



Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für Geoinformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

Halbautomatische Extraktion bodennaher Vegetation aus Airborne Laserscanning-Daten als Grundlage für OL-Karten

vorgelegt von

Dipl. Ing. Gianreto Schaad FH/STV
1224107, UNIGIS MSc Jahrgang 2013

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachterin:
Dr. Gudrun Wallentin

Steinhausen, 17.06.2017

Vorwort und Danksagung

Diese Master Thesis wurde im Rahmen meiner beruflichen Tätigkeit als Software-Ingenieur bei der Firma OCAD AG erstellt. In meinem Beruf befasse ich mich intensiv mit der Kartographie und Airborne Laserscanning-Daten. In den letzten 10 Jahren programmierte ich diverse Module zum Import und zur Analyse von Airborne Laserscanning-Daten in der Kartographie-Software OCAD. Bei einer Supportanfrage im Jahr 2014 erhielt ich neue Airborne Laserscanning-Daten. Diese hatten eine deutlich höhere Punktdichte, als die bislang verwendeten. So scheiterte OCAD beim Import. Die Datenmenge war schlicht und einfach zu gross. Also musste ich die Software umprogrammieren. Gleichzeitig entdeckte ich das mögliche Potenzial dieser hohen Punktdichte. Ist es möglich, aus dieser Punktwolke neue, bessere Information zur Vegetation zu gewinnen? Können diese nützlichen Informationen dem OL-Kartographen in verständlicher Weise zur Verfügung gestellt werden?

Mit dieser Master Thesis hatte ich die Möglichkeit, das Airborne Laserscanning-Modul in OCAD mit hilfreichen Funktionen zu ergänzen und diese Tausenden OL-Kartographen weltweit zur Verfügung zu stellen. Diese Master Thesis profitiert auch von meiner über 25-jährigen Erfahrung im Bereich der OL-Kartographie.

Zuerst möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie, meinen Kolleginnen und Kollegen bedanken, die mich während dieser Zeit unterstützt und motiviert haben. Ein grosser Dank gilt meinem Arbeitgeber OCAD AG, der mir die notwendige Zeit zur Verfügung gestellt hat. Ich hoffe, dass der entwickelte Prototyp weiter verbessert wird und auch bei den Kunden Anklang findet. Die OLV Zug stellte die OL-Karte Steinhuserwald für meine Master Thesis zur Verfügung. Besten Dank. Danke auch den GIS-Fachstellen des Kantons Zug und Zürich für die Testdaten. Mein Dank gilt auch Coni Müller und Pieter Mulder fürs Korrekturlesen.

Und nicht zuletzt ein grosses Dankeschön dem ganzen UNIGIS-Team für die gute Unterstützung während des gesamten Fernstudiums!

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäss übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Steinhausen, den 17.06.2017

Gianreto Schaad (eigenhändige Unterschrift)

Kontaktinformation:

Gianreto Schaad
Mattenstrasse 48
6312 Steinhausen
Schweiz

Email: grs@grs.ch

Web: <http://www.grs.ch/blog/>

Zusammenfassung

Airborne Laserscanning liefert eine dreidimensionale Punktwolke mit einer riesigen Menge an Daten. Die Herausforderung ist, aus diesen Geodaten die relevanten Informationen über die Vegetation für die Grundlage einer OL-Karte zu gewinnen.

Eine OL-Karte ist eine detaillierte topographische Karte, die zusätzliche Angaben zur Belaufbarkeit des Geländes enthält. Um die Chancengleichheit bei Wettkämpfen weltweit zu wahren, sind die OL-Karten durch die Darstellungsvorschriften ISOM des Internationalen OL-Verbandes IOF genormt. Bei der Kartierung der Vegetation unterscheidet die ISOM zwischen Bodenbewuchs und Laufbehinderung durch dichten Wald.

Diese Master Thesis befasst sich mit der Analyse der bodennahen Vegetation im Wald. «Bodennah» bezieht sich in dieser Arbeit auf die Zone zwischen dem Boden und 3m darüber. In diesem Bereich bewegt sich der OL-Läufer. Die korrekte Darstellung der Vegetation gemäss ISOM ist für den OL-Kartographen sehr zeitintensiv, insbesondere in den Wäldern des Schweizer Mittellands. Diese zeichnen sich durch viele kleine Vegetationsflächen aus, die einzeln kartiert oder generalisiert werden müssen. Detailreichere, klassierte und lokalisierte Grundlagen über die Vegetation sollen dem OL-Kartographen bei der Kartierung im Gelände helfen und somit zu weniger zeitlichem Aufwand führen.

Diese Arbeit zeigte, dass anhand von im Gelände erfassten Stichproben die Grenzwerte der Vegetationsklassen bestimmt werden konnten. Daraus liess sich das Vegetationsmodell für das Testgebiet berechnen. Durch Geländeaufnahmen wurde das Testgebiet kartiert. Der Vergleich zwischen dem Modell und der OL-Karte lieferte interessante Erkenntnisse. Die Vegetation konnte deutlich besser detektiert werden als der Bodenbewuchs. Ein visueller Vergleich zwischen Karte und Modell zeigte, dass alle kartierten Vegetationsflächen auch als solche im Modell erkannt wurden. Nur die Grösse, Form und Klassierung innerhalb der Vegetationsklassen war unterschiedlich. Für die bessere Berechnung des Bodenbewuchses sind aktuellere ALS-Daten notwendig, die genügend korrekt klassierte Punkte im Bereich zwischen Boden und 1m darüber beinhalten.

Basierend auf dieser Arbeit entstand in der Kartographie-Software OCAD ein neues Modul zur interaktiven Aufbereitung der Grundkarte für die Vegetationskartierung aus Airborne Laserscanning-Daten. Dieses Modul ermöglicht eine neuartige interaktive Analyse der Vegetation und liefert dem Kartographen eine genauere, informativere Grundlage für die anschliessende Kartierung im Gelände.

Abstract

LiDAR provides for a three-dimensional point cloud with a significant amount of data. When preparing an orienteering base map, the challenge is to gain the relevant information from this geodata.

An orienteering map is a detailed topographic map that contains additional information about the runnability of the terrain. To maintain equal opportunity in competitions world-wide, orienteering maps are standardized by the International Specification for Orienteering Maps (ISOM), on behalf of the International Orienteering Federation IOF. In the mapping of vegetation, ISOM distinguishes between areas characterized by undergrowth and areas with dense trees or thickets.

This master thesis deals with the analysis of near-ground vegetation in the forest. In this work, “near-ground” refers to the zone between ground level and 3 meters above ground, the zone in which orienteers navigate their courses. According to ISOM, an accurate representation of the vegetation by the mapper implies a critical time factor for the competitor, in particular in the forests of the Swiss Midlands. These forests are characterized by many small vegetation patches which must be mapped as individual features. More detailed, classified and localized vegetation base mapping helps the mapper during field work and therefore saves precious time and effort.

This work shows that conducting spot checks in the test area resulted in a more effective determination of the border values of vegetation classes. A comparative analysis of the model and the map provided interesting results. Vegetation features could be detected considerably better than undergrowth.

A visual comparison between map and model confirmed that all vegetation features in the model could be verified in the map. Only the size, shape and classification within the vegetation classes are different. For a more efficient determination of the undergrowth, more up to date LiDAR data that contain adequate numbers of correctly classified points in the zone from ground level to 1 m height is required.

Based on this work, a new module for the interactive preparation of the base map for mapping vegetation using LiDAR data was developed for the cartography software OCAD. This module allows a new, interactive analysis of the vegetation and provides the cartographer with a better vegetation base map for the mapping the chosen terrain.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Ausschnitt der OL-Karte „Benente“ mit detailreicher, kleinflächiger Vegetation. Keine massstäbliche Abbildung. Abstand zwischen Nordlinien 250m. (Quelle: OL WM 2012 Lausanne)	2
Abbildung 2 Prinzip von Airborne Laserscanning (Quelle: GEOPLEX GmbH).....	5
Abbildung 3 ALS mit First and Last Pulse (Quelle: GEOPLEX GmbH)	6
Abbildung 4 Gaussian decomposition of full waveform (Baltsavias, 2014).....	7
Abbildung 5 Klassierung der ALS-Daten nach dem ASPRS Standard. (Quelle: ASPRS)	8
Abbildung 6 Klassierung der ALS-Daten des Kantons Zürich. (Quelle: GIS-ZH des Kantons Zürich)	8
Abbildung 7 Unterschied zwischen DTM und DOM (Quelle: www.ocad.com)	9
Abbildung 8 Orthophoto des Testgebietes, 500mx500m (Quelle: https://map.geo.admin.ch)	12
Abbildung 9 Steinhuserwald, Ausschnitt Landeskarte 1:25'000. Nicht massstäblich abgebildet. (Kartengrundlage: https://map.geo.admin.ch/).....	13
Abbildung 10 Beispiel einer gelayouteten Wettkampfkarte. Nicht massstäblich abgebildet. (Quelle: SOW 2016 Engadin St. Moritz, CO Engiadina)	14
Abbildung 11 Ausschnitt aus OL-Karte „S-chanf“. Nicht massstäblich abgebildet. (Quelle: SC Corvatsch).....	15
Abbildung 12 Links: Nicht erlaubte Kombination der Signaturnummern 406 und 407. Rechts: Korrekt verwendete Signatur 408	17
Abbildung 13 OL-Karte S-chanf. Links: Photogrammetrische Luftbilddauswertung von Ivar Helgesen, Norwegen. Rechts: Derselbe Ausschnitt als OL-Karte. (Quelle: SC Corvatsch)	18
Abbildung 14 1m Höhenlinien (links) und Reliefschummerung (rechts) als Grundlage der OL-Karte Schorüti. (Lehmann, 2005).....	19
Abbildung 15 Vegetationshöhenmodell des Steinhuserwaldes farbig dargestellt.....	19
Abbildung 16 Grundkarte eines Ausschnittes des Waldes «Got Grond» (links) und die entsprechende OL-Karte (rechts). Keine massstäbliche Abbildung. (Quelle: OLG Chur).....	21
Abbildung 17 Zeichnung der Geländeaufnahme der OL-Karte «Pontresina Tais» in OCAD. (Quelle OL-Karte: CO Engiadina)	21
Abbildung 18 Perimeter der ALS-Kachel 26800_12290. (Quelle: GIS-ZH des Kantons Zürich).....	23
Abbildung 19 LASviewer von den LAsTools. (Datenquelle: GIS Zürich)	24
Abbildung 20 OCAD Import-Assistent zum Erstellen von DTM und DOM.....	24
Abbildung 21 OCAD: Höhenkurven, 1m Äquidistanz, Linien nicht geglättet.....	25
Abbildung 22 OCAD: Vegetationshöhen, klassiertes, normalisiertes Vegetationsmodell.....	25
Abbildung 23 OCAD: Reliefschummerung zur Detektion von linearen Objekten (z. B. Strassen)	25
Abbildung 24 OCAD: Intensitätskarte des Oberflächenmodells, Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelwald	25
Abbildung 25 OCAD «LiDAR Point Cloud Manager».....	26
Abbildung 26 Karttapullautin: Höhenkurven, 0.33m Äquidistanz, Linien geglättet zusätzlich Kuppen und kleine Senken (braun)	27
Abbildung 27 Karttapullautin: Vegetation	27
Abbildung 28 Karttapullautin: Bodenbewuchs.....	27
Abbildung 29 Karttapullautin: Vermutete Felsen	27

Abbildung 30 Graphischer Benutzeroberfläche von OL Laser	27
Abbildung 31 OL Laser: Höhenkurven, 1m Äquidistanz, Linien geglättet.....	28
Abbildung 32 OL-Laser: Vermutete Felsen (schwarz) anhand der Hangneigung, kombiniert mit Höhenkurven. 28	
Abbildung 33 OL Laser: Reliefschummerung zur Detektion von linearen Objekten (z. B. Strassen)	28
Abbildung 34 OL Laser: Intensitätskarte des Oberflächenmodells, Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelwald	28
Abbildung 35 «Lidar-batch»: Vegetationskarte mit Bodenbewuchs	29
Abbildung 36 Objektextraktion aus der Reliefschummerung (oben), überlagert mit der OL-Karte (unten) (Ditz, et al., 2014)	31
Abbildung 37 Flächendetektion von unterschiedlicher Vegetation anhand des Oberflächenmodells (oben), überlagert mit der OL-Karte (unten) (Ditz, et al., 2014)	31
Abbildung 38 Automatisch erstelle OL-Karte aus ALS-Daten ergänzt mit Elementen der nationalen topographischen Datenbank (links), erweitert nach manueller, visueller Interpretation (rechts) (Petrovič, 2014)	32
Abbildung 39 Nachbarschaft. Pixelgrösse 0.5m. Innerer Radius 1m, äusserer Radius 2.0m. Quelle: (Trier, 2015)	34
Abbildung 40 Gesamtüberblick zur Methodik von den ALS-Daten zur OL-Karte und dem Vergleich durch Geländebegehung	37
Abbildung 41 ALS-Daten Steinhuserwald Kanton Zürich in LASview	39
Abbildung 42 ALS-Daten Steinhuserwald Kanton Zug in LASview. (Datenquelle: GIS Zug)	40
Abbildung 43 Steinhuserwald mit nur gerenderten Bodenpunkten. (Datenquelle: GIS Zug)	40
Abbildung 44 OL-Karte "Steinhuserwald". Abbildung nicht masstäblich. (Quelle: OLV Zug).....	41
Abbildung 45 Geometrische Genauigkeiten der OL-Karte «Steinhuserwald». Gitterabstand 10m. (Quelle Luftbild: GIS Zug)	42
Abbildung 46 Komponenten des OCAD LiDAR Point Cloud Manager.....	43
Abbildung 47 Option zum Erstellen der ocdLas-Datei beim Import des DHM in OCAD	45
Abbildung 48 Querprofil im OCAD «LiDAR Point Cloud Manager»	46
Abbildung 49 OL-Karte mit den erfassten und klassierten Stichproben. Gitterabstand 50m. Ausschnitt 500x500m.	48
Abbildung 50 Erfasste und klassierte Stichproben. Gitterabstand 50m. Ausschnitt 500x500m.	48
Abbildung 51 Vertikale Verteilung der ALS-Punktewolke in OCAD	49
Abbildung 52 Zelle mit der Nachbarschaft und der Gewichtung	53
Abbildung 53 Bedeutung der Grenzwerte der Laufbehinderung	54
Abbildung 54 Funktion Orienteering Base Map zum Erstellen einer Grundkarte	55
Abbildung 55 Link: Bestehenden OL-Karte. Rechts: Berechnete Orienteering Base Map überlagert mit dem Wegenetz.....	55
Abbildung 56 Regeln für die Klassierung einer Zelle	57
Abbildung 57 Kartierung des Testgebiets im April 2017	61
Abbildung 58 Kartierung des Testgebiets mit Signaturen der Orienteering Base Map.....	62
Abbildung 59 Ergebnisse des Vergleichs zwischen Karte und Modell	65
Abbildung 60 Gegenüberstellung von Modell (7x7- Nachbarschaft), links und Karte rechts.....	66

Abbildung 61 Orienteering Base Map mit unterschiedlich grosser Nachbarschaft. 1x1 oben links, 3x3 oben rechts, 5x5 unten links, 7x7 unten rechts.	66
Abbildung 62 Aufteilung der NDNDs auf den ganzen Wertebereich für die 7x7 Nachbarschaft	67
Abbildung 63 Standorte der untersuchten Gebiete A, B und C im Testgebiet	67
Abbildung 64 Analyse des Bodenbewuchses zwischen Karte und Modell. Ausschnitt A, Gitterabstand 25m.	68
Abbildung 65 Analyse des Bodenbewuchses zwischen Karte und Modell. Ausschnitt B, Gitterabstand 25m.	68
Abbildung 66 Vertikale Verteilung der ALS-Punkte im Ausschnitt B	69
Abbildung 67 Analyse des Bodenbewuchses zwischen Karte und Modell. Ausschnitt C, Gitterabstand 25m.	69
Abbildung 68 Der Leica Pegasus Backpack, vorgestellt an der Intergeo 2015	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 LAS-Dateiformat, Point Data Record Format 0. (ASPRS, 2011).....	10
Tabelle 2 Inhalt einer OL-Karte gemäss ISOM 2000	15
Tabelle 3 Vegetationssignaturen der ISOM 2000 (Swiss Orienteering, 2000).....	16
Tabelle 4 Verwendete Softwares zur Auswertung von ALS-Daten	22
Tabelle 5 Farbkodierung der Vegetationshöhen in OCAD	25
Tabelle 6 Resultate der Befragung der Teilnehmer zur erstellten Trainingskarte (Petrovič, 2014)	33
Tabelle 7 Vegetationsklassen für Laufbehinderung durch Vegetation. Quelle: (Trier, 2015)	35
Tabelle 8 NDVD-Grenzwerte für die Berechnung der Vegetation. Quelle: (Trier, 2015).....	35
Tabelle 9 Klassierungsraten für 4 verschiedene Waldgebiete nahe Oslo. Quelle: (Trier, 2015)	36
Tabelle 10 Vergleich der ALS-Testdaten vom Gebiet Steinhuserwald.....	38
Tabelle 11 ocdLas-Datenformat	44
Tabelle 12 Test der Dateigrössen für die Testdaten	45
Tabelle 13 Geschwindigkeitstest mit ALS-Daten	45
Tabelle 14 Darstellung der Punkte nach Klassierung im «LiDAR Point Cloud Manager»	46
Tabelle 15 Signaturen der 6 Vegetationsklassen für die Stichproben	47
Tabelle 16 Beispiel einer Stichprobe für den Punkt in dem ObjectIndex 39	49
Tabelle 17 Streifenrandpunkte zur Analyse der Klassierung	50
Tabelle 18 NDVD der Vegetationsdichte	52
Tabelle 19 NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.0m bis 3.0m, 1x1 Nachbarschaft	59
Tabelle 20 NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.0m bis 3.0m, 3x3 Nachbarschaft	59
Tabelle 21 NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.0m bis 3.0m, 5x5 Nachbarschaft	59
Tabelle 22 NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.0m bis 3.0m, 7x7 Nachbarschaft	60
Tabelle 23 Grenzwerte für NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.0m bis 3.0m	60
Tabelle 24 NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.2m bis 2.0m, 5x5 Nachbarschaft	60
Tabelle 25 Vergleich NDVDs von Trier (2015) mit denen des Testgebiets	61
Tabelle 26 Vergleich der automatischen Klassierung und der Kartierung im Gelände, 1x1 Nachbarschaft	63
Tabelle 27 Vergleich der automatischen Klassierung und der Kartierung im Gelände, 3x3 Nachbarschaft	63
Tabelle 28 Vergleich der automatischen Klassierung und der Kartierung im Gelände, 5x5 Nachbarschaft	63
Tabelle 29 Vergleich der automatischen Klassierung und der Kartierung im Gelände, 7x7 Nachbarschaft	64
Tabelle 30 Übersicht der Ergebnisse des Vergleichs zwischen Karte und Modell.....	64

Abkürzungsverzeichnis

ALS	Airborne Laserscanning
ASPRS	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing
ISOM 2000	International Specification for Orienteering Maps 2000
ISOM 2017	International Specification for Orienteering Maps 2017
DHM	Digitales Höhenmodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DTM	Digitales Terrainmodell
LiDAR	Light detection and ranging
NDVD	Normalized Difference Vegetation Denisity
OL	Orientierungslauf
TLS	Terrestrisches Laserscanning
VHM	Vegetationshöhenmodell

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Motivation.....	2
1.3	Aufgabenstellung	3
1.4	Struktur der Master Thesis.....	3
2	Grundlagen.....	5
2.1	Airborne Laserscanning.....	5
2.1.1	Laserscanning	5
2.1.2	Digitales Terrainmodell	8
2.1.3	Digitales Oberflächenmodell	9
2.1.4	Vegetationshöhenmodell	9
2.1.5	Dateiformate	9
2.2	Testgebiet.....	11
2.3	Einführung in die OL-Karte	13
2.3.1	Orientierungslauf	13
2.3.2	OL-Karte.....	13
2.3.3	Entwicklung der OL-Karte.....	17
2.3.4	Kartierung im Gelände	20
2.3.5	Heutige Verwendung von ALS-Daten	22
2.4	Verwendete Software in OL-Kartographie	22
2.4.1	LAStools	23
2.4.2	OCAD 12	24
2.4.3	Karttapullautin.....	26
2.4.4	OL Laser 1.4.0.5	27
2.4.5	Lidar-batch.....	28
2.5	Testumgebung	29
3	Forschungsstand	30
3.1	Optimierung der Höhenkurven	30
3.2	Objektextraktion aus ALS-Daten	30
3.3	Automatisches Erstellen von OL-Karten.....	31
3.3.1	Automatische Kartierung der Vegetation.....	33
4	Methodik und Werkzeuge.....	37
4.1	ALS-Testdaten	38
4.1.1	ALS-Daten Kanton Zürich.....	39
4.1.2	ALS-Daten Kanton Zug.....	39
4.2	OL-Karte Steinhuserwald	41
4.3	OCAD «LiDAR Point Cloud Manager».....	42
4.3.1	ocdLas-Dateiformat	43
4.3.2	Bestehende Funktionalität	46
4.4	Modellbildung auf Basis von empirischen Daten.....	47
4.4.1	Empirische Daten	47
4.4.2	Analyse einer Stichprobe.....	49
4.4.3	Modellbildung	51
4.4.4	Entwicklung der Funktion «Orienteering Base Map».....	54
4.4.5	Regeln für die Klassierung einer Zelle	55
4.4.6	Morphologische Filter	58
5	Ergebnisse	59
5.1	Berechnung NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation.....	59
5.2	Verifikation des Vegetationsmodells	61
5.3	Analyse NDVD Undergrowth.....	67
6	Diskussion	70
6.1	Fazit.....	70
6.2	Beantwortung der Forschungsfrage.....	71
6.3	Ausblick	72

7	Literaturverzeichnis.....	73
8	Anhang.....	75
8.1	Legende ISOM 2000	75
8.2	Stichproben Steinhuserwald	76

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

OL ist ein Sport, bei dem der Athlet mit Hilfe von OL-Karte und Kompass eine bestimmte Reihenfolge von Kontrollposten in möglichst kurzer Zeit anlaufen muss. Die Route zwischen den Kontrollposten kann frei gewählt werden.

Die OL-Karte ist eine detaillierte topographische Karte, die zusätzliche Angaben zur Belaufbarkeit des Geländes enthält. Um die Chancengleichheit bei Wettkämpfen weltweit zu wahren, sind die OL-Karten durch die Internationalen Darstellungsvorschriften ISOM 2000 (International Orienteering Federation, 2000) genormt. OL-Karten werden im Auftrag von OL-Vereinen durch spezialisierte Kartographen oder in ehrenamtlicher Arbeit von Vereinsmitgliedern erstellt.

In den 70er Jahren verwendeten die OL-Kartographen topographischen Karten als Grundlage für ihre Arbeit. Der Einsatz von speziellen photogrammetrischen Luftbildauswertungen anfangs der 80er Jahre als Grundlage für eine OL-Karte erleichterte die Arbeit im Gelände und führte zu genaueren und damit besseren OL-Karten.

Der nächste grosse Schritt in der Technik der OL-Kartographie erfolgte 2005: Erstmals wurden in der Schweiz Airborne Laserscanning (ALS)-Daten für die Herstellung einer OL-Karte verwendet. Aus dem digitalen Terrainmodell des Bundesamtes für Landestopographie (swisstopo) konnten 1m-Höhenkurven¹ des Geländes und die Reliefschummerung berechnet werden. In der Reliefschummerung waren im steilen Gelände sogar die Geometrie der Strassen, Pfade und Gräben sichtbar. Die detailreichen Grundlagen führten zu einer Zeitersparnis bei der Kartenaufnahme im Gelände und zu einem genaueren, besseren Höhenkurvenbild (Lehmann, 2006).

Neben den Höhenkurven und der Reliefschummerung bietet die Vegetationshöhe (Differenz aus dem Höhen- und Geländemodell) weitere nutzbare Informationen. Aus den Vegetationshöhen kann man auch Waldränder, Waldlichtungen und sogar Vegetationsgrenzen im Wald extrahieren und kartieren (Schaad, 2009) (Gloor, 2013). Unterdessen sind die ALS-Daten als Grundlage für OL-Karten nicht mehr wegzudenken, wenn diese Daten im entsprechenden Gebiet verfügbar sind.

Heutzutage existieren sogar spezielle Softwares, die aus ALS- und topographischen Daten automatisch OL-Karten erstellen (Kapitel 3.3). Diese können zu Trainingszwecken verwendet

¹ In der Schweiz wird beim OL der Ausdruck «Höhenkurven» verwendet. In anderen Bereichen ist «Höhenlinien» gebräuchlich.

werden, ersetzen jedoch die traditionelle Geländeaufnahme für Wettkampfkarten nicht (Petrovič, 2013).

Diese Master Thesis basiert auf verfügbaren ALS-Datensätzen. Diese sind bei nationalen oder regionalen Geodatenlieferanten zu beziehen. Diese Master Thesis befasst sich nur mit klassierten Laserscanning-Daten. Aus Kostengründen ist es zurzeit nicht möglich, Gebiete nur zur Herstellung einer OL-Karte mit Laserscanning zu befliegen. Dies kann sich mit der Weiterentwicklung der Technologie und der Verbreitung von Drohnen jedoch schnell ändern. Nicht untersucht wird die Verwendung von Daten aus terrestrischen Laserscannern. Diese Aufnahmemethode ist bei einem typischerweise mehrere Quadratkilometer grossen Waldstück für eine OL-Karte zurzeit zu aufwändig und somit nicht rentabel.

1.2 Motivation

Die ALS-Daten erleichterten das Kartieren der Höhenkurven stark und ermöglichen dem Kartographen, ein Gebiet schneller zu kartieren. Hingegen ist die Kartierung der Vegetation nach wie vor sehr zeitintensiv. So sind im Schweizer Mittelland die Wälder in den letzten Jahren dichter und die Grünflächen kleinstrukturierter worden. Auf OL-Karten wird bei der Kartierung von Vegetation zwischen dichten Baumgruppen und Bodenbewuchs unterschieden. Dichte Baumgruppen, typischerweise Tannen- oder Buchendickichte, werden mit grüner Flächensignatur dargestellt. Der Bodenbewuchs, meist Brombeeren oder Fallholz, wird mit grünen, senkrechten Strichen gezeichnet. Ein entsprechender Ausschnitt einer OL-Karte mit hohem Grünanteil ist in der Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1 Ausschnitt der OL-Karte „Benente“ mit detailreicher, kleinflächiger Vegetation.
Keine massstäbliche Abbildung. Abstand zwischen Nordlinien 250m. (Quelle: OL WM 2012 Lausanne)

Für weitere Informationen zu OL-Karten, insbesondere auch zu deren Vegetationskartierung, wird auf das Kapitel 2.3.2 verwiesen.

Die Vegetationsdarstellung auf der OL-Karte ist für den Athleten eine sehr wichtige Information, damit er abschätzen kann, wie gut die frei wählbare Route zwischen den Kontrollposten im entsprechenden Gebiet belaufbar ist. Ist eine gewählte Route langsamer belaufbar als auf der Karte dargestellt, verliert der Athlet unerwartet Zeit. Andererseits ist es

aus Sicht der Chancengleichheit auch nicht gut, wenn die Route besser belaufbar und somit schneller als auf der Karte dargestellt ist.

Trier (2015) stellte fest, dass die Kartierung der Laufbehinderung durch Vegetation die grösste Herausforderung und subjektivste Aufgabe des Kartographen ist. So bieten automatische Methoden die Möglichkeit, den subjektiven Einfluss des Kartographen zu reduzieren und Zeit beim Kartieren im Gelände zu sparen (Trier, 2015).

1.3 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Master Thesis ist, Methoden zu entwickeln, mit denen anhand der ALS-Daten Rückschlüsse auf die bodennahe Vegetation gemacht werden können. Diese Grundlageninformationen sind für den Kartographen bei der Kartierung im Gelände wichtig und können seine Produktivität erhöhen.

Im Speziellen sollen die folgenden wissenschaftlichen Fragen beantwortet werden:

- *Kann bodennahe Vegetation aus den ALS-Daten extrahiert werden?*
- *Kann zwischen niedriger und hoher Vegetation unterschieden werden?*
- *Verkürzen diese zusätzlich gewonnenen Informationen die Herstellungsdauer einer OL-Karte und erhöhen somit die Produktivität des Kartographen?*
- *Kann die Kartierung der Vegetation vereinheitlicht werden?*

Die Überprüfung der Resultate erfolgt anhand eines Testgebietes.

Diese neuen Methoden sollen in einem Prototyp in der Kartographie-Software OCAD programmiert werden. OCAD verfügt schon über umfangreiche Funktionen zum Import und zur Analyse von ALS-Daten. Die Programmierung erfolgt mit «Object Pascal» in der Entwicklungsumgebung «Embarcadero Delphi».

1.4 Struktur der Master Thesis

Die vorliegende Master Thesis ist in 8 Kapitel gegliedert.

Nach der Einleitung folgt in Kapitel 2 ein Überblick über die Grundlagen zu dieser Arbeit. Der erste Teil erklärt Airborne Laserscanning. Die Weiterentwicklung in dieser verhältnismässig jungen Technologie ist rasant. Anschliessend wird das Testgebiet Steinhuserwald beschrieben. Weiter folgt die Beschreibung der Sportart OL und deren wichtigstes Sportgerät, der OL-Karte. Für die weiteren Kapitel ist es wichtig, die Vegetationskartierung auf der OL-Karte zu verstehen. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einer Übersicht der heute schon eingesetzten Softwares in Bereich OL-Kartographie und ALS-Daten.

Kapitel 3 beschreibt den aktuellen Forschungsstand im Bereich OL. In diesem Bereich findet wenig wissenschaftliche Forschung statt. Die aktuellen Themen sind die Optimierung der Höhenkurven, die Objektextraktion und die Vegetationskartierung.

Kapitel 4 umschreibt die Methodik und die Werkzeuge. Aus den im Gelände erfassten Stichproben wird ein Modell berechnet. Dieses wird mit der Geländekartierung verglichen. Die daraus berechneten Ergebnisse werden im Kapitel 5 dargestellt und analysiert. Kapitel 6 erörtert die anschliessende Diskussion und beantwortet die Forschungsfragen.

Im abschliessenden Kapitel 8 ist die Legende der OL-Karte nach ISOM 2000 dargestellt. Anschliessend folgt die komplette Liste der 166 Stichproben. Sämtliche in dieser Master Thesis abgebildeten OL-Karten wurden nach ISOM 2000 gezeichnet.

2 Grundlagen

2.1 Airborne Laserscanning

Airborne Laserscanning hat die Geländeaufnahme in den letzten zwei Jahrzehnten revolutioniert. Durch die hohe Datendichte und die für viele Anwendungen ausreichende Genauigkeit können die Daten in einem breiten Anwendungsspektrum angewendet werden.

2.1.1 Laserscanning

Laserscanning ist eine Technologie, bei der mit einem Laserstrahl Oberflächen abgetastet werden (Abbildung 2). Der Laserscanner sendet Impulse aus. Die Oberfläche reflektiert diese Impulse des stark gebündelten Laserstrahls. Dieser wird vom Sensor empfangen. Aus der Laufzeit vom Aussenden des Impulses bis zu dessen erneutem Empfang wird die zurückgelegte Distanz berechnet. Zusammen mit der Richtung kann die Distanz in ein dreidimensionales Koordinatensystem umgerechnet werden. Wenn die Position und Orientierung des Scanners zum Aufnahmezeitpunkt bekannt ist, kann die erfasste Punktwolke in ein georeferenziertes System transformiert werden. Dafür wird GPS und ein Inertialsystem verwendet.

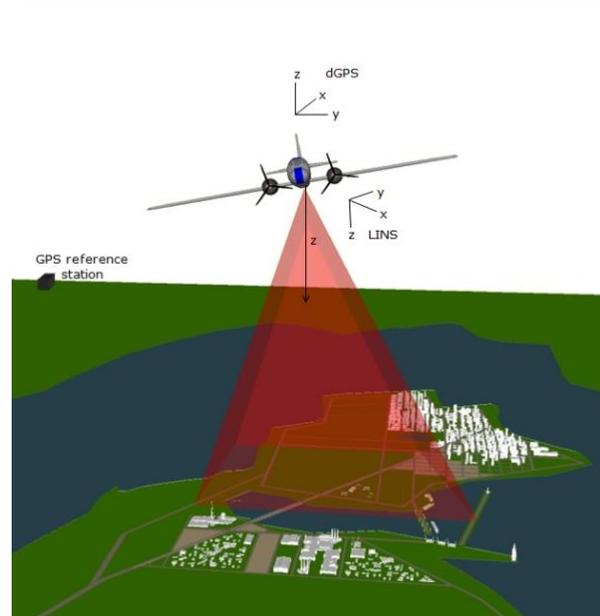


Abbildung 2 Prinzip von Airborne Laserscanning (Quelle: GEOPLEX GmbH)

Für Laserscanning wird in der Fernerkundung oft auch der Ausdruck LiDAR (Abkürzung fürs Englische *Light detection and ranging*) verwendet. Es wird zwischen Airborne Laserscanning (ALS) und terrestrischem Laserscanning (TLS) unterschieden.

