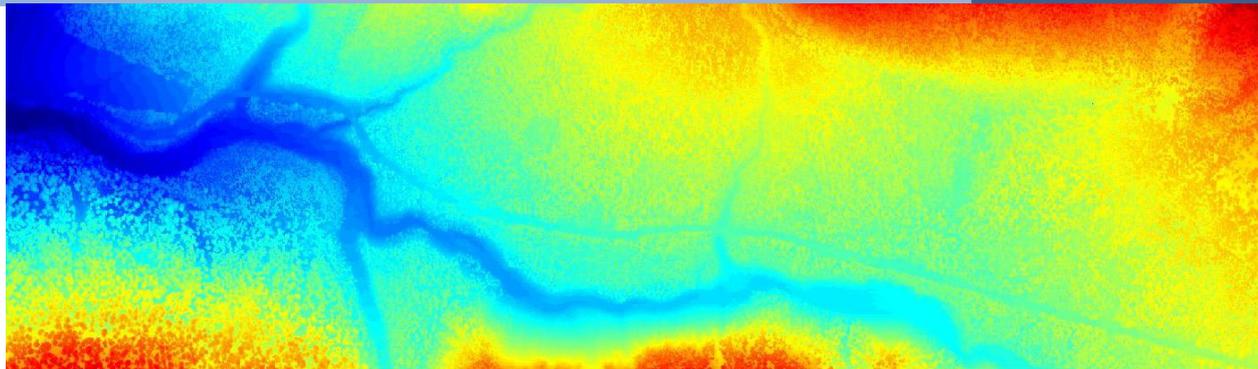


Masterarbeit

Untersuchung der Waldlücken und Waldstrukturen und deren Dynamik im Schweizerischen Nationalpark mit multitemporalen LiDAR Daten



Swen Walker

Februar 2013

Professur für Waldökologie

Departement Umweltsystemwissenschaften ETH Zürich

Referent: Dr. Christof Bigler, ETH Zürich

Korreferent: Dr. Felix Morsdorf, Universität Zürich

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Titelblatt: Digitales Oberflächenmodell von Il Fuorn und dessen Umgebung. Die Farben stehen für die verschiedenen Höhen der Rasterpixel (Blau für 1800 m ü. M. bis Rot für 2000 m ü. M.).



Wald an der oberen Waldgrenze im Schweizerischen Nationalpark mit Blick auf den Piz Daint (links) und den Piz Murtaröl (rechts). (Sven Walker, 2012)



Chaotisch anmutende Strukturen des Bergföhrenwaldes in der Nähe der Langzeituntersuchungsfläche der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. (Sven Walker, 2012)

Zusammenfassung

Waldlücken und Waldstrukturen befinden sich in einem andauernden dynamischen Prozess. Während Waldlücken durch Mortalitätsprozesse entstehen und grösser werden, erfolgt das Zuwachsen durch Verjüngungs- und Wachstumsprozesse. Die Technik der flugzeugbasierten Laserdatenerfassung scheint eine gute Möglichkeit zu sein, solche Waldlücken und Waldstrukturen zu ermitteln und mittels Aufnahmen von verschiedenen Jahren gar Veränderungen beobachten zu können. Während sich schon diverse Studien mit der statischen Erfassung von Waldlücken und Waldstrukturen mittels Laserdaten befasst haben, existieren erst noch wenige Untersuchungen über deren Dynamik. An diesem Punkt knüpft die vorliegende Masterarbeit an, denn sie befasst sich neben der allgemeinen Erfassbarkeit von Waldlücken auch mit der Frage, wo neue Lücken im Wald entstehen und ob sich diese allenfalls gerichtet (Nord, Ost, Süd, West) ausweiten. Überdies werden explorativ räumliche und topografische Einflüsse untersucht, welche sich unterschiedlich auf Lückengrösse, Lückenstruktur und deren Dynamik auswirken können.

Als Untersuchungsgebiet eignet sich der Schweizerische Nationalpark, weil dieser nun seit knapp 100 Jahren nicht mehr bewirtschaftet wird und somit die Natur ihren freien Lauf hat. Die Universität Zürich besitzt den ersten multitemporalen Laserdatensatz vom Gebiet des Schweizerischen Nationalparks mit den Aufnahmejahren 2002 und 2010, welcher für die vorliegende Studie zur Verfügung stand. Die Datenauswertung hat gezeigt, dass viele Parameter einen Einfluss auf die Genauigkeit der Wald- und Lückenerfassung haben. Während zum Beispiel eine zu kleine Datenauflösung zu fehlenden Datenwerten und damit zu einer verfälschten Waldflächenbestimmung führte, wurden die Waldflächen bei einer grösseren Auflösung wiederum als viel zu gross ermittelt. Mit einer geeigneten Parameterwahl konnten jedoch die Flächen soweit ausgewertet werden, dass im Untersuchungsgebiet in der untersuchten Zeitperiode kein richtungsabhängiges Zuwachsen von Wald und Ausweiten von Lücken aufgezeigt werden konnte. Mit der gewählten Methode zur Waldflächenbestimmung zeigte der reine Bergföhrenwald im Untersuchungsgebiet eine grössere Fragmentierung als die gemischten Nadelwälder. Als Grund hierfür kann wohl die Struktur der untersuchten Bergföhrenwälder genannt werden, denn diese weisen häufig keine so klaren Wald-Lücken-Grenzen auf wie andere Waldtypen. Das äussert sich auch darin, dass die Lücken sich in den gemischten Nadelwäldern hauptsächlich an bestehenden Wald-Lücken-Rändern ausweiten, wohingegen in den reinen Bergföhrenwäldern vielfach neue Lücken innerhalb der ermittelten Waldfläche entstehen.

Die Lückenanteile in den unteren Höhenlagen, also am Talboden und an den unteren Seitenhängen, haben in den untersuchten acht Jahren im Schnitt um etwa fünf Prozent abgenommen. Nach dem rund 100 jährigen Bewirtschaftungsverbot befindet sich der Wald in diesen Flächen foglich immer noch im Aufbaustadium. Es leben also nicht nur die Bäume einzeln für sich, die dynamische Waldstruktur lebt als Ganzes.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Material	4
2.1	Angaben zum Untersuchungsgebiet	4
2.2	Datenerfassung und Datenverarbeitung.....	6
2.3	Waldlückendefinition	7
3	Methoden.....	9
3.1	Baumartenanteile des Schweizerischen Nationalparks	9
3.2	Erstellen der Oberflächenraster	11
3.2.1	Genauigkeitskontrolle der Rasterdaten innerhalb desselben Jahres.....	13
3.2.2	Genauigkeitskontrolle der Rasterdaten zwischen 2002 und 2010.....	14
3.3	Erstellen der Lückenraster	15
3.3.1	Auswirkungen unterschiedlicher Rastergrößen auf die Waldanteile.....	16
3.3.2	Auswirkungen unterschiedlicher Schwellenwerte auf die Waldanteile.....	17
3.4	Bestimmung des Veränderungsstatus von Wald und Lücken	17
3.5	Erfassung der Feldanalysedaten.....	19
4	Resultate.....	22
4.1	Genauigkeit der Rasterdaten.....	22
4.2	Auswirkungen von unterschiedlichen Rastergrößen und Schwellenwerten.....	23
4.2.1	Bestimmung der Waldanteile mittels verschiedener Rastergrößen	23
4.2.2	Bestimmung der Waldanteile mittels verschiedener Schwellenwerte	24
4.3	Interpolationsfehler undefinierter Rasterpunkte.....	26
4.4	Dynamik des Veränderungsstatus	27
4.5	Auswertung der Feldanalyse	32
4.5.1	Testfläche.....	32
4.5.2	Lückenanteile je Feldfläche	37
4.5.3	Differenzen der Lückenanteile.....	44
4.5.4	Anzahl Lücken und deren Veränderung	48
4.5.5	Kernflächen und deren Differenzen	50
4.5.6	Grenzlängen und deren Differenzen	51
5	Diskussion.....	54
5.1	Genauigkeit der Daten und der Waldflächenbestimmung	54
5.2	Grenze der Rasterauflösung und Interpolationsfehler fehlender Datenpunkte	55
5.3	Zuwachsrichtungen und Positionen der Mortalität	56
5.4	Räumliche und topografische Einflüsse auf die Lücken und deren Dynamik	59
6	Schlussfolgerungen.....	63
	Dank.....	64
	Literatur- und Quellenverzeichnis	65
	Anhang.....	67

1 Einleitung

Waldstrukturen werden durch den Standort und die Baumartenzusammensetzung beeinflusst. So unterscheiden sich Waldstrukturen in Nadelwäldern von Laubwäldern oder jene von Bergföhrenwäldern von Fichtenwäldern. Auch innerhalb derselben Art gibt es Differenzen in der Waldstruktur, denn zum Beispiel kann sich die Baumdichte eines Bergföhrenwaldes in tiefer Lage von einem Bergföhrenwald an der oberen Waldgrenze unterscheiden. Während an gewissen Standorten der Wald ein mehr oder weniger geschlossenes Kronendach bildet, wachsen anderorts die Bäume solitär oder in Rotten. Diese Waldstrukturen, geschaffen von den Bäumen, haben wiederum einen rückwirkenden Einfluss auf die Bäume selbst. So etablieren sich lichtbedürftige Baumarten besser an den hellen Lückenstandorten, während sich schattentolerante Arten auch im dichten, geschlossenen Wald regenerieren können. Und während durch Sturmereignisse oder auch durch Pilzbefall an gewissen Stellen Lücken entstehen, können sich an diesen Standorten wiederum junge Pflanzen etablieren. Waldlücken beeinflussen damit die Dynamik und die Biodiversität im Waldökosystem. So zeigt z.B. Bendel et al. (2006a), dass die natürliche Sukzession im Schweizerischen Nationalpark durch Waldlücken verlangsamt wird, indem durch Waldlücken die frühsukzessive und lichtbedürftige Bergföhre gegenüber der spätsukzessiven und schattentoleranteren Arve begünstigt wird. Die Sukzession vom Bergföhrenbestand hin zum Arvenbestand kann somit in einem stark lückigen Wald gebremst bis gar unterbunden werden. In der Studie von Bendel et al. (2006a) wurde auch festgestellt, dass die Lücken innerhalb des Waldes jenen Pflanzen einen Lebensraum bieten, welche hauptsächlich ausserhalb in Wiesen vorkommen. Somit sind Waldlücken wichtige Struktur- und Diversitätselemente im Wald.

Die Wälder des Schweizerischen Nationalparks weisen eine relativ grosse Lückigkeit auf und die Stammdichte ist zudem relativ gering. Diese Waldlücken und allgemein die Waldstrukturen sind jedoch nicht starr, denn sie befinden sich in einem langsamen, aber andauernden dynamischen Prozess. Während das Zuwachsen der Waldlücken durch regenerative Verjüngungs- und Wachstumsprozesse erfolgt (Bendel et al., 2006b), bilden oder erweitern sich Lücken durch Mortalitätsprozesse. Ursachen hierfür können zum Beispiel kurzfristige Ereignisse wie Windwürfe sein. Einen langfristigen Einfluss auf Mortalitätsprozesse können hingegen die Wurzel- und Stammfäulepilze *Heterobasidion annosum* und *Armillaria spp.* haben (Dobbertin et al., 2001). Diese pathogenen Pilzarten bilden Infektionszentren, welche einzelne Bäume bis hin zu grösseren Flächen umspannen können. Dabei sterben die Bäume hauptsächlich an den Waldlückengrenzen der Infektionsflächen ab, was eine radiale Ausweitung der Lücken bewirkt (Dobbertin et al., 2001; Bendel et al., 2006b). Es entstehen damit Lückenflächen mit Totholz unterschiedlicher Todeszeitpunkte und Zersetzungsstadien. Die Nadeln der abgestorbenen Bäume verbleiben dabei noch über Jahre an den Bäumen bevor sie abfallen und ihre Stämme können noch Jahre bis Jahrzehnte nach ihrem Tod stehenbleiben (Brang, 1988). Durch das Absterben der Bäume gelangt wieder mehr Licht auf den Boden, was wiederum die lichtbedürftigen Baumarten wie die Bergföhre fördert und damit die Sukzession hin zur Arve, wie durch Bendel et al. (2006a) festgestellt, bremst.

Will man solche dynamische Waldstrukturprozesse beobachten, muss ein geeignetes Studiengebiet gesucht werden. In Zentraleuropa werden die meisten Waldbestände schon seit Jahrhunderten bewirtschaftet. Sie eignen sich somit wenig für eine Untersuchung der natürlichen Walddynamik. Hingegen bietet sich der 1914 gegründete Schweizerische

Nationalpark mit seinem Bewirtschaftungsverbot als nahezu ideales Untersuchungsgebiet an. Seine Wälder wurden früher zwar stark bewirtschaftet und genutzt, ja zum Teil sogar kahlgerodet (Parolini, 2012). Doch nun konnten sie sich durch das seit knapp 100 Jahren bestehende Bewirtschaftungsverbot relativ unbeeinflusst entwickeln.

Die Technik des flugzeugbasierten Laserscannings („airborne laserscanning“, ALS) scheint eine gute Möglichkeit zu sein, Bäume, Waldlücken und Waldstrukturen automatisiert ermitteln und Veränderungen beobachten zu können (**Abbildung 1**). Mittels Laserdaten kann die Waldstruktur durch Parameter wie zum Beispiel Bedeckungsgrad und Vegetationshöhe grossflächig mit hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit erfasst werden (Morsdorf et al., 2004; Vepakomma et al., 2012; Côté et al., 2012). Hierfür wird die Oberfläche mit Hilfe der Laufzeitmessung eines Laserpulses ("Light Detection And Ranging", LiDAR) abgetastet und aufgezeichnet. Die Universität Zürich verfügt über den ersten multitemporalen ALS Datensatz der Schweiz, welcher im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks erhoben wurde. Die Daten stammen aus einer Überfliegung im Jahr 2002 sowie einem zweiten Flug im Jahr 2010. Dank diesem Datensatz kann die natürliche Entwicklung des Waldes, und damit auch die Dynamik der Waldlücken und Waldstrukturen, über acht Jahre in diesem seit knapp 100 Jahren unbewirtschafteten Ökosystem untersucht und nachvollzogen werden.

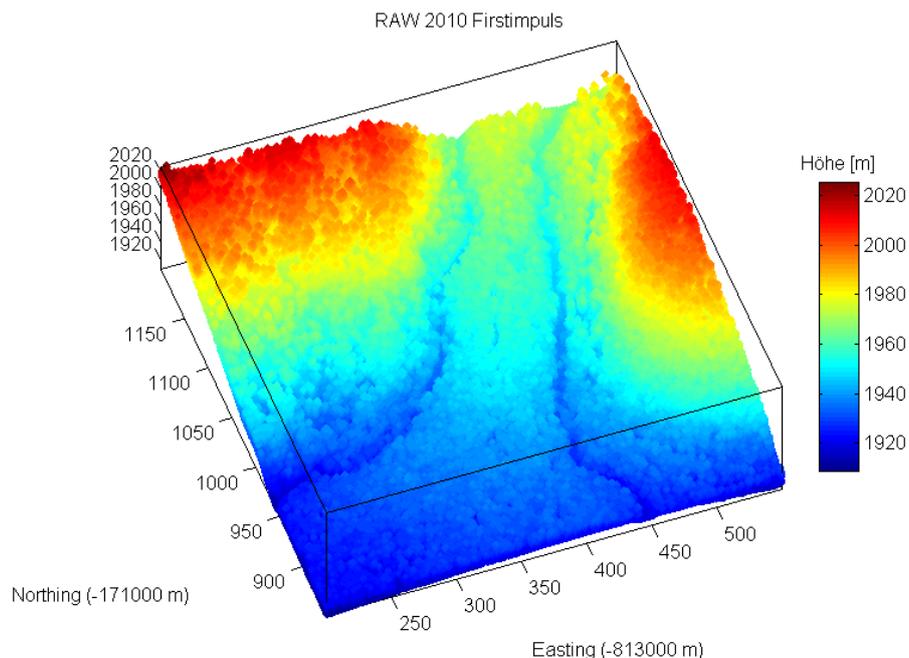


Abbildung 1 - Anhand von Laserdaten sind Einzelbäume, Baumabstände und das Geländeerief mit den Flussläufen gut erkennbar. Mittels solcher Datensätzen aus verschiedenen Jahren lassen sich Veränderungen in der Vegetation relativ genau ermitteln. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt der Laserdaten 2010 des Schweizerischen Nationalparks. Die Farben der einzelnen Datenpunkte geben deren absolute Höhenlage in Metern über Meer an.

In dieser Masterarbeit sollen nun etablierte Methoden der Fernerkundung auf die multitemporalen Daten im SNP angewendet werden. Dabei sollen Erkenntnisse über die generelle Erfassbarkeit von Waldstrukturen gewonnen werden. Weiter sollen die räumlich-zeitliche Dynamik von Waldlücken und Waldstrukturen erfasst und allfällig vorhandene topographische Abhängigkeiten gefunden werden. Es geht also um das Erkennen und Erklären der Dynamik in einem Bestand anhand von LiDAR-Daten.

In einem ersten Schritt wird die Erfassbarkeit der Waldstruktur mittels LiDAR-Daten untersucht. Es stellt sich die **methodische Frage (i)** inwiefern sich unterschiedliche Parameter in der Erfassung des Waldes auf die geschätzte Wald- und Lückenflächengrößen auswirken.

Darunter fällt zum Beispiel die Untersuchung, wie stark sich diese Flächengrößen ändern, wenn verschiedene Datenaufösungen gewählt werden. Weil sich die Technik vom Jahr 2002 auf das Jahr 2010 modernisiert und verbessert hat, ist auch interessant zu erfahren, ob bei der Gleichbehandlung der Datensätze 2002 und 2010 systematische Unterschiede in den Resultaten auftreten. Treten Differenzen aufgrund der wahren natürlichen Mortalität und des natürlichen Wachstums auf, oder sind Unterschiede eher aufgrund der Datenbeschaffung und der Datenbearbeitungsmethode erklärbar?

In einem zweiten Schritt wird untersucht, wie sich Lücken ausweiten oder neu bilden, oder wie sich der Wald generell ausbreitet. Dabei stellt sich die **ökologische Frage (ii)**, ob sich eher neue Lücken im geschlossenen Wald bilden oder ob sich bestehende Lücken nach dem von Dobbertin et al. (2001) und Bendel et al. (2006b) beschriebenen Muster ausweiten. Dabei vergrößern sich von pathogenen Pilzen verursachte Waldlücken vom Pilzbefallszentrum radial nach aussen, indem die Bäume an der Waldlückengrenze der Infektionsfläche absterben. Es werden dabei jedoch keine Bodenproben und Pilzuntersuchungen vorgenommen, womit auch der Pilzeinfluss nicht beziffert werden kann. Die Untersuchung soll lediglich auf optischer Betrachtung der dafür passend aufbereiteten LiDAR-Daten beruhen und dabei sollen allfällige Muster und Tendenzen visuell ermittelt werden. Ein systematischer, gerichteter Zuwachs von Wald oder richtungsabhängige Vergrößerungen von Lücken im Wald sollen dabei erkannt und falls möglich auch begründet werden.

Zuletzt richtet sich der Fokus auf das explorative Erkennen und Erklären der Waldstruktur und -dynamik in einem Bestand. Dabei stellen sich **ökologische Fragen (iii)** nach den räumlichen und topografischen Einflüssen, welche sich unterschiedlich auf Lückengröße, Lückenstruktur und deren Dynamik auswirken. Gibt es zum Beispiel Unterschiede in den Lückenveränderungen auf Flächen tieferer Lage zu jenen in den höheren Lagen? Und ist zum Beispiel der Einfluss der Höhenlage auf die Größe der Lückenanteile prägnanter als jener der Hangneigung oder auch der Exposition? Sind die feststellbaren Zustände und Veränderungen in der Waldstruktur logisch nachvollziehbar?

Die Beantwortung dieser Fragen soll einen Eindruck dessen geben, was unter anderem mit LiDAR-Daten im Bereich der grossräumigen Waldflächen- und Waldstrukturerfassung möglich ist und wo allenfalls Probleme darin auftreten. Somit steht neben der Untersuchung der Waldlücken und Waldstrukturen und deren Dynamik auch das Aufzeigen der Grenzen einer solchen Vegetationserfassung im Zentrum. Nach meinem Wissensstand ist das in dieser Form die erste Untersuchung über Waldstrukturen und deren Dynamik anhand von multitemporalen LiDAR-Daten, was den etwas explorativen Charakter dieser Studie erklärt.

28% der Nationalparkfläche sind bewaldet, wovon 99.5% der Waldfläche aus Nadelholz zusammengesetzt ist. 21% der Parkfläche sind alpine Weiden und die restlichen 51% werden durch Geröll und Fels gebildet. Natürlicherweise würde der typische Bergwald in der Region des Nationalparks aus Fichten (*Picea abies*), Lärchen (*Larix decidua*), Arven (*Pinus cembra*) und Bergföhren (*Pinus mugo*) bestehen (Schweizerischer Nationalpark, 2013). Doch aufgrund der starken Nutzung bis hin zu Kahlschlägen in der Vergangenheit sind heute Pionierwälder mit Bergföhren dominierend. Die Gebiete unterhalb der Waldgrenze sind weitgehend bewaldet.

Von der gesamten Nationalparkfläche wurde nur ein Teil überflogen und mit Laserdaten erfasst. Aufgrund der grossen Datenmenge konnte nicht der ganze Datensatz betrachtet werden. Deshalb wurde nur ein Ausschnitt zwischen Il Fuorn und Buffalora gewählt (**Abbildung 3**). Der Ausschnitt erstreckt sich im Schweizerischen Landeskoordinatensystem (CH1903) in der X-Achse von 812240 bis 816042 und in der Y-Achse von 170907 bis 172253. Innerhalb dieses Untersuchungsgebiets befindet sich östlich von Il Fuorn eine Langzeit-Untersuchungsfläche der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Diese Fläche ist relativ gut untersucht, denn von jedem Baum mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) grösser als 0.12 m wurden über Jahre diverse Parameter erfasst wie z.B. Geolokation, Baumhöhe und Stammdurchmesser. Zur geistigen Visualisierung eines solchen Waldausschnitts des Schweizerischen Nationalparks können nun folgende Informationen aus Dobbertin et al. (2001) zur LWF-Fläche genannt werden. Das Alter der Bäume lag zwischen 90 und 200 Jahren mit einem Durchschnitt von 150 Jahren. Mehr als 20% der stehenden Bäume in dieser LWF-Fläche wurden im Jahr 2001 als tot klassiert. Der Totholzanteil ist also relativ hoch, was damit zu tun hat, dass das gemessene Durchschnittsalter in etwa dem erreichbaren Alter der Bergföhre im Schweizerischen Nationalpark entspricht (Schweizerischer Nationalpark, 2013). Es steht und liegt somit viel Totholz in der Fläche und der Bestand ist relativ licht (**Abbildung 4**).

