungsprojekt wird aktuell weiter, unter der aktuellen Bezeichnung AFFRI 2, ausgeführt [BOKU AFFRI 2016].

#### 2.1.6.5 Die Österreichische Waldbrand-Datenbank

Eine umfangreiche Dokumentation von Brandereignisse der letzten Jahrzehnte in Österreich ist in der Waldbrand-Datenbank Österreich zu finden. Mit Hilfe der Projekte *AFFRI*, *ALP FFIRS* und *FIRIA* (Fire Risk Austria / auslaufendes Projekt, Untersuchung des Zusammenhangs historischer Waldbrände, Vegetation, Waldbrandindizes / Internetangabe: FIRIA 2016) wurde eine interne, serverbasierende Datenbank, und ein webbasierendes Geoinformationssystem mit dem Namen *Fire-Database*, entwickelt. Die Datenbank ist nur für einen eingeschränkten Nutzerkreis zugänglich. Die Web-Applikation ist für jeden Nutzerkreis frei zugänglich und ermöglicht die Abfrage von Brandereignisse in unterschiedlichen Regionen in Österreich. [Vacik et al. 2013] Detaillierte Informationen zu diesem Projekt ist unter der Internetangabe Waldbrand-Datenbank Österreich (2016) zu finden.

#### 2.1.7 Meteorologische Verfahren zur Entwicklung von Waldbrandgefahrenstufen

Der Begriff der Waldbrandprognose ist in der Literatur nicht klar abgegrenzt. Patzelt (2008) definiert den Begriff als: "die formelmäßige Bewertung von Witterungsfaktoren bezüglich ihrer Fähigkeit, eine bevorstehende Waldbrandgefahr erkennen zu helfen" [Patzelt, 2008, S. 113]. Weitere Bezeichnungen des Begriffs der Waldbrandprognose sind zum Beispiel in Lange (2004) zu finden.

Zur Beurteilung der Waldbrandgefahr stehen meteorologische Verfahren zur Verfügung, die die Gefährdung in Form von Waldbrandgefahrenstufen einordnen. Diese Methoden, die auf internationaler Ebene zum Einsatz kommen, werden in zentrale und dezentrale Verfahren unterschieden. Zentrale Anwendungen bewerten das Waldbrandrisiko nach objektiv normierten Kriterien. Hierbei werden Verfahren, wie die Methode nach Baumgartner, Nestrov, oder Angstroem, angesehen. Unter den dezentralen Anwendungen versteht man Verfahren, die durch subjektive Bewertungen von Forstmitarbeitern eingeschätzt und nur in dünn besiedelten Gebieten zum Einsatz kommen. Ein dezentrales Verfahren stellt u. a. der kanadische Fire Weather Index, dar [Patzelt, 2008].

#### 2.1.7.1 Die Entwicklung der Waldbrandprognose

Das erste Verfahren zur Einteilung von Waldbrandgefahrenstufen wurde nach einer Studie von Geiger im Jahr 1948 entwickelt. Grundlage dieser Studie waren 300 Großwaldbrände mit einer Fläche von mehr als 100 ha. Brandfläche. An Tagen mit einer hohen Brandgefahr nimmt Geiger meteorologische Parameter, wie die relative Luftfeuchtigkeit, die Temperatur, den Luftdruck, die Windverhältnisse und die Menge des Niederschlags, als Berechnungsgrundlage. Das Ergebnis war das erste 4-stufige Waldbrandwarnsystem nach Geiger [Patzelt, 2008]:

- $Warnstufe\ I = Waldbrandgefahr$
- *Warnstufe II = erhöhte Waldbrandgefahr*
- Warnstufe III = stark erhöhte Waldbrandgefahr
- Warnstufe IV = höchste Waldbrandgefahr

Dieses Warnsystem wurde überarbeitet, da es nicht die gewünschten Ergebnisse lieferte [Patzelt, 2008].

#### 2.1.7.2 Gefahrenklassen nach Baumgartner, Klemmer, Raschke und Waldmann

Im Jahr 1967 entwickelten Baumgartner, Klemmer, Raschke und Waldmann, basierend auf dem Geiger-Index, ein 5-stufiges Waldbrandgefahrensystem, welches auf der Differenz von Niederschlag und Verdunstung basierte. In dieser Studie wurden 1706 Waldbrände in Bayern untersucht, mit einer gesamten Waldbrandfläche von 23220 ha. Außerdem wurde neben der regionalen, jahres- und tageszeitlichen Verteilung, der Häufigkeit und das Ausmaß von Waldbränden, erstmals die meteorologische Einwirkung für jedes Brandereignis genauer untersucht. Somit ergab sich eine 5-stufiges System mit der folgenden Einteilung [Patzelt, 2008]:

- $Gefahrenstufe\ 1 = schwach$
- *Gefahrenstufe* 2 = *leicht*
- Gefahrenstufe  $3 = m\ddot{a}\beta ig$ ,
- $Gefahrenstufe\ 4 = stark$
- Gefahrenstufe 5 = außergewöhnlich hoch

Eine genauere Beschreibung des Baumgartner-Index, ist beispielsweise in Lex (1996) oder in Mißbach (1982) zu finden.

#### 2.1.7.3 Verfahren nach Nesterov

Das Modell von Nesterov wurde auf dem Gebiet der ehemaligen Sowjetunion (UdSSR) und der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) angewandt. Bei diesem Verfahren werden die relative Luftfeuchtigkeit und die Niederschlagsmenge um 13:00 UTC gemessen. Die Niederschlagsmenge unterliegt einem Schwellwert von 3 mm pro Tag, der nicht überschritten werden darf. Alle Tage, die einen geringeren Wert als 3 mm aufweisen, werden aufsummiert. Wird der Schwellwert überschritten, beginnt die Berechnung wieder mit 0. Das 5-stufige Warnsystem wurde mit Hilfe der untersuchten Zeiträume mit einer geringeren Niederschlagsmenge von 3 mm und den festgelegten Grenzwerten in 5. Klassen eingeteilt, wobei die *Stufe 1: keine Gefahr* und die *Stufe 5: außerordentliche Gefahr* darstellt [Patzelt, 2008]. Eine detaillierte Beschreibung zu dem Verfahren nach Nesterov, sind z. B. in Lange (1994) oder in Mißbach (1982) zu finden.

#### 2.1.7.4 Waldbrandkennziffern nach Käse

Käse überarbeitete das Verfahren nach Nesterov, in dem er sogenannte Waldbrandkennziffern (WBKZ) einführte. Deren Einflussfaktoren waren die Temperatur und das Sättigungsdefizit um 13:00 UTC. Außerdem wurde ein Korrekturfaktor für das Frühjahr, den Spätsommer und den Herbst definiert, der den Vegetationstand berücksichtigen sollte. Eine Addition der WBKZ erfolgt täglich im Zeitraum 15. Februar – 30. September. Dieser Zeitraum gilt als der am stärkst gefährdete Zeitraum, in dem sich ein Waldbrand entwickeln kann. Das neue erarbeitete Verfahren ist ein 4-stufiges System, mit folgenden Warnstufen, wobei die WBKZ nach der folgenden Formel berechnet werden [Patzelt, 2008]:

$$WBKZ = \sum_{15.2}^{30.9} (t_{13} + 10) * \Delta e_{13}$$
 (2.1)

mit  $t_{13} = Temperatur des trockenen Thermometers um 13:00 UTC [°]$  $\Delta e_{13} = S\"attiguns de fizit um 13:00 UTC [%]$ 

- Keine Warnstufe: Die WBKZ liegt unter 500, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Waldbrandes liegt bei unter 3 %
- Warnstufe 1: Die WBKZ liegt zwischen 501 und 2000, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Waldbrandes liegt bei unter 20 %
- Warnstufe 2: Die WBKZ liegt zwischen 2001 und 4000, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Waldbrandes liegt zwischen 20 % bis 39 %
- Warnstufe 3: Die WBKZ liegt zwischen 4001 und 7000, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Waldbrandes liegt zwischen 40 % und 59 %
- Warnstufe 4: Die WBKZ liegt über 7000, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Waldbrandes liegt bei mindestens 60 %

#### 2.1.7.5 Verfahren nach Angstroem

Das Verfahren nach Angstroem wurde im Speziellen in Schweden angewandt. Bei diesem Modell wird die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit um 13:00 UTC gemessen und über ein vereinfachtes Verfahren berechnet, bei dem das Ergebnis das Waldbrandrisiko für den Folgetag anzeigt. Die Ergebnisse dieses Verfahren neigten dazu, höhere Gefahrenklassen zu berechnen, als eigentlich nötig wären, da hier die Niederschlagsmenge nicht berücksichtigt wird [Patzelt, 2008].

#### 2.1.7.6 Der kanadische Forest Fire Weather Index (FWI)

Ein dezentrales Warnsystem stellt der kanadische Forest Fire Weather Index dar, dessen Gefahrenstufen durch die meteorologischen Faktoren Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Niederschlag, der letzten 24 Stunden berechnet werden. Der FWI wird in verschiedene Indizes eingeteilt, die in Patzelt (2008) ins Deutsche übersetzt wurden:

- Streufeuchteindex
- Verrote-Feuchte Index
- Tiefen-Feuchte Index
- *Initialer Ausbreitungsindex*
- Brennstoff-Index
- Fire-Weather Index

Der Streufeuchte-Index wird als Beispiel, wie folgt beschrieben [Patzelt, 2008]:

Streufeuchte-Index: Zeigt den Feuchtgehalt von Streu und anderem Feinmaterial in Waldgebieten mit einem Trockengehalt von 0.05 lb/fb², auf [Patzelt, 2008].

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Indizes des FWI ist in Patzelt (2008) beschrieben.

#### 2.1.7.7 U.S. National Fire Danger Rating System

Eines in der USA gebräuchliches Waldbrandprognoseverfahren stellt das U.S. National Fire Danger Rating System dar. Es wird ein vereinfachter FWI, der auf Basis des Feuchtgehalts und der Windgeschwindigkeit besteht, in Form einer Funktion berechnet.

Die Gefahrenstufen des FWI beschreiben nicht nur die einzelnen Waldbrandklassen, sondern auch die Bedeutung eines Brandes. Somit erhalten die Einsatzkräfte wichtige Hinweise für die Bekämpfung eines Waldbrandes [Patzelt, 2008].

#### 2.1.7.8 Der Waldbrandgefahrenindex M-68

Der Waldbrandgefahrenindex M-68 berücksichtigt bei der Berechnung die Kenngrößen: relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur um die Mittagszeit, Niederschlagssumme der letzten 24 Stunden, Windgeschwindigkeit, Schneehöhe im Frühjahr, und Bodenfeuchte. Das Verfahren ist nicht mit dem vor Ort festgelegten Waldbrandstufen von Behörden und Institutionen, identisch. Jedoch hat sich dieses Verfahren als M-68 Modell nach Käser etabliert und wird aufgrund seiner Zuverlässigkeit seit Mitte der 1990 vom Deutschen Wetterdienst (DWD) als Standardverfahren zur Vorhersage und Bestimmung von waldbrandgefährdeten Gebieten als Waldbrandgefahrindex M-68 genutzt [Stock et al. 2012].

#### 2.1.7.9 Waldbrandverfahren des Deutschen Wetterdienstes (DWD)

Aktuell verwendet der DWD ein Modell, das sich am kanadischen FWI, dem deutschen Baumgartner- und dem M-68 Prognoseverfahren anlehnt. Hier werden für die Berechnung ebenfalls meteorologische Einflussfaktoren, wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Niederschlags- und Schneemenge, und die kurz- und langwellige Strahlung der Atmosphäre herangezogen. Die Struktur des Modells basiert auf einer Funktion der Byram´s Gleichung der Feuerintensität.

Die Berechnung des Waldbrandgefahrenindex erfolgt auf der Angabe von stündlichen Werten. Eine detaillierte Beschreibung des vom DWD verwendeten Berechnungsmodell ist in der vom DWD im Jahr 2016 veröffentlichen Dokumentation zu finden [Internetangabe: DWD-Dokumentation 2016]. Die Einteilung des Gefahrenindex erfolgt in 5 Stufen, von *Stufe 1 mit einer sehr geringen Gefahr*, bis zur *Stufe 5 mit einer sehr hohen Gefahr*.

Die oben beschriebenen meteorologischen Modelle sind in der Waldbrandforschung etablierte Modelle und kommen aktuell noch zur Anwendung. Weitere Forschungsprojekte und meteorologische Waldbrandprognosemodelle für verschiedenste Länder sind beispielsweise unter der folgenden Internetangabe zu finden: GFMC Wildland Fire Early Warning (2016).

In der Schweiz wird aktuell eine statistische Methode mit der Bezeichnung *FireNiche* getestet. Hierbei werden verschiedene Indizes miteinander verknüpft. Eine genauere Beschreibung ist unter der Internetangabe: WSL FireNice (2016) zu finden

Patzelt (2008) zeigt eine Studie von Langholz und Schmidtmayer (1993) auf, in der die Verfahren nach Angstroem, Baumgartner und Nesterov miteinander verglichen werden. Patzelt (2008) zeigt außerdem eine eigenständig erstellte Vergleichsstudie verschiedener Waldbrandgefahrenmodelle in seiner Dissertation auf.

#### 2.1.8 Waldbrandgefährdungskarten

Werden Waldbrandwarnstufen für ein Waldgebiet ausgegeben, werden diese Warnstufen mit meteorologischen Modelle berechnet und anschließend visualisiert. Diese Darstellung wird auch als Waldbrandgefährdungskarte bezeichnet. Im Folgenden soll nun die kartographische Informationsvermittlung und Darstellung, sowie die intuitive Lesbarkeit derartiger Karten beleuchtet werden. Für die genauere Betrachtungsweise wurde die Waldbrandgefahrenkarte des DWD gewählt.

Um die Waldbrandgefahr in einem Waldgebiet bestmöglich darstellen zu können, muss eine Möglichkeit gefunden werden, die einzelnen Indizes optimal zu definieren.

Nach der Berechnung und Klassifizierung der Waldbrandgefahrenindizes (WBI) wird jeder Klasse eine bestimmte Farbgebung zugewiesen um ein besseres Verständnis und eine intuitive Lesbarkeit des Nutzers zu ermöglichen.

Die Auswahl der Farben spielt bei der Visualisierung generell und bei der Visualisierung von Waldbrandereignissen im Speziellen eine große Rolle. Die Wichtigkeit der Farbwahl ist in der Kartographie allgemein anerkannt, vergleiche auch: "Die Verwendung von Farben steigert die Lesbarkeit einer Karte gegenüber Schwarz-Weiß-Darstellungen erheblich" [Kohlstock, 2004, S. 81]. Die menschliche Empfindung für Farben liegt unter anderem psychologisch bedingt. Menschen weltweit assoziieren für gewisse Objekte dieselbe Farbgebung. Bekannte Beispiele sind hier die Farbe Grün für Natur und Wachstum oder die Farbe Rot für Liebe aber auch Kampf und Aggression.

Aber auch erfahrungsspezifische Empfindungen beeinflussen die menschliche Farbgebung. So assoziierte der Mensch unterbewusst die Farbe Gelb für die Sonne oder die Farbe Blau für Gewässer.

Aus diesem Ansatzpunkt heraus, wurde für die Waldbrandgefährdungskarte des DWD eine Farbgebung in Form eines Ampelsystems für die verschiedenen Waldbrandgefahrenklassen gewählt:

- sehr geringer Gefährdung (Stufe 1) Grün
- geringer Gefahr (Stufe 2) Gelb
- mittlerer Gefährdung (Stufe 3) Orange
- hoher Gefahr (Stufe 4) Rot
- sehr höher Gefährdung (Stufe 5) Lila.



Die dargestellte Abbildung visualisiert eine Waldbrandgefährdungskarte des DWD vom 13. August 2015. Der WBI wurde mit Hilfe der oben beschriebenen Farbcodiert dargestellt.

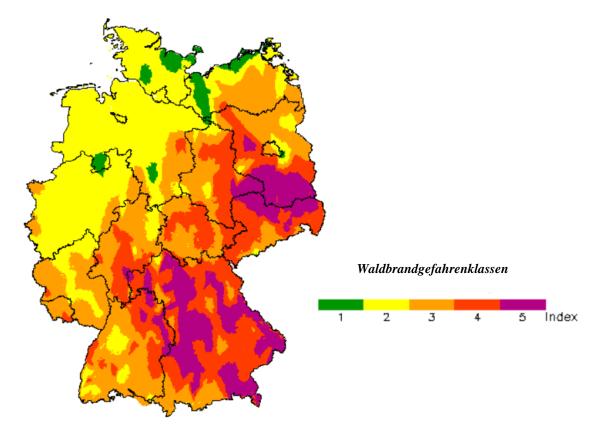


Abbildung 2: Waldbrandgefährdungskarte (DWD-WBI, 13. August 2016)

Die vom DWD erstellten Waldbrandkarten können für den jeweiligen aktuellen Tag, sowie für 5 Folgetage unter der Internetangabe: DWD-Waldbrandkarte, abgerufen werden.

Von der ZAMG in Österreich werden nach einem ähnlichen Prinzip ebenfalls Waldbrandgefährdungskarten für den Nutzer online unter der Internetangabe: ZAMG, Waldbrandkarte (2016) zur Verfügung gestellt.

In der Schweiz kann über das Internetportal des Bundesamtes für Umwelt aktuelle Waldbrandgefährdungskarten abgerufen werden [Internetangabe: BAFU, Waldbrandkarte, 2016]

# 3. Airborne Laserscanning

#### 3.1 Einleitung

Das luftgestützte Laserscanning (engl. Airborne Laserscanning, ALS) hat sich in den letzten 20 Jahren als effiziente Methode zur Erfassung und Kartierung der Erdoberfläche, entwickelt [Reitberger et al., 2009]. Durch die Bereitstellung hochauflösender, präziser, dreidimensionaler Informationen wurde ein hohes Anwendungsspektrum erreicht [Buddenbaum, 2010]. Das Laserscanning wird in der Literatur auch unter den Bezeichnungen Laser Radar, Lidar (Light detection and ranging) oder Ladar (Laser detection and ranging) aufgeführt [Kraus, 2004]. Die Abbildung 3 soll das Prinzip des luftgestützten Laserscanning verdeutlichen.

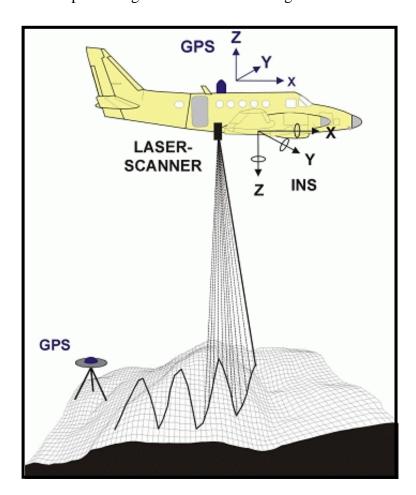


Abbildung 3: Prinzip des luftgestützten Laserscanning (Wien Stadtentwicklung, 2016)

Bei Laserscanning kann zwischen unterschiedlichen Systemen differenziert werden. Eine Einteilung erfolgt u. a. nach dem Durchmesser, des auftreffenden Laserstrahls am Boden. Ist der ankommende "Fussabdruckdurchmesser" unter einem Meter, spricht man von einem Small-Footprint-System, ist der Durchmesser über einem Meter wird das System als ein Large-

Footprint-System bezeichnet [Buddenbaum, 2010]. Wird die Entfernung zum gemessenen Objekt über den Vergleich der ausgesandten und der empfangenen Strahlungsintensität gemessen, spricht man von einem "Continuous-Wave-Scanner". Bei einem Pulsed-Laser erfolgt die Messung über die Zeitdifferenz des Lichtimpulses von der Scanneinheit zum Zielobjekt und wieder zurück [Wagner et al., 2003]. Eine weitere Einteilung kann nach der Art der Verspeicherung des aufgenommenen Signals erfolgen. Wird das Signal in mehreren Echos zerlegt, spricht man von einem diskreten System. Full-Wave-Scanner sind in der Lage die ersten und letzten Echos, sowie dazwischenliegende Reflexionen (Intermediate Pulse) zu registrieren [Wagner et al., 2006].

Im Bereich der Fernerkundung stellt das ALS ein optisches aktives System dar, welches einen Lichtstrahl erzeugt, der auf der Erdoberfläche gestreut wird [Wagner et al., 2003]. Während der Fortbewegung des Flugzeuges oder des Hubschraubers werden die ausgesandten Laserimpulse quer zum Flugpfad abgestrahlt, so dass ganze Flächen aufgenommen werden können [NÆsset und Gobakken, 2008]. Der vom System ausgesandte Laserstrahl wird von der Zieloberfläche reflektiert und vom Empfänger des Laserscanners aufgezeichnet. Für die Messung der Entfernung zum Objekt besteht die Methoden der Laufzeitmessung oder die Methode der Messung aus der Phasenverschiebung. Die Methode der Laufzeitmessung hat sich beim praktischen Einsatz von ALS-Systemen bewährt. Hierbei erfolgt die Entfernungsmessung aus der Laufzeit zwischen dem ausgesandten und dem reflektierten Laserimpuls.

Neben der Laufzeit wird der Ablenkwinkel des Laserstrahls senkrecht zur Flugrichtung des Flugzeuges registriert. Für die Umwandlung dieser Polarkoordinaten sind zusätzlich die Position und die Lage des Scanners nötig. Laserscanning-Systeme sind mit einem Positionierung- und Orientierungssystem (POS) ausgestattet, welches Genauigkeiten im cm-Bereich erzielt. Das POS besteht aus 2 Komponenten, dem differentiellen Global Positioning System (GNSS) und dem Intertial Measurement Unit (IMU, Intertial Navigationssystem, INS). Das GNSS besteht aus einer Basisstation, einem an der Bodenstation installierten GPS-Empfänger und einem GPS-Empfänger an Bord des Laserscanning-Systems. Mit Hilfe der beiden GPS-Empfänger werden Fehler und Ungenauigkeiten im GPS-Signal ausgeglichen. Mit dieser Methode ist die genaue Position des ALS-Systems mit einer hohen Genauigkeit bekannt. Aktuell nehmen moderne Laserscanner mit einer Pulsrate von 10.000 bis 400.000 Punkte/s auf. Mit Hilfe der IMU wird die Lage des Laserscanners im Raum gemessen. In der Fernerkundung wird Normalerweise die räumliche Auflösung als Pixelgröße (ground sampling distance)

definiert. Beim Laserscanning wird die Anzahl der Punkte pro Flächeneinheit als räumliche Auflösung deklariert [Buddenbaum, 2010].

Der Laserscanner registriert unterschiedliche reflektierte Impulse. Der "First Puls" beschreibt den ersten reflektierten Impuls am jeweiligen Objekt, wie beispielsweise an Vegetationsoberflächen oder Gebäuden. Der "Last Puls" stellt die zuletzt vom Laser aufgenommene Reflexion dar. Wird nur ein einzelnes Echo registriert, spricht man auch von einem Only Puls [Buddenbaum, 2010].

Die Abbildung 4 soll die Interaktion des Laserstrahls auf der Erdoberfläche verdeutlichen.

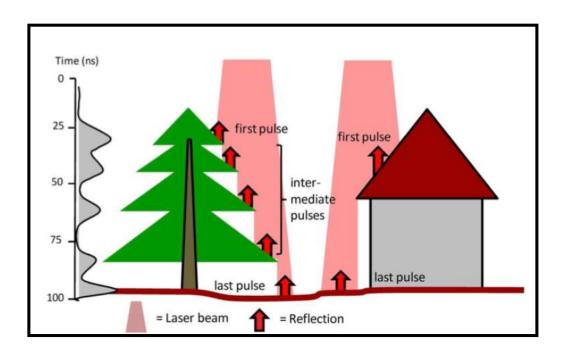


Abbildung 4: Interaktion des Laserstrahls auf der Erdoberfläche, Heinzel (2011)

Neben den Reflexionen der einzelnen Objekte wird auch die Intensität für jedes Echo aufgenommen. Nach Wagner et al. (2008) und Donoghue et al. (2007) ist die Intensität eine Funktion, die folgenden Einflussfaktoren beinhaltet, wie z. B. die Intensität des ausgesandten Signals, die Ausrichtung der reflektierten Oberfläche, die Entfernung zwischen Objekt und Sensor oder den Reflexionsgrad des reflektierten Objektes in der Wellenlänger des Laserlichts.

# 3.2. Historie von Airborne Laserscanning

Im Bereich der Fernerkundung begann der Einsatz von Laser (light amplification by simulated emission of radiation) bereits vor 50 Jahren. Theodor Maiman entwickelte im Jahr 1960 den ersten erfolgreichen Laser, der sowohl im optischen, als auch im infraroten Wellenlängenbereich zum Einsatz kam [Flood, 2001].

In den späten 70igern begann die Bestimmung der Topographie der Erdoberfläche mit Hilfe des Fernerkundungssystems Lidar (light detection and ranging). Das Initialsystem war ein Laser-System, welches Höhendaten entlang einer einzelnen Spur, bezogen auf die Fluglinie des Flugzeuges aufnahm [Lillesand et al., 2004].

Lidar wird u. a. in den Bereichen der Forstwissenschaften, Gelände- und Gebäudemodellierung, Landbedeckungsklassifizierung, Kartierung Überlandleitungen, Batymetrie, von Eisveränderungskartierungen, atmosphärische und meteorologische Anwendungen etc. verwendet [Buddenbaum, 2010]. Detaillierte Beschreibungen **Z**11 verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten des Systems Lidar sind unter anderem in Hill et al. (2000) oder Kim et al. (2003), zu finden.

#### 3.2.1 Laser-Profiler

Bereits im Jahr 1980 fanden erste forstwissenschaftliche Untersuchungen mit Hilfe flugzeuggestützter Laseraltimetern statt [Buddenbaum 2010]. Arp et al. (1982) untersuchte mit Hilfe eines Laser-Profiler tropische Waldgebiete in Venezuela, Nelson et al. (1984) gelang es, mit Hilfe eines Laser-Profiler strukturelle Forstparameter wie die Baumhöhen, die Biomasse und das Holzvolumen abzuleiten. Aktuell kommen Laser-Profiler kaum noch zum Einsatz, da diese fast vollständig von Laserscannern abgelöst wurden [Buddenbaum 2010].

#### 3.2.2 Luftgestütztes Laserscanning

Der Stand der Technik schritt immer schneller voran. Ab Mitte der 1990 Jahre kamen neue Anwendungen, wie das GPS für die Positionierung und das INS zu Bestimmung der Fluglage, zum Einsatz. Mit diesem technischen Fortschritt konnten nun Laserscanner, die eine flächenhafte Abtastung ermöglichten, eingesetzt werden [Buddenbaum, 2010]. Kilian et al.

(1996) nutzen diese neuartige Technik, um eine flächenhafte Aufnahme von Höhendaten zu ermöglichen. NÆsset (1997a, b) schätzte mit diesem neuartigen Verfahren die Baumhöhen und das Holzvolumen einzelner Bestände.

Nicht nur neue technische Anwendungsmöglichkeiten kamen zum Einsatz, auch die Pulsrate der Systeme steigerte sich kontinuierlich. So wurde anfangs mit einer Rate von 2000 bis 4000 Puls/s aufgenommen. Neue Systeme ermöglichen bereits eine Aufnahme mit einer Pulsrate von bis zu 400 kHz. Die Systeme entwickelten sich von einem *Single-Puls-System*, zu einem *Dual-Puls-System* über ein *Multiple-Puls-System* bis hin zur *Wellenformaufzeichnung* [Buddenbaum, 2010].

#### 3.2.3 Satellitengestütztes Lidar

Ein weltraumgestützter Lasersprofiler ist GLAS (Geoscience Laser Altimeter System), der auf dem Satelliten ICESat (Ice Cloud and Land Elevation Satellite) für die Messung der Eisdicke, sowie für forstwissenschaftliche Anwendungen, entwickelt wurde. Die Daten werden in zwei – drei Messkampagnen im Jahr aufgenommen, da der Laser eine begrenzte Lebensdauer vorweist [Buddenbaum, 2010]. Eine detaillierte Beschreibung zu GALS und zu weiteren System wie zum Beispiel SLICER (Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery), VCL (Vegetation Canopy Lidar) ist zum Beispiel in Abshire et al. (2005) oder in Zwally et al. (2002), zu finden.

#### 3.2.4 Terrestrisches Laserscanning

Bei diesem Verfahren wird der Laserscanner an einem festen Ort montiert. Der Scanner tastet die Umgebung mit Hilfe von Ablenkmechanismen ab, die in zwei verschiedene Richtungen bewegt werden. Bei dieser Anwendung wird eine hohe Punktdichte, jedoch eine geringe Reichweite erzielt [Buddenbaum, 2010].

Das terrestrische Laserscanning wird für unterschiedlichste Vermessungsaufgaben, wie der Vermessung von Gebäuden oder Denkmälern, eingesetzt. Dieses Verfahren wird heutzutage auch immer mehr für forstwirtschaftliche Anwendungen genutzt. Mit Hilfe eines terrestrischen Laserscanners kann zum Beispiel die detaillierte Struktur von Baumgruppen oder einzelner Bäume genau erfasst werden [Buddenbaum, 2010]. Tansey et al. (2009) ermittelten u. a. mit

Hilfe eines terrestrischen Systems den Brusthöhendurchmesser und die Stammzahl pro Hektar, jedoch nur für kleine Gebiete. Weitere forstwissenschaftliche Anwendungen, die mit Hilfe von terrestrischen Laserscannern untersucht wurden, sind zum Beispiel in Danson et al. (2006) oder in Van der Zande et al. (2009), zu finden.

### 3.3 Physikalische Grundlagen des Airborne Laserscanning

Ein Laser beruht auf dem physikalischen Prinzip einer Lichtverstärkung durch stimulierende Emission von Strahlung. Im Bereich der Fernerkundung stellt ein Laser ein aktives System dar, welches einen Lichtstrahl erzeugt, der an der Erdoberfläche gestreut wird. Das ausgesandte Laserlicht ist annährend monochromatisch, stark gebündelt und kohärent und weißt eine hohe Intensität auf. Diese Eigenschaften sind für ein Laserscanning-System von großer Bedeutung. Durch das stark gebündelte Licht können kleine Öffnungswinkel von ungefähr 0.2-2 mrad verwendet werden, was bei einer Flughöhe von 1000 m einen Durchmesser des Laserstrahls auf der Erdoberfläche von 0.2-2 m erzeugt. Die monochromatische Eigenschaft des Laserlichts wird dazu genutzt, um mit Hilfe von sogenannten Interferenzfiltern, die Effekte der Sonnenstrahlung, die auch als Hintergrundstrahlung bezeichnet wird, zu verhindern. Mit Hilfe der zeitlichen Kohärenz kann Information über die Entfernung zu einem aufgenommenen Objekt, sowie die Geschwindigkeit des Systems gewonnen werden [Wagner et al., 2003].

#### 3.3.1 Systemkomponenten

Ein Laserscanner besteht, aus 3 Systemkomponenten, dem Sender, dem Empfänger und der Streuungs- und Messeinheit.

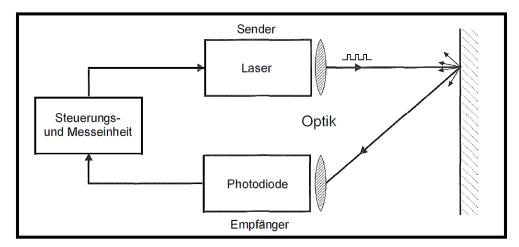


Abbildung 5: Vereinfachtes Blockdiagramm eines Laserscanners, Wagner et al. (2003)

Der Laser, der auch als Sender fungiert, sendet ein Lichtsignal aus, welches zurück zur Photodiode, dem Empfänger gelangt. Der erzeugte Laserstrahl wird durch die Ablenkungseinheit, die sich am Sender befindet, quer zur Flugrichtung abgelenkt. Aus diesem Prozess heraus, wird ein Geländestreifen entlang des Flugwegs abgetastet [Wagner et al., 2003].

#### 3.3.2 Das Messprinzip

Über die Laufzeitmessung des Lichtstrahls wird die Distanz zwischen dem Sender, dem reflektierenden Objekt und dem Empfänger gemessen. Die Entfernung zum Ziel kann über folgende Formel berechnet werden [Buddenbaum, 2010]:

$$R = C_{Atm} * \tau/2 \tag{3.1}$$

R = Entfernung Sensor und Zielobjekt [m]

 $C_{Atm} = Lichtgeschwindgkeit Atmophäre [m/s]$ 

 $\tau = Laufzeit des Signals [s]$ 

Die Lichtgeschwindigkeit der Atmosphäre wird über die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, dividiert durch den Brechungsindex der Luft abgeleitet [Buddenbaum, 2010].

#### 3.3.3. Der "Fußabdruck" des Laserstrahls

Laserlicht unterliegt einer starken Bündelung. Trotz dieser Tatsache, fächert der Laserstrahl mit dem Winkel Y beim atmosphärischen Durchgang auf. Der Winkel Y weist einen Wert von 0,2 bis 0,6 mrad auf. Der " $Fu\beta abdruck"$  des Laserstrahls ist ungefähr kreisförmig und ändert sich mit der Entfernung R zwischen dem Sensor und dem Zielobjekt, sowie des Auslenkwinkels des Nadirs  $\Theta_{ins}$ .

Der Durchmesser des Nadirs wird normalerweise wie folgt angegeben [Buddenbaum 2010]:

$$F_{Pinst} = R * Y \tag{3.2}$$

 $mit \quad R = Entfernung Sensor und Zielobjekt [m]$ 

Y = Winkel Auffächerung [°]

Seine Fläche  $A_l$  wird wie folgt angegeben [Buddenbaum, 2010]:

$$A_l = \frac{\pi}{4} (R * Y)^2 \tag{3.3}$$

mit R = Entfernung Sensor und Zielobjekt [m]

Y = Winkel Auffächerung [°]

 $\pi = Kreiszahl [3,14159...]$ 

Bei den oben beschriebenen Formeln des Nadirs wird von einer ebenen Aufnahmefläche ausgegangen. Jedoch kommt es zur Verformung des "Fußabdrucks" durch die Topographie. Bei einer Schrägsicht auf ebenen Gelände ergibt sich zum Beispiel eine elliptische Form des "Fußabdrucks". Die Definition des "Fußabdrucks" ist nicht klar abgegrenzt [Buddenbaum, 2010].

## 3.3.4. Die Energie des Laserstrahls

Mit Hilfe der Radargleichung lässt sich der Anteil der ausgesandten Energie des Laserstrahls berechnen, der zum Empfänger zurückgestreut und aufgenommen wird. Werden die nach Buddenheim (2010) angegeben Gleichungen der *Energiedichte* unter der Annahme einer einheitlichen Energieverteilung in der Fläche A<sub>I</sub>, die gesamte reflektierte Energie eines Zielobjektes, unter der Annahme eines lambertschen Reflexionsverhaltens und die beim

*Empfänger ankommende Energie*, auf der Empfangsfläche der Apertur des Sensors, kombiniert, so ergibt sich die für die *P<sub>r</sub> Energie am Empfänger*:

$$P_r = \frac{pM^2A_r}{\pi R^2}P_t \tag{3.4}$$

p = Reflexionsgrad [%]

 $M^2 = Transmissivität der Atmosphäre [%]$ 

 $A_r = Empfangsfläche der Apertur des Sensors [m]$ 

 $R^2$  = Entfernung Sensor und Zielobjekt [m]

 $P_t = ausgesandte Energie [J]$ 

Normalerweise ist bei Radarsystemen der Laserstrahl sowohl auf dem Weg zum Zielobjekt, als auch zurück zum Empfänger stark gefächert [Buddenbaum, 2010].

Ein detaillierter Überblick über ALS-Systemkomponenten, Sensoren, sowie physikalisch genauere Betrachtungsweisen sind beispielsweise in Ackermann (1999), Baltsavias, (1999a), Wagner et al (2006) oder in Wehr und Lohr (1999) gegeben.

#### 3.3.5 Primäre Produkte

Die nach einer Laserscanningbefliegung prozessierten Daten liegen als eine dreidimensionale Punktwolke vor. Aus diesen Messungen heraus können nun Modelle, wie beispielsweise ein digitales Oberflächen- oder ein digitales Geländemodell, sowie weitere Folgeprodukte, wie beispielsweise ein digitales normalisiertes Oberflächenmodell, generiert werden. Zunächst sollen die Begriffe der oben genannten Modelle weiter aufgeführt und definiert werden. In der Literatur unterscheiden sich die Begriffe der Modelle. Aus diesem Grund werden die in Kraus (2004) und Pfeifer (2003) definierten Begrifflichkeiten gewählt. Pfeifer (2003) weist expliziert darauf hin, dass die unten beschriebenen Definitionen keine "einzig gültige Nomenklatur" darstellen, sondern nur einen Überblick über die verwendeten Definitionen geben sollen.

Weitere Beschreibungen zu den oben genannten Modellen sind unter anderem auch in Kraus (2005) zu finden. Weitere Modelle, die in dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden, sind beispielsweise das Höhenmodell, das Situationsmodell oder das Gebäudemodell. Eine genauere Beschreibung dieser Modelle ist u. a. bei Kraus (2000, 2005) zu finden.

## 3.3.5.1 Digitales Geländemodell (DGM)

Ein digitales Geländemodell (engl. Digital Terrain Model, DTM) beschreibt die Geländeoberfläche, mittels eines X/Y/Z-Koordinatensystems, ohne Kunstbauten und Vegetation. Für die Generierung eines DGM werden nur die letzten Echos der Punktwolke verwendet. Da die Punkte nicht immer am Boden liegen, kann das DGM nicht direkt aus der Punktwolke abgeleitet werden. Es ist eine sogenannte Filterung der der Last-Echos notwendig [Kraus, 2004]

## 3.3.5.2 Digitales Oberflächenmodell (DOM)

Ein digitales Oberflächemodell (eng. Digital Surface Model, DSM) beschreibt die Geländeoberfläche unter Einbezug der Kunstbauten, Vegetation, sowie sonstige feste und bewegliche Objekte [Kraus, 2004]. Pfeifer (2003) beschreibt den Begriff des DOMs auch als ein Modell, dass die oberste Fläche aus der Vogelperspektive beschreibt. Bei offenen Gelände, wie beispielsweise bei Straßen, nackten Boden, landwirtschaftliche genutzte Flächen ohne Bewuchs oder Grasland mit niedrigere Vegetation, sind das DGM, sowie das DOM als gleich anzusehen. Bei Gebäuden beschreibt das DOM die Hausdächer, während das DGM die Geländeoberfläche ohne Gebäude darstellt. In Waldgebieten beschreibt das DOM die Fläche der obersten Baumkronen, während das DGM die Bodenoberfläche beschreibt. Für die Generierung eines DOMs werden die First-Echos der Punktwolke herangezogen [Kraus, 2005].

## 3.3.5.3 Normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDOM)

Ein normalisiertes digitales Oberflächenmodell oder auch digitales Bestandhöhenmodell genannt (nDOM, engl. Canopy Heigh Model, CHM) beschreibt die Höhe der Objekte über dem Gelände. Generiert wird dieses Modell, aus der Subtraktion des DOMs vom einem DGM [Pfeifer, 2003].

## 3.3.6. Verfahren zur Generierung Primärer Produkte

Zur Generierung eines DOMs bzw. eines DGMs werden verschiedene Verfahren differenziert. Briese (2004a)zeigt in seiner Dissertation unterschiedliche Methoden Oberflächenmodellierung auf. Hierbei wird zwischen geometrischen und mathematischen Ansätzen unterschieden. Bei der geometrischen Modellierung wird die Oberfläche über die aufgenommen ALS-Punkte, sowie über geometrische Informationen wie zum Beispiel über Gelände- oder Bruchkanten beschrieben und mit Hilfe von Algorithmen berechnet. Geometrische Ansätze sind zum Beispiel in Dickerson et al. (1997), die mit der Fast Greedy Triangulation Oberflächen modellieren oder in Kraus (2000), der mit Hilfe der Delauney Triangulation die geometrische Modellierung durchführt, zu finden.

Im Gegensatz dazu, nutzen die mathematischen Ansätze, Funktionen um die Oberfläche zu beschreiben. Hierbei kann zwischen Interpolations- oder Approximationsverfahren unterschieden werden. Für beide Ansätze wird eine mathematische Funktion auf Basis der aufgenommenen Punkte und der geometrischen Informationen definiert. Bei der Interpolation wird die definierte Funktion exakt durch die ALS-Punkte beschrieben, wobei die Funktion der Approximationsmethode nur durch die gemessenen Punkte angenähert wird [Hollaus, 2006]. Hierbei seien Autoren wie zum Beispiel Lanchester und Salkauskas (1986), die mit der Moving-Least-Squares Interpolation Oberflächen modellierten oder Hoschek und Lasser (1993) die die Finite-Elemente-Methode einsetzten, zu nennen. Weitere Ansätze der geometrischen und mathematischen Oberflächenmodellierung sind zum Beispiel in Briese (2004b) oder Ackermann und Kraus (2004) zu finden.