Bei ALS erfolgen die Messungen meist vom einem Flugzeug oder Helikopter aus. Somit ermöglicht ALS grossflächige Geländeaufnahmen. Neuste Entwicklungen ermöglichen sogar, den Laserscanner an einer Drohne zu befestigen. Somit könnte es schon in naher Zukunft möglich werden, Waldgebiet speziell für OL-Karte zu befliegen, ohne den Kostenrahmen zu

sprengen. Die in dieser Master Thesis verwendeten Daten stammen ausschliesslich von flugzeuggestützten Messungen. Die Datenerfassung erfolgt in Flugstreifen. Die Abweichungen der einzelnen Punkte in der Querüberlappung können für die Qualitätsbeurteilung verwendet werden.

Beim terrestrischem Laserscanning (TLS) hingegen erfolgt die Aufnahme von einem stationären Laserscanner (z. B. auf einem Messstativ) oder einem Fahrzeug aus.

2.1.1.1 *First and Last-Pulse*

Der ausgesendete Impuls wird an der Objektoberfläche reflektiert und vom Sensor wieder empfangen. Laserstrahlen durchdringen zum Teil auch die Vegetation. So ist es möglich, dass mehrere reflektierte Impulse des ausgesendeten Laserstrahls vom Sensor empfangen werden. Beim an der Baumkrone reflektierten Impuls spricht man von «First Pulse.» Der «Last Pulse» entspricht meist dem reflektierten Punkt am Boden oder an Gebäudedächern. Im bewaldeten Gebiet haben diese verschiedenen Impulse den Vorteil, dass sowohl die Baumkronen wie auch der Waldboden erfasst werden. Somit ist ALS prädestiniert zum Erfassen von Waldgebieten. Dieses «First and Last-Pulse» Verfahren ist in Abbildung 3 dargestellt.

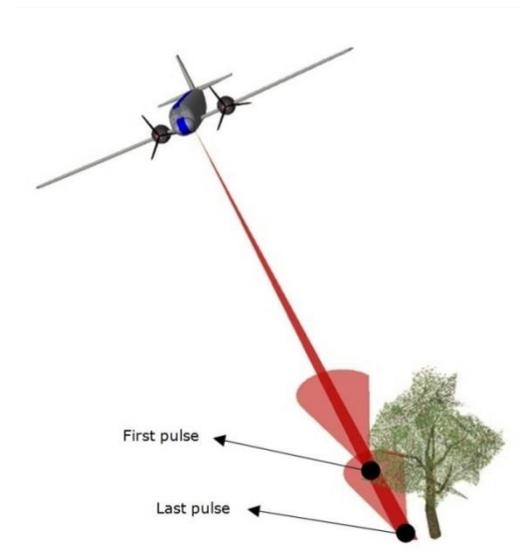


Abbildung 3 ALS mit First and Last Pulse (Quelle: GEOPLEX GmbH)

2.1.1.2 *Discrete Echo und Full Waveform Sensoren*

Es gibt zwei verschiedene Systeme beim ALS: *Discrete Echo* und *Full Waveform Sensoren* (Baltsavias, 2014). *Discrete Echo* gilt als konventionelles System. Pro ausgesendeter Impuls kann ein First und Last Echo empfangen und gespeichert werden. Die Weiterentwicklung führte dazu, dass 4 bis 5 Echos als diskrete Punkte gespeichert werden. Wegen der sogenannten Totzeit des Empfängers ist dieser jedoch für einen Bereich von etwa 3m praktisch «blind». Das bedeutet, dass im Bereich des Waldes, wenn der Boden erfasst wird, bei diesem Laserimpuls keine weiteren bodennahen Punkte vom Empfänger erfasst werden können. Damit kann durch diese Zwischenechos der Bereich zwischen Waldboden und

Baumkronen erfasst werden, was für diese Master Thesis essentiell ist. Jedoch können nicht alle empfangenen Informationen (z.B. Echobreite) in diskreten Punkten abgespeichert werden, was zu einem Informationsverlust führt.

Neuere ALS-System unterstützen *Full Waveform*. Dabei wird das ganze empfangene Signal gespeichert. Die Daten werden nachbearbeitet (*post-processing*). Die zusätzlichen Informationen wie Echobreite, Amplitude und Querschnitt sind wichtige Informationen bei der Klassierung der einzelnen Punkte.

Das Beispiel in Abbildung 4 zeigt, wie das empfangene analoge Signal digitalisiert wird. Alle 15cm (entspricht einer Nanosekunde) berechnet der Laserscanner aus dem analogen Signal einen Punkt und modelliert diesen als Überlagerung mehrerer Gauss-Funktionen.

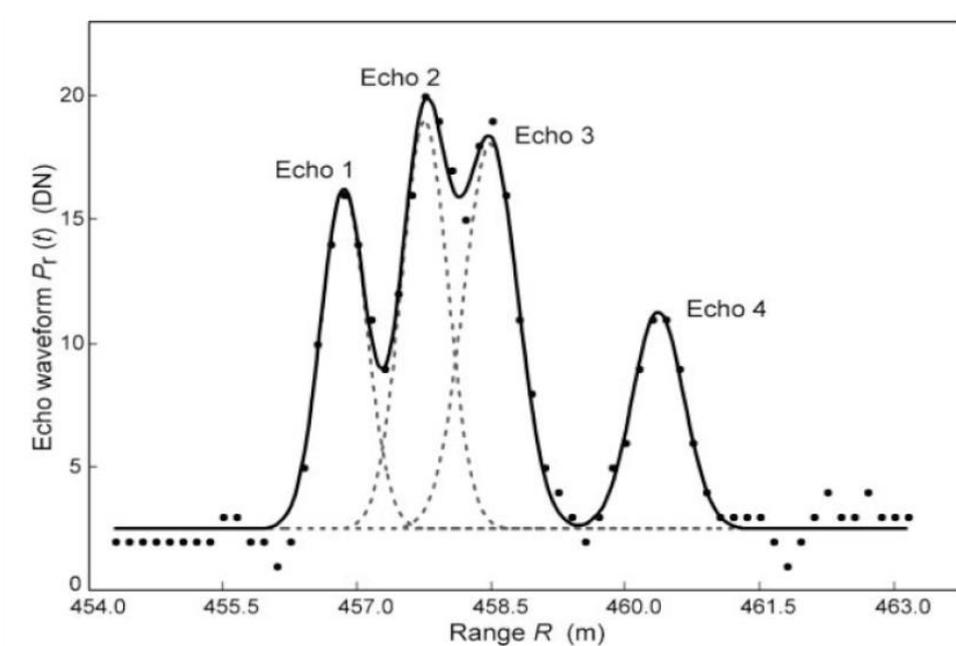


Abbildung 4 Gaussian decomposition of full waveform (Baltsavias, 2014)

Gemäss (Baltsavias, 2014) sind *full waveform*-ALS-Daten nützlich, um Vegetationsstrukturen zu beschreiben, und führen zu einer höheren Qualität bei einem digitalen Terrainmodell bei Gebieten mit niedriger Vegetation oder im Wald.

2.1.1.3 Intensität

Erfasste Objekte reflektieren Impulse des Laserstrahls mit unterschiedlicher Stärke. Die Stärke dieser Reflexion wird Intensität genannt. Die Intensität wird vom ALS-Sensor ebenfalls erfasst. Daraus kann auf die Art des Objektes geschlossen werden. Dieser Schritt erfolgt in der Klassierung.

2.1.1.4 Klassierung

Bei der Klassierung wird jeder Punkt anhand seiner Attribute einer bestimmten Klasse zugeordnet. Diese Klassierung erfolgt meist durch den Datenproduzenten. Die Klassierung

nach dem ASPRS Standard (ASPRS, 2011) ist in Abbildung 5 dargestellt. Dieser ist in den *LAS Specification* definiert. Die in dieser Master Thesis verwendeten Daten des Kantons Zürich basieren gemäss den Spezifikationen auf der LAS-Version 1.2.

Classification Value (bits 0:4)	Meaning
0	Created, never classified
1	Unclassified ¹
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Point (noise)
8	Model Key-point (mass point)
9	Water
10	<i>Reserved for ASPRS Definition</i>
11	<i>Reserved for ASPRS Definition</i>
12	Overlap Points ²
13-31	<i>Reserved for ASPRS Definition</i>

Abbildung 5 Klassierung der ALS-Daten nach dem ASPRS Standard. (Quelle: ASPRS)

Eine präzise Definition, ob ein Punkt niedriger (*low*), mittlere (*medium*) oder hohe Vegetation (*high vegetation*) ist, fehlt in diesem ASPRS Standard. Diese Klassierung ist beschrieben in den Spezifikationen der ALS-Daten des Kantons Zürich². Diese Einteilung der Vegetationsklassen ist für diese Master Thesis nicht von Bedeutung, da für jeden Punkt die Höhe über Boden aus dem Terrainmodell neu berechnet wird. Die Vegetation bei den Daten des Kantons Zürich ist in drei Schichten (0m-0.5m, 0.5m-3.0m und über 3.0m) eingeteilt (Abbildung 6).

Name	Typ	Einheit Beschreibung
LAS point classification	Short Integer	2 Bodenpunkte / DOM + DTM 3 Bodennahe Punkte/Vegetation tief (< 50 cm) / DOM 4 Vegetation mittel (< 3 m) / DOM 5 Vegetation hoch (> 3 m) / DOM 6 Gebäude / DOM 7 Ausreisser und Fehlmessungen 10 Brücken, Stege (> 3m) / DOM 12 Streifenrandpunkte 15 Freileitungen, Masten, Antennen 17 Übrige (Fahrzeuge, etc.)

Abbildung 6 Klassierung der ALS-Daten des Kantons Zürich. (Quelle: GIS-ZH des Kantons Zürich)

2.1.2 Digitales Terrainmodell

Das digitale Terrainmodell (DTM) beschreibt die Geländeoberfläche ohne Kunstbauten und Vegetation. Oft werden dafür auch die Begriffe digitales Höhenmodell (DHM) und digitales Geländemodell (DGM) verwendet.

² <https://geolion.zh.ch/geodatensatz/show?nbid=2618>

2.1.3 Digitales Oberflächenmodell

Das digitale Oberflächenmodell (DOM) bildet die Geländeoberfläche mit allen künstlichen (zum Beispiel Gebäude und Brücken) und natürlichen Erhebungen (typischerweise Büsche und Bäume) ab. Abbildung 7 zeigt den Unterschied zwischen dem DTM (rot dargestellt) und dem DOM (blau).



Abbildung 7 Unterschied zwischen DTM und DOM (Quelle: www.ocad.com)

2.1.4 Vegetationshöhenmodell

Das Vegetationshöhenmodell (VHM) ist die Differenz zwischen dem Oberflächenmodell und dem Terrainmodell. Damit wird die Höhe der Vegetation und der Kunstbauten abgebildet. Somit kann der Ausdruck «Vegetationshöhenmodell» auch verwirrend sein, da in diesem Fall nicht nur die Vegetation, sondern auch Kunstbauten wie Gebäude abgebildet werden. Da sich die Anwendung in der OL-Kartographie jedoch auf den Wald bezieht, setzte sich der Ausdruck «Vegetationshöhenmodell» durch. Es wird dabei nicht unterschieden zwischen Vegetationshöhenmodellen aus klassierten und nicht klassierten Punktwolken. Bei klassierten Punktwolken kann das Vegetationshöhenmodell natürlich auch nur aus den Vegetationspunkten und dem Terrainmodell berechnet werden.

Oft wird auch der Begriff normalisiertes digitales Oberflächenmodell (englisch: *normalized Digital Surface Model*) mit der Abkürzung nDSM verwendet. Innerhalb der Forstwirtschaft wird auch vom «normalisierten Kronenmodell» gesprochen.

2.1.5 Dateiformate

ALS-Daten können in verschiedenen Dateiformaten abgespeichert werden. ASCII xyz und ESRI ASCII Grid sind Textdateien. Solche Textdateien sind für die Speicherung von grossen ALS-

Punktwolken nicht geeignet, weil dadurch die Dateien unnötigerweise mehrere GB gross würden. Somit sind diese Dateiformate für diese Master Thesis nicht relevant.

2.1.5.1 LAS

LAS ist ein offenes Dateiformat zum Austausch von 3-dimensionalen Punktwolken zwischen verschiedenen Benutzern. Es kann zu jedem Punkt neben der Koordinate auch ALS-spezifische Attribute abspeichern. Es hat sich zum Standard-Austauschformat für ALS-Daten entwickelt. Das LAS-Dateiformat wird vom *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) verwaltet und weiterentwickelt.

Das Dateiformat ist binär. Darum benötigt die Speicherung der Daten bedeutend weniger Platz im Vergleich zu ASCII-Daten. Zudem können solche binären Dateien von Softwares deutlich schneller gelesen und geschrieben werden. Bei ASCII-Daten muss beim Lesen und Schreiben die Zahl als Text immer noch binär umgewandelt werden.

Von LAS existieren verschiedenen Versionen. Aktuell ist die Version 1.4. Der Unterschied zwischen den Versionen ist jedoch für diese Master Thesis nicht relevant. Die Punkte in der LAS-Datei können in verschiedenen *Point Data Record Formats* abgespeichert werden. Diese ermöglichen eine sehr effiziente und benutzerfreundliche Speicherung der Daten. So kann zum Beispiel im *Point Data Record Format 2* zu jedem Punkt noch ein RGB-Wert hinzugefügt werden, sofern dieser durch ein Bild, typischerweise von einer digitalen Kamera aufgenommen, «gefärbt» ist. Die Attribute des *Point Data Record Format 0* sind in der Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1 LAS-Dateiformat, Point Data Record Format 0. (ASPRS, 2011)

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	*
Y	long	4 bytes	*
Z	long	4 bytes	*
Intensity	unsigned short	2 bytes	
Return Number	3 bits (bits 0, 1, 2)	3 bits	*
Number of Returns (given pulse)	3 bits (bits 3, 4, 5)	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 byte	*
Scan Angle Rank (-90 to +90) – Left side	char	1 byte	*
User Data	unsigned char	1 byte	
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	*

Für diese Master Thesis von Bedeutung sind die 3D-Koordinate (X, Y, Z) des Punktes und die Attribute *Intensity*, *Return Number*, *Number of Returns* sowie *Classifikation*. Die beiden Attribute *Return Number* und *Number of Returns* bestimmen, wie viele Reflexionen des gesendeten Impulses total wieder beim Sensor eintreffen und um die wievielte Reflexion es sich handelt. Die ersten Reflexionen zusammen ergeben das Oberflächenmodell. Die letzte

Reflexion entspricht oft dem Boden oder den Gebäudedächern. Die Bedeutung der Attribute Intensität (*Intensity*) und Klassierung (*Classifikation*) ist in den Kapiteln 2.1.1.3 und 2.1.1.4 beschrieben.

2.1.5.2 laz

Eine laz-Datei ist eine verlustfreie Komprimierung einer las-Datei. Laz-komprimierte Dateien sind 5 bis 13-mal kleiner als die Originaldatei (Rees, 2013). Die Software LAStools von Martin Isenburg, rapidlasso GmbH verfügt mit LASzip über ein Tool zum Lesen und Schreiben der laz-Dateien. laz ist ein offenes Dateiformat. Die Software LAStools ist im Kapitel 2.4.1 beschrieben.

2.2 Testgebiet

Die ALS-Daten sind beim Bundesamt für Landestopographie swisstopo über die ganze Fläche der Schweiz bis zu einer Höhenlage von ca. 2000m über Meer erhältlich. Diese Daten sind jedoch nur als digitales Terrainmodell und Oberflächenmodell verfügbar. Schweizweit gibt es somit keine sogenannte Punktwolke aus ALS-Daten. Unterdessen haben einzelne Kantone, Gemeinden oder Private einzelne Gebiete selber beflogen. Diese Daten sind meist als klassierte Punktwolke im las-Dateiformat verfügbar. Das heisst, dass diese Daten nicht nur die Punkte des Terrain- und Oberflächenmodells beinhalten, sondern im bewachsenen Gebiet auch Zwischenpunkte. Typischerweise sind das Blätter, Baumstämme oder Äste. In dieser Master Thesis interessant sind vor allem die Punkte zwischen dem Waldboden und den 3m darüber. In dieser Zone „bewegt“ sich der OL-Läufer.

Der Kanton Zug beflog sein Gebiet mit dem Laserscanner für die Herstellung eines Solarkatasters im Jahre 2013. Der angrenzende Kanton Zürich beflog seinen Teil des Kantonsgebiets im 2014. Als Testgebiet eignet sich somit der Steinhuserwald, weil hier verschiedene Datensätze vorliegen. Es handelt sich um einen Mischwald mit Laub- und Nadelbäumen. Der Wald hat relativ viel Bodenbewuchs und allgemein eine kleinstrukturierte Vegetation, was für diese Master Thesis interessant ist. Abbildung 8 zeigt einen 500m x 500m grossen Ausschnitt des Steinhuserwaldes als Luftbild. Die Aufnahme erfolgte vor dem Laubaustritt im Frühling. In dunkelgrüner Farbe sind die Nadelbäume gut sichtbar. Gebiete mit Laubbäumen sind als braune Flächen erkennbar.



Abbildung 8 Orthophoto des Testgebietes, 500mx500m (Quelle: <https://map.geo.admin.ch>)

Der Steinhuserwald befindet sich nördlich von Steinhausen im Kanton Zug, 20km südlich der Stadt Zürich. Der südliche Teil des Waldes liegt im Kanton Zug, der nördliche im Kanton Zürich. Somit sind überlappende ALS-Daten von beiden Kantonen aus zwei unterschiedlichen kantonalen Messkampagnen verfügbar. Diese Konstellation ist ideal. Das Waldgebiet ist ungefähr 2 km² gross. Das verwendete Testgebiet ist in der Abbildung 9 mit einem roten Rahmen gekennzeichnet. Die Kantonsgrenze zwischen Zürich und Zug ist mit einer transparenten violetten Line dargestellt. Die Gitterweite in der Abbildung beträgt 1km.

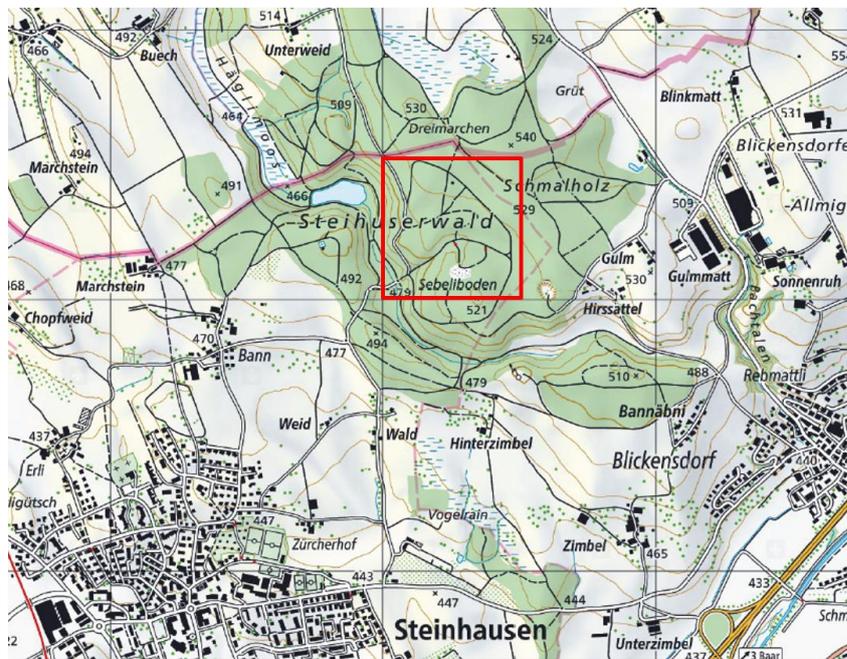


Abbildung 9 Steinhuserwald, Ausschnitt Landeskarte 1:25'000. Nicht massstäblich abgebildet. (Kartengrundlage: <https://map.geo.admin.ch/>)

Die ALS-Daten vom Testgebiet werden in dieser Master Thesis nun als Testdaten bezeichnet.

2.3 Einführung in die OL-Karte

2.3.1 Orientierungslauf

OL ist ein Sport, bei dem der Athlet mit OL-Karte und Kompass die Kontrollposten in einer bestimmten Reihenfolge in möglichst kurzer Zeit anlaufen muss. Die Route zwischen den Kontrollposten kann frei gewählt werden. OL ist eine vom Internationalen Olympischen Komitee (IOC) anerkannte Sportart, wurde jedoch noch nie an Olympischen Spielen ausgetragen. Zu den führenden OL-Nationen gehören die nordischen Länder Norwegen, Schweden, Finnland und Dänemark sowie die Schweiz und Russland. Neben der starken Verbreitung in Europa gehören auch Nordamerika, Australien und Neuseeland sowie Japan zu den aktiveren OL-Regionen.

2.3.2 OL-Karte

Die OL-Karte ist eine detaillierte topographische Karte, die zusätzliche Angaben zur Belaufbarkeit des Geländes enthält. Um die Chancengleichheit bei Wettkämpfen weltweit zu wahren, sind die OL-Karten durch die Internationalen Darstellungsvorschriften ISOM 2000 (International Orienteering Federation, 2000) genormt. Im April 2017 erschien die überarbeitete Spezifikation ISOM 2017 (International Orienteering Federation, 2017) mit Änderungen gegenüber der ISOM 2000. Diese sind jedoch nicht relevant für diese Master Thesis, da bei der Vegetationsdarstellung nichts geändert wurde. Sämtliche in dieser Master Thesis abgebildeten Karten basieren auf der ISOM 2000, welche somit auch als Referenz verwendet wird. Der Kartenmassstab für Wettkämpfe im Wald beträgt 1:15'000 oder 1:10'000

und die Äquidistanz 5m. Vermehrt finden auch urbane Sprintläufe statt. Dabei wird mit Karten im Massstab 1:5'000 oder 1:4'000 gelaufen.

Je genauer die OL-Karte ist, desto besser kann der Veranstalter den Athleten gleiche und somit faire Wettkampfbedingungen bieten. Die OL-Karte sollte so genau sein, dass der Wettkämpfer keinen Widerspruch zwischen Karte und Gelände feststellen kann. Gemäss ISOM 2000 ist dies erfüllt, wenn die Distanz zwischen zwei Objekten nicht mehr als 5% von der Realität abweicht. Die absolute Höhengenaugkeit ist bei der OL-Karte von kleiner Bedeutung. Jedoch muss die relative Höhengenaugkeit benachbarter Objekte korrekt dargestellt sein.

Die Grösse einer OL-Karte wird aus drucktechnischen Gründen meist auf das Papierformat A4 oder A3 begrenzt. Somit ist die kartierte Fläche typischerweise zwischen 2 und 10 km² gross. Abbildung 10 zeigt die Wettkampfkarte der Junioren-WM 2016 im Staffelwettbewerb. Die dabei benutzte Karte hat das Format A4. Das Kartenbild zeigt neben der Inselkarte weitere Layout-Elemente wie Wettkampftitel mit Logos, Sponsorenlogos und Kartenbeschriftung. Relevant für den Athleten ist hier der Kartenmassstab (1:10'000) und die Äquidistanz (5m).

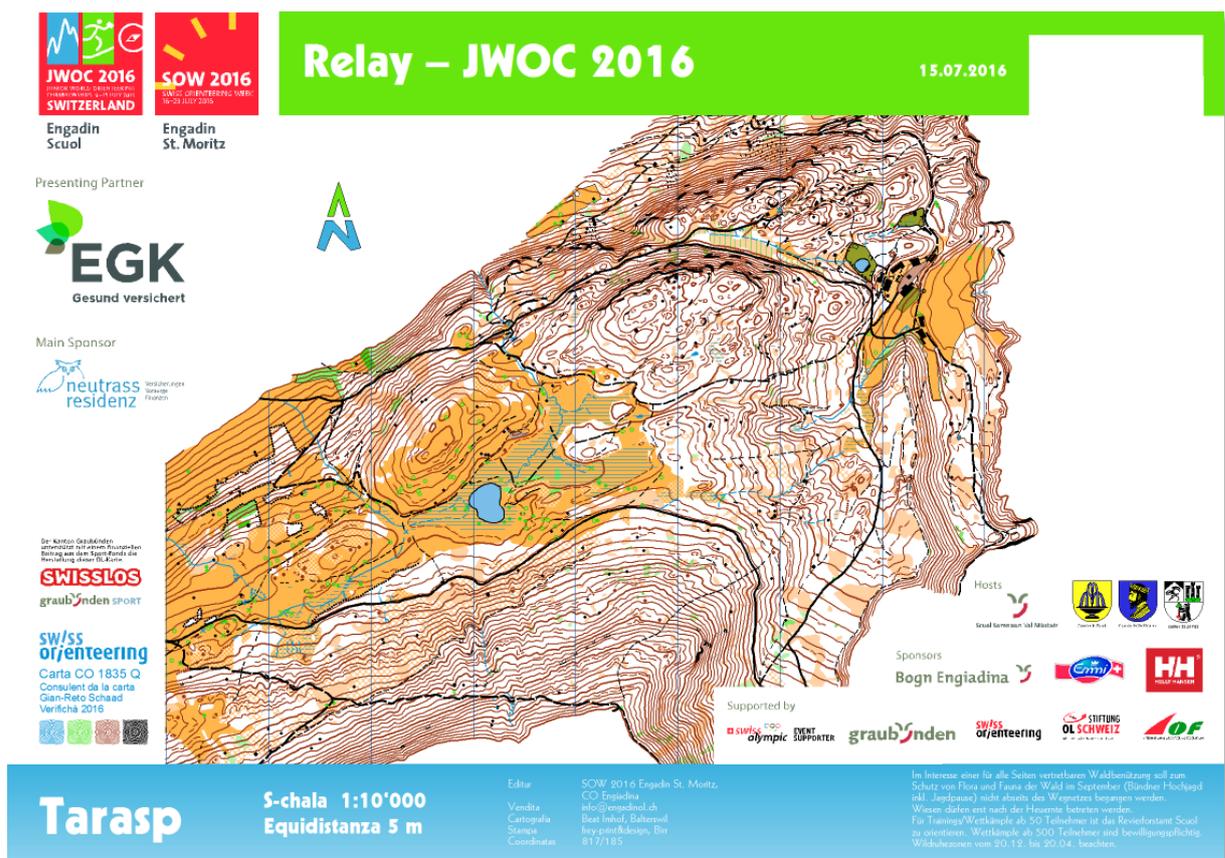


Abbildung 10 Beispiel einer layouteten Wettkampfkarte. Nicht massstäblich abgebildet.
(Quelle: SOW 2016 Engadin St. Moritz, CO Engiadina)

2.3.2.1 Inhalt einer OL-Karte

Eine OL-Karte beinhaltet gemäss der ISOM 2000 die in der Tabelle 2 dargestellten Elemente. Speziell daran ist, dass der Wald im Gegensatz zu topographischen Karten weiss dargestellt wird.

Tabelle 2 Inhalt einer OL-Karte gemäss ISOM 2000

Farbe	Elemente
Braun	Geländere relief
Schwarz	Felsen, Steine, bauliche Anlagen
Blau	Gewässer, Sümpfe
Grün	Vegetation (Bodenbewuchs und Vegetation)
Gelb	offene Gebiete
Weiss	Wald ohne Laufbehinderung
Oliv	Siedlungsgebiet

Nicht aufgeführt in der Tabelle 2 sind die *technischen Symbole* wie die Nordlinien. Diese können in unterschiedlichen Farben dargestellt werden. Dazu kommt das Kartenlayout, das frei gestaltet werden kann. Die entsprechende Umsetzung ist in einem Kartenausschnitt in Abbildung 11 ersichtlich. Der Abstand zwischen den blauen Nordlinien beträgt 250m.

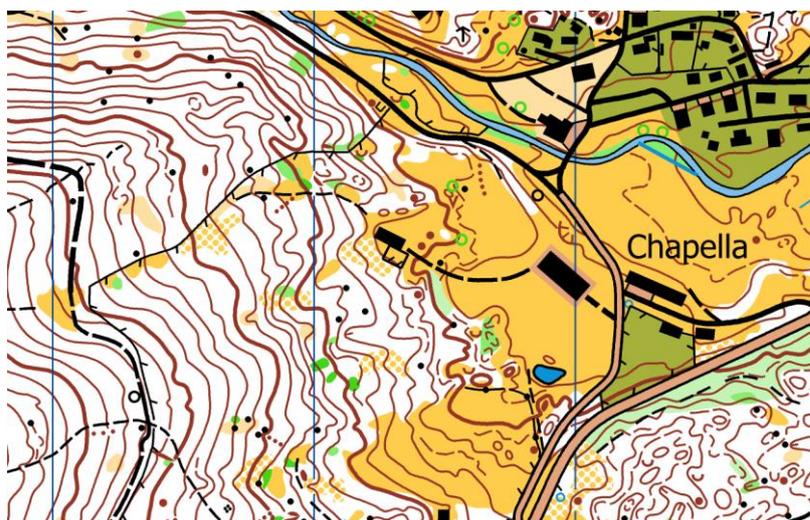


Abbildung 11 Ausschnitt aus OL-Karte „S-chanf“. Nicht massstäblich abgebildet. (Quelle: SC Corvatsch)

Die Minimaldimensionen in der ISOM 2000 definieren, ab welcher Grösse ein Objekt kartiert wird. Zum Beispiel muss ein Stein mindestens 1m hoch und im Gelände für den Läufer sofort erkennbar sein, damit er auf der OL-Karte dargestellt wird. Die Minimaldimensionen verhindern, dass Objekte kartiert werden, die der Athlet im Lauftempo gar nicht wahrnehmen kann.

2.3.2.2 Vegetationskartierung

Bei der Kartierung der Vegetation unterscheidet die ISOM 2000 zwischen Bodenbewuchs und Laufbehinderung durch hohe Vegetation. Die entsprechenden Signaturen und deren Bedeutung sind in der Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3 Vegetationssignaturen der ISOM 2000 (Swiss Orienteering, 2000)

Signatur- Nummer	Darstellung	Bedeutung
405		Wald: ohne Laufbehinderung Für den jeweiligen Geländetyp typischer offener Wald. Wenn kein Teil des Waldes gut belaufbar ist, darf Weiss in der Karte nicht erscheinen.
406		Vegetation: leichte Laufbehinderung Ein Gebiet mit dichten Bäumen und Gebüsch (geringe Sichtweite), welche die Laufgeschwindigkeit auf 60-80% der normalen Geschwindigkeit verringert.
407		Bodenbewuchs: leichte Laufbehinderung Ein Gebiet mit dichter Bodenvegetation, bis zu 1m Wuchshöhe, jedoch sonst guter Sichtweite (Brombeersträucher, Heidekraut, niedrige Büsche einschliesslich abgeschnittener Äste), welche die Belaufbarkeit auf 60-80% der normalen Geschwindigkeit verringert. Diese Signatur darf nicht mit Signaturen 406 oder 408 kombiniert werden.
408		Vegetation: starke Laufbehinderung Ein Gebiet mit dichten Bäumen oder Dickichten (geringe Sichtweite), welche die Laufgeschwindigkeit auf 20-60% der normalen Geschwindigkeit verringern.
409		Bodenbewuchs: starke Laufbehinderung Ein Gebiet mit dichter Bodenvegetation, bis zu 1m Wuchshöhe, jedoch sonst guter Sichtweite (Brombeersträucher, Heidekraut, niedrige Büsche einschliesslich abgeschnittener Äste), welche die Belaufbarkeit auf 20-60% der normalen Geschwindigkeit verringert. Diese Signatur darf nicht mit Signaturen 406 oder 408 kombiniert werden.
410		Vegetation: sehr starke Laufbehinderung, unpassierbar Ein Gebiet mit dichter Vegetation (Bäume oder Bodenbewuchs), das kaum passierbar ist. Die Laufgeschwindigkeit ist auf 0-20% der normalen Geschwindigkeit verringert.