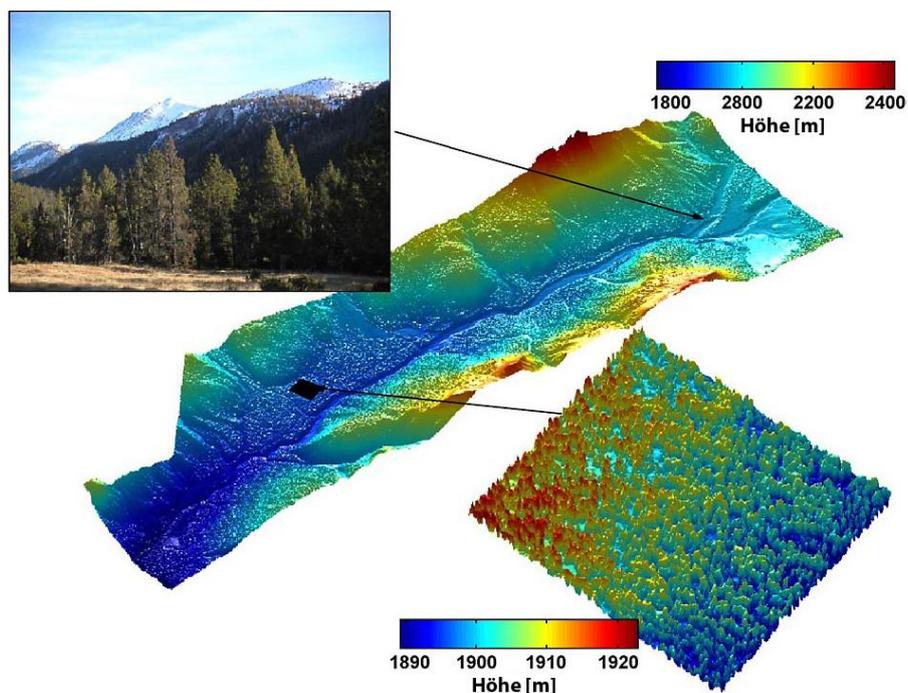


Abbildung 3 - Die Datenmenge des überflogenen und erfassten Gebiets ist sehr gross, weshalb nur ein Ausschnitt des Datensatzes verwendet wird. Die Abbildung zeigt die Laserdaten des gewählten Ausschnitts, welches sich von Il Fuorn bis Buffalora erstreckt. Inmitten des Untersuchungsgebiets befindet sich eine Langzeituntersuchungsfläche der WSL. Deren Position und vergrößerter Ausschnitt ist hier ebenfalls zu sehen (Morsdorf et al., 2004).



Abbildung 4 - Die Waldstruktur im Schweizerischen Nationalpark ist aufgelöst und es steht und liegt relativ viel Totholz im Bestand. Dieses Erscheinungsbild ist im Schweizerischen Nationalpark häufig anzutreffen und kann somit als typisch bezeichnet werden. Die Aufnahme entstand in der Nähe der Langzeituntersuchungsfläche der WSL. (Sven Walker, 2012)

2.2 Datenerfassung und Datenverarbeitung

Die deutsche Firma TopoSys hat im Auftrag der Universität Zürich die Überfliegungen und Datenaufnahmen vollzogen. So wurden in den Jahren 2002 und 2010 Laser-Daten auf einer Grundfläche von über 14 km² erfasst. Als Sensor kam der Falcon II zur Anwendung. Die Daten wurden als *small footprint* erfasst, wobei die erste Impulsreflektion die Oberfläche der Vegetation (DSM, Digital Surface Model) und der letzte Impuls die Grundfläche (DTM, Digital Terrain Model) widerspiegeln kann (**Abbildung 5**). Bei undurchdringbaren Oberflächen (Z.B. dichte Vegetation oder vegetationsfreier Boden), können First- und Lastimpuls auch nahezu identisch sein. Für die Genauigkeit der Daten gibt TopoSys eine Horizontalaufklärung von 0.5 m und eine Vertikalaufklärung von 0.15 m an. In Morsdorf et al. (2004) wurden in einer Qualitätsbeurteilung diese Genauigkeiten bestätigt.

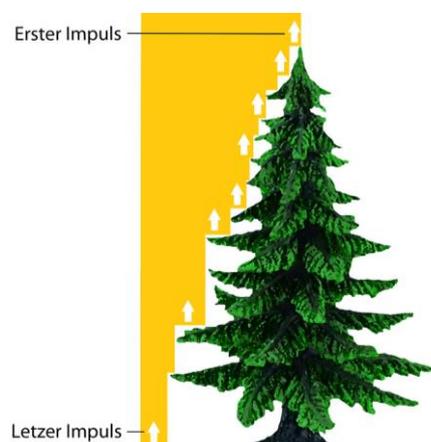


Abbildung 5 - Während die erste Laserimpulsreflektion die Oberhöhe erfasst, gibt der letzte Impuls den tiefsten Punkt an der erfassten Stelle wieder. Bei einem *small footprint* werden nur diese beiden Impulse erfasst. (frei nach Reitberger, 2010)

Für die Bestimmung der Lücken aus den Laserdaten musste erst entschieden werden, ob diese in Rasterdaten oder in Polygonen erfasst werden sollen. Die Arbeit mittels Rasterdaten hat den Vorteil, dass die Rasterpunkte der beiden Datensätze relativ einfach miteinander verglichen werden können. Zudem können jedem Rasterpunkt weitere Informationen wie z.B. die Dichte des Bewuchses oder die Durchschnittshöhe angehängt werden. Obwohl das Arbeiten mit Polygonen bei der Untersuchung der Lückenform eventuell Vorteile gehabt hätte, wurde für die vorliegende Arbeit die Verwendung von Rasterdaten gewählt.

Bei einer Laserdatenerfassung wird die Bodenoberfläche nicht immer direkt senkrecht von oben erfasst. Häufig fallen die Laserstrahlen schief auf die Vegetation und den Boden (**Abbildung 6**). Dadurch entstehen Flächen mit einer hohen Konzentration von Datenpunkten und Regionen, an welchen keine Daten reflektiert werden. Wird die Rastergröße zu klein gewählt, entstehen viele Rasterpunkte, welche keine Laserdatenpunkte beinhalten. Diese sind dann in ihrem Höhenwert undefiniert. Bei grösseren Rastergittern verringert sich die Anzahl solcher undefinierter Rasterpunkte, weil die Wahrscheinlichkeit steigt, dass mindestens ein Datenpunkt im Rasterpunkt vorhanden ist. Die Wahl der Rastergröße bestimmt somit nicht nur die Genauigkeit der Lückenerfassung sondern auch die Menge der undefinierten Rasterpunkte. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Auflösungen verglichen, um sich dann für die geeignetste zu entscheiden.

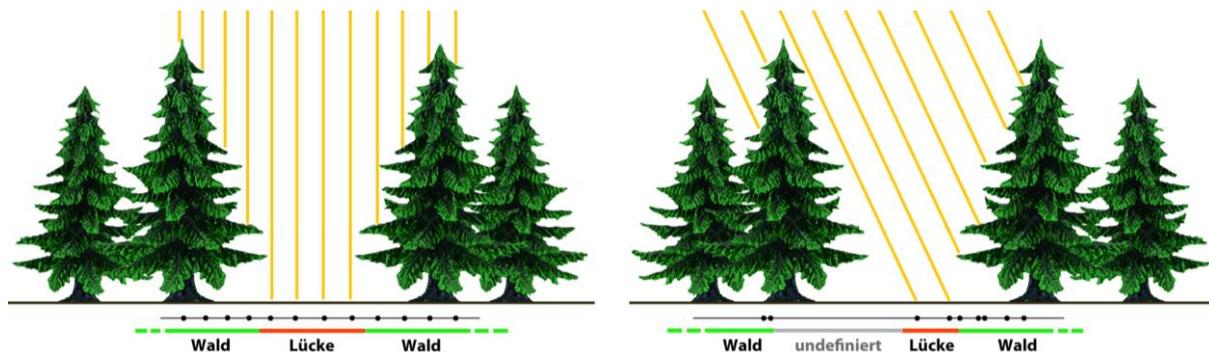


Abbildung 6 - Bei einer senkrechten Datenerfassung ist die Dichte der erfassten Datenpunkte konstant. Eine schiefe Erfassung ergibt hingegen Regionen mit hoher Datenkonzentration, wie auch grössere Abschnitte ohne Reflektionen. (frei nach Gaulton, 2008)

Die gesamte Datenverarbeitung von der Rastererstellung bis hin zu den Darstellungen und Auswertungen wurde mittels MATLAB (The MathWorks, 2012) vollzogen. Die Matlab-Skripte liegen der Arbeit in digitaler Form bei. Zur Überprüfung von Regressionsanalysen und Darstellungen durch Matlab wurde zum Teil das Statistikprogramm R herbeigezogen (R Core Team, 2012).

2.3 Waldlückendefinition

Um eine Waldlücke definieren zu können, braucht man erst zu wissen, was überhaupt als Wald anerkannt wird. Die Definition von Wald wird je nach Zweck (z.B. Raumplanung, Anwendung der Waldgesetze) und Kanton unterschiedlich gehandhabt. Das LFI (Landesforstinventar) wendet eine national einheitliche Walddefinition nach quantitativen Kriterien an. Die Definition richtet sich nach den drei Parametern **Waldbreite**, **Deckungsgrad** und **Baumhöhe**. Die Baumhöhe muss den fixen Wert von 3 m übersteigen, hingegen sind die Breite und der Deckungsgrad variabel. Ist ein Waldstück breiter als 50 m, so ist ein minimaler Deckungsgrad von 20% gefordert. Bei dichterem Bewuchs können auch schmalere Waldstücke als Waldfläche anerkannt werden (**Abbildung 7**).

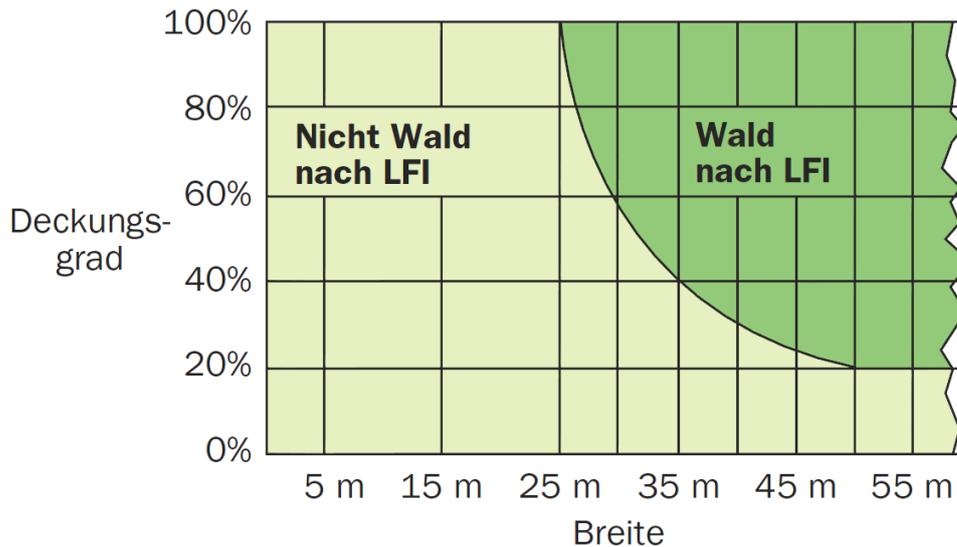


Abbildung 7 - Das Schweizerische Landesforstinventar (LFI) definiert Wald anhand der Kriterien Waldbreite, Deckungsgrad und Baumhöhe. Während die Baumhöhe mindestens 3 m betragen muss, kann der Deckungsgrad je nach Waldbreite variieren. (Schweizerisches Landesforstinventar, 2013)

Äquivalent zu dieser Definition von Wald kann eine Waldlücke definiert werden. Passend hierfür wären folgende Kriterien:

- Abhängig von der Lückenbreite (z.B. mindestens eine Baumlänge => fixer Wert oder abhängig von der Höhe der angrenzenden Bäume).
- Maximale Vegetationshöhe von 3 m.
- Die Baumkronen dürfen in der Lücke maximal eine Fläche von 20% bedecken.
- Befindet sich innerhalb der Waldlücke eine kleine Baumgruppe, kann diese ab einer bestimmten Flächengrösse aus der Lücke ausgeklammert werden (z.B. ab einer Are).

Für die vorliegende Arbeit erscheinen die Kriterien a, c und d jedoch zu einschränkend. Da die Dynamik von Waldlücken untersucht werden soll, braucht es eine möglichst feine Auflösung der Lücken. Es ist nicht nur entscheidend, wie gross oder wie dicht bewachsen diese sind, sondern es soll erkannt werden können, wie sich die Lücken über die Zeit entwickelt haben. Somit soll jede Fläche als Waldlücke betrachtet werden, welche frei von Bäumen und zudem komplett von Bäumen umgeben ist. Als baumfrei gilt eine Fläche, wenn der Bewuchs einen gewissen Höhengschwellenwert nicht übersteigt. Beim LFI beträgt dieser Wert 3 m. In dieser Definition stellt somit der äusserste Rand eines einzelnen Baumes auf der Höhe des Schwellenwertes die Grenze zwischen Wald und Nichtwald dar. Ermittelt wird diese Grenze durch die vorhandenen Laserdatenpunkte und der daraus ermittelten Vegetationshöhe.

3 Methoden

3.1 Baumartenanteile des Schweizerischen Nationalparks

Obwohl die Wälder des Schweizerischen Nationalparks seit 100 Jahren nicht mehr bewirtschaftet werden, sind diese von menschlichen Einflüssen nicht gänzlich befreit. Zum Beispiel hat die Ofenpasstrasse sehr wohl einen Einfluss auf den angrenzenden Wald. Hier müssen aus Sicherheitsgründen des Strassenverkehrs am Strassenrand jene Bäume gefällt werden, welche am Absterben sind und drohen, auf die Strasse zu fallen. Dieselben Massnahmen werden wohl auch auf den Wanderwegen praktiziert. Somit wurden für die vorliegende Studie nur jene Waldflächen betrachtet, welche vom Menschen weitestgehend unbeeinflusst sind. Aus diesem Grund sind Wälder nahe an Strassen, Infrastrukturen und Wanderwegen für die Datenauswertung nicht berücksichtigt worden. Hierfür fiel die Entscheidung, bei Infrastrukturen wie Strassen, Parkplätze und dergleichen, ein Abstandspuffer von 8 m einzuführen. Bei Wanderwegen wurde eine Pufferbreite von beidseitig 3 m gewählt. Ebenfalls gibt es im Untersuchungsgebiet sogenannte Entsorgungsflächen (z.B. Abfallsammelstellen an Parkplätzen), welche einen Puffer von 4 m erhalten haben. Alle bewaldeten Flächen im Untersuchungsgebiet, welche diese Pufferzonen schnitten, wurden von der Waldfläche abgezogen. Damit wurden diese vom Menschen beeinflussten Waldteile für die weiteren Untersuchungen nicht mehr berücksichtigt (**Abbildung 8**). Der gesamte Arbeitsschritt wurde vollzogen mit ArcGIS (ESRI, 2012) und den GIS-Daten von HABILALP (Lotz, 2006). Die HABILALP-Daten beruhen auf CIR (Color-Infrared) Luftbildern, welche nach einem einheitlichen Interpretationsschlüssel ausgewertet wurden. Die HABILALP-Layer beinhalten Polygone, welche unter anderem jeweils Informationen über die vorherrschende Bedeckung (Wald, Wiese, Infrastruktur, etc.) oder auch Bedeckungsgrade (90% Bergföhre und 10% Lärche, etc.) beinhalten. Die **Abbildung 9** zeigt die resultierende Waldfläche (grün) abzüglich der Wanderwege (rot), der Entsorgungsflächen (orange), der Infrastrukturflächen (gelb), sowie deren Pufferzonen.

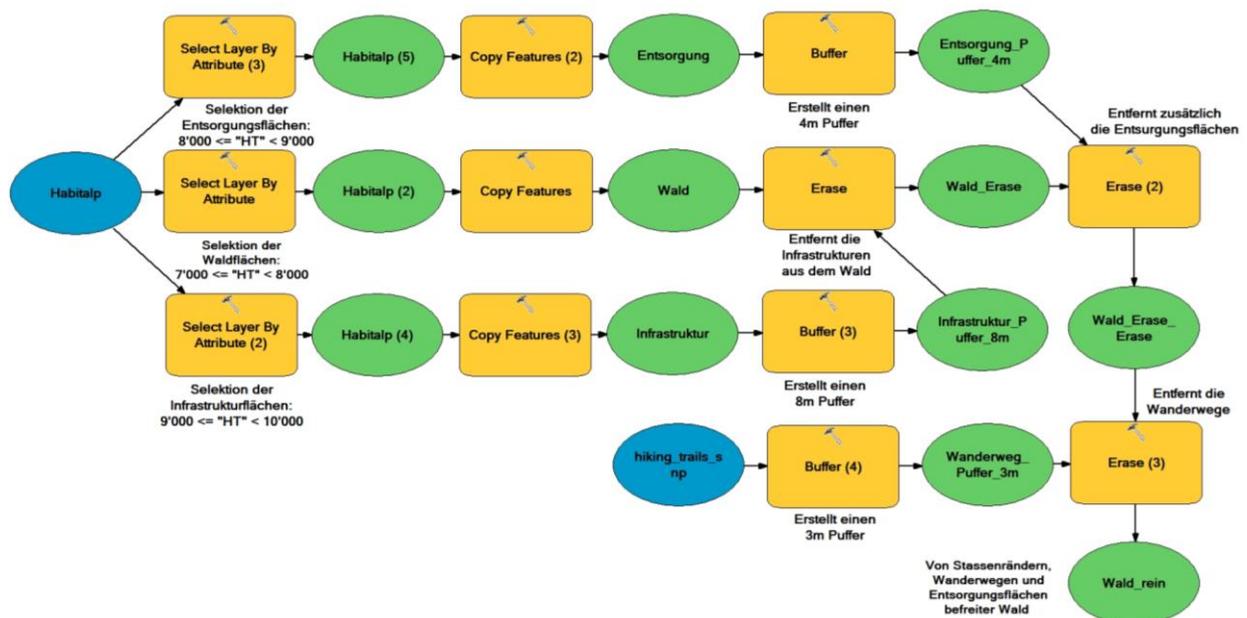


Abbildung 8 - Im ModelBuilder von ArcGIS wurde allen Infrastrukturflächen (Strassen, Gebäude, etc.) ein Puffer von 8 m umgelegt und diese Fläche bei Überschneidungen mit dem Wald von der Waldfläche entfernt. Ebenfalls wurden die Entsorgungsflächen mit einem Puffer von 4 m und die Wanderwege mit einem Puffer von 3 m von der Waldfläche entfernt. Es resultiert eine Waldfläche, welche mehr oder weniger frei von aktuellen menschlichen Einflüssen ist.

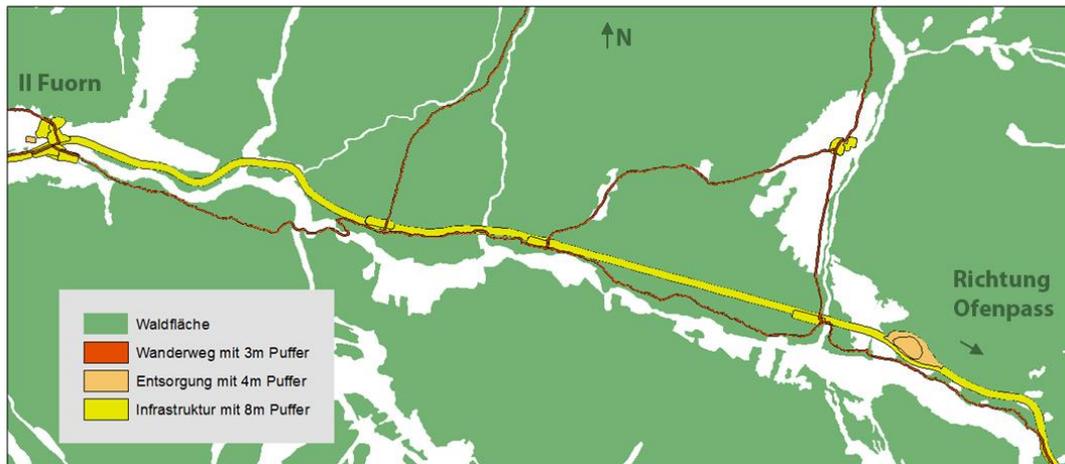


Abbildung 9 - Dieser Ausschnitt der Untersuchungsfläche zeigt die Waldfläche (grün), von welcher die Infrastrukturrpuffer (gelb), die Entsorgungspuffer (orange) und die Wanderwegpuffer (rot) abgezogen wurde.

In einem weiteren Schritt wurde die bereinigte Waldfläche mit Hilfe der HABITALP-Informationen in ihre Baumartenanteile zerlegt und mit Prozentwerten in 10% Schritten klassiert. Das untersuchte Waldgebiet ist nur mit Nadelhölzern bestockt (**Abbildung 10**), Laubbäume kommen höchstens vereinzelt vor. Der Nadelwald setzt sich hauptsächlich aus Bergföhren, Lärchen, Arven, Fichten und Legföhren zusammen. Während die **Bergföhre** an Südexpositionen die dominierende Art darstellt (**Abbildung 11**) und das Gebiet nördlich der Ofenpassstrasse fast gänzlich für sich beansprucht, kommt die **Lärche** im Untersuchungsgebiet hauptsächlich an nordwest-, nord- bis nordostexponierten Hängen mit Anteilen bis zu 90% vor (**Abbildung 12**). Auch die **Arve** ist im untersuchten Gebiet noch relativ häufig anzutreffen. Sie besetzt dieselben Expositionen wie die Lärche, jedoch in geringeren Anteilen. Verstreuter ist die Verteilung der **Legföhre**. Sie kommt in wenigen Flächen mit Anteilen bis zu 100% in mehr oder weniger allen Expositionen des untersuchten Gebietes vor. Die seltenste vorkommende Art ist die **Fichte**. Sie ist in nur wenigen Flächen mit bis zu 30% vertreten. Die Anteilsgrafiken der Arve (**Abbildung 79**), der Legföhre (**Abbildung 80**) und der Fichte (**Abbildung 81**) befinden sich im Anhang dieser Arbeit. Mit Hilfe dieser erstellten Bestandeslayer wird es möglich, die Auswertung der Daten separat für einzelne Baumarten zu betrachten.

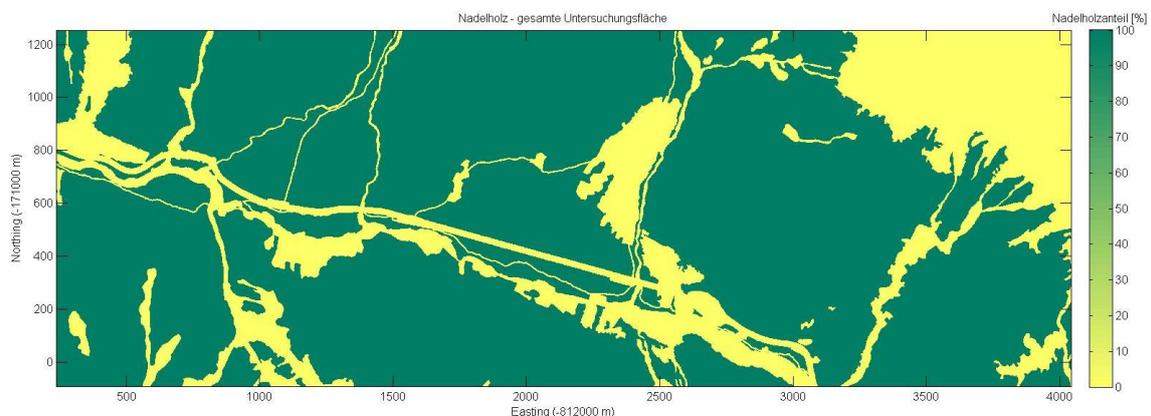


Abbildung 10 - Die Wälder des Untersuchungsgebietes bestehen zu 100% aus Nadelbäumen. Die dunklen Flächen zeigen das Ausmass dieser Waldfläche. Die hellen Flächen hingegen stellen den Strassenverlauf, Wanderwege, Schuttflächen und andere waldfreie Gebiete dar.