Für die Generierung eines DGM wird eine Klassifizierung der Punktwolke in Boden- und Nicht-Boden-Punkte durchgeführt. Das ALS-System nimmt nur die geometrischen Informationen der vom Laserstrahl getroffenen Ziele auf. Da die semantischen Informationen, unbekannt sind, kann keine genaue Zuordnung erfolgen, woher die aufgezeichneten Echos stammen. Mit Hilfe von statistischen Verfahren wird nun versucht, einen räumlichen Bezug der aufgenommenen Punkte herzustellen [Hollaus, 2006]. Dies bringt einen Ansatz hervor, der in der Literatur auch als Filterung bekannt ist. Es gibt im Wesentlichen drei unterschiedliche Filterverfahren, die in Pfeifer (2003) genauer beschrieben werden: Die morphologische Filterung, die progressive TIN-Verdichtung und die robuste Filterung

Die genannten Filtermethoden setzen voraus, dass Objekte auf dem Erdboden, wie zum Beispiel Bäume, Fahrzeuge oder Gebäude gewöhnlich höher liegen, als die umliegenden Bodenpunkte. Full-Wave-Laserscanner ermöglichen es, mehr physikalische Kriterien für die Klassifizierung der Punktwolke zu erhalten und somit eine bessere Genauigkeit des Klassifizierungsergebnisses zu errechnen [Hollaus, 2006]. Ein DOM wird aus den höchsten Punkt einer vordefinierten Rasterzelle, mit Hilfe einer einfachen Interpolationsmethode, wie zum Beispiel *moving plane*, berechnet [Kraus, 2010].

Die aufgeführte Abbildung 6 von Hollaus (2006) zeigt den Unterschied zwischen einem DOM und einem DGM.

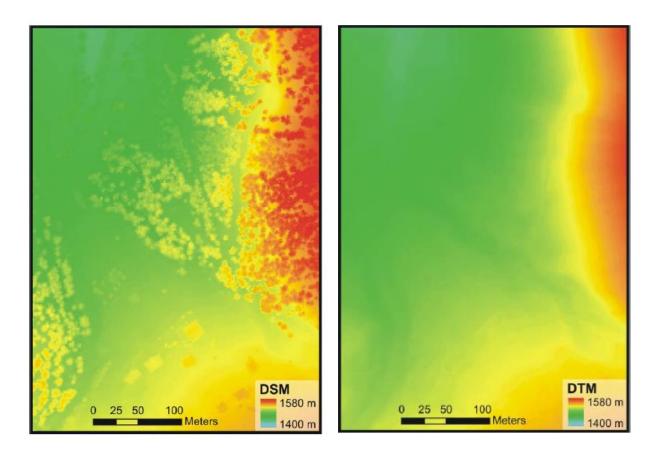


Abbildung 6: DOM versus DGM (Hollaus, 2006)

Die Baumhöhe in Waldgebieten, wird als das vertikale Niveau zwischen der Bodenoberfläche und der obersten Baumwipfel in Metern, definiert [Hollaus, 2006]. In dieser Arbeit wird die Baumhöhe als ein digitales Bestandhöhenmodell (CHM) repräsentiert. Die Berechnung dieses Modells erfolgt aus der Differenz der Fist-Puls-Daten zu den Last-Puls-Daten bzw. aus der Subtraktion des DOMs von einem DGM [Pfeifer, 2003].

Im Gegensatz zu einem Last-Puls ist bei einem Fist-Puls die Reflektion an einem ersten Objekt, durch den Laufweg des Laserstrahls bekannt. In Abhängigkeit von der Oberfläche, kann mit Sicherheit angenommen werden, dass eine gewisse Durchdringung des Laserstrahls stattfindet. Triff der Strahl zum Beispiel auf ein Waldgebiet mit spärlicher Kronenbedeckung (z. B. laubabwerfender Wald) so kann sich die Durchdringungstiefe um einige Meter vergrößern. Bei Last-Echos ist es jedoch unbekannt ob die Reflektion von der Krone oder vom Boden zurückgeworfen wird. Zusammenfassend lässt sich damit sagen, dass die First-Echos für Berechnung eines Bestandhöhenmodells besser geeignet sind, als die Last-Echos [Hollaus, 2006]

Die Genauigkeit der abgeleiteten Modelle hängt u. von den ALS-Systemkomponenten, den Modellierungsmethoden, den Umweltbedingungen, sowie des aufgenommenen Gebietes ab. Genauigkeitsuntersuchungen unter verschiedenen Anforderungen wurden zum Beispiel von Kraus et al. (2004), Kraus und Pfeifer (1998) oder Hyyppä et al. (2005) durchgeführt.

# 3.4. Airborne Laserscanning versus Photogrammetrie

Dieser kurze Vergleich des ALS und der Photogrammetrie ergibt sich aus der Literaturrecherche aus Kraus (2000, 2003, 2004). Eine detaillierte Beschreibung zu dieser Thematik ist beispielsweise auch in Baltsavias (1999b), zu finden.

Das ALS ist ein aktives Fernerkundungsverfahren, da das ausgesendete Signal von einem auf der Erdoberfläche befindlichen Objekt reflektiert und der daraus zurückgestreute Lichtstrahl von dem Empfänger aufgenommen wird. Eine Aufnahme mit Hilfe eines Laserscan-Systems kann somit zu jeder Tages- und Nachtzeit erfolgen. Die (Stereo-) Photogrammmetrie wiederrum, gehört den passiven Verfahren an, da die Aufnahme mit Hilfe der externen Energie der Sonnenstrahlung erfolgt. Große Vorteile ergeben sich für das ALS in bewaldeten oder bebauten Gebieten. Bei diesem Verfahren ist ein einziger Aufnahmeort ausreichend, um ein DGM abzuleiten. Im Gegenzug zum ALS-System werden in der Photogrammmetrie, sich zwei überlappende Luftbildaufnahmen benötigt, um ein DGM abzuleiten. Außerdem spielen die Flughöhe und der Kameratyp während der Aufnahme für die Genauigkeit dieses Modells eine zentrale Rolle. Beim ALS spielt die Punktdichte für die Genauigkeit eine zentrale Rolle.

Sogar auf texturlosen Boden liefert das ALS im Gegensatz zur Photogrammetrie brauchbare Höheninformationen, wie beispielsweise bei glatten, trockenen Ackerflächen, Dünen, oder beschatteten Waldgebieten [Kraus 2003, 2004]. Jedoch ist die Auflösung der Aufnahmen in der Photogrammetrie wesentlich besser. Die aufgeführte Abbildung 7 von Hollaus (2006) zeigt den Unterschied zwischen einem DGM und einem Color-Infrared Orthophoto (CIR).

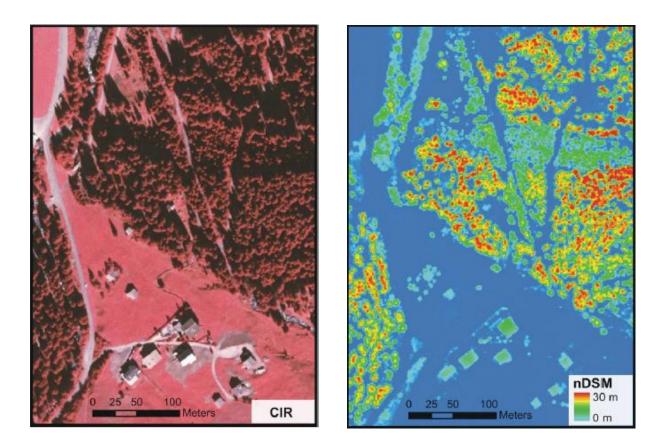


Abbildung 7: DOM versus DGM (Hollaus, 2006)

# 4. Stand der Wissenschaft – Schätzung der Brandgutparameter

# 4.1 Einleitung

Die "Brennstoffverteilung" innerhalb eines Waldgebietes ist ein wichtiger Parameter für die Ermittlung der Feuergefahr [Riaño, 2003]. Brennmaterial wird definiert als, brennbares, lebendes oder abgestorbenes pflanzliches Material, einschließlich Grass, Streu, Humus, Wurzel- und Strauchwerk, sowie Unterholz und Bäume. [van Wagtendonk, 2006]. Ein Feuer innerhalb eines Waldgebietes kann sich schnell ausbreiten, wenn eine regelmäßige Verteilung des Brennstoffes vorliegt. Für die Charakterisierung des Brennmaterials spielen Faktoren wie zum Beispiel die Kronendichte, die Kronenansatzhöhe, die Kronenlänge, der Bedeckungsgrad und der Anteil an toten und lebenden Brennstoff eine wichtige Rolle [Riaño, 2003].

In diesem Teil der Arbeit werden die für die Generierung einer Brandgutkarte nötigen strukturellen Forstparameter näher beschrieben. Nach einer eingehenden Literaturrecherche werden die folgenden aufgeführten Parameter als signifikante Einflussgrößen zur Ableitung einer Brandgutkarte bestimmt und im *praktischen Abschnitt 6* mit Hilfe der wissenschaftlichen Laserscanning-Software Opals berechnet:

- Baumhöhe
- Kronenansatzhöhe und Kronenlänge
- Kronenschlussgrad
- Waldlücken
- Einteilung des Waldbestandes nach Wuchsklassen

#### 4.1.1 Die Baumhöhe

Die Schätzung der Baumhöhe in Waldgebieten stellt eine der fundamentalsten Anwendungen von ALS-Daten dar [Buddenbaum, 2010]. Arp et al. (1982), Nelson et al. (1984) oder Nelson (1997) schätzen die Baumhöhe bereits mit Hilfe von Laser-Profiling. Beispielweise konnten Nelson et al. (1988) mit einer guten Genauigkeit, die Baumhöhen, das Holzvolumen und die Biomasse von verschiedenen Beständen schätzen.

Die Baumhöhe stellt zwar keine direkte waldbrandspezifische Größe dar, jedoch ermöglicht ihre Kenntnis die Ableitung der waldbrandspezifischen Parameter, wie zum Beispiel *die Kronenansatzhöhe, Kronenlänge* oder den *Kronenschlussgrad* 

Bei der Schätzung der Baumhöhe kann die Höhe aus der 3D-Punktwolke der ALS-Rohdaten mit Hilfe der X-, Y-, Z-Koordinaten der Punkte bestimmt werden [Buddenbaum, 2010]. Eine weitere Möglichkeit zeigt Hollaus (2006) auf, indem die Baumhöhen aus den Pixelwerten eines nDSM berechnet werden. Bei beiden Berechnungsmethoden wird für jeden Baum der höchste Punkt, in Form des maximalen Wertes definiert. Die Ableitung der Baumhöhen, deren Höhen über NN (Normalnull, Höhenbezugsfläche) oder dem Ellipsoid angegeben sind, kann nur erfolgen, wenn für jedes aufgenommene Laserecho ein dazugehöriger Bodenpunkt existiert.

Aufgrund der Verteilung der aufgenommenen Laserpunkte kommt es zu Problemen bei der Ableitung der Baumhöhe. Die Spitze eines Baumes wird mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit erfasst und somit die Höhe unterschätzt. Dieses Problem tritt insbesondere bei Nadelbäumen auf. Die Unterscheidung von Waldboden und Unterwuchs stellt ein weiteres Problem bei der Bestimmung der Baumhöhe dar. Befindet sich das aufgenommene Waldgebiet in einer Hanglage, so wird die Baumhöhe unterschätzt, wenn der Baum zum Hang hingeneigt ist. Die Baumhöhe wird überschätzt, wenn der Baum vom Hang weggeneigt ist. Außerdem besteht die Gefahr, dass das erste Echo von einem Baum zu schwach ist und somit vom ALS-System nicht aufgenommen wird [Buddenheim, 2010].

## 4.1.2 Schätzung der Kronenansatzhöhe und der Kronenlänge

Die Kronenansatzhöhe ist definiert als der Übergang vom Stamm zur Krone eines Baumes. Die Kronenlänge wird aus der Differenz zwischen der *Baumhöhe* und der *Kronenansatzhöhe* abgeleitet. In Verbindung mit dem Kronendurchmesser kann das Kronenvolumens ermittelt werden [Buddenbaum, 2010].

Buddenbaum (2010) verwendetet zur Berechnung der Kronenlänge einen Full-Wave-Datensatz. Er stellt für seine Untersuchungen die Hypothese auf, dass aus der gesamten Baumkrone Laserechos zurückgeworfen werden. Zwischen dem Bereich der Krone und dem Boden wird sehr wenig Energie zurückgeworfen, so dass die Kronenansatzhöhe durch die Abnahme der reflektierten Energie zu erkennen ist.

Baumkrone Laserechos zurückgeworfen werden. Zwischen dem Bereich der Krone und dem Boden wird sehr wenig Energie zurückgeworfen, so dass die Kronenansatzhöhe durch die Abnahme der reflektierten Energie zu erkennen ist. Die Hypothese ist fehlerhaft, wenn eine Krone so dicht wird, dass ihre unteren Bereiche vom Laserstrahl nicht mehr erreicht werden können oder die Echos aus den unteren Bereichen, den Sensor nicht mehr erreichen. Es werden Rasterzellen mit einer Größe von 5 m x 5 m definiert. Innerhalb dieser Zellen wird das, als Funktion der Aufnahmezeit aufgetragene Signal des Full-Wave-Datensatzes mit einem vorgegeben Schwellwert abgetastet. Die Höhe, bei dem der Schwellenwert unterschritten wird, wird als Kronenansatzhöhe gespeichert. Somit kann aus der Differenz zwischen der Baumhöhe und der ermittelten Kronenansatzhöhe, die Kronenlänge bestimmt werden. Die Prozessierung des Full-Wave-Datensatzes wird in der Arbeit von Buddenbaum (2010) nicht näher erläutert. Für die meisten Bestände konnten gute Ergebnisse erzielt werden, jedoch können keine komplexen Baumkronen mit diesem Verfahren erfasst werden. Es wird eine Korrelation zwischen den im Gelände vermessenen Beständen und den aus Lidar-Daten berechneten Kronenlängen von r = 0.73 erreicht. Die Kronenlänge der Baumart Buchen wird besser geschätzt r = 0.77 als die der Baumart Fichten r = 0.69 [Buddenbaum, 2010].

Buddenbaum (2010) beschreibt eine weitere Methode von Riaño et al. (2003). Bei dieser Methode wird die Kronenansatzhöhe als erstes Perzentil über 4 m Höhe in der Häufigkeitsverteilung von Einzelpunktdaten, in vordefinierten Rasterzellen mit einer Größe von  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  bestimmt. Buddenheim (2010) wendete den Ansatz nach Riaño (2010) auf die vorher beschriebene Studie an. Es wurde das 10. Perzentil der Energieverteilung oberhalb von 2 m in den  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  großen Rasterzellen der Full-Wave-Daten bestimmt. In dem von Buddenbaum (2010) untersuchten Gebiet liegen viele Jungbestände mit niedrigeren Kronenansatzhöhen vor. Aus diesem Grund wurde ein höheres Perzentil gewählt, da im Signal unter der Krone ein Grundrauschen beobachtet wird. Bei dem Verfahren nach Riaño (2003) berechneten Kronenansatzhöhen und den im Gelände gemessenen Ansatzhöhen besteht eine Korrelation bei der Baumart Fichte mit r = 0.94, bei der Baumart Buche mit r = 0.95 und bei beiden Baumarten gemeinsam mit r = 0.90. Die Kronenlänge korreliert bei der Baumart Buche mit r = 0.90, bei der Baumart Fichte mit r = 0.81 und bei beiden Baumarten gemeinsam mit r = 0.83 [Buddenbaum, 2010].

Die Abbildung 8 stellt die Ergebnisse der Berechnungen der Kronenuntergrenze im Perzentilbasierten Verfahren nach Buddenbaum (2010) dar. Der unterer graue Bereich stellt den Unterwuchs-Schwellwert dar, der obere graue Bereich enthält 90 % der Fläche der restlichen Kurve.

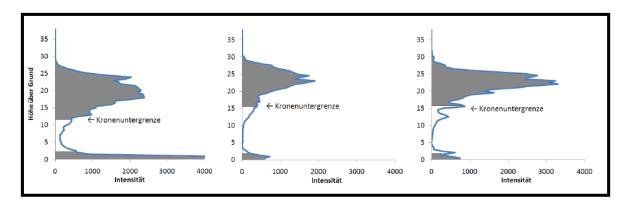


Abbildung 8: Kronenuntergrenze im Perzentil-basierenden Verfahren, Buddenbaum (2010)

Die folgende Abbildung 9 zeigt den Zusammenhang zwischen den im Gelände gemessenen und mit Lidar-Daten geschätzten Kronenansatzhöhen und Kronenlängen. Die Messwerte und Regressionsgerade für die Baumart Fichte ist in grün, für die Baumart Fichte in blau und für beide Baumarten gemeinsam in schwarz dargestellt.

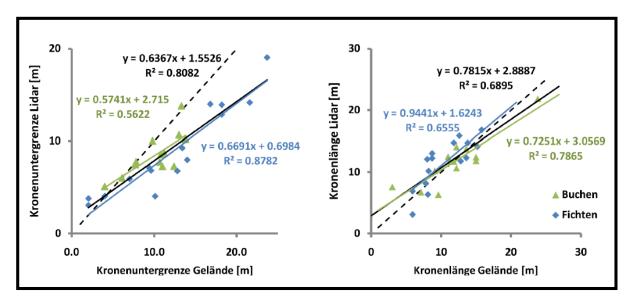


Abbildung 9: Zusammenhang der im Gelände gemessenen und mit Lidar geschätzten Kronenansatzhöhen und Kronenlängen. Buddenbaum (2010)

## 4.1.3. Schätzung des Kronenschlussgrades

Der Kronenschlussgrad auch als Bedeckungsgrad oder Überschirmungsgrad bezeichnet, ist der Flächenanteil, den die Baumkronen im Verhältnis zur gesamten Fläche einnehmen. Der Kronenschlussgrad stellt ebenfalls einen wichtigen Parameter zur Ermittlung der Feuergefahr in einem Waldgebiet dar. Er liefert u. a. für Brandmodelle wichtige Parameter zur Berechnung von abgestorbenen Brennmaterial [Internetangabe: landfire, Kronenschlussgrad].

Eine Möglichkeit um den Kronenschlussgrad zu berechnen, ist die in Straub (2010) beschriebene Methode. Der Schlussgrad wird mit Hilfe eines nDOM geschätzt, in dem er als ein Dichtemaß angenommen wird, anstelle des Bestockungsgrades. Bei diesem Verfahren wird der Schwellwert dynamisch gehalten, indem die ALS-Oberhöhen mit der Formel: *Oberhöhe [m]* \* 0.5 berechnet werden. So wird für jeden Pixel des nDSM ein neues nDSM<sub>(>schwel)</sub> berechnet, bei dem der Höhen-Schwellwert einen gewissen Wert überschreitet. Durch den festgesetzten Schwellwert fließen die Strauch- und Bodenvegetation nicht mit in die Berechnungen ein. Die Fläche des nDSM<sub>(>schwel)</sub> wird ins Verhältnis zur gesamten Fläche gesetzt und daraus der geschätzte Kronenschlussgrad ermittelt. Überlappungsbereiche von Kronen findet bei dieser Methode keine Berücksichtigung. Außerdem kann der Kronenschlussgrad den Wert 1 nicht überschreiten.

Eine weitere Möglichkeit zur Schätzung des Kronenschlussgrades beschreiben Mean et al. (1999). Dabei werden die von der Vegetation reflektierten Laserimpulse ins Verhältnis zur Gesamtanzahl der reflektierten Impulse gesetzt:

$$Schlussgrad = \frac{Vegetationspunkte}{Vegetationspunkte + Bodenpunkte} * 100$$
(4.1)

Die Genauigkeit des Kronenschlussgrades hängt von der Punktanzahl /  $m^2$  ab. Der Wert dieses Parameters ist umso aussagekräftiger, je höher die Punktdichte /  $m^2$  ist. Straub (2010) vergleicht die berechneten Werte des  $nDSM_{(>schwel)}$  mit einer Luftbildinterpretation. Das beste Ergebnis für den Zusammenhang des aus Laserscanningdaten berechneten Kronenschlussgrad und der Luftbildinterpretation (RMSE = 9.28 % Bias = -5,13 %) wird mit der Berechnung des Schwellwertes und der Formel: Oberh"ohe \* 0.5 erzielt.

## 4.1.4 Schätzung von Waldlücken

Der Waldlückenanteil hängt stark mit dem in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Kronenschlussgrad zusammen und stellt aus diesem Grund ebenfalls einen Parameter für die Generierung einer Brandgutkarte dar.

Bei Laserscanningdaten wird die Annahme getroffen, dass bei einem lückigen Bestand mehr Laserpunkte den Boden erreichen, als bei einem geschlossenen Bestand. Die Bestimmung des Lückenanteils erfolgt über den Anteil der Laserpunkte oder der zurückgestreuten Energie, die sich unter dem Bestand an den gesamten Punkten oder der gesamten empfangenen Energie befinden [Buddenbaum, 2010].

Buddenbaum (2010) untersuchte in seiner Dissertation die in Hopkinson und Chasmer (2009) beschriebenen Methoden zur Bestimmung des Bedeckungsgrades (Fractional Cover, FC) bzw. der Gap Fraction G aus Laserscanningdaten. Die Gap Fraction G wurde von Riaño el at. (2004) definiert. Hierbei wurden hemisphärische Fotos und Lidardaten zur Bestimmung von Lückenanteilen herangezogen.

Hopkinson und Chasmer (2009) definierten somit:

$$1 - FC = G = T = \frac{I_l}{I_0} = e^{-k*LAI_e}$$
 (4.2)

mit T = Transmissivität des Baumbestandes [%]

 $I_l$  = Lichtintensität nach Durchgang des Weges der Länge l durch den Bestand [W]

 $I_0$  = Lichtintensität über dem Bestand [W]

-k =  $Extinktionskoeffizient [L * mol^{-1} * cm^{-1}]$ 

 $LAI_e = effektiver\ Blattflächenindex\ [\%]$ 

Buddenbaum (2010) berechnete den Kronenschlussgrad mit Hilfe der folgenden Modelle: Das Modell All Return Ratio (FC<sub>Lidar(RR)</sub>) setzt die Anzahl der Laserechos aus dem Bestand ins Verhältnis mit der Anzahl aller Echos des gesamten Flächensegments. Das zweite Modell First Return Ratio (FC<sub>Lidar(FR)</sub>) verwendet nur die First-Pulse zur Berechnung. Über das Modell Intensity Ratio (FC<sub>Lidar(IR)</sub>) kann der Bedeckungsgrad aus dem Verhältnis Rückstreuintensität im Bestand zur gesamten Intensität berechnet werden. Dieses Modell wird angewendet, wenn nicht nur die Anzahl der Echos bekannt ist, sondern auch deren Intensität. Jedoch ergibt sich aus den oben genannten Modellen folgendes Problem: Die verschiedenen Wahrscheinlichkeiten, ein Signal aus dem Bestand oder aus dem Boden zu empfangen, werden nicht berücksichtigt. Durch den vorherigen Kontakt mit der Oberfläche, haben Intermediate-Pulse und Last-Pulse einen Transmissionsverlust erfahren, First-Pulse jedoch nicht. Gemäß Lambert-Beerschen Gesetz, bei dem von einer gleichmäßigen Extrinktion der Strahlung nach unten ausgegangen wird, muss auch von der entsprechenden Extrinktion nach der Reflexion der Strahlung am Boden ausgegangen werden. Durch das Modell FC<sub>Lidar(IR-2way)</sub> wird dieser zweimalige Energieverlust berücksichtigt. Hopkinson und Charsmer (2009) kombinierten den Gedanken der oben beschriebenen Modelle, den Transmissionsverlust um unterschiedlichen Echo-Typen zu berücksichtigen im Modell FC<sub>Lidar(BL)</sub>. BL steht hier für die Bezeichung Beer's Law. Mit dem Modell FC<sub>Lidar(BL)</sub> wurde ein gutes Ergebnis des Bedeckungsgrades der vorliegenden Laserscanningdaten erreicht.

Die genauen Formeln der einzelnen Modelle, sowie eine detaillierte Beschreibung der Studie ist in der Dissertation von Buddenbaum (2010) zu finden.

Die folgende Abbildung 10 zeigt einen Ausschnitt der vier Fractional-Cover-Modelle von Buddenbaum (2010) in einer Falschfarbendarstellung. (rot = hoher Kronenschlussgrad, grün / blau = niedriger Kronenschlussgrad).

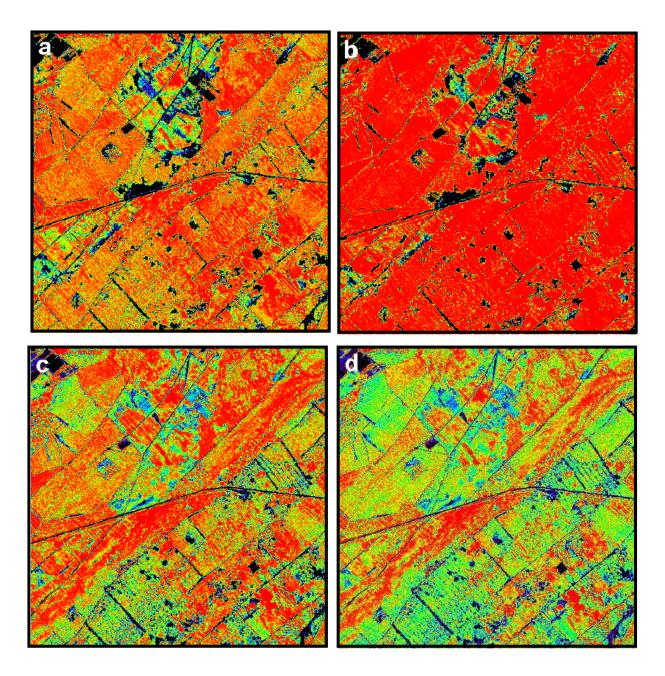


Abbildung 10: a: FCLidarRR, b: FCLidarFR, c: FCLidarIR d: FCLidarBL (Buddenbaum, 2010)

## 4.1.5 Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen

Die Einflussfaktoren, die einen Waldbrand auslösen können, sind unterschiedlicher Natur. Neben klimatischen- und jahreszeitlichen Voraussetzungen spielt auch der Waldtyp eine entscheidende Rolle. Dichtstehende Nadelholzreinbeständen bis zu einem Alter von 40 Jahren, in Zusammenhang mit klimatischen- und jahreszeitlichen Voraussetzungen, bieten eine ideale Grundlage um einen Waldbrand zu entfachen. Insbesondere der Nadelbaumtyp Kiefer stellt die höchste Gefährdung dar. Eine positive Wirkung auf das Bestandsklima hat der Laubholz-

unterstand unter Nadelholzbeständen und birgt somit eine deutlich geringere Gefahr ein Feuer zu verursachen. Die geringste Gefährdung geht von Altholz-Mischbeständen aus [Internetangabe: Stiftung Unternehmen Wald, Beschreibung Nadelwald]. Aus diesem Grund ist es wichtig, eine Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen zu erzielen, um die Waldbrandgefahr in einem Waldgebiet einschätzen zu können.

Mit Laserscanning ist es möglich, Klassifikationen durchzuführen. Schreier et al. (1985) erzielte mit Hilfe der Parameter Intensität, Variabilität und der Höhe über Grund mit Laserprofilerechos eine Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen, sowie niedriger Vegetation. Brandberger (2007) klassifizierte Baumarten über eine Einzelbaumbestimmung und der Analyse der Baumkronen und Reitberger et al. (2009) erzielten eine Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen mit Hilfe von Full-Wave-Daten.

Heurich (2006) vergleicht zwei verschiedene ALS-Datensätze, aus einer Sommer- und Winterbefliegung, indem er die einzelnen Baumkronen segmentiert und danach klassifiziert. Bei der Klassifizierung werden gleichartigen Pixeln dieselben Attribute zugeordnet. Gerade in den Winterbefliegungen lassen sich die Nadelbäume besonders gut von den unbelaubten Laubbäumen unterscheiden. Die unbelaubten Laubbaumkronen können von den Impulsen stärker durchdrungen werden, als die Nadelbaumkronen. Aus diesem Grund werden die Last-Pulse für die Isolation der Nadelbäume verwendet. Aus den aufgenommenen First-Puls-Daten und Last-Puls-Daten wird jeweils ein nDOM berechnet, die für die Klassifizierung der Klassen Nadelwald, Laubwald und Jungwuchs / Waldboden herangezogen werden.

Heinzel (2011) untersucht in einer Studie die detaillierte Erkennung unterschiedlicher Baumarten, sowie der Klassifizierung zwischen Laub- und Nadelbäumen. Die Tatsache, dass die Segmentierung von einzelnen Baumkronen, Probleme mit sich bringt, wird hier berücksichtigt. Zunächst erstellte Heinzel (2011) ein Rastermodell, indem er die Werte der Laserimpulse, sowie weitere statistische Parameter einfließen lässt. Die Analyse dieses Modells erfolgte mit der linearen Diskriminanzanalyse. Für die anschließende Klassifikation werden die aufschlussreichen Kenngrößen herausgefiltert.

Um die Genauigkeiten der oben beschriebenen Klassifizierungsergebnisse angeben zu können, wurden diese mit terrestrisch aufgenommene Laserdaten verglichen. Die Trefferquote wird als Grad der Übereinstimmung definiert. Heurich (2006) erzielt mit Daten aus einer Winterbefliegung eine Trefferquote von 97 % bei der Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen.

Die von ihm untersuchten Gebiete ergeben einen Nadelholzanteil zwischen 67 % und 94 %. Die Genauigkeit der Segmentierung wird durch einen hohen Nadelholzanteil gesteigert, was in diesem Fall die hohe Trefferquote erklären könnte. Heinzel (2011) konnte bei einer Klassifizierung der Baumarten Rotkiefer, Eiche, Buche, Fichte, Hainbuche und Vogelkirsche eine Trefferquote von 57 % erzielen. Bei einer Unterscheidung in Laub- und Nadelbäume erreichte er ein Ergebnis von 91 %.

## 4.1.6 Einteilung von Waldflächen nach Wuchsklassen

In der Ökologie wird die vertikale Schichtung eines Lebensraums auch als Stratifikation bezeichnet. Es werden die Schichten der Vegetation beschrieben, die sich durch die Wuchshöhen der einzelnen Pflanzen unterscheiden. Der Stockwerkbau des Waldes wird in vier Schichten eingeteilt. Pilze, Moose, niedrige Blütenpflanzen und Insekten sind in der Bodenund Moosschicht (unterste Schicht) zu finden. Die Krautschicht (zweite Schichte), die sich bis zu einem Meter Höhe erstreckt, beheimatet Gräser, Farne, Jungbäume und Blütenpflanzen. In der dritten Schichte, der Strauchschicht, sind vor allem junge Bäume und Sträucher zu finden. Diese Schicht erstreckt sich bis in drei Meter Höhe. Die Baumschicht (vierte Schicht) stellt die größte Schicht in einem Wald dar. Dieser Schicht werden nur Bäume zugeteilt [Internetangabe: Stiftung Unternehmen Wald, Waldschichten, 2016].

Eine Schicht bildet alle Bäume, die einen gemeinsamen Kronenraum angehören und einen Deckungsgrad von mindestens 10 % aufweisen. Wälder, die zwei Kronenschichten übereinander haben, die sich jedoch nicht berühren, werden als zweischichtig bezeichnet [Internetangabe: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Deutschland, 2016].

In der Forstpraxis erfolgt die Einteilung des Waldbestandes nach Altersklassen, wie zum Beispiel 1-20, 21-40, 41-60 Jahre usw. Alternativ zur Altersklassifizierung können sogenannte Wuchsklassen gebildet werden. Hierbei erfolgt die Einteilung nach dem Entwicklungsstadium des Waldbestandes. Eine mögliche Einteilung von Wuchsklassen soll anhand der Definition der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) aufgezeigt werden.

Die Einteilung von Bestandsflächen durch die ÖWI erfolgt prinzipiell durch die Zugehörigkeit zu einer Höhenschicht in der vertikalen Struktur:

*Blöβe:* Waldböden ohne forstlichen Bewuchs oder Flächen mit einer Überschirmung zwischen 1/10 und  $\leq 3/10$ ; Fläche ab 500 m<sup>2</sup>.

**Bestandslücke:** Lücken im Kronendach zwischen 50 und 500 m² oder einer Überschirmung unter 3/10; Differenzierung zwischen Bestandslücken mit und ohne Sträucher.

Jugend I: Flächen mit durchschnittlicher Baumhöhe bis 1,3 m; nur bei Fläche > 500 m²; Sonderfall Jugend I: Altholzbestand mit Lücken < 500 m², keine Berücksichtigung bei Schirmverjüngung.

*Jugend II:* der BHD (Brusthöhendurchmesser) kommt als Kriterium hinzu; Waldfläche mit Baumhöhe > 1,3 m und einem BHD ≤ 104 mm; Flächen können freistehend oder unter Schirm stehen.

Die ÖWI bezieht für die weitere Einteilung nun den BHD mit ein. Somit ergibt sich eine weitere Klassifizierung: *Stangenholz (BHD 105 und 204 mm)*, *Baumholz I (BHD 205 und 354 mm) Baumholz II (BHD 355 bis 504 mm)* und *Starkholz (BHD > 550 mm)*.

Alternativ kann die Baumhöhe für die Wuchsklasseneinteilung als Kriterium herangezogen werden. Somit könnte wahlweise eine Einteilung ab der Klasse *Jugend II* mittels Höhendefinition erfolgen.

Diese Kategorisierung soll als Anregung dienen [Zeiner, 2010]:

- *Blöβe: Fläche* > 500 m<sup>2</sup>
- Bestandslücken: Fläche < 500 m²
- *Jugend I:* < 2 *m*
- *Jugend II: 2 − 10 m*
- 10-15 m
- 15-20 m
- 20 25 m usw.

48

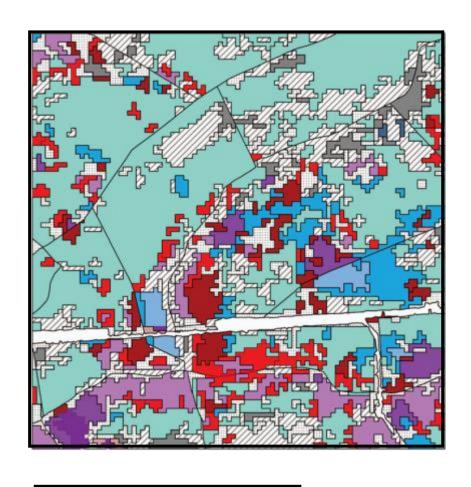
Nicht nur der Waldtyp hat einen Einfluss auf die Waldbrandgefahr, auch die verschiedenen Schichten mit ihrem brennbaren Material weisen unterschiedliches Brennverhalten auf. Somit ist es von großer Bedeutung, einen ALS-Datensatz in unterschiedliche Wuchsklassen zu klassifizieren.

Koch et al. (2009) entwickelten einen Ansatz, um auf Basis von ALS-Daten, Waldbestände in Wuchsklassen einzuteilen. Hierbei wird das Geländemodell zunächst auf topographische Begebenheiten (Gräben, Bäche, Geländekuppen) und Erschließungslinien mit Hilfe von Algorithmen abgesucht und diese als Gebietsgrenzen festzulegen. Im Anschluss wird ein Erhebungsraster mit einer Kantenlänge von 20 m über das Testgebiet gelegt. Im nächsten Schritt erfolgt eine Zuweisung der Rasterzellen zu den einzelnen Gebieten, mit Hilfe einer Verschneidung der Ergebnisse (topographische Begebenheiten, Erschließungslinien). Nun erfolgt eine Klassifizierung der Waldtypen, aus einer Winterbefliegung erstellten nDSM. Rasterzellen mit mindestens 70 % Nadelholz, gehören dem Typ "Nadelwald" an, Rasterzellen mit einem Mindestanteil von 70 % Laubholz, werden der Kategorie "Laubwald" zugeordnet. Als "Bodenfläche" werden Rasterzellen kategorisiert, die mindestens 70 % unbestockt sind. Rasterzellen, die keiner der genannten Kategorien angehören, werde als "gemischte Zelle" klassifiziert. Mit Hilfe der Klassifikation sollen gleich- und ungleichartige Rasterzellen unterschieden werden. Somit wird die Rauigkeit über die Höhenverteilung in der Zelle ermittelt. Gleichartige Rasterzellen werden in die folgenden Höhenstufen eingeteilt:

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

Nun werden die "gleichen" Zellen zu Beständen zusammengefasst und eine Mindestgröße festgelegt. Bestände, die unter der festgesetzten Mindestgröße liegen, werden zu "horizontal stark strukturierten" Flächen zusammengefasst.

In der Abbildung 11 von Koch et al. (2009) wird das kartographische Ergebnis der automatischen Bestandsdelinierung nach Struktur- und Höhenklassen dargestellt.



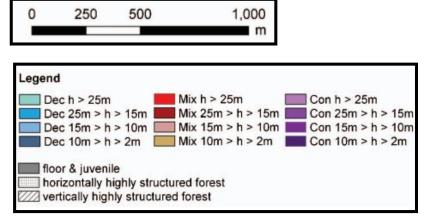


Abbildung 11: Kartographisches Ergebnis nach Bestandsklassifizierung nach Struktur und Höhenklassen (Koch et al. 2009)

Erklärung Legende: Dec = Laubwald Mix = gemischte Fläche Con = Nadelwald

# 4.2 Ableitung von Forstparameter aus ALS-Daten für verschiedene Anwendungen

In der vorhergehenden Ausarbeitung wurden im Speziellen die für eine Brandgutkarte relevanten Forstparameter dargestellt. Aus ALS-Daten ist es möglich, noch weitere Forstparameter für verschiedenste Aufgabenstellungen abzuleiten. In der folgenden Tabelle wird eine Auswahl dieser Kenngrößen kurz dargestellt:

Forstparameter	Ableitbare Größe	Literatur	
Schätzung der Stammzahl	• Biomasse	• Buddenbaum (2010)	
	<ul> <li>Holzvorrat</li> </ul>	• Hyyppä et al. (2008)	
		• Lee und Lucas (2007)	
Schätzung des Holzvorrats	Ökonomischer Wert	• Buddenbaum (2010)	
		• Maltamo et al. (2004)	
Brusthöhendurchmesser	Ableitung Grundfläche	• Zeiner (2010)	
		• Schardt et al. (2002)	
Identifikation einzelner	• Biomasse	Buddenbaum (2010)	
Bäume	<ul> <li>Holzvorrat</li> </ul>	• Brandtberg et al. (2003)	
		• Koch et al. (2006a & b)	
Schätzung der Biomasse	Kohlenstoffkreislauf	• Buddenbaum (2010)	
	Biochemische	• Means et al. (1999)	
	Prozesse	• Patenaude et al. (2004)	
Schätzung der Bonität	Leistungsfähigkeit	• Zeiner (2010)	
Blattflächenindex	• Ökosysteme	Buddenbaum (2010)	
	<ul> <li>Photosynthese</li> </ul>	• Solberg et al. (2009)	
	Evatranspiration	• Jensen et al. (2008)	

Tabelle 1: Darstellung Forstparameter verschiedener Aufgabenstellungen

Weitere Autoren die sich mit der Anwendung von Laserscanning für forstwissenschaftliche Aufgabenstellen ausführlich beschäftigen sind zum Beispiel Eysen et al. (2010), Morsdorf (2006) oder Maltamo et al. (2014).

# 5. Testgebiete und Daten

# 5.1 Aufgabenstellung

Im Folgenden soll nun die *praktische Ausarbeitung* näher erläutert werden. Die Ableitung einer Brandgutkarte aus ALS-Daten umfasst folgende Einzelschritte, die im Kapitel 6 näher beschrieben werden:

- Qualitätskontrolle
- Ableitung eines landschaftsbezogenen Oberflächenmodells
- Schätzung der Baumhöhe
- Ableitung der Waldparameter
- Ableitung der Waldbrandgefahrenstufen
- Visuelle Darstellung der Brandgutkarten

Die vorliegende Datengrundlage basiert auf 4 3D-Punktwolken im Format \*.las, mit zugehörigen Orthophotos. Eine nähere Beschreibung der Testgebiete erfolgt im Abschnitt 5.2. Die oben dargestellten Einzelschritte erfolgen mit der wissenschaftlichen Laserscanning-Software OPALS, die am Department für Geodäsie und Geoinformation der TU Wien entwickelt wurde. Eine detaillierte Beschreibung zu diesem Programmsystem ist zum Beispiel in Mandelburger et al. (2010) zu finden. Die Visualisierung der abgeleiteten Waldbrandgefahrenstufen und der Brandgutkarten erfolgt mit der frei verfügbaren Software QGIS. Die Ergebnisse der einzelnen Methoden werden im Abschnitt 7 dargestellt und diskutiert.

# **5.2** Testgebiete

Als Untersuchungsgebiet wurden die Waldgebiete Schlegelholz, Maulenberg, Toppwald-West und Toppwald-Ost im Kanton Bern in der Schweiz ausgewählt. In verschiedenen Schweizer Waldgebieten wurden bereits unterschiedlichste Studien unter anderen von Mathys (2005), Morsdorf (2011) oder Breschan (2013), mit Hilfe von Laserscanningbefliegungen durchgeführt.

Der Anteil der Waldfläche liegt in der Schweiz bei ca. 1,31 Mio. ha., dies entspricht einer Waldbedeckung von 32 % der gesamten Landesfläche. 67 % des Schweizer Waldes wird von Nadelholz und nur 33 % von Laubholz beherbergt [Internetangabe: BAFU, Schweizer Wald]. Die folgende Abbildung 12 verdeutlicht die Verteilung der Waldflächen (grüne Farbcodierung) in der Schweiz.