Eine Kombination dieser Signaturen Bodenbewuchs und Vegetation ist gemäss ISOM 2000 nicht gestattet. Die Abbildung 12 zeigt ein entsprechendes Beispiel: Ein Gebiet hat dichtere Bäume und wird darum mit der Signatur 406 dargestellt. Zudem hat es in diesem Gebiet dichteren Bodenbewuchs, was zu einer zusätzlichen leichten Laufbehinderung führt (Signaturnummer 407). Anstatt der Kombination beider Signaturen verweist die ISOM 2000

auf die Signaturnummer 408. Diese vermittelt dem Läufer eine starke Laufbehinderung in diesem Gebiet.

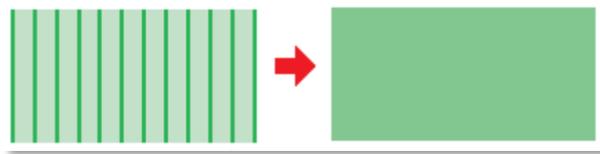


Abbildung 12 Links: Nicht erlaubte Kombination der Signaturnummern 406 und 407.
Rechts: Korrekt verwendete Signatur 408

Die deutsche Übersetzung der ISOM 2000 (Swiss Orienteering, 2000) beschreibt die Laufbehinderung wie folgt:

Die Laufbehinderung hängt von der Waldstruktur ab (Dichte der Bäume/Buschwerk und Bodenbewuchs, Farnkraut, Brombeeren, Brennnesseln usw.). Sie berücksichtigt jedoch keine Sümpfe, steinigen Boden usw., die durch andere Signaturen dargestellt werden.

Die Laufbehinderung des Waldes wird in 4 Klassen entsprechend der Laufgeschwindigkeit eingeteilt. Wenn die Geschwindigkeit im typisch offenen Wald z.B. 5 min/km beträgt, ist folgendes Verhältnis massgebend:

<i>Offener Wald</i>	<i>80-100%</i>	<i>5 -6:15 min/km</i>
<i>leichte Laufbehinderung</i>	<i>60-80%</i>	<i>6:15 - 8:20 min/km</i>
<i>starke Laufbehinderung</i>	<i>20-60%</i>	<i>8:20 - 25:00 min/km</i>
<i>sehr starke Laufbehinderung</i>	<i>0-20%</i>	<i>> 25:00 min/km</i>

Der Einfluss der Vegetation auf die Belaufbarkeit ist sehr stark abhängig von der Jahreszeit. Für den OL-Läufer relevant sind kleine Laubbäume, welche im Winter die Blätter verlieren und bis im Frühling relativ gut durchquerbar sind. Im Sommer sind diese jedoch deutlich dichter. Gebiete mit kleineren Tannen sind während des ganzen Jahres gleich gut belaufbar. OL-Karten werden meist für Wettkämpfe neu erstellt. Dementsprechend muss die Vegetationskartierung dem erwarteten Stand am Wettkampftag entsprechen. Obwohl die Spezifikationen zur Kartierung der Vegetation klar sind, wird diese von den einzelnen Kartographen unterschiedlich interpretiert und angewendet.

2.3.3 Entwicklung der OL-Karte

Spezialisierte OL-Kartographen oder Vereinsmitglieder in ehrenamtlicher Arbeit erstellen die OL-Karten im Auftrag von OL-Vereinen. Die OL-Vereine verwenden die OL-Karten für Wettkämpfe sowie Trainings.

Da sich der Wald insbesondere durch den Einfluss der Forstwirtschaft ändert, sollten die OL-Karten dementsprechend regelmässig nachgeführt werden. Der Nachführungszyklus ist sehr

unterschiedlich. Dieser hängt davon ab, wie schnell sich die Vegetation des Waldes ändert und die Karte somit nicht mehr aktuell ist. Andererseits auch, wie oft Veranstaltungen in diesem Wald stattfinden. Stark ändernde Wälder können durchaus jährlich nachgeführt werden, andere nur alle 10 Jahre.

In den 70er Jahren verwendeten die OL-Kartographen topographische Karten als Grundlage für ihre Arbeit. Der Einsatz von speziellen photogrammetrischen Luftbilddauswertungen (Abbildung 13) anfangs der 80er Jahre als Grundlage für eine OL-Karte erleichterte dem Kartographen die Arbeit im Gelände und führte zu genaueren und somit besseren OL-Karten.

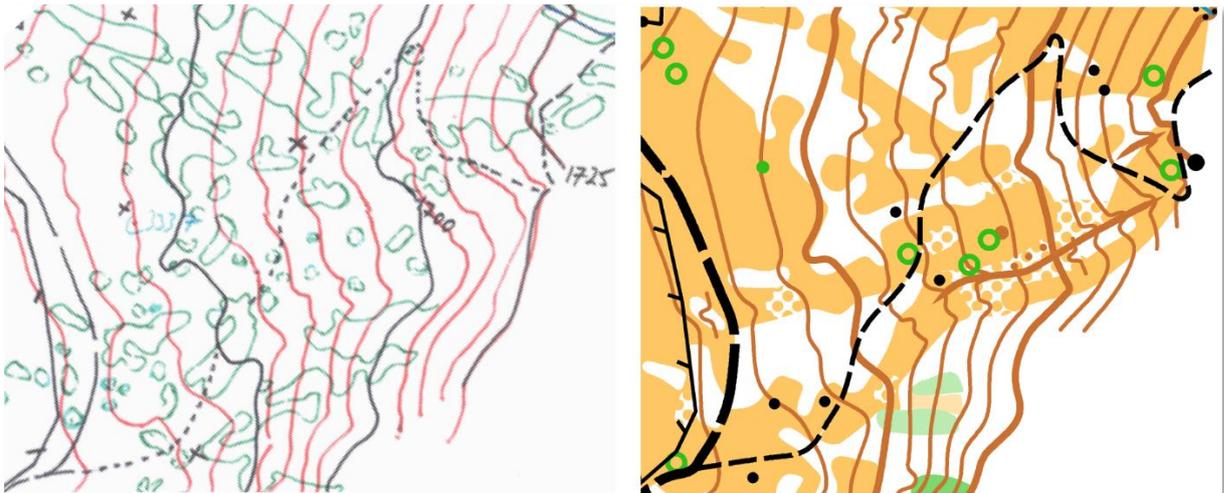


Abbildung 13 OL-Karte S-chanf. Links: Photogrammetrische Luftbilddauswertung von Ivar Helgesen, Norwegen. Rechts: Derselbe Ausschnitt als OL-Karte. (Quelle: SC Corvatsch)

Der nächste grosse Schritt erfolgte 2005: Erstmals wurden in der Schweiz ALS-Daten für die Herstellung von OL-Karten verwendet. Aus dem 2m Grid des digitalen Terrainmodells des Bundesamtes für Landestopographie swisstopo wurden die 1m-Höhenkurven des Geländes und die Reliefschummerung berechnet. In der Reliefschummerung (Abbildung 14) war im steilen Gelände die Geometrie von Strassen, Pfaden und Gräben sichtbar. Diese Informationen fehlten zum Teil auf den bisher verwendeten topographischen Karten oder wiesen eine schlechtere geometrische Genauigkeit auf. Die detailreichen Grundlagen führten zu einer Zeitersparnis bei der Kartenaufnahme im Gelände und zu einem genaueren, besseren Höhenkurvenbild (Lehmann, 2006). Dies darf als weitere Meilenstein in der OL-Kartographie bezeichnet werden.

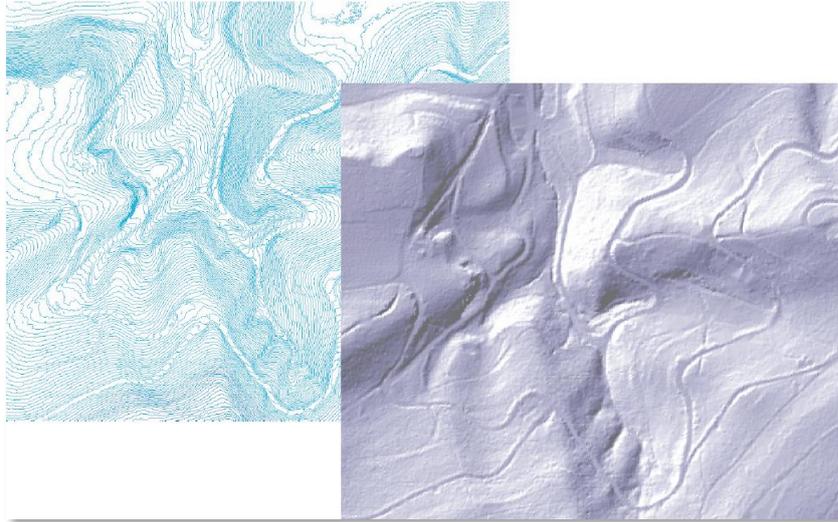


Abbildung 14 1m Höhenlinien (links) und Reliefschummerung (rechts) als Grundlage der OL-Karte Schorüti. (Lehmann, 2005)

Neben den Höhenkurven und der Reliefschummerung bietet das Vegetationshöhenmodell (Differenz aus dem Höhen- und Geländemodell) weitere nutzbare Informationen. Damit können auch Waldränder, Waldlichtungen und sogar Vegetationsgrenzen im Wald extrahiert werden (Schaad, 2009) (Gloor, 2013).

Abbildung 15 zeigt ein eingefärbtes Vegetationshöhenmodell. Die gelbe Farbe stellt Flächen ohne relevante Vegetation dar. Dabei sind auch Punkte bis 10cm über dem Boden enthalten, um die Messungenauigkeit herauszufiltern. Der Farbverlauf nach Rot stellt die Höhen bis 3m dar. Der Farbverlauf von Grün nach Weiss zeigt Baumhöhen zwischen 3m und 30m. Der Ausdruck «Vegetationshöhenmodell» ist nicht ganz korrekt und kann somit auch verwirrend sein. Denn in diesem Fall werden nicht nur die Vegetation, sondern auch Kunstbauten wie Gebäude darin abgebildet. Da sich die Anwendung im Bereich OL-Kartographie jedoch auf den Wald bezieht, setzte sich der Ausdruck «Vegetationshöhenmodell» durch. Dieses ist auch im Kapitel 2.1.4 beschrieben.

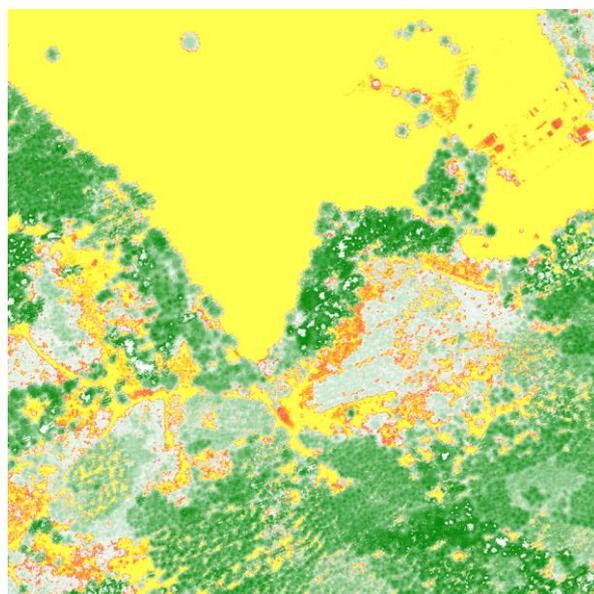


Abbildung 15 Vegetationshöhenmodell des Steinhuserwaldes farbig dargestellt

Unterdessen sind die ALS-Daten als Grundlage für OL-Karten nicht mehr wegzudenken, wenn diese im entsprechenden Gebiet verfügbar sind. Dies zeigt ein Erfahrungsaustausch unter den OL-Kartographen in der Schweiz. Es ist wichtig zu betonen, dass diese aus den ALS-Daten berechneten Informationen nur als Grundlagen für den Kartographen dienen. Er muss weiterhin ins Gelände gehen, die Daten verifizieren, generalisieren, klassieren und dementsprechend kartieren. Genau hier setzt diese Master Thesis an. Die zusätzlich gewonnenen Erkenntnisse zur Vegetation sollen den Kartographen bessere Grundlagen liefern.

2.3.4 Kartierung im Gelände

Aus den verschiedenen Daten erstellt der Kartograph eine Grundkarte. Mit dieser geht er ins Gelände und kartiert. Eine Grundkarte enthält meist Informationen aus den folgenden Daten:

- Basisplan der Vermessung (Gebäude, Weg- und Strassennetz, Gewässer, Parzellengrenzen)
- Orthophoto (Gebäude, Weg- und Strassennetz, markante Bäume als Referenzpunkte)
- DTM (1m Höhenkurven)
- Reliefschummerung (Gräben, Löcher, Wegenetz)
- VHM (Waldränder, Vegetationsränder, Schneisen)

Die Gestaltung der Grundkarte ist bei den OL-Kartographen sehr unterschiedlich. Diese Gestaltung ist auch abhängig von den vorhandenen Daten und dem Geländetyp. Wichtig für den Kartographen ist, dass er im Gelände schnell seine Position auf der Grundkarte bestimmen kann. Dazu sollte die Grundkarte eine möglichst hohe Dichte an relevanten Informationen enthalten, jedoch nicht überladen sein. Für den Kartographen muss diese gut lesbar sein. Sieht er im Gelände ein zu kartierendes Objekt (z. B. einen Stein), sollte er dessen Position auf der Grundkarte schnell bestimmen können. Bei einem zu grossen Zeitverlust ist seine Arbeit nicht mehr effizient. Hilfreich bei der Positionsbestimmung können neben den Informationen auf der Grundkarte auch GPS-Informationen oder elektronische Distanzmessgeräte sein.

Abbildung 16 zeigt die Grundkarte (links) der OL-Karte «Got Grond» aus dem Jahr 2010. Als Vergleich dazu derselbe Ausschnitt der OL-Karte mit einer Äquidistanz von 5m auf der rechten Seite der Abbildung.

Die Grundkarte beinhaltet die folgenden Elemente:

- Schwarz: Wegenetz aus Vermessungsplan, Orthophoto oder Geländeschummerung
- Rot: Höhenkurven 1m Äquidistanz, berechnet aus dem ALS-Terrainmodell
- Blau: Vegetation, dementsprechend sind weisse Stellen kleine Lichtungen im Wald

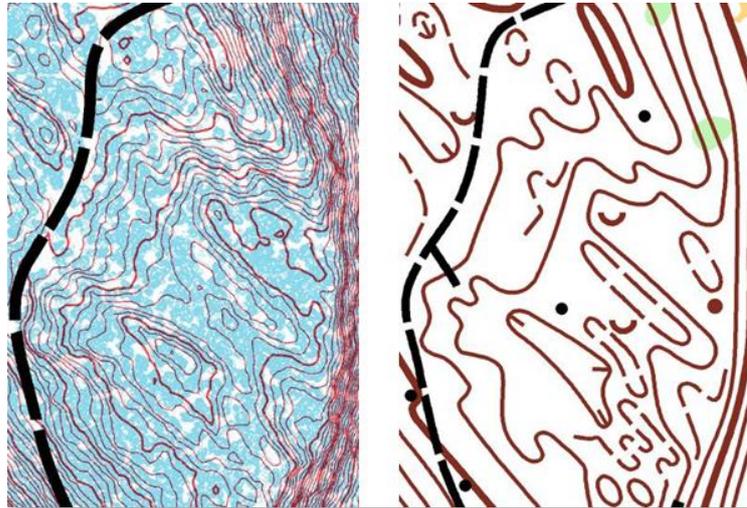


Abbildung 16 Grundkarte eines Ausschnittes des Waldes «Got Grond» (links) und die entsprechende OL-Karte (rechts). Keine massstäbliche Abbildung. (Quelle: OLG Chur)

Im Gelände ergänzt der Kartograph die Grundkarte mit den relevanten Informationen für die OL-Karte. Auf der einen Seite müssen die Daten der Grundkarte generalisiert werden, andererseits relevante Objekte ergänzt und klassiert werden. Bei der Zeichnung verwendet der Kartograph oft eigene Signaturen und ergänzt diese mit einer kurzen Beschriftung. So stellen Nummern entlang von Wegen oft dessen Klassierung gemäss ISOM 2000 dar.

Abbildung 17 zeigt die Zeichnung der Geländeaufnahme der OL-Karte «Pontresina Tais» in der Kartographie-Software OCAD. Die gescannte Geländeaufnahme wird als Hintergrundkarte geladen und georeferenziert. Oft wird die Geländeaufnahme gedimmt, damit der Kontrast zur OL-Karte grösser wird. Die Objekte werden nun anhand der vorhandenen Signaturen digitalisiert. In der Abbildung ist gut ersichtlich, dass der westliche und nördliche Teil dieses Ausschnittes bereits in der Software gezeichnet wurde.

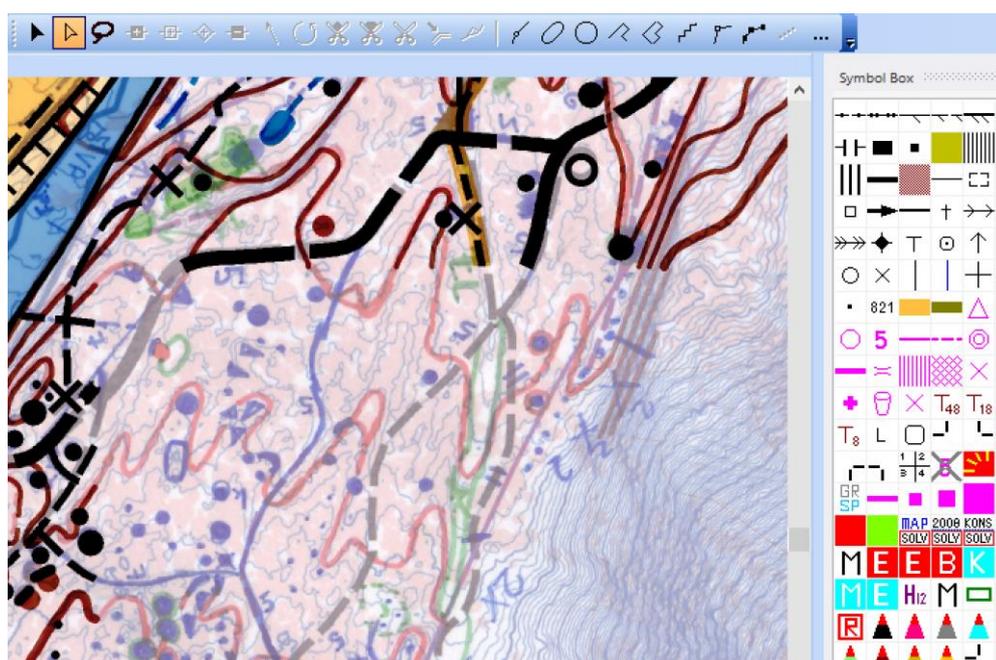


Abbildung 17 Zeichnung der Geländeaufnahme der OL-Karte «Pontresina Tais» in OCAD. (Quelle OL-Karte: CO Engiadina)

2.3.5 Heutige Verwendung von ALS-Daten

Viele in den letzten 10 Jahren neu erstellten OL-Karten basieren auf ALS-Daten, sofern diese für das entsprechende Gebiet verfügbar waren. Die Verfügbarkeit ist weltweit sehr unterschiedlich. Einige Länder sind komplett beflogen, andere nur teilweise in urbanen Gebieten.

Die Schweiz ist durch die swisstopo bis zur Waldgrenze komplett beflogen worden. Die Waldgrenze liegt in der Schweiz je nach Region zwischen 1800m und 2100m über Meereshöhe. Die entsprechenden ALS-Daten sind bei der swisstopo in Online Shop³ erhältlich. Zudem verfügen auch gewisse Kantone, Gemeinden oder private Firmen über weitere ALS-Daten, die aktueller sind und aufgrund neuer Technologien über eine höherer Punktdichte verfügen.

2.4 Verwendete Software in OL-Kartographie

Seit der Einführung der ALS-Daten in der OL-Kartographie vor 12 Jahren entwickelten verschiedene Personen und Firmen Softwares zur effizienten Weiterverarbeitung von ALS-Daten. Das Ziel dieser Tools ist es, möglichst viele für den OL-Kartographen relevante Informationen aus den ALS-Daten zu gewinnen. Damit soll er einerseits genauere und bessere Grundlagen erstellen, aber auch schneller und somit effizienter kartieren können.

Heute verwenden OL-Kartographen die verschiedensten Softwares zur Auswertung von ALS-Daten (Tabelle 4).

Tabelle 4 Verwendete Softwares zur Auswertung von ALS-Daten

Software	Hersteller	Typ
LASTools ⁴	Rapidasso GmbH Martin Isenburg, Deutschland	Freie und kommerzielle Software (open and closed source)
OCAD ⁵	OCAD AG, Schweiz	Kommerzielle Software
Karttapullautin ⁶	Jarkko Ryyppö, Finnland	Freie Software für nicht kommerzielle Zwecke
OL Laser ⁷	Jerker Boman, Schweden	Freie Software
lidar-batch ⁸	Terje Mathisen, Norwegen	Freie Software

Die Softwares werden in den folgenden Unterkapiteln auf für OL-Karten relevante Funktionen beschrieben. Diese besitzen oft dieselbe Funktionalität. Als ALS-Daten wird die Kachelnummer

³ <http://www.toposhop.admin.ch/de/shop/index>

⁴ <http://rapidlasso.com/lastools/>

⁵ <http://ocad.com/de/>

⁶ <http://www.routegadget.net/karttapullautin/>

⁷ http://oapp.se/Applikationer/OL_Laser.html

⁸ http://tmsw.no/mapping/basemap_generation.html

26800_12290.laz des Kantons Zürich verwendet. Diese 500mx500m grosse Kachel deckt ein Waldstück ab, das unterschiedliche Vegetation beinhaltet. Diese Kachel entspricht auch dem im Kapitel 2.2 beschriebenen Testgebiet. Die Abbildung 18 zeigt den Perimeter der Kachel. Im südlichen Teil (dargestellt zwischen der blauen und roten Begrenzungslinie) sind keine Daten vorhanden, weil dieses Gebiet ausserhalb des Kantons Zürich und des 500m umliegenden Bereiches entlang der Kantonsgrenze liegt.

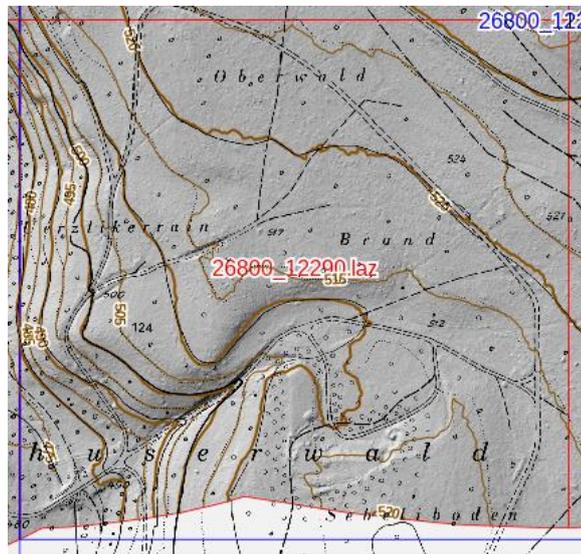


Abbildung 18 Perimeter der ALS-Kachel 26800_12290. (Quelle: GIS-ZH des Kantons Zürich)

Bei sämtlichen Softwares können die Parameter geändert werden, um optimale Resultate zu erzielen.

2.4.1 LAStools

LAStools ist ein Softwarepaket bestehend aus einzelnen Tools zur effizienten Verarbeitung von ALS-Daten. Diese Tools sind ein Quasi-Standard. Führende GIS-Produkte wie ESRI ArcGIS können diese Tools integrieren.

Die Tools können über die Windows-Kommandozeile gestartet und mit Parameter gesteuert werden. Zudem verfügen die Tools über einfache graphische Benutzeroberflächen.

Abbildung 19 zeigt eine eingefärbte ALS-Punktwolke im Tool LASview. Bodenpunkte sind Braun dargestellt. Grün zeigt die Vegetation, hier vor allem Bäume. Auf der rechten Seite sind in oranger Farbe Gebäudedächer erkennbar.

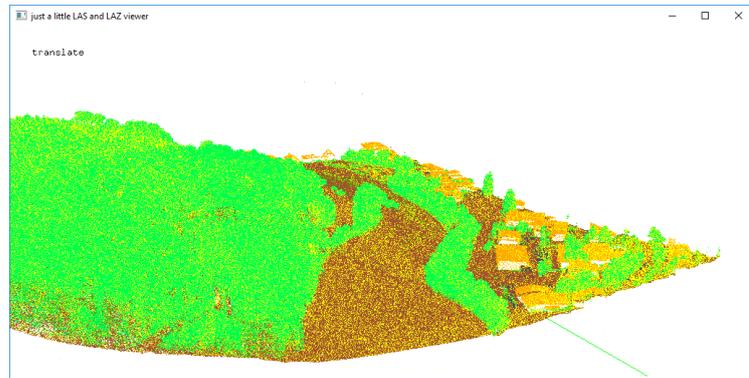


Abbildung 19 LASviewer von den LAStools. (Datenquelle: GIS Zürich)

Die folgenden OL-spezifischen Softwares verwenden auch einzelne dieser frei verfügbaren Tools dieses Paketes. Ein Beispiel dafür ist LASzip zum Komprimieren und Dekomprimieren von Daten im las-Datei-Format. Komprimierte las-Datei haben die Dateierdung *laz*.

2.4.2 OCAD 12

OCAD ist die weltweit meist eingesetzte Kartographie-Software im Bereich OL. Die Software enthält ein Modul zum Import und zur Analyse von ALS-Daten. Abbildung 20 zeigt den neuen DHM-Import Assistenten von OCAD 12 mit einer Auswahl von möglichen Importoptionen für das DTM und DOM.

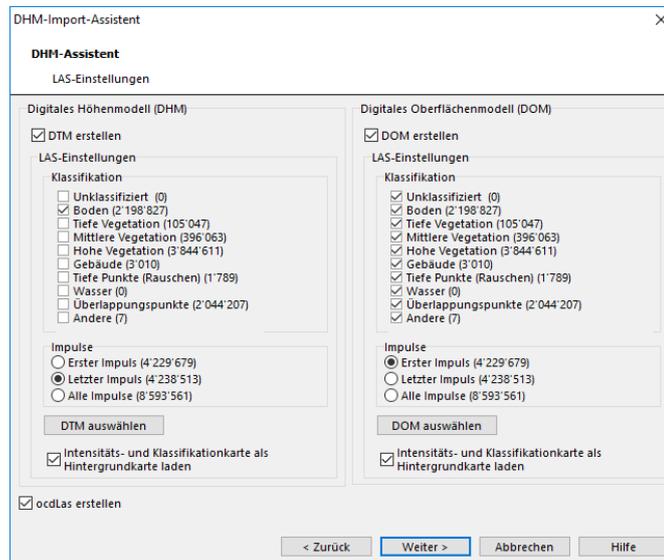


Abbildung 20 OCAD Import-Assistent zum Erstellen von DTM und DOM

OCAD kann die folgenden OL-relevanten Produkte aus den ALS-Daten erstellen:

- Höhenkurven, berechnet aus einem Höhenmodell
- Vegetationshöhenmodell
- Reliefschummerung des Geländemodells
- Intensitätskarte der ALS-Punkte
- Hangneigungskarte zur Detektion von möglichen Felsen

Einige dieser Produkte sind in Abbildung 21 bis Abbildung 24 dargestellt. Die ALS-Daten sind vom Testgebiet. Die Grösse des Ausschnitts beträgt 500x500m.

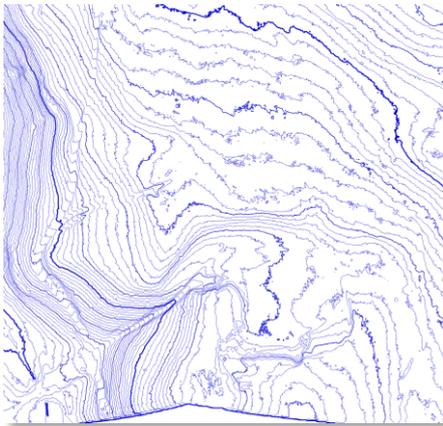


Abbildung 21 OCAD: Höhenkurven, 1m Äquidistanz, Linien nicht geglättet

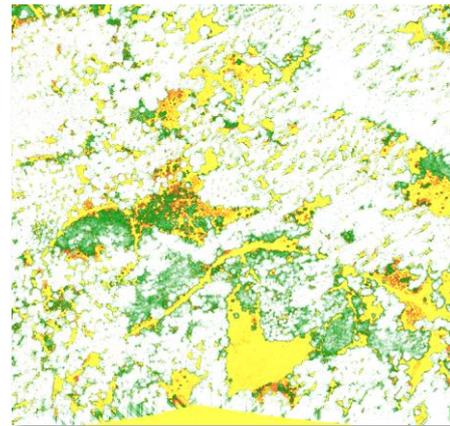


Abbildung 22 OCAD: Vegetationshöhen, klassiertes, normalisiertes Vegetationsmodell

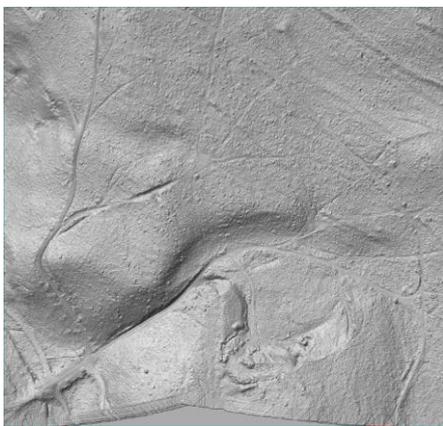


Abbildung 23 OCAD: Reliefschummerung zur Detektion von linearen Objekten (z. B. Strassen)

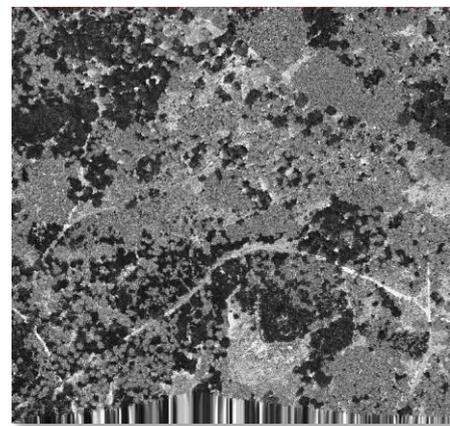


Abbildung 24 OCAD: Intensitätskarte des Oberflächenmodells, Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelwald

Die in der Abbildung 22 dargestellten Vegetationshöhen sind gemäss der Tabelle 5 farbkodiert. Sehr hohe Bäume werden bewusst mit weisser Farbe dargestellt. Damit bleibt die Karte für den Kartographen für die Geländeaufnahme besser lesbar.

Tabelle 5 Farbkodierung der Vegetationshöhen in OCAD

Vegetationshöhe	Bedeutung	Farbe oder Farbverlauf
0 – 0.1m	Keine Vegetation	Gelb
0.1 – 2m	Niedrige Vegetation	Gelb nach Rot
2 – 12m	Kleine und mittlere Bäume	Grün nach Weiss
Über 12m	Sehr hohe Bäume	Weiss

Weiter enthält die aktuelle Version OCAD 12 den «LiDAR Point Cloud Manager». Dieser wird im Kapitel 4.3 beschrieben und ist in Abbildung 25 ersichtlich. Der «LiDAR Point Cloud

Manager» ermöglicht die interaktive Analyse der ALS-Punktwolke im direkten Vergleich zur OL-Karte.