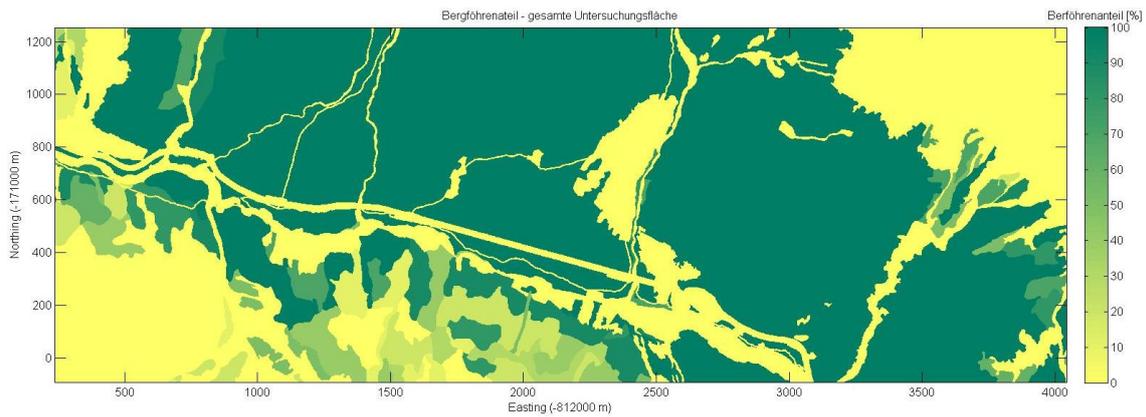


Abbildung 11 - Das Untersuchungsgebiet wird dominiert von der Bergföhre. Sie besetzt im Untersuchungsgebiet die Süd- und Südosthänge nahezu zu 100%.

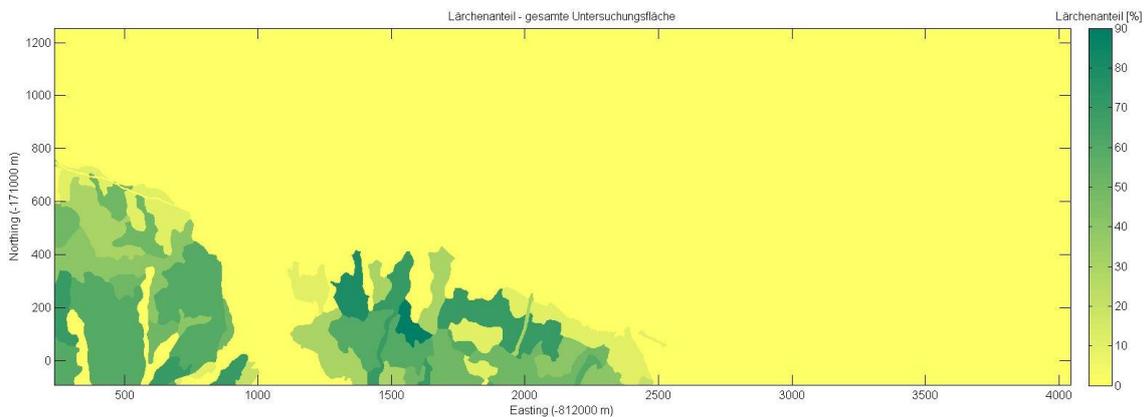


Abbildung 12 - Die am zweithäufigsten vertretene Baumart in der untersuchten Fläche ist die Lärche. Sie ist hauptsächlich südlich der Ofenpassstrasse aufzufinden. Hier kommt sie bis zu einem Anteil von 90% vor.

3.2 Erstellen der Oberflächenraster

Die LiDAR-Daten beinhalten zum Teil fehlerhafte Höhenwerte, welche die Untersuchungsergebnisse hätten verfälschen können. Falsche Messwerte entstanden zum Beispiel durch die Erfassung fliegender Vögel. Bevor also aus den LiDAR-Daten die Oberflächen- und Bodenraster erstellt werden konnten, mussten die fehlerhaften Höhenwerte gefunden und gelöscht werden. Weil das nur wenige Punkte waren, wurde dies von Hand durchgeführt. Die LiDAR-Datensätze der beiden Jahre 2002 und 2010 wurden zudem überprüft, wie gut sie in der X- und Y-Achse miteinander übereinstimmen oder ob diese eine Verschiebung zueinander aufweisen. Dafür wurden sechs verschiedene Einzelbäume in der gesamten Testfläche ausgewählt, an denen die Daten auf eine Verschiebung überprüft werden konnten. Die Positionen der sechs Einzelbäume wurden mehr oder weniger zufällig gewählt (**Abbildung 13**). Bei der Auswahl der Bäume wurde darauf geachtet, dass diese möglichst gut über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt waren. Weiter wurden nur Bäume ausgewählt, welche mehr oder weniger solitär stehend waren. Bei allen sechs Bäumen wurden jeweils die Punktwolkendaten 2002 und 2010 gemeinsam in einer Grafik dargestellt und auf Versatz kontrolliert. Mit dieser Methode konnte optisch eine Verschiebung in der X-Achse von 0.6 m der Daten aus dem Jahr 2010 gegenüber 2002 festgestellt werden. Nach der Korrektur dieses Shifts schienen die Daten sehr gut übereinzustimmen. Die **Abbildung 14** zeigt als Beispiel den Baum Nr. 3 mit den Laserdaten 2002 in grüner Farbe und den Daten von 2010 in blauer Farbe. Eine

hundertprozentige Übereinstimmung war nur schon aufgrund des Wachstums über die acht Jahre nicht möglich und auch die Genauigkeitstoleranz der Datenerfassung trägt noch ihren Anteil dazu bei. Jedoch stimmten mit der Shiftkorrektur von 0.6 m die Testbäume im Schnitt sehr gut miteinander überein.

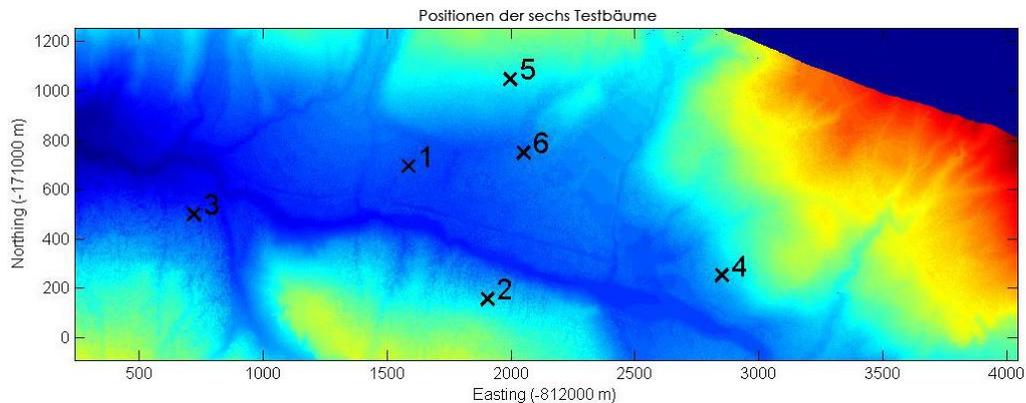


Abbildung 13 - Die Positionen der sechs Baumstandorte zur Überprüfung der Datenübereinstimmung wurden relativ zufällig gewählt. Als Auswahlkriterium diente einzig eine gute Verteilung in der gesamten Untersuchungsfläche und dass die Bäume mehr oder weniger freistehend waren. Die Kreuze eins bis sechs bezeichnen die Positionen dieser Baumstandorte. Der Baum Nr. 1 liegt innerhalb der LWF-Untersuchungsfläche.

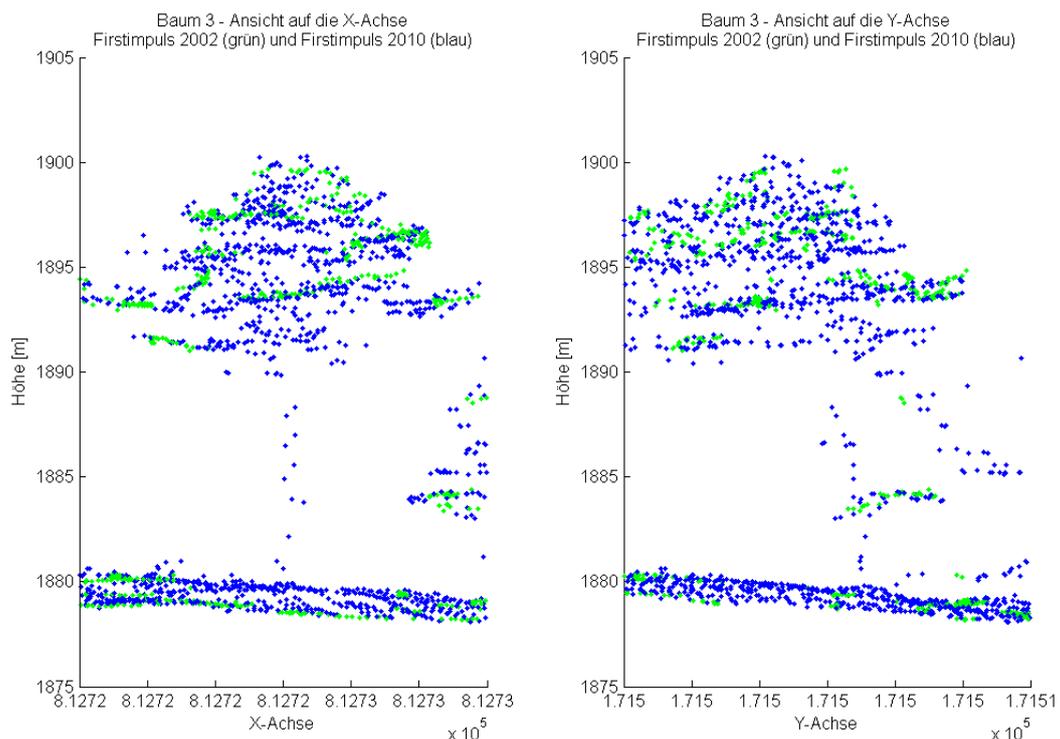


Abbildung 14 - Nachdem die LiDAR-Daten 2010 in der X-Achse um 0.6 m verschoben wurde, zeigt die Darstellung der Einzelbäume (hier den Baum Nr. 3) mit Frontansicht (links) und Seitenansicht (rechts) eine recht gute Übereinstimmung. Die grünen Punkte stellen die Daten des Jahres 2002 dar und die blauen Punkte jene von 2010.

Aus diesen korrigierten RAW-Daten wurden dann Rasterdaten in der Auflösung 0.5 m, 1 m, 2 m und 3 m erstellt. Dabei wurde für das Oberflächenmodell (DSM) in jedem Rasterpunkt der Höhenwert des jeweils höchsten in diesem Feld enthaltenen Messpunktes zugeordnet. Hingegen wurde beim Bodenmodell (DTM) der Mittelwert der Höhen aller im Rasterpunkt vorhandenen Messpunkten übernommen. Enthielt ein Rasterpunkt keine Messwerte (siehe **Abbildung 6** auf Seite 7), so wurde ein Wert aus den Höhenwerten der benachbarten

Rasterpunkte (horizontal, vertikal und diagonal) interpoliert. Vollzogen wurde dieser Schritt mit dem Matlab-Skript *inpaint_nans.m* von John D'Errico (Copyright (c) 2009) und dessen Interpolationsmethode 4.

An Baumpositionen drang der letzte Laserdatenimpuls nicht bis zum Boden hindurch. Für die Erstellung der DTM aus den RAW-Daten entstanden deshalb an den Baumpositionen Artefakte, welche umständlich zu entfernen gewesen wären. Aus diesem Grund wurden die von TopoSys aus den RAW-Daten vorgefertigten DTM-Raster verwendet, denn in diesen wurden die Baumstammartefakte schon entfernt. Die mittlere Grafik in der **Abbildung 15** zeigt solche Artefakte, wie sie bei der Generierung aus den RAW-Daten entstanden. Als Ausschnitt dient hier die LWF-Fläche. In der Abbildung links ist das DSM-Raster zu sehen, welches problemlos aus den Laserdaten erstellt werden konnte. Rechts in der Abbildung befindet sich das von TopoSys vorgefertigte *Original-DTM*, welches für die weitere Untersuchung verwendet wurde. Für die gesamte Untersuchungsfläche wurde ebenfalls das *Original-DTM* von TopoSys verwendet.

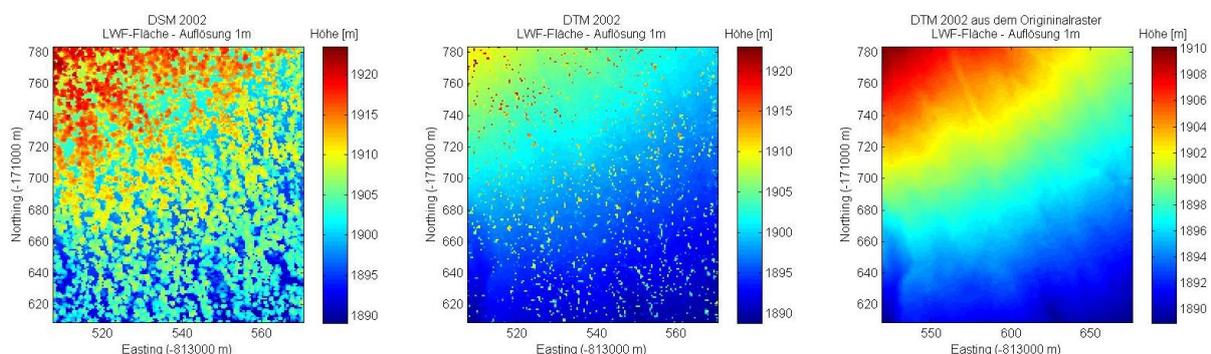


Abbildung 15 - Die aus den RAW-Daten generierten DTM-Raster zeigen an den Stammzentren Artefakte (Mitte). Weil diese kompliziert zum Entfernen sind, wurden für die Analyse die von TopoSys generierten DTM verwendet (rechts). Die Darstellung links zeigt die Vegetationsoberfläche (DSM). Als Ausschnitt dient hier die LWF-Fläche vom Jahr 2002 mit einer Auflösung von 1 m.

Das Original-DTM 2002 hatte ein Rasterformat mit der Auflösung von 1 m. Das Original-DTM 2010 hingegen wies eine Rasterauflösung von 0.5 m auf. Die Originalraster von 2002 mussten also auf die Rastergrößen 0.5 m, 2 m und 3 m uminterpoliert werden. Die Originalraster von 2010 erfuhren demgegenüber eine Uminterpolation auf 1 m, 2 m und 3 m. Weiter kommt hinzu, dass das Rastergitter 2002 auf den vollen Meter (.00) ausgerichtet war, das 2010er-Raster hingegen eine Versetzung von 0.25 m (.25/.75) aufwies. Das DTM 2010 Raster musste somit noch auf das Rastergitter der 2002er-Daten ausgerichtet werden. In einem weiteren Schritt wurde kontrolliert, ob das DTM-Originalraster zum DTM-aus-RAW eine Verschiebung in der X- oder Y-Achse aufwies. Weil die LiDAR-Daten 2010 um 0.6 m zu den Daten 2002 verschoben waren, musste das Originalraster 2010 bei der 1 m Auflösung um 1 m und bei der 0.5 m Auflösung um 0.5 m verschoben. Für die Auflösungen von 2 m und 3 m wurde dieser Schritt unterlassen, weil dies eine zum Datensatz 2002 verschobenes Rastergitter bedeutet hätte. So stimmten die Originalraster 2010 wieder mit den aus den LiDAR-Daten 2010 erstellten DSM überein.

3.2.1 Genauigkeitskontrolle der Rasterdaten innerhalb desselben Jahres

Weil für die Weiterverarbeitung aufgrund der Artefakte anstelle der aus den RAW-Daten generierten DTM-Raster die von TopoSys generierten DTM-Raster verwendet wurden, ergibt ein Genauigkeitsvergleich dieser beiden Raster Sinn. Hierbei stellte sich die Frage, wie genau

die Höhenwerte der DTM aus den Originalraster den DTM aus den RAW-Daten im selben Jahr entsprechen? Diese Überprüfung ist nicht Teil der Forschungsfragen, doch stellt sie eine Vorbedingung zur Beantwortung dessen dar. Sollten die Daten ungenau sein, so würden sich deren Fehler in die Hauptuntersuchung hinein ziehen. Die Resultate dieser Genauigkeitskontrolle wurden deshalb in die Datenanalyse verschoben.

Als Testfläche diente die gesamte Untersuchungsfläche, welche einen Waldanteil von 100% aufwies. Die Infrastrukturbauten wie Strassen, Häuser und Wanderwege inklusive ihrer Puffer wurden vom Höhenvergleich ausgeschlossen (**Abbildung 16**). Der Vergleich der beiden DTM geschah mittels Subtraktion der beiden Raster und der Histogrammdarstellung der resultierenden Differenzen. Um die Differenzen der Artefakte auszublenden, wurde lediglich der Anzeigebereich der Differenzen auf ± 0.5 m eingeschränkt. Diese Untersuchung wurde nur für die Rasterauflösung von 1 m vollzogen.

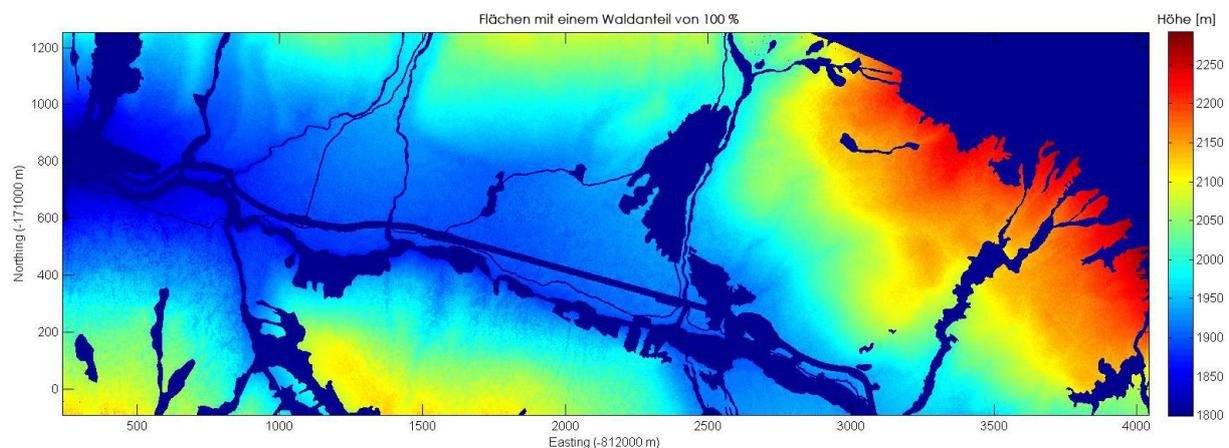


Abbildung 16 - Zur Untersuchung der Daten auf generelle Höhenunterschiede dient die gesamte Untersuchungsfläche, welche einen Waldanteil von 100% aufweist. Ebenfalls ausgeschlossen sind Infrastrukturbauten wie Häuser, Strassen und Wanderwege (inklusive Puffer). Die ausgeschlossenen Flächen sind dunkelblau gefärbt. Das hier zugrundeliegende Raster ist das Vegetationsoberflächenraster (DSM) 2010.

3.2.2 Genauigkeitskontrolle der Rasterdaten zwischen 2002 und 2010

Bevor aus den zueinander überprüften DSM- und Original-DTM-Rastern die definitive Vegetationshöhe berechnet wurde, mussten diese Raster hinsichtlich systematischer Fehler und Abweichungen aufgrund der LiDAR-Technologie der beiden Jahre überprüft werden. Dazu wurden jeweils die DSM des Jahres 2002 mit denen von 2010 und die DTM des Jahres 2002 mit denen von 2010 verglichen. Hierfür wurde die Differenz in einem Histogramm dargestellt. Auf einer vegetationsfreien Fläche sollten die DSM der beiden Jahre übereinstimmen, sofern keine Bodenveränderungen wie z.B. Hangrutsche vorgekommen sind. Es wurden also in beiden Vegetationsrastern nur diejenigen Flächen mit einer Vegetation von unter 0.5 m ausgewählt (DSM minus Original-DTM) und die Differenz dieser Punkte betrachtet. Damit konnte ein allfälliger Höhenshift dieser beiden DSM-Raster ersichtlich werden. Auch beim Vergleich der beiden DTM aus den RAW-Daten wurden wiederum nur die Flächen betrachtet, welche bei den DSM 2002 und 2010 eine Vegetationshöhe von maximal 0.5 m aufwiesen. Dies wurde deshalb so gewählt, weil dadurch die Baumstamm-Artefakte nicht in den Vergleich miteinbezogen wurden, denn diese hätten das Resultat verfälscht. Die Original-DTM wurden hingegen auf der gesamten Fläche verglichen, also unabhängig von der Vegetationshöhe.

3.3 Erstellen der Lückenraster

Mittels der überprüften Raster (DSM aus den LiDAR-Daten und shiftkorrigierte Original-DTM) wurden die Vegetationshöhenraster (CHM, Canopy Height Modell) erstellt. Dies erfolgte durch die einfache Subtraktion DSM minus DTM. Aufgrund der Datentoleranzen ergaben sich zum Teil negative Werte. Weil es keine negativen Vegetationshöhen geben kann, wurden allfällige Negativwerte auf Null gesetzt. Zur Veranschaulichung zeigt die **Abbildung 17** die Vegetationshöhenraster 2002 und 2010 der LWF-Fläche mit der Auflösung von 1 m. Die gelben Flächen sind Lücken, wohingegen grüne Rasterpunkte Bäume darstellen. Höhere Bäume erscheinen dunkler als kleine Bäume.

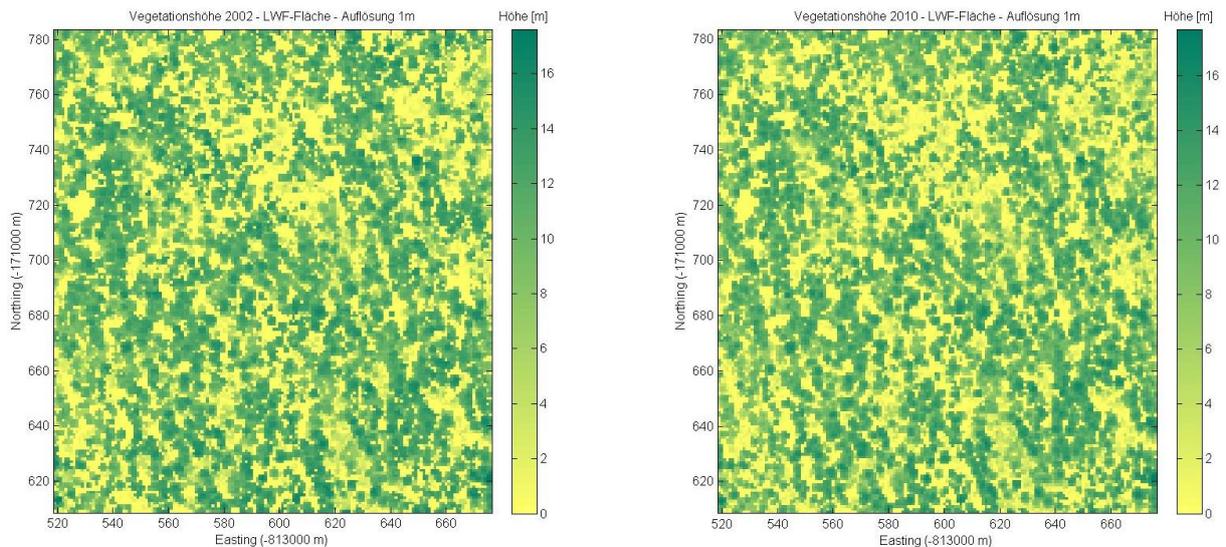


Abbildung 17 - Die Vegetationshöhenraster (CHM) für die LWF-Fläche zeigen in gelber Farbe die Lückenflächen und in grüner Farbe die Bäume. Je dunkler ein Punkt, desto höher ist ein Baum an dieser Stelle. Diese Abbildungen haben eine Rasterauflösung von 1 m.