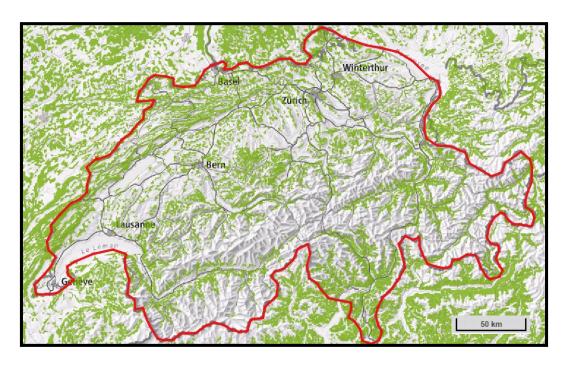


Abbildung 12: Karte der Waldverteilung in der Schweiz (BAFU, Waldflächenverteilung Schweiz)

Der Kanton Bern ist zu 30 % von Wald bedeckt, dies entspricht einer Fläche von 178.490 ha. (Gesamtfläche Kanton Bern 595.940 ha.). Der durchschnittliche Nadelholzanteil in diesem Kanton entspricht 75 %, das bedeutet, dass jeder 3 Baum den Nadelhölzern zuzuordnen ist. Die beiden Nadelbaumarten Fichte (48.8%) und Tanne (23.4%) dominieren die Waldgebiete.

Die Laubbaumart Buche ist im Berner Wald zu 18.8 % beheimatet [Internetangabe: Volkwirtschaftsdirektion Kanton Bern, Schweiz, Amt für Wald, Berner Wald]. Die folgende Abbildungen 13 zeigt eine Karte des Kanton Berns, die die Lage der Testgebiete (rote Quadrate) darstellt. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um keine maßstabstreue Gebietsgröße der Testgebiete handelt, da es sich bei den Waldgebieten um Gebiete mit einer durchschnittlichen Waldgröße von 14 ha. – 333 ha. handelt.

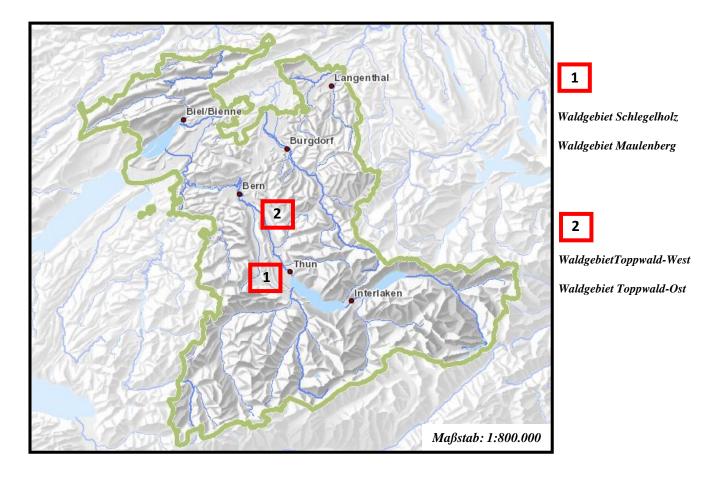


Abbildung 13: Kanton Bern, Darstellung der Testgebiete (Geoportal Kanton Bern, Schweiz)

## **5.2.1** Waldgebiet Schlegelholz

Das Waldgebiet Schlegelholz befindet sich (46°31'57.79"N, 7°23'8.76"E) im Berner Oberland in der Schweiz, in 3 km Entfernung zur Ortschaft Zweisimmen, Schweiz. Topographisch erstreckt sich das Gebiet auf dem Berg Ginggemeid (Höhe 1352 ü. NN.) bis zu einer Höhe von 947 m ü. NN. Das Testgebiet umfasst ca. 14 ha. Waldfläche. Nach Angaben des BAFU in der Schweiz, sind in diesem Waldgebiet 65 - 80 % Nadelwald zu verzeichnen [BAFU, Baumartenanteil Waldgebiet Schlegelholz].

#### 5.2.2. Waldgebiet Maulenberg

Das Waldgebiet Maulenberg befindet sich (46°31'52.34"N, 7°23'56.41"E) ebenfalls im Berner Oberland in der Schweiz, 3 km von der Ortschaft Zweisimmen entfernt. Aus topographischer Sicht erstreckt sich das Gebiet auf dem Berg Gandhore (Höhe 2112 ü. NN.) und gehört dem Waldgebiet Mulebergwald an. Das Waldgebiet erstreckt sich bis zu einer Höhe von 1800 m ü.

NN, auf dem Nord-West Hand des Berges. Das Aufnahmegebiet umfasst 140 ha. Wald. Nach Angaben des BAFU in der Schweiz ist in diesem Waldgebiet 65 - 80 % Nadelbaumholz zu verzeichnen [Internetangabe: BAFU, Baumartenanteil Waldgebiet Maulenberg].

## **5.2.3** Waldgebiet Toppwald-West

Das Waldgebiet Toppwald-West befindet sich (46°51'38.11"N, 7°39'3.95"E) im Berner Mittelland in der Schweiz, zwischen den beiden Ortschaft Linden und Freimettingen in der Schweiz. Topographisch gehört das Aufnahmegebiet dem Hohwald an. Das Waldgebiet erstreckt sich bis auf eine Höhe von 1008 m ü. NN. Das aufgenommene Waldgebiet umfasst 315 ha. Waldfläche. Nach Angaben des BAFU in der Schweiz sind in diesem Waldgebiet 65 – 80 % Nadelbäume beheimatet [Internetangabe: BAFU, Baumartenanteil Waldgebiet Toppwald-West].

## 5.2.4. Waldgebiet Toppwald-Ost

Das Waldgebiet Toppwald-West befindet sich (46°52'32.34"N, 7°40'44.38"E) ebenfalls im Berner Mittelland in der Schweiz und liegt direkt neben dem Aufnahmegebiet Toppwald-West. Topographisch gehört das Aufnahmegebiet dem Toppwald an. Das Waldgebiet erstreckt sich bis auf eine Höhe von 1002 m ü. NN. Dieses Gebiet umfasst 333 ha. Waldfläche. Nach Angaben des BAFU in der Schweiz sind in diesem Waldgebiet 50 – 80 % Nadelwald zu verzeichnen [Internetangabe: BAFU, Baumartenanteil Waldgebiet Toppwald-Ost].

## 5.2.5 Klimatische Bedingungen des Kanton Berns

Da für die Generierung von Brandgutkarten die klimatischen Bedingungen eine wichtige Rolle spielen, sollen im Folgenden die klimatischen Begebenheiten des Kanton Bern dargestellt werden. Der Kanton Bern befindet sich in einer gemäßigten Klimazone, in der eine Durchschnittliche Niederschlagsmenge von 1000 mm zu verzeichnen ist. Die Jahresmitteltemperatur entspricht 8 Grad Celsius, wobei im Sommer die Tagesmitteltemperatur bei durchschnittliche 15 – 20 Grad Celsius liegt. Der wärmste Monat ist der Juli mit einer Durchschnittstemperatur von 17, 4 Grad Celsius. Im Winter liegen die Tagesmitteltemperaturen um den Gefrierpunkt. Im Winter ist der kältest Monat der Januar mit einer durchschnittlichen

Tageshöchsttemperatur von –1 Grad Celsius. Die mittlere Windgeschwindigkeit liegt ungefähr bei 1,6 m/s. Die höchsten Windgeschwindigkeiten werden bei Westwindlagen erreicht [Internetangabe: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz].

Aufgrund der oben beschriebenen klimatischen Bedingungen, wird der Kanton Bern seltener von Waldbränden heimgesucht. Andere Kantone wie zum Beispiel Tessin oder Wallis sind auf Grund der klimatischen Begebenheiten (Alpensüdseite, Föhnwind etc.) deutlich stärker von Waldbränden betroffen. Im Kanton Bern wurden seit dem Jahr 2000 ca. 272 Waldbrände verzeichnet, was einen Jahresdurchschnitt von ungefähr 23 Waldbränden im Jahr entspricht [Swissfire Datenbank, Statistische Angaben]. Keiner der Waldbrände löste eine Katastrophe aus. Aktuell kann die Waldbrandgefahr des Kanton Bern auf der Internetseite der Volkswirtschaftsdirektion, Kanton Bern, Schweiz, Amt für Wald, abgerufen werden [Internetangabe: Volkswirtschaftsdirektion, Kanton Bern, Schweiz, Amt für Wald, Waldbrandgefahr]. Die dargestellte Abbildung zeigt die aktuelle Waldbrandgefahr des Kanton Bern vom 11.07.2016

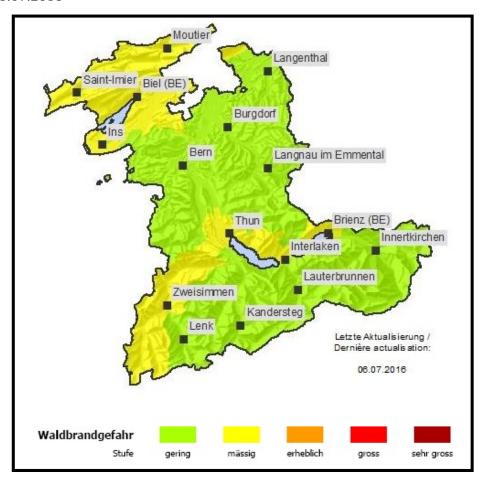


Abbildung 14: Waldbrandgefahr Kanton Bern, Schweiz, 11.07.2016 (Volkswirtschaftsdirektion, Waldbrandgefahr)

## 5.2.6 Laserscanningdaten der Testgebiete

Die vorliegenden Lidar-Datensätze des Berner Mittelandes (Toppwald West und Ost) wurden mit dem Laser-Scanner-System Leica ALS70 der Firma ASTEC GmbH aufgenommen. Die Lidar-Datensätze des Berner Oberlandes (Schlegelholz, Maulenberg) wurden mit dem Laser-Scanner-System Riegl LMS Q780 der Firma Flycom erfasst. Die technischen Daten der beiden verwendeten Laserscanner der Befliegung können der folgenden Tabelle 2 entnommen werde.

Parameter	Berner Mittelland	Berner Oberland	
Öffnungswinkel	20 °	max. 60 deg	
Flughöhe über Grund	max. 1700 m	max. 1400 m	
Fluggeschwindigkeit	125 kn	60 kn	
Laser Puls Rate	ca. 168.5 kHz	ca. 266.6 kHz	
Scan Frequenz	ca. 66 Hz	ca. 78 Hz	

Tabelle 2: Technische Daten des verwendeten Laserscanners

## 5.2.7 Orthophotos der Testgebiete

Es wurden RGB-Orthophotos für jedes Testgebiet durch das Amt für Geoinformation des Kanton Bern zur Verfügung gestellt. Die RGB Bilder weisen eine räumliche Auflösung von 0.25 x 0.25 m auf.

# 5.2.8 DGMs der Testgebiete

Ebenso lagen für jedes Testgebiet DGMs, mit einer Rasterweite von 5 m vor. Diese Modelle wurden am Department für Geodäsie und Geoinformation an der Technischen Universität Wien generiert und zur Verfügung gestellt.

# 6. Methoden

# 6.1 Qualitätskontrolle der ALS-Daten

Die Qualität von Laserscanningdaten wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Diese lassen sich gruppieren in Fehler, die durch das Laserscanning-System (Laser, INS, GPS) entstehen, Fehler die durch die Aufnahmecharakteristik (Flughöhe, Scanwinkel) hervorgerufen werden, Fehler der Datenprozessierung (Filterfehler, Fehler durch Segmentierung) und Fehler die durch Charaktereigenschaften des aufgenommenen Objektes (Geländetyp, Geländeneigung, Vegetationsdichte) verursacht werden [Buddenbaum, 2010].

Die vorliegenden 3D-Punktwolken wurden am Department für Geodäsie und Geoinformation der TU Wien bereits vorprozessiert, so dass in dieser Arbeit nur eine Analyse der Punktdichte der einzelnen \*.las-Files erfolgt. Die Punktdichte wird definiert als die durchschnittliche Anzahl von Punkten pro Quadratmeter (1 Punkt/m²) in einer Auswerteeinheit [Ressel, 2013]. Dieser Parameter stellt einen wichtigen Faktor für den Detaillierungsgrad der anschließend generierten Modelle dar [Pfeifer, 2003].

Mit der Software OPALS wird für jedes Testgebiete die mittlere Punktdichte und statistische Kenngrößen berechnet. Mit einem rasterbasierenden Analysetool werden die Daten in eine regelmäßige definierte Rasterstruktur unterteilt und mit der Funktion "pdens" Punktdichtemodelle ermittelt. Anschließend erfolgt die Generierung statistischer Kenngrößen und die Darstellung der Ergebnisse in ein farbcodiertes Rasterbild.

# 6.2 Ableitung eines landschaftsbezogenen Oberflächenmodells

Für die Generierung eines DOMs werden die First-Echos der Punktwolke herangenzogen, die mit Hilfe einer in OPALS implementierten Filtermethode, von den Last-Echos getrennt werden. Die Ableitung des Modells erfolgt nach einem bestehenden Arbeitsablauf, der von Hollaus et al. (2010) entwickelt wurde. Im Folgenden soll dieser Workflow genauer dargestellt werden.

Für jedes Testgebiet wird ein Oberflächenmodell (DOM<sub>max)</sub> mit Hilfe eines rasterbasierenden Analysetools und der Funktion "*max*" berechnet. Auf Basis einer vordefinierten Rasterzelle wird der höchste Z-Wert der Punkte innerhalb der Zelle für die Berechnung herangezogen.

Das generierte DOM $_{max}$  zeigt jedoch einige Nachteile auf. Bei einer zu geringen Punktdichte entstehen innerhalb des Oberflächenmodells Datenlücken. Außerdem werden künstlich Rauigkeitseffekte, bei einer unregelmäßigen Punkteverteilung oder bei Ungenauigkeiten in der Messung bzw. Georeferenzierung der Flugsteifen, erzeugt. Um diese Nachteile zu minimieren wird ein weiteres Oberflächenmodell (DOM $_{mls}$ ) berechnet. Mit Hilfe von regelmäßigen Gitterstrukturen und unter Anwendung der Moving-Plane-Interpolation wird die Oberfläche bzw. das Gelände der Testgebiete abgeleitet. Für jede Gitterzelle wird der nächstgelegene Punkt abgefragt und eine passende geneigte Ebene durchgelegt. Die Höhe der festgelegten Ebene am Gitterpunkt wird auf die jeweilige Gitterzelle übertragen. Zusätzlich wird ein Rauigkeitsindikator (Sigma Z,  $\sigma_z$ ) der Oberfläche generiert, da er für die weitere Berechnung von Bedeutung ist. Im Folgenden werden die beiden Oberflächenmodelle DOM $_{max}$  und DOM $_{mls}$  mit Hilfe der untenstehenden Formel (Pseudocode) kombiniert und das landschaftsbezogene Oberflächenmodell generiert:

$$z[DOM] = z[\sigma_z] < 0.2 \text{ or not } z[DOM_{max}] ? z[DOM_{mls}] : z[DOM_{max}]$$
(6.1)

Der Rauigkeitsindikators wird mit einem Schwellwert in 2 Klassen eingeteilt. Die erste Kategorie beinhaltet raue Oberflächenbeschaffenheiten, die zweite Klasse glatte Oberflächenbeschaffenheiten. In Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit wird das DOM<sub>max</sub> oder das DOM<sub>mls</sub> für die Generierung herangezogen.

Durch die Kombination der beiden Oberflächenmodelle DOM<sub>max</sub> und DOM<sub>mls</sub> wird ein landschaftsbezogenes Oberflächenmodell (DOM<sub>final</sub>) erzeugt, dass die Oberfläche mit den darauf befindlichen Objekten abbildet, in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit des vorliegenden Testgebietes.

# 6.3 Schätzung der Baumhöhe

Die vorliegenden Testgebiete bestehen ausschließlich aus Waldanteilen, so dass sich bei der Ableitung des CHM keine Nachteile durch Gebäude, Fahrzeuge oder andere Objekten ergeben. Autoren wie zum Beispiel Matikainen et al. (2003) oder Rottensteiner et al. (2005) befassen sich mit Algorithmen für die Detektion der genannten Objekte, genauer.

Die Berechnung des CHM erfolgte durch die Subtraktion des in Abschnitt 6.2 generierten DOM und des DGM. Das erstellte Differenzbild wird im Anschluss in Form eines farbcodierten Rasterbildes (Baumhöhenkarte) für jedes Waldgebiet visualisiert.

Nach den oben genannten Prozessierungsschritten liegen nun folgenden Rasterbilder für die Berechnung der Brandgutparameter vor:

- Landschaftsbezogenes DOM
- DGM (Referenzdaten)
- Differenzbild (normalisiertes Kronenmodell)
- Orthophotos (Referenzdaten)

## 6.4 Ableitung der Brandgutparameter

#### 6.4.1 Schätzung der Kronenansatzhöhe und der Kronenlänge

Die Ableitung der Kronenansatzhöhe erfolgt durch die Berechnung von Quantile. Als Berechnungsgrundlage dienen hierbei die normalisierten Höhen der einzelnen Testgebiete. Die normalisierten Höhen stellen die Höhen der Objekte über dem Gelände dar. Bei der entwickelten Methode wird die Kronenansatzhöhe in einer vordefinierten Rasterzelle für jedes Testgebiet über das 5 %-Quantil, mit einem festgesetzten Schwellwert berechnet. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Baumhöhen nach der gleichen Berechnungsmethode für das 95 %-Quantil. Die Kronenlänge wird aus der Differenz des 95 %-Quantils der Baumhöhe und des 5 %-Quantils der Kronenansatzhöhe berechnet.

Im Anschluss werden die Quantile der Baumhöhe und der Kronenansatzhöhe, sowie die draus berechnete Kronenlänge in Form farbcodierten Rasterbilder dargestellt.

#### 6.4.2 Schätzung des Kronenschlussgrades

Die Berechnung des Kronenschlussgrades erfolgt nach einer einfach entwickelten Methode. Auch in diesem Fall stellen die normalisierten Höhen für jedes Testgebiet die Berechnungsgrundlage dar. In einem ersten Schritt werden die First-Echos (Reflektionen an den Baumkronen) einer vordefinierten Rasterzelle mit Hilfe der normalisierten Höhen und einem festgesetzten Schwellwert gefiltert. Im Anschluss werden die Punkte aller Echos in einer vordefinierten Rasterzelle berechnet. Abschließend wird die Anzahl der First-Punkte in jeder Rasterzelle ins Verhältnis zu der Punkanzahl aller Echos in jeder Rasterzelle gesetzt und daraus der Kronenschlussgrad abgeleitet. Das erstellte Rasterbild wird im Anschluss in Form einer farbcodierten Kronenschlussgradkarte für jedes Waldgebiet visualisiert.

#### 6.4.3 Schätzung von Waldlücken

Der Waldlückenanteil hängt stark mit dem vorher berechneten Kronenschlussgrad zusammen, so dass keine gesonderte Berechnung des Waldlückenanteils der Waldgebiete erfolgt. Die davor abgeleitete Kronenschlussgradkarte dient als Grundlage zur Ableitung einer farbcodierten Waldlückenkarte für jedes Testgebiet.

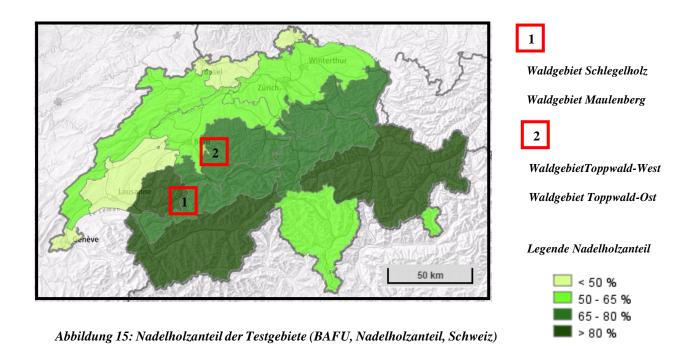
#### 6.4.4 Unterscheidung von Laub- und Nadelbaumbeständen

Wie bereits in *Abschnitt 4.1.5* erläutert wurde, ist es mit Hilfe von Laserscanningdaten möglich, eine Unterscheidung von Laub- und Nadelbaumbeständen zu erzielen. Im *Kapitel 5.2* wurde aufgezeigt, dass nach Angaben des BAFU in der Schweiz, in den vorliegenden Waldgebiete 65 – 80 % Nadelholzanteil zu finden ist. Aus diesem Grund wurde keine Klassifizierungsmethode mit der Software Opals entwickelt, sondern auf andere einfachere Möglichkeiten zurückgegriffen, die ebenfalls sehr gute Ergebnisse liefern.

#### 6.4.4.1 Referenzdaten des BAFU in der Schweiz

Bei den Referenzdaten des BAFU in der Schweiz handelt es sich um flächendeckende Angabe der Nadelbaumverteilung der Schweiz. In der dargestellten Abbildung 16 handelt es sich um eine Karte, die den prozentualen Nadelholzanteil in der Schweiz aufzeigt.

Die markierten Testgebiete zeigen einen Nadelholzanteil von 65 - 80 % auf. Hier sei nochmal darauf hinzuweisen, dass die es sich bei der Markierung (rote Quadrate) der Testdaten um keine maßstabtreue Darstellung handelt, sondern vielmehr um eine visuelle Verdeutlichung der Situation.



6.4.4.2 Visuelle Bildinterpretation mit Hilfe der vorliegenden Orthophotos

Aus dem oben beschriebenen Prozess und einem nach Albertz (2009) definierten Interpretationsschlüssel zur Bestimmung von mitteleuropäischen Baumarten, wurde eine visuelle Klassifizierung der Nadelbäume in den vorliegenden Waldgebieten durchgeführt

Die folgende Abbildung 16 stellt den Interpretationsschlüssel für mitteleuropäische Baumarten nach Albertz (2009) dar.

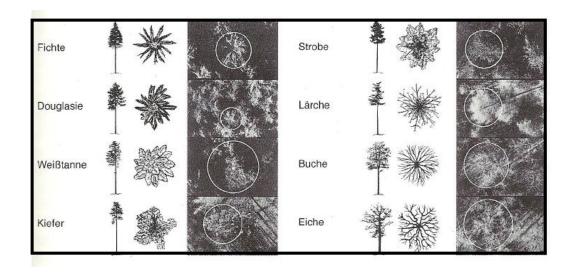


Abbildung 16: Interpretationsschlüsse für mitteleuropäische Baumarten (Albertz, 2009)

## 6.4.4.3 Unterscheidung von Laub- und Nadelbaumbeständen mit Hilfe von Baumprofilen

Mit der frei verfügbaren Software Fugoviewer werden, mit Hilfe eines speziellen Analysetools, Querprofile für jedes Waldgebiet erstellt. Die Profile zeigen die Punktverteilung der Laserscann-Daten für einen ausgewählten Bereich, mit ihren unterschiedlichen Höhenverteilungen an. Aus der Verteilung der Laserpunkte heraus, kann an der Form, den Baumkronen und an der Belaubung eines Baumes erkannt werden, ob es sich hierbei um einen Nadel- oder Laubbaum handelt. Die Abbildung 17 stellt ein Querprofil eines ausgewählten Bereichs des Waldgebietes Schlegelholz dar.

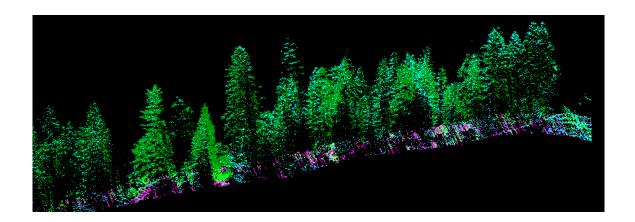


Abbildung 17: Querprofil eines ausgewählten Bereichs des Waldgebietes Schlegelholz, Schweiz

#### 6.4.5 Einteilung des Waldbestandes in Wuchsklassen

Angelehnt an der Methode von Koch et al. (2010) werden Wuchsklassen für die verschiedenen Testgebiete definiert und mit einer selbständig entwickelten Methode abgeleitet.

In einem ersten Schritt werden die vorliegenden Waldgebiete in die unten aufgeführten Wuchsklassen eingeteilt. Ein grundlegender Gedanke, der bei der Klassifizierung einen großen Einfluss hat, ist die in Abschnitt 2.1.1 von Mißbach (1982) aufgezeigte Tatsache, dass 75 % aller Waldbrände der Kategorie Bodenbrände angehören und niedrige Vegetation wie Gras, Laub, Unterholz, Nadelgehölz, Dickicht, Sträucher und Jungwuchs auf der Bodenoberfläche verbrennen und sich somit ein Waldbrand schnell ausbreitet. Außerdem erfolgt eine zusätzliche Einteilung in die Kategorie ein-, zwei-, oder mehrschichtiger Wald, da dies ebenfalls Auswirkungen auf das Brandverhalten in einem Waldgebiet hat (Abschnitt 2.1.1). Aufgrund der genannten Tatsachen wird die folgende Klassifizierung gewählt:

unter 1 m: Gras, Laub, Unterholz

 1-3 m: Dickicht, Sträucher
 3-10 m: Stangenholz
 10-20 m: Baumholz
 über 20 m: Altholz.

 Mehrschichtig
 Zweischichtig
 Einschichtig

In einem nächsten Schritt werden die normalisierten Höhen für jedes Testgebiet berechnet, da diese als Berechnungsgrundlage dienen. In einem nächsten Schritt werden Höhenlayer, entsprechend den zuvor klassifizierten Wuchsklassen definiert. Auf Basis einer vordefinierten Rasterzelle werden innerhalb dieser Zelle die Anzahl der darin befindlichen Punkte berechnet und dem Höhenlayer zugewiesen. Im Anschluss werden die Punkte aller Echos in einer vordefinierten Rasterzelle mit einem festgelegten Schwellwert berechnet. Der Höhenlayer der alle Punkte beinhaltet, dient als Referenz für die nachfolgenden Berechnungen. Anschließend wird die Anzahl der Punkte in den Höhenlayern ins Verhältnis zu dem Höhenlayer der alle Punkte beinhaltet gesetzt, Anschließend erfolgt eine prozentuale Analyse der Punkteverteilung in den definierten Höhenlayer (siehe Anhang). Aus dieser Erkenntnis heraus, erfolgt eine Einteilung in die definierten Wuchsklassen. Abschließend erfolgt eine Berechnung von shape-Files für jede Wuchsklasse. Mit Hilfe der erstellten shape-Files erfolgt die Visualisierung einer Wuchsklassenkarte für jedes Waldgebiet.

# 6.5 Ableitung der Waldbrandgefahrenstufen

Nachdem die oben beschriebenen Brandgutparameter berechnet wurden, werden die daraus gewonnen Ergebnisse in Waldbrandgefahrenstufen klassifiziert und im Anschluss visualisiert. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass hier nur eine Einteilung nach den vorliegenden Ergebnissen der ALS-Daten erfolgt und meteorologische Parameter außeracht gelassen werden.

Zunächst wird die Einteilung der Waldbrandgefahrenstufen und deren Farbgebung dargestellt. Die Visualisierung der Brandgutkarten erfolgt nach den Waldbrandindices des DWD in Deutschland und dem BAFU in der Schweiz. Beide Institutionen nutzen für die Einteilung von Waldbrandgefahrenstufen ein 5-stufiges Ampelsystem:



Abbildung 18: Einteilung der Waldbrandindices des DWD, Deutschland und des BAFU, Schweiz

Auf die genaue Farbgebung und -Interpretation der Waldbrandvisualisierung wurde bereits in *Abschnitt 2.1.8.1* genauer eingegangen.

Im Folgenden wird das Waldbrandkonzept für die Brandgutparameter aus ALS-Daten aufgezeigt. Der Waldparameter *Baumhöhe* wird hierbei nicht dargestellt, da dieser Parameter nicht für die Generierung einer Brandgutkarte von entscheidender Bedeutung ist, sondern nur für die Berechnung waldbrandspezifischer Kenngrößen herangezogen wird.

## 6.5.1 Kronenansatzhöhe und Kronenlänge

Im *Abschnitt 4.1.2* wurde bereits aufgezeigt, dass sich die Kronenlänge aus der Differenz der Kronenansatzhöhe von der Baumhöhe ergibt. Die Kronenansatzhöhe wird demnach für die Berechnung der Kronenlänge benötigt, wird aber in dieser Arbeit nicht gesondert nach Waldbrandgefahrenstufen klassifiziert.

Studien zeigen, dass sich u. a. Nadelbäume mit langen Baumkronen toleranter gegen Trockenstress erweisen und sich somit schneller erholen [Freise, 2005]. Aus diesem Ansatz heraus und mit Hilfe der berechneten Quantile der Kronenansatzhöhe und der Baumhöhe wird die Kronenlänge klassifiziert. Die folgende Tabelle 3 zeigt das 5-stufige Waldbrandwarnsystem der Kronenlänge.

Kronenlänge		Waldbrandindex	
extrem lang:	> 20 m	Stufe 1: gering	
lang:	15 – 20 m	Stufe 2: erhöht	
mittel:	10 – 15 m	Stufe 3: hoch	
kurz:	5 – 10 m	Stufe 4: extrem	
extrem kurz:	1 – 5 m	Stufe 5: extrem hoch	

Tabelle 3: 5-stufiges Waldbrandwarnsystem der Kronenlänge

## 6.5.2 Kronenschlussgrad

Der Kronenschlussgrad wird mit Hilfe des von Albertz (2009) vorgeschlagenen Kronendichteschemas in die oben beschriebenen Waldbrandindices eingeteilt. Wie in der dargestellten Abbildung 19 ersichtlich, wurde der Kronenschlussgrad in diesem Konzept auf 10 Klassen, beginnend mit 10 % bis hin zu 100 % klassifiziert.

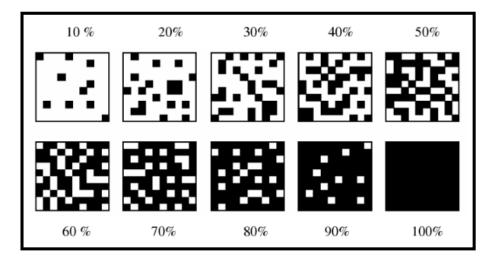


Abbildung 19: Kronendichteschema von Albertz (2009)

Das Kronendichteschema nach Albertz (2009) wird in ein 5-stufiges Waldbrandsystem für den Kronenschlussgrad in der folgenden Tabelle 4 zusammengefasst.

Kronenschlussgrad	Waldbrandindex
0 – 20 %	Stufe 1: gering
21 – 40 %	Stufe 2: erhöht
41 – 60 %	Stufe 3: hoch
61 – 80 %	Stufe 4: extrem
>80 %	Stufe 5: extrem hoch

Tabelle 4: 5-stufiges Waldbrandwarnsystem des Kronenschlussgrades

#### 6.5.3 Waldlücken

Lücken im Kronendach können als umgekehrter Schluss zum Kronenschlussgrad angesehen werden. Je mehr die Kronen ineinandergreifen, umso höher ist der Kronenschlussgrad eines Waldgebietes und umso niedriger der Grad der Waldlücken. Das von Albertz (2009) vorgeschlagene Kronendichteschema wurde für die Klassifizierung der Waldlücken in umgekehrter Reihenfolge interpretiert.

In der Tabelle 5 wird das 5-stufiges Waldbrandsystem der Waldlücken aufgezeigt, welches nach dem Kronendichteschema von Albertz (2009) umgekehrt wird.

Waldlücken	Waldbrandindex
>80 %	Stufe 1: gering
61 – 80 %	Stufe 2: erhöht
41 – 60 %	Stufe 3: hoch
21 – 40 %	Stufe 4: extrem
0 – 20 %	Stufe 5: extrem hoch

Tabelle 5: 5-stufies Waldbrandwarnsystem der Waldücken

Eine weitere Möglichkeit der Einteilung des Kronenschlussgrades, sowie der Waldlücken eines Waldgebietes kann durch das Konzept von Kramer (1995) erfolgen. Hier erfolgt die Kategorisierung nicht nach Prozentangaben, sondern nach waldspezifischen Definitionen. Greifen die Kronen tief ineinander, beutet das im waldwissenschaftlichen Fachchargon das ein gedrängter Kronenschlussgrad vorliegt (nach Albertz (2009): > 80 %) Im umgekehrten Fall würde räumdige Waldlücken vorliegen, was bedeutet, dass der Kronenabstand eine Kronenbreite überschreitet (eigene Überlegung: 0 – 20 %) Weitere waldspezifischen Definitionen sind geschlossen (die Kronen berühren sich mit Zweigspitzen), locker (der Kronenabstand ist kleiner als eine Kronenbreite) und licht (der Kronenabstand entspricht einer Kronenbreite).

#### 6.5.4 Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen

Laut Angaben des BAFU in der Schweiz, stellt der Nadelholzanteil in den vorliegenden Testgebieten mindestens 65 – 80 % dar. Anhand dieser Referenzdaten wird eine Klassifizierung der Waldbrandindices für den Nadelbaumanteil durchgeführt. Da nach diesen Angaben ein hoher Nadelholzanteil vorliegt, wird eine Klassifizierung von Laubbäumen, sowie eine Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen außer Acht gelassen. Die dargestellte Abbildung 20 stellt die Nadelholzanteil in der Schweiz dar.

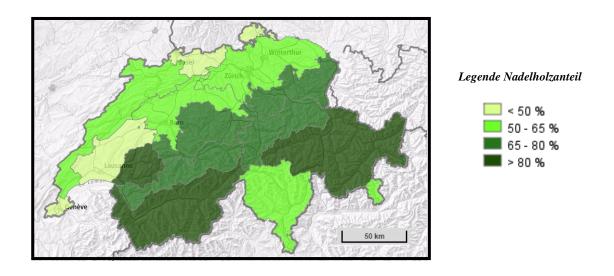


Abbildung 20: Nadelholzanteil in der Schweiz, Referenzdaten, BAFU, Schweiz

Die oben aufgeführt Legende des Nadelholzanteils der Schweiz, wird entsprechend dem 5stufigen Waldbrandwarnsystem angepasst und in der folgenden Tabelle 6 dargestellt.

Nadelholzanteil	Waldbrandindex
0 – 25 %	Stufe 1: gering
25 – 50 %	Stufe 2: erhöht
50 – 65 %	Stufe 3: hoch
65 – 80 %	Stufe 4: extrem
>80 %	Stufe 5: extrem hoch

Tabelle 6: 5-stufies Waldbrandwarnsystem des Nadelholzanteils der Schweiz

#### 6.5.5 Einteilung des Waldbestandes in Wuchsklassen

Wie bereits mehrfach in dieser Arbeit erwähnt, gehören 75 % der Waldbrände den Bodenbränden an. Aus einem Bodenbrand kann sich schnell ein großer, flächendeckender Waldbrand entwickeln. Aus dieser Sachlage heraus, wird anhand der klassifizierten Wuchsklassen ein 5-stufiges Waldbrandschema entwickelt. Zusätzlich erfolge eine Einteilung der Waldschichten in ein-, zwei- oder mehrschichtigen Wald. Mehrschichtiger Wald gehört der Wuchsklasse Unterholz oder Dickicht an und stellt somit eine höhere Waldbrandgefahr dar, als einschichtiger Wald der der Kategorie Baumholz oder Altholz angehört.

In der folgenden Tabelle 7 wird das 5-stufige Waldbrandsystem der Wuchsklassen aufgezeigt.

Wuchsklassen	Waldbrandindex
über 20 m: Altholz (einschichtig)	Stufe 1: gering
10 – 20 m: Baumholz (einschichtig)	Stufe 2: erhöht
3 – 10 m: Stangenholz (zweischichtig)	Stufe 3: hoch
1 − 3 m: Dickicht, Sträucher (mehrschichtig)	Stufe 4: extrem
unter 1 m: Gras, Laub, Unterholz (mehrschichtig)	Stufe 5: extrem hoch

Tabelle 7: 5-stufies Waldbrandwarnsystem der Wuchsklassen

# 6.6 Ableitung der Brandgutparameter nach den Waldbrandgefahrenstufen

Die berechneten Brandgutparameter werden nun gemäß der entsprechenden 5-stufigen Waldbrandwarnsysteme abgeleitet, und im Anschluss aus diesen Ergebnissen eine Brandgutkarte erstellt. Die Ableitung nach dem 5-stufigen Waldbrandwarnsystem wird anhand des Kronenschlussgrades des Waldgebietes Schlegelholz in der Schweiz näher erläutert und kurz dargestellt. Die genauen Ergebnisse und Interpretationen werden in *Kapitel 7* aufgezeigt.

Die vorliegende farbcodierte Kronenschlussgradkarte wird mit einer Gitterstruktur versehen. Mit Hilfe dieses Gitters werden die einzelnen Gitterzellen interpretiert und entsprechend dem 5-stufigen Waldbrandwarnsystem zugeordnet. Ist die Zuordnung erfolgt, wird die Gitterzelle mit der entsprechenden Farbe des Warnsystems farbcodiert. Die Farbcodierung erfolgt in einer transparenten Farbgebung um die "darunterliegende" Kronenschlussgradkarte weiterhin zu erkennen. Die folgende Abbildung 21 verdeutlicht die Zuordnung der Farbcodierung nach dem Waldbrandwarnsystem genauer.

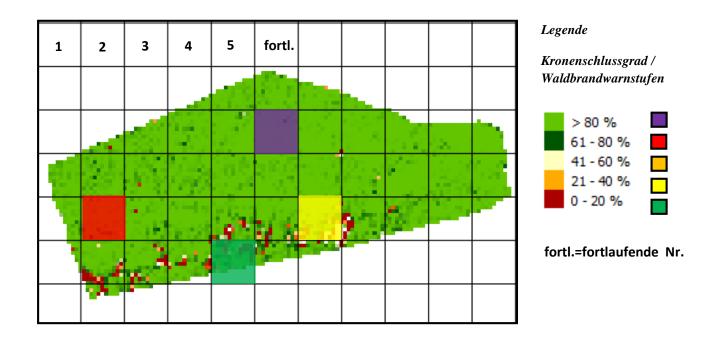


Abbildung 21: klassifizierte Kronenschlussgradkarte nach 5-stufigen Waldbrandwarnsystem

.

Diese Ableitung erfolgt nun für jeden Brandgutparameter analog. Die Interpretation soll an einem einfachen Beispiel erklärt werden: Es wird für jeden Brandgutparameter die identische Gitterzelle angesehen und der Median gebildet. Beispielsweise ergeben sich für die *Gitterzelle* 1 jedes Brandgutparameter des Waldgebietes Schlegelholz folgende Ergebnisse:

Gitterzelle 1 Waldgebiet Schlegelholz	Waldbrandindex
Kronenschlussgrad	Stufe 5: extrem hoch
Waldlücken	Stufe 1: gering
Kronenlänge	Stufe 1: gering
Nadelbaumklassifizierung	Stufe 4: extrem
Wuchsklassen	Stufe 1: gering
Ergebnis der Brandgutkarte / Median	Waldbrandindex
Gitterzelle 1	Stufe 1 gering

Tabelle 8: Interpretation Waldbrandwarnstufen Gitterzelle 1, Waldgebiet Schlegelholz

# 7. Ergebnisse und Diskussion

## 7.1. Qualitätskontrolle der ALS-Daten

# 7.1.1 Waldgebiet Schlegelholz

Für das Waldgebiet Schlegelholz wird mit der Zellengröße 1m x 1m eine mittlere Punktdichte von mindestens 23 Pkt./m² ermittelt. Die Verteilung der Punkte ist in diesem Gebiet nicht als homogen anzusehen. Eine deutlich höhere Punktdichte (> 23 Pkt./m²) ist in den Vegetationsbereichen, die in dunkelgrüner Farbcodierung dargestellt werden, zu verzeichnen. Die hellgrün farbcodierten Bereiche werden als nackter Boden, offene Stellen, Waldlücken etc. interpretiert. In diesen Bereichen ist eine Punktdichte von 10 Pkt./m² zu verzeichnen. Über das Aufnahmegebiet sind kleinere Datenlücken vorhanden, die eine Punktdichte von 0 Pkt./m² aufweisen (graue Farbcodierung). Die Analyse des rechtsschiefen Histogramms ergibt eine mittlere Verteilung der Punkte von 23 Pkt./m². Neben der visuellen Betrachtung wurden folgende statistische Kennzahlen, die in der folgenden Tabelle 9 dargestellt werden, ermittelt:

Statistische Kenngröße	Wert (Pkt./m²)
Mittelwert	43,2
Median	29,0
Standardabweichung	50,0
RMS	66,1
5 %-Quantil	4,7
25 %-Quantil	15,1
75 %-Quantil	52,8
95 %-Quantil <sub>0</sub>	145,8

Tabelle9: mittlere Punktdichte, statistische Kennzahlen, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Die folgende Abbildung 22 stellt das farbcodierte Rasterbild der mittleren Punktdichte von 23 Pkt./m² des Waldgebietes Schlegelholz, in der Schweiz dar.

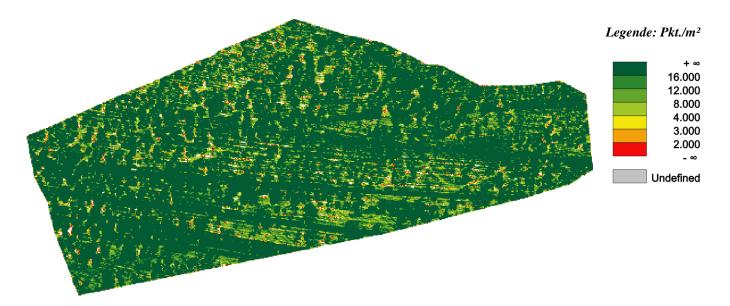


Abbildung 22: Farbcodiertes Rasterbild mittlere Punktdichte, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

#### 7.1.2 Waldgebiet Maulenberg

Die mittlere Punktdichte des Testgebietes Maulenberg wurde mit einer Zellengröße von 3m x 3 m berechnet, was dabei ein Ergebnis von 24 Pkt./m² erbrachte. Auch in diesem Waldgebiet ist eine deutlich höhere Punktdichte (> 24 Pkt./m²) in den Vegetationsbereichen zu verzeichnen (dunkelgrüne Farbcodierung). Ebenfalls sind in diesem Waldgebiet, offen Stellen, nackter Boden, Waldlücken etc. zu verzeichnen, die eine geringere Punktdichte (8 Pkt./m²) aufweisen. Die Analyse des rechtsschiefen Histogramms hat eine Punktdichte von mindestens 24 Punkten pro m² ergeben. Die statistischen Kenngrößen wurden in der folgenden Tabelle 10 zusammengefasst.