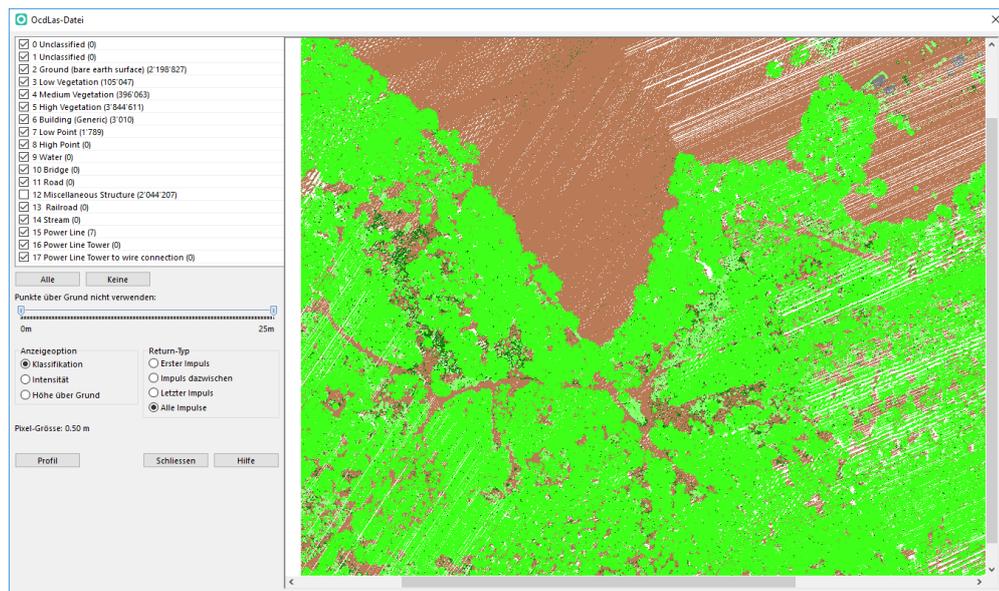


Abbildung 25 OCAD «LiDAR Point Cloud Manager»

2.4.3 Karttapullautin

Karttapullautin ist eine Software aus Finnland zum automatischen Erstellen von OL-Trainingskarten sowie Grundlagen für OL-Karten. Die Software läuft über die Windows-Kommandozeile und wird mit einer Parameterdatei gesteuert. Karttapullautin kann folgende OL-relevante Produkte aus ALS-Daten erstellen:

- Höhenkurven, berechnet aus einem Höhenmodell, ergänzt mit Kuppen und kleinen Senken
- Hohe Vegetation
- Bodenbewuchs
- Hangneigungskarte zur Detektion von möglichen Felsen

Einige dieser Produkte sind in Abbildung 26 bis Abbildung 29 dargestellt. Die ALS-Daten sind vom Testgebiet. Die Grösse des Ausschnitts beträgt 500x500m.

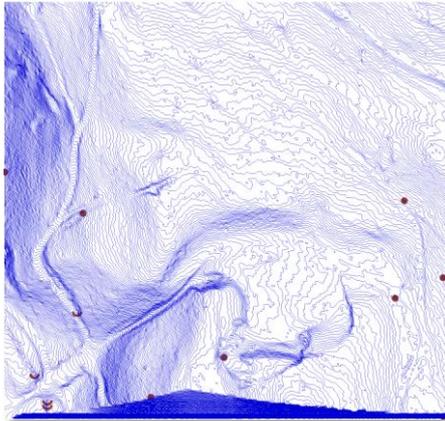


Abbildung 26 Karttopullautin: Höhenkurven, 0.33m Äquidistanz, Linien geglättet zusätzlich Kuppen und kleine Senken (braun)

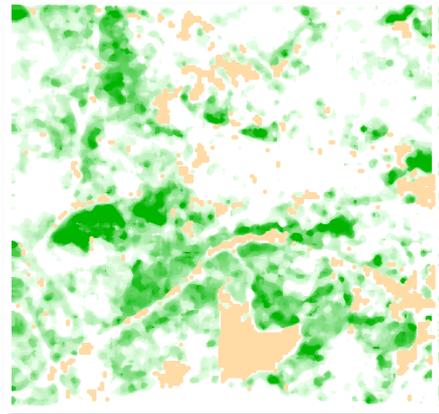


Abbildung 27 Karttopullautin: Vegetation

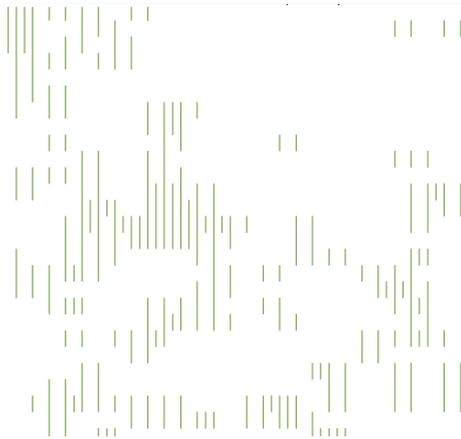


Abbildung 28 Karttopullautin: Bodenbewuchs



Abbildung 29 Karttopullautin: Vermutete Felsen

2.4.4 OL Laser 1.4.0.5

«OL Laser»⁹ ist eine Software aus Schweden, die zum Erstellen von OL-Kartengrundlagen entwickelt wurde. Die Benutzeroberfläche der Software ist in Abbildung 30 ersichtlich.

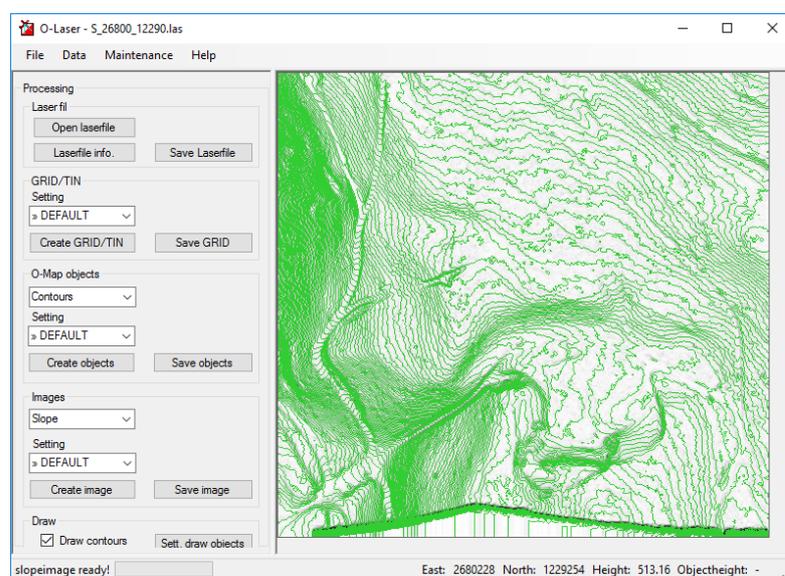


Abbildung 30 Graphischer Benutzeroberfläche von OL Laser

⁹ Gemäss Webseite heisst die Software *OL Laser*, obwohl im Programmtitel der Software *O-Laser* steht.

«OL Laser» kann folgende OL-relevanten Produkte aus ALS-Daten erstellen:

- Höhenkurven, berechnet aus einem Höhenmodell
- Reliefschummerung des Geländemodells
- Intensitätskarte der ALS-Punkte
- Hangneigungskarte zur Detektion von möglichen Felsen

Einige dieser Produkte sind in Abbildung 31 bis Abbildung 34 dargestellt. Die ALS-Daten sind vom Testgebiet. Die Grösse des Ausschnitts beträgt 500x500m.

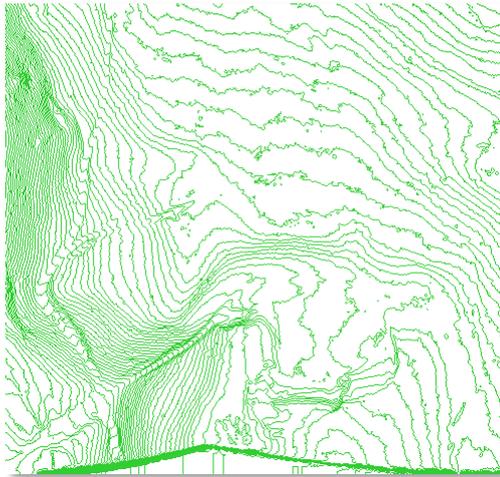


Abbildung 31 OL Laser: Höhenkurven, 1m Äquidistanz, Linien geglättet

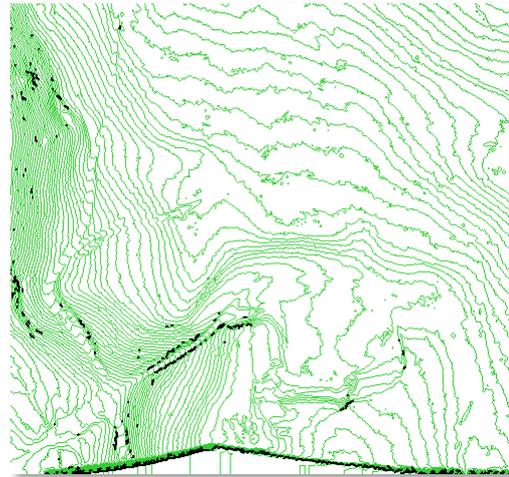


Abbildung 32 OL-Laser: Vermutete Felsen (schwarz) anhand der Hangneigung, kombiniert mit Höhenkurven



Abbildung 33 OL Laser: Reliefschummerung zur Detektion von linearen Objekten (z. B. Strassen)



Abbildung 34 OL Laser: Intensitätskarte des Oberflächenmodells, Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelwald

2.4.5 Lidar-batch

«Lidar-batch» ist ebenfalls eine Software zum Erstellen von Grundlagen für OL-Karten. Das Programm läuft über die Windows-Kommandozeile und wird mit einer Batch-Datei gesteuert.

«Lidar-batch» kann folgenden OL-relevanten Produkten aus ALS-Daten erstellen:

- Höhenkurven, berechnet aus einem Höhenmodell

- Vegetationskarte
- Hangneigungskarte zur Detektion von möglichen Felsen

Abbildung 35 zeigt die erstellte Vegetationskarte ergänzt mit Bodenbewuchs. Die Grösse des Ausschnitts beträgt 500x500m.

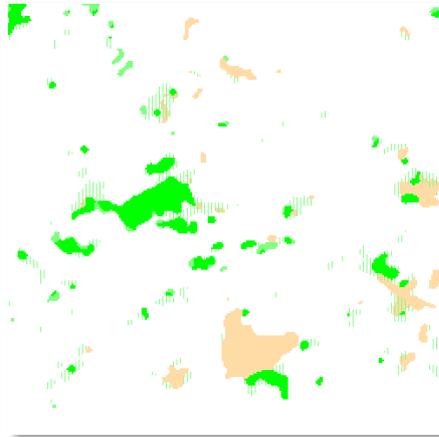


Abbildung 35 «Lidar-batch»: Vegetationskarte mit Bodenbewuchs

2.5 Testumgebung

Die Tests und die Programmierung wurden auf einem Dell XPS Desktop Computer mit Intel Core i7-Processor und 16 GB RAM Speicher durchgeführt. Das Betriebssystem war Windows 10 Professional, 64-bit.

3 Forschungsstand

Im Bereich OL-Kartographie findet wenig wissenschaftliche Forschung statt. Viele der im Kapitel 2.4 beschriebenen Softwares für die OL-Kartographie basieren auf «best practice». Diese Softwares wurden meist für den Eigengebrauch entwickelt und nach Rückmeldungen der Benutzer verbessert. Sie werden von den OL-Kartographen akzeptiert und darum sehr häufig eingesetzt. Dies schliesst nicht aus, dass aus den ALS-Daten noch bessere Grundlagedaten für den OL-Kartographen berechnet werden können. Die aktuelle Forschung im Bereich ALS-Daten und OL-Karten befasst sich mit folgenden Themen:

- Optimierung der Höhenkurven
- Objektextraktion
- Vegetationskartierung

3.1 Optimierung der Höhenkurven

Born (2013) untersuchte die Optimierung von Höhenkurven und Zwischenkurven aus ALS-Daten. Diese Arbeit lieferte dem Kartographen Erkenntnisse, an welchen Stellen Optimierungsbedarf für die berechneten Höhenlinien besteht. Born (2013) zeigte mit Verbesserungsvorschlägen und möglichen Weiterentwicklungen das grosses Potential von ALS-Daten für die Geländedarstellung in OL-Karten. Dieses Thema ist für diese Master Thesis nicht relevant und wird darum nicht weiter beschrieben.

3.2 Objektextraktion aus ALS-Daten

Ditz et al. (2014) untersuchten die weitere mögliche Nutzung der Objektextraktion aus ALS-Daten. Die Extraktion von Objekten mit visueller Interpretation war möglich und zeigte unterschiedlichen Erfolg für Linien-, Punkt- und Flächenobjekte. Fast alle Linienobjekte, ein grosser Teil von Punktobjekten und Vegetationswechsel konnten detektiert werden. Ditz et al. (2014) stellten fest, dass die Klassierung und Verifizierung der gefundenen Objekte im Gelände erfolgen muss.

Abbildung 36 zeigt die aus der Reliefschummerung gewonnenen Linien- und Punktobjekte. Geländeformen wie Löcher, Gruben oder Senken (orange markiert) konnten mit hoher geometrischer Genauigkeit und Wahrscheinlichkeit extrahiert werden. Die rot markierten Objekte (Kuppen, Steine) wurden mit genügender Genauigkeit extrahiert. Deren semantische Bedeutung muss aber im Gelände bestimmt werden. Die detektierten Felsen sind blau dargestellt, die übrigen Linienobjekte grün.

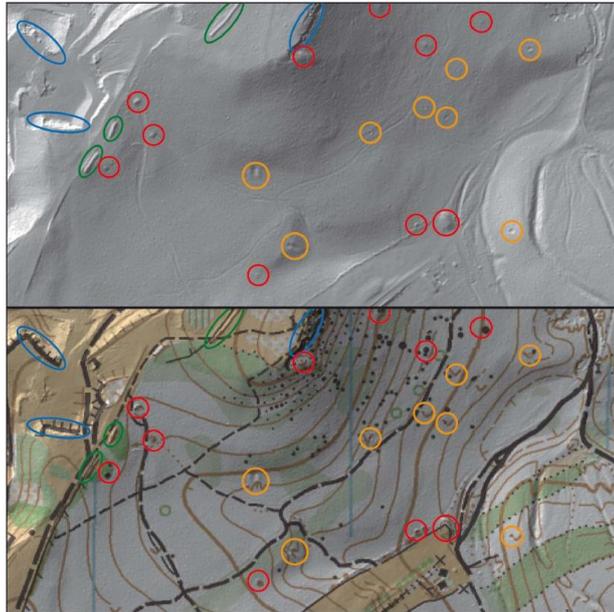


Abbildung 36 Objektextraktion aus der Reliefschummerung (oben), überlagert mit der OL-Karte (unten) (Ditz, et al., 2014)

In der Abbildung 37 ist der aus dem Oberflächenmodell abgeleitete Vegetationswechsel dargestellt. Grün markiert sind die Waldränder. Vegetationsgrenzen innerhalb des Waldes sind in Orange und Rot gezeichnet. Auch hier muss die Klassierung und Verifizierung durch Feldarbeit erfolgen (Ditz, et al., 2014).

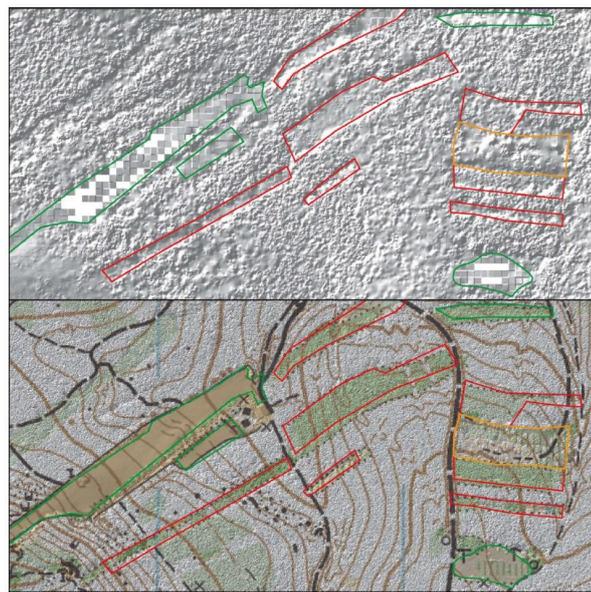


Abbildung 37 Flächendetektion von unterschiedlicher Vegetation anhand des Oberflächenmodells (oben), überlagert mit der OL-Karte (unten) (Ditz, et al., 2014)

3.3 Automatisches Erstellen von OL-Karten

Petrovič (2014) untersuchte die automatische Produktion von OL-Karten aus ALS-Daten. In einem Versuch wurde die automatisch erstellte OL-Karte bei einem Training in Slowenien eingesetzt. Die OL-Karte wurde ohne zusätzliche Geländeaufnahme verwendet. Petrovič (2014) befragte die Teilnehmer nach dem Training. Die ALS-Daten wurden für diese Arbeit in der Zeit vor dem Laubaustritt geflogen. Es wurde ein mehrheitlich flaches Gelände

ausgewählt, bei welchem eine gute Geländedarstellung erwartet wurde. Mit der Software Karttapullautin (Kapitel 2.4.3) wurde aus der ALS-Punktwolke eine erste Version der Karte erstellt. Diese Karte beinhaltete:

- generalisierte Höhenkurven
- einige Geländeobjekte wie Kuppen und Löcher
- Unterscheidung offenes Gebiet und Wald mit unterschiedlicher Vegetationsdichte
- Felsen

Ergänzt wurde die Karte mit den folgenden Daten der nationalen topographischen Datenbank:

- Gebäude
- Strassen ausserhalb des Waldes
- Flüsse und Seen
- Landnutzung

Dies so entstandene Karte ist in Abbildung 38, links ersichtlich. In einem nächsten Schritt wurde die Karte durch manuelle visuelle Interpretation der Reliefschummerung ergänzt. Dazu gehören Elemente des Wegenetzes, Bäche und Rinnen (Abbildung 38, rechts).

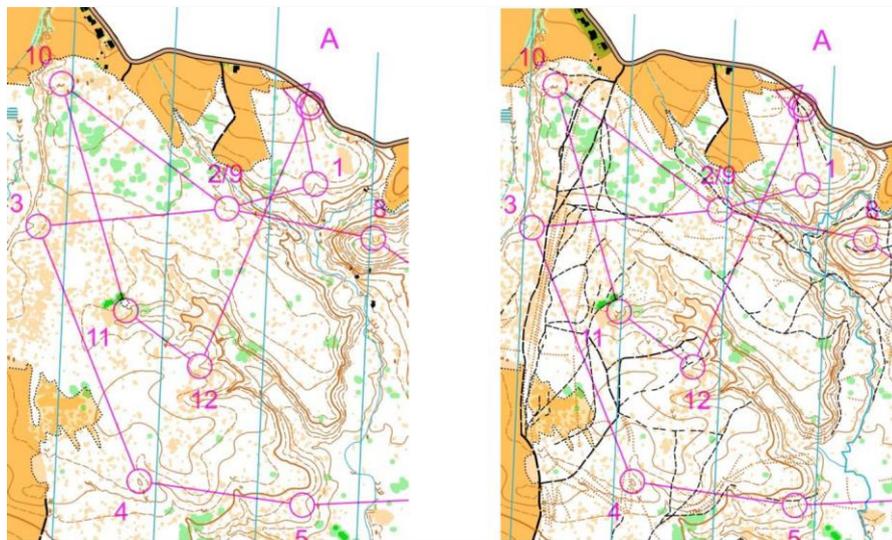


Abbildung 38 Automatisch erstellte OL-Karte aus ALS-Daten ergänzt mit Elementen der nationalen topographischen Datenbank (links), erweitert nach manueller, visueller Interpretation (rechts) (Petrovič, 2014)

Mittels einer Umfrage bei den Teilnehmern wurde die Qualität der Karte beurteilt. Diese ist in der Tabelle 6 dargestellt. Die Bewertung erfolgte von 1 (*very bad*) nach 5 (*excellent*).

Tabelle 6 Resultate der Befragung der Teilnehmer zur erstellten Trainingskarte (Petrovič, 2014)

Criteria	mean	stdev
Readability of map:	4,8	0,4
Suitability of colours:	4,5	0,6
Correctness of contour lines:	4,5	0,6
Relief point objects (pits, depressions, knolls):	3,6	1,4
Relief line objects (ditches, gullies):	3,8	1
Presentation of vegetation - yellow:	3,3	1,1
Presentation of vegetation - green:	3,6	0,8
Presentation of water objects:	3,4	1,3
Tracks and paths:	3,4	0,7
Harmonization of overall objects' presentation (generalization, mapping criteria):	4,2	0,8
Suitability for trainings:	4,8	0,6
Suitability for competitions:	3	1,3

Die Lesbarkeit der Karte (*Readability of map*), Eignung der Farben (*Suitability of colours*) und die Korrektheit der Höhenkurven (*Correctness of contour lines*) wurden sehr gut anerkannt (4.5 bis 4.8), die Darstellung der Vegetation (*Presentation of vegetation - green*) weniger (3.3).

Petrovič (2014) stellte fest, dass solche OL-Karten die Anforderungen an OL-Wettkämpfe nicht erfüllen, diese jedoch für OL-Trainings verwendet werden können. Für Wettkampfkarten ist Geländearbeit weiterhin notwendig. Die Informationen aus den LAS-Daten sind für die Geländeaufnahme hilfreich und reduzieren den Zeitaufwand (Petrovič, 2014).

3.3.1 Automatische Kartierung der Vegetation

Trier (2015) präsentierte neue Methoden für die automatische Kartierung der Vegetation aus ALS-Daten. Die Methoden wurden speziell für OL-Karten im Massstab 1:15'000 und 1:10'000 entwickelt. Er führte die «Normalized Difference Vegetation Density» (NDVD) als Indikator für die Dichte der Vegetation ein. Eine modifizierte Version des NDVD wurde zur Kartierung des dichten Bodenbewuchs verwendet.

Trier (2015) unterteilte seine Arbeit in die zwei folgenden hauptsächlichen Bearbeitungsvorgänge, die am Schluss wieder zusammengeführt wurden:

- Kartierung des offenen Gebiets
- Kartierung der Laufbehinderung

Die Kartierung des offenen Gebietes war relativ einfach. Dafür war ein Schwellwert für die Vegetationshöhe zu definieren. Anschliessend wurde eine Generalisierung durchgeführt, damit die Karte besser lesbar wurde. Hier eigneten sich morphologische Operatoren zum Füllen von kleinen Lücken oder Entfernen von zu kleinen Flächen. Bei der Generalisierung der Flächen waren die in der ISOM 2000 definierten Minimaldimensionen zu berücksichtigen.

Die Kartierung der Laufbehinderung war anspruchsvoller. Für die Laufbehinderung entscheidend ist die Vegetationsdichte zwischen 0m und 2m über dem Boden. Ist das

Kronendach der Bäume jedoch dicht, erreichten nur wenige ALS-Impulse diesen bodennahen Bereich. Dieses schwache Signal muss bei den Bearbeitungsvorgängen kompensiert werden (Trier, 2015).

In dieser Arbeit wurde die weitere Bearbeitung auf Rasterbasis durchgeführt. Bei einer Punktdichte von 2 gesendeten Impulsen pro m² wurde eine Pixelgrösse von 0.5m verwendet. Für die Vegetationsdichte schlug Trier (2015) die «Normalized Difference Vegetation Density» (NDVD) vor:

$$NDVD = \frac{V - G}{V + G}$$

Dabei entspricht G der Anzahl Bodenpunkte (*Ground Points*) und V der Anzahl Vegetationspunkte innerhalb des Vegetationsbereiches. Um den NDVD zu berechnen, bestimmte Trier (2015) für seine Arbeit die Parameter wie folgt:

- Minimale Höhe über dem Boden für einen Vegetationspunkt, 0.2m (idealerweise wäre 0.0, berücksichtigt aber die Höhengenaugigkeit der Punkte nicht und führt somit zu Artefakten)
- Maximale Höhe über dem Boden für einen Vegetationspunkt, idealerweise 2.0m
- Grösse der Nachbarschaft sollte idealerweise so gross sein, damit mehrere Bodenpunkte vorhanden sind

Durch Testen bestimmte Trier (2015) einen Nachbarschaftsradius von 2.0m. Dabei wurden alle Punkte innerhalb von 1.0m Radius gleich gewichtet. Die Punkte mit einer Entfernung von 1.0m bis 2.0m wurden linear schwächer gewichtet. Dies ist in Abbildung 39 dargestellt.

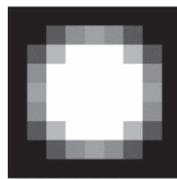
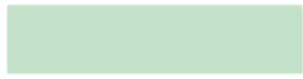


Abbildung 39 Nachbarschaft. Pixelgrösse 0.5m. Innerer Radius 1m, äusserer Radius 2.0m. Quelle: (Trier, 2015)

Die Laufbehinderung durch die Vegetation kartierte Trier (2015) in die in der Tabelle 7 dargestellten drei Klassen gemäss ISOM 2000.

Tabelle 7 Vegetationsklassen für Laufbehinderung durch Vegetation. Quelle: (Trier, 2015)

Signatur-Nummer	Darstellung	Bedeutung
406		Wald mit leichter Laufbehinderung (englisch: <i>Slow run</i>)
408		Wald mit starker Laufbehinderung (englisch: <i>Walk</i>)
410		Vegetation mit sehr starker Laufbehinderung, unpassierbar (englisch: <i>Fight</i>)

Für alle drei Klassen verwendete Trier (2015) die gleiche Methode. Einzig der NDVD-Grenzwert für die Vegetation von 0.2m bis 2.0m über Boden wurde geändert. Die folgenden Schritte wurden angewendet:

- Berechnung des NDVD für eine Vegetationshöhe von 0.2m bis 2.0m, 1.0m Auflösung
- Grenzwerte zwischen den Klassen gemäss Tabelle 8. Die berechnete Rasterkarte mit der Vegetationsdichte wurde nun in mehreren Schritten generalisiert. Diese erfolgte durch abwechslungsweise schliessende und öffnende binäre morphologische Filter mit unterschiedlicher Grösse der Nachbarschaftszellen.

Tabelle 8 NDVD-Grenzwerte für die Berechnung der Vegetation. Quelle: (Trier, 2015)

Class	Reduced running speed	ALS pulse density per m ²	Threshold for NDVD 0.2–2.0m
Slow run	20–50%	2	–0.2
Walk	50–80%	2	0.20
Fight	80–100%	2	0.60
Slow run	20–50%	10	0.00
Walk	50–80%	10	0.35
Fight	80–100%	10	0.70

Der morphologische schliessende Filter füllt Lücken in Gebieten mit dichter Vegetation in Abhängigkeit der gewählten Grösse der Nachbarschaft. Hingegen entfernt der morphologische öffnende Filter zu kleine Flächen gemäss den Minimaldimensionen für Flächen der ISOM 2000.

Bei einem Versuch in 4 verschiedenen Waldgebieten nahe Oslo konnte die Vegetation zwischen 71% und 75% korrekt klassiert werden. Dabei wurden die durchgeführten Geländeaufnahmen mit der automatisch berechneten Rasterkarte pixelweise verglichen.

Trier (2015) relativierte die guten, berechneten Resultate. Würden alle Pixel der Signatur «Wald ohne Laufbehinderung» (auch als «Normaler Wald» bezeichnet) zugewiesen, würde

die korrekte Klassierung immer noch 54.5% bis 66% betragen. Somit verbesserte die neue Methode die Klassierung um 7% bis 20%. Die korrekten Klassierungsraten jeder Klasse sind in der Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9 Klassierungsraten für 4 verschiedene Waldgebiete nahe Oslo. Quelle: (Trier, 2015)

Klasse	Korrekte Klassierungsraten
Offen	81%-88%
Wald ohne Laufbehinderung	76%-80%
Wald mit leichter Laufbehinderung	22%-52%
Wald mit starker Laufbehinderung	9%-40%
Vegetation mit sehr starker Laufbehinderung	0%-40%

Basierend auf diesen Resultaten könnte nur eine Klasse für die Laufbehinderung verwendet werden. Damit wird die korrekte Klassierungsrate auf 26% bis 60% gesteigert (Trier, 2015).

Die Untersuchung von Trier (2015) zeigte, dass offene Gebiete automatisch sogar besser klassiert werden konnten als durch manuelle Kartierung. Hingegen bleibt die automatische Kartierung der dichten Bodenvegetation weiterhin ein grosses Problem. In vielen Fällen konnte die automatische Methode grössere Flächen mit dichter Bodenvegetation identifizieren. In anderen Gebiete gab es nur eine tiefe Übereinstimmung von automatisch und manuell kartierter dichter Bodenvegetation. Ein mögliches Problem war, dass die ALS-Impulse durch die dichte Vegetation geblockt wurden, bevor diese den Vegetationsbereich zwischen 0.2m und 2m erreichten. Die Blätter der Laubbäume blocken das ALS-Signal fast komplett. Somit sind Flugaufnahmen im Frühling vor dem Laubaustritt besser. Auch eine höhere Punktdichte könnte von Vorteil sein. Aber das Testgebiet mit höherer Punktdichte führte zu keinem besseren Resultat bei der Kartierung der Vegetationsdichte. Ein weiteres mögliches Problem beim Vergleich zwischen der automatischen Berechnung und der Geländeaufnahme kann sein, dass bei der Geländeaufnahme nicht immer korrekt kartiert wurde (Trier, 2015).

Trier (2015) stellte fest, dass die Kartierung der Laufbehinderung die grösste Herausforderung und subjektivste Aufgabe des OL-Kartographen ist. So bieten automatische Methoden die Möglichkeit, den subjektiven Einfluss zu reduzieren und Zeit zu sparen.

4 Methodik und Werkzeuge

Dieses Kapitel beschreibt den Prozess, wie aus den ALS-Daten und den zusätzlich erfassten Stichproben ein Vegetationsmodell erstellt wird. Das Modell dient dazu, die Wirklichkeit zu abstrahieren. Anhand von zusätzlichen Geländeaufnahmen wird das Modell mit der OL-Karte verglichen. Der gesamte Prozess ist in der Abbildung 40 dargestellt.

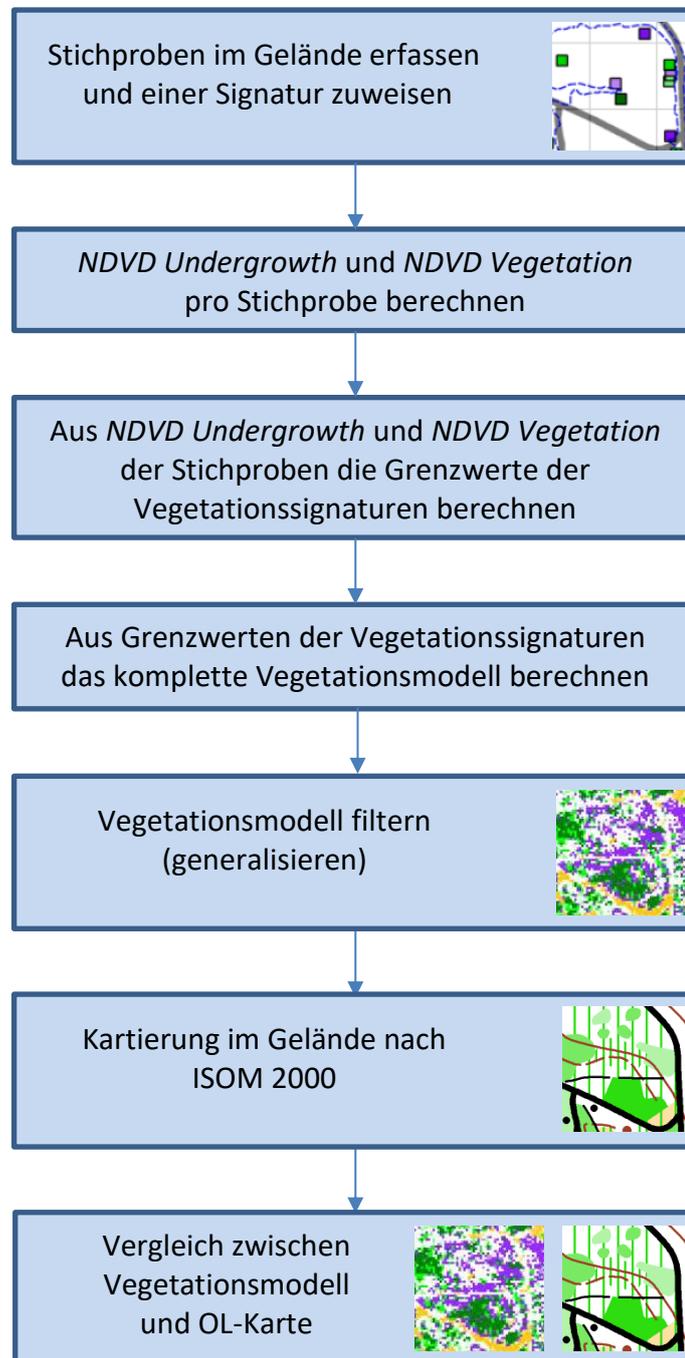


Abbildung 40 Gesamtüberblick zur Methodik von den ALS-Daten zur OL-Karte und dem Vergleich durch Geländebegehung

Im Testgebiet wurden 166 Stichproben erfasst und jede einer ISOM 2000-Vegetationssignatur (Tabelle 3) zugewiesen. Zu jeder Stichprobe wurde aus den ALS-Daten die Merkmale *NDVD Undergrowth* und *NDVD Vegetation* berechnet. Damit konnten aus diesen beiden Merkmalen die Grenzwerte zwischen den einzelnen ISOM 2000-Vegetationssignaturen bestimmt werden.