Für die Bestimmung der Waldlücken- und Waldflächen wurde der Höhenwert jedes Rasterpunktes des CHM mit dem Schwellenwert h verglichen und dementsprechend jedem Rasterpunkt der zugehörige Status *Lücke* oder *Wald* zugeordnet. War ein Rasterhöhenwert des CHM kleiner als der Schwellenwert, so bekam dieser Rasterpunkt den Wert 1. Für Höhenwerte grösser oder gleich h , wurde der Wert 0 gesetzt:

$$\begin{aligned} CHM \geq h &\rightarrow Status = 0 \\ CHM < h &\rightarrow Status = 1 \end{aligned}$$

Für die Vegetationsschwelle h wurden die Werte 1 m, 2 m, 3 m und 4 m verwendet. Daraus resultierten Lückenraster mit nur zwei möglichen Werten, für die **Abbildung 18** sind das z.B. grün für *Wald* und gelb für *Lücke*.

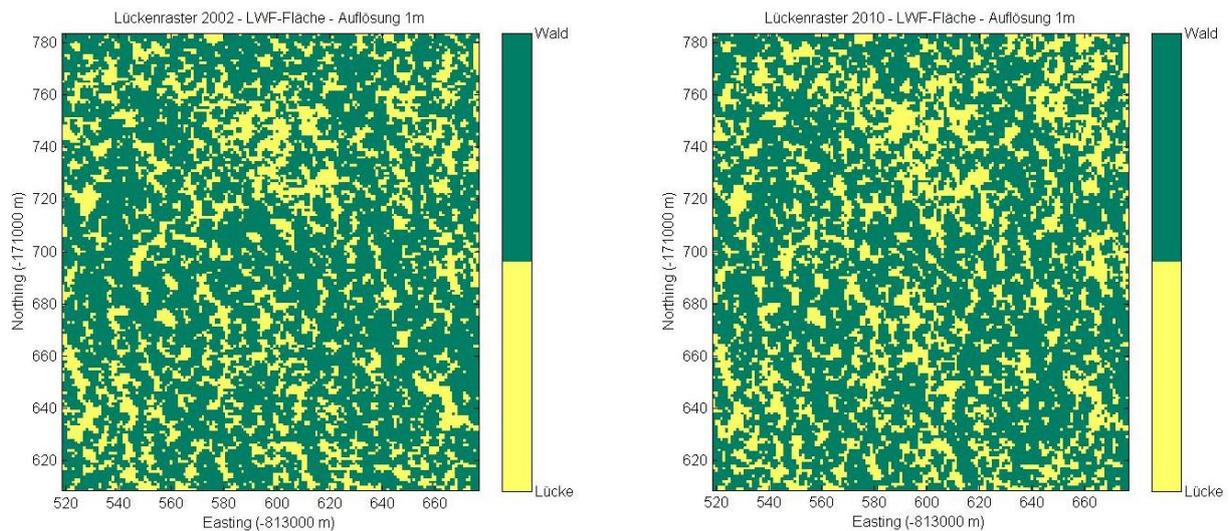


Abbildung 18 - Die Lückenraster 2002 und 2010 mit der Auflösung von 1 m unterscheiden sich auf den ersten Blick nur wenig. Bei genauerer Betrachtung fallen jedoch Unterschiede auf. Der Schwellenwert für die Lücken-Wald-Grenze beträgt in diesem Fall 3 m und die Auflösung 1 m. Grün steht für die Waldfläche und Gelb für die Lückenfläche.

3.3.1 Auswirkungen unterschiedlicher Rastergrößen auf die Waldanteile

Der ermittelbare Waldanteil hängt wesentlich von der Auflösung der verwendeten Raster ab. Je feiner die Auflösung, desto kleiner (und genauer) ist der Waldanteil. Man kann dies folgendermassen erklären. Ist nur ein Messpunkt innerhalb eines Rasterpixels höher als der Schwellenwert, so wird der gesamte Rasterpixel als Wald klassiert. Wenn nun im Extremfall eine Rastergröße gewählt wird, welche der Größe der Untersuchungsfläche entspricht, beträgt folglich der Waldanteil 100%. Wird hingegen die Rastergröße infinitesimal gewählt, wird genau die auf der Höhe des Schwellenwertes und darüber auf die Grundfläche projizierte Fläche als Waldfläche berechnet. Die Frage ist nun, wie es bei Rastergrößen zwischen diesen beiden Extremen aussieht. Um diese Frage zu beantworten wurden vier unterschiedliche Versuchsflächen gewählt, an denen diese Differenzen untersucht werden konnten (**Abbildung 19**). Die Positionen wurden so gewählt, dass keine Lawinenzonen geschnitten wurden. Weiter wurde darauf geschaut, dass flache Zonen (Nr. 1 und 3) wie auch steile Flächen (Nr. 2 und 4) sowie möglichst unterschiedliche Flächenazimute vertreten waren. An der Position 1 befindet sich die LWF-Fläche. Die Seitenlänge der Quadrate beträgt 150 m. Als Schwellenwert für die Wald-Lücken-Grenze kam wie im LFI die Höhe von 3 m zur Anwendung. Von diesen vier Flächen wurden dann die Waldanteile mit den Rasterauflösungen 0.5 m, 1 m, 2 m und 3 m ermittelt und verglichen.

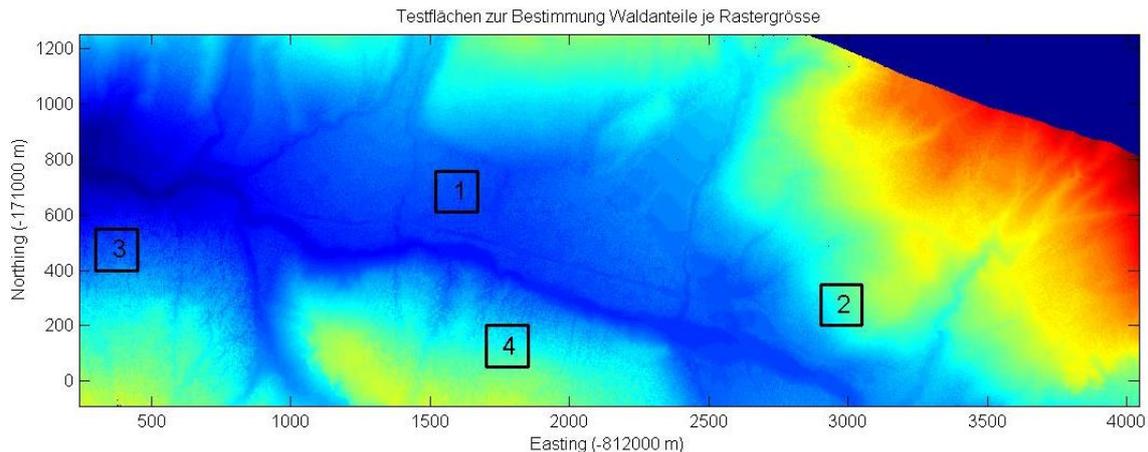


Abbildung 19 - Die vier Quadrate zeigen die Positionen der Testflächen, an welchen die Waldanteile für die Rastergrößen 0.5 m, 1 m, 2 m und 3 m ermittelt und verglichen wurden. Die Positionen wurden so gewählt, dass sie nicht in Lawinenzonen zu liegen kamen. Weiter wurden jeweils nord- und südseitig eine flache (Nr. 1 und 3) und eine steile Fläche (Nr. 2 und 4) gewählt.

3.3.2 Auswirkungen unterschiedlicher Schwellenwerte auf die Waldanteile

Eine weitere Bezugsgrösse zur Ermittlung des Waldanteils ist der Schwellenwert, welcher die Abgrenzung zwischen Wald und Nichtwald vollzieht. In einem weiteren Schritt wurde somit untersucht, wie sich der geschätzte Waldanteil bei verschiedenen Schwellenhöhen verhält. Als Rastergrösse wurde die fixe Auflösung von 1 m gewählt. Die Testflächen waren dieselben wie bei der Ermittlung der Waldanteile je Rastergrösse (**Abbildung 19**). Als Höschwellen wurden die Werte 1 m, 2 m, 3 m und 4 m gewählt.

3.4 Bestimmung des Veränderungsstatus von Wald und Lücken

Eine wichtige Untersuchung in dieser Masterarbeit ist die Ermittlung, welche und wie viele Flächen eine Statusveränderung erfahren haben. Sei dies der Wandel von einer Lücke zu Wald oder umgekehrt. Viele Flächen werden aber auch ihren Status als Lücke oder Wald unverändert beibehalten haben. Als Grundlage hierfür dienten die Lückenraster 2002 und 2010. Hierfür wurde ein Statuslayer erstellt, in dem für jeden einzelnen Rasterpixel die Veränderung, oder eben auch deren unveränderter Zustand festgehalten wurde. Das heisst konkret, dass jedem Pixel die Information zugeordnet wurde, ob dieser von 2002 auf 2010 unverändert unbewaldet (*//* für Lücke-Lücke) oder bewaldet (*ww* für Wald-Wald) blieb, oder ob sich der Pixelstatus von Lücke zu Wald (*/w*) oder von Wald zu Lücke (*w/*) verändert hat. Jede Lücke erhielt zudem eine Identitätsnummer (ID) und von jeder Lücke wurde die zugehörige Flächengrösse ermittelt. Für diese Statusanalyse wurden nur die Lückenraster mit der Auflösung von 1 m und dem Schwellenwert von 3 m betrachtet. Insgesamt wurden sechs Ausschnitte erstellt (**Abbildung 20**). Jede Teilfläche misst 150 m x 100 m. Diese Flächen unterscheiden sich in ihren Baumartenanteilen sowie in ihren topografischen Eigenschaften (**Tabelle 1**). Während die Ausschnitte 1, 3, 5 und 6 einen Baumartenanteil von 100% Bergföhren aufweisen, haben die Flächen 2 und 4 gemischte Nadelholzanteile. Die Flächen 1 und 6 haben beide eine Südwestexposition. Die Flächen 2 und 4 sind hingegen nordwärts gerichtet und die Fläche 3 hat eine Südexposition. Die Flächenmittelpunkte liegen auf ca. 1900 bis 2050 m ü. M.

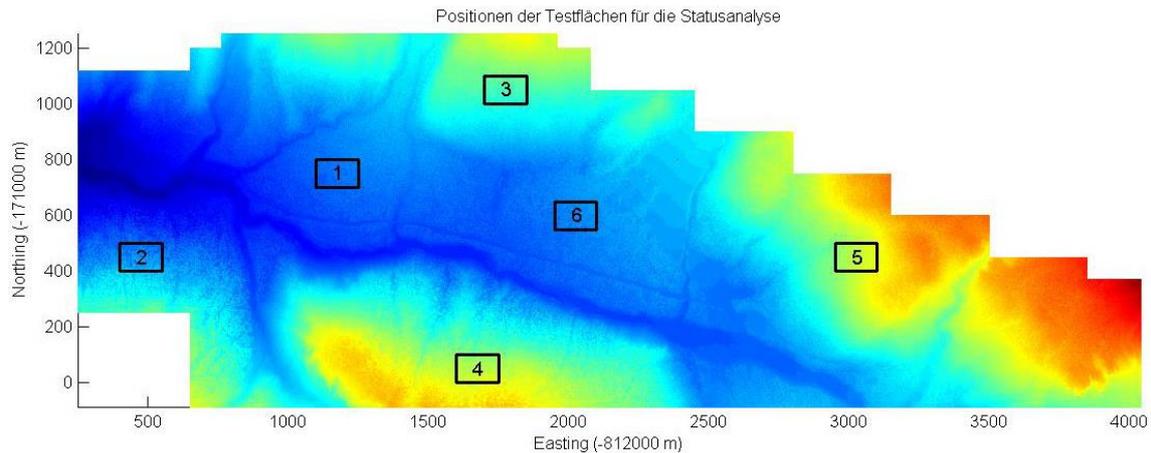


Abbildung 20 - Die Positionen der sechs Flächen für die Analyse der Statusveränderungen sind gut über die Untersuchungsfläche verstreut. Bei der Auswahl der Flächen wurde darauf geschaut, dass verschiedene Höhenstufen, Neigungen und Expositionen vertreten sind. Jede Fläche misst 150 m x 100 m.

Tabelle 1 - Baumartenzusammensetzung und Topografie der sechs Feldflächen. Während die Felder 1, 3, 5 und 6 einen Nadelholzanteil von 100% Bergföhre aufweisen, haben die Felder 2 und 4 verschiedene Nadelholzanteile. Auch Exposition, Höhe und Neigung der Flächen unterscheiden sich zum Teil stark.

Fläche	Baumartenanteile (Grobschätzung)	Exposition (\varnothing , in Grad)	Höhe (\varnothing , in m)	Neigung (\varnothing , in %)
1	100% Bergföhre	223 (SW)	1898	12
2	50% Arve 10% Bergföhre 15% Fichte 25% Lärche	10 (N)	1905	42
3	100% Bergföhre	180 (S)	1998	36
4	25% Arve 60% Lärche 15% Bergföhre	2 (N)	2045	41
5	100% Bergföhre	280 (W)	2051	30
6	100% Bergföhre	224 (SW)	1909	9

Für eine Teilfläche der LWF-Fläche als Beispiel ergibt sich das Lückenstatusraster der **Abbildung 21**. Als Erklärung dieser Rastergrafik, und nicht als deren Interpretation, dienen folgende Ausführungen. Die orangen Flächen zeigen Rasterpositionen, welche 2002 als Wald und 2010 als Lücke klassiert wurden. Treten solche Punkte geklumpt auf, kann dies auf einen umgefallenen Baum hin deuten. Einzelne orange Punkte können aufgrund des Kippens eines Baumes oder das Abbrechen eines Astes zustande gekommen sein. Diese orangen Rasterpunkte bilden zusammen mit den weissen Punkten die Lückenfläche 2010. Die weissen und schwarzen Rasterpunkte ergeben zusammen die Lückenfläche 2002, weil schwarz hier eine Veränderung von Lücke (2002) zu Wald (2010) bedeutet.

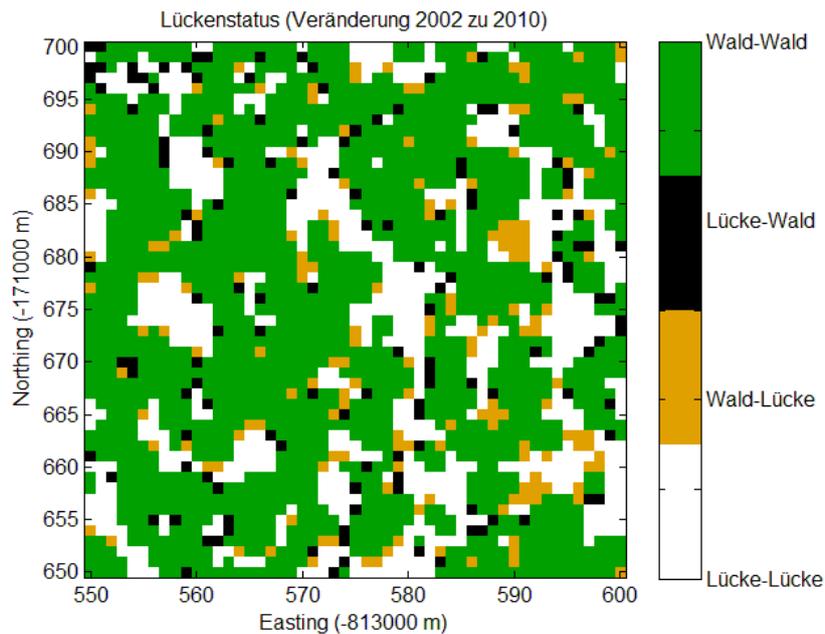


Abbildung 21 - In einem vergrösserten Ausschnitt des Lückenstatusrasters lassen sich die Positionen erkennen, wo die Pixel einen Statuswandel von Lücke zu Wald erfahren haben (schwarz). Andere Pixel hingegen haben eine Veränderung von Wald zu Lücke erfahren (orange). Die hellgrünen Flächen hingegen zeigen die Rasterpunkte, welche unverändert den Status Wald behalten haben und die weissen Pixel stehen für einen unveränderten Lückenstatus.

Mittels solcher Rastergrafiken können dann von Auge wiederholt auftretende Muster oder Auffälligkeiten erkannt und interpretiert werden. Dies hilft bei der Beantwortung der Fragestellung (ii) dieser Masterarbeit. Sollten sich also vermehrt an der Ostseite von Waldrändern orange Punkte häufen und an der Westseite vermehrt schwarze Punkte vorkommen, dann kann dies auf einen X-Achsenshift der beiden Lückenlayer 2002 und 2010 hin deuten. Sind jedoch die orangenen Punkte zufällig verteilt, jedoch die grünen Punkte mehrheitlich an den westlichen Waldgrenzen positioniert, dann kann dies ein richtungsabhängiges Zuwachsen bedeuten.

Diese Statusinformationen können zugleich auch zur Kontrolle der in **Kapitel 3.2** angesprochenen Interpolation von fehlenden Datenwerten dienen. Diese Überprüfung der Interpolation ist kein Teil der Forschungsfrage, doch können damit Informationen über die Verlässlichkeit der Datenaufbereitung gewonnen werden. Rasterpunkte, an denen keine Laserdatenpunkte erfasst wurden, mussten wie erwähnt interpoliert werden. Wenn diese Interpolation korrekt erfolgte, dann müssten diese Punkte verhältnismässig gleich häufig in jeder der vier Klassen (ll, lw, wl und ww) vorkommen. Sollte dies nicht der Fall sein, dann liegt ein systematischer Fehler in der Methode der Datenaufbereitung vor und kann, je nach Einflussstärke, die Resultate verfälschen. Aus diesem Grund befindet sich auch diese Überprüfung in der Datenanalyse. Als Untersuchungsflächen für diese Interpolationsfehler dienen dieselben vier Testflächen wie für die Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Rastergrössen auf den Waldanteil (**Abbildung 19** auf Seite 17).

3.5 Erfassung der Feldanalysedaten

Das explorative Erkennen und Erklären der Waldlücken und deren Dynamik in einem Bestand (Fragestellung (iii)), wird mittels einer Feldanalyse durchgeführt. Der Begriff Feldanalyse kommt daher, dass die gesamte Untersuchungsfläche in gleich grosse Felder unterteilt wurde. Zu jedem Feld wurden diverse Informationen ermittelt, aufgrund deren dann die

Lücken- und Walddynamik untersucht werden können. Ausser den Statusdaten und der Baumartenanteile wurden die Informationen jeweils für beide Jahre 2002 und 2010 ermittelt. Diese Analyse wurde für verschiedene Feldgrössen vollzogen. Als Feldgrössen wurden die Werte 10 m x 10 m, 20 m x 20 m, 30 m x 30 m, 40 m x 40 m und 50 m x 50 m gewählt. Für jedes einzelne Feld wurden die nachfolgenden Informationen ermittelt.

Lückenvariablen

- Anzahl Lückenpixel
- Lückenanteil [%] (Anzahl Lückenpixel / Anzahl Pixel des Feldes * 100%)
- Lücken-IDs
- Lückengrösse je ID [m²]
- Anzahl Lücken je Lückengrösse
- X- und Y-Koordinaten der Feldmitte

Feldflächenvariablen

- Mittelwert des Feldflächenazimutes (0° = Nordexposition, im Uhrzeigersinn steigend)
- Mittelwert der Feldflächenneigung [%]
- Mittelwert der Feldflächenhöhe [m ü. M.]

Landschaftsmetriken

- Anzahl Lückenkernelnflächen (Das sind Lückenpixel, welche rechts, links, oben und unten von weiteren Lückenpixeln umgeben sind.)
- Gesamtlänge der Lückenränder [m]

Lückenenwicklung

- Anzahl Lücken mit dem unveränderten Status *Wald* (Bezeichnung *ww*)
- Anzahl Lücken mit dem unveränderten Status *Lücke* (Bezeichnung *ll*)
- Anzahl Lücken mit der Statusänderung von *Wald* zu *Lücke* (Bezeichnung *wl*)
- Anzahl Lücken mit der Statusänderung von *Lücke* zu *Wald* (Bezeichnung *lw*)

Baumartenanteile (in 10% Stufen)

- Nadelholz
- Fichte
- Waldföhre
- Arve
- Lärche
- Bergföhre
- Legföhre

Wichtig hierbei ist, dass nur Felder mit reinen Waldflächen verwendet wurden (also z.B. keine Wiesen oder Flussbete) und dass diese von Menschen möglichst unbeeinflusst waren. Somit wurde für die Feldanalyse nur die Waldflächen verwendet, welche mit der Erklärung von **Kapitel 3.1** erstellt wurden. Ein weiteres Kriterium für die Feldanalyse war, dass nur Flächen verwendet wurden, welche eine flächendeckende LiDAR-Datenerfassung aufwiesen. Hierfür mussten mehrere Teilflächen zu einer Grossfläche kombiniert werden (**Abbildung 22**). Die Gesamtfläche wurde somit in neun Teilflächen segmentiert. Weil die Informationen aller Felder für jede Teilfläche als Vektordaten abgespeichert wurden und diese neun Teilflächenvektoren einfach zusammengesetzt werden konnten, kann für die Datenanalyse die zusammengesetzte Gesamtfläche unkompliziert als Ganzes untersucht werden. Doch bevor dies gemacht wird, sollen zu Testzwecken an einer kleinen, möglichst homogenen Testfläche ein paar Vorauswertungen gemacht werden (**Abbildung 37**). Dies soll dazu dienen, allenfalls auftretende Probleme oder Fehler in der Datenbearbeitung möglichst frühzeitig zu erkennen und beheben zu können.

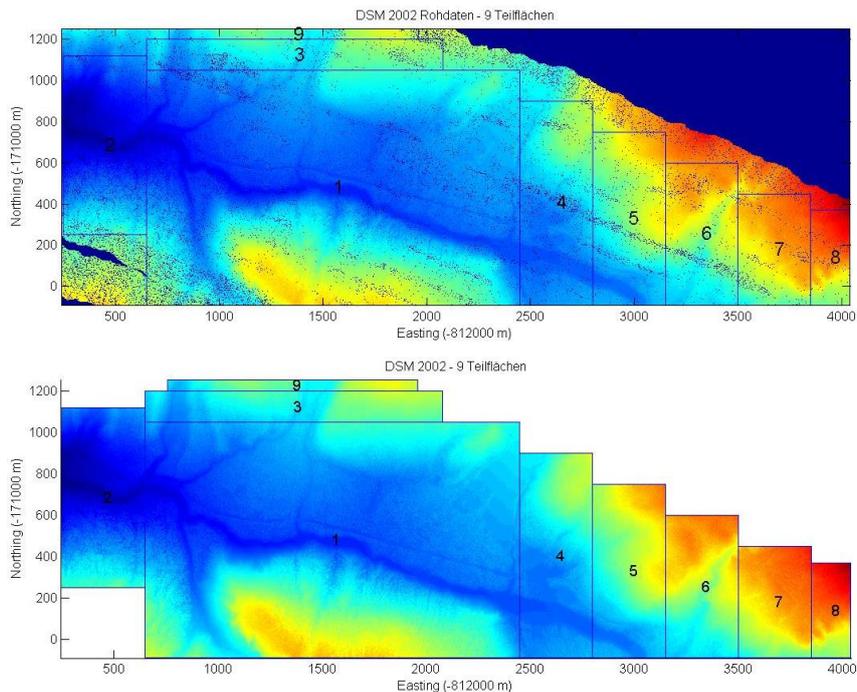


Abbildung 22 - Die LiDAR-Daten sind nicht flächendeckend für die ganze Untersuchungsfläche vorhanden (oben). Es gab zum Beispiel Streifen, welche nicht erfasst wurden (unten links im oberen Bild). Es mussten somit verschiedene Teilflächen zu einer kombinierten und bereinigten Gesamtfläche zusammengeschlossen werden (unten).