Wert (Pkt./m²)
31,2
22,5
29,5
43,0

5 %-Quantil	7,7
25 %-Quantil	14,3
75 %-Quantil	37,0
95 %-Quantil	94,5

Tabelle 10: mittlere Punktdichte, statistische Kennzahlen, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Die folgende Abbildung 23 stellt das farbcodierte Rasterbild der mittleren Punktdichte von 24 Pkt/m² des Waldgebietes Maulenberg, in der Schweiz dar.

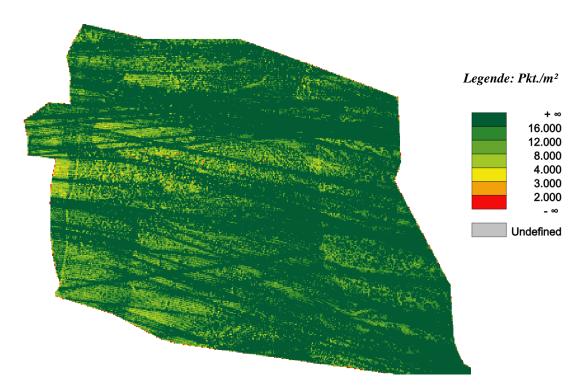


Abbildung 23: Farbcodiertes Rasterbild mittlere Punktdichte, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

# 7.1.3 Waldgebiet Toppwald-West

Für das Gebiet Toppwald-West wurde eine mittlere Punktdichte von 5 Pkt./m² ermittelt, bei einer Rasterzellengröße von 4 m x 4 m. Bei diesem Gebiet ist zu beachten, dass es sich hierbei um ein \*las-File handelt, indem mehrere Laserscann-Steifen zusammengefügt wurden. In den Überlappungsbereichen der Steifen wurde eine höhere Punktdichte festgestellt (>16 Pkt./m²).

Das bimodal verteilte Histogramm ergab im ersten Peak eine Punktdichte von 5 Pkt./m². Mehrere weitere Peaks sind ab dem Bereich 10 Pkt./m² zu verzeichnen. Diese Bereiche spiegeln die Überlappungsbereiche wieder. Außerdem sind Bereiche mit einer Punktdichte von 3 Pkt. /m², zu erkennen. Diese Bereiche stellen offenen Boden, Waldlücken etc., dar (gelb / orange Farbcodierung). Die statistischen Größen werden in der folgenden Tabelle 11 dargestellt:

Statistische Kenngröße	Wert (Pkt./m²)
Mittelwert	11,0
Median	8,2
Standardabweichung	9,3
RMS	14,4
5 %-Quantil <sub>0</sub>	2,9
25 %-Quantil	4,5
75 %-Quantil	14,5
95 %-Quantil	31,5

Tabelle 11: mittlere Punktdichte, statistische Kennzahlen, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Die Abbildung 24 stellt das farbcodierte Rasterbild der mittleren Punktdichte von 5 Pkt/m² des Waldgebietes Toppwald-West, in der Schweiz dar.

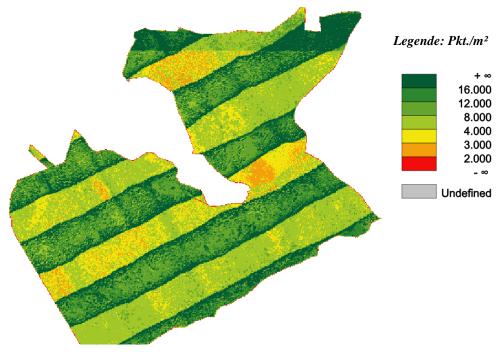


Abbildung 24: Farbcodiertes Rasterbild mittlere Punktdichte, Waldgebiet Toppwald-West,

## 7.1.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

Für das Gebiet Toppwald-Ost wurde eine mittlere Punktdichte von 5 Pkt./m² ermittelt, bei einer Zellengröße von 4 m x 4 m. Auch hier sind Überlappungsbereiche vorhanden die eine höhere Punktdicht aufweisen (>16 Pkt./m²). In diesem Gebiet sind ebenfalls Bereiche mit einer geringen Punktedichte (3 Pkt./m², offener Boden, Waldlücken etc.) zu verzeichnen. Die statistischen Kenngrößen werden in der folgenden Tabelle 12 aufgezeigt:

Statistische Kenngröße	Wert (Pkt./m²)
Mittelwert	12,5
Median	9,4
Standardabweichung	11,5
RMS	17,0
5 %-Quantil	3,2
25 %-Quantil	5,1
75 %-Quantil	15,4
95 %-Quantil	37,7

Tabelle 12: mittlere Punktdichte, statistische Kennzahlen, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

Die Abbildung 25 stellt das farbcodierte Rasterbild der mittleren Punktdichte von 5 Pkt./m² des Waldgebietes Toppwald-Ost, in der Schweiz dar.

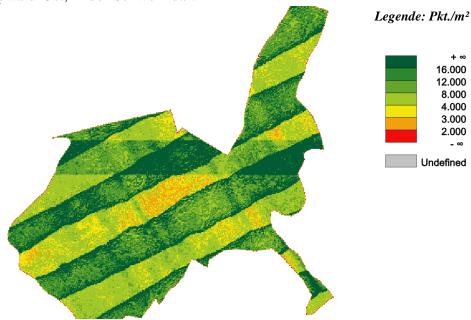


Abbildung 25: Farbcodiertes Rasterbild mittlere Punktdichte, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

# 7.2 Ableitung eines landschaftsbezogenen Oberflächenmodells

# 7.2.1 Waldgebiet Schlegelholz

In einem ersten Schritt wird das  $DSM_{max}$  mit einer Rasterweite von 0.5 m x 0.5 m berechnet. Die Abbildung 26 zeigt das abgeleitete, farbcodierte  $DSM_{max}$ , sowie eine berechnete Schummerung dieses Modells.

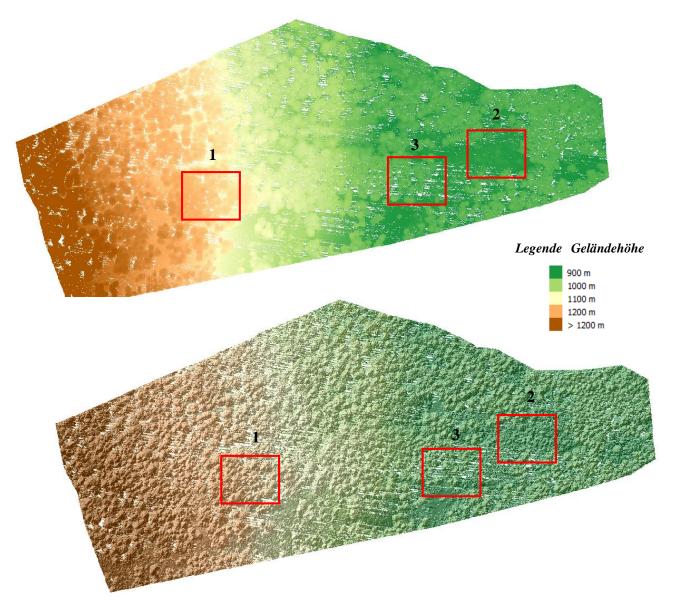


Abbildung 26: Farbcodierte Darstellung DSM<sub>max</sub> versus DSM<sub>max</sub> mit Schummerung, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Das Ergebnis des DSM<sub>max</sub> bildet die Fläche der oberen Baumkronen gut ab (rotes Quadrat 1). Offene Bodenflächen, Waldlücken etc. sind zu erkennen (rotes Quadrat 2). Die Datenlücken, die sich über das Gebiet erstrecken, sind als weiß gekennzeichnete Pixelwerte erkennbar (rotes Quadrat 3).

In einem nächsten Schritt wird das  $DSM_{mpl}$  mit einer Rasterweite von 0.5 m x 0.5 m berechnet. Die Abbildung 27 zeig das abgeleitete, farbcodierte  $DSM_{mpl}$ , sowie eine Darstellung dieses Modell mit einer berechneten Schummerung.

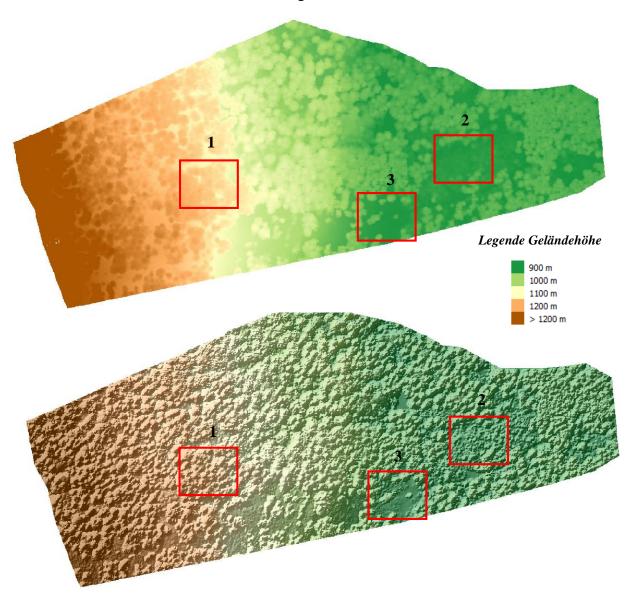


Abbildung 27: Farbcodierte Darstellung DSMmpl versus DSMmpl mit Schummerung, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Das Ergebnis des DSM<sub>mpl</sub> bildet die Fläche der oberen Baumkronen deutlich besser ab, als das zuvor erstellte DSM<sub>max</sub> (rotes Quadrat 1). Ebenso sind offene Bodenflächen, Waldlücken etc. deutlicher zu erkennen (rotes Quadrat 2). Datenlücken, sind in diesem Modell nicht vorhanden. Das geschummerte Rasterbild bildet bereits niedriger Vegetation ab (rotes Quadrat 3)

Für die Berechnung des landschaftsbezogenen DOMs werden die beiden oben dargestellten Modelle miteinander kombiniert, unter Einbezug des Sigmas Z-Wertes. Die Abbildung 28 zeigt den farbcodierten berechnete Sigma Z-Wert.

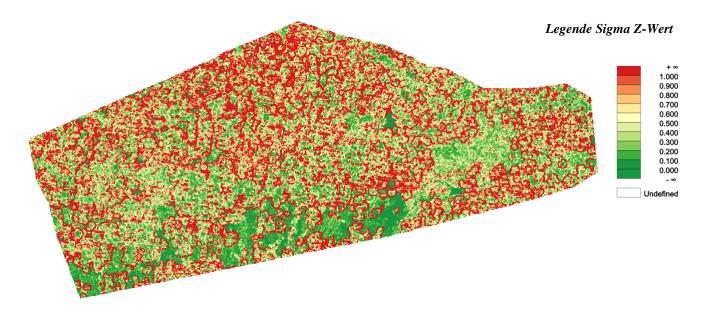


Abbildung 28: Farbcodierte Darstellung Sigma Z, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Es ist zu erkennen, dass der Sigma Z-Wert in den Vegetationsbereichen (raue Oberfläche) den höchsten Wert aufweist (rote Farbcodierung). In den Bereichen niedrigerer Vegetation (Unterholz, Dickicht, Sträucher etc.) liegt der Wert bei 0.5 (helle Farbcodierung). In Bereichen mit offenen Bodenflächen liegt der Wert bei 0 (dunkelgrüne Farbcodierung).

Die folgende Abbildung 29 zeigt das landschaftsbezogenen, farbcodierte DOM sowie eine Darstellung dieses Modells mit einer berechneten Schummerung. Das Ergebnis des landschaftsbezogenen DOM bildet die Fläche der oberen Baumkronen sehr gut ab (rotes Quadrat 1). Ebenso sind offene Bodenflächen, Waldlücken etc., sowie Bereiche mit niedriger Vegetation deutlich zu erkennen (rotes Quadrat 2).

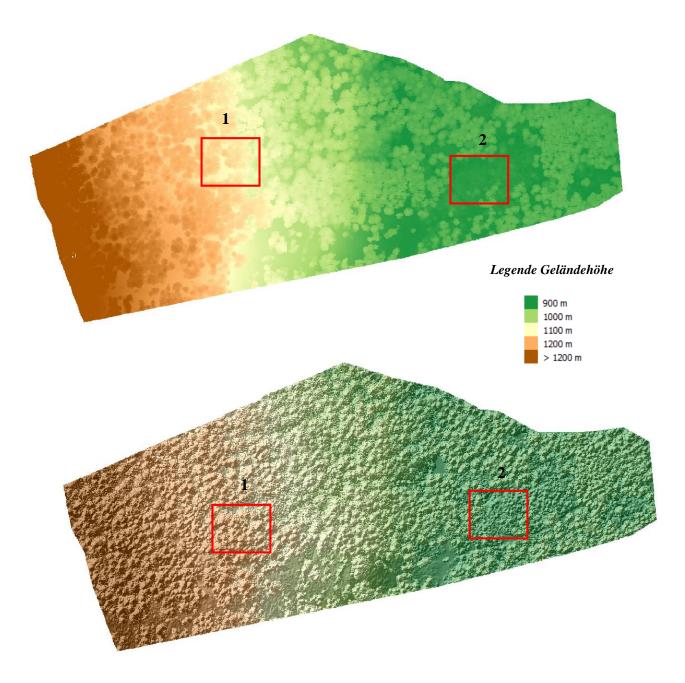


Abbildung 29: Darstellung farbcodiertes landschaftsbezogenes DOM versus landschaftsbezogenes DOM Schummerung, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Die folgende Abbildung 30 stellt das berechnete Ergebnis des nDOMs dar. Eine ausführliche Interpretation zu den Kronenhöhen erfolgt im Kapitel 7.3.

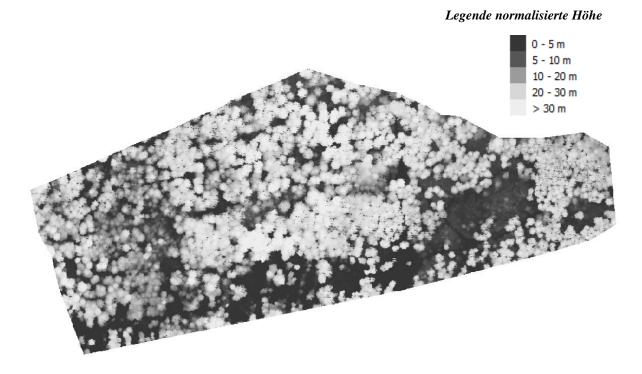


Abbildung 30: Farbcodierte Darstellung des berechneten nDOM, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

# 7.2.2 Waldgebiet Maulenberg

Die Abbildungen 31 und 32 zeigen das abgeleitete, farbcodierte  $DSM_{max\ mit}$  einer Rasterweite von  $0.5\ m$  x  $0.5\ m$ , sowie das abgeleitete Modell mit einer berechneten Schummerung für das Waldgebiet.

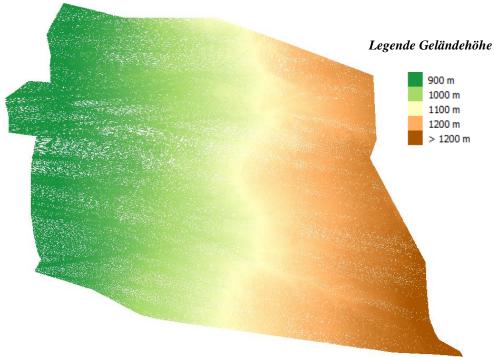


Abbildung 31: Farbcodierte Darstellung DSM $_{max}$  Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

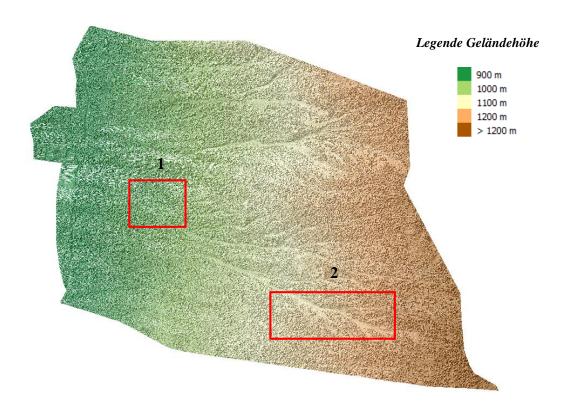
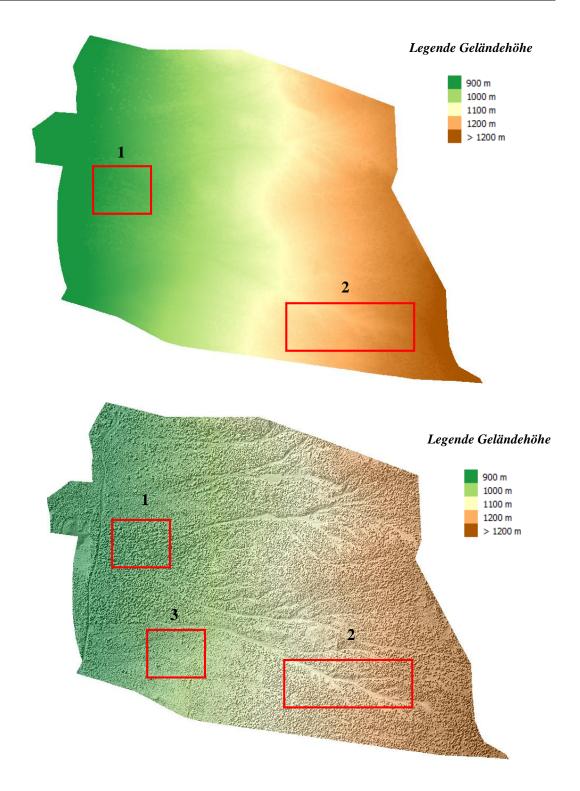


Abbildung 32: Farbcodierte Darstellung DSM<sub>max</sub> mit Schummerung Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Das Ergebnis des DSM<sub>max</sub> bildet die Fläche der oberen Baumkronen nicht optimal ab. Die Baumkronen sind nur schwer erkennbar. Das Testgebiet ist mit Datenlücken "übersät" (weißcodierte Pixel). Mit Hilfe des geschummerten Rasterbildes sind die Vegetationsflächen erkennbar (rotes Quadrat 1). Topographisch bedingte Waldschneisen (Geröll, Schutt), sowie offene Bodenflächen entlang des Berghanges bilden sich deutlich in dem dargestellten geschummerten Rasterbild ab (rotes Quadrat 2)

In der folgenden Abbildung 33 wird das  $DSM_{mpl}$  berechnet und als farbcodiertes Rasterbild mit und ohne Schummerung dargestellt.

Das Ergebnis des  $DSM_{mpl}$  bildet die Fläche der oberen Baumkronen besser ab, als das zuvor erstellte  $DSM_{max}$  (rotes Quadrat 1). Topographisch bedingte Waldschneisen am Berghang sind erkennbar (rotes Quadrat 2). Datenlücken, sind in diesem Modell nicht vorhanden.



 $Abbildung~33:~Darstellung~des~farbcodierten~DSM_{mpl}~versus~DSM_{mpl}~mit~Schummerung,~Waldgebiet~Maulenberg,~Schweiz~Schwe$ 

Die folgende Abbildung 34 zeigt den farbcodierten, berechnete Sigma Z-Wert des Waldgebietes.

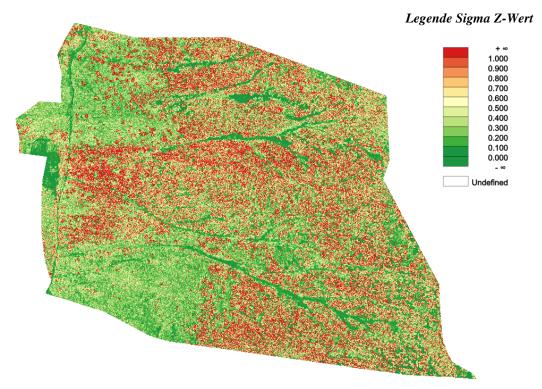


Abbildung 34: Farbcodierte Darstellung Sigma Z, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Es ist zu erkennen, dass der Sigma Z-Wert in den Vegetationsbereichen (raue Oberfläche) den höchsten Wert aufweist (rote Farbcodierung). In den Bereichen niedrigerer Vegetation (Unterholz, Dickicht, Sträucher etc.) liegt der Wert bei 0.5 (helle Farbcodierung). In Bereichen mit offenen Bodenflächen liegt der Wert bei 0.2 (grüne Farbcodierung). Die topographisch bedingten Waldschneisen weißen einen Wert von 0 auf (dunkelgrüne Farbcodierung)

Die folgende Abbildung 35 zeigt das landschaftsbezogenen, farbcodierte DOM, sowie eine Darstellung dieses Modells mit einer berechneten Schummerung. Das Ergebnis dieses Modells bildet die Fläche der oberen Baumkronen gut ab (rotes Quadrat 1). Die topographisch bedingten Waldschneisen am Berghang sind erkennbar (rotes Quadrat 2). Datenlücken sind nicht vorhanden.

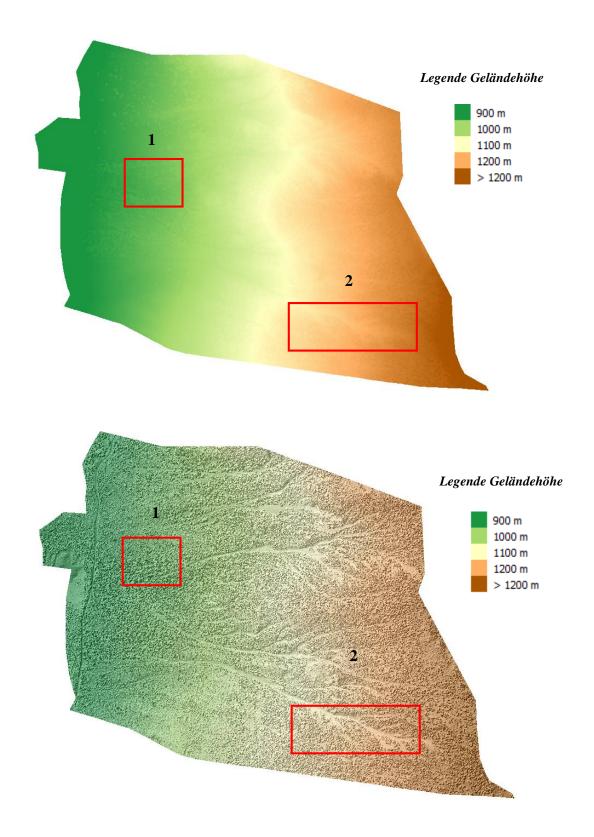


Abbildung 35: Darstellung farbcodiertes landschaftsbezogenes DOM versus landschaftsbezogenes DOM Schummerung,
Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Die folgende Abbildung 36 stellt das berechnete Ergebnis des nDOMs dar.

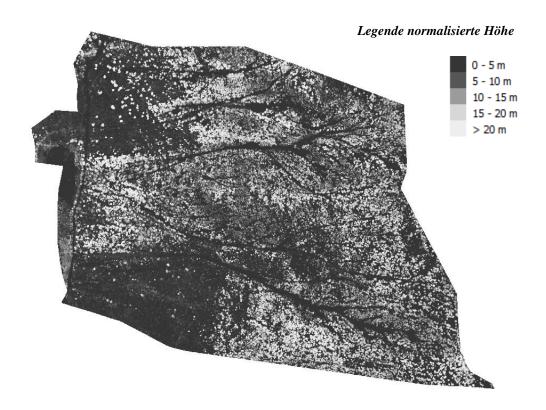
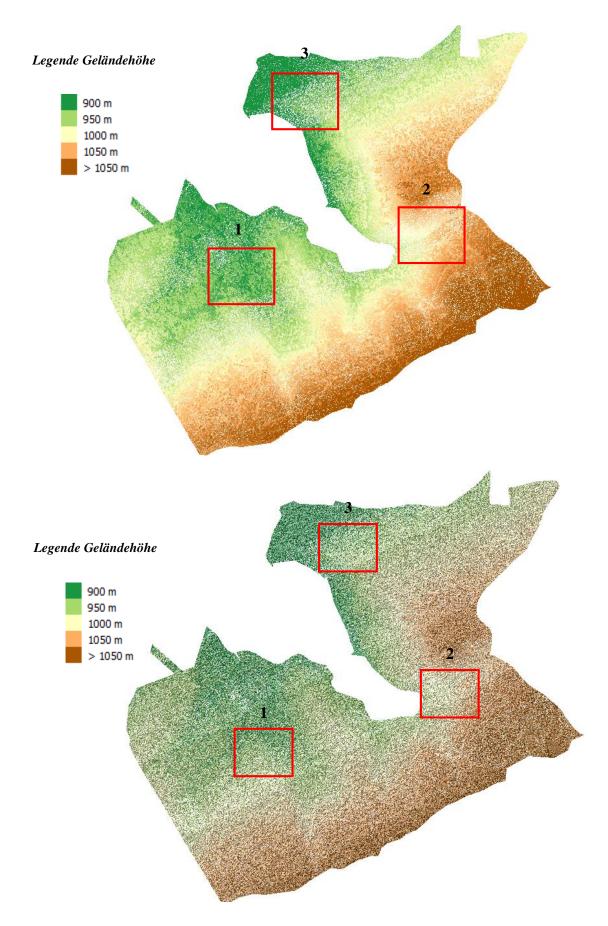


Abbildung 36: Farbcodierte Darstellung des berechneten nDOM, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

## 7.2.3 Waldgebiet Toppwald-West

Die Abbildung 37 zeigt das abgeleitete farbcodierte  $DSM_{max}$  mit einer Rasterweite von 0.5 m x 0.5 m, sowie das abgeleitete Modell mit einer berechneten Schummerung für das Waldgebiet Toppwald-West.

Das Ergebnis des DSM<sub>max</sub> bildet die Fläche der oberen Baumkronen sehr gut ab. Offene Bodenflächen, Waldlücken, aber auch Waldwege sind gut erkennbar (rotes Quadrat 2). Datenlücken bilden sich besonders in den Bereichen der Streifenüberlappungen aus (rotes Quadrat 3).



 $Abbildung~37:~Darstellung~farbcodiertes~DSM_{max}~versus~DSM_{max}~mit~Schummerung,~Waldgebiet~Toppwald-West,~Schweiz~Schwei$ 

Die folgende Abbildung 38 zeig das abgeleitete, farbcodierte  $DSM_{mpl}$ , mit einer Rasterweite von  $0.5 \, \text{m} \times 0.5 \, \text{m}$ . sowie eine Darstellung dieses Modells mit einer berechneten Schummerung.

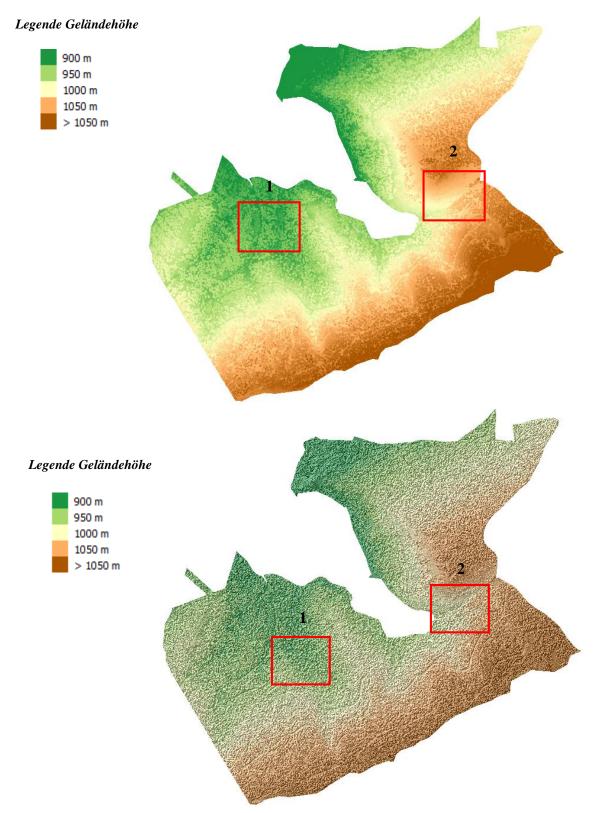


Abbildung 38: Darstellung farbcodiertes DSM<sub>mpl</sub> versus DSM<sub>mpl</sub> mit Schummerung, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Das Ergebnis des DSM<sub>mpl</sub> bildet die Fläche der oberen Baumkronen optimal ab. Offene Bodenflächen, Waldlücken und Waldwege (rotes Quadrat 2) sind sehr gut erkennbar. Datenlücken, sind in diesem Modell nicht vorhanden.

Die folgende Abbildung 39 zeigt den farbcodierten Sigma Z-Wert des Waldgebietes.



Abbildung 39: farbcodierte Darstellung Sigma Z, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Wie bereits in den beiden zuvor dargestellten Waldgebieten Schlegelholz und Maulenberg, ist auch hier deutlich zu erkennen, dass der Sigma Z-Wert in den Vegetationsbereichen (raue Oberfläche) den höchsten Wert aufweist (rote Farbcodierung). Quer durch das Waldgebiet erstreckt sich eine Freileitung (blaues Quadrat). Freileitungen stellen für die Waldbrandgefährdung einen erheblichen Risikofaktor dar. Ein winziger Funkenflug genügt, um bei trockenen Vegetationsbereichen einen Waldbrand auszulösen. Um die Gefahrensituation auch in den folgenden Arbeitsschritten zu verdeutlichen wird in diesem Fall keine morphologische Filterung durchgeführt um die Freileitung zu entfernen. In den Bereichen mit niedrigerer Vegetation (Unterholz, Dickicht, Sträucher etc.) liegt der Wert bei 0.5 (helle Farbcodierung). In den Bereichen mit offenen Bodenflächen liegt der Wert bei 0.2 (grüne Farbcodierung).

Die folgende Abbildung 40 und 41 zeigen das landschaftsbezogenen, farbcodierte DOM, sowie eine Darstellung dieses Modells mit einer berechneten Schummerung für das Waldgebiet Toppwald-West.

Das Ergebnis des landschaftsbezogenen DOM bildet die Fläche der oberen Baumkronen optimal ab (rotes Quadrat 1). Offene Bodenflächen, Waldlücken und Waldwege sind gut erkennbar (rotes Quadrat 2). Außerdem ist die Freileitung, die sich durch das Gebiet erstreckt über Datenlücken erkennbar (rotes Quadrat 3). Ansonsten sind keine Datenlücken vorhanden.

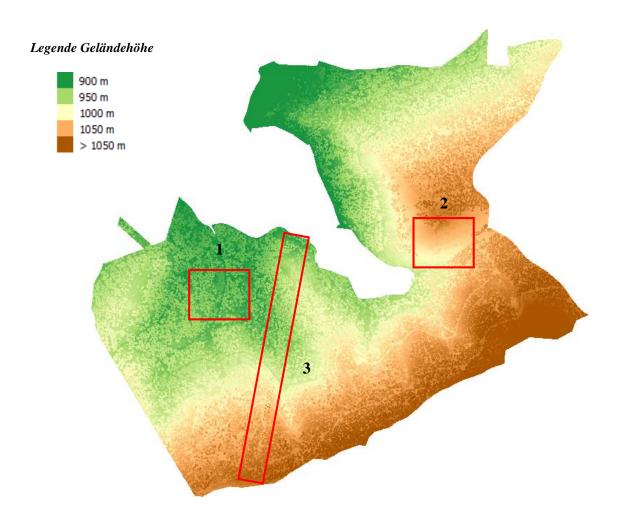


Abbildung 40: Darstellung farbcodiertes landschaftsbezogenes DOM, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

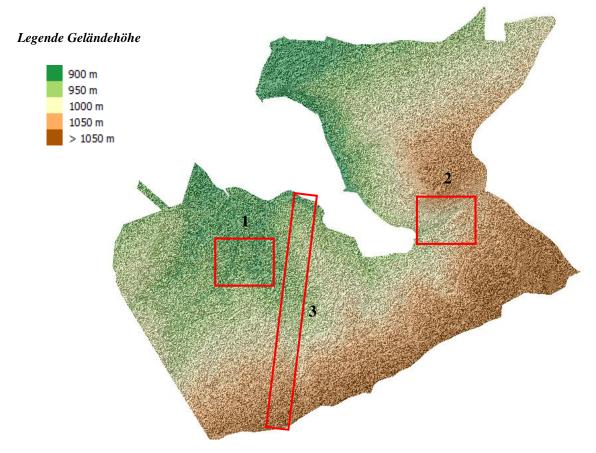


Abbildung 41: Farbcodierte Darstellung landschaftsbezogenes DOM mit Schummerung, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz Die folgende Abbildung 42 stellt das berechnete Ergebnis des nDOMs dar.

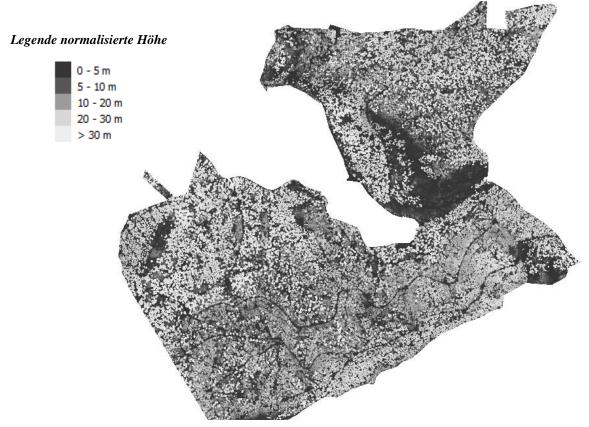


Abbildung 42: Farbcodierte Darstellung des berechneten nDOM, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

## 7.2.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

Die folgende Abbildungen 43 und 44 zeigen das abgeleitete, farbcodierte  $DSM_{max}$  mit einer Rasterweite von 0.5 m x 0.5 m, sowie das abgeleitete Modell mit einer berechneten Schummerung des Waldgebietes Toppwald-Ost.

Das Ergebnis des DSM<sub>max</sub> bildet die Fläche der oberen Baumkronen sehr gut ab (rotes Quadrat 1). Offene Bodenflächen sind erkennbar (rotes Quadrat 2) Datenlücken bilden sich besonders in den Bereichen der Streifenüberlappungen aus (rotes Quadrat 3).

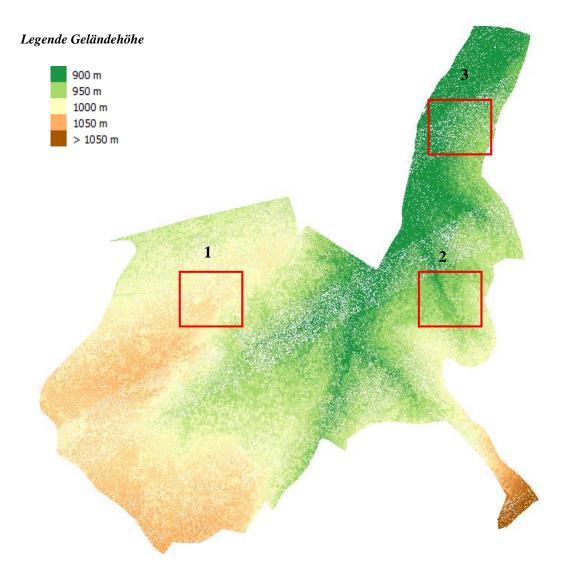


Abbildung 43: Darstellung farbcodiertes DSM<sub>max</sub>, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

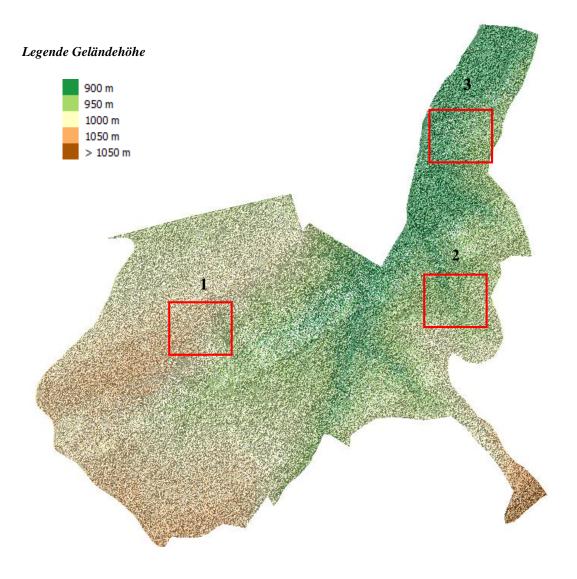
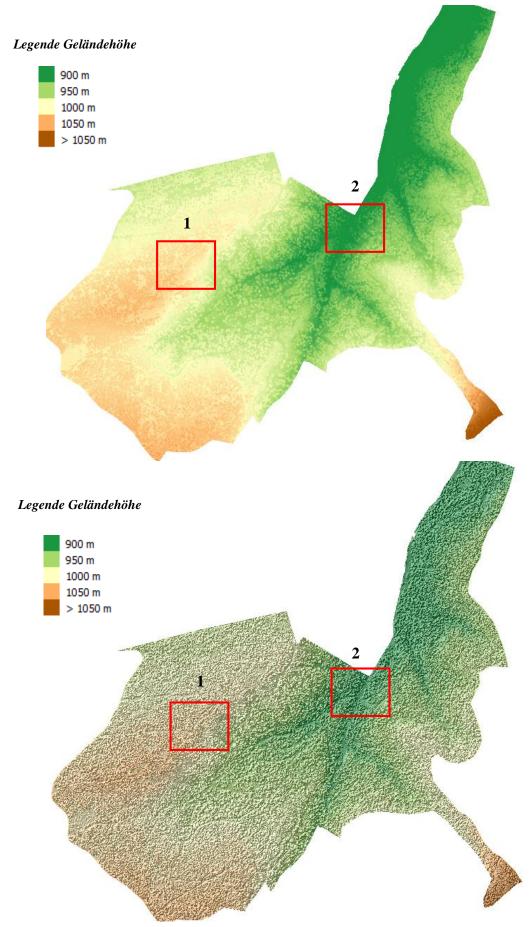


Abbildung 44: Darstellung farbcodiertes DSMmax mit Schummerung, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Die folgende Abbildungen 45 zeigt das abgeleitete, farbcodierte  $DSM_{mpl}$ , sowie eine Darstellung dieses Modells mit einer berechneten Schummerung.

Das Ergebnis des  $DSM_{mpl}$  bildet die Fläche der oberen Baumkronen besser ab, als das zuvor erstellte  $DSM_{max}$  (rotes Quadrat 1). Offene Bodenflächen, Waldlücken etc. sind optimal erkennbar (rotes Quadrat 2).



 $Abbildung~45: farbcodierte~Darstellung~des~DSM_{mpl}~werus~DSM_{mpl}~mit~Schummerung,~Waldgebiet~Toppwald-Ost,~Schweiz~Schummerung,~Waldgebiet~Toppwald-Ost,~Schweiz~Schummerung,~Waldgebiet~Toppwald-Ost,~Schweiz~Schummerung,~Waldgebiet~Toppwald-Ost,~Schweiz~Schummerung,~Waldgebiet~Toppwald-Ost,~Schweiz~Schummerung,$ 

Die folgende Abbildung 46 stellt den farbcodierten Sigma Z-Wert des Waldgebietes dar.

Das Ergebnis des Sigma Z-Wertes zeigt, wie bereits in den davor dargestellten Waldgebieten, dass in den Vegetationsbereichen (raue Oberfläche) der höchsten Wert vorliegt (rote Farbcodierung). In den Bereichen niedrigerer Vegetation (Unterholz, Dickicht, Sträucher etc.) liegt der Wert bei 0,5 (helle Farbcodierung). In Bereichen mit offenen Bodenflächen liegt der Wert bei 0,2 bis 0 (grüne - dunkelgrüne Farbcodierung).

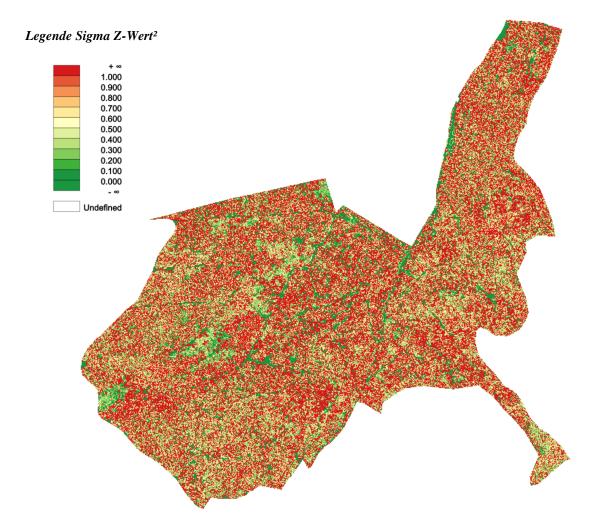


Abbildung 46: Farbcodierte Darstellung des Sigma Z-Wertes, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

Die folgende Abbildung 47 zeigt das landschaftsbezogenen, farbcodierte DOM, sowie eine Darstellung dieses Modells mit einer berechneten Schummerung. Das Ergebnis des landschaftsbezogenen DOM bildet die Fläche der oberen Baumkronen optimal ab (rotes Quadrat 1). offene Bodenflächen, Waldlücken etc. sind gut erkennbar (rotes Quadrat 2).