Anhand dieser Grenzwerte und der Klassierung der ALS-Daten konnte aus den Testdaten ein Modell mit einer Zellengrösse von 1m berechnet werden. Regeln und Filter generalisieren und verbessern dieses Modell. Somit war jede Zelle im Modell eindeutig einer ISOM 2000-Vegetationssignatur zugeordnet. Diese Rasterkarte diente als Grundlage für eine weitere Geländeaufnahme im Testgebiet. Dabei wurde das Gebiet komplett als OL-Karte aufgenommen und anschliessend am Computer gezeichnet. Mit dem abschliessenden Vergleich mittels Rasteranalyse zwischen dem berechneten Modell und der OL-Karte konnte das Resultat beurteilt werden. Dies wird im Kapitel 5.2 beschrieben.

Die Programmierung der einzelnen Berechnungsschritte erfolgte in der Kartographie-Software OCAD.

4.1 ALS-Testdaten

Das Testgebiet Steinhuserwald ist im Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben. Für dieses Gebiet standen Datensätze des Kantons Zürich und des Kantons Zug zur Verfügung. Ein Vergleich der beiden Datensätze ist gemäss den Spezifikationen der Datenlieferanten in der Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10 Vergleich der ALS-Testdaten vom Gebiet Steinhuserwald

	Kanton Zürich	Kanton Zug
Befliegungsdatum	März/April 2014	2013
Genauigkeit	Lage 20cm, Höhe 10cm	Im Wald 50cm
Punktdichte	Mittlere Punktedichte ohne Überlappung von 8 Punkten/m ²	Mittlere Punktedichte von 4 Punkten/m ² in Landwirtschaftszone
Kachelgrösse	500m x 500m	1000m x 1000m
las-Dateigrösse Testdaten	288 MB für 0.23km ² -> 1252 MB/km ²	350 MB (1 km ²)
Anzahl Punkte	15.2 Mio für 0.23km ² -> 66.1 Mio/km ²	4.8 Mio für 0.25km ² -> 19.2 Mio/km ²
Dateiformat	laz, LAS-Version 1.2	laz, LAS-Version 1.2
Referenzsystem	CH1903+	CH1903
Bezug	Open Data, Download über Web	Webshop
Klassiert	ja	ja
Spezifikationen	Auf Webseite verfügbar ¹⁰	Auf Webseite verfügbar ¹¹

Die beiden Datensätze lieferten gemäss den Spezifikationen keine direkt vergleichbare Punktdichte. Die Daten des Kantons Zürich hatten eine mittlere Punktedichte von 8 Punkten/m². Der Kanton Zug gab eine mittlere Punktedichte von 4 Punkten/m² in der

¹⁰<http://geolion.zh.ch/geodatensatz/show?nbid=2618>

¹¹<https://www.zg.ch/behoerden/direktion-des-innern/grundbuch-und-vermessungsamt/vermessung/Produkteinformationen%20amtliche%20Vermessung/Produkteinformationen%20amtliche%20Vermessung/08m04-produkteblatt-lidar.pdf>

Landwirtschaftszone an, jedoch keine Informationen für das Waldgebiet. Anhand der Anzahl Punkte für dieses Testgebiet konnte die Punktdichte verglichen werden. Bei einer Punktemenge von 66.1 Mio/km² respektive 19.2 Mio/km² hatte der Kanton Zürich eine 3.4-fach höhere Punktdichte als der Kanton Zug. Jedoch war bei diesem Vergleich zu berücksichtigen, dass die Punktwolken gegebenenfalls nicht klassierte oder überlappende Punkte enthalten konnten.

4.1.1 ALS-Daten Kanton Zürich

Die ALS-Daten des Kantons Zürich waren als Open Data verfügbar und konnten übers GIS-Portal des Kantons Zürich¹² heruntergeladen werden. Gemäss den technischen Spezifikationen erfolgte die Befliegung vor dem Laubaustritt bei schneefreien Verhältnissen. Weiter sind gemäss den Spezifikationen für den Datenproduzenten «Datenlücken aufgrund Nadelwald, dichtem Unterholz, etc. mit der Wahl des Befliegungszeitpunktes zu vermeiden». Zur Verifikation der Daten wurde die laz-Datei im Tool LASview von LAStools geöffnet (Abbildung 41). Die farbliche Darstellung erfolgte gemäss der Klassierung der Daten. Braun dargestellt ist der Boden, Gelb die mittlere Vegetation und Grün die hohe Vegetation.

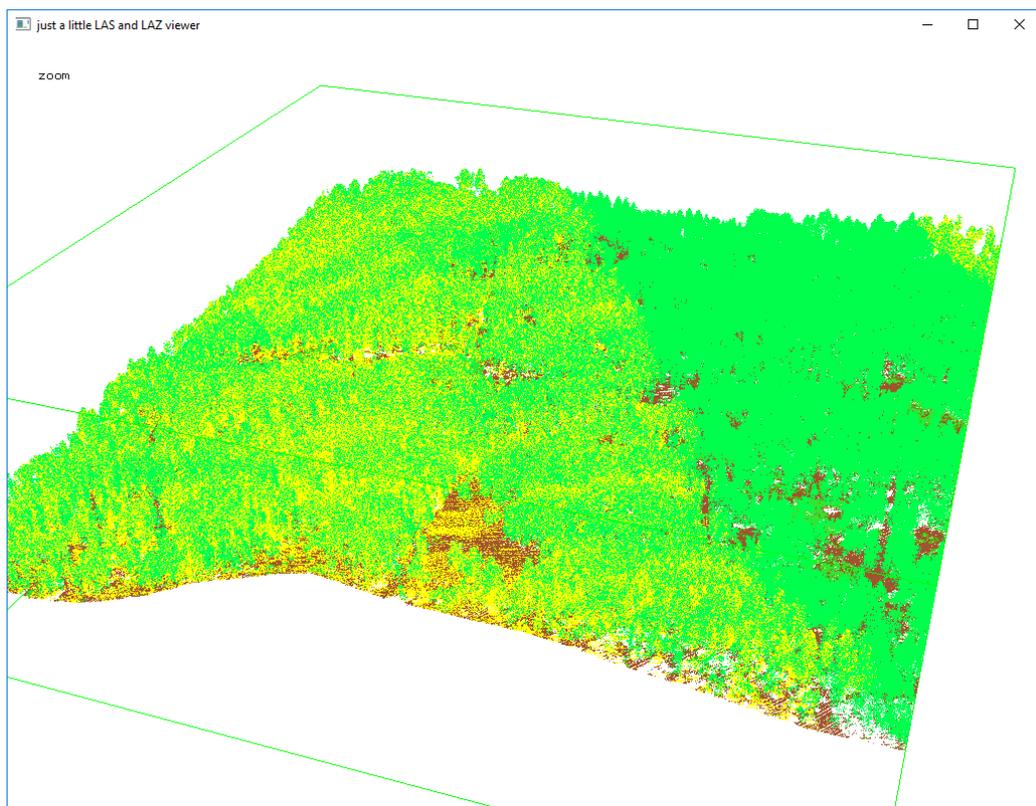


Abbildung 41 ALS-Daten Steinhuserwald Kanton Zürich in LASview

4.1.2 ALS-Daten Kanton Zug

Der Kanton Zug beflog sein ganzes Gebiet 2013 zur Erstellung eines Solarkatasters. Abbildung 42 zeigt die 4 Kacheln des Testgebietes gerendert mit dem Programm LASview. Die zwei

¹² <http://maps.zh.ch/>

braunen Querstreifen irritierten, da mit Braun eigentlich nur Bodenpunkte dargestellt werden.

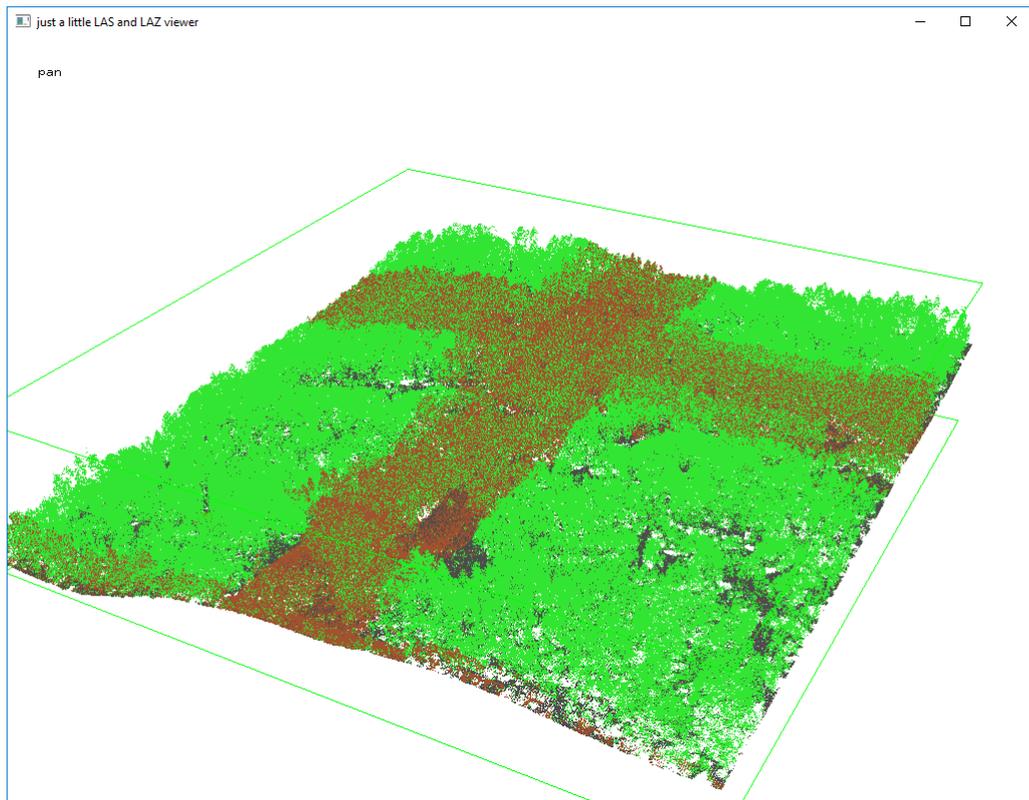


Abbildung 42 ALS-Daten Steinhuserwald Kanton Zug in LASview. (Datenquelle: GIS Zug)

Zur weiteren Analyse wurden die Daten mit geänderter Einstellung neu visualisiert. Bei der LASview Option «render only» wurden nur die Bodenpunkte «ground» dargestellt. Abbildung 43 zeigt bei der Kachel *680_229.laz* eindeutig, dass viele Punkte dieser Daten falsch klassiert sind. In der Abbildung unten links sind klar Baumstrukturen ersichtlich, die vom Datenlieferanten fälschlicherweise als Bodenpunkte klassiert wurden.

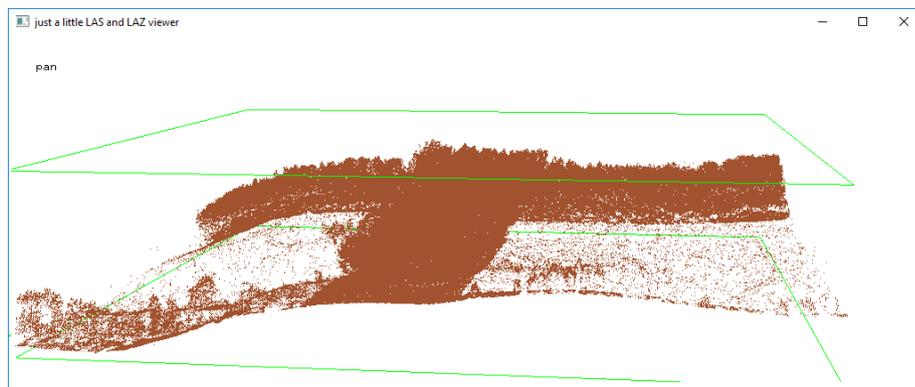


Abbildung 43 Steinhuserwald mit nur gerenderten Bodenpunkten. (Datenquelle: GIS Zug)

Da sich diese Master Thesis nicht mit der Klassierung der ALS-Daten befasste, wurden diese ALS-Daten des Kantons Zug nicht weiterverwendet. Die ALS-Daten des Kantons Zürich sollten für diese Master Thesis genügen. Jedoch war somit ein Vergleich zwischen den Resultaten beider Datensätze nicht möglich.

4.2 OL-Karte Steinhuserwald

Die OLV Zug ist Herausgeberin der OL-Karte «Steinhuserwald». Die letzte Überarbeitung erfolgte 2010. In den 7 Jahren seit der letzten Kartierung hatte sich in diesem Wald vor allem die Vegetation geändert. Somit war diese Karte nicht mehr aktuell. Die Karte lag als OCAD-Datei im Massstab 1:10'000 vor. Die OL-Karte «Steinhuserwald» des Testgebiets ist in der Abbildung 44 ersichtlich. Die Grösse des Ausschnitts beträgt 500x500m.

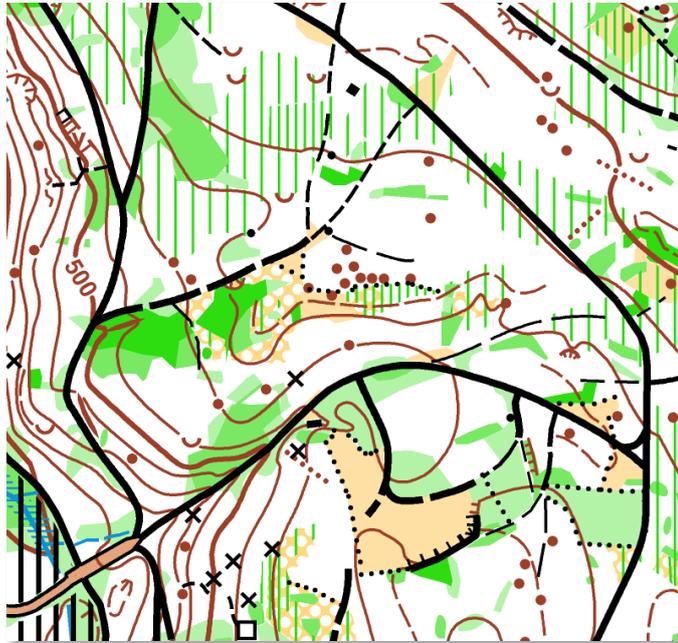


Abbildung 44 OL-Karte "Steinhuserwald". Abbildung nicht massstäblich. (Quelle: OLV Zug)

4.2.1.1 Geometrische Genauigkeit

Leider war diese OL-Karte geometrisch ungenau. Die Karte war georeferenziert, jedoch lokal verzogen. Diese Verschiebungen sind in der Abbildung 45 gut ersichtlich. Das Wegenetz der OL-Karte ist in Schwarz dargestellt. Zur Überprüfung der Geometrie wurde das Orthophoto vom Geoportal des Kantons Zug mittels WMS (Web Map Service) ergänzend geladen. Die maximale Auflösung des Orthophotos betrug 0.1m. Zur Lagegenauigkeit des Orthophotos wurden keine Angaben publiziert. Diese Lagegenauigkeit war jedoch deutlich kleiner als die für OL-Karten relevanten 1m. Somit war diese geometrische Genauigkeit des Orthophotos zur Beurteilung der OL-Karte genügend.

Zur besseren Sichtbarkeit wurde zusätzlich das Wegenetz digitalisiert. Dieses ist mit roter Farbe transparent dargestellt (Abbildung 45). In dieser Abbildung beträgt der Gitterabstand 10m. Im südwestlichsten Teil des Ausschnittes ist gut erkennbar, dass die Strassengeometrie der OL-Karte über 10m vom lagerichtigen Orthophoto abweicht. Weil damit auch die Vegetation in dieser OL-Karte nicht lagerichtig war, konnte kein rasterbasierter Vergleich zwischen dieser OL-Karte und den neu berechneten Daten durchgeführt werden. Dies würde zu falschen Resultaten und Interpretationen führen.



Abbildung 45 Geometrische Genauigkeiten der OL-Karte «Steinhuserwald». Gitterabstand 10m. (Quelle Luftbild: GIS Zug)

Für den Athleten ist diese Ungenauigkeit der Karte im Gelände kaum merkbar, da die relative Lagegenauigkeit auf der Karte entscheidender ist. Eine Ungenauigkeit kann erst nach dem Lauf bei der Analyse der Karte mit der gelaufenen Route anhand der aufgezeichneten GPS-Daten festgestellt werden.

4.3 OCAD «LiDAR Point Cloud Manager»

Die Kartographie-Software OCAD enthält seit der aktuellen Version 12 einen «LiDAR Point Cloud Manager». Dieser hat Funktionen zur Analyse der ALS-Punktwolke und wurde in dieser Master Thesis durch zusätzliche Funktionen ergänzt. Dabei wurde die englische Sprachversion von OCAD verwendet.

Eine Übersicht der einzelnen Funktionen des «LiDAR Point Cloud Managers» zeigt die Abbildung 46. Die bestehenden Komponenten sind in oranger Farbe dargestellt, die in dieser Master Thesis neu entwickelten Funktionen in Blau. Der «LiDAR Point Cloud Manager» basiert auf einer ocdLas-Datei. Dieses Dateiformat ist im Kapitel 4.3.1 beschrieben. Mittels Optionen lässt sich die Punktwolke nach Klasse, «Return Type» und Höhe über dem Boden für die Weiterverarbeitung filtern. Die Funktion Querprofil stellt die Waldstruktur anhand der nach Klasse eingefärbten ALS-Punkte dar. Mittels Filter und verschiedenen Anzeigoptionen wie Klassierung kann eine benutzerdefinierte Rasterkarte erstellt werden. Die bestehende Funktionalität ist im Kapitel 4.3.2 ausführlich beschrieben.

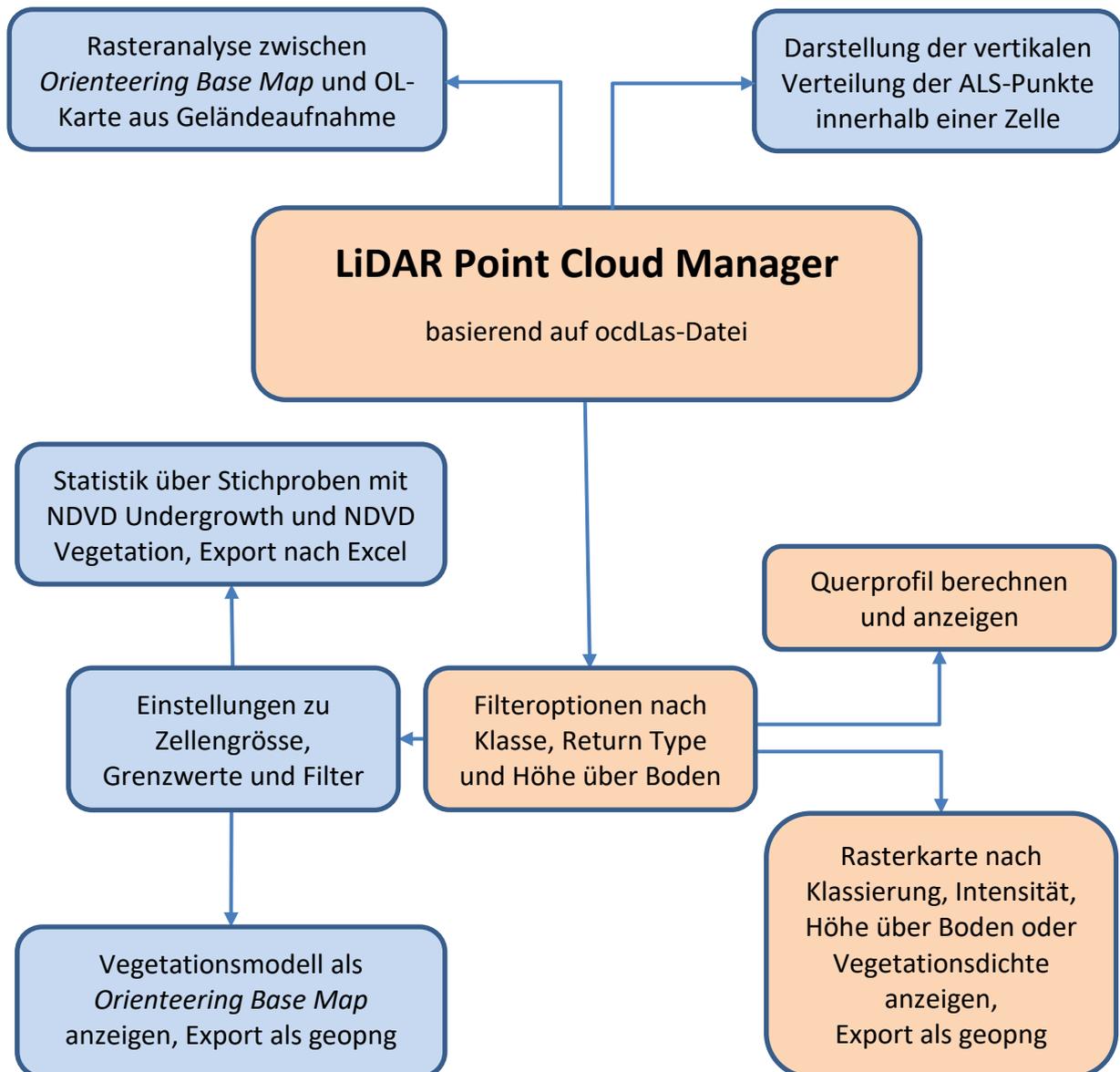


Abbildung 46 Komponenten des OCAD LiDAR Point Cloud Manager

Im Verlaufe dieser Master Thesis wurden zusätzliche Komponenten zur Analyse der bodennahen Vegetation entwickelt. Aus den Stichproben können die Grenzwerte der Vegetationsklassen berechnet werden (Kapitel 4.4.2). Anhand dieser wird das Vegetationsmodell berechnet und als *Orienteering Base Map* dargestellt (Kapitel 4.4.4). Abschliessend wird mit der neuen Funktion der Rasteranalyse das berechnete Vegetationsmodell mit der Geländeaufnahme verglichen und beurteilt (Kapitel 5.2). Die vertikale Punktverteilung ermöglicht die zusätzliche Analyse der ALS-Punkte in einer Zelle.

4.3.1 ocdLas-Dateiformat

Der «LiDAR Point Cloud Manager» arbeitet nicht direkt mit *las* oder *laz*-Dateien, sondern mit einem proprietären, binären Format von OCAD mit der Dateierweiterung *ocdLas*. Das proprietäre Format ermöglicht den schnelleren Zugriff auf die relevanten Daten der Punktwolke. Die Datenstruktur ist vom *las*-Dateiformat abgeleitet, welche im Kapitel 2.1.5.1 beschrieben ist.

Nicht notwendige Informationen wie die *Point Source ID* werden in der ocdLas-Datei nicht gespeichert. Dafür speichert OCAD zu jedem Punkt die Höhe über dem Terrainmodell («Height Above Ground»). Der schnelle Zugriff auf diese Information ist wichtig bei der Analyse der bodennahen Vegetation. Andernfalls müsste OCAD bei jedem Datenpunkt zuerst diese Höhe aus der ganzen Punktwolke berechnen.

Die Tabelle 11 stellt dar, welche Informationen zu jedem ALS-Punkt in der ocdLas-Datei abgespeichert werden. Aus Performance-Gründen werden die Koordinate und die Höhen als Ganzzahl in Zentimeter abgespeichert. Die Genauigkeit in Zentimeter ist für ALS-Daten in diesem Anwendungsbereich ausreichend genau, da diese 10mal genauer ist als die in den Spezifikationen der Testdaten angegebene Höhengenaugkeit. Die Testdaten haben gemäss den Spezifikationen eine Lagegenauigkeit von 20cm und Höhengenaugkeit von 10cm. Die Datentypen entsprechen denen der Programmiersprache Object Pascal.

Tabelle 11 ocdLas-Datenformat

Name	Object Pascal Datentyp	Ergänzung
Easting	Integer (4 Byte)	Ganzzahl in cm
Northing	Integer (4 Byte)	Ganzzahl in cm
Height	Integer (4 Byte)	Ganzzahl in cm
Height Above Ground	Word (2 Byte)	Ganzzahl in cm
Intensity	Word (2 Byte)	Gemäss LAS-Dateiformat
Return Number	Byte (1 Byte)	Gemäss LAS-Dateiformat
Number of Returns	Byte (1 Byte)	Gemäss LAS-Dateiformat
Classification	Byte (1 Byte)	Gemäss LAS-Dateiformat

Jeder Punkt benötigt somit 19 Byte Speicherplatz. Die ocdLas-Datei enthält einen hier nicht beschriebenen kleinen Dateiheder. Die Datei ist binär und unkomprimiert. Damit kann die komplette Datei beim Öffnen des «LiDAR Point Cloud Manager» sehr schnell in die lokale Datenstruktur und somit in den Speicher des Computers geladen werden, weil die Datei zuerst nicht noch dekomprimiert werden muss. Komprimieren und dekomprimieren ist ein verhältnismässig langsamer Vorgang. Der Nachteil der unkomprimierten Daten ist jedoch, dass die ocdLas-Datei mehrere GB gross werden kann und dementsprechend viel Speicher (RAM) bei deren Anwendung benötigt. Da OCAD eine 64-bit Software ist, kann diese Software eine typischerweise 1-12 GB grosse Dateien laden, wenn der Computer dementsprechend mit 16 GB RAM oder mehr ausgestattet ist.

OCAD erstellt die ocdLas-Datei optional beim Import von ALS-Dateien. Dazu ist die entsprechende Option auszuwählen (Abbildung 47). OCAD erstellt in diesem Schritt auch ein DTM. Dieses ist notwendig, um für jeden Punkt in der ocdLas-Datei die Höhe über dem Boden zu berechnen.

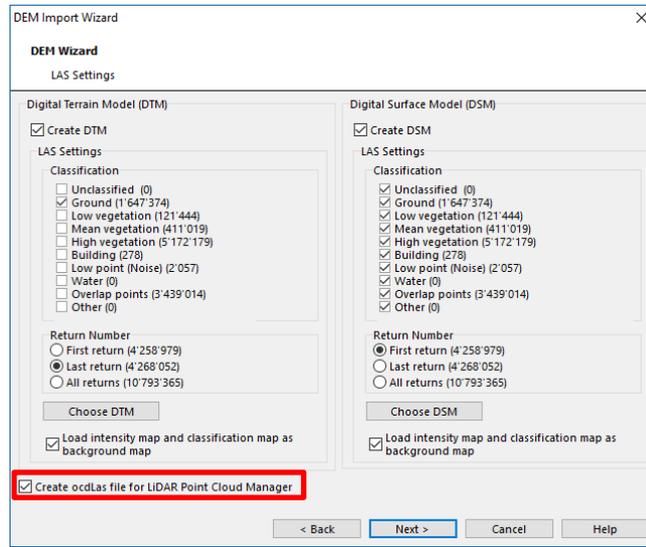


Abbildung 47 Option zum Erstellen der ocdLas-Datei beim Import des DHM in OCAD

Ein Vergleich der Dateigrößen mit den Testdaten ist in Tabelle 12 dargestellt. LAStools komprimierte die Datei auf 18% der ursprünglichen Dateigröße. Das proprietäre ocdLas-Dateiformat benötigte 32% weniger Speicherplatz als die unkomprimierte Punktwolke im las-Dateiformat.

Tabelle 12 Test der Dateigrößen für die Testdaten

Dateiformat	Beschreibung	Dateigröße	Kompressionsrate
las, Version 1.2	Punktwolke unkomprimiert	288 MB	-
laz	Punktwolke komprimiert mit LAStools	51.4 MB	82%
ocdLas, Version 12	Punktwolke unkomprimiert im proprietären Dateiformat	195 MB	32%

Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse eines Tests zur Lese-Geschwindigkeit dieser Dateien. OCAD las die proprietäre Datei 11x schneller, als LAStools dafür benötigte, die laz-Datei zu dekomprimieren. Die Dekomprimierung fand mit LAStools über die Windows-Kommandozeile statt.

Tabelle 13 Geschwindigkeitstest mit ALS-Daten

Beschreibung	Zeit
Dekomprimieren der laz-Datei nach las mit LAStools über die Kommandozeile von Windows	5.6 sec
Lesen der unkomprimierten ocdLas-Datei in die interne OCAD-Datenstruktur	0.5 sec

Dieser Test zeigte, dass es aus Gründen der Performance durchaus sinnvoll ist, die Punktwolke unkomprimiert zu speichern, wenn dafür ausreichend Speicherplatz auf dem Computer vorhanden ist. Zudem ermöglichen heutzutage SSD-Festplatten den schnellen Zugriff auch auf mehrere GB grosse Dateien.

4.3.2 Bestehende Funktionalität

Der «LiDAR Point Cloud Manager» bot die folgenden Funktionen:

- Zusätzliche Filterung der Punkte nach Klassierung, Impulstype (*Return type*) und Höhe über Boden (*Height above ground*)
- 2D-Darstellung der Punktwolke, eingefärbt nach Klassierung, Intensität oder Höhe über Boden (*Height above ground*)
- Exportieren der 2D-Darstellung als geopng-Rasterkarte
- Anzeigen des Querprofils für eine ausgewählte Strecke

Tabelle 14 zeigt die Darstellung der Punkte nach Klassierung im «LiDAR Point Cloud Manager». Dabei sind nur die im Wald relevanten Punktklassen aufgeführt. Die ID und deren Beschreibung entspricht dem ASPRS Standard (Kapitel 2.1.1.4). Die Bodenpunkte werden braun, die Vegetation grün dargestellt.

Tabelle 14 Darstellung der Punkte nach Klassierung im «LiDAR Point Cloud Manager»

ID	Beschreibung	Farbe
2	Bodenpunkt	Braun
3	Niedrige Vegetation	Dunkelgrün
4	Mittlere Vegetation	Hellgrün
5	Hohe Vegetation	Rotgrün
12	Streifenrandpunkte	Rot

Abbildung 48 stellt das Querprofil einer gewählten Strecke durch die ALS-Punktwolke dar. Die Punkte werden anhand ihrer Klassierung farblich dargestellt (Tabelle 14). In diesem Beispiel beträgt die wählbare Profilbreite 6m.

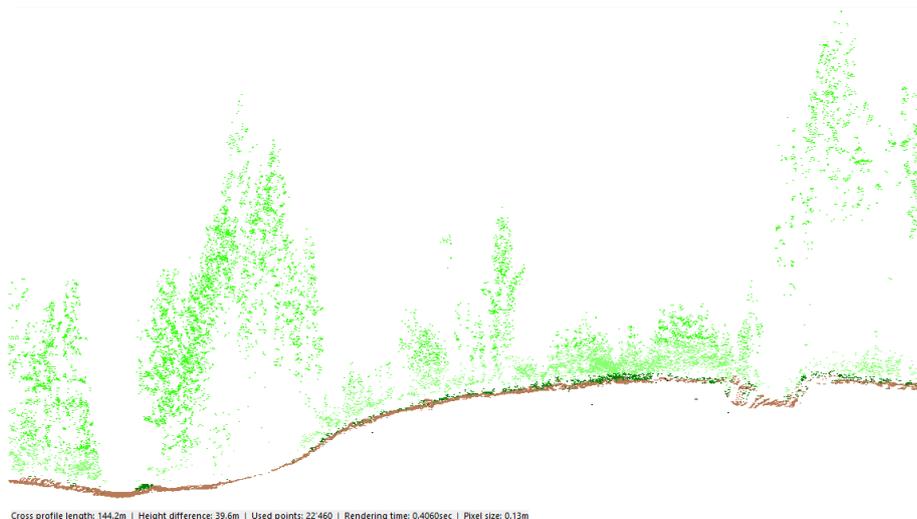


Abbildung 48 Querprofil im OCAD «LiDAR Point Cloud Manager»

Das Querprofil gab schon einen ersten Eindruck über die Vegetation im Wald. Neben der Baumstruktur ist auch dichter Bodenbewuchs (dunkelgrün dargestellt) in der Abbildung 48

an mehreren Stellen klar zu erkennen. Diese Darstellungsart eignete sich jedoch nicht für die Darstellung der Vegetation als Fläche. Hierfür war eine Rasterkarte geeigneter.