Um die Daten einfacher auswerten zu können, wurden diese in einem weiteren Schritt klassiert. Die Einteilung erfolgte jeweils in vier und zum Teil auch in acht Klassen.

Exposition

- Nord, West, Süd und Ost
- Nord, Nordwest, West, Südwest, Süd, Südost, Ost und Nordost

Neigung

- vier Klassen mit 0 - 25%, 25 - 50%, 50 - 75% und über 75%
- acht Klassen mit 0 - 12.5%, 12.5 - 25%, ..., 75 - 87.5% und über 87.5%

Höhe über Meer

- vier gleich grosse Intervalle zwischen minimal und maximal vorkommender Höhe
- acht gleich grosse Intervalle zwischen minimal und maximal vorkommender Höhe

Anteil Lückenpixel

- vier gleichgrosse Intervalle zwischen 0 und 100%
- acht gleichgrosse Intervalle zwischen 0 und 100%

Entwicklung

- ll, vier gleichgrosse Intervalle zwischen 0 und 100%
- lw, vier Klassen mit 0 - 5%, 5 - 10%, 10-20% und 20 - 100%
- wl, vier Klassen mit 0 - 5%, 5 - 10%, 10 - 20% und 20 - 100%
- ww, vier gleichgrosse Intervalle zwischen 0 und 100%

Kernfläche

- vier Klassen mit 0 - 12.5%, 12.5 - 25%, 25 - 50%, 50 - 100%

Grenzlänge

- vier gleichgrosse Intervalle zw. 0 m und der maximal vorkommenden Grenzlänge

4 Resultate

4.1 Genauigkeit der Rasterdaten

Die Höhendifferenzen der aus den RAW-Daten erstellten DTM-Rastern und den DTM aus den Originalrastern von TopoSys (jeweils innerhalb desselben Jahres verglichen) sind relativ klein (**Abbildung 23**). Die Mittelwerte der Abweichungen betragen in beiden Jahren null, oder praktisch null. Die Standardabweichung beträgt für das Jahr 2010 7 cm und für das Jahr 2002 41 cm. Die Abweichungen der Original-DTM zu den aus den RAW-Daten erstellten DTM liegen somit innerhalb der angegebenen 0.5 m.

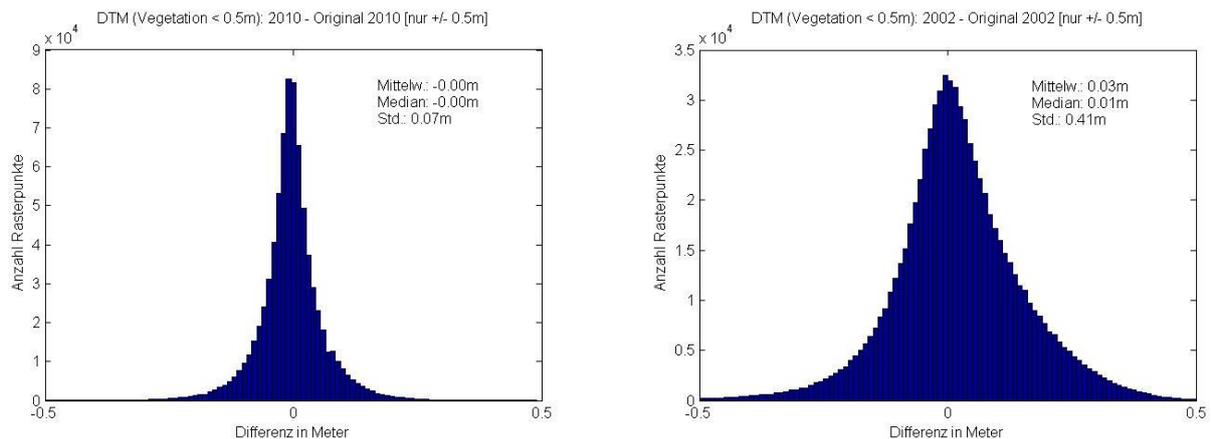


Abbildung 23 - Die Differenzwerte der aus den RAW-Daten erstellten Bodenraster und den von TopoSys erstellten DTM-Raster sind relativ klein. Mittelwert und Median sind jeweils praktisch Null und die Standardabweichung von 7 cm (2010) und 41 cm (2002) sind klein. Berücksichtigt wurden nur Rasterpositionen mit einer Vegetation < 0.5 m.

Auch die DSM-Rasterpunkte 2010 der Untersuchungsfläche mit einer Vegetation von unter 0.5 m entsprechen sehr gut den DSM-Punkten vom Jahr 2002 (**Abbildung 24**). Der Median von 6 cm lässt auf einen leichten, positiven Höhenshift des DSM 2010 gegenüber 2002 schließen. Obwohl die meisten Abweichungen im Ausschnitt von ± 0.5 m über dem Nullwert liegen, beträgt der Mittelwert -6 cm. Das heisst, es sind vereinzelt grosse Negativdifferenzen vorhanden, welche den Mittelwert ins Negative ziehen und die Standardabweichung auf 1.08 m erhöhen. Doch diese Werte sind nicht ausschlaggebend. Für die Untersuchung des Höhenshifts genügt der Medianwert und dieser hält sich relativ klein.

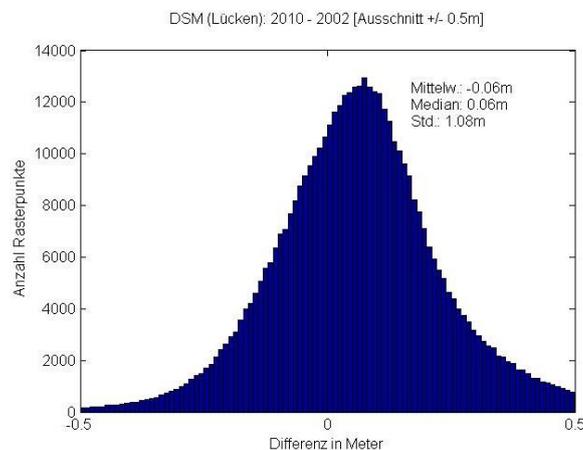


Abbildung 24 - Die Differenzwerte des DSM-Raster 2010 minus 2002 lassen auf einen Höhenshift des DSM 2010 gegenüber 2002 von plus 6 cm schließen. Hierfür wurden nur Rasterpunkte mit einer Vegetationshöhe von maximal 0.5 m berücksichtigt, um den Einfluss der Höhenveränderung von Baum- und Strauchvegetation auszuschliessen.

Die Differenzverteilung der beiden DTM aus den RAW-Daten hat eine ähnliche Form wie bei den DSM-Differenzen, doch hier ist der Höhenshift im Schnitt praktisch Null (**Abbildung 25 links**). Hingegen ergeben sich beim Vergleich der beiden Original-DTM 2002 und 2010 praktisch dieselben Resultate wie bei den DSM-Differenzen. Der Median der Abweichungen beträgt 8 cm, was auf einen Höhenshift des Original-DTM 2010 gegenüber 2002 schliessen lässt (**Abbildung 25 rechts**).

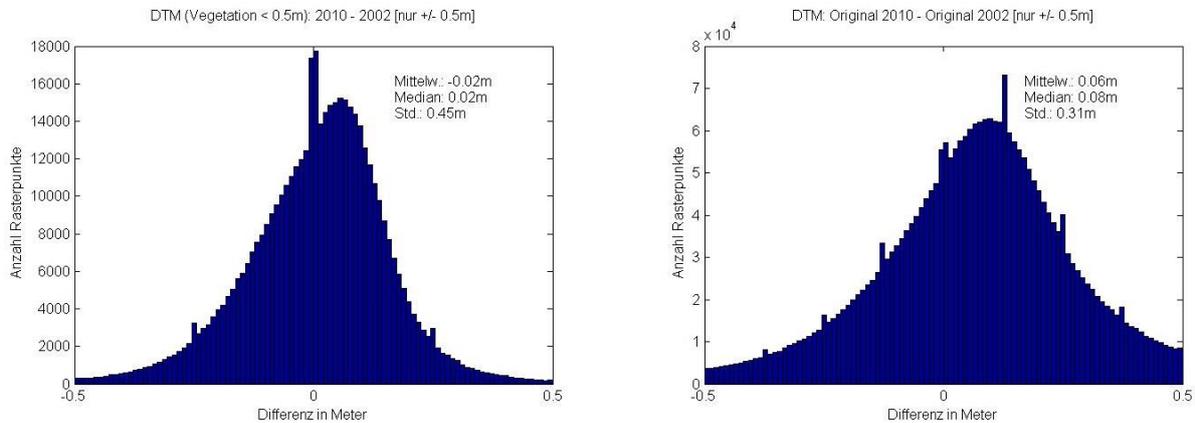


Abbildung 25 - Die Differenzen der aus den RAW-Daten generierten DTM (2010-2002) liegen im Schnitt praktisch bei Null (Histogramm links). Eine leichte Verschiebung weisen hingegen die Original-DTM (2010-2002) zueinander auf (rechts), doch liegt der Shift mit einem Wert von im Schnitt 8 cm sehr nahe bei Null. Dargestellt sind hier nur die Differenzen von ± 0.5 m.

4.2 Auswirkungen von unterschiedlichen Rastergrößen und Schwellenwerten

4.2.1 Bestimmung der Waldanteile mittels verschiedener Rastergrößen

Die Waldanteile für die unterschiedlichen Rasterauflösungen variieren sehr stark (Tabelle 2). Für die Fläche 1 ergibt ein Wechsel von der Rastergröße 0.5 m auf 3 m einen um 45.4% grösseren Waldanteil. Um die Daten besser interpretieren zu können, sind die Waldanteile 2002 und 2010 der vier Testflächen in einzelnen Plots dargestellt und deren Kurven mittels Polygon-Trendlinien ergänzt (**Abbildung 26**). Bei der fiktiven Auflösung von 0 m ergibt sich mittels der Trendlinien für die Flächen 1 und 2 Waldanteile zwischen 30% bis 40%. Bei der Fläche 3 geht der Waldanteil gegen 60% und bei der Fläche 4 beträgt dieser um die 50%. Bei einer Auflösung um 4 m tendiert der Waldanteil bei allen Flächen gegen 100%.

Tabelle 2 - Der ermittelte Waldanteil variiert sehr stark durch die Wahl einer anderen Rastergröße. Die grösste Differenz ist für die Fläche 1 im Jahr 2010 festzustellen. Hier beträgt die Differenz der Waldanteile zwischen einer Auflösung von 0.5 m und 3 m 45.4%. Für die Abgrenzung von Wald/Lücke wurde überall der Schwellenwert 3 m verwendet.

Rasterauflösung [m]	Waldanteil [%]							
	Fläche 1		Fläche 2		Fläche 3		Fläche 4	
	2002	2010	2002	2010	2002	2010	2002	2010
0.5	53.3	51.5	57.0	54.0	66.8	65.4	61.7	59.3
1	68.6	68.7	70.8	73.5	71.3	74.4	67.8	69.9
2	89.1	89.5	90.4	92.8	83.4	85.2	82.4	84.2
3	96.3	96.9	97.8	98.7	90.9	92.3	91.2	92.1

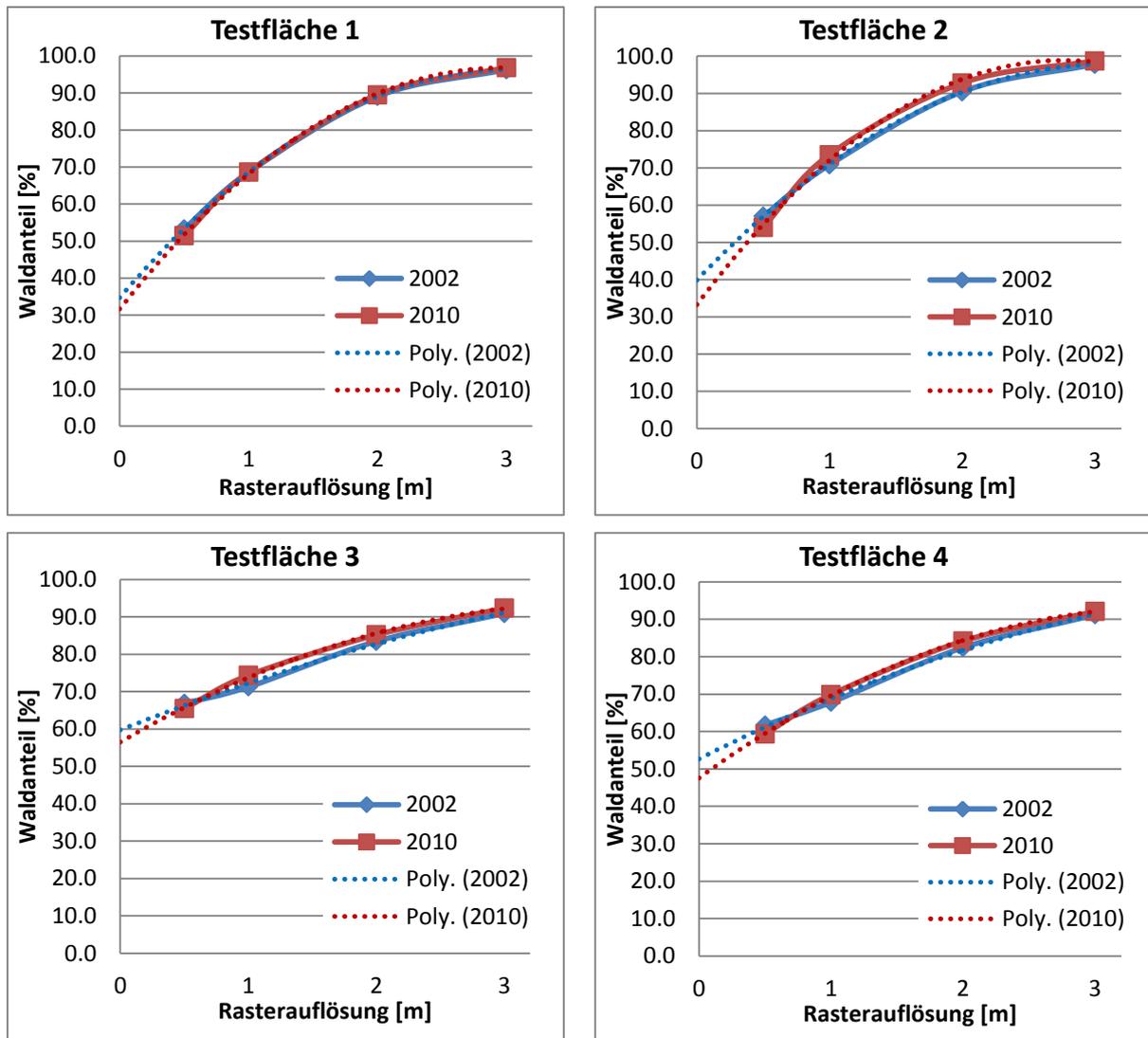


Abbildung 26 - Der ermittelte Waldanteil ist stark von der gewählten Rastergröße abhängig. Je kleiner die Rastergröße, desto kleiner ist auch der Waldanteil. Die gestrichelten Linien geben die Tendenz für Rasterauflösungen unter 0.5 m an. Bei der Punktwolkendichte der vorhandenen LiDAR-Daten macht jedoch eine Rasterauflösung unter 0.5 m keinen Sinn. Die Waldflächen tendieren bei einer Rastergröße von 4 m gegen 100%. Der Schwellenwert für die Waldflächenbestimmung beträgt hier überall 3 m.

Die Abbildungen zeigen ein interessantes Phänomen. Während die Waldanteilskurven 2002 (blaue, ausgezogene Linien) von der Auflösung 3 m hin zur Auflösung 1 m kontinuierlich stärker sinken, erfahren diese Kurve zwischen den Auflösungen 1 m und 0.5 m einen Knick. Die Waldanteile für das Jahr 2002 sind laut den Daten für die Auflösungen 1 m bis 3 m mehrheitlich kleiner als für das Jahr 2010. Doch aufgrund des Kurvenknicks sind die Waldanteile für die Auflösung von 0.5 m für alle Testflächen im Jahr 2002 grösser als 2010. In den punktierten Polygontrendlinien zweiten Grades sind jeweils die Knicke ausgeglättet.

4.2.2 Bestimmung der Waldanteile mittels verschiedener Schwellenwerte

Die Waldflächen nehmen mit steigendem Hörschwellenwert bei allen Testflächen ab (**Tabelle 3**). Die grösste Veränderung durch die Variation der Hörschwelle erfährt die Fläche 2 für das Jahr 2002 (**Abbildung 27**). Sie ist die steilste aller vier Testflächen. Hier ergibt sich vom Schwellenwert 4 m zum Schwellenwert 1 m ein absoluter Waldflächenunterschied von 12.8%, was einer relativen Flächenzunahme von 19.3% entspricht. Die relative

Waldflächenzunahme für die Schwellenwerte 3 m und 2 m beträgt für alle vier Flächen nur noch maximal 5.6% (wiederum bei der Fläche 2). Der Mittelwert der relativen Waldflächenzunahme dieser vier Testflächen beträgt 3.4% und die Standardabweichung 1.45%. Für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit wird der Einfachheit halber nur noch mit einem einzigen Schwellenwert gearbeitet. Wie beim LFI beträgt dieser 3 m.

Tabelle 3 - Diese Tabelle listet die prozentualen Waldanteile der Jahre 2002 und 2010 von vier Testflächen auf. Dabei werden jeweils unterschiedliche Schwellenhöhen für die Abgrenzung Wald-Lücke verwendet. Wie zu erwarten, werden die Waldanteile mit zunehmendem Schwellenwert kleiner. Die Rasterauflösung beträgt hier 1 m.

		Waldanteil [%]							
		Fläche 1		Fläche 2		Fläche 3		Fläche 4	
Schwellenwert [m]		2002	2010	2002	2010	2002	2010	2002	2010
1		75.1	76.9	78.8	81.3	75.2	76.9	74.8	74.1
2		71.3	71.9	74.8	77.3	72.3	75.1	70.0	71.2
2.7		69.3	69.6	72.0	74.6	71.5	74.6	68.3	70.2
3		68.6	68.7	70.8	73.5	71.3	74.4	67.8	69.9
4		66.4	66.5	66.0	68.8	70.5	73.8	66.6	68.9

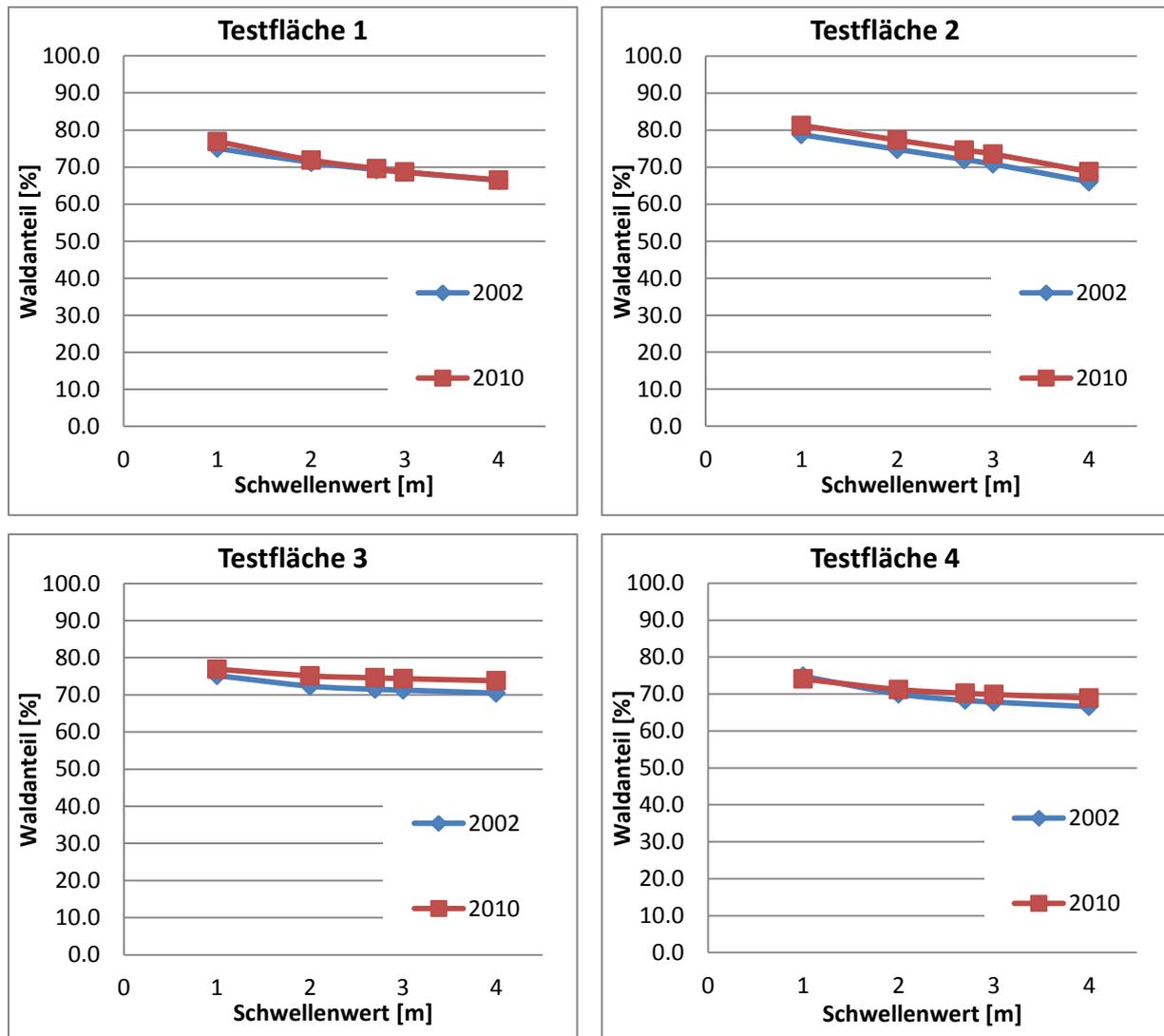


Abbildung 27 - Die Waldanteile nehmen mit sinkendem Schwellenwert relativ linear zu. Am grössten sind diese Änderungen bei der Testfläche 2. Die Änderungen sind jedoch gering, denn bei einer Schwellenwertänderung von 3 m auf 2.7 m resultiert eine relative Waldflächenzunahme von nur 1.7%. Die Rastergrößen betragen überall 1 m.

Um den Einfluss eines allfälligen lokalen Rasterhöhenshifts von 0.3 m zu ermitteln, wurde noch der Schwellenwert 2.7 m mit einbezogen. Auch hier sind wiederum die Abweichungen in der Testfläche 2 für das Jahr 2002 am grössten. Diese Waldfläche erfährt durch den um 30 cm gegenüber 3 m verringerten Schwellenwert eine relative Zunahme von 1.7%. Der Mittelwert aller vier Flächen liegt bei einer relativen Zunahme von 0.9% mit einer Standardabweichung von 0.46%.