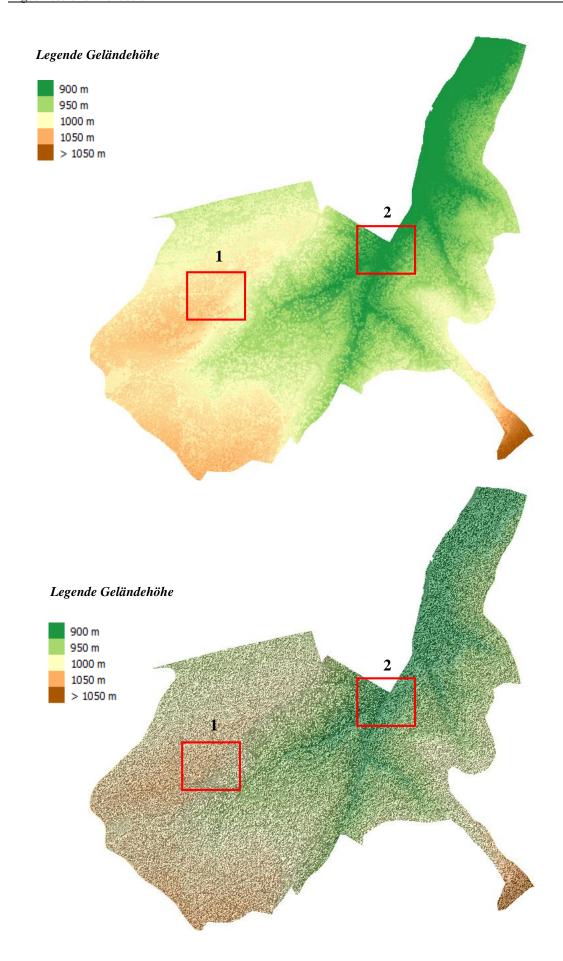


Abbildung 47: Darstellung farbcodiertes landschaftsbezogenes DOM versus DOM mit Schummerung, Waldgebiet Toppwald-West

Die folgende Abbildung 48 stellt das berechnete Ergebnis des nDOMs.

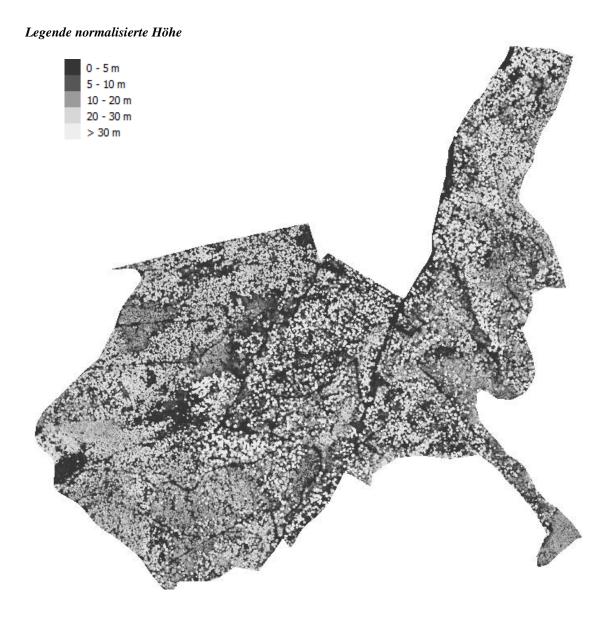


Abbildung 48: Farbcodierte Darstellung des berechneten nDOM, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

# 7.3 Schätzung der Baumhöhe

Aus den vorliegenden nDSM werden die Baumhöhen für jedes Waldgebiet in Form einer Baumhöhenkarte abgeleitet und visualisiert.

#### 7.3.1 Waldgebiet Schlegelholz

Die dargestellte, farbcodierte Abbildung 49 stellt die Baumhöhen des Waldgebietes Schlegelholz, dar.

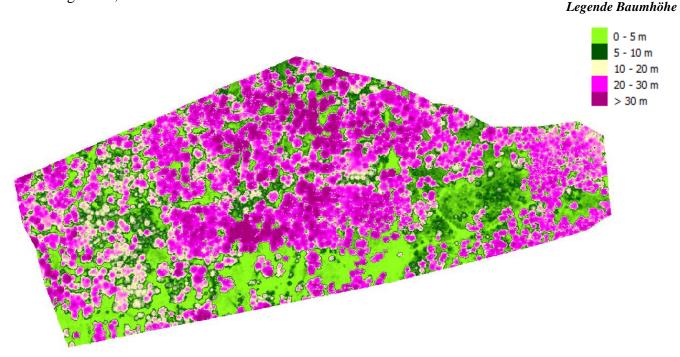


Abbildung 49: Farbcodierte Darstellung der Baumhöhen, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Das Ergebnis der Baumhöhenkarte zeigt auf, dass in diesem Waldgebiet vermehrt Baumhöhen ab einer Höhe von 20 m - 30 m zu finden sind (farbcodierte rosa Bereiche). Vereinzelt sind Baumhöhen mit einer Höhe von > 30 m zu verzeichnen (farbcodierte lila Bereiche). Außerdem fallen die grün visualisierten Gebiet auf. In diesen Bereich sind Baumhöhen zwischen 0-10 m zu finden (farbcodierte grüne und dunkelgrüne Bereiche). Baumhöhen mit einer Höhe von 10-20 m sind vereinzelt vorhanden. Die Baumhöhenkarte wird als Referenzdaten für die Einteilung der Wuchsklassen herangezogen.

## 7.3.2 Waldgebiet Maulenberg

Die dargestellte farbcodierte Abbildung 50 stellt die Baumhöhen des Waldgebietes Maulenberg in der Schweiz dar.

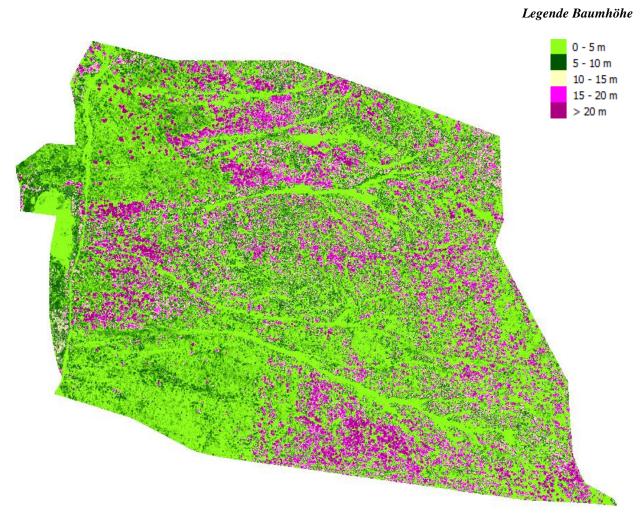


Abbildung 50: Farbcodierte Darstellung der Baumhöhen, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Das Ergebnis der Baumhöhenkarte des Waldgebietes Maulenberg zeigt auf, dass sich vermehrt Baumhöhen von 0-5 m in diesem Gebiet befinden (farbcodierte grüne Bereiche). Außerdem zeichnen sich deutlich die topographisch bedingten Waldschneisen mit einer Höhe von 0-5 m ab. Baumhöhen mit einer Höhe von 15-20 m sind in mehreren Bereichen als Baumgruppen zu verzeichnen (farbcodierte rosa Bereiche). Es zeichnen sich Einzelbaumformationen ab (fabcodierte lila Bereiche). Baumhöhen mit einer Höhe von 10-15 m sind in diesem Waldgebiet kaum zu verzeichnen.

## 7.3.3 Waldgebiet Toppwald-West

Die farbcodierte Abbildung 51 stellt die Baumhöhen des Waldgebietes Toppwald-West, in der Schweiz dar.

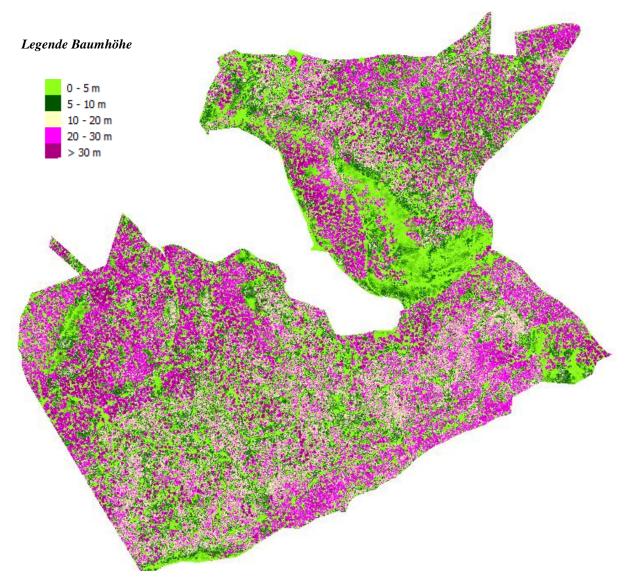


Abbildung 51: Farbcodierte Darstellung der Baumhöhen, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Das Ergebnis der farbcodierten Baumhöhenkarte in diesem Waldgebiet zeigt deutlich auf, dass sich hier vermehrt Baumhöhen mit einer Höhe von 10-30 m befinden. Deutlich in Auge fällt auch das farbcodierte grüne Gebiet auf, welches Baumhöhen von 0-5 m beinhaltet. Vereinzelt sind Waldlücken (farbcodierte grüne Bereiche) zwischen den Baumgruppen (fabcodierte rosa Bereiche) zu erkennen. Auffällige Einzelbaumformationen sind in diesem Waldgebiet nicht zu verzeichnen.

# 7.3.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

Die dargestellte, farbcodierte Abbildung 52 stellt die Baumhöhen des Waldgebietes Toppwald-Ost, in der Schweiz dar.

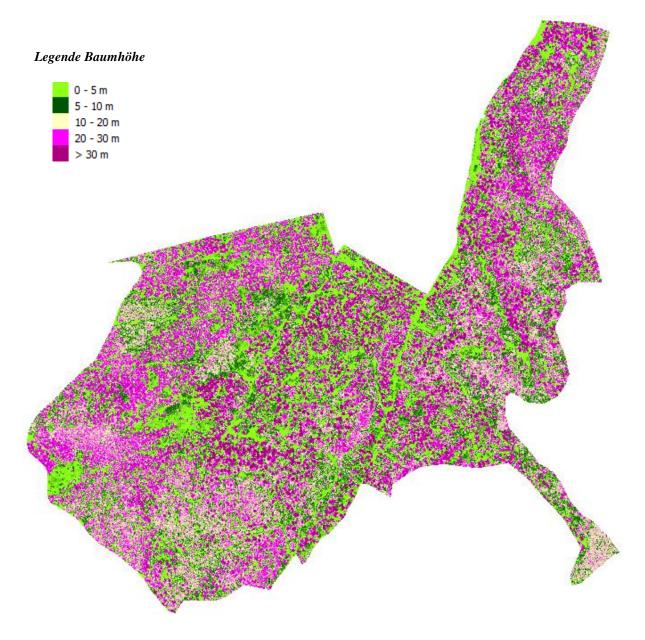


Abbildung 52: Farbcodierte Darstellung der Baumhöhen, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

Das Ergebnis der farbcodierten Baumhöhenkarte für dieses Waldgebiet zeigt ebenfalls einen dichteren Waldbestand mit einer Baumhöhe von 10 - 30 m auf. Vereinzelt sind Waldlücken, offener Boden, Waldwege zu erkennen (farbcodierte grüne Bereiche). Auch in diesem Gebiet sind keine auffälligen Einzelbaumformationen zu erkennen.

# 7.4 Schätzung der Brandgutparameter

In diesem Abschnitt werden die berechneten Ergebnisse der einzelnen Brandgutparameter dargestellt und analysiert. Eine genaue Analyse bezüglich der Waldbrandwarnstufen der dargestellten Brandgutparameter erfolgt im Kapitel 7.6.

#### 7.4.1 Kronenlänge und Kronenansatzhöhe

Im Folgenden werden die Tabellen der berechneten Quantile der Baumhöhen (95 %-Quantil), der Kronenansatzhöhen (5 %-Quantil) und die daraus berechnete Kronenlänge dargestellt. Im Anschluss wird die Kronenlänge in Form eines farbcodierten Rasterbildes mit einer Rasterweite von 5 m x 5 m für jedes Waldgebiet dargestellt.

#### 7.4.1.1 Waldgebiet Schlegelholz

Die Tabelle 13 und das farbcodierte Abbildung 54 stellt die Werte des 95 %-Quantil der Baumhöhe und des 5 %-Quantil der Kronenansatzhöhe, sowie die daraus berechnete Kronenlänge dar.

Quantile			Kronenlänge	
Baumhöhe	95 %-Quantil	41,008 m		
			35,585 m	
Kronenansatzhöhe	5 %-Quantil	21,006 m		

 $Tabelle~13:95~\%-Quantil~Baumh\"{o}he, 5~\%-Quantil~Kronenansatzh\"{o}he,~Kronenl\"{a}nge,~Waldgebiet~Schlegelholz,~Schweiz~Granen Granen Granen$ 

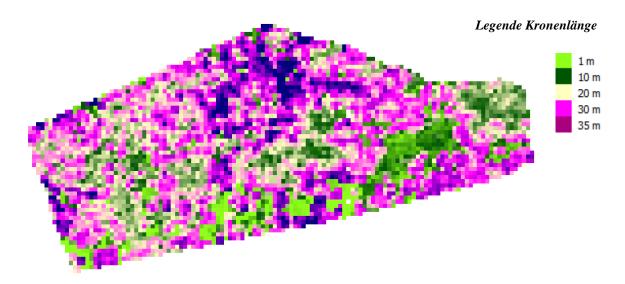


Abbildung 53: Farbcodierte Darstellung der Kronenlänge, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Wie in der Abbildung 53 ersichtlich, ergibt sich eine Kronenlänge von 35,585 m im oberen Teil des Waldgebietes. Ein Vergleich mit der berechneten Baumhöhenkarte lässt darauf schließen, dass sich in diesem Teil des Waldgebietes, die höchsten Bäume befinden.

## 7.4.1.2 Waldgebiet Maulenberg

Im Folgenden wird die Tabelle 14 und farbcodierte Abbildung 55 der Werte des 95 %-Quantil der Baumhöhe und des 5 %-Quantil der Kronenansatzhöhe, sowie der daraus berechneten Kronenlänge, dargestellt.

Quantile			Kronenlänge	
Baumhöhe	95 %-Quantil	24,488 m		
			4,428 m	
Kronenansatzhöhe	5 %-Quantil	22,733 m		

Tabelle 14: 95 %-Quantil Baumhöhe, 5 %-Quantil Kronenansatzhöhe, Kronenlänge, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

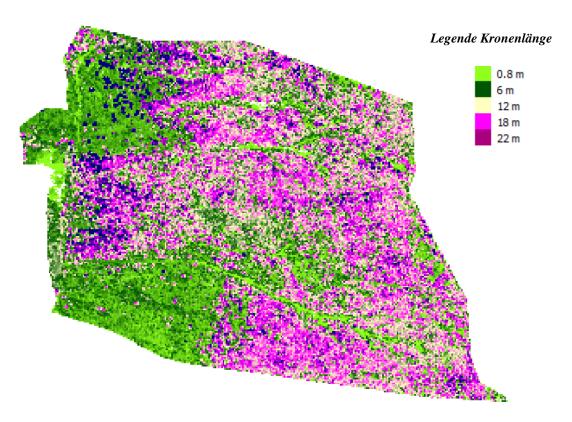


Abbildung 54: Farbcodierte Darstellung der Kronenlänge, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

In Abbildung 54 ist ersichtlich, dass sich die Kronenlänge von 4,428 m im linken Teil des Waldgebietes erstreckt.

## 7.4.1.3 Waldgebiet Toppwald-West

Die folgende Tabelle 15 und die farbcodierte Abbildung 56 stellt den Werte des 95 %-Quantil der Baumhöhe und den Wert des 5 %-Quantil der Kronenansatzhöhe und die daraus berechnete Kronenlänge dar.

Quantile			Kronenlänge	
Baumhöhe	95 %-Quantil	39,710 m		
			35,848 m	
Kronenansatzhöhe	5 %-Quantil	17,229		

Tabelle 15: 95 %-Quantil Baumhöhe, 5 %-Quantil Kronenansatzhöhe, Kronenlänge, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

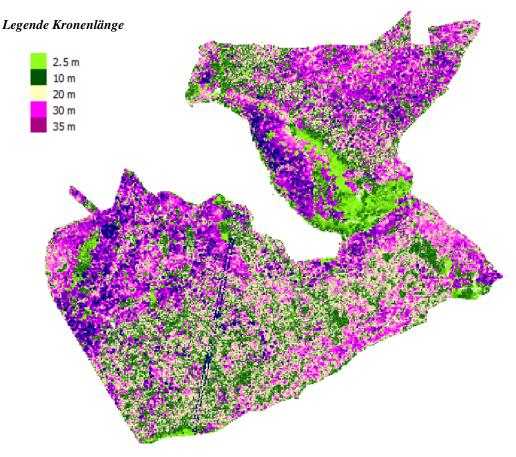


Abbildung 55: Farbcodierte Darstellung der Kronenlänge, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Wie in der Abbildung 55 ersichtlich, ergibt sich eine Kronenlänge von 35,848 m im linken und rechten oberen Teilen des Waldgebietes. Ein Vergleich mit der berechneten Baumhöhenkarte lässt darauf schließen, dass sich in diesem Teil des Waldgebietes, die höchsten Bäume befinden.

## 7.4.1.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

Die folgende Tabelle 16 und die farbcodierte Abbildung 57 stellt den Werte des 95 %-Quantil der Baumhöhe und den Wert des 5 %-Quantil der Kronenansatzhöhe und die daraus berechnete Kronenlänge dar.

Quantile			Kronenlänge	
Baumhöhe	95 %-Quantil	42,726 m		
			38,275 m	
Kronenansatzhöhe	5 %-Quantil	18,208 m		

Tabelle 16: 95 %-Quantil Baumhöhe, 5 %-Quantil Kronenansatzhöhe, Kronenlänge, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

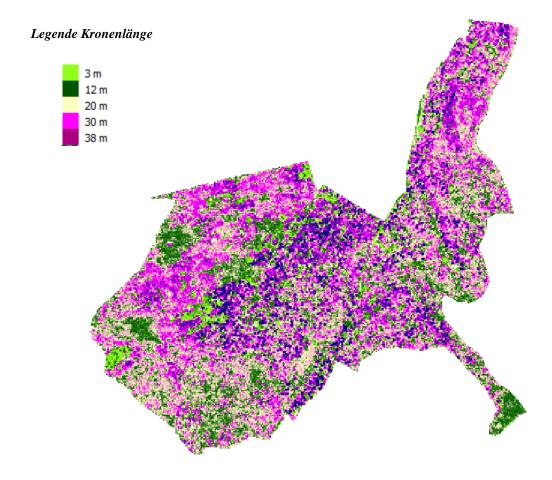


Abbildung 56: Farbcodierte Darstellung der Kronenlänge BH Q:95% / KA Q:5%, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

In Abbildung 56 ist ersichtlich, dass sich die Kronenlänge von 38,275 m in den mittleren Teilen des Waldgebietes deutlich abzeichnet. Auch im rechten oberen Teil sind Bäume mit dieser Kronenlänge zu verzeichnen.

## 7.4.2 Kronenschlussgrad und Waldlücken

Im Folgenenden wird der Kronenschlussgrad und die Waldlücken in Form eines Rasterbildes für jedes Waldgebiet mit einer Rasterweite von 5 m x 5m dargestellt. Die folgenden Darstellungen stellen den Kronenschlussgrad, sowie den Grad der Waldlücken für jedes Waldgebiet in Prozent dar.

#### 7.4.2.1 Waldgebiet Schlegelholz

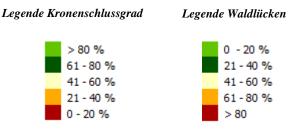


Abbildung 57: Farbcodierte Darstellung Kronenschlussgrad versus Waldlücken Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Interpretation Kronenschlussgrad Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz:

Die dargestellte Abbildung 57 zeigt fast im gesamten Waldgebiet einen Kronenschlussgrad von über 80 % an, was auf einen sehr dicht besiedelten Wald schließen lässt. Vereinzelt sind Pixel zu erkennen, die im Bereich von 61-80 % angesiedelt sind. Am unteren Rand des Gebietes ist ein Kronenschlussgrad von 0-20 % zu verzeichnen, was auf Waldlücken, offener Boden etc. schließen lässt.

Interpretation Bedeckungsgrad Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz:

Die dargestellte Abbildung 57 zeigt auf, dass sich nur im unteren Teil des Waldgebietes Waldlücken mit einem Wert > 80 % befinden. In diesem Gebiet wird auf offenen, nackten Boden, etc. geschlossen.

# 7.4.2.2 Waldgebiet Maulenberg

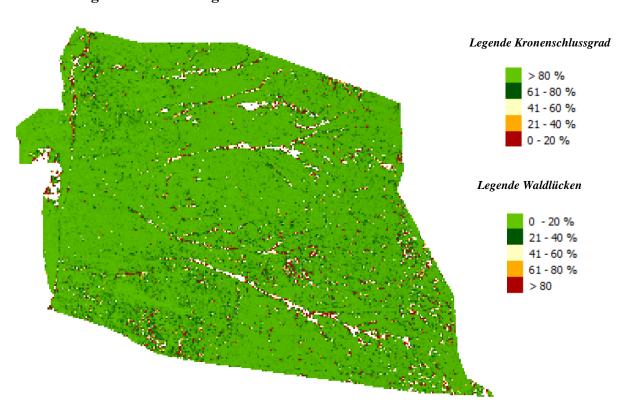


Abbildung 58: Farbcodierte Darstellung Kronenschlussgrad versus Waldlücken Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Interpretation Kronenschlussgrad Waldgebiet Maulenberg, Schweiz:

Die dargestellte Abbildung 58 zeigt ebenfalls im gesamten Waldgebiet einen Kronenschlussgrad von über 80 % an, was auch hier auf dichten Bewuchs schließen lässt. Vereinzelt sind Pixelwerte zu erkennen, die im Bereich von 61-80 % angesiedelt sind. Ebenso sind Pixelwerte im Bereich 0-20 % zu verzeichnen. Die in diesem Gebiet auffälligen Waldschneisen sind mit keinem Pixelwert belegt.

Interpretation Bedeckungsgrad Waldgebiet Maulenberg, Schweiz:

Die dargestellte Abbildung 58 zeigt vereinzelt Waldlücken mit einem Wert > 80 % auf. Das gesamte Gebiet weist einen Waldlückenanteil mit einem Wert von 0-20 % auf.

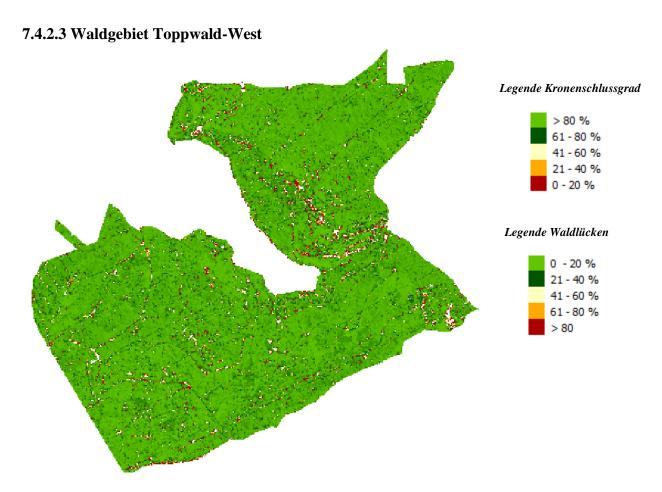


Abbildung 59: Farbcodierte Darstellung Kronenschlussgrad versus Waldlücken Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Interpretation Kronenschlussgrad Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz:

Die Abbildung 61 zeigt ebenfalls im gesamten Waldgebiet einen Kronenschlussgrad von über 80 % an, was auch hier auf dichten Bewuchs schließen lässt. Ebenso sind Pixelwerte im Bereich 0-20 % zu verzeichnen, was auf Waldlücken schließen lässt. Waldwege bilden sich im gesamten Gebiet ab. Diese Bereiche sind mit keinen Pixelwert belegt.

Interpretation Bedeckungsgrad Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz:

Auch dieses Waldgebiet weist einen geringen Waldlückenanteil auf (0-20 %).

# 7.4.2.3 Waldgebiet Toppwald-Ost

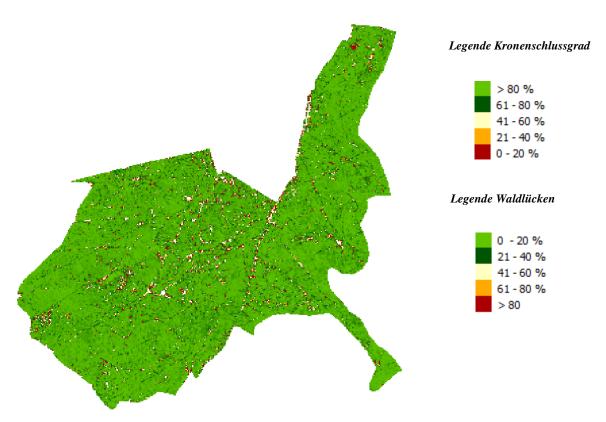


Abbildung 60: Farbcodierte Darstellung Kronenschlussgrad versus Waldlücken Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

Interpretation Kronenschlussgrad und Bedeckungsgrad Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz:

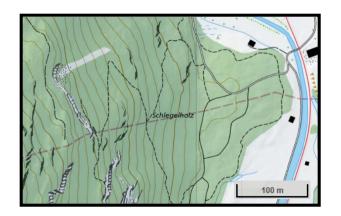
Wie bereits in den vorher dargestellten Testgebieten ersichtlich ist, wird auch hier ein sehr hoher Kronenschlussgrad erkannt werden. Im Gegenzug dazu ergibt sich ein sehr geringer Waldlückenanteil.

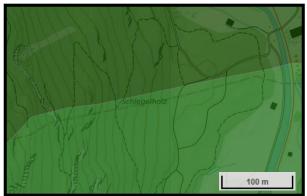
#### 7.4.3 Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen

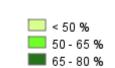
Im Folgenden wird für jedes Waldgebiet der Baumartenanteil mit den in Abschnitt 6.4.4 aufgezeigten Referenzdaten bestimmt.

## 7.4.3.1 Waldgebiet Schlegelholz

Referenzdaten des BAFU in der Schweiz – Nadelholzanteil







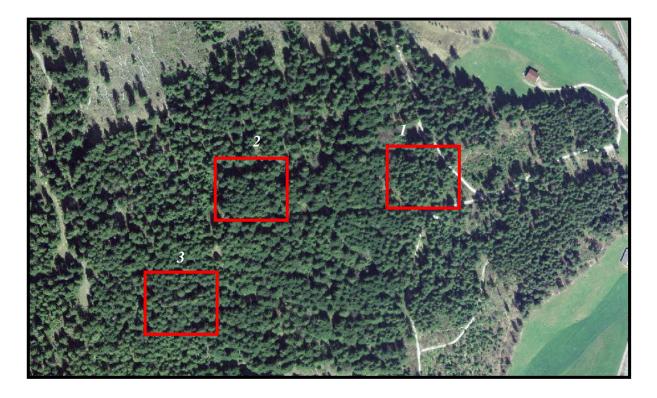
Legende Nadelholzanteil

Abbildung 61: Ausschnitt Topographische Karte versus Topographische Karte mit Layer Nadelholzanteil,

Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Es wird zunächst ein Ausschnitt der topographischen Karte (linke Abbildung) des BAFU in der Schweiz dargestellt, um die Lage des Waldgebietes Schlegelholz in der Schweiz zu verdeutlichen. In einem nächsten Ausschnitt des Waldgebietes, wird die topographische Karte mit einem Layer überdeckt (rechte Abbildung). Dieser Layer stellt den in der Legende prozentualen Nadelholzanteil des Waldgebietes Schlegelholz in der Schweiz dar. Es ist ersichtlich, dass das Waldgebiet bezüglich der Nadelholzverteilung in zwei Teile aufteilt ist. Der eine Teil dieses Gebietes besteht zu 65 – 80 % aus Nadelhölzern, die andere Hälfte zu einem Anteil von über 80 %.

# Referenz daten-Orthophotos



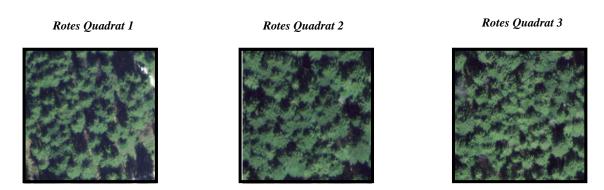


Abbildung 62: Ausschnitt Orthophoto versus detaillierte Waldausschnitte des Orthophotos Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Die Abbildung 62 zeigt einen Ausschnitt des Orthophotos, des Waldgebietes Schlegelholz in der Schweiz. Stichprobenartig wird innerhalb des Orthophotos 3 Ausschnitte markiert, um zu prüfen, ob Nadelholzanteil vorliegt. In jedem Ausschnitt ist klar an der Baumspitze und der Baumkrone erkennbar, dass es sich hierbei um die Baumart Nadelholz handelt (Interpretationsschlüssel nach Albertz (2009), siehe Abschnitt 6.4.4.2).

## Referenzdaten – Querprofile des Waldgebietes

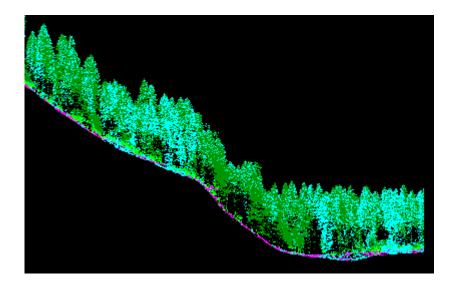


Abbildung 63: Querprofil des gesamten Waldgebietes; Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Die Abbildung 63 zeigt das Querprofil des gesamten Waldgebietes Schlegelholz. Hier sind bereits an der Form der Bäume, den Baumspitzen und der Baumbelaubung erkennbar, dass es sich hierbei um einen Nadelwald handelt.

Die Abbildung 64 zeigt die detaillierten Ausschnitte der vorher dargestellten Orthophoto-Ausschnitte als Querprofile.

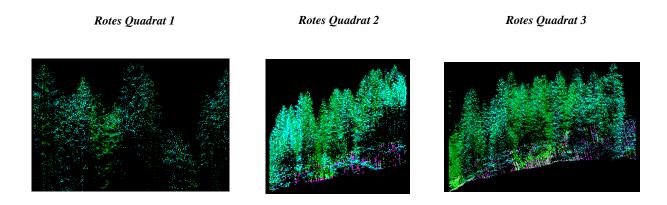
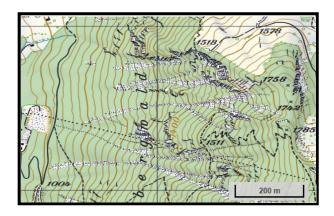


Abbildung 64: Detaillierte Querprofile der Stichproben des Orthophotos, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

Auch in den detaillierten Ausschnitten 68 der Querprofile ist klar an der Baumform und der Baumkrone erkennbar, dass es sich in dem Waldgebiet überwiegend Nadelholz befindet.

# 7.4.3.2 Waldgebiet Maulenberg

Referenzdaten des BAFU in der Schweiz – Nadelholzanteil



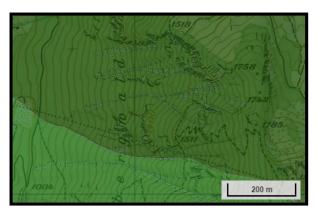
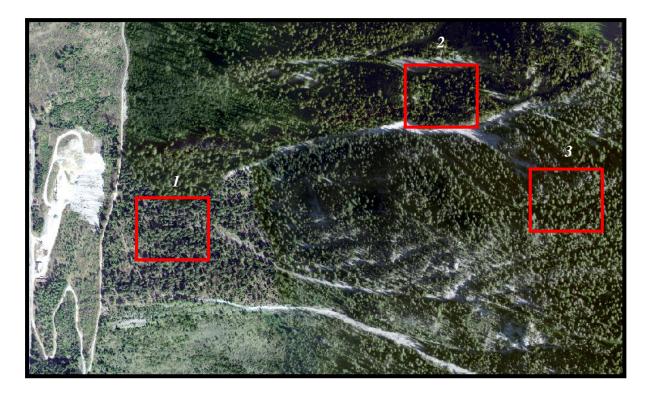




Abbildung 65: Ausschnitt Topographische Karte versus Topographische Karte mit Layer Nadelholzanteil,
Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Es wird ebenfalls ein Ausschnitt der topographischen Karte (linke Abbildung), sowie ein Layer, der den prozentualen Anteil des Nadelholzanteils des Waldgebietes Maulenberg in der Schweiz (rechte Abbildung), aufgezeigt. Auch in diesem Waldgebiet ist ersichtlich, dass sich der Layer in zwei Kategorien teilt. Der eine Teil dieses Gebietes besteht zu 65 – 80 % aus Nadelhölzern, die andere Hälfte zu einem Anteil von über 80 %.

#### Referenzdaten -Orthophotos



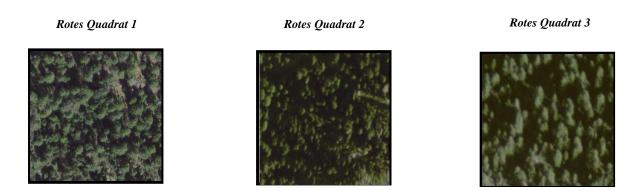


Abbildung 66: Ausschnitt Orthophoto versus detaillierte Waldausschnitte des Orthophotos Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Die Abbildung 66 zeigt einen Ausschnitt des Orthophotos des Waldgebietes Maulenberg in der Schweiz. Stichprobenartig wird innerhalb des Orthophotos 3 Ausschnitte markiert, um zu prüfen, ob Nadelholzanteil vorliegen. In den beiden Ausschnitt 1 und 2 ist klar an der Baumspitze und der Baumkrone erkennbar, dass es sich hierbei um die Baumart Nadelholz handelt (Interpretationsschlüssel nach Albertz (2009), siehe Abschnitt 6.4.4.2). Im Ausschnitt 3 ist nicht eindeutig, ob es sich hierbei nur um Nadelholzanteil handelt. (runde Kronen). Aufgrund dieses Ergebnisses wurden weitere Stichproben genommen. Dieser ergaben das Ergebnis, dass in diesem Waldgebiet überwiegend Nadelholz zu verzeichnen ist.

# Referenzdaten -Querprofile des Waldgebietes

Die folgende Abbildung 67 zeigt einen Ausschnitt des Querprofils des gesamten Waldgebietes. Auch in diesem Fall ist bereits an der Form der Bäume und den Baumspitzen erkennbar, dass es sich hierbei um einen Nadelwald handelt.

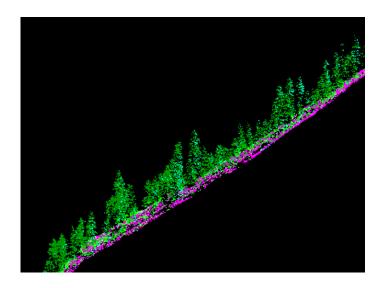


Abbildung 67: Querprofil des gesamten Waldgebietes; Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

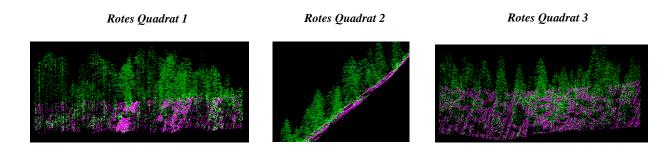
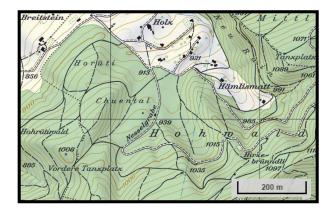


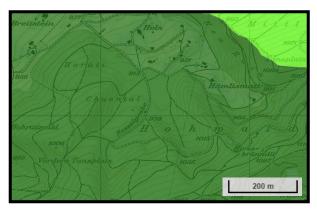
Abbildung 68: Detaillierte Querprofile der Stichproben des Orthophotos, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Auch in den detaillierten Ausschnitten 68 der Querprofile ist klar erkennbar, dass es sich in dem Waldgebiet überwiegend Nadelholz befindet.

# 7.4.3.3 Waldgebiet Toppwald-West

Referenzdaten des BAFU in der Schweiz - Nadelholzanteil





Legende Nadelholzanteil

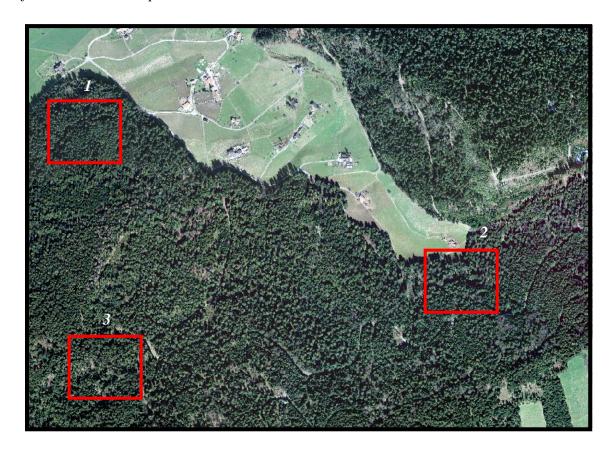


Abbildung 69: Ausschnitt Topographische Karte versus Topographische Karte mit Layer Nadelholzanteil,

Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Auch hier wird ein Ausschnitt einer topographischen Karte (linke Abbildung), sowie ein Layer, der den prozentualen Anteil des Nadelholzanteils dieses Waldgebietes darstellt (rechte Abbildung), aufgezeigt. Mit Hilfe des Layers ist ersichtlich, dass das Waldgebiet überwiegend 65 – 80 % Nadelholz beheimatet. Ein geringer Teil dieses Waldgebietes ist der Kategorie 50 – 65 % zuzuordnen.

# Referenzdaten - Orthophotos



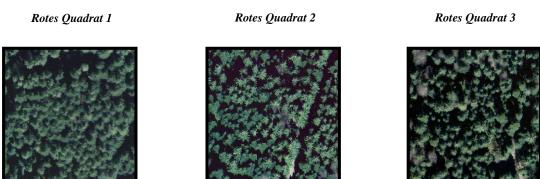


Abbildung 70: Ausschnitt Orthophoto versus detaillierte Waldausschnitte des Orthophotos

Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Die Abbildung 70 zeigt einen Ausschnitt des Orthophotos des Waldgebietes Toppwald-West in der Schweiz. Stichprobenartig wird innerhalb des Orthophotos 3 Ausschnitte markiert, um zu prüfen, ob Nadelholzanteil vorliegt. In allen 3 Ausschnitt ist klar an der Baumspitze und der Baumkrone erkennbar, dass es sich hierbei um die Baumart Nadelholz handelt (Interpretationsschlüssel nach Albertz (2009), siehe Abschnitt 6.4.4.2).

## Referenzdaten -Querprofile des Waldgebietes

Die folgende Abbildung 71 zeigt einen Ausschnitt des Querprofils des gesamten Waldgebietes Toppwald-West. In diesem Fall ist bereits an der Form der Bäume, den Baumspitzen und der Baumbelaubung erkennbar, dass es sich hierbei um einen Nadelwald handelt

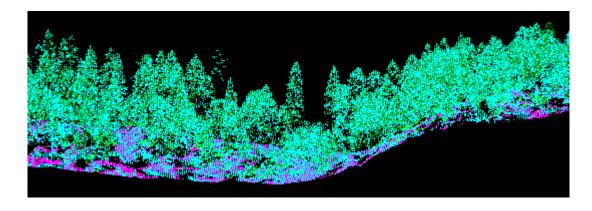


Abbildung 73: Ausschnitt des Querprofils des gesamten Waldgebietes; Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

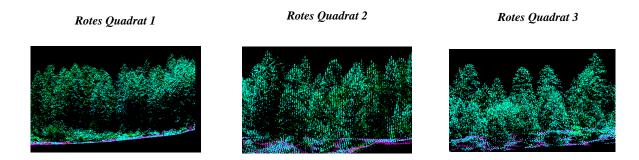


Abbildung 72: Detaillierte Querprofile der Stichproben des Orthophotos, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Auch in den detaillierten Ausschnitten 72 der Querprofile ist klar erkennbar, dass es sich in dem Waldgebiet überwiegend Nadelholz befindet.