4.4 Modellbildung auf Basis von empirischen Daten

4.4.1 Empirische Daten

Am 13.11.2016 wurden innerhalb des ganzen Testgebietes 166 Stichproben erfasst. Diese sollten so ausgewählt werden, dass sie eindeutig einer ISOM 2000-Vegetationssignatur (Tabelle 15) zugewiesen werden konnten. Grenzfälle bei den Stichproben sollten vermieden werden, da diese sowohl der einen wie auch einer anderen Klasse zugeordnet werden könnten. Trier (2015) wies schon darauf hin, dass die Kartierung der Laufbehinderung durch Vegetation die grösste Herausforderung und subjektivste Aufgabe des OL-Kartographen ist. Von den erfassten Stichproben wurden insgesamt 52 (31%) dem Bodenbewuchs und 83 (50%) der Vegetation zugeordnet. Die restlichen 31 Stichproben (19%) wurden als Wald ohne Laufbehinderung bestimmt.

Tabelle 15 Signaturen der 6 Vegetationsklassen für die Stichproben

Nummer ISOM 2000	Beschreibung	Anzahl Stichproben	Darstellung RGB-Werte
405	Wald	31	255,255,255
407	Bodenbewuchs leicht	42	191, 128, 255
409	Bodenbewuchs stark	10	128, 0, 255
406	Vegetation leicht	15	128, 255, 128
408	Vegetation stark	57	0, 255, 0
410	Vegetation sehr stark	11	0, 128, 0

Auf der OL-Karte wird sowohl der Bodenbewuchs als Strichraster, wie auch die Vegetation als Fläche in grüner Farbe dargestellt (Kapitel 2.3.2.2). Um in einer Rasterkarte zwischen Bodenbewuchs und Vegetation klar unterscheiden zu können, wurden die zwei Klassen des Bodenbewuchses in violetter Farbe dargestellt (Tabelle 15). Es musste mit Violett eine Farbe gewählt werden, die nicht schon auf OL-Karten verwendet wird. Somit schlossen sich Gelb, Blau, Grün, Braun und Schwarz aus. Rot eignete sich nicht, weil Personen mit Rot-Grün-Blindheit Probleme mit der Unterscheidung dieser zwei Farben hätten.

Die Positionsbestimmung im Gelände erfolgte mittels der bestehenden OL-Karte und der Vegetationshöhenkarte. Zusätzlich wurde ein Track mit einer GPS Uhr *Garmin Forerunner 910XT* aufgezeichnet. Jede Sekunde wurde die aktuelle Position erfasst und als sogenannter Track abgespeichert. Zu beachten galt, dass die bestehende OL-Karte nicht genau georeferenziert war (Kapitel 4.2). Bei der Digitalisierung der Stichproben in der Software OCAD diente der aufgezeichnete GPS-Track als zusätzliche Kontrolle zur Lokalisierung.

Die Abbildung 49 zeigt die erfassten Stichproben auf der bestehenden OL-Karte. Jede Stichprobe ist mit einem Quadrat dargestellt. Deren Füllung entspricht der Farbe der Klassierung (Tabelle 15). Für die korrekte geometrische Darstellung wurde das Strassennetz ab Orthophoto vorgängig neu in OCAD digitalisiert. Zur besseren Lesbarkeit der Karte in der Abbildung 49 sind bestimmte Signaturen der OL-Karte, vor allem Punktobjekte, nicht dargestellt.

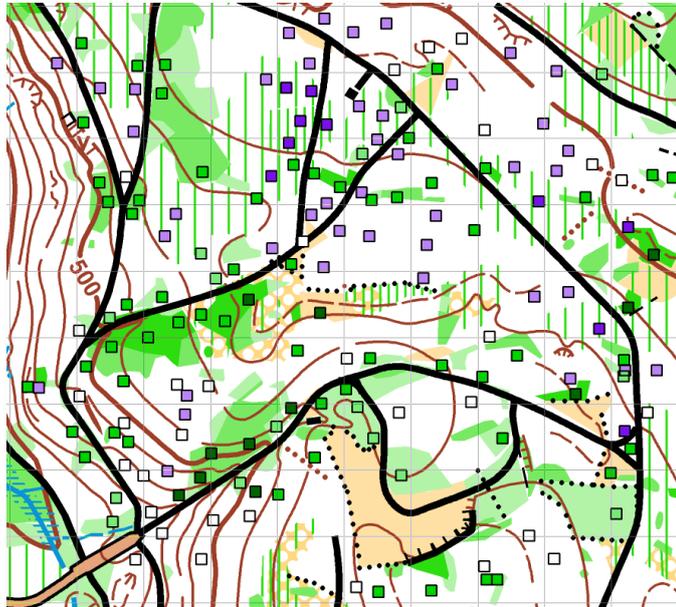


Abbildung 49 OL-Karte mit den erfassten und klassierten Stichproben.
Gitterabstand 50m. Ausschnitt 500x500m.

Die erfassten Stichproben (gefüllte Quadrate) mit dem blau dargestellten GPS-Track der Aufnahme sind in Abbildung 50 dargestellt. Zusätzlich enthält diese Karte das Strassennetz in grauer Farbe zur besseren Lokalisierung.

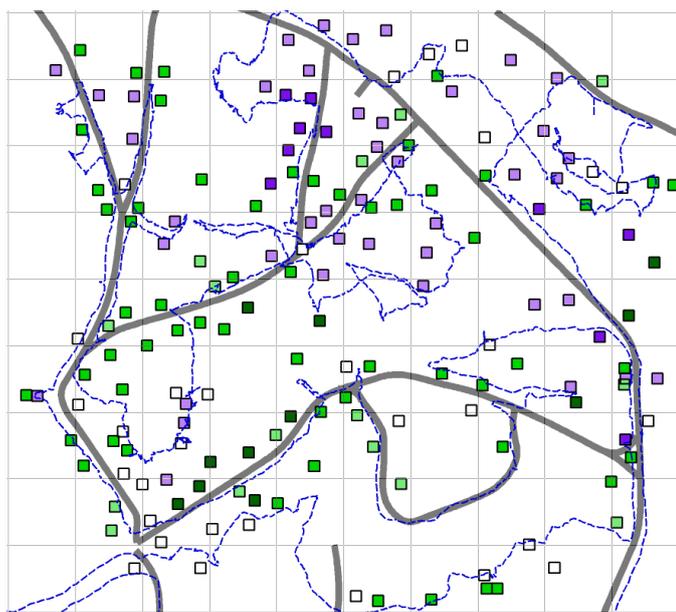


Abbildung 50 Erfasste und klassierte Stichproben.
Gitterabstand 50m. Ausschnitt 500x500m.

Die komplette Liste der 166 erfassten Stichproben ist im Kapitel 8.2 sichtbar. Das Beispiel einer Stichprobe ist in Tabelle 16 dargestellt. Die erste Spalte (*ObjectIndex*) ist die interne Identifikation in der OCAD-Datei. Die Symbolnummer (*Symbol Number*) ist gleichbedeutend mit der Klassierung gemäss ISOM 2000 Signatur. *Easting* und *Northing* sind die Ost- und Nordwerte der Koordinate. *NDVD Undergrowth* und *NDVD Vegetation* definieren die Vegetationsdichte, die im Kapitel 4.4.3 beschrieben ist. Die Liste im Anhang 8.2 ist geordnet nach Symbolnummer und eingefärbt nach deren Klassierung (Tabelle 15).

Tabelle 16 Beispiel einer Stichprobe für den Punkt in dem ObjectIndex 39

ObjectIndex	Symbol Number	Easting	Northing	NDVD Undergrowth	NDVD Vegetation
39	408	680'091.50	229'343.00	-0.73	-0.13

4.4.2 Analyse einer Stichprobe

Die 3D-Punktwolke aus ALS-Daten liefert viele Informationen. Es ist sehr wichtig, diese Informationen verfügbar zu machen, um diese korrekt interpretieren zu können. Dazu wurde eine Analysefunktion für die Punktwolke in OCAD entwickelt.

Diese Hilfsfunktion liefert die graphische Darstellung der vertikalen Verteilung (*Vertical Distribution*) der Punktwolke (*Point Cloud*) innerhalb einer Zelle (Abbildung 51). In der Punktwolken-Darstellung kann durch Drücken der rechten Maustaste das entsprechende Fenster mit der vertikalen Verteilung geöffnet werden. Dabei wird die Koordinate des Mouse-Cursors übernommen und dessen Daten angezeigt. Das Fenster stellt alle Punkte innerhalb der 2x2m grossen Zelle dar.

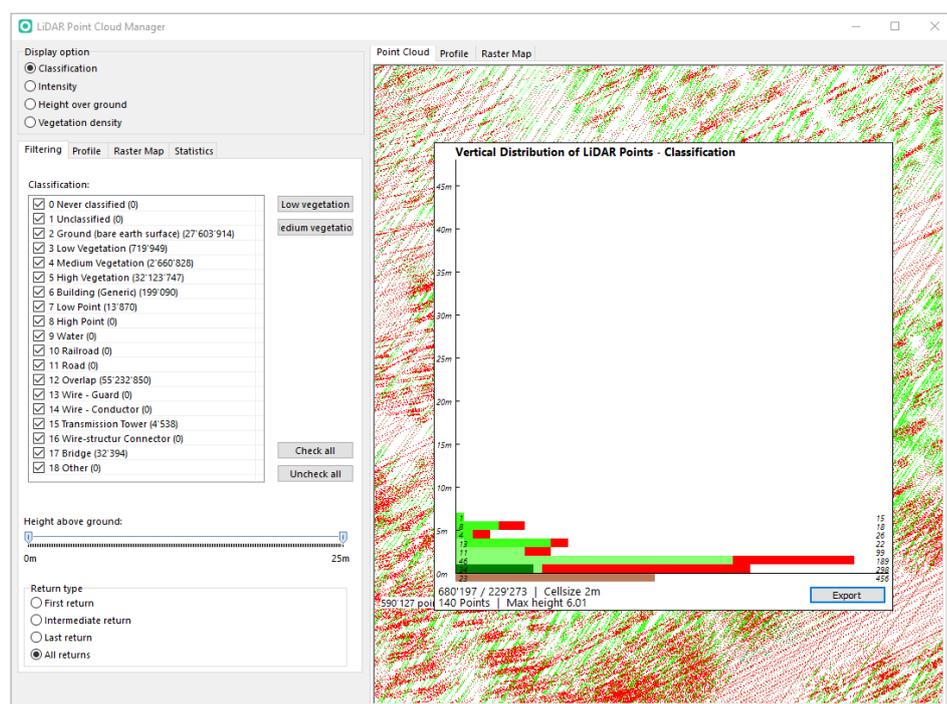


Abbildung 51 Vertikale Verteilung der ALS-Punktwolke in OCAD

Die Koordinate des Zellenzentrums für den Punkt in der Abbildung 51 ist 680'197/229'273. Innerhalb dieser 4m² liegen 140 ALS-Punkte. Ebenfalls in der Statusanzeige dieses Dialoges ist die maximale Höhe über dem Boden eines ALS-Punktes ersichtlich. Diese beträgt für diese Zelle 6.01m. Jeder Punkt ist als Quadrat im Querschnitt in Bezug auf die Höhe über dem Boden dargestellt. Die Farbe bezieht sich auf die Klassierung (Tabelle 14). Rechts der vertikalen Achse mit der Höhenangabe ist die Anzahl Punkte pro 1m-Schicht dargestellt. Braun dargestellt sind die 23 als Boden klassierten Punkte. 34 Punkte sind in der untersten Schicht zwischen dem Boden und einem Meter darüber. Diese teilen sich auf in 10 Vegetationspunkte und 24 Streifenrandpunkte (rot dargestellt). Diese Streifenrandpunkte sind nicht klassiert und dürfen nicht falsch interpretiert werden. Bei den 24 Streifenrandpunkten handelt es sich um Boden- sowie auch Vegetationspunkte.

Die entwickelte Export Funktion erstellt eine Microsoft Excel-Datei dieser ALS-Daten mit ihren Attributen für die weitere Analyse. Diese 24 Streifenrandpunkte lassen sich in Excel herausfiltern (*Classification = 12*) und nach *Height Above Ground* aufsteigend sortieren (Tabelle 17).

Tabelle 17 Streifenrandpunkte zur Analyse der Klassierung

LiDAR Point List: 680197 | 229273

ID	Easting	Northing	Elevati	Height	Intensi	Class
0	680'197.50	229'273.80	515.35	0	422	12
1	680'197.20	229'273.70	515.38	0	574	12
9	680'197.80	229'273.90	515.35	0	392	12
10	680'197.50	229'273.80	515.37	0	435	12
11	680'197.20	229'273.70	515.38	0	477	12
28	680'197.70	229'272.60	515.36	0	429	12
136	680'197.50	229'273.80	515.39	0	17	12
2	680'196.90	229'273.60	515.43	0.01	465	12
22	680'196.60	229'273.50	515.53	0.01	429	12
20	680'197.20	229'273.80	515.44	0.03	435	12
29	680'197.40	229'272.50	515.42	0.03	387	12
12	680'196.90	229'273.50	515.46	0.05	444	12
21	680'196.90	229'273.70	515.5	0.06	438	12
30	680'197.20	229'272.40	515.52	0.12	299	12
134	680'197.90	229'273.90	515.56	0.17	207	12
3	680'196.70	229'273.50	515.69	0.21	447	12
13	680'196.70	229'273.40	515.76	0.29	405	12
23	680'196.40	229'273.50	515.93	0.39	386	12
15	680'196.40	229'273.30	515.99	0.45	108	12
25	680'196.20	229'273.30	516.1	0.51	119	12
31	680'197.10	229'272.30	516.2	0.8	264	12
4	680'196.60	229'273.40	516.31	0.82	303	12
26	680'196.10	229'273.20	516.55	0.94	218	12
139	680'196.30	229'273.90	516.54	0.95	86	12

Der Wert 0 in der Spalte *Height Above Ground* bedeutet, dass dieser Punkt bei der Berechnung höhenmässig unterhalb des berechneten DTMs oder genau darauf lag und somit auf den Wert 0 gesetzt wurde. Unter Berücksichtigung der Höhengenaugigkeit von 10cm gemäss Spezifikationen (Tabelle 10) war damit zu rechnen, dass etwa die Hälfte dieser 24 Streifenrandpunkte Bodenpunkte und die andere Hälfte Vegetationspunkte waren. Trotzdem konnte anhand der hohen Punktdichte von 35 Punkte/m² gesagt werden, dass in dieser Zelle

der Wald im bodennahen Bereich dicht war. Auch die maximale Höhe über dem Boden von 6.01m (Abbildung 51) deutete auf Jungwuchs hin.

Diese Zelle hatte 140 ALS-Punkte. Ohne Überlappungspunkte waren es immer noch 92. Die Punktedichte von 23 Punkte/m² im Waldgebiet war somit deutlich höher als die in den Spezifikationen angegebenen 8 Punkte/m² (Tabelle 10). Dies bestätigte sich auch mit der Gesamtpunktmenge der 500m x 500m Kachel der Testdaten. Die Kachel enthielt 7.4 Millionen Punkte (ohne Überlappungspunkte). Daraus resultierte eine durchschnittliche Dichte von 30 Punkte/m².

4.4.3 Modellbildung

Trier (2015) führte den NDVD (*Normalized Difference Vegetation Density*) zur Beschreibung der Vegetationsdichte ein. Dieser ist im Kapitel 3.3.1 ausführlich beschrieben. Dieser NDVD wurde auch in OCAD programmiert. Trier (2015) unterschied im Gegensatz zu dieser Master Thesis nicht zwischen Bodenbewuchs und Vegetation. Somit wurden für diese Master Thesis zwei unterschiedliche NDVDs als Merkmale der Vegetationsdichte einer Zelle berechnet:

- *NDVD Undergrowth* (deutsch: NDVD Bodenbewuchs)
- *NDVD Vegetation* (deutsch: NDVD Vegetation)

Der *NDVD Undergrowth* berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen der Anzahl Vegetationspunkte des Bodenbewuchses und den Bodenpunkten. Als oberen Grenzwert wurde 1.0m gewählt. Dies entspricht der ISOM 2000. Erfahrungsgemäss wird beim Kartieren im Gelände oft ein höherer Wert (1.2 bis 1.5m) verwendet. Jedoch wurden die Testdaten im April geflogen. Zu dieser Zeit waren die in diesem Gebiet vorhandenen Brombeeren deutlich niedriger als im Sommer. Somit war dieser obere Grenzwert von 1.0m aus dieser Sicht wieder sinnvoll.

Für den *NDVD Vegetation* wurden alle Vegetationspunkte zwischen Boden und 3.0m über Boden verwendet. Damit waren in diesem Wert auch alle Punkte des Bodenbewuchses enthalten. Der *NDVD Vegetation* muss somit immer grösser oder gleich gross wie der *NDVD Undergrowth* sein, wenn derselbe untere Grenzwert verwendet wurde.

Die Normalisierung führte dazu, dass die Werte im Bereich zwischen -1 und +1 lagen.

- -1 bedeutete, dass keine Vegetationspunkte vorhanden waren, somit keine relevante Vegetation
- 0 bedeutete, dass gleich viel Vegetationspunkte wie Bodenpunkte vorhanden waren
- 1 bedeutete, dass nur Vegetationspunkte, aber keine Bodenpunkte vorhanden waren, somit sehr dichte Vegetation

Das Verhalten des NDVD-Indexes in Bezug auf die Verteilung der Punkte am Boden und der Vegetation bei 10 Punkten zeigt die Tabelle 18.

Tabelle 18 NDVD der Vegetationsdichte

Punkte Boden	Punkte Vegetation	Punkte Total	NDVD
10	0	10	-1.0
9	1	10	-0.8
8	2	10	-0.6
7	3	10	-0.4
6	4	10	-0.2
5	5	10	0.0
4	6	10	0.2
3	7	10	0.4
2	8	10	0.6
1	9	10	0.8
0	10	10	1.0

Als Vegetation klassierte ALS-Punkte zwischen dem Boden und 3m darüber deuteten auf ein Hindernis für den Athleten hin. Es war jedoch nicht klar, ob dies ein Baumstamm, ein Ast, Laub, Bodenvegetation oder etwas Anderes war. Anhand der Häufigkeit dieser Hindernisse sollte auf die Stärke der Laufbehinderung geschlossen werden können. Jedoch war es auch möglich, dass das Kronendach zu dicht war und keine Laserimpulse in den bodennahen Bereich durchdrangen. Damit war keine Aussage über die bodennahe Vegetation möglich. Trier (2015) stellte fest, dass der norwegische Fichtenwald normalerweise die Laserimpulse bis auf dem Boden liess. Hingegen blockierten Laubbäume während der Vegetationszeit die Impulse schon in der Baumkrone. Die Testdaten dieser Master Thesis wurden gemäss den Spezifikationen im März/April 2014 geflogen.

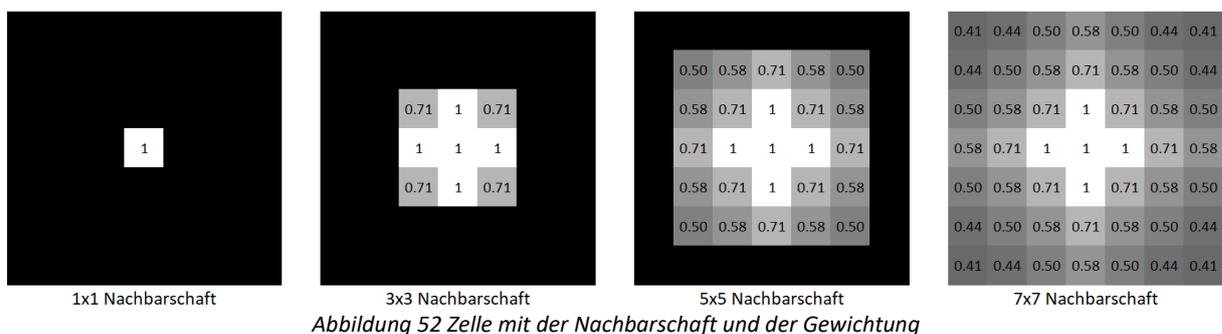
Für die Berechnung mit den Testdaten wurden nur die Boden- und Vegetationspunkte verwendet. Total waren dies 7.35 Mio. Punkte, aufgeteilt in die verschiedenen Klassen:

- Boden 1.65 Mio.
- Niedrige Vegetation 0.12 Mio.
- Mittlere Vegetation 0.41 Mio.
- Hohe Vegetation 5.17 Mio.

Gemäss den Spezifikationen des Kantons Zürich (Abbildung 6) hatte die Klasse «Hohe Vegetation» einen unteren Grenzwert von 3m. In dieser Master Thesis wurde ein oberer Grenzwert von 3m verwendet. Das heisst, dass von dieser Klasse mit den meisten Punkten wohl nur sehr wenige infolge des leicht unterschiedlichen Terrainmodells verwendet wurden. OCAD verwendete zum Berechnen der «Height Above Ground» das eigens berechnete DTM.

Gänzlich nicht verwendet wurden die 3.44 Mio. Überlappungspunkte. Die Analyse einer Stichprobe (Kapitel 4.4.2) zeigte, dass es nicht klar war, welche von diesen Punkten wirklich Bodenpunkte und welche Vegetationspunkte waren. Die korrekte Klassierung der Punkte war aber für diese Master Thesis notwendig.

Die Zellengrösse konnte in der neu entwickelten Funktion in OCAD selbst definiert werden. Standardmässig war eine Zellengrösse von 1x1m eingestellt. Für die Berechnung der NDVDs einer Zelle konnten auch weitere Punkte in der Nachbarschaft miteinbezogen werden, damit genügend Vegetationspunkte zur Analyse der Zelle vorlagen. Damit konnten auch Zellen ohne Punkte anhand der Umgebung klassiert werden. Die Entfernung zur Zelle gewichtete die Punkte der Umgebung. Für diese Master Arbeit wurden dazu 3 weitere unterschiedlich grosse Nachbarschaften programmiert (Abbildung 52). Somit standen 4 Nachbarschaften zur Verfügung: 1x1, 3x3, 5x5 und 7x7. Die Zentrumszelle wurde mit dem Faktor 1 gewichtet. Die Punkte der umliegenden Zellen wurden mit der in Abbildung 52 dargestellten Gewichtung in die Berechnung miteinbezogen.



Mit allen Stichproben im Testgebiet wurden die NDVDs der folgenden 7 Vegetationsklassen berechnet:

- NDVD Undergrowth Forest
- NDVD Undergrowth Slow
- NDVD Undergrowth Difficult
- NDVD Vegetation Forest
- NDVD Vegetation Slow
- NDVD Vegetation Difficult
- NDVD Vegetation Very Difficult

Daraus wurden die Grenzwerte zwischen den Vegetationsklassen berechnet (Abbildung 53). Diese waren für die Abgrenzung der Vegetationsklassen im Modell notwendig. Somit waren 2 *NDVD Undergrowths* und 3 *NDVD Vegetations* vorhanden. Die Ergebnisse der Berechnung sind im Kapitel 5.1 dargestellt. Der linke Teil der Abbildung 53 zeigt die Laufbehinderung durch Bodenbewuchs, der rechte durch die Vegetation gemäss der ISOM 2000. Die Grenzwerte

wurden gewichtet aus den arithmetischen Mitteln zwischen den Vegetationsklassen berechnet. Diese waren für die Klassierung im Modell notwendig.

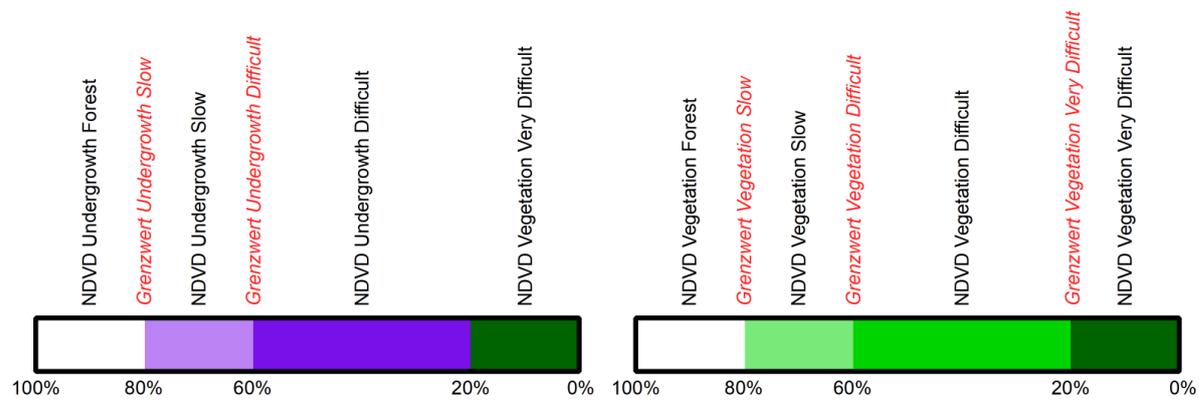


Abbildung 53 Bedeutung der Grenzwerte der Laufbehinderung

Der sehr schwer belaufbare Bodenbewuchs wurde ebenfalls als *Vegetation Very Difficult* klassiert. Somit existierten beim Bodenbewuchs nur zwei Laufbehinderungsklassen, bei der Vegetation jedoch 3. Die mittleren Laufbehinderungsklassen (60%-20%) besaßen einen doppelt so grossen Bereich wie die anderen Klassen.

4.4.4 Entwicklung der Funktion «Orienteering Base Map»

Anhand der berechneten Grenzwerte zwischen den einzelnen Vegetationsklassen konnte jede Rasterzelle im Modell klassiert werden. Da eine Rasterzelle in zwei verschiedene Vegetationsklassen (Bodenbewuchs und Vegetation) eingeteilt werden konnte, mussten Regeln (Kapitel 4.4.5) definiert werden. Die Regeln bestimmten, welcher Wert in welchem Fall höhere Priorität besass.

In OCAD wurde die neue Funktion *Orienteering Base Map* zur Erstellung der Grundkarte entwickelt. Der entsprechende Dialog ist in Abbildung 54 dargestellt. Bei den Einstellungen (*English Settings*) mussten die Grenzwerte der Vegetationsklassen übertragen werden. Die Funktion «Draw» berechnete für jede Rasterzelle im Modell die entsprechenden NDVDs und klassierte diese. Das Resultat wurde als Rasterbild dargestellt.

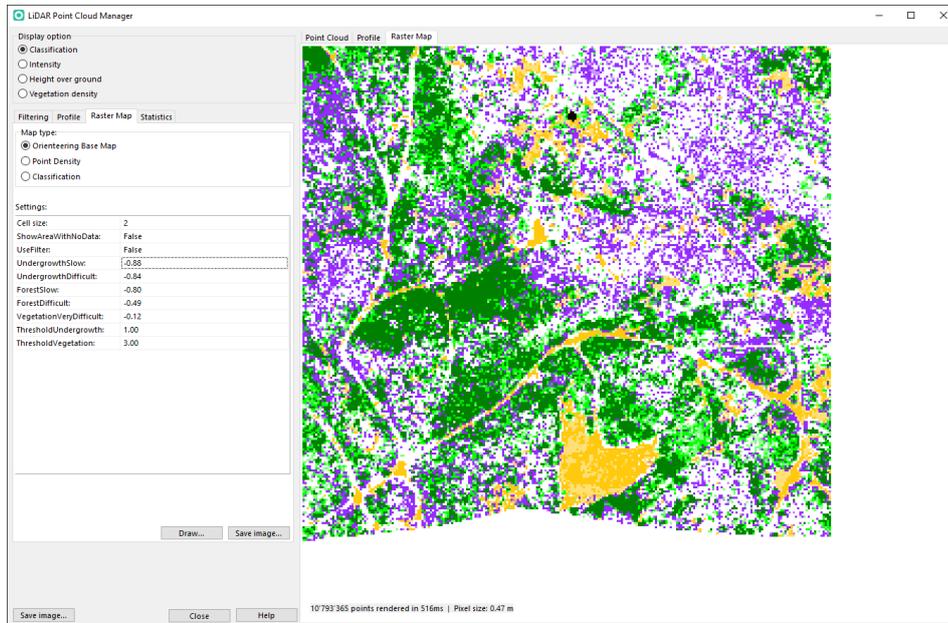


Abbildung 54 Funktion *Orientering Base Map* zum Erstellen einer Grundkarte

Mit der Funktion «Save image» konnte das Rasterbild als georeferenzierte png-Datei exportiert und in OCAD als Hintergrundkarte zur OL-Karte geladen werden.

Die Abbildung 55 zeigt einen ersten Vergleich des Testgebiets zwischen der bestehenden OL-Karte und der berechneten *Orientering Base Map*. Diese ist ergänzt mit dem Wegenetz. Übereinstimmungen der grünen Vegetationsklassen zwischen Modell und der bestehenden OL-Karte waren erkennbar. Der violett dargestellte Bodenbewuchs war jedoch stark zerstückelt. Morphologische Filter lösten dieses Problem (Kapitel 4.4.6).

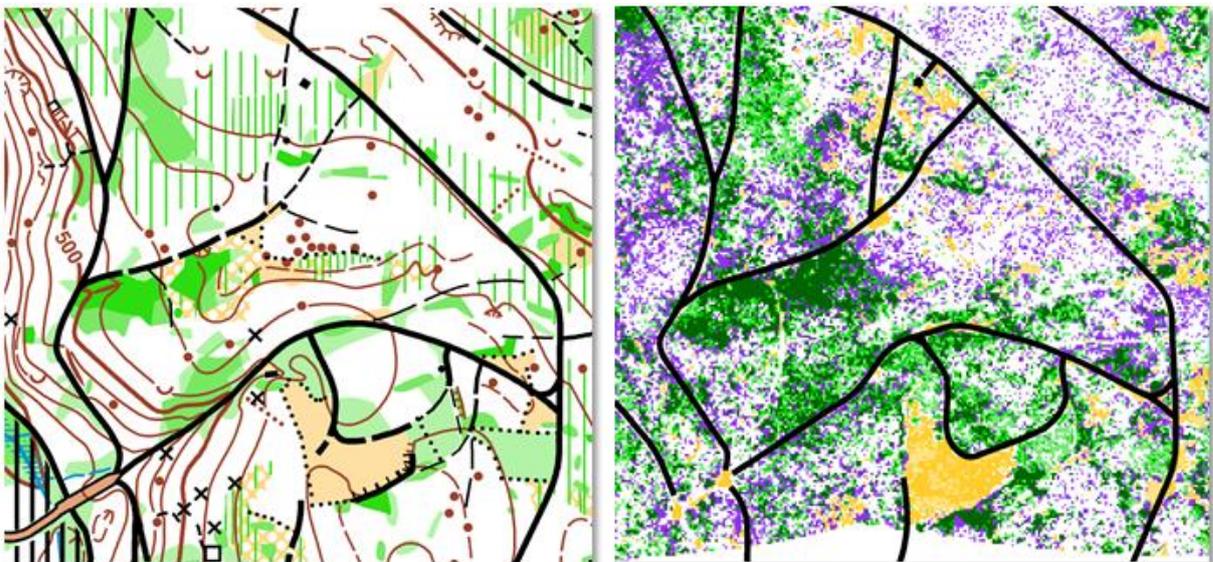


Abbildung 55 Link: Bestehenden OL-Karte. Rechts: Berechnete *Orientering Base Map* überlagert mit dem Wegenetz.

4.4.5 Regeln für die Klassierung einer Zelle

Eine Zelle war im «LiDAR Point Cloud Manager» standardmässig 1x1m gross. Dieser Wert konnte geändert werden. In einer Zelle kommen im Waldgebiet meistens Punkte verschiedener Klasse vor. Die definierten Regeln lösten diese Mehrdeutigkeit und bestimmten

die Klassierung einer Zelle. Die eindeutige Klassierung war notwendig bei der Erstellung der *Orienteering Base Map*. Die Regeln zur Klassierung ist in Form eines Flussdiagramms in der Abbildung 56 dargestellt.

Jede Zelle durchlief die Klassierung. Im ersten Test überprüfte die Funktion, ob Punkte innerhalb dieser Zelle vorhanden waren. Optional konnten Zellen ohne Punkte rot dargestellt werden, ansonsten weiss. Diese Information ist insbesondere für den Kartographen wichtig. Wenn mehrere zusammenhängende Zellen ohne Punkte vorhanden sind, können zu diesen Gebieten keine Aussagen über die Vegetation getroffen werden. Handelte sich es aber um einzelne, nicht zusammenhängende Zellen, wurden diese durch Filter (Kapitel 4.4.6) anhand der Klasse der umliegenden Zellen klassiert. Im zweiten Schritt wurden Gebäudezellen klassiert. Gebäude hatten gegenüber der Vegetation höhere Priorität. Dies verhinderte, dass Gebäude im Wald nicht dementsprechend klassiert wurden, wenn Äste hoher Bäume übers Gebäudedach ragten.