4.3 Interpolationsfehler undefinierter Rasterpunkte

Im Folgenden wird anhand der vier Testflächen (**Abbildung 19** auf Seite 17) untersucht, wie die Positionen der Pixel mit fehlenden Messdaten in den vier Klassen verteilt sind. Weil die Verteilungen für alle Testflächen qualitativ ähnlich aussehen, werden hier nur die Resultate der Testfläche 1 (LWF-Fläche) dargestellt (**Abbildung 28**). Die **obere Balkendiagrammreihe** zeigt die totale Pixelzahl je Statuskategorie. Mit einem Waldanteil von knapp 70% (**Tabelle 3** auf Seite 25) für die gewählte Rasterauflösung von 1 m und dem Schwellenwert von 3 m weist die Kategorie *Wald-Wald* erwartungsgemäss die grösste Pixelzahl auf. 64.3% aller Pixel der LWF-Fläche sind dieser Kategorie zugeordnet. Die zweitgrösste Kategorie stellt die *Lücke-Lücke*-Klasse dar. In dieser Kategorie befinden sich 26.7% aller Testflächenpixel. Somit haben die übrigen 9% aller Pixel einen Wandel von Wald zu Lücke (3.5%) oder eine Veränderung von Lücke zu Wald (5.5%) erfahren.

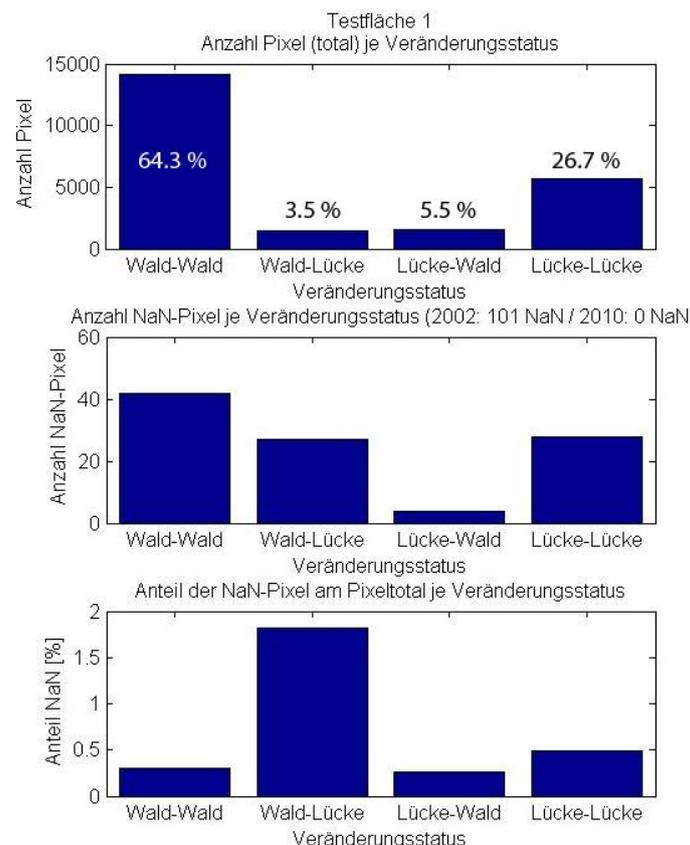


Abbildung 28 - Die Balkendiagramme stellen die Anzahl Pixel (oben), die Anzahl fehlender Datenpunkte (Mitte) und die Anteile fehlender Datenpunkte (unten) der vier Veränderungskategorien dar. Die oberste Balkenreihe zeigt, dass die meisten Pixel unverändert Wald blieben und die wenigsten Pixel wechselten den Status von Wald zu Lücke. Die zweite Reihe zeigt jedoch, dass fast genauso viele fehlende Datenpunkte im Status Wald-Lücke, wie im Status Wald-Wald aufzufinden waren. Somit befinden sich im Verhältnis der Anzahl Pixel (oberste Reihe) überproportional viele Datenlücken im Status Wald-Lücke. Dies bestätigt die unterste Balkenreihe. Hier wird der Anteil der fehlenden Datenpunkte gegenüber den Pixelzahlen dargestellt. Bei einer zufälligen Verteilung wären die untersten Balken jeweils gleich hoch.

Wenn man nun annehmen würde, dass die Pixel mit fehlenden Laserdaten (NaN-Pixel) mit derselben Wahrscheinlichkeit in allen vier Kategorien (ww, wl, lw und ll) vorkommen, dann müssten die **Balken der zweiten Diagrammreihe** dieselben Formen aufweisen, wie jene der ersten Diagrammreihe. Wie man aus der Grafik erkennen kann, trifft dies nicht zu. Nun hat die Klasse lw die kleinste Pixelzahl, während die Klassen wl und ll in etwa dieselbe Anzahl Pixel aufweisen. Die Klasse mit den unveränderten Waldpixeln weist hier nur noch einen leicht höheren Wert auf. Die **unterste Balkenreihe** zeigt den Anteil der Pixel mit fehlenden Laserdaten am Pixeltotal jeder Kategorie in Prozent an. Bei einer zufälligen Verteilung der NaN-Pixel müssten hier alle Balken dieselbe Höhe aufweisen. Wie man erkennen kann, ist das nicht der Fall.

Auf der obersten Balkendiagrammreihe ist zudem noch zu erkennen, dass die Kategorie *Lücke-Wald* leicht mehr Pixel aufweist, als die Kategorie *Wald-Lücke*. Das heisst, die Waldfläche 2010 wurde laut dieser Darstellung gegenüber 2002 leicht grösser. Genau dieselbe Information konnte schon aus der **Abbildung 26** (Seite 24) und der **Abbildung 27** (Seite 25) entnommen werden.

4.4 Dynamik des Veränderungsstatus

Bevor die Raster der Wald- und Lückenveränderungen betrachtet werden, folgt erst noch ein Blick auf die DSM-Differenzen zwischen den beiden Jahren (2010 - 2002). Als Ausschnitt dient die LWF-Fläche. Bei diesen Höhendifferenzen sind Veränderungen von ca. - 15 m bis + 15 m zu erkennen (**Abbildung 29 links**). Die Änderungen erscheinen in der positiven und negativen Achse relativ ausgeglichen. Dunkelblaue Punkte in der **Abbildung 29 rechts** zeigen Positionen, welche eine grosse Negativveränderung erfahren haben. Das umgekehrte ist für die dunkelroten Flächen der Fall, sie haben eine Höhenzunahme erfahren. Die Abbildung lässt erkennen, dass die dunkelblauen Punkte häufiger grossflächig geklumpt auftreten, als dies für die roten Punkte der Fall ist. In dieser Grafik lässt es sich nur recht schwer erkennen, aber häufig liegen rote und blaue Punkte angrenzend nebeneinander.

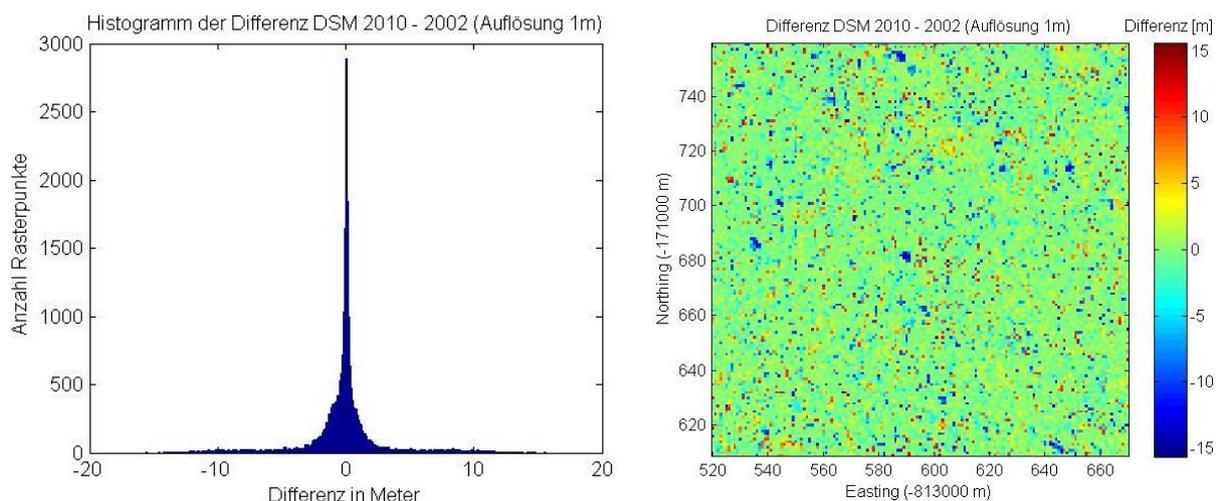


Abbildung 29 - In der LWF-Fläche betragen die DSM-Differenzen bis zu ± 15 m (Histogramm links). Diese Differenzen können zustande kommen, wenn z.B. ein Baum umfällt oder wenn ein Ast über ein als Lücke klassiertes Pixel wächst. Die Positionen mit einer starken Höhenabnahme lassen sich im Differenzraster (rechts) gut erkennen (dunkelblaue Rasterpunkte). Die roten Punkte stellen hingegen eine starke Höhenzunahme dar.

Die vorhergehenden Datenauswertungen haben gezeigt, dass die Waldflächen leicht zugenommen haben. Nun werden die Daten daraufhin untersucht, wo diese Zunahmen erfolgt sind oder wo sich Lücken vergrößert haben. Hierfür werden die Flächen 1 bis 6 betrachtet (**Abbildung 20**), an welchen der Veränderungsstatus ermittelt wurde (**Abbildung 30 bis Abbildung 35**). Auffallend ist, dass die Flächen 2 und 4 ein markant anderes Wald- und Lückenmuster aufweisen als die übrigen vier Flächen. Ihre Kronendurchmesser und Baumabstände sind um einiges grösser. In den Flächen 1, 3, 5 und 6 sind hingegen die Lücken viel fragmentierter als in den Ausschnitten 2 und 4. Hierzu muss erwähnt werden, dass die Flächen 2 und 4 im Gegensatz zu den übrigen Flächen nicht zu 100% aus Bergföhren, sondern aus unterschiedlichen Nadelhölzern zusammengesetzt sind. Zudem haben diese beiden Flächen eine Nordexposition, während die übrigen Flächen Süd-, Südwest und Westexpositionen aufweisen.

Betrachtet man jeweils die grösseren orangen Flächen, welche für umgefallene oder gekippte Bäume stehen, so fallen visuell in keiner der sechs Flächen besondere Richtungstendenzen auf. Es lässt sich nicht sagen, dass die Bäume mehrheitlich z.B. an der Westgrenze oder an der Nordgrenze einer Lücke gekippt oder umgefallen sind. Dasselbe gilt für die einzelnen orangen Pixelpunkten an der Wald-Lücken-Grenze. Sie treten in allen Richtungen in etwa gleich häufig auf. Auch die schwarzen Punkte, welche für das Einwachsen von Bäumen stehen, weisen in diesen Abbildungen keine auffälligen Richtungstendenzen auf.

Neben den oben angesprochenen unterschiedlichen Wald- und Lückenmustern der Flächen 2 und 4 gegenüber den Flächen 1, 3, 5 und 6 gibt es zusätzlich Differenzen in den Positionen der neuen Lückenpunkte (orange). In den beiden Flächen 2 und 4 verteilen sich diese neu entstandenen Lückenrasterpunkte hauptsächlich an den Wald-Lücken-Grenzen. Hingegen sind in den übrigen und stärker fragmentierten Flächen häufig auch mitten in den Waldflächen neue Lückenpunkte entstanden. Die an Waldrändern entstandenen Lückenpunkte sind meist grösser (klumpiert) während die neuen Lückenrasterpunkte innerhalb der Waldflächen eher solitär auftreten.

Auch die grünen Lücken-Wald-Punkte kommen bei den Flächen mit verschiedenen Nadelholzanteilen (Flächen 2 und 4) hauptsächlich an den Wald-Lücken-Rändern vor. Bei den Flächen mit 100% Bergföhre sind diese Punkte hingegen zufällig über die gesamte Fläche verteilt. Sie konzentrieren sich nicht an den Wald-Lücken-Grenzen und kommen sehr oft auch innerhalb der Waldflächen vor. Häufig sind sie auch solitär oder leicht klumpiert innerhalb der Lückenflächen anzutreffen.

Die Flächen 1 und 6 zeigen zudem zum Teil besonders viele Rasterpunkte innerhalb der Waldfläche, welche einen Wandel von Lücke zu Wald (schwarz) erfahren haben. Ein direkter Vergleich (ohne Abbildung) mit den Rasterpunktpositionen mit fehlendem Datenwert (wie in **Abbildung 6** auf Seite 7) hat ergeben, dass diese schwarzen Einwachspunkte nicht aus Interpolationsfehlern entstanden sind. Dieser Waldzuwachs ist laut Daten real. Die Waldfläche 2002 war laut diesen Darstellungen in den Flächen 1 und 6 also noch etwas lückiger als im Jahr 2010.

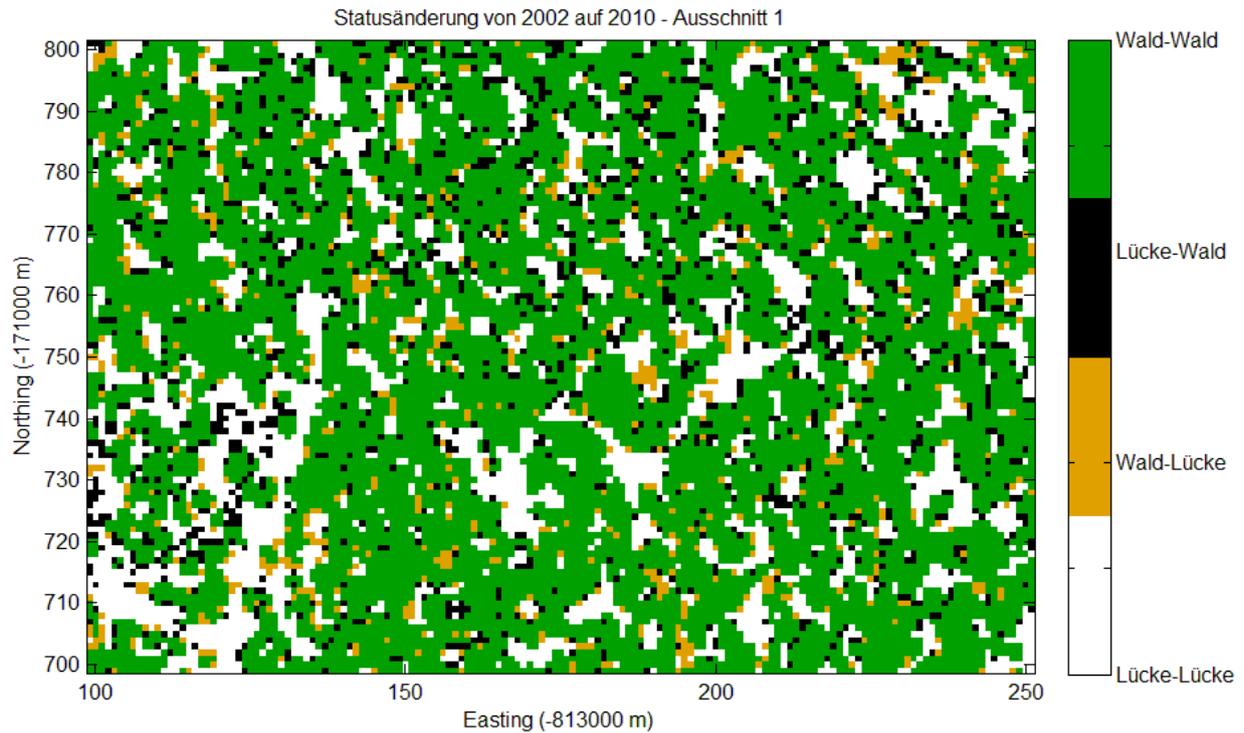


Abbildung 30 - Die Fläche 1 hat einen Bergföhrenanteil von 100% und befindet sich auf ca. 1898 m ü. M. Die Exposition ist Südwest und die Hangneigung beträgt durchschnittlich 12%.

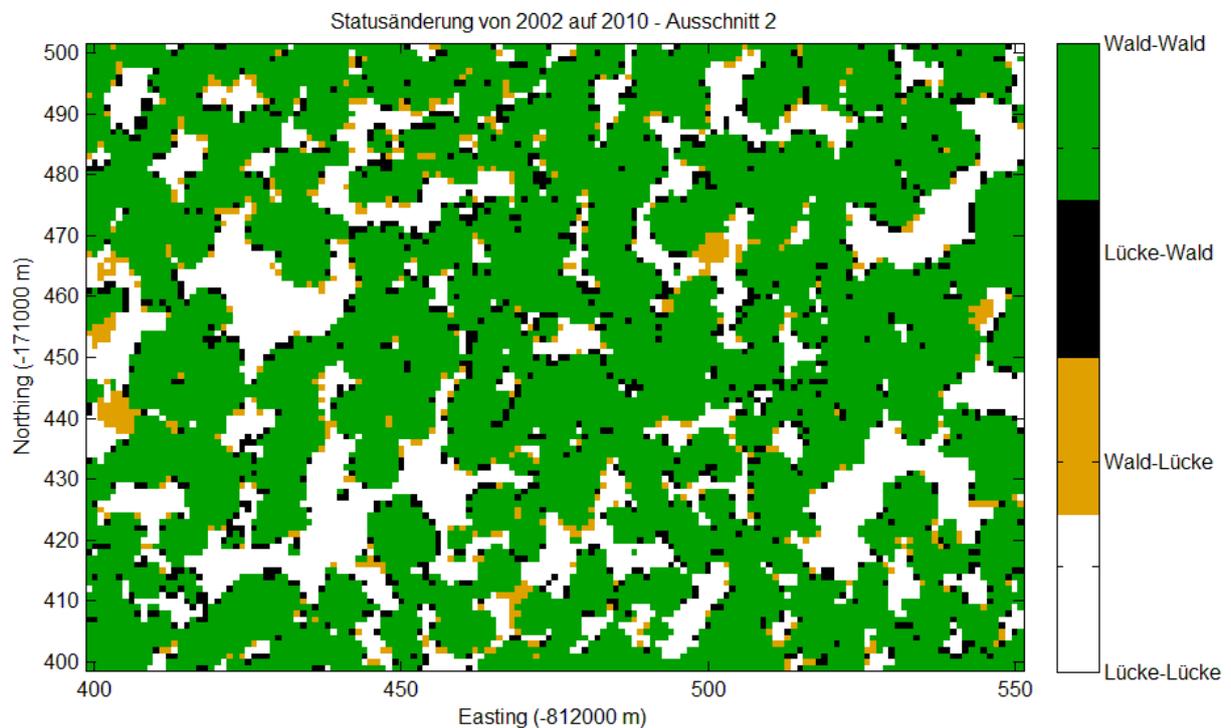


Abbildung 31 - Die Baumartenanteile der Fläche 2 liegen bei ca. 50 % Arve, 10 % Bergföhre, 15 % Fichte und 25 % Lärche. Die Höhe beträgt ca. 1905 m ü. M., die Exposition ist Nord und die durchschnittliche Hangneigung beträgt 42 %.

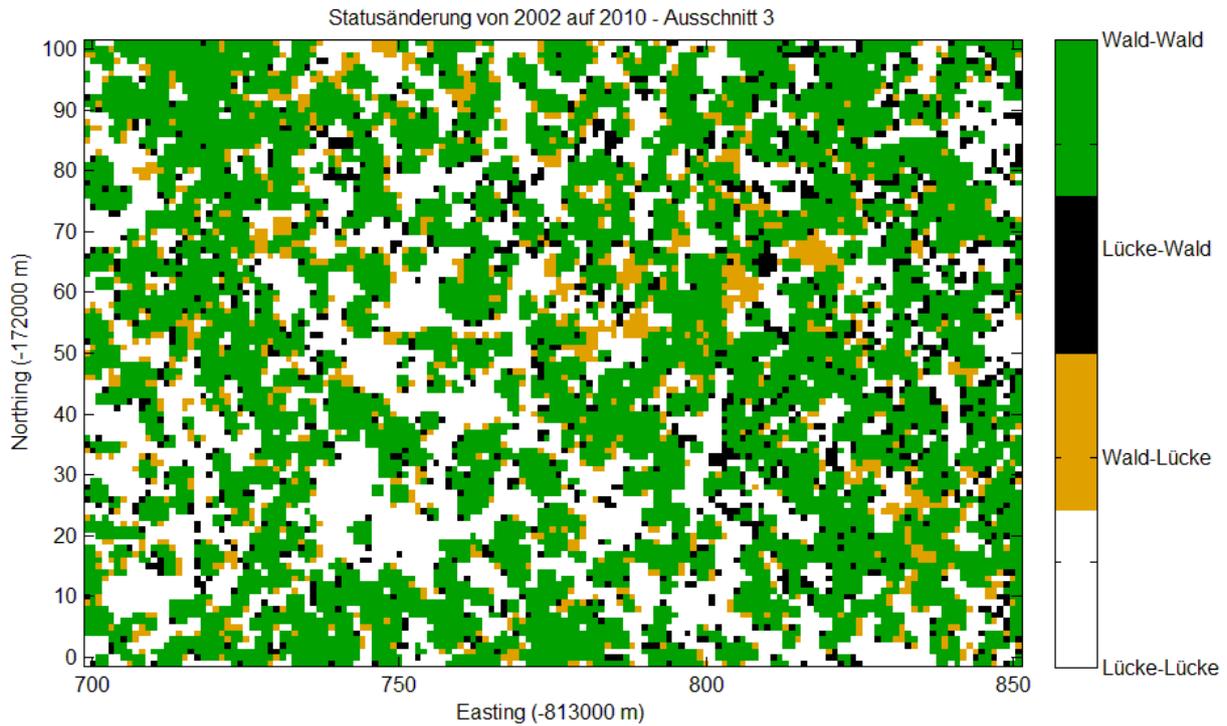


Abbildung 32 - Die Fläche 3 hat einen Bergföhrenanteil von 100 % und befindet sich auf ca. 1998m ü. M. Die Exposition ist Süd und die Hangneigung beträgt durchschnittlich 36 %.

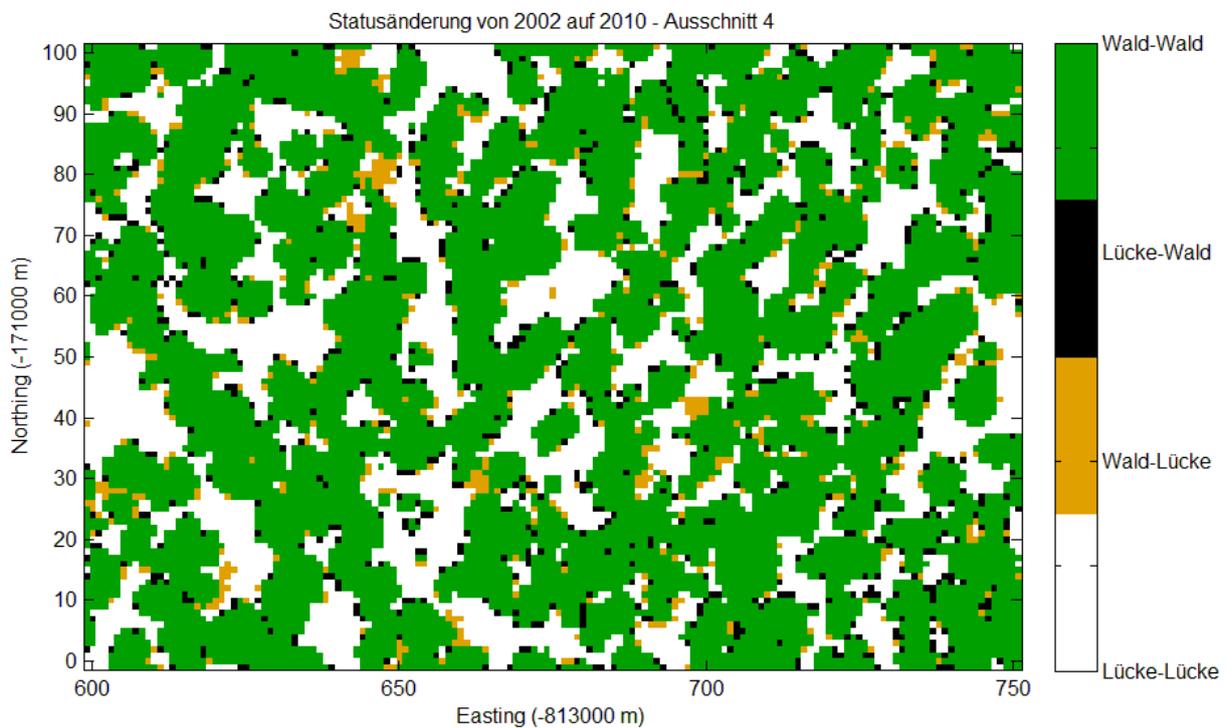


Abbildung 33 - Die Baumartenanteile der Fläche 4 liegen bei ca. 25 % Arve, 60 % Lärche und 15 % Bergföhre. Die Höhe beträgt ca. 2045 m ü. M., die Exposition ist Nord und die durchschnittliche Hangneigung beträgt 41 %.