# 7.4.3.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

Referenzdaten des BAFU in der Schweiz – Nadelholzanteil

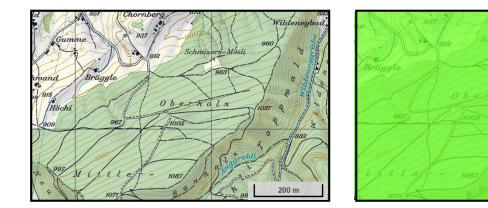
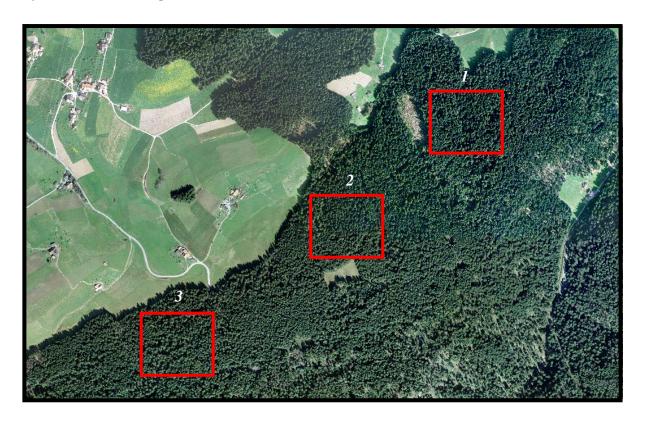




Abbildung 73: Ausschnitt Topographische Karte versus Topographische Karte mit Layer Nadelholzanteil,
Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

Auch hier wird ein Ausschnitt einer topographischen Karte (linke Abbildung), sowie ein Layer, der den prozentualen Anteil des Nadelholzanteils dieses Waldgebietes darstellt (rechte Abbildung), aufgezeigt. Das Gebiet besteht überwiegend zu 50-65 % aus Nadelhölzer., Ein ganz geringer Teil dieses Waldgebietes ist der Kategorie 65-80 % zuzuordnen.

# Referenzdaten - Orthophotos



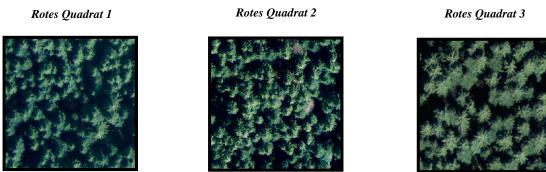


Abbildung 74: Ausschnitt Orthophoto versus detaillierte Waldausschnitte des Orthophotos

Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Die Abbildung 74 zeigt einen Ausschnitt des Orthophotos des Waldgebietes Toppwald-Ost in der Schweiz. Stichprobenartig wird innerhalb des Orthophotos 3 Ausschnitte markiert, um zu prüfen, ob Nadelholzanteile vorliegen. In allen 3 Ausschnitt ist klar an der Baumspitze und der Baumkrone erkennbar, dass es sich hierbei um die Baumart Nadelholz handelt (Interpretationsschlüssel nach Albertz (2009), siehe Abschnitt 6.4.4.2).

## Referenzdaten - Querprofile

Die folgende Abbildung 75 zeigt einen Ausschnitt des Querprofils des gesamten Waldgebietes. Auch in diesem Fall ist bereits an der Form der Bäume, den Baumspitzen und der Baumbelaubung erkennbar, dass es sich hierbei um einen Nadelwald handelt.

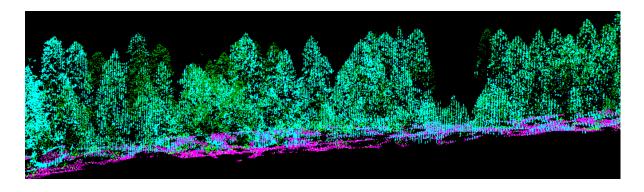


Abbildung 75: Ausschnitt des Querprofils des gesamten Waldgebietes; Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

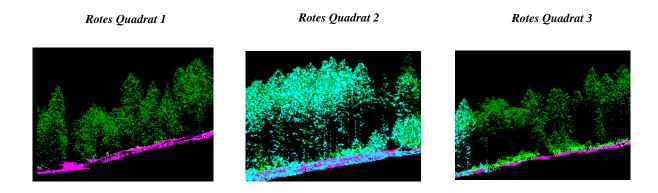


Abbildung 76: Detaillierte Querprofile der Stichproben des Orthophotos, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

Auch in den detaillierten Ausschnitten 76 der Querprofile ist klar erkennbar, dass es sich in dem Waldgebiet überwiegend Nadelholz befindet.

## 7.4.4 Einteilung des Waldbestandes in Wuchsklassen

In diesem Abschnitt werden die abgeleiteten Wuchskarten für jedes Testgebiet dargestellt.

## 7.4.4.1 Waldgebiet Schlegelholz

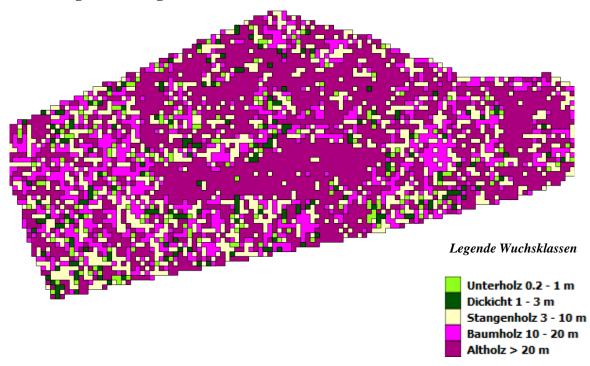


Abbildung 77: Wuchsklassenkarte des Waldgebietes Schlegelholz, Schweiz

Die dargestellte Abbildung 77 zeigt die Wuchsklassen des Waldgebietes Schlegelholz, in der Schweiz. Der dominierende Anteil in diesem Waldgebiet, ist die Wuchsklasse Altholz (farbcodierte lila Bereiche), der sich deutlich im mittleren und oberen Teil der Abbildung abzeichnet. Die Wuchsklassen Baumholz und Stangenholz sind im gesamten Gebiet vorhanden (farbcodierte rosa und helle Bereiche). Vereinzelnd sind die beiden Wuchsklassen Unterholz und Dickicht zu erkennen. Diese Wuchsklassen sind im ganzen Gebiet als einzelne farbcodierte grüne und dunkelgrüne Pixel abgebildet. Als Referenzdaten wird die berechnete Baumhöhenkarte herangezogen. Ein Vergleich mit dieser Karte ergab für die Wuchsklassen Altholz, Baumholz und Stangenholz sehr gute Übereinstimmungen. Für die beiden Wuchsklassen Unterholz und Dickicht werden keine optimalen Ergebnisse erzielt. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die berechneten Wuchsklassen aus einer einfachen Methode abgeleitet werden, jedoch sind die aufgezeigten Ergebnisse für die Interpretation der Waldbrandgefahr ausreichend.

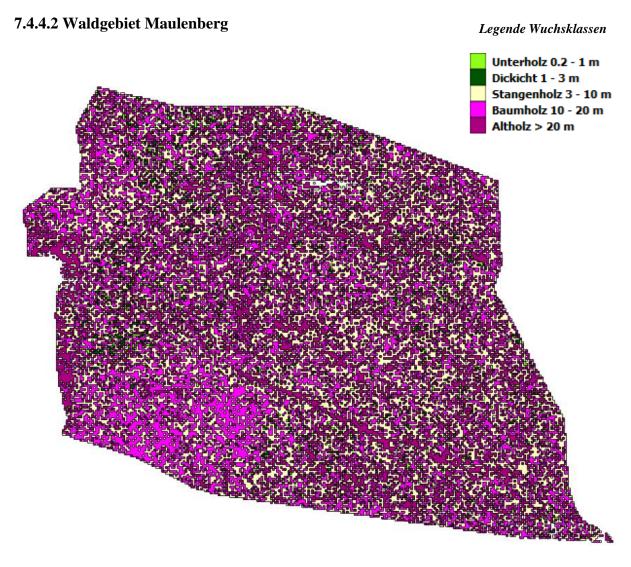


Abbildung 78: Wuchsklassenkarte des Waldgebietes Maulenberg, Schweiz

Die Abbildung 78 stellt die Wuchsklassenkarte des Waldgebietes Maulenberg in der Schweiz dar. Die Wuchsklassen Stangenholz, Baumholz und Altholz zeigen eine regelmäßige Verteilung über das gesamte Waldgebiet auf (farbcodierte helle, rosa, lila Bereiche). Im linken unteren Teil der Abbildung 82 ist ein dominierender Anteil der Wuchsklasse Baumholz (farbcodierte rosa Bereiche) erkennbar. Auch in diesem Waldgebiet zeigen die drei Wuchsklassen Stangenholz, Baumholz und Altholz gute Ergebnisse bezüglich der Referenzdaten Baumhöhe. Die Wuchsklasse Altholz zeigt sogar Übereinstimmungen im Bereich der Einzelbaumformationen (linker oberer Teil der Abbildung). Die Wuchsklassen Unterholz und Dickicht zeigen auch in dieser Karte keine optimalen Ergebnisse auf.

## 7.4.4.3 Waldgebiet Toppwald-West

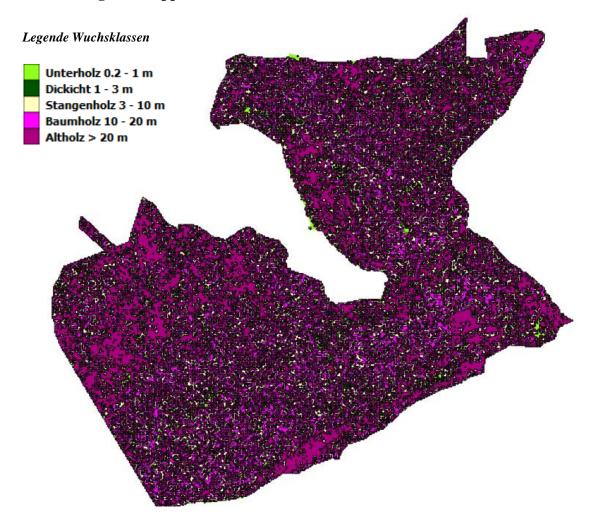


Abbildung 79: Wuchsklassenkarte des Waldgebietes Toppwald-Ost, Schweiz

Die Abbildung 79 stellt die Wuchsklassenkarte des Waldgebietes Toppwald-West in der Schweiz dar. Die Wuchsklassen Baumholz und Altholz zeigen auch hier eine regelmäßige Verteilung über das gesamte Waldgebiet auf (farbcodierte rosa, lila Bereich) und stellen somit die zwei dominanten Wuchsklassen für dieses Gebiet dar. In der Abbildung 83 ist zu erkennen, dass vereinzelt dominante Gebiete der Wuchsklasse Baumholz (farbcodierte rosa Bereiche) vorhanden sind. Die Wuchsklassen Baumholz und Altholz stimmen sehr gut mit den in den Referenzdaten der Baumhöhen klassifizierten Höhen überein. Auch die Wuchsklassen Unterholz, Dickicht und Stangenholz liefern für dieses Waldgebiet übereinstimmende Ergebnisse.

# 7.4.4.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

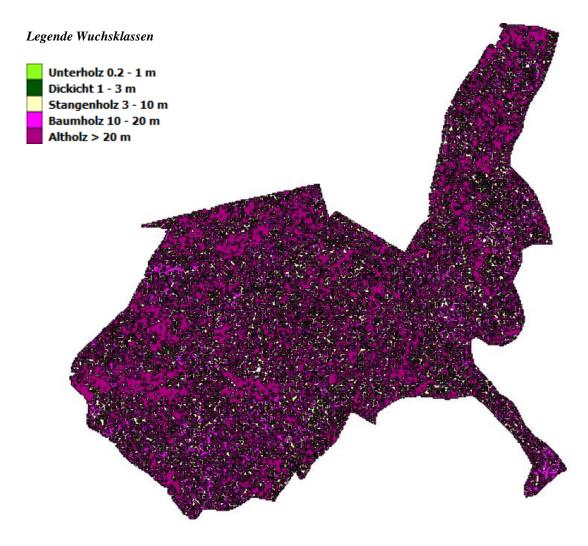


Abbildung 80: Wuchsklassenkarte des Waldgebietes Toppwald-West, Schweiz

Die Abbildung 80 stellt die Wuchsklassenkarte des Waldgebietes Toppwald-Ost in der Schweiz dar. Die Wuchsklassen Baumholz und Altholz zeigen auch hier eine regelmäßige Verteilung über das gesamte Waldgebiet auf (farbcodierte rosa, lila Bereich) und stellen somit die zwei dominanten Wuchsklassen für dieses Gebiet dar. Ebenfalls ist in der Abbildung 84 zu erkennen, dass vereinzelt dominante Gebiete der Wuchsklasse Baumholz (farbcodierte rosa Bereiche) vorhanden sind. Die Wuchsklassen Baumholz und Altholz stimmen sehr gut mit den in den Referenzdaten der Baumhöhen klassifizierten Höhen überein. Auch die Wuchsklassen Unterholz, Dickicht und Stangenholz liefern für dieses Waldgebiet gute Ergebnisse.

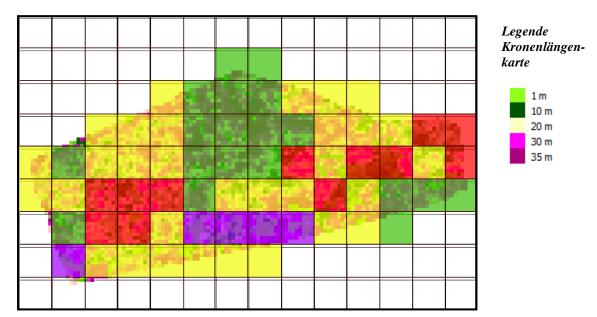
# 7.5 Ableitung der Waldbrandgefahrenstufen

Im Folgenden werden die abgeleiteten farbcodierten Brandgutkarten der einzelnen Brandgutparameter dargestellt. Als Kartengrundlage zur Ableitung und Interpretation dienen die zuvor berechneten Karten der jeweiligen Brandgutparameter. Für die Nadelbaumklassifizierung wird das erstelle DOM als Kartengrundlage herangezogen und entsprechend den Ergebnissen angepasst.

## 7.5.1 Brandgutkarten Kronenlänge

#### 7.5.1.1 Waldgebiet Schlegelholz

Die Abbildung 81 stellt die Brandgutkarte der Kronenlänge des 95%-Quantils der Baumhöhe und des 5 %-Quantils der Kronenuntergrenze des Waldgebiets dar.



# Legende Waldbrandwarnsystem Kronenlänge

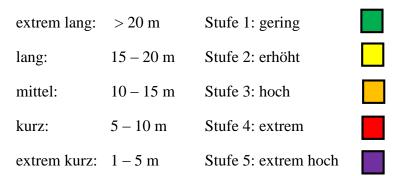
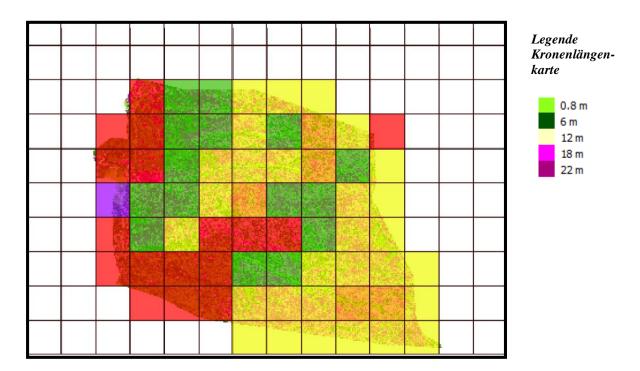


Abbildung 81: Brandgutkarte Kronenlänge (95%-Q: BH / 5%-Q: KU) Waldgebiet, Schlegelholz, Schweiz

In der Abbildung 81 ist ersichtlich, dass die Stufe 1 *geringe* Waldbrandgefahr (Kronenlänge berechnetes Quantil) und die Stufe 2 *erhöhte* Waldbrandgefahr überwiegen. Teile dieses Gebietes sind mit der Stufe 4 *extreme* und der Stufe 5 *extrem hohe* Waldbrandgefahr klassifiziert worden. Die Stufe 3 *hohe* Waldbrandgefahr wird in diesem Gebiet nicht klassifiziert.

#### 7.5.1.2 Waldgebiet Maulenberg

Die Abbildung 82 stellt die Brandgutkarte der Kronenlänge des 95%-Quantils der Baumhöhe und des 5 %-Quantils der Kronenuntergrenze des Testgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Kronenlänge

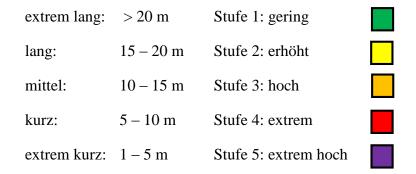
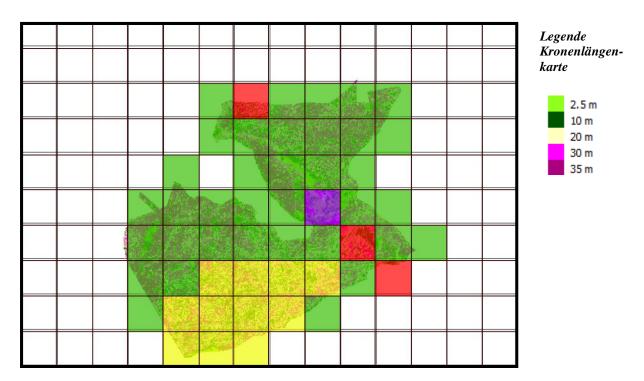


Abbildung 82: Brandgutkarte Kronenlänge (95%-Q: BH / 5%-Q: KU), Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

In der Abbildung 82 ist ersichtlich, dass die Stufe 2 *erhöhte* Waldbrandgefahr überwiegt. Teile sind mit der Stufe 1 *geringe* (Kronenlänge berechnetes Quantil) und der Stufe 4 *extreme* Waldbrandgefahr klassifiziert worden. Die Stufe 3 *hohe* und die Stufe 5 *extrem hohe* Waldbrandgefahr sind nur vereinzelnd klassifiziert worden.

## 7.5.1.3 Waldgebiet Toppwald-West

Die Abbildung 83 stellt die Brandgutkarte der Kronenlänge des 95%-Quantils der Baumhöhe und des 5 %-Quantils der Kronenuntergrenze des Waldgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Kronenlänge

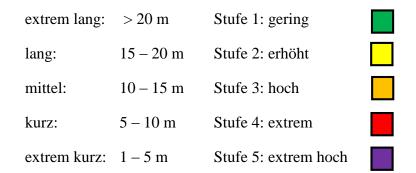
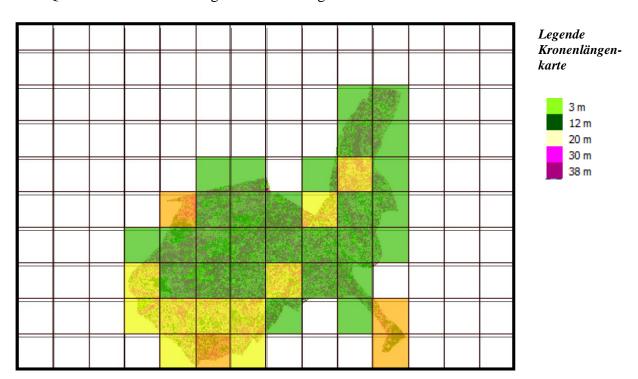


Abbildung 83: Brandgutkarte Kronenlänge (95%-Q: BH / 5%-Q: KU), Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

In der Abbildung 83 ist ersichtlich, dass die Stufe 1 *geringe* Waldbrandgefahr überwiegt (Kronenlänge berechnetes Quantil). Teile sind mit der Stufe 2 *erhöhte*, der Stufe 4 *extreme* und der Stufe 5 *extrem hohe* Waldbrandgefahr klassifiziert worden. Die Stufe 3 *hohe* Waldbrandgefahr ist nicht klassifiziert worden.

## 7.5.1.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

Die Abbildung 84 stellt die Brandgutkarte der Kronenlänge des 95%-Quantils der Baumhöhe und des 5 %-Quantils der Kronenuntergrenze des Waldgebietes dar



Legende Waldbrandwarnsystem Kronenlänge

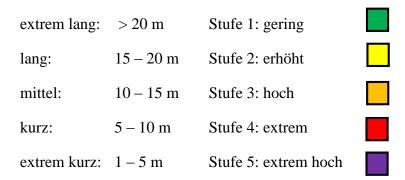


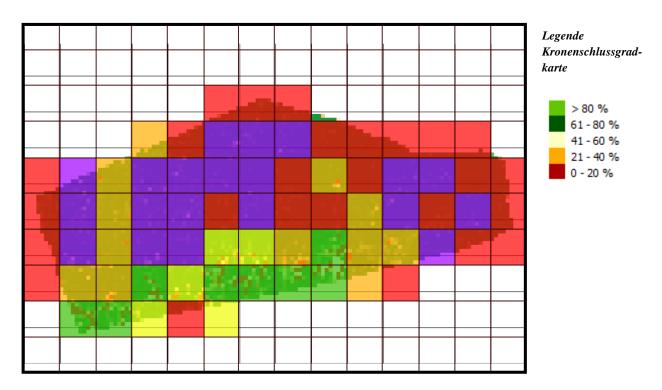
Abbildung 84: Brandgutkarte Kronenlänge (50%-Q: BH / 50%-Q: KU), Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

In der Abbildung 84 ist ersichtlich, dass die Stufe 1 *geringe* Waldbrandgefahr überwiegt (Kronenlänge berechnetes Quantil). Teile sind mit der Stufe 2 *erhöhte* und der Stufe 3 *hohe* Waldbrandgefahr klassifiziert. Die Stufe 4 *extreme* und die Stufe 5 *extrem hohe* Waldbrandgefahr sind nicht klassifiziert worden.

## 7.5.2 Brandgutkarten Kronenschlussgrad

## 7.5.2.1 Waldgebiet Schlegelholz

Die Abbildung 85 stellt die Brandgutkarte des Kronenschlussgrades des Testgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Kronenschlussgrad

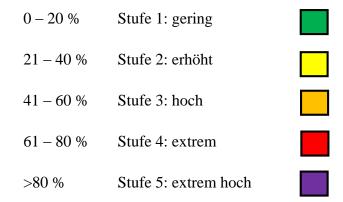
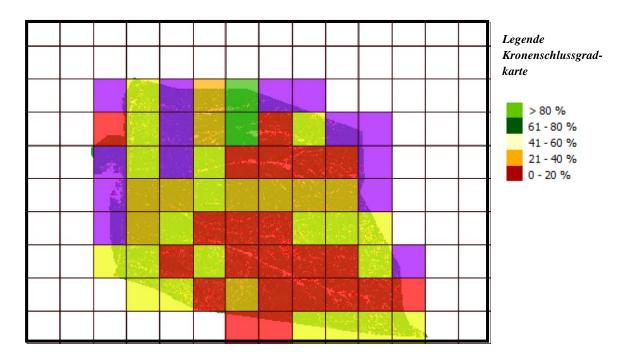


Abbildung 85: Brandgutkarte Kronenschlussgrad, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

In der Abbildung 85 ist ersichtlich, dass die Stufe 4 *extreme* Waldbrandgefahr und die Stufe 5 *extrem hohe* Waldbrandgefahr überwiegen Diese Gebiete stellen einen Kronenschlussgrad von mindestens 61 % dar. (dichter Wald). Die Stufe 1 *geringe*, die Stufe 2 *erhöhte* und die Stufe 3 *hohe* Waldbrandgefahr sind an den Stellen, wo offener nackter Boden, Waldlücken, Waldwege etc. zu finden sind, zu verzeichnen (Kronenschlussgrad von 0 – 40 %).

#### 7.5.2.2 Waldgebiet Maulenberg

Die Abbildung 86 stellt die Brandgutkarte des Kronenschlussgrades des Testgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Kronenschlussgrad

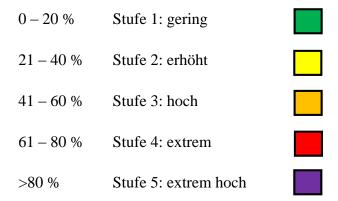
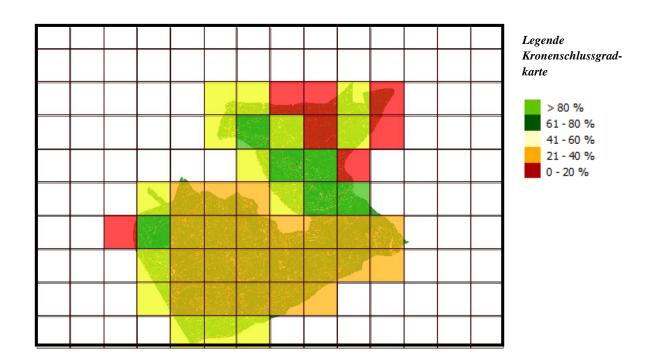


Abbildung 86: Brandgutkarte Kronenschlussgrad, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Auch in der Abbildung 86 ist ersichtlich, dass die Stufe 4 *extreme* Waldbrandgefahr und die Stufe 5 *extrem hohe* Waldbrandgefahr überwiegen (dichter Waldanteil). Die Stufe 1 *geringe*, die Stufe 2 *erhöhte* und die Stufe 3 *hohe* Waldbrandgefahr sind zum Teil klassifiziert worden. Diese Gebiete stellen offenen, nackten Boden, aber auch im speziellen in diesem Gebiet topographisch bedingte Waldschneisen dar.

#### 7.5.2.3 Waldgebiet Toppwald-West

Die Abbildung 87 stellt die Brandgutkarte des Kronenschlussgrades dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Kronenschlussgrad

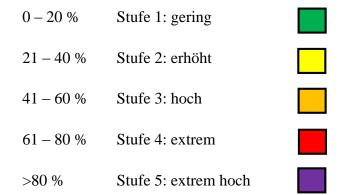
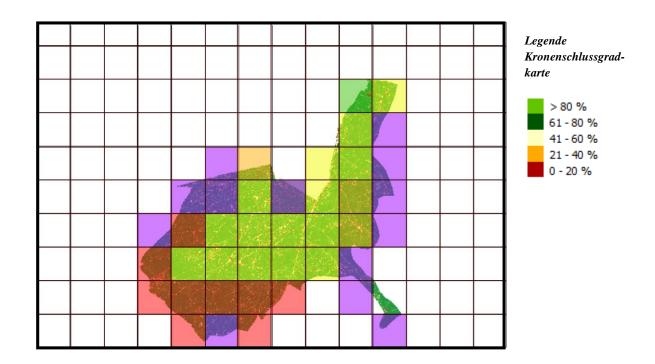


Abbildung 87: Brandgutkarte Kronenschlussgrad, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

In der Abbildung 87 ist ersichtlich, dass die Stufe 3 *hohe* Waldbrandgefahr überwiegt. (Kronenschlussgrad von 46 – 60%). Die Stufe 1 *geringe*, die Stufe 2 *erhöhte* und die Stufe 3 *hohe* Waldbrandgefahr sind zum Teil klassifiziert worden. Diese Gebiete stellen offenen, nackten Boden, Waldwege etc. dar. Die Stufe 5 *extreme* Waldbrandgefahr wurde nicht klassifiziert.

#### 7.5.2.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

Die Abbildung 88 stellt die Brandgutkarte des Kronenschlussgrades dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Kronenschlussgrad

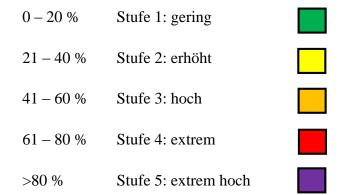


Abbildung 88: Brandgutkarte Kronenschlussgrad, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

In der Abbildung 88 ist ersichtlich, dass die Stufe 2 *erhöhte*, die Stufe 4 *extreme* und die Stufe 5 *extrem hohe* Waldbrandgefahr überwiegen (Kronenschlussgrad von 41 – >80%). Durch das gesamte Gebiet erstrecken sich Waldwege. Aus diesem Grund ist ein geringerer Kronenschlussgrad vorhanden. Die Waldbrandwarnstufe 4 *extrem* und die Stufe 5 *extrem hohe* Waldbrandgefahr finden sich am Rande des Gebietes, wo der Wald dichter besiedelt ist. Die Stufen 1 *geringe* und die Stufe 3 *hohe* Waldbrandgefahr sind so gut wie nicht in zu verzeichnen (jeweils 1 Gitterzelle grün und orange farbcodiert).

#### 7.5.3 Brandgutkarten Waldlücken

#### 7.5.3.1 Waldgebiet Schlegelholz

Die Abbildung 89 stellt die Brandgutkarte der Waldlücken dar.

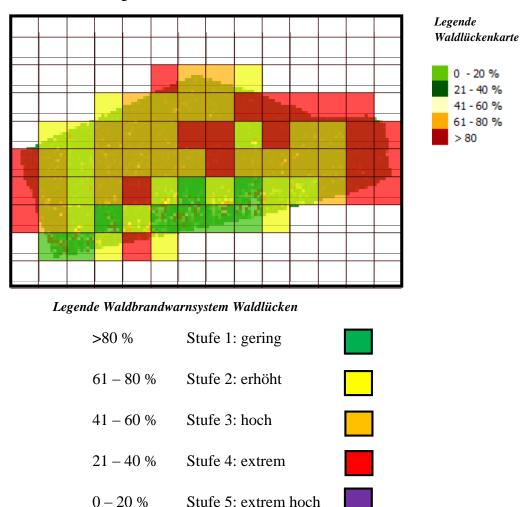
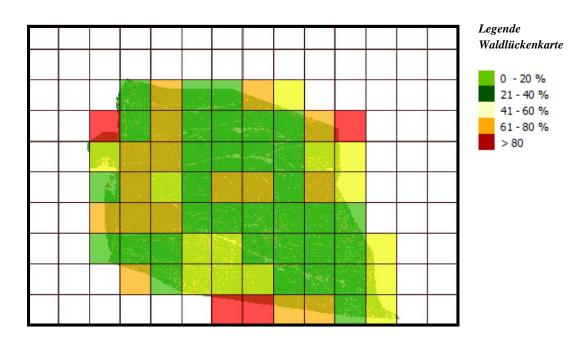


Abbildung 89: Brandgutkarte Waldlücken, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

In der Abbildung 89 ist ersichtlich, dass die Stufe 3 hohe und die Stufe 4 extreme Waldbrandgefahr überwiegen. Dies lässt darauf schließen, dass ein dichterer Waldbestand ohne Waldlückenanteil vorliegt. Die Stufen 1 geringe und die Stufe 2 erhöhte Waldbrandgefahr sind im unteren Teil der Abbildung 91 ersichtlich. In diesem Teil sind größere Waldlücken zu verzeichnen.

#### 7.5.3.2 Waldgebiet Maulenberg

Die Abbildung 90 stellt die Brandgutkarte der Waldlücken dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Waldlücken

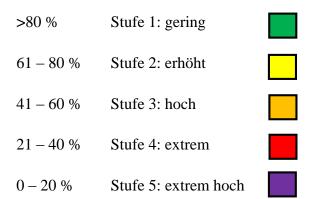
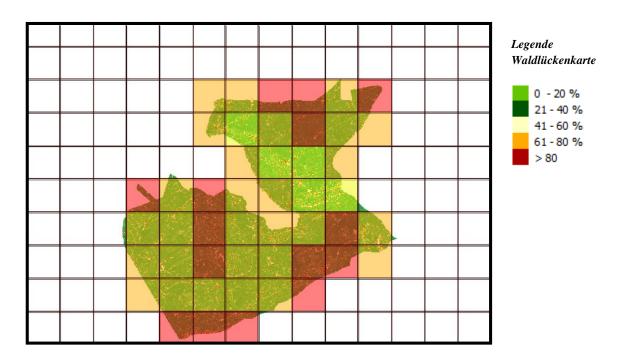


Abbildung 90: Brandgutkarte Waldlücken, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

In der Abbildung 90 ist ersichtlich, dass die Stufe 1 *geringe* Waldbrandgefahr überwiegt. Die topographisch bedingten Waldschneisen erstrecken sich über das gesamte Waldgebiet. Somit ist in diesem Gebiet ein hoher Waldlückenanteil von >80 % zu verzeichnen. Die Stufe 2 *erhöhte*, die Stufe 3 *hohe* und die Stufe 4 *extreme* Waldbrandgefahr sind in geringen Anteilen vorhanden.

#### 7.5.3.3 Waldgebiet Toppwald-West

Die Abbildung 91 stellt die Brandgutkarte der Waldlücken des Testgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Waldlücken

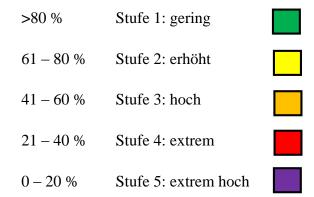
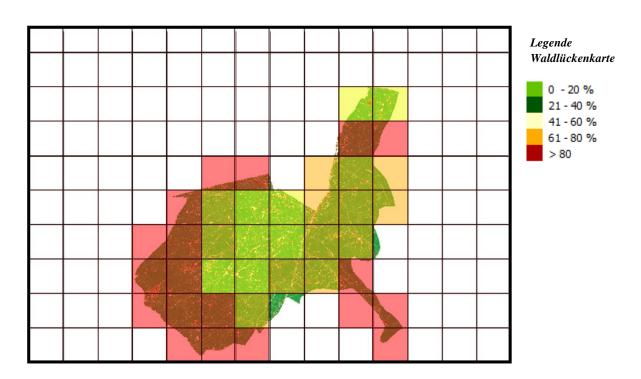


Abbildung 91: Brandgutkarte Waldlücken, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

In der Abbildung 91 ist ersichtlich, dass die Stufe 2 *erhöhte* Waldbrandgefahr überwiegt. In diesen Bereich befinden sich Waldwege, die sich innerhalb des gesamten Gebietes erstrecken. Die Stufe 3 *hohe* und die Stufe 4 *extreme* Waldbrandgefahr sind in diesem Gebiet ebenfalls klassifiziert worden. Die Stufe 5 *extrem hohe* Waldbrandgefahr wurde nicht klassifiziert.

#### 7.5.3.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

Die Abbildung 92 stellt die Brandgutkarte der Waldlücken des Waldgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Waldlücken

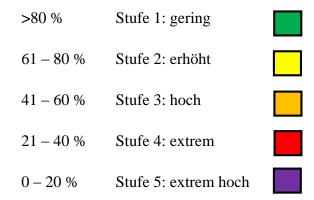


Abbildung 92: Brandgutkarte Waldlücken, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

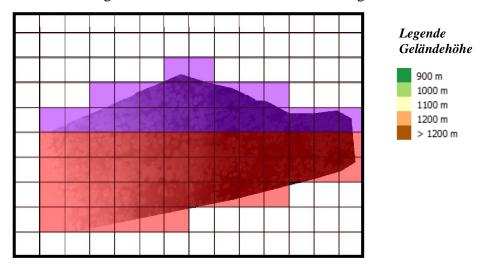
In der Abbildung 92 ist ersichtlich, dass die Stufe 2 hohe Waldbrandgefahr überwiegt. In diesen Bereich befinden sich Waldwege, die sich innerhalb des gesamten Gebietes erstrecken. Die Stufe 2 erhöhte und die Stufe 4 extreme Waldbrandgefahr sind in diesem Gebiet ebenfalls klassifiziert worden. Die Stufe 5 extrem hohe Waldbrandgefahr wurde nicht klassifiziert.

#### 7.5.4 Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen

Für diesen Brandgutparameter werden aus den oben beschrieben Referenzdaten des BAFU in der Schweiz, der vorliegenden Orthophotos und den erstellten Querprofilen der ALS-Daten Brandgutkarte erstellt und abgeleitet.

#### 7.5.4.1 Waldgebiet Schlegelholz

Die Abbildung 93 stellt die Brandgutkarte des Nadelholzanteils des Waldgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Nadelholzanteil

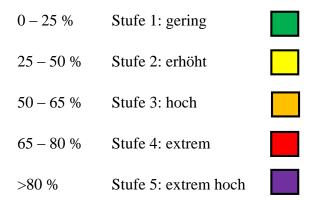
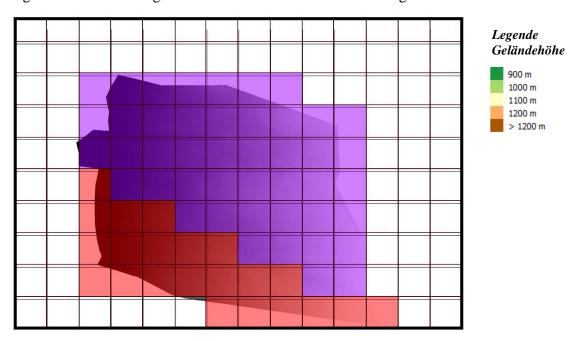


Abbildung 93: Brandgutkarte Nadelholzanteil, Schlegelholz, Schweiz

Nach den Referenzdaten des BAFU in der Schweiz ist das Waldgebiet zweigeteilt. Die eine Hälfte dieses Gebietes besteht aus 65 – 80 % Nadelwaldanteil, die andere Hälft aus > 80 %. In der Abbildung 95 sind die beiden klassifizierten Nadelholzanteile mit der Warnstufe 4 für *extreme* und der Stufe 5 für *extrem hohe* Waldbrandgefahr deutlich zu erkennen. Die weiteren Referenzdaten (Orthophotos, Querprofile) ergeben ebenfalls das Ergebnis, dass in diesem Waldgebiet überwiegend Nadelholz zu verzeichnen ist.

#### 7.5.4.2 Waldgebiet Maulenberg

Die Abbildung 94 stellt die Brandgutkarte des Nadelholzanteils des Testgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Nadelholzanteil

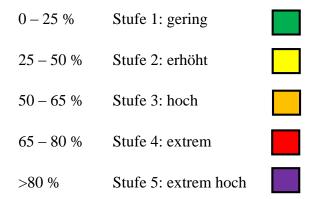
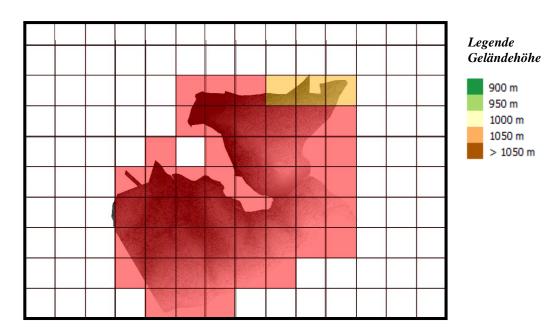


Abbildung 94: Brandgutkarte Nadelholzanteil, Maulenberg, Schweiz

Nach den Referenzdaten des BAFU in der Schweiz ist auch dieses Waldgebiet zweigeteilt. Die eine Hälfte dieses Gebietes besteht aus 65 – 80 % Nadelwaldanteil, die andere Hälfte aus > 80 %. In der Abbildung 96 ist ersichtlich, dass das Waldgebiet mit der Warnstufe 4 für *extreme* und der Stufe 5 für *extrem hohe* Waldbrandgefahr klassifiziert wurde. Weitere Referenzdaten (Orthophotos, Querprofile) ergeben ebenfalls das Ergebnis, dass in diesem Waldgebiet überwiegend Nadelholz zu verzeichnen ist.

#### 7.5.4.3 Toppwald-West

Die Abbildung 95 stellt die Brandgutkarte des Nadelholzanteils des Waldgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Nadelholzanteil

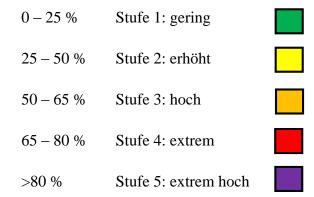
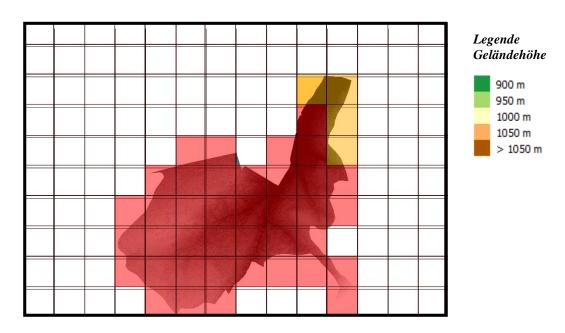


Abbildung 95: Brandgutkarte Nadelholzanteil, Toppwald-West, Schweiz

In diesem Waldgebiet besteht laut den Referenzdaten des BAFU in der Schweiz ein Nadelholzanteil von 65 – 80 %. Ein flächendeckender sehr geringer Anteil ist von 50 – 65 % zu verzeichnen. In der Abbildung 97 sind die klassifizierten Anteile mit der Warnstufe 3 für *hohe* und der Stufe 4 für *extrem* Waldbrandgefahr deutlich zu erkennen. Die weiteren Referenzdaten (Orthophotos, Querprofile) ergeben ebenfalls das Ergebnis, dass in diesem Waldgebiet überwiegend Nadelholz zu verzeichnen ist.

#### 7.5.4.4 Toppwald-Ost

Die Abbildung 96 stellt die Brandgutkarte des Nadelholzanteils des Waldgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Nadelholzanteil

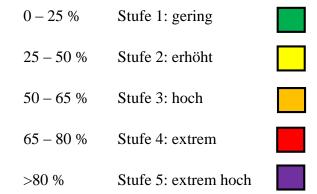


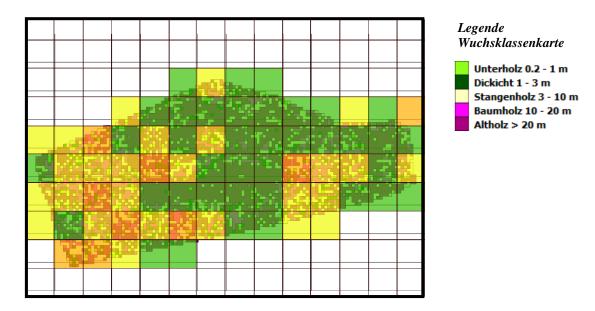
Abbildung 96: Brandgutkarte Nadelholzanteil, Toppwald-West, Schweiz

Auch in diesem Waldgebiet besteht laut den Referenzdaten des BAFU in der Schweiz ein Nadelholzanteil von 65 – 80 %. Ein flächendeckender sehr geringer Anteil ist von 50 – 65 % zu verzeichnen. In der Abbildung 98 sind die beiden klassifizierten Anteile mit der Warnstufe 3 für *hohe* und der Stufe 4 für *extrem* Waldbrandgefahr deutlich zu erkennen. Die weiteren Referenzdaten (Orthophotos, Querprofile) ergeben ebenfalls das Ergebnis, dass in diesem Waldgebiet überwiegend Nadelholz zu verzeichnen ist.