Im nächsten Schritt fand die Entscheidung zwischen offenem Gebiet und Vegetation statt. Die Zelle wurde als offen klassiert, wenn keine Vegetationspunkte vorhanden waren oder mindestens 20x weniger als Bodenpunkte. Die zweite Bedingung verhinderte, dass eine Zelle mit wenigen Vegetationspunkten, jedoch sehr vielen Bodenpunkten nicht als offenes Gebiet klassiert wurde. Bei den weiteren Entscheidungen wurde die Vegetation höher priorisiert als der Bodenbewuchs. War der *NDVD Undergrowth* gleich gross wie der *NDVD Vegetation*, bedeutete dies, dass keine Punkte zwischen 1.0m und 3.0m in der Zelle existierten. Dementsprechend wurde diese Zelle als Bodenbewuchs oder Wald klassiert.

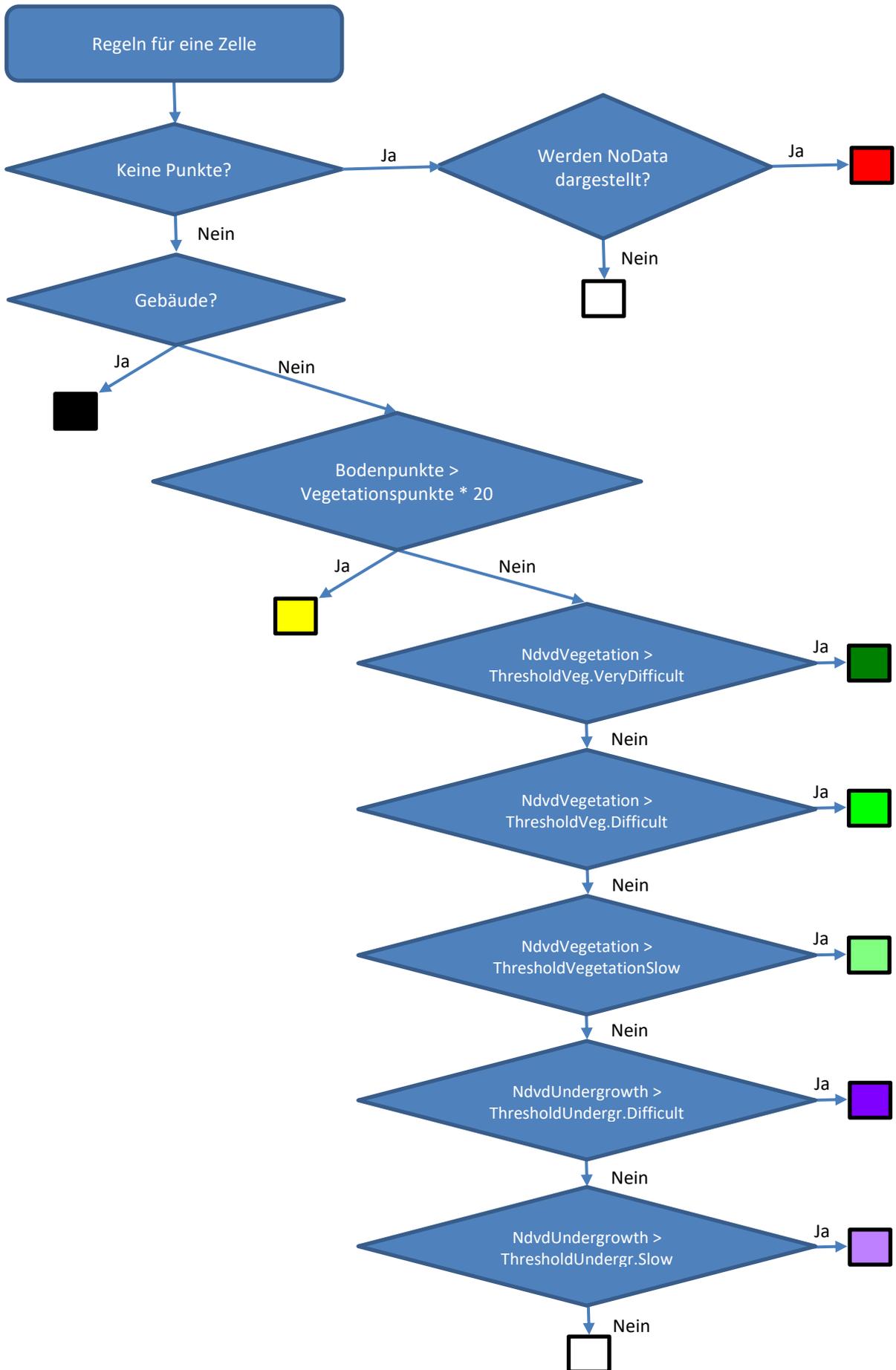


Abbildung 56 Regeln für die Klassierung einer Zelle

4.4.6 Morphologische Filter

Auf das klassierte Modell können morphologische Filter angewendet werden. Diese Filter generalisieren das Modell basierend auf einem Raster. Öffnende Filter entfernen einzelne klassierte Zellen. Schliessende Filter ersetzen einzelne Zellen mit der Klasse der umliegenden Zellen.

Die in OCAD entwickelte Filteroption enthielt mehrere öffnende und schliessende Filter für die einzelnen Klassen. Klassierte Gebäudezellen wurden grundsätzlich nicht gefiltert, damit diese Information nicht von der Grundkarte für den OL-Kartographen verschwand. Selbst kleinste offene Gebiete sind für den Kartographen eine sehr wichtige Information zur Bestimmung seiner Position im Wald. Darum wurden offene Gebiete nur mit einem schliessenden Filter generalisiert. Anschliessend wurden die Zellen mit dem Bodenbewuchs und der Vegetation mit mehreren öffnenden und schliessenden Filtern neu berechnet.

5 Ergebnisse

5.1 Berechnung NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation

Die 166 Stichproben im Testgebiet wurden mit den 4 unterschiedlich grossen Nachbarschaften (1x1, 3x3, 5x5 und 7x7) bei einer Zellengrösse von 1x1m berechnet. Tabelle 19 bis Tabelle 22 zeigen die entsprechenden Resultate. Der *NDVD Undergrowth* und *NDVD Vegetation* ist das arithmetische Mittel der einzelnen Stichproben. Die Grenzwerte teilen den Wertebereich in die verschiedenen Vegetationsklassen (Abbildung 53). Zu beachten ist, dass der Wertebereich der einzelnen Klassen unterschiedlich gross ist.

Tabelle 19 NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.0m bis 3.0m, 1x1 Nachbarschaft

1x1 Nachbarschaft Vegetationsklassen	NDVD Undergrowth	NDVD Vegetation	Anzahl Stichproben	Grenzwert
Forest	-0.89	-0.81	31	-
Undergrowth Slow	-0.93	-	42	-0.91
Undergrowth Difficult	-0.69	-	10	-0.85
Vegetation Slow	-	-0.71	15	-0.76
Vegetation Difficult	-	-0.29	57	-0.57
Vegetation Very Difficult	-	0.10	11	-0.03

Tabelle 20 NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.0m bis 3.0m, 3x3 Nachbarschaft

3x3 Nachbarschaft Vegetationsklassen	NDVD Undergrowth	NDVD Vegetation	Anzahl Stichproben	Grenzwert
Forest	-0.88	-0.78	31	-
Undergrowth Slow	-0.85	-	42	-0.87
Undergrowth Difficult	-0.77	-	10	-0.82
Vegetation Slow	-	-0.59	15	-0.69
Vegetation Difficult	-	-0.16	57	-0.45
Vegetation Very Difficult	-	0.15	11	0.05

Tabelle 21 NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.0m bis 3.0m, 5x5 Nachbarschaft

5x5 Nachbarschaft Vegetationsklassen	NDVD Undergrowth	NDVD Vegetation	Anzahl Stichproben	Grenzwert
Forest	-0.91	-0.80	31	-
Undergrowth Slow	-0.84	-	42	-0.88
Undergrowth Difficult	-0.79	-	10	-0.82
Vegetation Slow	-	-0.49	15	-0.65
Vegetation Difficult	-	-0.14	57	-0.37
Vegetation Very Difficult	-	0.19	11	0.08

Tabelle 22 NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.0m bis 3.0m, 7x7 Nachbarschaft

7x7 Nachbarschaft Vegetationsklassen	NDVD Undergrowth	NDVD Vegetation	Anzahl Stichproben	Grenzwert
Forest	-0.92	-0.79	31	-
Undergrowth Slow	-0.84	-	42	-0.88
Undergrowth Difficult	-0.80	-	10	-0.83
Vegetation Slow	-	-0.45	15	-0.62
Vegetation Difficult	-	-0.14	57	-0.35
Vegetation Very Difficult	-	0.13	11	0.04

Die Tabelle 23 stellt die berechneten Grenzwerte für den *NDVD Undergrowth* und *NDVD Vegetation* in Bezug auf die verschiedenen grossen Nachbarschaften in einer Übersicht dar.

Tabelle 23 Grenzwerte für NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.0m bis 3.0m

Vegetationsklassen	Grenzwert Nachbarschaft 1x1	Grenzwert Nachbarschaft 3x3	Grenzwert Nachbarschaft 5x5	Grenzwert Nachbarschaft 7x7
NDVD Undergrowth Slow	-0.91	-0.87	-0.88	-0.88
NDVD Undergrowth Difficult	-0.85	-0.82	-0.82	-0.83
NDVD Vegetation Slow	-0.76	-0.69	-0.65	-0.62
NDVD Vegetation Difficult	-0.57	-0.45	-0.37	-0.35
NDVD Vegetation Very Difficult	-0.03	0.05	0.08	-0.04

Trier (2015) verwendete neben der Kernzelle weitere Zellen im Radius von 2m. Dieser Ansatz entsprach der 5x5m grossen Nachbarschaft dieser Master Thesis. Der Höhenbereich betrug 0.2m bis 2.0m. Durch das Erhöhen des unteren Grenzwertes auf 0.2m vermied Trier (2015) Artefakte infolge der Überlappungsbereiche zwischen den einzelnen Flugstreifen. Die dabei verwendeten Punkte waren nicht als Bodenpunkte oder Vegetationspunkte klassiert. Mit denselben Grenzwerten für die Höhe wurde das Testgebiet neu berechnet. Für die Vegetation betrug der Höhenbereich 0.2 bis 2.0m und für den Bodenbewuchs 0.2 bis 1.0m. Die Werte der neuen Berechnung sind in den Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24 NDVD Undergrowth und NDVD Vegetation für den Bereich von 0.2m bis 2.0m, 5x5 Nachbarschaft

5x5 Nachbarschaft Vegetationssignatur	NDVD Undergrowth	NDVD Vegetation	Anzahl Stichproben	Grenzwert
Forest	-0.97	-0.91	31	-
Undergrowth Slow	-0.93	-	42	-0.95
Undergrowth Difficult	-0.91	-	10	-0.92
Vegetation Slow	-	-0.70	15	-0.81
Vegetation Difficult	-	-0.39	57	-0.60
Vegetation Very Difficult	-	-0.10	11	-0.20

Die berechneten Grenzwerte des Testgebiets liessen sich nun mit den Resultaten von Trier

(2015) in der Tabelle 25 gegenüberstellen. Trier (2015) berechnete jedoch den Bodenbewuchs nicht.

Tabelle 25 Vergleich NDVDs von Trier (2015) mit denen des Testgebiets

Vegetationssignatur	Trier (2015) 0.2-2.0m	Testgebiet 0.2-2.0m
Threshold Forest to Vegetation Slow	0.00	-0.81
Threshold Vegetation Slow to Vegetation Difficult	0.35	-0.60
Threshold Vegetation Difficult to Vegetation Very Difficult	0.70	-0.20

Die drei Grenzwerte für die Vegetation des Testgebietes wichen sehr stark von den berechneten Werte von Trier (2015) ab. Diese Werte basierten jedoch auf einer Dichte von 10 Punkte/m² und wurden für norwegische Wälder bestimmt. Die Dichte der Punkte des Testgebiete betrug 30 Punkte/m². Die tieferen NDVDs für das Testgebiet bedeuten, dass selbst bei dichtem Wald deutlich mehr Punkte an den Boden gelangten und das reflektierte Signal vom Sensor wieder empfangen wurde.

5.2 Verifikation des Vegetationsmodells

Zur Verifikation des Vegetationsmodells wurde ein Teil des Testgebiet am 9. April 2017 gemäss den ISOM 2000-Spezifikationen im Gelände neu aufgenommen und am Computer anschliessend gezeichnet (Abbildung 57). Als Kartierungsgrundlage diente die erstellte *Orienteering Base Map*, ergänzt mit dem Wegenetz und den Höhenkurven. Der Zeitaufwand für die Geländeaufnahmen betrug 4.2 Stunden. Der Perimeter mass 0.14km². Dies ergab einen Zeitaufwand von 30 h/km².

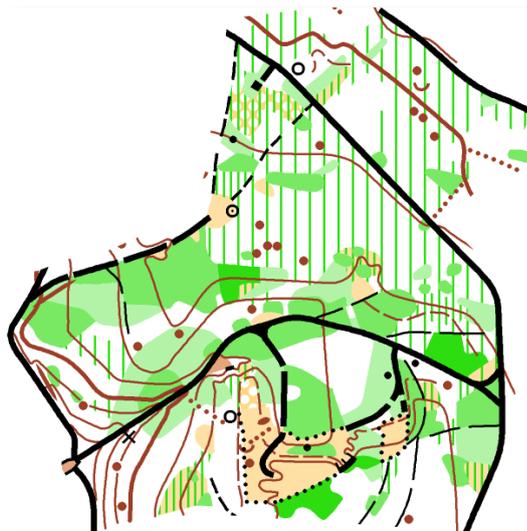


Abbildung 57 Kartierung des Testgebiets im April 2017

Der Vergleich zwischen Modell und OL-Karte basierte auf einer Rasteranalyse. Dementsprechend musste die OL-Karte so umkartiert werden, damit die Signaturen denen der *Orienteering Base Map* entsprachen (Abbildung 58). Die Rasteranalyse ignorierte

schwarze Bereiche. Aus diesem Grund wurde das ganze Wegenetz auch mit ausgezogenen, schwarzen Linien dargestellt. Denn das ganze Wegenetz war in den ALS-Daten nicht speziell klassiert und konnte somit von anderen Bodenpunkten nicht unterschieden werden. Dies hätte zu falschen Resultaten geführt.



Abbildung 58 Kartierung des Testgebiets mit Signaturen der Orientierung Base Map

Die Ergebnisse der Rasteranalyse für die 4 verschiedenen grossen Nachbarschaften sind in Tabelle 26 bis Tabelle 29 dargestellt. Die Zellengrösse betrug 1m. In den Spalten dieser Tabellen werden die Anzahl Zellen der gezeichneten Karte aufgeteilt nach Klasse dargestellt. Die Zeilen zeigen die Anzahl Zellen im berechneten Modell. Bei der 1x1- Nachbarschaft gab es die grösste Übereinstimmung auf der Karte beim Wald (*Forest*). 73.7% des kartierten Waldes wurde auch im Modell als Wald bestimmt. Beim Modell war die beste Übereinstimmung beim *Undergrowth Slow*. 59.9% des im Modell bestimmten *Undergrowth Slow* wurden auch auf der Karte dementsprechend dargestellt. Jedoch wurden nur 2.2% dieser Vegetationsklasse im Modell detektiert. Die Werte in der Diagonale stellen die korrekt klassierten Zellen dar.

Tabelle 26 Vergleich der automatischen Klassierung und der Kartierung im Gelände, 1x1 Nachbarschaft

		Kartierung im Gelände								
Automatische Klassierung	1x1 Nachbarschaft	Forest	Under growth Slow	Under growth Difficult	Vegetati on Slow	Vegetati on Difficult	Vegetati on Very Difficult	Open	Total	Correct Map %
	Forest	26234	156	2087	983	2729	2010	1406	35605	73.7
	Undergrowth Slow	24566	805	5839	689	1781	1262	2325	37267	2.2
	Undergrowth Difficult	2748	144	1042	210	501	292	2032	6969	15.0
	Vegetation Slow	6738	76	999	853	3489	3456	631	16242	5.3
	Vegetation Difficult	4675	106	1678	705	3421	8187	1243	20015	17.1
	Vegetation Very Difficult	534	17	780	101	328	1535	197	3492	44.0
	Open	1287	41	431	136	441	226	4326	6888	62.8
	Total	66782	1345	12856	3677	12690	16968	12160		
	Correct Model %	39.3	59.9	8.1	23.2	27.0	9.0	35.6		

Tabelle 27 Vergleich der automatischen Klassierung und der Kartierung im Gelände, 3x3 Nachbarschaft

		Kartierung im Gelände								
Automatische Klassierung	3x3 Nachbarschaft	Forest	Under growth Slow	Under growth Difficult	Vegetati on Slow	Vegetati on Difficult	Vegetati on Very Difficult	Open	Total	Correct Map %
	Forest	20416	1236	2252	4468	5124	708	1401	35605	57.3
	Undergrowth Slow	18703	2999	5597	4099	3117	423	2329	37267	8.0
	Undergrowth Difficult	2309	247	742	762	768	101	2040	6969	10.6
	Vegetation Slow	3074	181	571	3051	6776	1983	606	16242	18.8
	Vegetation Difficult	1698	147	564	1814	8295	6306	1191	20015	41.4
	Vegetation Very Difficult	174	29	288	225	889	1708	179	3492	48.9
	Open	1141	95	242	544	431	96	4339	6888	63.0
	Total	47515	4934	10256	14963	25400	11325	12085		
	Correct Model %	43.0	60.8	7.2	20.4	32.7	15.1	35.9		

Tabelle 28 Vergleich der automatischen Klassierung und der Kartierung im Gelände, 5x5 Nachbarschaft

		Kartierung im Gelände								
Automatische Klassierung	5x5 Nachbarschaft	Forest	Under growth Slow	Under growth Difficult	Vegetati on Slow	Vegetati on Difficult	Vegetati on Very Difficult	Open	Total	Correct Map %
	Forest	19511	2138	1582	7387	3324	278	1385	35605	54.8
	Undergrowth Slow	16144	6322	5335	5617	1365	208	2276	37267	17.0
	Undergrowth Difficult	2079	480	715	1198	453	17	2027	6969	10.3
	Vegetation Slow	1998	300	378	5239	6392	1361	574	16242	32.3
	Vegetation Difficult	922	231	443	3169	8706	5398	1146	20015	43.5
	Vegetation Very Difficult	63	37	172	398	1170	1486	166	3492	42.6
	Open	1157	152	189	789	219	58	4324	6888	62.8
	Total	41874	9660	8814	23797	21629	8806	11898		
	Correct Model %	46.6	65.4	8.1	22	40.3	16.9	36.3		

Tabelle 29 Vergleich der automatischen Klassierung und der Kartierung im Gelände, 7x7 Nachbarschaft

		Kartierung im Gelände								
Automatische Klassierung	7x7 Nachbarschaft	Forest	Under growth Slow	Under growth Difficult	Vegetation Slow	Vegetation Difficult	Vegetation Very Difficult	Open	Total	Correct Map %
	Forest	19603	2173	1571	8484	2187	213	1374	35605	55.1
	Undergrowth Slow	15466	7060	5983	5465	905	148	2240	37267	18.9
	Undergrowth Difficult	1974	600	831	1252	289	12	2011	6969	11.9
	Vegetation Slow	1640	263	328	6345	5838	1269	559	16242	39.1
	Vegetation Difficult	683	220	399	3960	7618	5993	1142	20015	38.1
	Vegetation Very Difficult	26	20	104	490	1035	1659	158	3492	47.5
	Open	1269	155	146	719	181	90	4328	6888	62.8
	Total	40661	10491	9362	26715	18053	9384	11812		
	Correct Model %	48.2	67.3	8.9	23.8	42.2	17.7	36.6		

Die Tabelle 30 zeigt die Übersicht der korrekt klassierten Zellen zwischen der Karte und dem Modell in Abhängigkeit der Nachbarschaft für die Vegetationsklassen. Zur besseren Beurteilung sind die berechneten Werte auch als Diagramm in der Abbildung 59 dargestellt. Die Übereinstimmung der Werte für den Bodenbewuchs (2.2%-18.9%) ist deutlich tiefer als diejenigen der Vegetation (5.3%-48.9%). Je dichter die Vegetation, desto besser die Übereinstimmung. Die Übereinstimmung ist jedoch beim Wald (54.8%-73.7%) und beim offenen Gebiet (62.8%-63.0%) am besten.

Tabelle 30 Übersicht der Ergebnisse des Vergleichs zwischen Karte und Modell

	1x1 Nachbarschaft	3x3 Nachbarschaft	5x5 Nachbarschaft	7x7 Nachbarschaft
Forest	73.7%	57.3%	54.8%	55.1%
Undergrowth Slow	2.2%	8.0%	17.0%	18.9%
Undergrowth Difficult	15.0%	10.6%	10.3%	11.9%
Vegetation Slow	5.3%	18.8%	32.3%	39.1%
Vegetation Difficult	17.1%	41.4%	43.5%	38.1%
Vegetation Very Difficult	44.0%	48.9%	42.6%	47.5%
Open	62.8%	63.0%	62.8%	62.8%
Undergrowth Total Map	17.7%	21.7%	29.1%	32.7%
Vegetation Total Map	55.5%	78.1%	83.8%	86.1%
Undergrowth Total Model	55.1%	63.1%	69.6%	72.9%
Vegetation Total Model	66.2%	60.1%	61.4%	63.2%

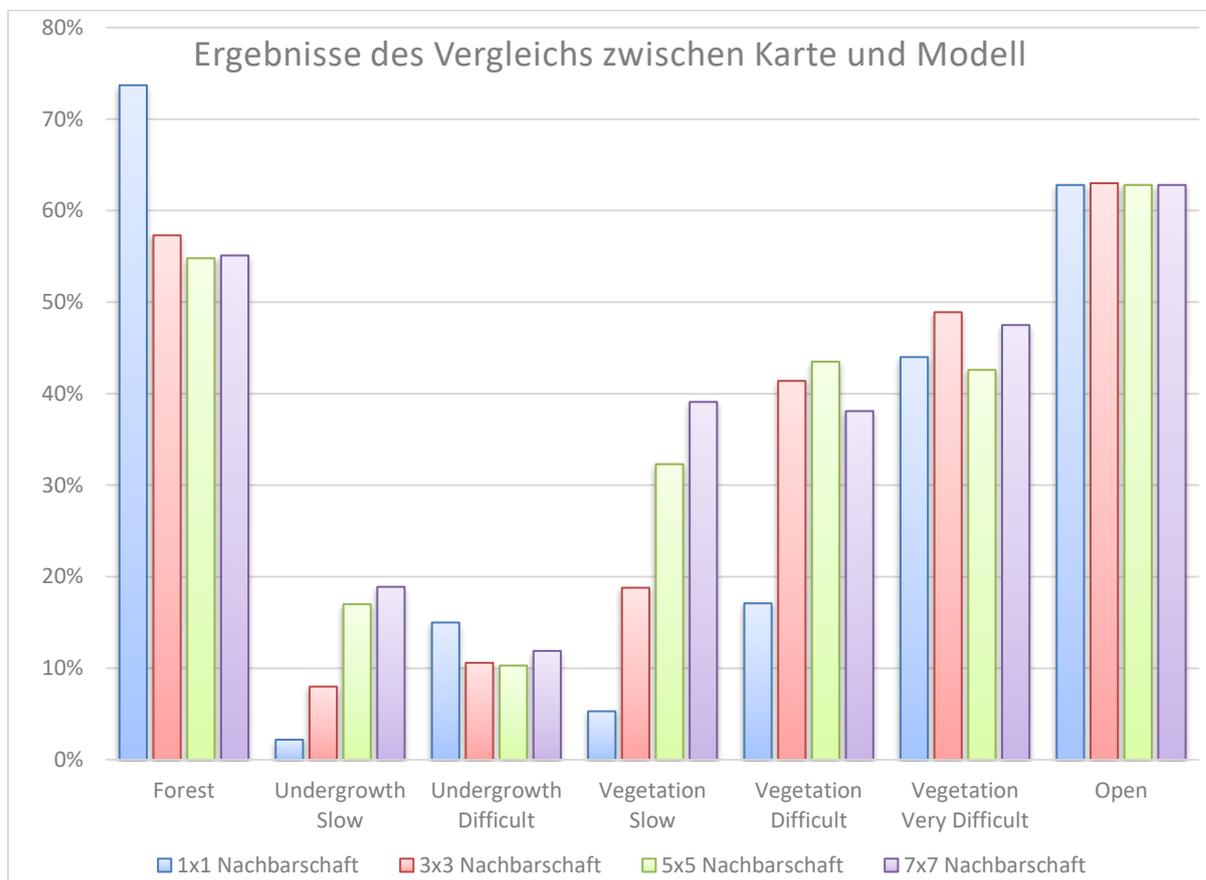


Abbildung 59 Ergebnisse des Vergleichs zwischen Karte und Modell

Die Übereinstimmung für die einzelnen Klassen des Bodenbewuchses und der Vegetation betrug in keinem Fall mehr als 50%. Für die bessere Beurteilung der verschiedenen grossen Nachbarschaften wurden die einzelnen Vegetationsklassen zu einer Klasse Bodenbewuchses (*Undergrowth Total*) und einer Klasse Vegetation (*Vegetation Total*) zusammengefasst. Damit erhöhte sich die Übereinstimmung signifikant. Die besten Übereinstimmungen ergab die 7x7-Nachbarschaft. 32.7% des kartierten Bodenbewuchses wurde auch im Modell dementsprechend berechnet. Bei der Vegetation lag dieser Wert bei 86.1%. Trier (2015) berechnete eine Übereinstimmung bei der Vegetation für 4 Gebiete bei Oslo von 25% bis 60%.

Auch ein visueller Vergleich zwischen Karte und Modell (Abbildung 60) zeigt, dass sämtliche kartierte Vegetation auch als solche im Modell erkannt wurde. Nur die Grösse, Form und Klassierung innerhalb der Vegetationsklassen war unterschiedlich. 72.9% des im Modell detektierten Bodenbewuchses wurde auch als solcher kartiert. Dies ist eine hohe Übereinstimmung. Jedoch muss dies relativiert werden, da nur ein Drittel (32.7%) des kartierten Bodenbewuchses auch dementsprechend im Modell klassiert wurde.

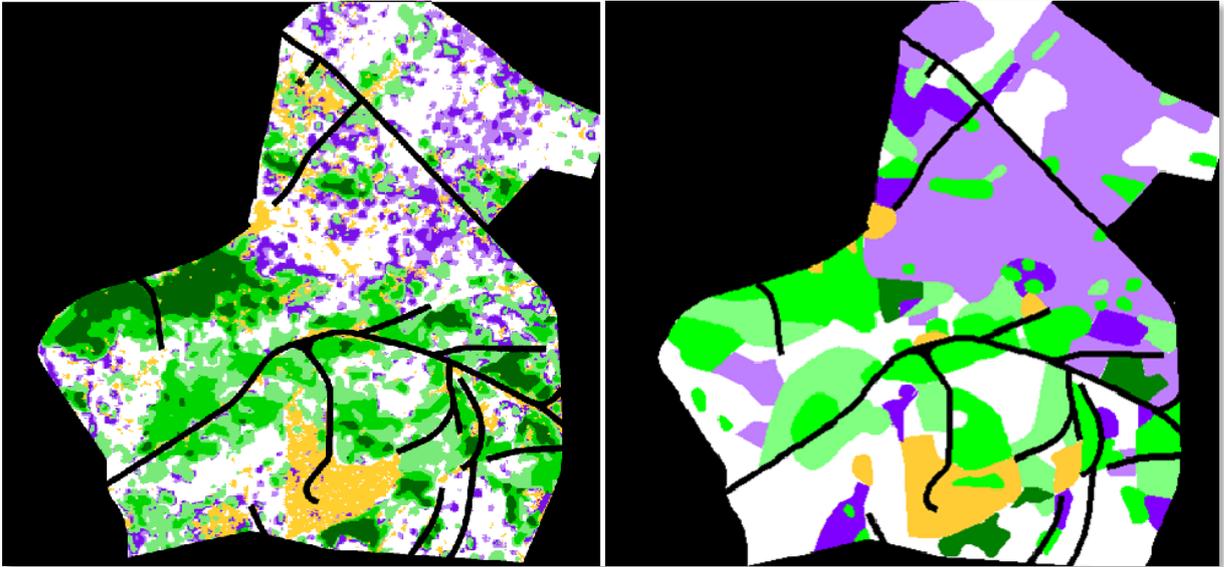


Abbildung 60 Gegenüberstellung von Modell (7x7- Nachbarschaft), links und Karte rechts

Die unterschiedlich grossen Nachbarschaften beeinflusste die *Orienteering Base Map* stark. Die Abbildung 61 zeigt einen 100x72m grossen Ausschnitt des Testgebiets mit den 4 verschiedenen grossen Nachbarschaften (1x1, 3x3, 5x5 und 7x7) bei einer Zellengrösse von 1m. Durch die Vergrösserung der Nachbarschaft wurden Punkte der Umgebung in die Berechnung der Zelle miteinbezogen. Dadurch wurde die Karte generalisierter.

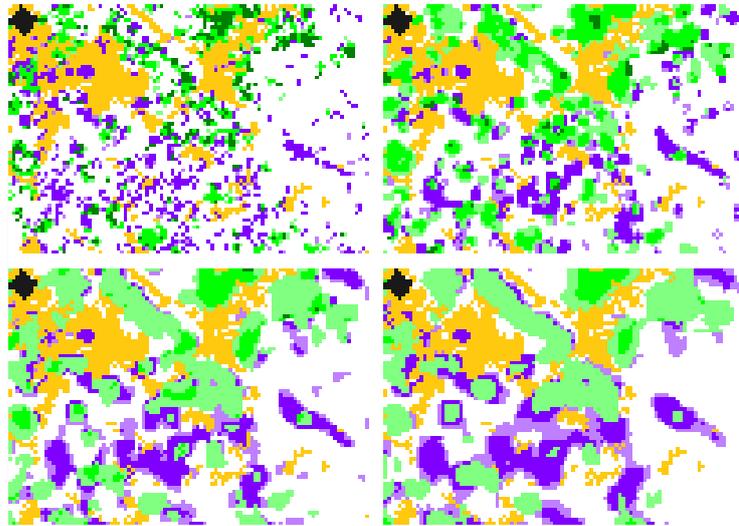


Abbildung 61 Orienteeing Base Map mit unterschiedlich grosser Nachbarschaft.
1x1 oben links, 3x3 oben rechts, 5x5 unten links, 7x7 unten rechts.

Die Abbildung 62 zeigt die Grenzwerte für den Bodenbewuchs (links) und die Vegetation (rechts) bei der 7x7 Nachbarschaft, verteilt auf den gesamten Wertebereich von -1 bis +1. Die beiden Grenzwerte des Bodenbewuchses von -0.83 und -0.88 zusammen mit den Wertebereichsgrenzen ergaben eine uneinheitliche Verteilung. 91.5% des Wertebereiches wurde von der Klasse *Undergrowth Difficult* abgedeckt, 8.5% von den anderen zwei Klassen. Dagegen waren die 4 Klassen der Vegetation über den ganzen Wertebereich gut verteilt.

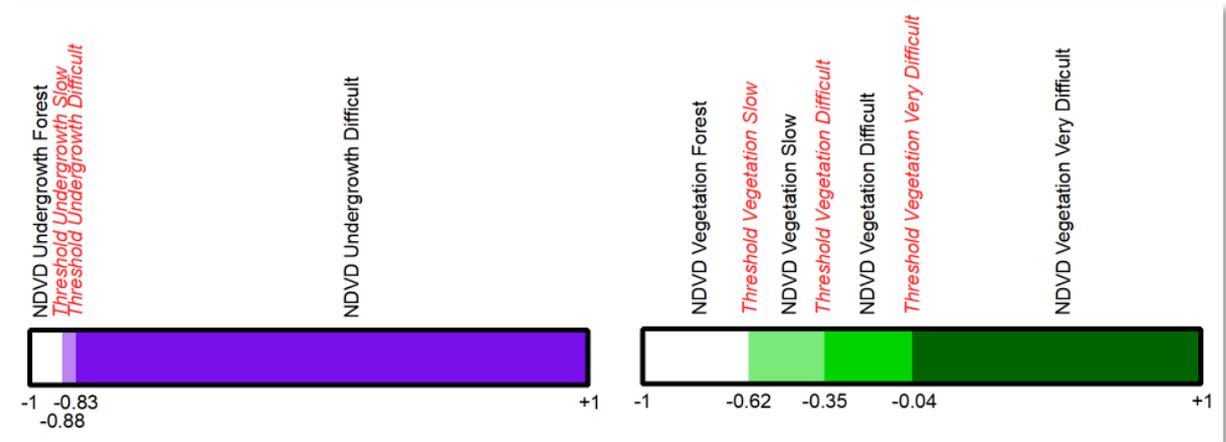


Abbildung 62 Aufteilung der NDNDs auf den ganzen Wertebereich für die 7x7 Nachbarschaft

5.3 Analyse NDVD Undergrowth

Die Berechnung detektierte nur 32.7% des kartierten Bodenbewuchses im Modell (7x7 Nachbarschaft). Eine genauere Analyse dieses Resultats war angebracht. Dazu wurden die Ausschnitte A, B und C des Testgebietes betrachtet (Abbildung 63).