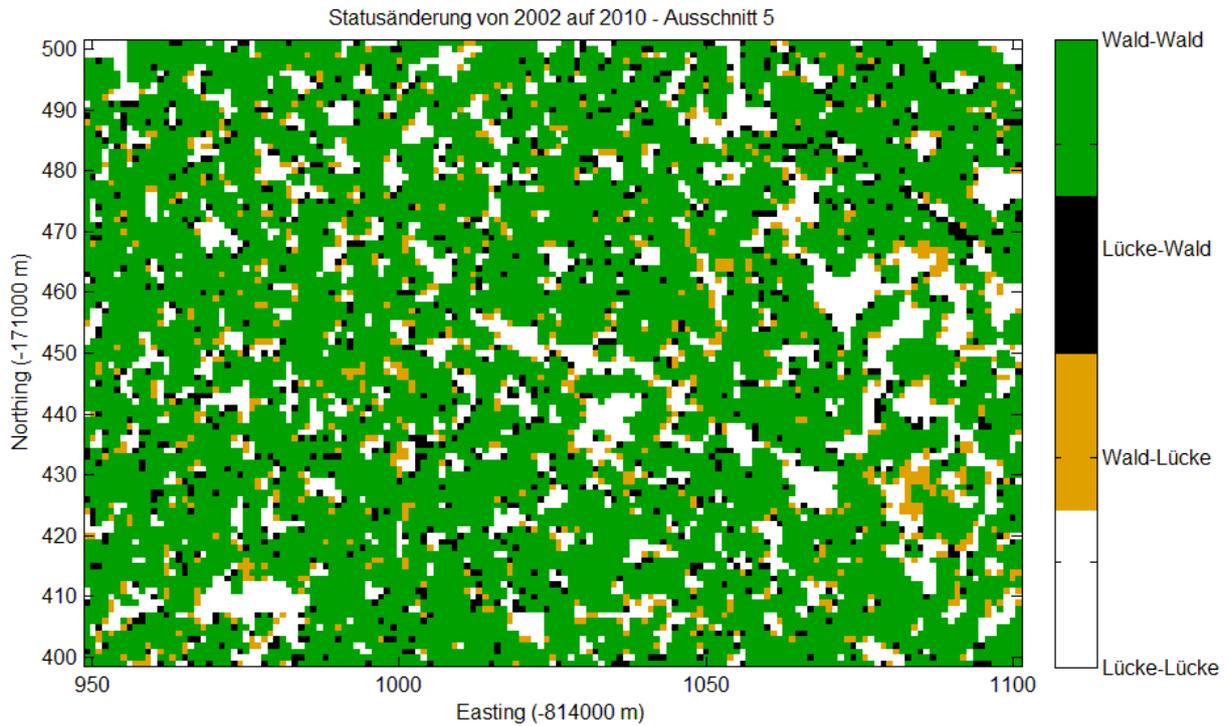


Abbildung 34 - Die Fläche 5 hat einen Bergföhrenanteil von 100 % und befindet sich auf ca. 2051 m ü. M. Die Exposition ist West und die Hangneigung beträgt durchschnittlich 30 %.

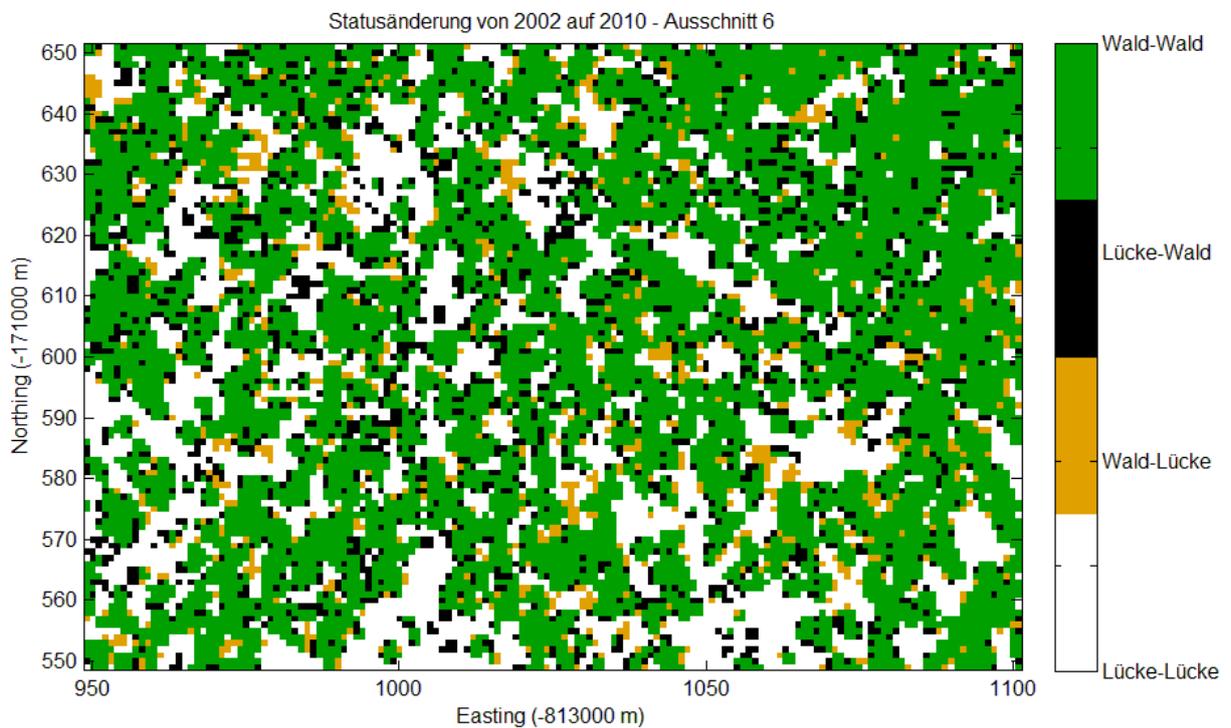


Abbildung 35 - Die Fläche 6 hat einen Bergföhrenanteil von 100 % und befindet sich auf ca. 1909 m ü. M. Die Exposition ist Südwest und die Hangneigung beträgt durchschnittlich 9%.

Eingangs dieses Kapitels wurde für die DSM-Differenzen in der LWF-Fläche festgehalten, dass die Rasterpunkte mit grosser Höhenabnahme häufiger grossflächig geklumpt auftreten als jene mit einer Positivveränderung. In den sechs soeben besprochenen Veränderungsrastern ergab sich der Eindruck, dass die orangen *Wald-zu-Lücke-Flächen*, welche für die Rasterpunkte mit einer Höhenabnahme unter den Schwellenwert stehen, allgemein etwas grösser sind als die schwarzen *Lücke-zu-Wald-Flächen*. Um dies etwas objektiver beurteilen zu können, wurden die Anzahl Flächen für jede vorkommende Flächengrösse für beide Veränderungsklassen in XY-Plots dargestellt. Für die Fläche 2 wird dabei gleich ersichtlich, dass die grössten zusammenhängenden *Wald-zu-Lücke-Flächen* grösser sind als jene der *Lücke-zu-Wald-Flächen* (**Abbildung 36 rechts**). Somit bestätigt sich hier der erwähnte Eindruck der etwas grösseren Klumpierung oranger Flächen. Die Anzahl der kleinen *Lücke-zu-Wald-Flächen* (1 m^2 und 2 m^2) ist laut dieser Darstellung grösser als jene der *Wald-zu-Lücke-Flächen*. Für die Fläche 1 hingegen sind die grössten zusammenhängenden Flächen in etwa gleich gross. Aber auch hier ist die Zahl der kleinen *Lücke-zu-Wald-Flächen* grösser als jene der *Wald-zu-Lücke-Flächen*. Die Fläche 4 verhält sich gleich wie die Fläche 2 und die Flächen 3, 5 und 6 verhalten sich wie die Fläche 1. Deshalb wird auf deren Darstellungen verzichtet. Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich die Flächen mit 100% Bergföhre etwas anders verhalten als jene aus verschiedenen Baumarten zusammengesetzten Flächen.

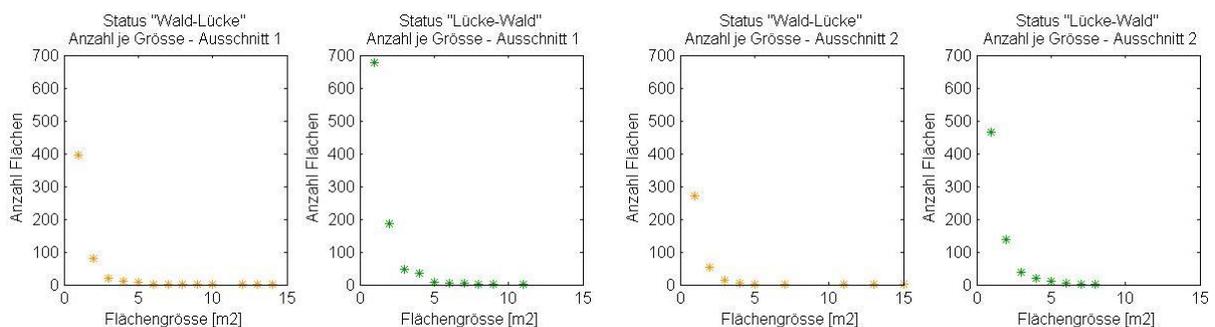


Abbildung 36 - Für die Flächen mit 100% Bergföhre (links als Vertreter die Fläche 1) sind die grössten zusammenhängenden Flächen in beiden Veränderungskategorien (Lücke-zu-Wald und Wald-zu-Lücke) in etwa gleich gross. In den Flächen mit gemischten Baumartenanteilen hingegen (rechts als Vertreter die Fläche 2) sind die grössten zusammenhängenden Wald-zu-Lückenflächen um einiges grösser als in der Lücke-zu-Wald-Kategorie. In allen sechs Flächen ist die Anzahl der kleinsten Flächen mit Veränderung von Lücke zu Wald grösser als jene der andern Kategorie.

4.5 Auswertung der Feldanalyse

4.5.1 Testfläche

Bevor die statistische Auswertung zur Fragestellung (iii) mit dem gesamten Datensatz (neun zusammengesetzten Flächen) vollzogen wird, werden ein paar Auswertungen in einer kleinen, möglichst homogenen Testfläche (**Abbildung 37**) gemacht werden. Diese Testfläche reicht von 1900 bis 2080 Meter über Meer und weist einen Bergföhrenanteil von 100% auf. Die Felder sind hauptsächlich südwärts gerichtet. Man erkennt dies an den mehr oder weniger horizontalen Farblinien in der **Abbildung 38**. Trägt man die Neigung der einzelnen Felder in Abhängigkeit von deren Höhen in einem XY-Diagramm auf, so zeigt sich eine durchschnittliche Feldflächenneigung von meist zwischen 30 und 50% (**Abbildung 39**). Es hat vereinzelt auch stärker oder schwächer geneigte Flächen in dieser Testfläche.

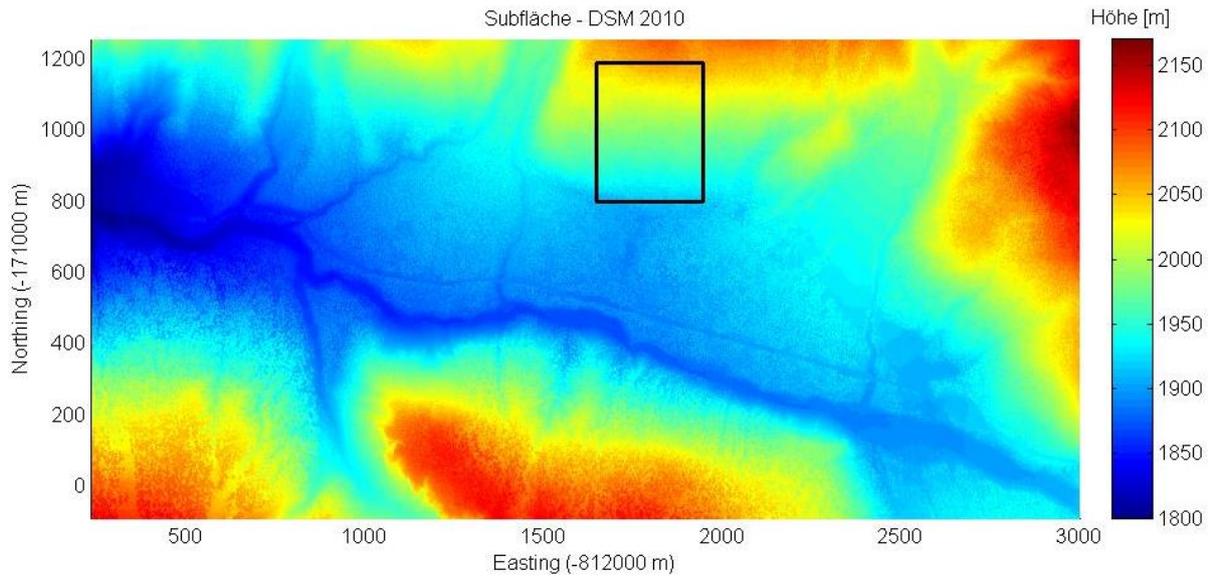


Abbildung 37 - Die Auswertung der Feldflächendaten wird vorerst für eine Testfläche des Untersuchungsgebietes vollzogen. Diese Testfläche befindet sich nordwestlich von Il Fuorn und damit nördlich der Ofenpasstrasse. Der Bergföhrenanteil der Testfläche beträgt 100%.

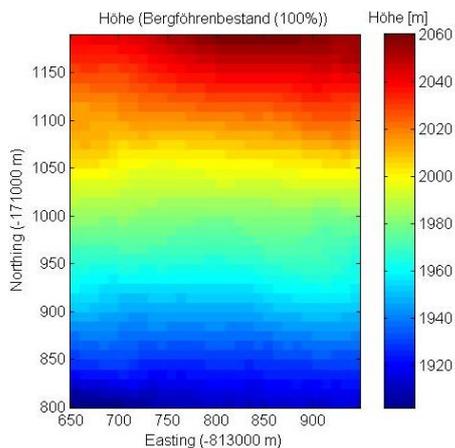


Abbildung 38 - Jeder farbige Punkt in der Testfläche steht für die durchschnittliche Hangexposition eines Feldes mit der Feldseitenlänge von 10 m. Wie man an den mehr oder weniger horizontalen Farbverläufen erkennen kann, weisen die Felder mehrheitlich eine Südexposition auf.

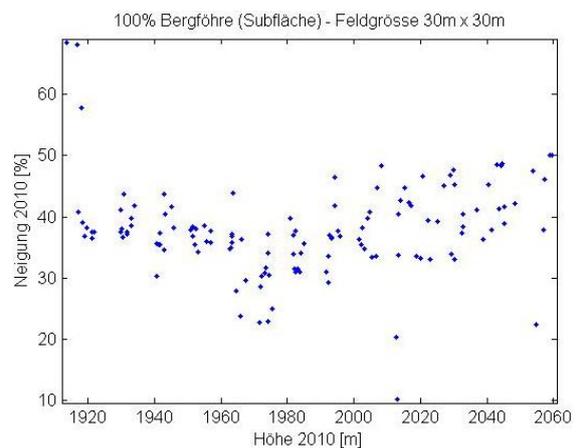


Abbildung 39 - Die Testfläche hat eine mittlere Steilheit von ca. 40%. Die Neigungen der Felder betragen meist zwischen 30 und 50%. Der Mittelteil ist eher etwas weniger steil als der obere Teil. Vereinzelt hat es auch Felder mit grösserer oder kleinerer Neigung.

Auf dieser Teilfläche werden nun die Feldflächendaten betrachtet und analysiert. Dazu werden die Lückenanteile jeder Feldfläche (jeweils 30 m x 30 m) in Bezug zu ihrer Höhenlage in einem XY-Plot dargestellt (**Abbildung 40**). Die X-Achse gibt dabei die Höhenlage der Felder in Meter über Meer an und die Y-Achse steht für deren Lückenanteil in %. Die roten Linien stellen die Regressionskurven zweiten Grades dar.

Die Lückenanteile der Feldflächen zeigen eine leichte Tendenz zu höheren Werten je höher die Felder liegen. Dieser Trend ist für das Jahr 2010 ausgeprägter als für das Jahr 2002. Für das Jahr 2002 zeigen sich auf der Höhe von ca. 1920 m drei Feldflächen mit Lückenanteilen um die 55 bis 65%. Diese beeinflussen die Trendkurve linksseitig nach oben. Für 2010 weisen diese drei Felder kleinere Lückenanteile auf, sie sind in den acht Jahren offenbar etwas zugewachsen.

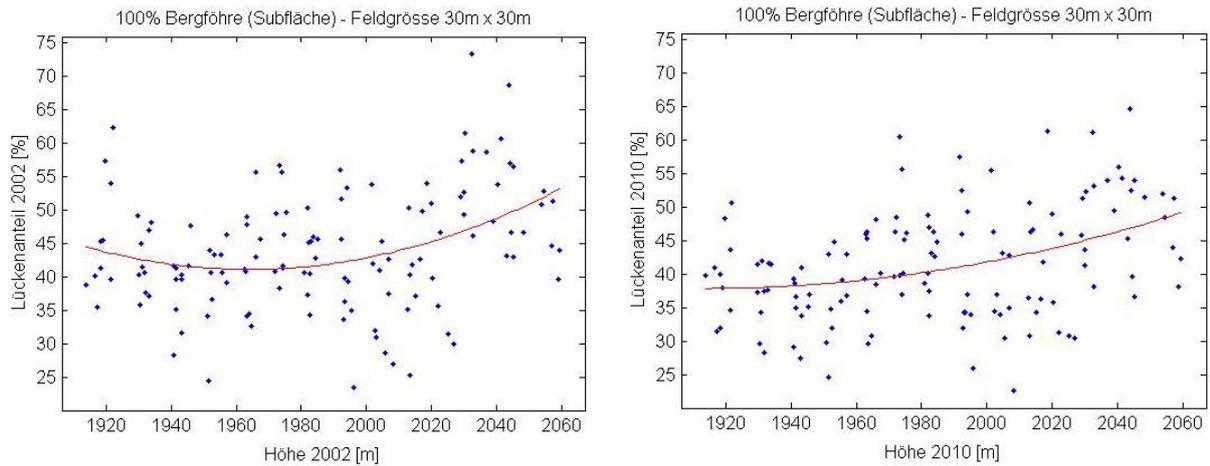


Abbildung 40 - Die Lückenanteile der Feldflächen (30 m x 30 m) scheinen im oberen Teil grösser zu sein als im unteren Abschnitt. Dieser Trend erscheint für das Jahr 2010 (rechts) ausgeprägter als für das Jahr 2002 (links). Wie man auf den Abbildungen erkennen kann, sind z.B. auf der Höhe von ca. 1920 m ü. M. die Lückenanteile von drei Feldflächen laut den Daten stark zugewachsen. Während diese im Jahr 2002 Lückenanteile von um die 55 - 65% aufwiesen, wurden für das Jahr 2010 noch Lückenanteile von maximal knapp über 50% ermittelt werden.

Während zwischen den Lückenanteilen und deren Höhenlagen ein leichter Trend festzustellen ist, lässt sich zu den Feldflächenneigungen direkt kein Zusammenhang finden. Die Varianz der Lückenanteile ist hierfür innerhalb der engen Neigungsbandbreiten zu gross (**Abbildung 41**). Wir werden später noch sehen, wie sich diese Darstellung für die Daten der gesamten Untersuchungsfläche verhält.

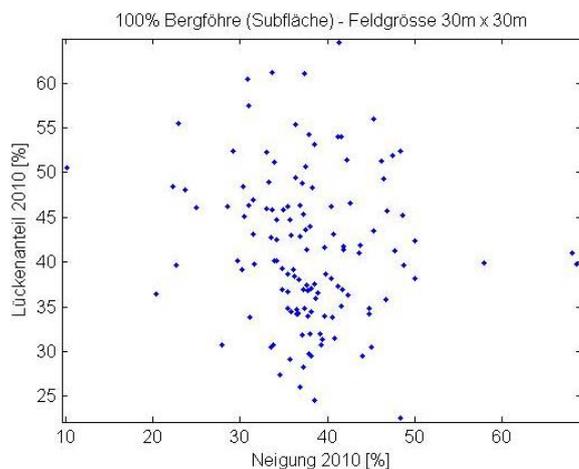


Abbildung 41 - Zwischen den Lückenanteilen und der Hangneigung sind für die Testfläche keine Korrelationsstrends feststellbar. Die Felder mit ähnlichen Hangneigungswerten unterscheiden sich sehr stark in ihren Lückenanteilen.

Die Lückenanteile in den oberen und unteren Lagen der Subfläche haben im Gegensatz zu den mittleren Höhenlagen vom Jahr 2002 auf 2010 im Schnitt leicht abgenommen. Insgesamt befinden sich deutlich mehr Feldflächenpunkte unterhalb der Nulllinie als oberhalb, was auf eine allgemeine Lückenabnahme hindeutet (**Abbildung 42**). Im Umkehrschluss kann also festhalten werden, dass der Wald in der Testfläche laut Daten insgesamt dichter geworden ist. Im oberen und unteren Teil der Testfläche ist dieser Trend stärker als im mittleren Testflächenabschnitt.

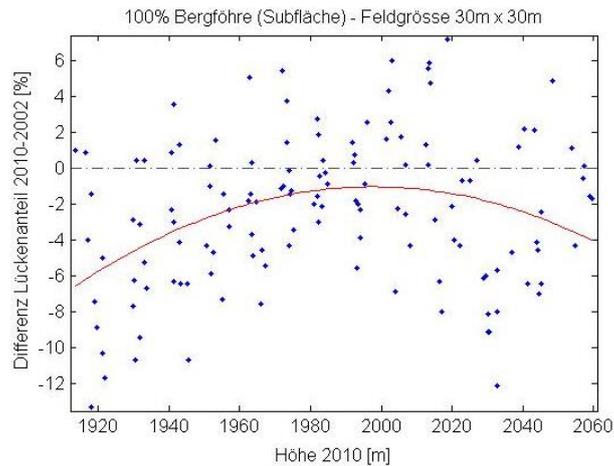


Abbildung 42 - Die Punkte unterhalb der Nulllinie stehen für Feldflächen, deren Lückenanteile abgenommen haben. Die Trendlinie zeigt insgesamt eine Abnahme der Lückenanteile von 2002 auf 2010. Folglich kann gesagt werden, dass die Waldfläche in der Testfläche im Schnitt zugenommen hat, wobei dieser Trend in den unteren und oberen Höhenlagen der Testfläche stärker ausgeprägt ist als im Mittelteil.