#### 7.5.5 Einteilung der Waldgebiete in Wuchsklassen

#### 7.5.5.1 Waldgebiet Schlegelholz

Die Abbildung 97 stellt die Brandgutkarte der Wuchsklassen des Testgebietes dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Wuchsklassen

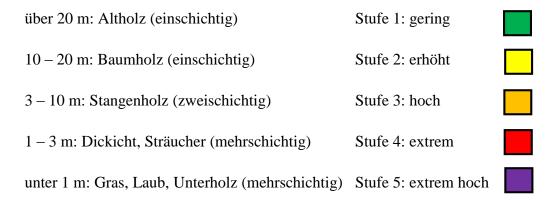
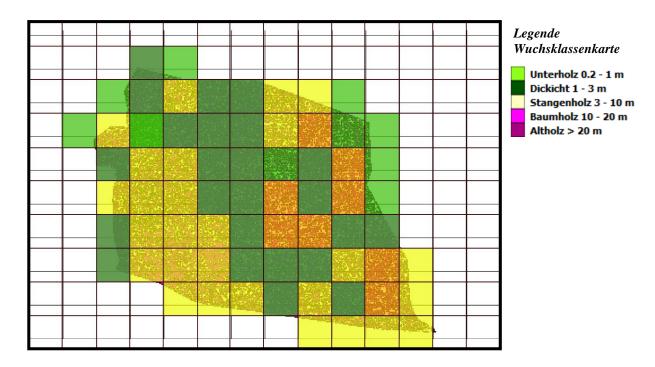


Abbildung 97: Brandgutkarte Wuchsklassen, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz

In diesem Waldgebiet sind gerade in den mittleren Bereichen Altholzbestände mit Hilfe der Wuchsklassen klassifiziert worden. In diesen Bereichen wird eine Waldbrandgefahr mit der Stufe 1 *gering* eingestuft. Die Waldbrandwarnstufen *erhöht* und *hoch* sind in diesem Waldgebiet ebenfalls klassifiziert worden. Sie finden sich in den Bereichen von Stangen- und Baumholz wieder. Die Stufe 4 für *extrem* und die Stufe 5 für *extrem hohe* Gefahr werden in diesem Gebiet nicht klassifiziert.

#### 7.5.5.2 Waldgebiet Maulenberg

Die Abbildung 98 stellt die Brandgutkarte der Wuchsklassen das Testgebiet dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Wuchsklassen

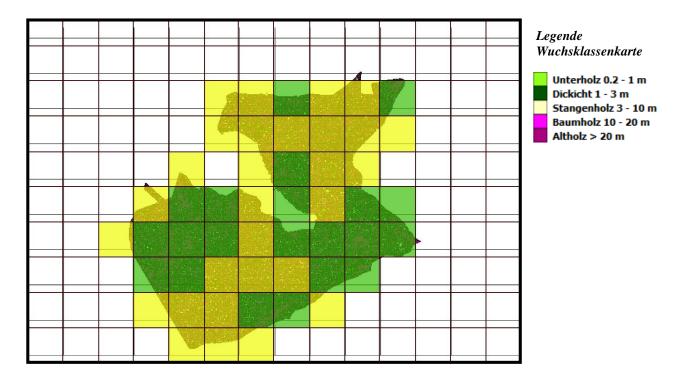
über 20 m: Altholz (einschichtig)	Stufe 1: gering	
10 – 20 m: Baumholz (einschichtig)	Stufe 2: erhöht	
3 – 10 m: Stangenholz (zweischichtig)	Stufe 3: hoch	
1 – 3 m: Dickicht, Sträucher (mehrschichtig)	Stufe 4: extrem	
unter 1 m: Gras, Laub, Unterholz (mehrschichtig)	Stufe 5: extrem hoch	

Abbildung 98: Brandgutkarte Wuchsklassen, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

In der Abbildung 98 ist ersichtlich, dass die Waldbrandwarnstufen *gering* (Stufe 1) und erhöht (Stufe 2) in diesem Gebiet dominieren. Dies sind Bereiche in dem Altholz und Baumholz zu finden ist. Die Stufe 3 für *hohe* Waldbrandgefahr wird vereinzelt klassifiziert. Die Stufen 4 für *extreme* und die Stufe 5 für *extrem hohe* Waldbrandgefahr werden nicht klassifiziert.

#### 7.5.5.3 Waldgebiet Toppwald-West

Die Abbildung 99 stellt die Brandgutkarte der Wuchsklassen für das Waldgebiet dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Wuchsklassen

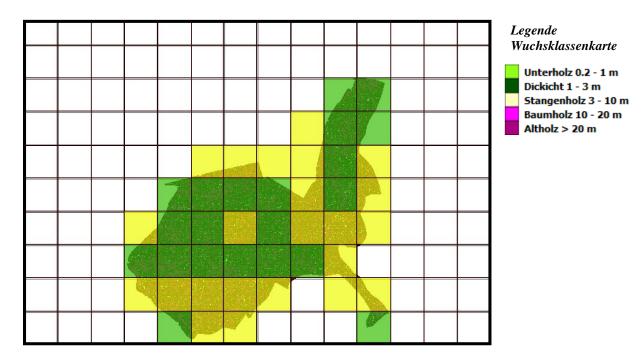
über 20 m: Altholz (einschichtig)	Stufe 1: gering	
10 – 20 m: Baumholz (einschichtig)	Stufe 2: erhöht	
3 – 10 m: Stangenholz (zweischichtig)	Stufe 3: hoch	
1 − 3 m: Dickicht, Sträucher (mehrschichtig)	Stufe 4: extrem	
unter 1 m: Gras, Laub, Unterholz (mehrschichtig)	Stufe 5: extrem hoch	

Abbildung 99: Brandgutkarte Wuchsklassen, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

In der Abbildung 99 ist ersichtlich, dass nur die Waldbrandwarnstufen *gering* (Stufe 1) und *erhöht* (Stufe 2) für dieses Gebiet klassifiziert wurden. Dies sind Bereiche in dem Altholz und Baumholz zu finden ist. Diese Wuchsklassen dominieren in diesem Gebeit. Die Stufen 3 für *hohe*, 4 für *extreme* und 5 für *extrem hohe* Waldbrandgefahr werden nicht klassifiziert.

#### 7.5.5.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

Die Abbildung 100 stellt die Brandgutkarte der Wuchsklassen für das Testgebiet dar.



Legende Waldbrandwarnsystem Wuchsklassen

über 20 m: Altholz (einschichtig)	Stufe 1: gering	
10 – 20 m: Baumholz (einschichtig)	Stufe 2: erhöht	
3 – 10 m: Stangenholz (zweischichtig)	Stufe 3: hoch	
1 − 3 m: Dickicht, Sträucher (mehrschichtig)	Stufe 4: extrem	
unter 1 m: Gras, Laub, Unterholz (mehrschichtig)	Stufe 5: extrem hoch	

Abbildung 100: Brandgutkarte Wuchsklassen, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

In der Abbildung 100 ist ersichtlich, dass nur die Waldbrandwarnstufen *gering* (Stufe 1) und *erhöht* (Stufe 2) für dieses Gebiet klassifiziert wurden. Dies sind Bereiche in dem Altholz und Baumholz zu finden ist. Diese Wuchsklassen dominieren in diesem Gebiet. Die Stufen 3 für *hohe*, 4 für *extreme* und 5 für *extrem hohe* Waldbrandgefahr wurden nicht klassifiziert.

# 7.6 Visuelle Darstellung der Brandgutkarten

In diesem Abschnitt werden nun die Brandgutkarten der einzelnen Testgebiete dargestellt. Die Ableitung der Brandgutkarten erfolgt nach der im Kapitel 6.7 aufgezeigten Methode.

Die Brandgutkarten werden aus den Ergebnissen der abgeleiteten ALS-Daten erstellt. Meteorologische Parameter wie zum Beispiel Temperatur, Luftfeuchtigkeit etc. werden hier nicht mit einbezogen. Waldbrandkarten der ZAMG oder des DWD spiegeln tagesaktuelle Ergebnisse der Waldbrandgefahr wieder. ALS-Befliegungen eines Waldgebietes finden in der Regel alle 10 – 15 Jahre statt, so dass die erstellten Brandgutkarten aus ALS-Daten keine tagesaktuellen Waldbrandergebnisse liefern können. Vielmehr steht die allgemeine Beurteilung und Einschätzung eines Waldgebietes bezüglich der Waldbrandgefahr im Vordergrund.

#### 7.6.1 Waldgebiet Schlegelholz

Die Abbildung 101 stellt die Brandgutkarte des Waldgebietes Schlegelholz dar.

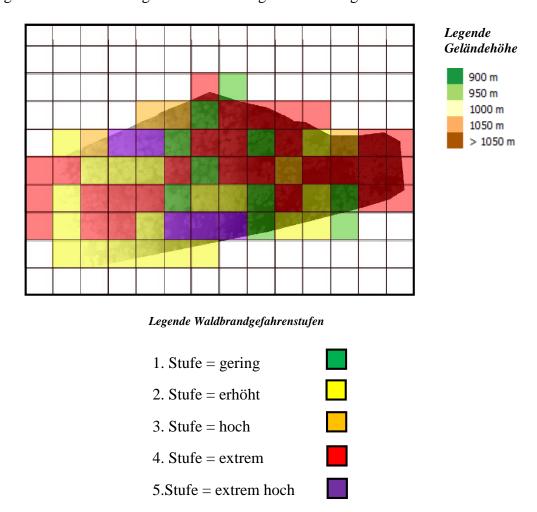
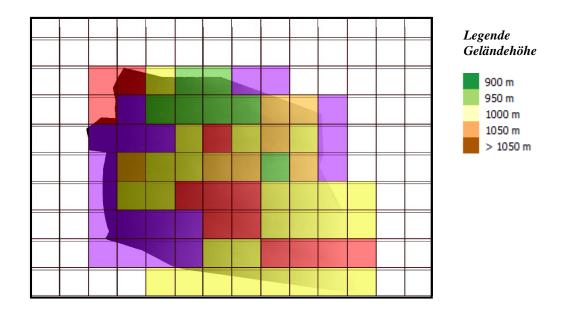


Abbildung 101: Brandgutkarte Waldgebiet, Schlegelholz, Schweiz

Die Brandgutkarte werden aus der Berechnung des Median der einzelnen Gitterzellen der Brandgutparameter abgeleitet. Die Abbildung 101 zeigt, dass die Waldbrandwarnstufen 2 für *erhöhte* und 4 für *extreme* Gefahr in diesem Gebiet dominieren. Beide Stufen erstrecken sich über dicht besiedelte Waldanteilen. *Geringe* Gefahr (Stufe 1) werden in Teilen des Gebietes klassifiziert, wo niedrigere Wuchsklassen, Waldlücken etc. zu finden sind. Die Stufen 4 für *extrem hohe* Waldbrandgefahr ist deutlich dort zu erkennen, wo sich Waldlücken befinden. Vereinzelnd ist die Stufe 3 (hohe Waldbrandgefahr) klassifiziert worden. Die abgeleitete Brandgutkarte zeigt ein gutes Ergebnis für die Einschätzung der Waldbrandgefahr des Waldgebietes Schlegelholz auf.

#### 7.6.2 Waldgebiet Maulenberg

Die Abbildung 102 stellt die Brandgutkarte des Waldgebietes Maulenberg dar.



Legende Waldbrandgefahrenstufen

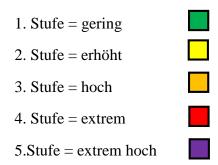
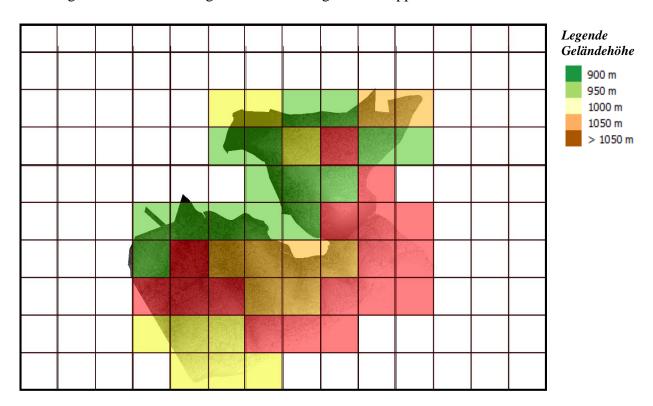


Abbildung 102: Brandgutkarte, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz

Die Abbildung 102 zeigt, dass die Waldbrandwarnstufen 2 für *erhöhte*, 4 für *extreme* und 5 für *extrem hohe* Gefahr in diesem Gebiet dominieren Die Stufen erstrecken sich über die in diesem Gebiet topographisch bedingten Waldschneisen. Die Stufe 1 für *geringe* und die Stufe 3 für *hohe* Waldbrandgefahr wurde in einem geringen Anteil klassifiziert. Die abgeleitete Brandgutkarte zeigt ein gutes Ergebnis für die Einschätzung der Waldbrandgefahr des Waldgebietes Maulenberg auf.

#### 7.6.3 Waldgebiet Toppwald-West

Die Abbildung 103 stellt die Brandgutkarte des Waldgebietes Toppwald-West dar.



Legende Waldbrandgefahrenstufen

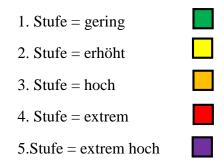
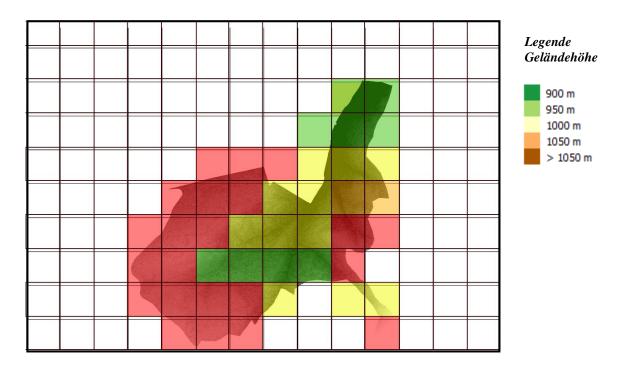


Abbildung 103: Brandgutkarte, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Die Abbildung 103 zeigt auf, dass die Waldbrandwarnstufen gering (Stufe 1), erhöht (Stufe 2), hohe (Stufe 3) und extreme (Stufe 4) in diesem Waldgebiet relativ gleichverteilt klassifiziert werden. Die Stufe 1, die für geringe Gefahr steht, findet sich an offenen Boden, Waldlücken etc. Die Stufen 2 erhöhte, 3 hohe und 4 extreme Waldbrandgefahr erstrecken sich über das gesamte Gebiet. In diesen Bereichen ist dichterer Wald zu finden. Die Warnstufe 5 extreme hohe Gefahr wird nicht klassifiziert. Die abgeleiteten Brandgutkarten zeigen ein gutes Ergebnis für die Einschätzung der Waldbrandgefahr des Waldgebietes Toppwald-West auf.

#### 7.6.4 Waldgebiet Toppwald-Ost

Die Abbildung 104 stellt die Brandgutkarte des Waldgebietes Toppwald-Ost dar.



 $Legende\ Waldbrand gefahren stufen$ 

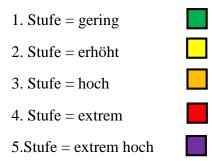


Abbildung 104: Brandgutkarte, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz

Die Abbildung 104 zeigt auf, dass die Waldbrandwarnstufen gering (Stufe 1), hoch (Stufe 3) und extrem (Stufe 4) in diesem Waldgebiet relativ gleichverteilt klassifiziert werden. Die Stufe 1, die für geringe Gefahr steht, findet sich an offenen Boden, Waldlücken etc. Die Stufen 2 für erhöhte und 4 für extreme Waldbrandgefahr erstrecken sich über das gesamte Gebiet. In diesen Bereichen ist dichterer Wald zu finden. Die Warnstufe 5 für extrem hohe Gefahr wird nicht klassifiziert. Die abgeleiteten Brandgutkarten zeigen ein gutes Ergebnis für die Einschätzung der Waldbrandgefahr des Waldgebietes Toppwald-Ost auf.

# 8. Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend soll nochmals ein kurzer Überblick über die Zielsetzung der Arbeit, die wesentlichen Arbeitsschritte und die daraus gewonnenen Erkenntnisse sowie die Empfehlungen zu einer möglichen Fortsetzung gegeben werden. Zu Beginn der Arbeit bestand das allgemein formulierte Untersuchungsziel Brandgutkarten mit Hilfe von ALS-Daten zu erstellen. Als erster zentraler Arbeitsschritt erfolgte eine Literaturrecherche zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Waldbrandes, sowie die Analyse und Festlegung der waldbrandspezifischen Forstparameter. Die Tatsache, welche waldbrandspezifischen Forstparameter für die Generierung einer Brandgutkarte aus den ALS-Daten gewonnen werden können, spielten bei der Entscheidungsfindung eine Rolle. Auf diese Festlegung folgte der praktische Teil der Arbeit, in dem waldbrandspezifischen Forstparameter mit Hilfe der wissenschaftlichen Laserscanning-Software OPALS berechnet wurden. Als wesentliches Ergebnis wurden aus den berechneten Forstparametern einer Brandgutkarte abgeleitet. Die Ergebnisse der Brandgutkarten werden für jedes Gebiet als gute Resultate eingestuft.

Topographische Attribute wie zum Beispiel die Geländeneigung oder die Exposition der untersuchten Gebiete werden für die Generierung der Brandgutkarten nicht mit einbezogen. Diese Attribute können ebenfalls für die Analyse und Ableitung der Waldbrandgefahr in einem Testgebiet herangezogen werden.

Wetterdienste wie zum Beispiel der DWD in Deutschland oder die ZAMG in Österreich verwenden Modelle, die mit Hilfe meteorologischer Parameter tagesaktuelle Waldbrandprognosen für die Gebiete abgeben. ALS-Befliegungen eines Waldgebietes finden in der Regel alle 10 – 15 Jahre statt, so dass die erstellten Brandgutkarten aus ALS-Daten keine tagesaktuellen Waldbrandergebnisse liefern können. Vielmehr steht die allgemeine Beurteilung und Einschätzung eines Waldgebietes bezüglich der Waldbrandgefahr im Vordergrund.

Das genannte Programm OPALs unterliegt einer steten Weiterentwicklung, so dass eventuell in naher Zukunft die Möglichkeit besteht, ein implementiertes Tool zu entwickeln, dass im speziellen für waldbrandspezifische Forstparameter ausgelegt ist und die Berechnung und Ableitung der Waldbrandgefahr erleichtert. Zuletzt bietet sich noch die Untersuchung weiterer Laserscanning-Programme hinsichtlich ihrer Eignung zur Ableitung waldbrandspezifischer Forstparameter und der Generierung einer Brandgutkarte.

.

Abbildung 1: globale Feueraktivität, März 2016; Sensor MODIS (Internetangabe: MODIS, 2016)	8
Abbildung 2: Waldbrandgefährdungskarte (DWD-WBI, 13. August 2016)	21
Abbildung 3: Prinzip des luftgestützten Laserscanning, (Wien Stadtentwicklung, 2016)	23
Abbildung 4: Interaktion des Laserstrahls mit der Erdoberfläche, Heinzel (2011)	25
Abbildung 5: Vereinfachtes Blockdiagramm eines Laserscanners, Wagner et al. (2003)	28
Abbildung 6: DSM versus DTM, Hollaus (2006)	34
Abbildung 7: nDSM versus CIR Orthophoto, Hollaus (2006)	36
Abbildung 8: Kronenuntergrenze Perzentil-basierenden Verfahren, Buddenbaum (2010)	40
Abbildung 9: Zusammenhang der im Gelände gemessenen und mit Lidar geschätzten	
Kronenansatzhöhen und Kronenlängen, Budennbaum (2010)	40
Abbildung 10: a: FCLidarRR, b: FCLidarFR, c: FCLidarIR d: FCLidarBL (Buddenbaum, 2010)	44
Abbildung 11: Kartographisches Ergebnis der automatischen Bestandsklassifizierung nach Struk und Höhenklassen (Koch et al. 2009)	
Abbildung 12: Karte der Waldverteilung in der Schweiz (BAFU, Waldflächenverteilung, Schweiz	52
Abbildung 13: Kanton Bern, Darstellung der Testgebiete (Geoportal Kanton Bern, Schweiz)	53
Abbildung 14: Waldbrandgefahr Kanton Bern, Schweiz, 11.07.2016 (Volkswirtschaftsdirektion, Schweiz)	55
Abbildung 15: Nadelholzanteil der Testgebiete, (BAFU, Nadelholzanteil, Schweiz)	61
Abbildung 16: Interpretationsschlüssel mitteleuropäischer Baumarten (Albertz, 2009)	62
Abbildung 17: Querprofil eines ausgewählten Bereichs des Waldgebietes Schlegelholz, Schweiz	62
Abbildung 18: Einteilung der Waldbrandindices des DWD, Deutschland und des BAFU, Schweiz	64
Abbildung 19: Kronendichteschema nach Albertz (2001)	66
Abbildung 20: Nadelholzanteil in der Schweiz, Referenzdaten, BAFU, Schweiz	68

Abbildung 21: klassifizierte Kronenschlussgradkarte nach 5-stufigen Waldbrandwarnsystem70
Abbildung 22: Farbcodiertes Rasterbild mittlere Punktdichte, Waldgebiet Schlegelholz,
Schweiz
Abbildung 23: farbcodiertes Rasterbild mittlere Punktdichte, Waldgebiet Maulenberg,  Schweiz
Abbildung 24: Farbcodiertes Rasterbild mittlere Punktdichte, Waldgebiet Toppwald-West,  Schweiz
Abbildung 25: farbcodiertes Rasterbild mittlere Punktdichte, Waldgebiet Toppwald-Ost,  Schweiz
Abbildung 26: Farbcodierte Darstellung DSM <sub>max</sub> versus DSM <sub>max</sub> mit Schummerung, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
Abbildung 27: Farbcodierte Darstellung DSM <sub>mpl</sub> versus DSM <sub>mpl</sub> mit Schummerung, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
Abbildung 28: Farbcodierte Darstellung Sigma Z, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz79
Abbildung 29: Darstellung farbcodiertes landschaftsbezogenes DOM versus landschaftsbezogenes DOM Schummerung, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
Abbildung 30: Farbcodierte Darstellung des berechneten nDOM, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz81
Abbildung 31: Farbcodierte Darstellung DSM <sub>max</sub> Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Abbildung 32: Farbcodierte Darstellung DSM <sub>max</sub> mit Schummerung Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Abbildung 33: Darstellung des farbcodierten DSM <sub>mpl</sub> versus DSM <sub>mpl</sub> mit Schummerung, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Abbildung 34: Farbcodierte Darstellung Sigma Z, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz84
Abbildung 35: Darstellung farbcodiertes landschaftsbezogenes DOM versus landschaftsbezogenes DOM Schummerung, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Abbildung 36: Farbcodierte Darstellung des berechneten nDOM, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz, Schweiz
Abbildung 37: Darstellung farbcodiertes DSM <sub>max</sub> versus DSM <sub>max</sub> mit Schummerung, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 38: Darstellung farbcodiertes DSM <sub>mpl</sub> versus DSM <sub>mpl</sub> mit Schummerung, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 39: farbcodierte Darstellung Sigma Z, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz89

Abbildung 40: Darstellung farbcodiertes landschaftsbezogenes DOM, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 41: Darstellung farbcodiertes landschaftsbezogenes DOM mit Schummerung, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz91
Abbildung 42: Farbcodierte Darstellung des berechneten nDOM, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 43: Darstellung farbcodiertes DSM <sub>max</sub> , Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz92
Abbildung 44: Darstellung farbcodiertes DSM <sub>max</sub> mit Schummerung, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 45: farbcodierte Darstellung des DSM <sub>mpl</sub> versus DSM <sub>mpl</sub> mit Schummerung, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz
Abbildung 46: Farbcodierte Darstellung des Sigma Z-Wertes, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz95
Abbildung 47: Darstellung farbcodiertes landschaftsbezogenes DOM versus DOM mit Schummerung, Waldgebiet Toppwald-Wes96
Abbildung 48: Farbcodierte Darstellung des berechneten nDOM, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz
Abbildung 49: Farbcodierte Darstellung der Baumhöhen, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz98
Abbildung 50: Farbcodierte Darstellung der Baumhöhen, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz99
Abbildung 51: Farbcodierte Darstellung der Baumhöhen, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz100
Abbildung 52: Farbcodierte Darstellung der Baumhöhen, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz101
Abbildung 53: Farbcodierte Darstellung der Kronenlänge, BH Q:95% / KA Q:5% Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
Abbildung 54: Farbcodierte Darstellung der Kronenlänge BH Q:95% / KA Q:5%, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Abbildung 55: Farbcodierte Darstellung der Kronenlänge BH Q:95% / KA Q:5%, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 56: Farbcodierte Darstellung der Kronenlänge BH Q:95% / KA Q:5%, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz
Abbildung 57: Farbcodierte Darstellung Kronenschlussgrad versus Waldlücken Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
Abbildung 58: Farbcodierte Darstellung Kronenschlussgrad versus Waldlücken Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Abbildung 59: Farbcodierte Darstellung Kronenschlussgrad versus Waldlücken Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz

Abbildung 60: Farbcodierte Darstellung Kronenschlussgrad versus Waldlücken Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz
Abbildung 61: Ausschnitt Topographische Karte versus Topographische Karte mit Layer Nadelholzanteil, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
Abbildung 62: Ausschnitt Orthophoto versus detaillierte Waldausschnitte des Orthophotos Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
Abbildung 63: Querprofil des gesamten Waldgebietes; Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
Abbildung 64: Detaillierte Querprofile der Stichproben des Orthophotos, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
Abbildung 65: Ausschnitt Topographische Karte versus Topographische Karte mit Layer Nadelholzanteil, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Abbildung 66: Ausschnitt Orthophoto versus detaillierte Waldausschnitte des Orthophotos Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Abbildung 67: Querprofil des gesamten Waldgebietes; Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Abbildung 68: Detaillierte Querprofile der Stichproben des Orthophotos, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Abbildung 69: Ausschnitt Topographische Karte versus Topographische Karte mit Layer Nadelholzanteil, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 70: Ausschnitt Orthophoto versus detaillierte Waldausschnitte des Orthophotos Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 71: Ausschnitt des Querprofils des gesamten Waldgebietes; Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 72: Detaillierte Querprofile der Stichproben des Orthophotos, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 73: Ausschnitt Topographische Karte versus Topographische Karte mit Layer Nadelholzanteil, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz
Abbildung 74: Ausschnitt Orthophoto versus detaillierte Waldausschnitte des Orthophotos Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz
Abbildung 75: Ausschnitt des Querprofils des gesamten Waldgebietes; Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz
Abbildung 76: Detaillierte Querprofile der Stichproben des Orthophotos, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz
Abbildung 77: Wuchsklassenkarte Waldgebietes Schlegelholz, Schweiz
Abbildung 78: Wuchsklassenkarten Waldgebietes Maulenberg, Schweiz
Abbildung 79: Wuchsklassenkarte des Waldgebietes Toppwald-West, Schweiz

Abbildung 80: Wuchsklassenkarte des Waldgebietes Toppwald-West, Schweiz	126
Abbildung 81: Brandgutkarte Kronenlänge (95%-Q: BH / 5%-Q: KU) Waldgebiet, Schlegel Schweiz	
Abbildung 82: Brandgutkarte Kronenlänge (95%-Q: BH / 5%-Q: KU), Waldgebiet Maulenl Schweiz	_
Abbildung 83: Brandgutkarte Kronenlänge (95%-Q: BH / 5%-Q: KU), Waldgebiet Toppwald-V	
Abbildung 84: Brandgutkarte Kronenlänge (95%-Q: BH / 5%-Q: KU), Waldgebiet Toppwald Schweiz	
Abbildung 85: Brandgutkarte Kronenschlussgrad, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz	131
Abbildung 86: Brandgutkarte Kronenschlussgrad, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz	132
Abbildung 87: Brandgutkarte Kronenschlussgrad, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz	133
Abbildung 88: Brandgutkarte Kronenschlussgrad, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz	134
Abbildung 89: Brandgutkarte Waldlücken, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz	135
Abbildung 90: Brandgutkarte Waldlücken, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz	136
Abbildung 91: Brandgutkarte Waldlücken, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz	137
Abbildung 92: Brandgutkarte Waldlücken, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz	138
Abbildung 93: Brandgutkarte Nadelholzanteil, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz	139
Abbildung 94: Brandgutkarte Nadelholzanteil, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz	140
Abbildung 95: Brandgutkarte Nadelholzanteil, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz	141
Abbildung 96: Brandgutkarte Nadelholzanteil, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz	.142
Abbildung 97: Brandgutkarte Wuchsklassen, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz	.143
Abbildung 98: Brandgutkarte Wuchsklassen, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz	.144
Abbildung 99: Brandgutkarte Wuchsklassen, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz	.145
Abbildung 100: Brandgutkarte Wuchsklassen, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz	.146
Abbildung 101: Brandgutkarte Waldgebiet, Schlegelholz, Schweiz	.148
Abbildung 102: Brandgutkarte, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz	149

Abbildung 103: Brandgutkarte, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz	150
Abbildung 104: Brandgutkarte, Waldgebiet Toppwald-Ost,	
Schweiz	151

158

Tabellenverzeichnis 159

# 10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung Forstparameter verschiedener Aufgabenstellungen, Buddenbaum (2010),
Zeiner (2010)
Tabelle 2: Technische Daten des verwendeten Laserscanners       56
Tabelle 3: 5-stufiges Waldbrandwarnsystem der Kronenlänge    65
Tabelle 4: 5-stufiges Waldbrandwarnsystem des Kronenschlussgrade    66
Tabelle 5: 5-stufies Waldbrandwarnsystem der Waldlücken
Tabelle 6: 5-stufies Waldbrandwarnsystem des Nadelholzanteils der Schweiz       68
Tabelle 7: 5-stufies Waldbrandwarnsystem der Wuchsklassen    69
Tabelle 8: Interpretation Waldbrandwarnstufen Gitterzelle 1, Waldgebiet Schlegelholz71
Tabelle 9: mittlere Punktdichte, statistische Kennzahlen, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
Tabelle 10:         mittlere Punktdichte, statistische Kennzahlen, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Tabelle 11:         mittlere Punktdichte, statistische Kennzahlen, Waldgebiet Toppwald-West, Schweiz75
Tabelle 12: mittlere Punktdichte, statistische Kennzahlen, Waldgebiet Toppwald-Ost, Schweiz76
<b>Tabelle 13:</b> 95 %-Quantil Baumhöhe, 5 %-Quantil Kronenansatzhöhe, Kronenlänge, Waldgebiet Schlegelholz, Schweiz
<b>Tabelle 14:</b> 95 %-Quantil Baumhöhe, 5 %-Quantil Kronenansatzhöhe, Kronenlänge, Waldgebiet Maulenberg, Schweiz
Tabelle 15: 95 %-Quantil Baumhöhe, 5 %-Quantil Kronenansatzhöhe, Kronenlänge, Waldgebiet         Toppwald-West, Schweiz
Tabelle 16:       95 %-Quantil Baumhöhe, 5 %-Quantil Kronenansatzhöhe, Kronenlänge, Waldgebiet         Toppwald-Ost, Schweiz

Abkürzungsverzeichnis 161

# 11. Abkürzungsverzeichnis

\*.las LASer File Format

\*.tif Tagged Image File Format

2D zwei Dimensionen

3D drei Dimensionen

ALS luftgestütztes Laserscanning, Airborne Laserscanning

AVHRR Advanced Very High Resolution Radiometer

ALPFFIRS Alpin Forest Fire Warning System

AFFRI Austrian Forest Fire Research Initiative

BABS Bundesamt für Bevölkerungsschutz, Schweiz

BAFU Bundesamt für Umwelt, Schweiz

BH Baumhöhe

BHD Brusthöhendurchmesser

BIRD Bi-spectral Infrared Detection

BIROS Berlin InfraRed Optical System

BOKU Universität für Bodenkultur, Wien

CC Canopy Closure (Kronenschlussgrad)

CHM Canopy Height Model

CHD Kronenschüttdichte

CIR Color-Infrared

DDR Deutsche Demokratische Republik

DG ENV Directorate General of Environment

DGM Digitales Geländemodell

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

DOM Digitales Oberflächenmodell

DSM Digital Surface Model

DTM Digital Terrain Model

DWD Deutscher Wetterdienst

EFFIS Europäisches Waldbrandinformationssystem

FAO Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen

FC Fractional Cover (Bedeckungsgrad)

Abkürzungsverzeichnis 161

FIRIA Fire Risk Austria

FIRMS Fire Information for Resource Management System

FWI (kanadischer) Forest Fire Weather Index

GF Gap Fraction (Bestandslückenanteil)

GFMC Global Fire Monitoring Center

GLAS Geoscience Laser Altimeter System

GPS Global Positioning System

ha Hektar

ICESat Ice Cloud and Land Elevation Satellite

IIASA Internationales Institut für angewandte Systemanalyse

IMU Intertial Navigationssystem

JRC Joint Research Center

kHZ Kilohertz

Ladar Laser detecting and ranging

Laser Light amplification by simulated emission of radiation

Lidar Light detection and ranging

LP DAAC Land Processes Distributed Active Archive Center

m Meter

m<sup>2</sup> Quadratmeter

NASA National Aeronautics and Space Administration

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

max Maximal

mls Moving Last Square

MODIS Moderate Resolution Image Spectroradiometer

mrad Milliradiant

nDOM normalisiertes digitales Oberflächenmodell

NN Normalnull

ÖWI Österreichische Waldinventur

PIXEL Ground sampling distance

POS Positionierungs- und Orientierungssystem

\_\_\_\_\_

Abkürzungsverzeichnis 162

R Korrelation

R<sup>2</sup> Bestimmtheitsmaß

RMS Root Mean Square (Quadratisches Mittel)

RMSE Root Mean Square Error (Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)

SLICER Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery

TET Technologieerprobungsträger

TU Wien Technische Universität Wien

UdSSR ehemalige Sowjetunion

UTC koordinierte Weltzeit

VCL Vegetation Canopy Lidar

WBGK Waldbrandgefährdungskarte

WBI Waldbrandgefahrenindex

WBKZ Waldbrandkennziffern

WSL Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landwirtschaft, Schweiz

ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

μm Mikrometer

#### 12. Literaturverzeichnis

Abshire J.B., Sun X., Riris H., Sirota J.M., McGarry J.F., Palm S., Yi D. and Liiva P. (2005): Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance, Geophysical Research Letters, 32, L21S02, doi: 10.10.029/2005GL024028

**Ackermann F.** (1999): Airborne laser scanning – present status and future expectations, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54, 64-67

Ackermann F. und Kraus K. (2004): Reader commentary: Grid based digital terrain models, Geoinformatics 7, 28-31

Albertz J. (2009): Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und satellitenbildern, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 4. Auflage, Darmstadt

Arno F.S. und Allison-Bunnell S. (2002): Flames in our forest: disaster or renewal? Island Press, Washington

**Arp H., Griesbach J.C. und Burns J.P. (1982):** *Mapping in Tropical Forests: A new Approach using the Laser APR*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 48 (1): 91-100

**Baltsavias E.P.** (1999a): Airborne laser scanning: basic relations and formulas, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, 199-214

**Baltsavias E.P.** (1999b): A comparison between photogrammetry and laser scanning, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (2-3), 165 - 198

Barbosa P., Camia A., Kucera J., Libertá G., Palumbo I., San-Migual-Ayanz J. und Schmuck G. (2009): Assessment of Forest Fire Impact and Emission in the European Union Based on the European Forest Fire Information System, Developments in Environmental Science, Volume 8

**Brandtberg T.** (2007): Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne lidar, Photogrammetry and Remote Sensing 61: 325-340

Brandtberg T., Warner R.E., Landenberger und McGraw J.B. (2003): Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America, Remote Sensing of Environment 85: 290-303

Briess K., Lorenz E., Oertel D., Skrbek W und Zhukov B. (2003): Fire Recognition Potential of the Bi-spectral InfraRed Detection (BIRD) Satellite, International Journal of Remote Sensing

**Briese C.** (2004a): *Breakline Modelling from Airborne Laser Scanner Data*, Institut Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F), Technische Universität Wien, Wien, Dissertation (2004)

**Buddenbaum H.** (2010): Charakterisierung von Forstbeständen mit Hilfe von Laserscanning und Reflexionsmodellierung, Universität Trier, Fachbereich IV Geographie / Geowissenschaften, Dissertation (2010)

Burschel P. und Huss J. (1987): Grundriss des Waldbaus, Parey

Danson F.M., Hetherington D., Morsdorf F., Koetz B. and Allgöwer B. (2006): *Three-dimensional Forest Canopy Structure from Terrestrial Laser Scanning*, In: Koukal T., and Schneider W. (eds.): Proc. International Workshop 3D Remote Sensing in Forstery, Vienna, Feb. 14-15, 2006

**Dickerson M., Drysdale R., McElfresh S. und Welzl E. (1997):** Fast Greedy triangulation algorithms, Computational Geometry: Tehory and Applications 8, 67-86

**Donoghue D.N.M., Watt P.J., Cox N.J. und Wilson J. (2007):** Remote Sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data, Remote Sensing of Environment, 110: 509-522

Eysen L., Hollaus M., Schadauer K., Pfeifer N.: Forest Delineation Based on Airborne LIDAR Data, Remote Sensing 2012, 4(3), 762-783, doi:10.339/rs403762

**Flannigan M.D. und Vonder Haar T.H. (1986):** Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR, Can. J. For. Res. 16: 975-982

**Flood M. (2001):** *Lidar Activities and Research Properties in the Commercial Sector*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W4, Annapolis, MD

**Fuller M.** (1991): Forest Fires: An Introduction to Wildland Fire Behavior, Management, Firefighting and Prevention, II. Series, SD421.F84, Printed in United States of America

Ghiyamat T. und Sharfi H.Z.M. (2010): A review on hyperspectral remote sensing for homogeneous and heterogeneous forest biodiversity assessment, International Journal of Remote Sensing 31 (7): 1837-1856

Giglio L., Decloitres J., Justice C.O. und Kaufman Y.J. (2003): An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS, Remote Sensing of Environment 87: 273-282

**Gimmi U., Bürgi M., Wohlgemuth T. (2004):** *Wie oft brennte der Walliser Wald im 20. Jahrhundert?* Schweiz. Z. Forstwesen 155 (2004) 10: 437-440

**Heinzel J.** (2011): Combined use of high resolution LIDAR and multispectral data for automated extraction of single trees and tree species, Alber-Ludwig-Universität Freiburg, im Breisgau, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften, Dissertation (2011)

Helms J.A. (2002): What do these Term mean? Forest, Forestry, Forester, Journal of Forestry

**Herkendell J. und Pretzsch J. (1995):** *Die Wälder der Erde: Bestandsaufnahme und Perspektive*, C.H. Beck´sche Verlagsbuchhandlung, München

**Heurich M.** (2006): Evaluierng und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeutgetragener Fernerkundungsssensoren, Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation (2006)

Hill J.M., Graham L.A. und Henry R.J. (2002): Wide-Area Topographic Mapping and Applications Using Airborne Light Detection and Ranging (LIDAR) Technology, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 66 (8): 908-914

Hollaus M. (2006): Large Scale Applications of Airborne Laser Scanning for a Complex Montainous Environment, Technische Universität Wien, Fakultät für Mathematik und Geoinformation, Dissertation (2006)

Hollaus M., Mandelburger G., Pfeifer N. und Mücke W. (2010): Land Cover Dependent Derivation Of Digital Surface Models From Airborne Laser Scanning Data, In: Paparoditis N., Pierrot-Deseilligny M., Mallet C., tournaire O. (EDS), IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3A

Hopkinson C. und Chasmer L. (2009): Testing LIDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones, Remote Sensing of Environment 113: 275-288

Hoschek J. und Lasser D. (1993): Fundamentals of Computer Aided Geometric Design, A. K. Peters Ltd.