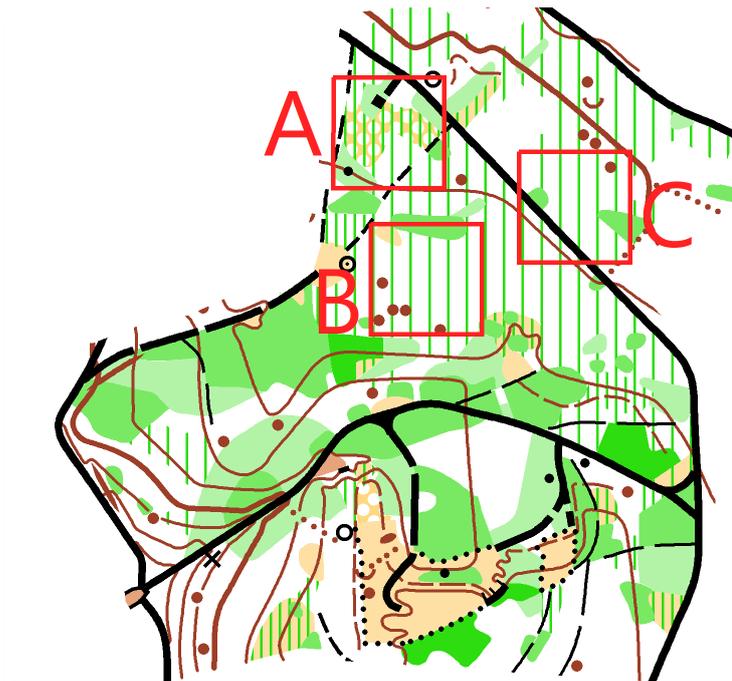


Abbildung 63 Standorte der untersuchten Gebiete A, B und C im Testgebiet

Diese Gebiete enthielten viel kartierten Bodenbewuchs. Der linke Teil in Abbildung 64, Abbildung 65 und Abbildung 67 stellt das kartierte Gebiet dar, der rechte das entsprechende Modell.

Ein visueller Vergleich beim Ausschnitt A zeigte klar, dass das Modell im Bereich des kartierten starken Bodenbewuchses grössere gelbe Flächen enthält. Dies ist offenes Gebiet. Die Testdaten waren schon 3 Jahre alt. Es war somit realistisch, dass der starke Bodenbewuchs

erst nach der Erfassung der ALS-Daten entstanden war. Wie die Situation zur Aufnahmezeit war, konnte nicht eindeutig nachvollzogen werden.

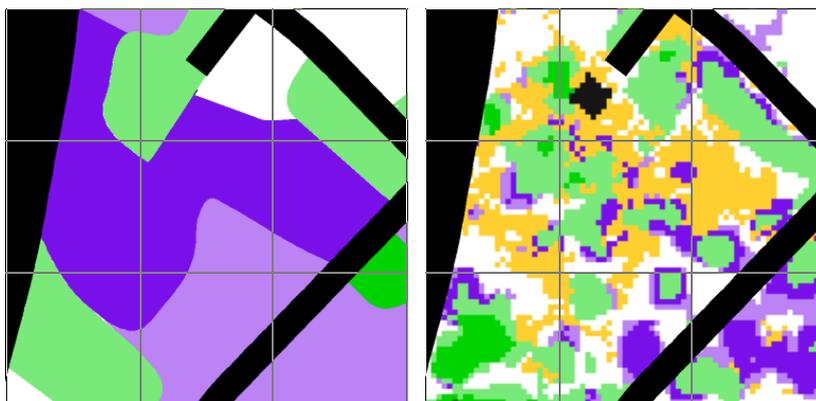


Abbildung 64 Analyse des Bodenbewuchses zwischen Karte und Modell. Ausschnitt A, Gitterabstand 25m.

Ausschnitt B zeigt neben starkem Bodenbewuchs im Modell auch grössere Gebiete ohne Laufbehinderung (Wald).

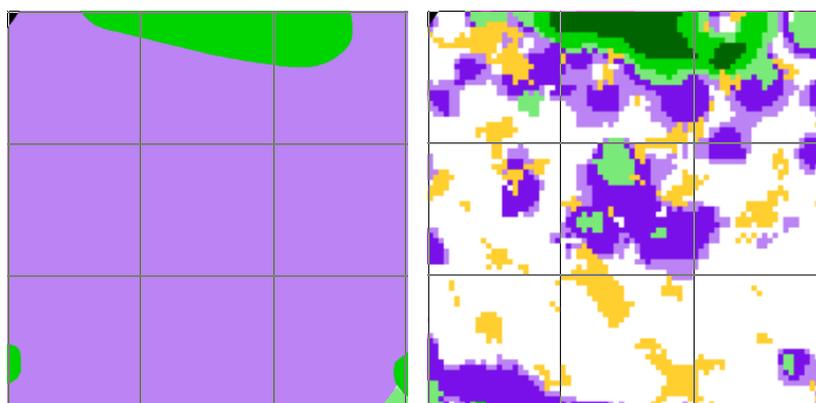


Abbildung 65 Analyse des Bodenbewuchses zwischen Karte und Modell. Ausschnitt B, Gitterabstand 25m.

Eine visuelle Kontrolle mit der entwickelten OCAD-Komponente «Vertical Distribution» (Kapitel 4.4.1) zeigte, dass in diesem Modell als Wald kartiertes Gebiet Bodenpunkte vorhanden waren, jedoch keine oder nur wenige relevante Vegetationspunkte zwischen 0-3m über dem Boden. In der Abbildung 66 ist die 2x2m-Zelle bei der Koordinate 680'300 / 229'305 abgebildet. Dies ist ein Punkt im östlichen Bereich dieses Ausschnittes B. Die Zelle enthielt 25 Vegetationspunkte auf einer Höhe von 20-26m und 11 Bodenpunkte, jedoch keine Punkte für die Laufbehinderung. Die hohe Zahl von Bodenpunkten zeigte aber auch, dass das Kronendach der Bäume für den Laserscanner nicht zu dicht war und somit genügend Bodenpunkte in dieser Zelle vorhanden waren. Waren keine bodennahen Punkte vorhanden, konnte das Modell dementsprechend auch keine Laufbehinderung detektieren.

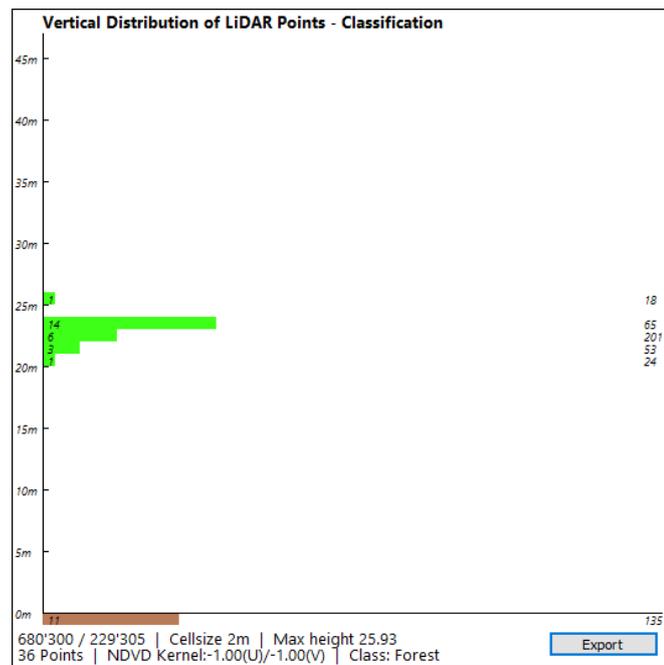


Abbildung 66 Vertikale Verteilung der ALS-Punkte im Ausschnitt B

Ausschnitt C zeigt ein weiteres Gebiet mit kartiertem Bodenbewuchs. Mehrere Gebiete davon sind im Modell als Wald definiert. Im südöstlichen Teil hat es aber auch einen als leichte Vegetation dargestellten Bereich.

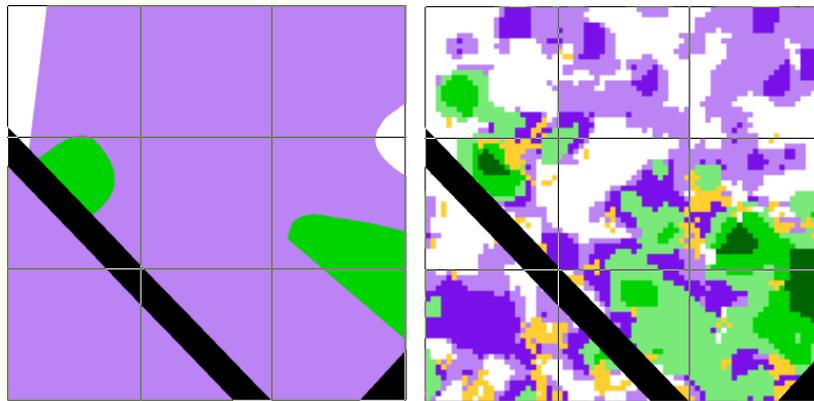


Abbildung 67 Analyse des Bodenbewuchses zwischen Karte und Modell. Ausschnitt C, Gitterabstand 25m

Die Analyse zeigte, dass verschiedene Faktoren zu der tiefen Übereinstimmung von 32.7% führten. Zum einen können die Daten veraltet gewesen sein und die bodennahe Vegetation in offenen Gebieten unterdessen deutlich dichter. Zudem fehlten in einigen Gebieten bodennahe Punkte. Wenn keine Punkte vorhanden waren, konnte die entwickelte Methode für das Modell auch keine Laufbehinderung detektieren.

6 Diskussion

6.1 Fazit

Ziel dieser Master Thesis war es, aus den ALS-Daten halbautomatisch die bodennahe Vegetation zu berechnen. Mittels Geländebegehung wurden im Testgebiet 166 Stichproben erhoben. Für jede Stichprobe wurden aus dem Modell die Vegetationsdichten für den Bodenbewuchs und die Vegetation im bodennahe Bereich berechnet. Daraus ergaben sich die Grenzwerte zwischen den Vegetationsklassen. Somit konnte das Modell mit der *Orienteering Base Map* erstellt werden. Diese enthält die bodennahe Vegetation. Die neue Karte kann dem OL-Kartographen als neue, wertvolle Grundlage für seine Arbeit im Gelände dienen.

Die berechneten Grenzwerte weichen stark von den Berechnungen für die Wälder bei Oslo (Trier, 2015) ab. Dies zeigt, dass diese Grenzwerte abhängig von der Art des Waldes, vom Zeitpunkt der Befliegung und der ALS-Punktdichte sind. Somit müssen für andere Gebiete zuerst Stichproben erfasst und die Parameter bestimmt werden, um das Modell berechnen zu können.

Die beiden berechneten *NDVD Undergrowths* entsprechen nicht den Erwartungen. Bei einem Wertebereich von -1 bis zu +1 liegen diese maximal 0.06 auseinander. Dies entspricht nur 3% des Wertebereiches. Dementsprechend ist die Unterscheidung der beiden Bodenbewuchsklassen kaum möglich. Wenn keine bodennahen Punkte in der ALS-Punktwolke vorhanden sind, kann für das Modell auch keine Laufbehinderung detektiert werden. Diese Daten wurden im März oder April geflogen. Zu dieser Zeit sind die im Testgebiet vorhandenen Brombeerbelder am niedrigsten. Es ist unklar, ob diese Brombeeren als Boden klassiert oder gar nicht erfasst wurden. Ich hatte jedoch eine bessere Detektierbarkeit in den ALS-Daten erwartet.

Die beste Übereinstimmung zwischen Modell und OL-Karte lieferte die 7x7m Nachbarschaft. Dies ist die Grösste der 4 verwendeten. Es stellt sich somit unweigerlich die Frage, wieso nicht grössere Nachbarschaften (z.B. 9x9m) getestet wurden. Je grösser die Nachbarschaft, desto mehr wird die Vegetationskarte generalisiert. Damit könnten aber kleine Details auf dieser Karte verschwinden, die für den Kartographen bei der Geländeaufnahme wichtig sind.

Beim Vergleich zwischen dem Modell und der OL-Karte muss berücksichtigt werden, dass das Modell nicht mit der Realität verglichen wird. Die OL-Karte ist selbst schon generalisiert und kann auch Aufnahmefehler (Lage, Klassierung) enthalten.

Wichtig ist, dass die ALS-Daten korrekt klassiert sind. Die falsch klassierten Daten des Kantons Zug waren darum für diese Master Thesis nicht zu gebrauchen. Sämtliche Daten sind vor deren Verwendung auf ihre Korrektheit zu überprüfen.

6.2 Beantwortung der Forschungsfrage

Aus den erzielten Resultaten lassen sich folgende Antworten auf die gestellten Forschungsfragen geben:

Kann bodennahe Vegetation aus den ALS-Daten extrahiert werden?

Ja. Mit der geeigneten Grösse der Nachbarschaft und der Grenzwerte sind 86.1% der kartieren Vegetation im Modell bestimmt worden. Beim Bodenbewuchs sind es hingegen nur 32.7%. Die Vegetation kann somit deutlich besser detektiert werden als der Bodenbewuchs. Ein visueller Vergleich zwischen Karten und Modell zeigt, dass sämtliche kartierte Vegetation im Modell auch als solche erkannt wurde. Nur die Grösse, Form und Klassierung innerhalb der Vegetationsklassen ist unterschiedlich. Für die bessere Berechnung des Bodenbewuchses sind aktuellere ALS-Daten notwendig, die genügend korrekt klassierte Punkte im Bereich zwischen Boden und 1m darüber besitzen.

Kann zwischen niedriger und hoher Vegetation unterschieden werden?

Ja. Die Unterscheidung zwischen Bodenbewuchs und Vegetation erfolgte mittels des Grenzwertes von 1m über Boden. Dieser erwies sich bei der Geländeaufnahme als sinnvoll. Die Nachbarschaft mit der spezifizierten Grösse generalisiert das berechnete Modell. Die resultierende *Orienteering Base Map* enthält die klare farbliche Unterscheidung zwischen dem violetten Bodenbewuchs und der grünen Vegetation.

Verkürzen diese zusätzlich gewonnenen Informationen die Herstellungsdauer einer OL-Karte und erhöhen somit die Produktivität des Kartographen?

Für die Kartierung wurden 30 h/km² gebraucht. Der Zeitaufwand bei den Kartographen ist sehr unterschiedlich. Ein richtiger Vergleichswert fehlt für die Beurteilung. Dazu hätte dasselbe Gebiet ohne diese Grundlagen kartiert werden müssen. Ich kann mir jedoch nicht vorstellen, wie ich dieses Gebiet ohne die neuen Grundlagen mit derselben Qualität schneller hätte aufnehmen können. Zu beachten ist, dass bei der Einführung einer neuen Technologie auch zuerst Erfahrungen gesammelt werden müssen. Es kann somit erwartet werden, dass mit mehr Erfahrung auch der Zeitaufwand sinkt. Somit ist zu erwarten, dass diese zusätzlich gewonnenen Informationen über die bodennahe Vegetation die Herstellungsdauer einer OL-Karte verkürzen und somit die Produktivität des Kartographen steigern.

Kann die Kartierung der Vegetation vereinheitlicht werden?

Die Modellberechnung erfolgt durch die NDVDs. Diese normalisieren Gebiete mit unterschiedlicher ALS-Punktdichte. Dadurch können auch grössere Waldgebiete einheitlich dargestellt werden. Diese einheitlichen Vegetations-Grundlagen können zu einer

einheitlicheren Kartierung führen. Dazu müssen zuerst jedoch noch Erfahrungen gesammelt werden. Somit kann diese Frage nicht abschliessend beantwortet werden. Die stark unterschiedlichen Grenzwerte vom Testgebiet mit denen von Trier (2015) zeigen aber eindeutig, dass die für dieses Testgebiet berechneten Grenzwerte nicht allgemeingültig sind. Diese müssen für andere Gebiet anhand von Stichproben neu berechnet werden.

6.3 Ausblick

Diese Master Thesis zeigt das grosse Potential der ALS-Daten bei der Vegetationskartierung für OL-Karten. Für die bessere Berechnung des Bodenbewuchses müssen jedoch aktuelle ALS-Daten verfügbar sein, die mehr bodennahe Punkt enthalten. Hier sollte untersucht werden, ob Daten, die zu einem anderen Zeitpunkt geflogen wurden, bessere Resultate zum Bodenbewuchs liefern. Im Sommer ist der Bodenbewuchs insbesondere durch Brombeeren höher und sollte für ALS besser detektierbar sein. Jedoch ist zu diesem Zeitpunkt auch das Kronendach der Laubbäume dichter, womit weniger ALS-Impulse in den bodennahen Bereich gelangen.

Die Entwicklung in dieser noch jungen Technologie Laserscanning geht rasant weiter. Neue Möglichkeiten werden sich eröffnen. Somit bleibt auch die Entwicklung für die OL-Kartographie weiterhin sehr spannend. Der an der Intergeo 2015 von Leica Geosystems präsentierte Pegasus Backpack (Abbildung 68) könnte die Zukunft für den OL-Kartographen sein. Der «Rucksack» ist ausgestattet mit Laserscanner, GPS und Videokamera. Damit läuft der OL-Kartograph durchs Gelände. Aus den vom mobilen Laserscanner erfassten Daten wird automatisch die Vegetation gemäss ISOM klassiert.



Abbildung 68 Der Leica Pegasus Backpack, vorgestellt an der Intergeo 2015

7 Literaturverzeichnis

ASPRS, 2011. *ASPRS LAS 1.4 Format Specification*. [Online]

Available at: http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS_1_4_r13.pdf

Born, B., 2013. *Generierung von für den Orientierungslauf optimierten Höhenlinien aus swissALTI3D Daten*, Zürich: ETH .

Ditz, R., Glarner, F. & Gartner, G., 2014. Laser Scanning and Orienteering Maps. In: Wien: Vienna University of Technology, pp. 13-18.

E. Baltsavias, ETH Zürich, 2014. *Discrete echo and full-waveform ALS systems*, Zürich: ETH.

Gloor, T., 2013. *Vegetation height maps derived from digital elevation models – the next innovation in the production of orienteering maps?*. [Online]

Available at:

http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2013/ICC2013_Proceedings.pdf , Page 558

International Orienteering Federation, M. C., 2000. *International Specification for Orienteering Maps 2000*. [Online]

Available at: http://orienteering.org/wp-content/uploads/2010/12/International-Specification-for-Orienteering-Maps-2000_2.pdf

International Orienteering Federation, M. C., 2017. *International Specification for Orienteering Maps 2017*. [Online]

Available at: http://orienteering.org/wp-content/uploads/2017/04/ISOM2017_01May2017.pdf

Lehmann, M., 2005. *Kartenaufnahme mit Airborne Laserscanning Höhendaten*. [Online]

Available at: http://www.swiss-orienteering.ch/files/kommission_karten/kt/kt2005_airbornelaserscanning.pdf

Petrovič, D., 2014. *Reducing Field Work with Automation in Orienteering Map Production*, Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering.

Rees, E. v., 2013. *Rapidlasso Efficient Tools for LiDAR Processing*, AE Emmeloord, The Netherlands: GEO Informatics.

Schaad, G.-R., 2009. *Digitales Oberflächenmodell (DOM) zur Vegetationskartierung*. [Online]

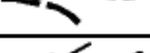
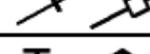
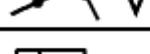
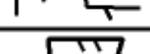
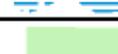
Available at: http://www.swiss-orienteering.ch/files/kommission_karten/krtelertagung_2009_dom.pdf

Swiss Orienteering, 2000. *ISOM*, Olten: Swiss Orienteering.

Trier, Ø. D., 2015. *Automatic Mapping of Forest Density from Airborne Lidar Data*. Norwegian Computing Center, Oslo, Norway: Taylor&Francis.

8 Anhang

8.1 Legende ISOM 2000

Legende	
	Wald = weiss; Wiese, Weide = gelb
	Hügel; kleine Kuppe
	Senke; kleine Senke; Loch
	Graben; Trockenrinne
	kleinkupiertes Gelände; Erdwall
	Grube; Böschung
	unpassierbare Felswand
	passierbarer Fels
	Fahrweg; Karrweg
	Fussweg; Pfad
	Stromleitung, Skilift; Sesselbahn Gondelbahn
	kleiner Turm; Futterkrippe
	Stein; Felsblock; Grenzstein
	Steingruppe; Steingebiete
	Steinmauer; Felsloch
	Zaun passierbar
	Zaun, überqueren verboten
	Gebäude
	Sperrgebiet (Privatgelände)
	Brunnen; Wasserschacht; Wasserloch
	Bach; Wasserrinne; Quelle
	Sickerbach oder Sumpfstreifen
	Sumpf undeutlich; passierbar
	leichte Behinderung
	starke Behinderung
	sehr starke Behinderung, unpassierbar
	rauhes offenes Land; mit Bodenbewuchs
	halboffenes Gebiet; Einzelbaum
	besonderes kleines Objekt

8.2 Stichproben Steinhuserwald

Stichproben, 5x5 Nachbarschaft

Object Index	Symbol Number	Easting	Northing	NDVD Undergrowth	NDVD Vegetation
31	405	680'436.00	229'380.30	-0.89	-0.85
32	405	680'457.90	229'368.40	-0.98	-0.98
35	405	680'313.70	229'468.80	-0.92	-0.88
36	405	680'287.70	229'451.70	-0.94	-0.75
43	405	680'086.90	229'370.90	-0.96	-0.81
44	405	680'338.30	229'475.10	-0.99	-0.93
72	405	680'051.90	229'255.10	-0.84	-0.76
101	405	680'355.30	229'406.20	-0.96	-0.89
104	405	680'477.20	229'193.20	-1.00	-1.00
113	405	680'388.50	229'100.30	-0.94	-0.94
114	405	680'407.30	229'082.80	-0.91	-0.91
115	405	680'355.00	229'077.10	-0.95	-0.74
120	405	680'259.40	229'061.50	-1.00	-1.00
121	405	680'291.10	229'193.20	-0.99	-0.95
122	405	680'345.30	229'201.10	-0.85	-0.85
134	405	680'179.50	229'115.10	-0.98	-0.94
135	405	680'152.30	229'112.10	-0.67	-0.50
136	405	680'143.30	229'082.70	-0.79	-0.14
137	405	680'094.10	229'082.30	-0.67	-0.64
138	405	680'114.10	229'101.90	-0.98	-0.89
150	405	680'052.10	229'205.30	-0.94	-0.93
151	405	680'085.50	229'185.30	-0.65	-0.56
152	405	680'086.10	229'153.50	-0.67	-0.57
153	405	680'100.10	229'145.50	-0.95	-0.95
154	405	680'105.90	229'118.10	-0.98	-0.62
161	405	680'128.90	229'176.30	-0.93	-0.65
162	405	680'125.10	229'214.30	-0.99	-0.57
163	405	680'148.70	229'213.10	-0.94	-0.94
172	405	680'252.10	229'233.90	-1.00	-0.80
178	405	680'219.30	229'322.10	-0.99	-0.99
192	405	680'359.10	229'250.50	-0.96	-0.95

Mittelwert:	-0.91	-0.80
--------------------	--------------	--------------

37	407	680'257.00	229'480.10	-0.91	-0.91
38	407	680'281.90	229'486.50	-0.92	-0.92
46	407	680'330.70	229'440.70	-0.96	-0.90
52	407	680'409.10	229'375.50	-0.78	-0.76
53	407	680'417.90	229'390.70	-0.82	-0.79
54	407	680'399.10	229'411.10	-0.81	-0.69
55	407	680'374.70	229'464.30	-0.51	-0.49
56	407	680'409.10	229'450.70	-0.83	-0.80
60	407	680'035.50	229'456.70	-0.83	-0.46
61	407	680'067.50	229'437.90	-0.56	-0.33
62	407	680'092.70	229'405.10	-0.82	-0.70
63	407	680'093.90	229'437.10	-0.97	-0.43

74	407	680'196.30	229'317.10	-0.55	-0.34
75	407	680'124.20	229'343.00	-0.74	-0.68
76	407	680'115.90	229'326.10	-0.60	-0.58
81	407	680'191.70	229'444.50	-0.94	-0.94
82	407	680'224.20	229'456.50	-0.74	-0.71
83	407	680'209.00	229'479.40	-0.72	-0.65
84	407	680'235.50	229'490.40	-0.72	-0.66
91	407	680'225.70	229'342.30	-0.82	-0.66
92	407	680'237.00	229'351.10	-0.88	-0.88
95	407	680'275.00	229'399.10	-0.96	-0.85
96	407	680'261.30	229'424.30	-0.93	-0.92
97	407	680'279.10	229'417.00	-0.92	-0.92
100	407	680'377.60	229'378.40	-0.65	-0.59
106	407	680'419.40	229'218.70	-0.68	-0.64
107	407	680'460.40	229'225.10	-0.56	-0.45
110	407	680'484.10	229'225.20	-0.97	-0.95
149	407	680'021.70	229'212.10	-0.97	-0.93
158	407	680'117.90	229'149.10	-0.90	-0.81
159	407	680'132.50	229'205.90	-0.99	-0.90
160	407	680'131.10	229'191.70	-1.00	-0.92
175	407	680'309.50	229'294.70	-0.87	-0.80
176	407	680'234.90	229'302.90	-0.91	-0.91
179	407	680'246.90	229'330.30	-1.00	-0.99
180	407	680'269.10	229'326.10	-0.89	-0.89
181	407	680'312.10	229'319.70	-0.89	-0.88
182	407	680'318.90	229'341.70	-0.95	-0.95
183	407	680'290.50	229'388.10	-0.86	-0.86
188	407	680'263.30	229'359.30	-0.94	-0.94
190	407	680'417.90	229'284.10	-0.89	-0.82
191	407	680'392.50	229'280.70	-0.93	-0.89
Average:				-0.84	-0.76
49	409	680'462.70	229'333.10	-0.92	-0.71
50	409	680'395.90	229'352.30	-0.77	-0.57
79	409	680'225.80	229'435.70	-0.97	-0.97
80	409	680'206.80	229'438.10	-0.87	-0.87
85	409	680'208.90	229'396.70	-0.67	-0.25
86	409	680'217.40	229'413.10	-0.66	-0.64
87	409	680'195.70	229'371.50	-1.00	-1.00
98	409	680'237.10	229'410.40	-0.97	-0.96
103	409	680'460.10	229'179.10	-0.10	0.22
196	409	680'441.10	229'256.30	-0.99	-0.99
Average:				-0.79	-0.67
57	406	680'443.10	229'448.30	-0.96	-0.96
71	406	680'074.70	229'264.70	-0.55	-0.40
73	406	680'154.30	229'294.30	-1.00	-1.00
77	406	680'143.10	229'313.10	-0.93	-0.87
89	406	680'292.60	229'423.30	-0.86	-0.43
90	406	680'263.90	229'388.30	-0.78	-0.77

109	406	680'459.40	229'220.60	-0.76	-0.55
112	406	680'454.00	229'116.70	-0.91	-0.03
124	406	680'292.80	229'145.90	-0.86	-0.21
125	406	680'272.00	229'173.80	-0.53	0.19
126	406	680'260.20	229'197.40	-0.95	-0.39
133	406	680'172.30	229'140.30	-0.69	0.12
139	406	680'077.10	229'110.90	-0.92	-0.75
140	406	680'079.50	229'128.90	-0.81	-0.41
169	406	680'199.50	229'182.70	-0.96	-0.83
Average:				-0.83	-0.49
33	408	680'496.10	229'370.30	-0.36	0.03
34	408	680'481.00	229'372.30	-0.98	-0.68
39	408	680'091.50	229'343.00	-0.73	-0.13
40	408	680'096.90	229'353.30	-0.88	-0.58
41	408	680'073.50	229'352.00	-0.94	0.00
42	408	680'067.10	229'366.60	-0.91	-0.43
45	408	680'319.90	229'452.30	-0.99	-0.77
51	408	680'430.70	229'355.50	-0.96	-0.33
58	408	680'055.10	229'411.90	-0.62	-0.14
59	408	680'053.50	229'471.90	-0.84	-0.77
64	408	680'095.50	229'454.70	-0.96	-0.94
65	408	680'116.30	229'455.50	-0.52	-0.22
66	408	680'184.70	229'354.70	-0.84	-0.65
67	408	680'144.30	229'374.70	-0.89	-0.18
68	408	680'167.50	229'301.10	-0.12	0.06
69	408	680'113.90	229'280.30	-1.00	-0.62
70	408	680'087.50	229'274.70	0.07	0.34
78	408	680'113.70	229'433.90	-0.96	-0.45
88	408	680'212.20	229'380.00	-1.00	-1.00
93	408	680'247.20	229'363.20	-0.81	0.11
94	408	680'227.80	229'373.60	-0.41	0.19
99	408	680'356.00	229'377.50	-0.93	-0.93
102	408	680'464.40	229'165.70	-0.58	0.11
108	408	680'459.60	229'232.80	-0.50	-0.46
111	408	680'449.60	229'147.50	0.14	0.37
116	408	680'364.60	229'067.30	-0.73	0.22
117	408	680'356.70	229'067.20	-0.78	0.09
118	408	680'315.50	229'058.90	-0.24	0.59
119	408	680'275.90	229'058.00	-0.21	0.24
123	408	680'368.60	229'173.80	-0.93	-0.47
127	408	680'251.50	229'210.80	-0.88	-0.18
128	408	680'233.20	229'200.00	-0.84	0.14
129	408	680'228.10	229'159.40	-0.59	0.21
130	408	680'200.90	229'131.30	-0.96	-0.66
141	408	680'056.30	229'159.50	-0.85	-0.19
142	408	680'046.70	229'178.70	-0.84	-0.62
143	408	680'088.70	229'171.10	-0.90	-0.90
144	408	680'078.30	229'178.10	0.41	0.55
145	408	680'057.10	229'227.90	-0.69	0.44

146	408	680'076.10	229'242.70	-0.77	0.09
147	408	680'085.10	229'216.90	-0.87	-0.01
148	408	680'013.50	229'212.50	0.39	0.71
164	408	680'143.10	229'267.10	-0.76	-0.14
165	408	680'126.30	229'261.30	0.03	0.65
166	408	680'103.50	229'249.90	-0.78	0.13
167	408	680'161.10	229'262.10	-0.05	0.65
171	408	680'215.30	229'239.90	-0.27	0.30
173	408	680'269.50	229'234.10	-0.85	0.05
177	408	680'210.50	229'305.10	-0.76	-0.34
184	408	680'298.70	229'400.30	-0.56	-0.30
185	408	680'347.70	229'330.90	-0.42	0.03
186	408	680'289.90	229'355.50	-0.90	-0.34
187	408	680'270.70	229'353.50	-1.00	-0.20
189	408	680'315.70	229'366.30	-0.97	-0.75
193	408	680'323.30	229'228.70	-0.63	0.09
194	408	680'379.50	229'236.30	-0.62	0.28
195	408	680'353.70	229'220.10	-0.89	-0.44

Average:	-0.65	-0.14
-----------------	--------------	--------------

47	410	680'462.70	229'272.30	-0.07	0.77
48	410	680'481.90	229'312.30	-0.46	0.48
105	410	680'423.40	229'207.10	-0.08	0.64
131	410	680'183.70	229'133.50	-0.66	0.08
132	410	680'179.30	229'169.60	-0.94	-0.39
155	410	680'126.50	229'130.70	-0.70	0.34
156	410	680'142.50	229'144.30	-0.98	-0.17
157	410	680'150.70	229'162.30	-0.81	-0.29
168	410	680'178.70	229'278.30	0.03	0.78
170	410	680'210.70	229'196.70	-0.99	-0.20
174	410	680'232.30	229'268.50	-0.23	0.06

Average:	-0.54	0.19
-----------------	--------------	-------------