Hyyppä H., Yu X., Hyyppä J., Kaartinen H., Kaasalainen S., Konkovaara E. und Rönnholm P. (2005): Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spaial Information Sciences XXXVI (Part3/W19), 97-102

Hyyppä H., Hyyppä D., Leckie F., Gougeon X., Yu und 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 29 (5): 1339-1366

IUFRO (2005): IUFRO World Series, Vol. 5., *International guidelines for forest monitoring*, Päivinen R., Lund H., Poso S., Zawila-Niedzwiecki T., IUFRO Working Party 04.02.05, Vienna Austria

Jensen J.L.R., Humes K.S., Vierling L.A. und Hudak A.T. (2008): Discrete return lidar-based prediction of leaf area index in two conifer forests, Remote Sensing of Environment 112: 3947-3957

Justice C.O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J.T., Roy D., Descloitres J., Alleaume S., Petitcolin F. und Kaufman Y. (2002): *The MODIS fire products*, Remote Sensing of Environment 83: 244-262

Khabarov N., Krasovskii A., Obersteiner M., Swart R., Dosio A., San-Migual-Ayanz J., Durrant T., Camia A. und Migliavacca M. (2014): Forest fires and adaptation options in Europe, Reginal Environmental Change, Vol. 16 (1): 21-30

Kilian J., Haala N. and Englich M. (1996): Capture and evaluation of airborne laser scanner data, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31/3, ISPRS, Vienna, Austria

Kim K., Treitz P., Wulder M., St-Onge B. und Flood M. (2003): LIDAR remote sensing of forest structure, Progress in Physical Geography 27 (1): 88-106

Koch B., Heyder C. und Weinacker H. (2006a): Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 72 (4): 357-363

**Koch B., Heyder C., Straub und Weinacker H. (2006b):** *3D data for forest and environmental planning*, Proc. Workshop 3D Remote Sensing in Forestry, 14-15 Feb. 2006, Vienna, Austira: 1-8

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, 935-963

König H.C. (2007): Waldbrandschutz: Kompendium für Forst und Feuerwehr, Fachverlag Matthias Grimm, Berlin

Kohlstock P. (2004): Kartographie, Ferdinand Schöningh GmbH, 1. Auflage, Paderborn, S. 81

Kraus K. (2000): Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme, Verlag H. Stam GmbH, Köln

Kraus K. (2003): LaserScanning - ein Paradigmawechsel in der Photogrammetrie, Bulletin SEV/SVE 9, 19-22

Kraus K. (2004): Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanningaufnahmen, Hubert & Co., GmbH & Co. KG, Göttingen

**Kraus K.** (2005): *Laserscanning und Photogrammetrie im Dienste der Geoinformation*, Talk: AGIT (2005), Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XVII, Salzburg 06.07-08.07.2015, in "Angewandte Geoinformatik 2005 – Beiträge zum 17. AGIT Symposium Salzburg" Strobel J., Blaschke T., Griesebener G. (ed), Wichmann Verlag H.S. 386 - 396

Kraus K., Briese C., Attwenger M. und Pfeifer N. (2004): *Quality Measures for digital terrain Models*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information XXXV (Part B/2), 113-118

Kraus K. und Pfeifer N. (1998): Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53 (4) 193-203

Lanchaster P. und Salkauskas K. (1986): Curve and surface fitting, An Introduction, Academic Press

Lange S. (1994): Waldbrandprognose in Deutschland, Allgemeine Forstzeitschrift 44 (5): 172-174

**Lee A.C. und Lucas R.M. (2007):** A LIDAR-derived canopy density model for tree stem and crown mapping in Australian forests, Remote Sensing of Environment 111: 493-518

Lee K.-S., Cohen W.B., Kennedy R.E., Meisperger T.K. und Gower S.T. (2004): Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes, Remote Sensing of Environment 91, 508-520

Lex P. (1996): Bekämpfung von Waldbränden, Moorbränden, Heidebränden, Die Roten Hefte, Band 26, 4. Auflage, Kohlhammer

Lillesand T.L., Kiefer R.W. und Chipman J.W. (2008): Remote Sensing and Image Interpretation, 6. Auflage, John Wiley & Sons, Inc.

Maltamo M., Eerikäinen K., Pitkänen J., Hyyppä J. und Vehmas M. (2004): Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions, Remote Sensing of Environment 90: 319-330

Mandelburger G., Otepka J., Karel W., Wöhrer B., Wagner W. und Pfeifer N. (2010): *OPALS* (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data) – Konzept und Anwendungsbeispiele einer wissenschaftlichen Laserscanning Software, DGPF Tagungsband 19/2010 – Dreiländertagung OVG, DGPF und SGPF

Maltamo M., NÆsset E., Vauhkonen J. (2014): Forestry Applications of Airborne Laser Scanning, Concepts and Case Studies, Springer Dordrecht Heidelberg New York Londen, 2014

Matikainen L., Hyyppä J., und Hyyppä H. (2003): *Automatic Detection of Buildings from Laser Scanner data for Map Updating*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV (Part3/W13), 7pp.

Mean 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, Remote Sensing of Environment 67, 298-308

Mißbach K. (1982): Waldbrand, Verhütung und Bekämpfung, 3. Auflage, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, DDR-Berlin

**Morsdorf F.** (2006): LIDAR Remote Sensing for Estimation of Biophysical Vegetation Parameters, Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Zürich, Dissertation

NÆsset E. (1997a): Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 52, 49-56

NÆsset E. (1997b): Estimating Timber Volume of Forest Stands using airborne laser scanner data, Remote Sensing of Environment 61: 246-253

**NÆsset E. und Goakken T. (2008):** *Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser*, Remote Sensing of Environment 112: 3079-3090

Nelson R., Krabill W. und MacLean G. (1984): Determining forest canopy characteristics using airborne laser data, Remote Sensing of Environment 15: 201-212

**Nelson R.** (1997): *Modeling forest canopy heights: The effects of canopy shape*, Remote Sensing of Environment 60: 32-334

Omi N.P. (2005): Forest Fires: a reference handbook, ABD-CLIO, Inc. Santa Barbara, California

Patenaude G., Hill R.A., Milne R., Gaveau D.L.A., Briggs B.B.J und Dawson T.P. (2004): *Quantifying forest above ground carbon content using LIDAR remote sensing*, Remote Sensing of Environment 93: 368-380

Patzelt S.T. (2008): Waldbrandprognose und Waldbrandbekämpfung in Deutschland – zukunftsorientierte Strategien und Konzepte unter besonderer Berücksichtigung der Bekämpfung aus der Luft, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften, Dissertation (2008)

Pezzatti B., Conedere M. und Kaltenbrunner A. (2005): Die neue Waldbranddatenbank, Bündnerwald 58, 6: 37-39

**Pfeifer N.** (2003) *Oberflächenmodelle aus Laserdaten*, Section of Photogrammetry and Remote Sensing, Delf University of Technology, Niederlande

Reitberger J., Krzystek P., Stilla U. (2008): Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees, International Journal of Remote Sensing 29: 1407-1431

Reitberger J., Krzystek P., Stilla U. (2009): First/Last Pulse and Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern, DGPF Tagungsband 18

Ressel (2013): Qualitätskontrolle von ALS-Daten (Punktdichte), Topographische Modelle, Übung, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation

Riaño D., Valladares F., Condés S. und Chuvieco E. (2004): Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests, Agricultural and Forest Meteorology 124: 269-275

Riaño D., Meier E., Allgöwer B., Chuvieco E. und Ustin S.T. (2003): Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameter in fire behavior modeling, Remote Sensing of Environment 86: 177-186

**Rieger W., Eckmüllner O., Müllner H. und Reiter T. (1999):** *Laser-Scanning for the derivation of forest stand parameters*, Workshop of ISPRS WG III/2 & III/5: Mapping surface structure and topography by airborne and spaceborne lasers, 7.-9.11.1999 La Jolla, CA. Int. Arch. of Photo. & Rem. Sen., Vol. 32, Part 3-W14 193-200

Rosette J.A., North P.R.J., Sua'rez J.C., und Armston J.D. (2009): A comparison of biophysical parameter retrieval for forestry using airborne and satellite LIDAR, International Journal of Remote Sensing 30 (19): 5229-5237

Rottensteiner F., Trinder J., Clode S., und Kubik K. (2005): Using the Dempster-Shafer Method for the Fusion of LIDAR Data and Multi-Spectral Images for Building Detection, Information Fusion 6 (4), 283-300

Ruecker G., Lorenz E., Hoffmann A.A: Oertel D., Tieman J. und Halle W. (2011): High Resolution Active Fire Monitoring for Global Change Analysis: The Upcoming FireBIRD Satellite Mission, The 5th International Wildland Fire Conference, Sun City, South Africa, 9-13 Mai 2011

Schardt M., Ziegler M., Wimmer A., Wack R. und Hyyppä J. (2002): Assessment of Forest Parameters by Means of Laser Scanning, in: Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium: Photogrammetric Computer Version (peer review paper)

Schreier H., Lougheed J., Tucker C. und Leckie D. (1985): Automated measurement of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system, International Journal of Remote Sensing 6 (1): 101-113

Shi P. und Kasperson R. (2015): World Atlas of Natural Disaster Risk, Springer Verlag GmbH Berlin, Heidelberg und Beijing, University Press

Solberg S., Brunner A., Hanssen K.H., Lange H., NÆsset E., Rautiainen M und Steinberg P. (2009): *Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning*, Remote Sensing of Environment 113: 2317-2327

Swissfire Datenbank, Statistische Angaben: Es wurden die letzten Waldbrände des Kanton Bern in Form von Brandkoordinaten von einem zuständigen Mitarbeiter per Excel-Datei zur Verfügung gestellt.

**Straub C. (2010):** Erfassung des Energiepotenzials und seiner Verfügbarkeit im Wald und im Offenland mit neuen Fernerkundungsmethoden, Albert-Ludwig-Universität Freiburg im Breisgrau, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaft, Dissertation (2010)

Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenke E.A., Miskiv S.I. und Slinkina O.A. (2004): AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies, Remote Sensing of Environment 93: 546-564

Tansey K., Selmes N., Anstee A., Tate N.J. und Denniss A. (2008): Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data, International Journal of Remote Sensing 30, (19): 5195-5209

van Wagtendonk, J.W. (2006): *Fire as a physical process*. In: Sugihara, N.G., J. W. van Wagtendonk, K.E. Shaffer, J. Fites-Kauffman, and A.E. Thode (eds.) Fire in California's ecosystems. University of California Press, Berkeley and Los Angeles, CA. 38-57.

Van der Zande D., Mereu S., Nadezhdina N., Cermak J., Muys B., Coppin P. and Manes F. (2009): 3D upscaling of transpiration from leaf to tree using ground-based LIDAR: Application on a Mediterranean Holm oak tree, Agricultural and Forest Meteorology 149 (10): 1573-1583

Wagner W., Ullrich A. und Briese C. (2003): Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang, 4, 223-235

Wagner W., Hollaus M., Briese C. und Ducic V. (2008): 3D vegetation mapping using small-footprint fullwave airborne laser scanner, International Journal of Remote Sensing 29 (5): 1433 - 1452

Warnetz J. und Maas J. (1993): Technische Verbrennung: Physikalisch-chemische Grundlagen, Modellbildung, Schadstoffentstehung, Springer Verlag, Berlin

Wehr A. and Lohr U. (1999): Airborne laser scanning – an introduction an overview, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54: 68-82

Zeiner R. (2012): Der Einsatz von Airborne Laserscanning Daten im forstbetrieblichen Informationssystem, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Agrar- und Forstökonomie, Wien, Masterarbeit (2012)

Zwally H.J., Schutz B., Abdalati W., Abshire J., Bentle C., Brenner A., Bufton J., Dezio J., Hancock D., Harding D., Herring T., Minster B., Quinn K., Palm S., Spinhirne J. ud Thomas R. (2002): *ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean and land*, Journal of Geodynamics, 34: 405-445

Zhukov B., Briess K., Lorenz E., Oertel D. und Skrbek W. (2005): Detection and Analysis of High-Temperature Events in the BIRD Mission, Acta Astronautica 56: 65-71

Internetquellen 172

### 13. Internetquellen

ALP FFIRS: Beschreibung des Projekts Alpine Forest Fire Warning System, online im Internet:

http://www.alpffirs.eu/, Abrufdatum: 01.09.2016

BABS (2015): Bundesamt für Bevölkerungsschutz Schweiz, Nationale Gefährdungsanalyse –

Gefährdungsdossier Waldbrand, online im Internet:

http://www.bevoelkerungsschutz.admin.ch/internet/bs/de/home/themen/gefaehrdungen-

<u>risiken/nat</u> <u>gefaehrdungsanlayse/gefaehrdungsdossier.parsys.00012.downloadList.22289.DownloadFile.tmp/gdwaldbrandde.pdf, Abrufdatum: 01.09.2016</u>

BAFU, Baumartenanteile Schweiz: Baumartenanteile Schweiz in Kartenform, online im Internet:

https://map.geo.admin.ch/?lang=de&topic=bafu&X=207616.07&Y=647962.82&zoom=1&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=ch.swisstopo.vec200-landcover-wald,ch.bafu.landesforstinventar-

baumarten, ch. bafu. landes forst inventar-waldanteil, ch. bafu. landes forst inventar-

totholz,ch.bafu.waldschadenflaechen-lothar,ch.bafu.waldschadenflaechen-

<u>vivian,ch.bafu.holzvorrat&layers\_opacity=1,0.75,0.75,0.75,1.1,0.75&layers\_visibility=false,true,false,false,false,false,false&catalogNodes=813,825,826,832,833,838,843,849,851,1505, Abrufdatum: 01.09.2016</u>

**BAFU, Baumartenanteil Waldgebiet Maulenberg:** Baumartenanteile Waldgebiet Maulenberg in Kartenform, online im Internet:

 $\frac{\text{https://map.geo.admin.ch/?lang=de\&topic=bafu\&X=153445.00\&Y=596462.50\&zoom=8\&bgLayer=ch.swisstop}{\text{o.pixelkarte-grau\&layers=ch.swisstopo.vec200-landcover-wald,ch.bafu.landesforstinventar-}}$ 

 $\underline{baumarten, ch. bafu. landes for stinventar-waldanteil, ch. baf$ 

totholz,ch.bafu.waldschadenflaechen-lothar,ch.bafu.waldschadenflaechen-

 $\underline{vivian, ch.bafu.holzvorrat\&layers\_opacity=1,0.75,0.75,0.75,0.75,1,1,0.75\&layers\_visibility=false, false, false$ 

**BAFU**, Baumartenanteil Waldgebiet Schlegelholz: Baumartenanteile Waldgebiet Schlegelholz in Kartenform, online im Internet:

 $\frac{\text{https://map.geo.admin.ch/?lang=de\&topic=bafu\&X=153445.00\&Y=596462.50\&zoom=8\&bgLayer=ch.swisstop}{\text{o.pixelkarte-grau\&layers=ch.swisstopo.vec200-landcover-wald,ch.bafu.landesforstinventar-}}$ 

baumarten, ch. bafu. landes forst inventar-waldanteil, ch. bafu. landes forst inventar-

totholz,ch.bafu.waldschadenflaechen-lothar,ch.bafu.waldschadenflaechen-

 $\underline{vivian, ch.bafu.holzvorrat\&layers\_opacity=1,0.75,0.75,0.75,1.1,0.75\&layers\_visibility=false, false, fal$ 

**BAFU**, Baumartenanteil Waldgebiet Toppwald-Ost: Baumartenanteile Waldgebiet Toppwald-Ost in Kartenform, online im Internet:

https://map.geo.admin.ch/?lang=de&topic=bafu&X=191235.00&Y=618250.00&zoom=7&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=ch.swisstopo.vec200-landcover-wald,ch.bafu.landesforstinventar-

baumarten, ch. bafu. landes forst inventar-waldanteil, ch. bafu. landes forst inventar-

totholz,ch.bafu.waldschadenflaechen-lothar,ch.bafu.waldschadenflaechen-

<u>vivian,ch.bafu.holzvorrat&layers\_opacity=1,0.75,0.75,0.75,1,1,0.75&layers\_visibility=false,true,false,false,false,false,false&catalogNodes=813,825,826,832,833,838,843,849,851,1505,</u> Abrufdatum: 01.09.2016

**BAFU, Baumartenanteil Waldgebiet Toppwald-West:** *Baumartenanteile Waldgebiet Toppwald-West in Kartenform,* online im Internet:

 $\underline{https://map.geo.admin.ch/?lang=de\&topic=bafu\&X=189285.00\&Y=615820.00\&zoom=7\&bgLayer=ch.swisstop}\\ \underline{o.pixelkarte-grau\&layers=ch.swisstopo.vec200-landcover-wald,ch.bafu.landesforstinventar-}$ 

baumarten,ch.bafu.landesforstinventar-waldanteil,ch.bafu.landesforstinventar-

totholz,ch.bafu.waldschadenflaechen-lothar,ch.bafu.waldschadenflaechen-

vivian,ch.bafu.holzvorrat&layers opacity=1,0.75,0.75,0.75,1.1,0.75&layers visibility=false,true,false,false,false,false,false&catalogNodes=813,825,826,832,833,838,843,849,851,1505, Abrufdatum: 01.09.2016

**BAFU, Baumartenanteil Waldgebiet Schlegelholz:** *Baumartenanteile Waldgebiet Schlegelholz in Kartenform,* online im Internet:

 $\frac{\text{https://map.geo.admin.ch/?lang=de\&topic=bafu\&X=153445.00\&Y=596462.50\&zoom=8\&bgLayer=ch.swisstop}{\text{o.pixelkarte-grau\&layers=ch.swisstopo.vec200-landcover-wald,ch.bafu.landesforstinventar-}}$ 

 $\underline{baumarten, ch. bafu. landes for stinventar-waldanteil, ch. baf$ 

totholz,ch.bafu.waldschadenflaechen-lothar,ch.bafu.waldschadenflaechen-

 $\underline{vivian, ch.bafu.holzvorrat\&layers\_opacity=1,0.75,0.75,0.75,1.1,0.75\&layers\_visibility=false, false, fal$ 

**BAFU, Streckbrief Schweizer Wald:** *Eckdaten zum Schweizer Wald*, online im Internet:

http://www.bafu.admin.ch/wald/01198/01199/index.html?lang=de, Abrufdatum: 01.09.2016

**BAFU, Waldflächenverteilung Schweiz:** *Waldflächenverteilung der Schweiz – Darstellung in Kartenform,* online im Internet:

https://map.geo.admin.ch/?lang=de&topic=bafu&X=207616.07&Y=647962.82&zoom=1&bgLayer=ch.swisstopo.vec200-landcover-wald,ch.bafu.landesforstinventar-

baumarten,ch.bafu.landesforstinventar-waldanteil,ch.bafu.landesforstinventar-

totholz,ch.bafu.waldschadenflaechen-lothar,ch.bafu.waldschadenflaechen-

<u>vivian,ch.bafu.holzvorrat&layers\_opacity=1,0.75,0.75,0.75,1.1,0.75&layers\_visibility=true,false,false,false,false,false,false,false&catalogNodes=813,825,826,832,833,838,843,849,851,1505, Abrufdatum: 01.09.201</u>

BAFU, Nadelholzanteil der Testgebiete: Darstellung des Nadelholzanteils der Testgebiete in Form einer Karte, online im Internet:

https://map.geo.admin.ch/?lang=de&topic=bafu&X=199975.00&Y=628600.00&zoom=1&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=ch.swisstopo.vec200-landcover-wald,ch.bafu.landesforstinventar-

baumarten, ch. bafu. landes forst inventar-waldanteil, ch. bafu. landes forst inventar-

totholz,ch.bafu.waldschadenflaechen-lothar,ch.bafu.waldschadenflaechen-

<u>vivian,ch.bafu.holzvorrat&layers\_opacity=1,0.75,0.75,0.75,1,1,0.75&layers\_visibility=false,true,false,false,false,false,false&catalogNodes=813,825,826,832,833,838,843,849,851,1505, Abrufdatum: 01.09.2016</u>

**BAFU, Waldbrandkarte:** *Aktuelle Waldbrandgefährdungskarten*, online im Internet: <a href="http://www.waldbrandgefahr.ch/de/waldbrand/waldbrandgefahr/aktuelle-lage/">http://www.waldbrandgefahr.ch/de/waldbrand/waldbrandgefahr/aktuelle-lage/</a>, Abrufdatum 01.09.2016

**BOKU:** Waldbrand-Statistik, online im Internet:

http://www.wabo.boku.ac.at/waldbau/forschung/fachgebiete/bewirtschaftungskonzepte/waldbewirtschaftung-und-klimaaenderung/waldbrand/waldbrand-statistik/, Abruf: 01.09.2016

**BOKU:** Waldbrandinformation, online im Internet:

 $\underline{http://www.wabo.boku.ac.at/waldbau/forschung/fachgebiete/bewirtschaftungskonzepte/waldbewirtschaftung-und-klimaaenderung/waldbrand/, Abruf: 01.09.2016$ 

**BOKU AFFRI**: *AFFRI* – *Forschungsinitiative Waldbrand*, online im Internet:

 $\underline{http://www.wabo.boku.ac.at/waldbau/forschung/fachgebiete/bewirtschaftungskonzepte/waldbewirtschaftung-und-klimaaenderung/waldbrand/waldbrand-forschung/affri/, Abrufdatum: 01.09.2016$ 

**BOKU AFFRI 2:** *AFFRI 2 – Forschungsinitiative Waldbrand*, online im Internet:

http://www.wabo.boku.ac.at/waldbau/forschung/fachgebiete/bewirtschaftungskonzepte/waldbewirtschaftung-und-klimaaenderung/waldbrand/waldbrand-forschung/affri-2/, Abrufdatum: 01.09.2016

**Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz:** *Klimabeschreibung des Kanton Bern*, online im Internet: <a href="http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/gegenwart/klima-berichte.html">http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/gegenwart/klima-berichte.html</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung Deutschland (2014): Waldbrandstatistik für die Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2014, online im Internet: <a href="http://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/01\_Markt/10\_Statistik/Waldbrandstatistik/Waldbrandstatistik-2014.pdf">http://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/01\_Markt/10\_Statistik/Waldbrandstatistik/Waldbrandstatistik-2014.pdf</a>? blob=publicationFile, Abrufdatum: 01.09.2016

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft Deutschland: online im Internet:

https://www.bundeswaldinventur.de/index.php?id=676, Abrufdatum: 01.09.2016

**DLR:** *Informationen zu BIROS*, online im Internet: <a href="http://www.dlr.de/firebird/en/desktopdefault.aspx/tabid-9104/15718\_read-42455/">http://www.dlr.de/firebird/en/desktopdefault.aspx/tabid-9104/15718\_read-42455/</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

**DWD, Dokumentation:** Beschreibung des Waldbrandgefahrenmodells des DWD, online im Internet: <a href="http://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/wbx\_erlaeuterungen.pdf;jsessionid=CACCEE317934F2B64E534F5B52D06E26.live11042?\_blob=publicationFile&v=8, Abrufdatum: 01.09.2016

**DWD, Deutschlandkarte:** *Darstellung Deutschlandkarte Waldbrandgefahrenindices*, online im Internet: <a href="http://www.dwd.de/DE/leistungen/waldbrandgef/waldbrandgef.html">http://www.dwd.de/DE/leistungen/waldbrandgef/waldbrandgef.html</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

**DWD, Waldbrandkarte:** *Aktuelle Waldbrandgefährdungskarten*, online im Internet: <a href="http://www.wettergefahren.de/warnungen/indizes/waldbrand.html">http://www.wettergefahren.de/warnungen/indizes/waldbrand.html</a>, Abrufdatum 01.09.2016

**EFFIS:** *Informationen zu EFFIS*, online im Internet: <a href="http://forest.jrc.ec.europa.eu/effis/applications/">http://forest.jrc.ec.europa.eu/effis/applications/</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

International Strategy for Disaster Reduction, *Informationen zu Euro-Alpine Netzwerk*, online im Internet: <a href="http://www.fire.uni-freiburg.de/GlobalNetworks/EuroAlpine/EuroAlpine.html">http://www.fire.uni-freiburg.de/GlobalNetworks/EuroAlpine/EuroAlpine.html</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

Geoportal Kanton Bern, Schweiz: Darstellung Kanton Bern in Kartenform, online im Internet: <a href="http://www.map.apps.be.ch/pub/synserver?project=a42pub-basis&xmin=2482938.066209474&ymin=1114598.">http://www.map.apps.be.ch/pub/synserver?project=a42pub-basis&xmin=2482938.066209474&ymin=1114598.</a>
1881297142&xmax=2750061.933790526&ymax=1259801.8118702858&epsg=2056&language=de&userprofile=geo, Abrufdatum: 01.09.2016

**GFMC:** Wildland Fire Early Warning Portal, Beschreibung verschiedener Waldbrandgefahrenmodelle unterschiedlicher Länder, online im Internet: <a href="http://www.fire.uni-freiburg.de/fwf/fwf.htm">http://www.fire.uni-freiburg.de/fwf/fwf.htm</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

**FAO** (2005): Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen, Global Forest Resources, online im Internet: <a href="http://www.fao.org/docrep/008/a0400e/a0400e00.htm">http://www.fao.org/docrep/008/a0400e/a0400e00.htm</a>, Abrufdatum: 01.09.20116

**FIRIA:** *Informationen zum Projekt Fire Risk Austria*, online im Internet:

http://www.wabo.boku.ac.at/waldbau/forschung/fachgebiete/bewirtschaftungskonzepte/waldbewirtschaftung-und-klimaaenderung/waldbrand/waldbrand-forschung/firia/, Abrufdatum: 01.07.2016

**Firetec:** *Beschreibung Simulationsprogramm Firetech*, online im Internet: https://str.llnl.gov/str/November02/Bradley.html, Abrufdatum: 01.09.2016

**FIRMS:** *Informationen zu Fire Information for Ressource Management System*, online im Internet: <a href="https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/">https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

**Forstgesetz** (1975): Fassung 06.08.2015, Begriffsbestimmung § 1a, online im Internet: <a href="https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010371">https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010371</a>,

Abrufdatum: 01.09.2016

**FWI:** *Informationen zu kanadischen Forest Fire Weather Index*, online im Internet: <a href="http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/">http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

**Jahn** (**1955**): *Auswirkungen von Waldbränden*, online im Internet: <a href="http://www.zobodat.at/pdf/nat-land\_1955\_10-12\_0149-0151.pdf">http://www.zobodat.at/pdf/nat-land\_1955\_10-12\_0149-0151.pdf</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

**Kaufman et al. (1998):** Kaufman Y.J., Ichoku C., Giglio L., Korontzi S., Chu D.A., Hao W.M., Li R.R. und Justice C.O.: *Fire and smoke observed from the Earth Observing System MODIS instrument – products, validation and operational use*, online im Internet:

http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020038850.pdf, Abrufdatum: 01.09.2016

Landfire, Waldbrandgefahr, Kronenschlussgrad: Informationen zum Kronenschlussgrad bezüglich Waldbrandgefahr, online im Internet: <a href="http://www.landfire.gov">http://www.landfire.gov</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

Lex (1975): Waldbrände im August 1975 in Niedersachsen, online im Internet: <a href="http://www.feuerwehr-nuenchritz.de/PDF/wald1\_p\_lex.pdf">http://www.feuerwehr-nuenchritz.de/PDF/wald1\_p\_lex.pdf</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

**LP DAAC:** *Informationen zu Land Processes Distributed Active Archive Cente*, online unter: <a href="https://lpdaac.usgs.gov/">https://lpdaac.usgs.gov/</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

**MODIS:** *globale Feueraktivität, März 2016, Sensor Modis*, online im Internet: https://lance.modaps.eosdis.nasa.gov/cgi-bin/imagery/firemaps.cgi, Abrufdatum: 01.09.2016

**Modis Rapid Response System:** *Informationen zu Repid Response / Wordview*, online im Internet: <a href="https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/rapid-response">https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/rapid-response</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

National Interagency Fire Center in Boise Idaho: online im Internet: <a href="http://www.nifc.gov/">http://www.nifc.gov/</a>, Abrufdatum 01.09.2016

**Potenzial von Fernerkundungsdaten, 2016:** Das Potenzial von Fernerkundungsdaten zur Unterstützung eines nachhaltigen Waldmanagements, online im Internet: http://www.diss.fu-berlin.de/diss/servlets/MCPFileNodeServlet/FUDISS\_derivate\_000000002906/08\_09\_5\_Poten.pdf?bosts=

 $berlin. de/diss/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDISS\_derivate\_000000002906/08\_09\_5\_Poten.pdf? hosts=, \\ Abrufdatum~01.09.2016$ 

Stiftung, Unternehmen, Wald, Beschreibung Nadelwald und Waldbrandgefahr: Informationen bezüglich Nadelwald und Waldbrandgefahr, online im Internet: http://www.wald.de/waldbrand/, Abrufdatum: 01.09.2016

**Stiftung, Unternehmen, Beschreibung Waldschichten:** *Beschreibung der verschiedenen Waldschichten,* online im Internet: http://www.wald.de/stockwerke-des-waldes/, Abrufdatum: 01.09.2016

**Swissfire database Switzerland:** *Informationen zu Swissfire*, online im Internet: <u>www.wsl.ch/swissfire</u>, Abrufdatum: 01.09.2016

Umweltbundesamt Deutschland: Ursachen für Waldbrände, online im Internet:

 $\underline{http://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/forstwirtschaft/waldbraende,}$ 

Abrufdatum: 01.09.2016

University of Maryland Department of Geography: online im Internet: <a href="http://rapidresponse.umd.edu/">http://rapidresponse.umd.edu/</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

**USFS:** Remote Sensing Applications Center in Salt Lake City, online im Internet: <a href="http://www.fs.fed.us/eng/rsac/">http://www.fs.fed.us/eng/rsac/</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

Vacik H., Arpaci A., Kaiser G. und Müller M. (2013): *Waldbrand-Datenbank für Österreich*, online im Internet: <a href="http://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/brand/bfw\_waldbrand/index\_DE">http://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/brand/bfw\_waldbrand/index\_DE</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

Volkwirtschaftsdirektion Kanton Bern, Schweiz, Amt für Wald, Berner Wald: Wissenswertes aus dem Berner Wald, online im Internet:

 $\underline{http://www.vol.be.ch/vol/de/index/wald/wald/downloads\_publikationen.assetref/dam/documents/VOL/KAWA/d}\\ \underline{e/Publikationen/wald\_wissenswertes\_bern\_de.pdf}, Abrufdatum: 01.09.2016$ 

# Volkswirtschaftsdirektion, Kanton Bern, Schweiz, Amt für Wald, Waldbrandgefahr:

Waldbrandgefährdungskarte des Kanton Berns, online im Internet:

 $\underline{http://www.vol.be.ch/vol/de/index/wald/wald/berner\_wald/waldbrandgefahr.html\#originRequestUrl=www.be.ch/waldbrandgefahr, Abrufdatum: 11.09.2016$ 

**Waldbrand-Datenbank, Österreich:** *Waldbrand-Datenbank Österreich*, online im Internet: <a href="http://fire.boku.ac.at/public/">http://fire.boku.ac.at/public/</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

Wien, Stadtentwicklung: *Prinzip des Luftgestützten Laserscanning*, online im Internet: <a href="https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/als/technologie.html">https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/als/technologie.html</a>, Abrufdatum: 01.09.2016

WSL, Fireless2, Switzerland: Informationen zu Fireless 2, online im Internet:

http://www.wsl.ch/fe/oekosystem/insubrisch/projekte/FireLessII/index\_DE, Abrufdatum: 01.09.2016

WSL, FireNice: Informationen zu FireNice, online im Internet:

http://www.wsl.ch/fe/oekosystem/insubrisch/projekte/FireNiche/index\_DE, Abrudatum: 01.09.2016

 $\textbf{ZAMG, ZaWaldbrandkarte:} \ \textit{Aktuelle Waldbrandgef\"{a}hrdungskarten}, \ online \ im \ Internet:$ 

https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/produkte-und-services/freizeitwetter/waldbrand, Abrufdatum: 01.09.2016

# 14. Anhang

# Programmiercode OPALS

### **Import Punktwolke**

```
opalsImport -inf Schlegelholz.las -outf Schlegelholz.odm
opalsInfo -inf Schlegelholz.odm
```

### **Generierung Punktdichtekarte aller Echos**

```
opalsCell -inf Schlegelholz.odm -cellSize 1 -feature pdens -outf
pdens_cell1.tif
```

# Visualisierung der Punktdichtekarte aller Echos

```
opalsZColor -inf pdens_cell1.tif -palFile
C:\Programme\Opals\addons\pal\densityPal.xml -scale 4 -outf
pdens_cell1_zcolor.tif
```

# Berechnung statistischer Kenngrößen mit Hilfe eines Histogramms

```
opalsHisto -inf pdens_cell1.tif -sample 0 200 -densityRange 0 15 -plotFile C:\Anja\Testgebiete\Schlegelholz\Final\pdens_cell1_histo.svg
```

# Generierung Landschaftsbezogenes Oberflächenmodell

# **Berechnung DSMmax**

```
opalsCell -inf Schlegelholz.odm -cellSize 0.5 -feature max -outf DSMmax05.odm
```

# Generierung eines Rasterbildes des DSMmax im tiff-Format

```
opalsCell -inf Schlegelholz.odm -cellSize 0.5 -feature max -outFile DSMmax05.tif
```

# Generierung eines Hillshade-Rasterbildes im tiff-Format

```
palsShade -inf DSMmax05.tif -outf DSMmax05_shade.tif -oformat GTiff
```

Die farbcodierte Visualisierung des DSMmax05.tif und des DSMmax05\_shade.tif erfolgt mit der Software OGIS

### **Berechnung DSMmpl**

# DSMmax05.odm wird als Berechnungsgrundlage verwendet

```
opalsGrid -inf DSMmax05.odm -gridSize 0.5 -interpolation movingPlane -neighbours 8 -searchRadius 3 -selmode quadrant -feature sigmaZ -outf DSMmpl05.tif
```

# Generierung eines Hillshade-Rasterbildes im tiff-Format

```
opalsShade -inf DSMmpl05.tif -outf DSMmpl05_shade.tif -oformat GTiff
```

Die farbcodierte Visualisierung des DSMmpl05.tif und des DSMmpl05\_shade.tif erfolgt mit der Software QGIS

# Berechnung des DSMfinal

```
opalsAlgebra -inf DSMmax05.tif DSMmpl05.tif DSMmpl05_sigmaZ.tif -outf DSMFinal.tif -oformat GTiff -formula=" return r[0] if r[0]!=None and r[2] > 0.5 else r[1]
```

# Generierung eines Hillshade-Rasterbildes im tiff-Format

```
opalsShade -inf DSMFinal.tif -outf DSMFinal_shade.tif -oformat GTiff
```

Die farbcodierte Visualisierung des DSMFinal.tif und des DSMFinal\_shade.tif erfolgt mit der Software QGIS

# Farbcodierte Visualisierung des Rauigkeitsindikators

```
opalsZColor -inf DSMmpl05_sigmaZ.tif -palFile
C:\Programme\Opals\addons\pal\colorBrewer_GnYlRdPal.xml -interval 0.05 -
scalePal 0,1
```

# Berechnung des nDSM

```
opalsAlgebra -inf DSMFinal.tif DTM.tif -outf nDSM.odm -formula="return (r[0]-r[1]) if (r[0]-r[1]>0.5 and r[0]!=None) else 0.5"
```

# Die farbcodierte Visualisierung des nDSM.tif erfolgt mit der Software QGIS

### **Berechnung des Brandgutes**

# Kronenuntergrenze / Kronenlänge

# **Untergrenze Quantil 0.05 / Baumhoehe Quantil 0.95**

```
opalsCell -inf Schlegelholz.odm -outfile Untergrenze_Schlegelholz0.05.tif -
feature quantile:0.05 -cellSize 5 -filter "generic[normalizedZ > 0.3]" -
attribute normalizedZ

opalsCell -inf Schlegelholz.odm -outfile Baumhoehe_Schlegelholz0.95.tif -
feature quantile:0.95 -cellSize 5 -filter "generic[normalizedZ > 0.3]" -
attribute normalizedZ
```

# Berechnung Kronenlänge

```
opalsAlgebra -inf Baumhoehe_Schlegelholz0.95.tif Untergrenze_Schlegelholz0.05 -outf Kronenlaenge95005.tif -formula="return (r[0]-r[1]) if (r[0]-r[1]) 0.3 and r[0]!=None else 0.3"
```

#### Die farbcodierte Visualisierung der Kronenlaenge.tif erfolgt mit der Software QGIS

# Bedeckungsgrad / Waldlücken

### Punktwolke in Rasterzelle einteilten, First-Pulse werden benötigt

```
opalsCell -inf Schlegelholz.odm -cellSize 5 -feature pcount -filter 
"Echo[First] and Generic[normalizedz >1.5]" -outf
Schlegelholz_First_Veg.tif
```

# Rasterbild aller Punkte wird erzeugt

opalsCell -inf Schlegelholz.odm -outfile Toppwald\_West\_All.tif -feature
pcount -cellSize 5

# Die Anzahl der First-Punkte wird ins Verhältnis zur Gesamtanzahl der Punkte gesetzt

opalsAlgebra -inf Schlegelholz\_First\_Veg.tif Toppwald\_West\_All.tif -outf Bedeckungsgrad.tif -formula="return (100\*r[1]/r[0])"

#### Die farbcodierte Visualisierung des Schlegelholz\_First\_Veg.tif erfolgt mit der Software QGIS

### Wuchsklassen

### Höhenlayer definieren

#### HL > 0.1 m - <= 1 m

opalsCell -inf Schlegelholz.odm -outf HLayer1.tif -oformat GTiff -feature
pcount -cellSize 5 -filter "Generic[NormalizedZ > 0.1 and NormalizedZ <=
1]"</pre>

# HL > 1 m - <= 3 m

opalsCell -inf Schlegelholz.odm -outf HLayer2.tif -oformat GTiff -feature pcount -cellSize 5 -filter "Generic[NormalizedZ > 1 and NormalizedZ <= 3]"

### HL > 3 m - <= 10 m

opalsCell -inf Schlegelholz.odm -outf HLayer3.tif -oformat GTiff -feature pcount -cellSize 5 -filter "Generic[NormalizedZ > 3 and NormalizedZ <= 10]"

#### HL > 10 m - <= 20 m

opalsCell -inf Schlegelholz.odm -outf HLayer4.tif -oformat GTiff -feature
pcount -cellSize 5 -filter "Generic[NormalizedZ > 10 and NormalizedZ <=
20]"</pre>

### HL > 20 m

opalsCell -inf Schlegelholz.odm -outf HLayer5.tif -oformat GTiff -feature pcount -cellSize 5 -filter "Generic[NormalizedZ > 20]"

#### Berechnung aller Punkte > 0.1 m / Referenzfile

opalsCell -inf Schlegelholz.odm -outf HLayerAll.tif -oformat GTiff -feature pcount -cellSize 5 -filter "Generic[NormalizedZ >= 0.1]"

#### Die Anzahl der Punkte in jedem Layer wird ins Verhältnis zu allen Punkten gesetzt

```
opalsAlgebra -inf HLayerAll.tif HLayer1.tif -outf Perc1.tif -
formula="return (100*r[1]/r[0])"

opalsAlgebra -inf HLayerAll.tif HLayer2.tif -outf Perc2.tif -
formula="return (100*r[1]/r[0])"

opalsAlgebra -inf HLayerAll.tif HLayer3.tif -outf Perc3.tif -
formula="return (100*r[1]/r[0])"

opalsAlgebra -inf HLayerAll.tif HLayer4.tif -outf Perc4.tif -
formula="return (100*r[1]/r[0])"

opalsAlgebra -inf HLayerAll.tif HLayer5.tif -outf Per51.tif -
formula="return (100*r[1]/r[0])"
```

#### Unterholz / Mehrschichtig / > 0.1 m - 1 m

opalsAlgebra -inf Perc1.tif Perc2.tif Perc3.tif Perc4.tif Perc5.tif -outf Unterholz.tif -formula="return 1 if (r[0] < 50 and r[1] < 50 and r[2] < 50 and r[3] < 50 and r[4] < 50 and r[0] > 5 and r[1] > 5 and r[2] > 5 and r[3] > 5 and r[4] > 5) else 0"

### Dickicht / Mehrschichtig 1 m - 3 m

opalsAlgebra -inf Perc1.tif Perc2.tif Perc3.tif Perc4.tif Perc5.tif -outf Unterholz.tif -formula="return 1 if (r[0] < 50 and r[1] < 50 and r[2] < 50 and r[3] < 50 and r[4] < 50 and r[0] > 5 and r[1] > 5 and r[2] > 5 and r[3] > 5 and r[4] > 5) else 0"

# Stangenholz / Zweischichtig 3 m - 10 m

```
opalsAlgebra -inf Perc1.tif Perc2.tif Perc3.tif Perc4.tif Perc5.tif -outf Stangenholz.tif -formula="return 1 if ((r[0])=25 and r[1]>=40) or (r[0])=40 and r[2]>=40 or (r[0])=40 and r[3]>=40 or (r[0])=40 and r[4]>=40 or (r[1])=40 and r[2]>=40 or (r[1])=40 and r[3]>=40 or (r[1])=40 and r[4]>=40 or (r[2])=40 and r[4]>=40 or (r[3])=40 or (r[3])=40 and r[4]>=40) or (r[3])=40 and r[4]>=40) else 0"
```

# Baumholz / Zweischichtig 10 - 20 m

```
opalsAlgebra -inf Perc1.tif Perc2.tif Perc3.tif Perc4.tif Perc5.tif -outf Baumholz.tif -formula="return 1 if ((r[0])=40 and r[1]>=40) or (r[0]>=40 and r[2]>=40) or (r[1]>=40 and r[2]>=40) else 0"
```

### Altholz / Einschichtig > 20 m

palsAlgebra -inf Perc1.tif Perc2.tif Perc3.tif Perc4.tif Perc5.tif -outf Dickicht.tif -formula="return 1 if ((r[0]>=30 and r[1]<20 and r[2]<20 and r[3]<20 and r[4]<20) or (r[1]>=30 and r[0]<20 and r[2]<20 and r[4]<20]) or (r[2]>=30

# Berechnung der Wuchsklassen in shape-Files zur Visualisierung der Wuchsklassenkarte

```
opalsContouring -inf Unterholz.tif -outf Unterholz_shape.shp -minArea 10

opalsContouring -inf Dickicht.tif -outf Dickicht_shape.shp -minArea 10

opalsContouring -inf Stangenholz.tif -outf Stangenholz_shape.shp -minArea 10

opalsContouring -inf Baumholz.tif -outf Baumholz_shape.shp -minArea 10

opalsContouring -inf Altholz.tif -outf Altholz_shape.shp -minArea 10
```