Interessant ist nun der Vergleich der Lückenanteile mit den Lückenzahlen. Die Anzahl Lücken je Feldfläche weist genau den entgegengesetzten Trend zu den Lückenanteilen auf. Je höher die Lage eines Feldes, desto geringer scheint deren Lückenzahl zu sein (**Abbildung 43**). Betrachtet man die Differenz der Lückenzahlen 2010 - 2002, so zeigt sich, dass die Anzahl Lücken der einzelnen Felder in den unteren und oberen Teilen der Testfläche im Schnitt eher zugenommen hat, wohingegen die Lückenzahlen in der mittleren Höhenlage tendenziell eher zurückgegangen sind (**Abbildung 44**).

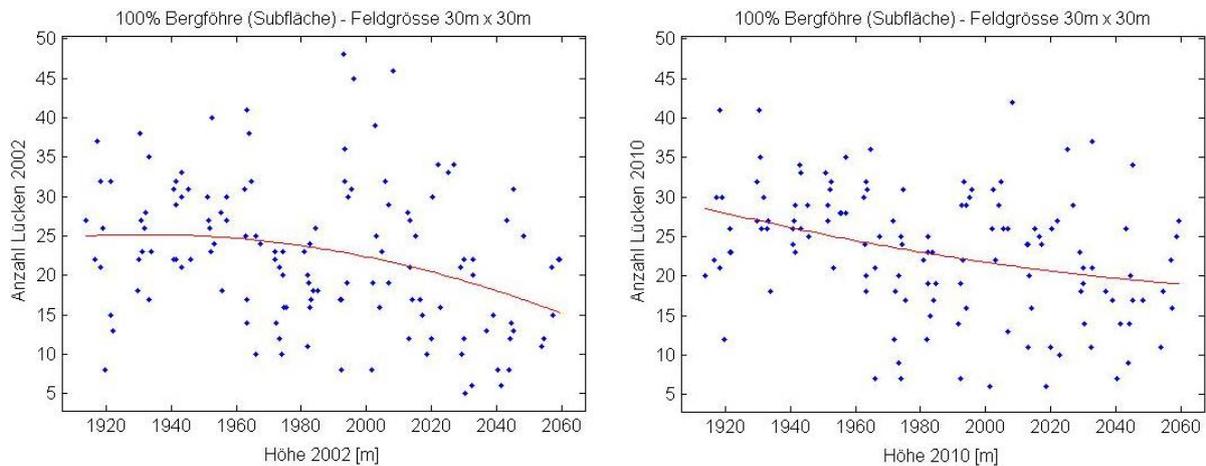


Abbildung 43 - Die Anzahl Lückenpixel je Höhe zeigt die Tendenz zu einer Abnahme mit steigender Höhe.

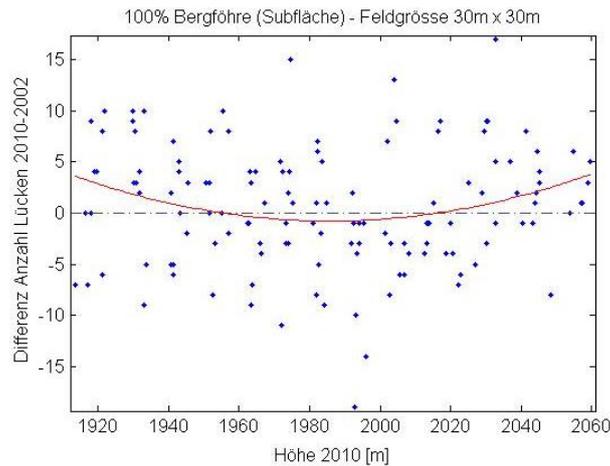


Abbildung 44 - Die Anzahl Lücken hat in der Testfläche in den unteren und oberen Lagen im Schnitt zugenommen. Im mittleren Testflächenabschnitt hingegen ist der gegenteilige Trend festzustellen, die Lückenzahl hat hier im Schnitt leicht abgenommen.

Die Betrachtung der vorhergehenden Abbildungen drängt den Schluss auf, dass die Anzahl Lücken je Feldfläche stark mit dem Lückenanteil korreliert. Dies lässt sich mit der Darstellung der Anzahl Lücken versus Lückenanteile bestätigen (**Abbildung 45**). Eine einfache lineare Regression bringt hierfür ein R^2 von 0.639 hervor. Somit lassen sich mit dieser einfachen Trendlinie knapp 64% der Datenpunkte erklären. Je grösser der Lückenanteil einer Feldfläche ist, desto kleiner ist offenbar deren Lückenzahl. Von der Trendkurve in der Grafik darf man sich jedoch nicht täuschen lassen. Diese gilt nur für den dargestellten Ausschnitt, denn bei einem Lückenanteil von 0% beträgt die Lückenzahl logischerweise Null. Somit muss in dieser Grafik irgendwo zwischen einem Lückenanteil von 0 und etwa 35% ein Maximum der Anzahl Lücken liegen.

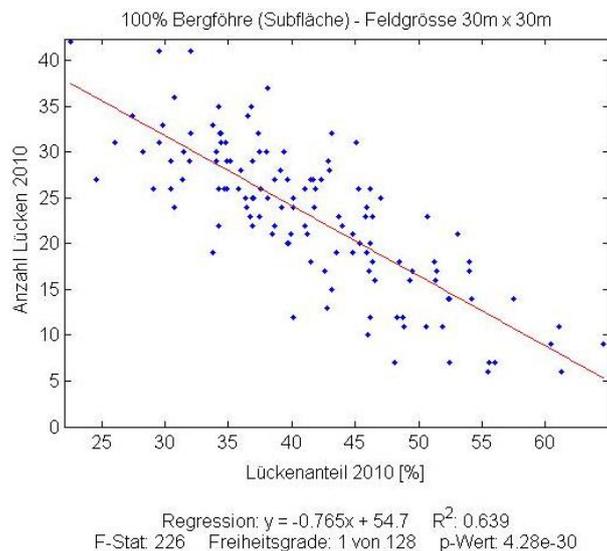


Abbildung 45 - Für diese Testfläche scheint die Anzahl Lücken je Lückenanteil (hier für das Jahr 2010) sehr stark mit den Lückenanteilen zu korrelieren (R^2 von 0.639). Je grösser der Lückenanteil einer Feldfläche, desto geringer ist deren Lückenzahl. Die Anzahl Lücken würde bei einem Lückenanteil von 100% erwartungsgemäss den Wert 1 aufweisen.

Die Auswertungen der Testfläche scheinen soweit in Ordnung zu sein, somit kann die zu untersuchende Fläche von der kleinen Testfläche auf den gesamten Datensatz ausgeweitet werden. Hierfür wird der komplette Datensatz aller Felder mit einem Bergföhrenanteil von

100% betrachtet (**Abbildung 46**). Weil in der Untersuchungsfläche auch noch weitere Nadelhölzer als die Bergföhre vorkommen, wird die Untersuchung dort, wo es nötig erscheint, zusätzlich auf die Felder mit 100% Nadelholz erweitert (**Abbildung 47**). Sollten die Darstellungen jedoch weitestgehend ähnlich erscheinen, dann wird jeweils auf eine Darstellung der Daten mit 100% Nadelholz verzichtet.

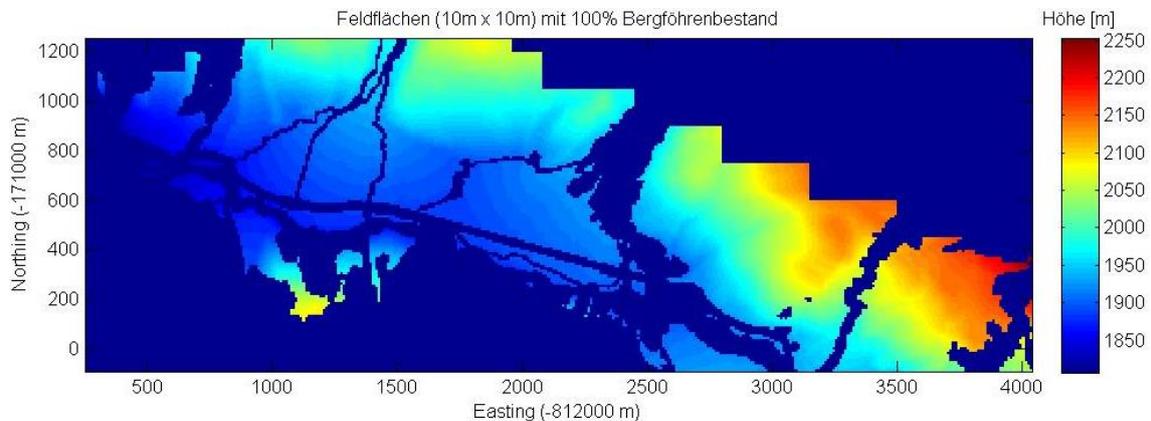


Abbildung 46 - Werden von der gesamten Untersuchungsfläche nur die Felder (10 m x 10 m) mit einem Bergföhrenanteil von 100% angezeigt, so ergibt sich dieses Bild. Die Daten der dunkelblauen Fläche werden dabei ausgeschlossen. Die verschiedenen Farben stellen die Höhenlagen der einzelnen Felder dar. Wie man darin erkennen kann, werden dabei die nordexponierten Hänge fast komplett ausgeschlossen (unten links).

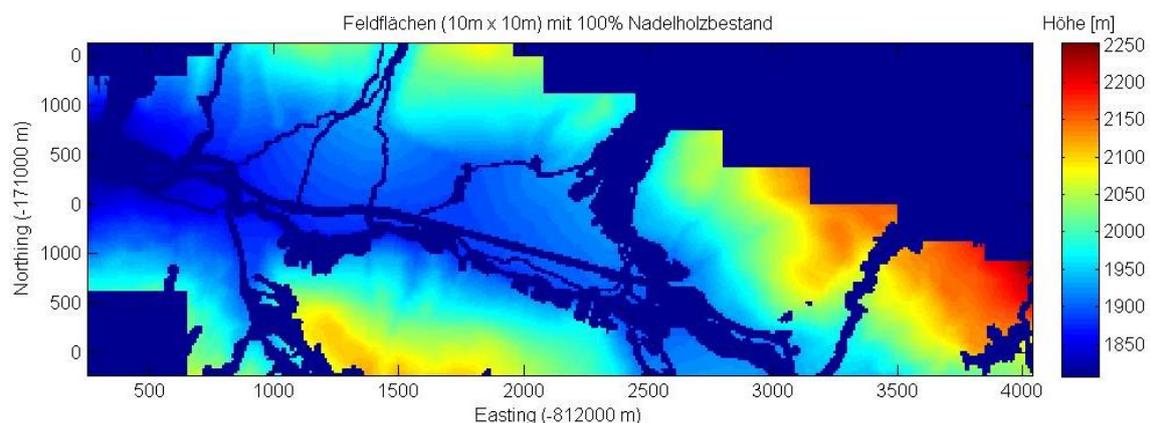


Abbildung 47 - In dieser Darstellung sind nun die Felder (10 m x 10 m) mit einem Nadelholzanteil von 100% abgebildet. Mit diesem Datensatz werden alle Waldflächen des Untersuchungsgebietes abzüglich der Infrastrukturen und Wanderwege inklusive deren Pufferflächen betrachtet. Auch Flüsse und Schuttflächen sind darin ausgeschlossen.

4.5.2 Lückenanteile je Feldfläche

Bei den Lückenanteilen in Abhängigkeit der Feldhöhe (**Abbildung 40** auf Seite 34) konnte für die Subfläche festgehalten werden, dass diese laut den Daten eine leicht positive Korrelation zueinander zeigen. Betrachtet man dasselbe für die gesamte Untersuchungsfläche mit einem Bergföhrenbestand von 100%, dann ergibt sich ein etwas differenzierteres Bild. Die Verteilung tendiert zu einem parabelförmigen Verlauf (**Abbildung 48**). Während die durchschnittlichen Lückenanteile bis zu einer Höhe von ca. 2000 m ü. M. ansteigen, so beginnen diese mit zunehmender Höhe wieder abzunehmen. Bei genauerer Betrachtung stellt man fest, dass die Erkenntnis der kleinen Testfläche trotzdem in diese Darstellung passt. Die Felder der Subfläche befinden sich auf einer Höhe zwischen ca. 1920 und 2060 m über Meer. Somit liegen deren Punkte genau noch im steigenden Teil der Trendkurve für die

Gesamtfläche und damit stimmen die Trends in diesem Abschnitt miteinander überein. Für die Betrachtung der Flächen mit 100% Nadelholz ergibt sich dasselbe Bild. Auf deren Darstellung wird deshalb verzichtet.

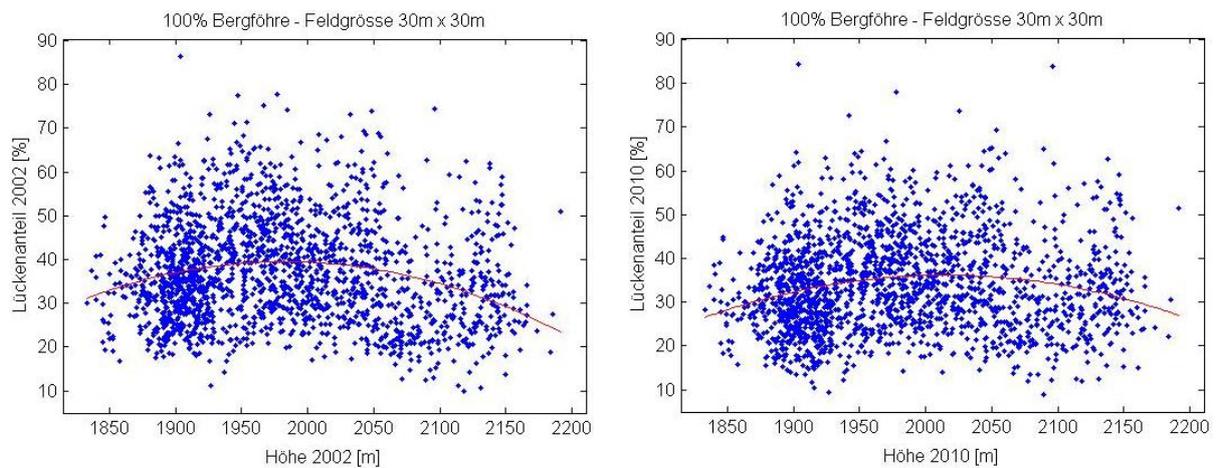


Abbildung 48 - Die Lückenanteile je Höhe weisen einen parabelförmigen Trend auf. In den unteren und oberen Höhenlagen scheinen die Lückenanteile der Felder im Schnitt kleiner zu sein als in den mittleren Höhenlagen.

Der Lückenanteil kann auch in Abhängigkeit von weiteren Parametern dargestellt werden, zum Beispiel der Flächenneigung für das Jahr 2010 (**Abbildung 49**). Für die kleine Subfläche konnte bei dieser Darstellung kein Zusammenhang gefunden werden, weil die Streuung der Daten für die geringe Neigungsbandbreite zu hoch war (**Abbildung 41**). Die Daten der gesamten Untersuchungsfläche zeigen hier jedoch ein etwas anderes Bild. Mittels einer Regressionskurve ersten Grades erkennt man eine leichte Tendenz zu einem höheren Lückenanteil mit zunehmender Boden­neigung. Dieser Trend ist jedoch nicht über alle Neigungsklassen gleich ausgeprägt, denn die Medianwerte zeigen in den Neigungsklassen N4 - N6 (Hang­neigungen zwischen 42 und 81%) einen kleinen Einbruch dieses Trends. Aus der Grafik kann auch herausgelesen werden, dass in der Untersuchungsfläche nicht alle Neigungen gleich häufig vertreten sind. So hat es zum Beispiel viele Flächen mit einer Neigung um die 10%, jedoch sind Flächen mit einer Neigung um 15% nur sehr schwach vertreten.

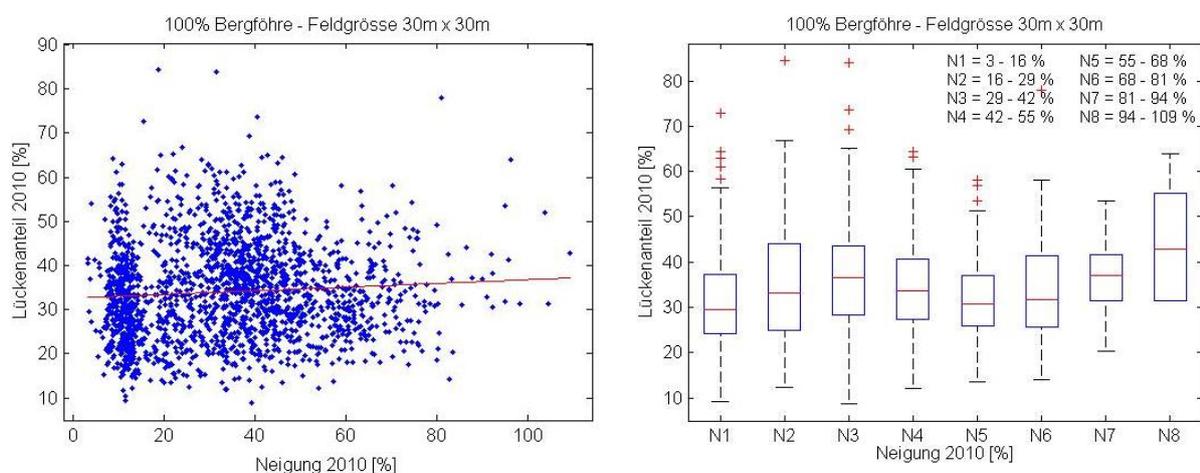


Abbildung 49 - Links sind die Lückenanteile in Bezug zur Feldflächenneigung als Punktwolke dargestellt und die Darstellung rechts zeigt dieselben Daten in Boxplots. Die Neigungen wurden bei den Boxplots in 8 gleich grosse Klassen unterteilt. Die Regressionsgerade in der Abbildung links zeigt eine leichte Tendenz zu einem höheren Lückenanteil mit zunehmender Hang­neigung. Die Medianwerte der Boxplots verdeutlichen dies zusätzlich, doch zeigen sie auch einen Einbruch dieses Trends in den mittleren Neigungsklassen.

Wir haben nun festgestellt, dass die Lückenanteile in höheren und tieferen Lagen eher kleiner sind als in den mittleren Höhenlagen. Zudem korrelieren die Lückenanteile leicht positiv mit den Flächenneigungen. Diese beiden Erkenntnisse führen zur Annahme, dass die Feldflächen in den unteren und oberen Höhenlagen weniger geneigt sind, als in den mittelhohen Regionen. Genau diese Annahme lässt sich mit der Darstellung der Feldneigungen je Feldhöhe bestätigen (**Abbildung 50**). Eine Polygontrendkurve zweiten Grades verdeutlicht dies.

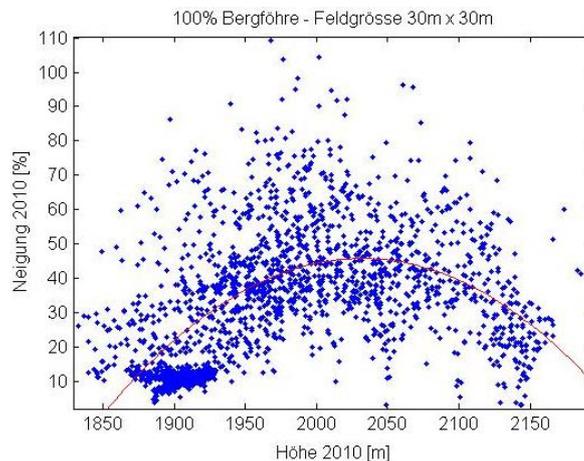


Abbildung 50 - Für die gesamte Untersuchungsfläche gilt, dass die unteren und oberen Höhenlagen eher kleinere Hangneigungen aufweisen als die mittleren Höhenlagen. Aus der Abbildung ist auch zu entnehmen, dass sehr viele Felder des Gebiets eine Höhenlage von ca. 1900 m ü. M. mit einer Hangneigung von ca. 10% aufweisen.

Bis jetzt wurden für die Darstellungen immer die Daten mit einer Feldgrösse von 30 m x 30 m verwendet. Für die Lückenanteile der Felder in Abhängigkeit von deren Exposition macht es jedoch Sinn, die Feldgrösse zu variieren, weil sich damit die Anzahl der Datenpunkte verändert. Bei einer Feldgrösse von 30 m x 30 m existieren für die Flächen mit 100% Bergföhre relativ wenige Datenfelder mit einer Nordost-, Ost- oder Südost-Exposition. Wird nun die Feldgrösse auf 10 m x 10 m verringert, so erhöht sich die Anzahl der Felder und damit auch die Zahl der Datenpunkte (**Abbildung 51**). Als Nachteil muss dafür eine grössere Streuung der Daten in Kauf genommen werden. Auf eine Trendlinie wird verzichtet, weil die X-Achse einen geschlossenen Kreis bildet (Ost, Süd, West, Nord und wieder Ost). Ein Blick auf die Darstellungen lässt vermuten, dass die Lückenanteile an süd- und südostexponierter Lage eher grösser sind, als jene an West- und Nordexposition. In diesen Darstellungen mag das stimmen, nur fehlt hier aber die Information der Höhenlage der einzelnen Feldflächen. Wie weiter oben festgehalten wurde, variieren die Lückenanteile in verschiedenen Höhenlagen leicht. Und weil für die Untersuchungsfläche an den verschiedenen Expositionen nicht alle Höhenlagen gleichhäufig vertreten sind, kann diese Grafik verfälscht sein. Um genauere Aussagen über die Expositionsabhängigkeit der Lückenanteile treffen zu können, wird im Folgenden die Höhenlage der einzelnen Felder mit berücksichtigt.

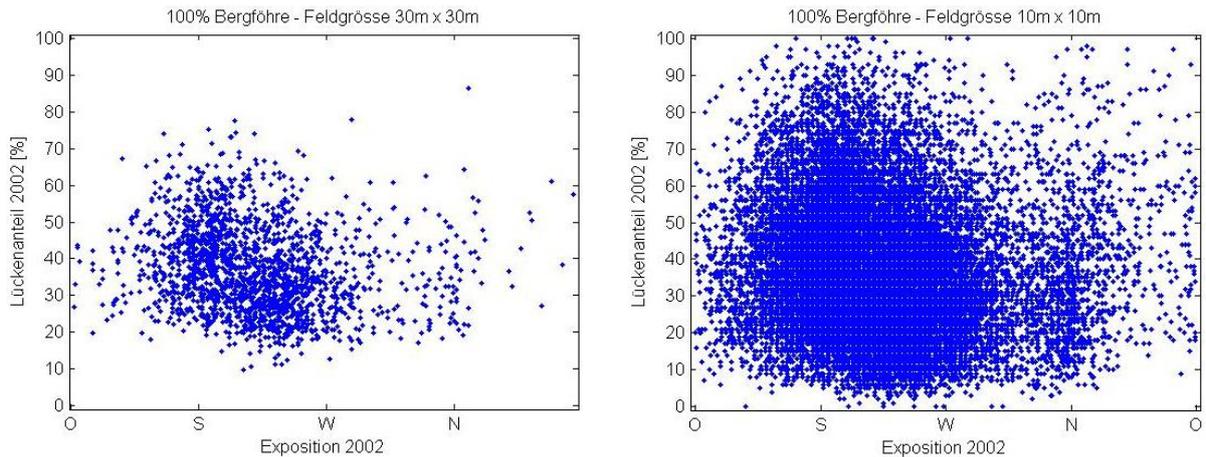


Abbildung 51 - Bei der Darstellung der Lückenanteile je Exposition gibt es für die Feldflächengrösse von 30 m x 30 m nur eine geringe Anzahl Datenpunkte (links). Hier kann es Sinn machen, die Feldgrösse auf einen Wert von 10 m x 10 m zu verringern (rechts). Damit ergeben sich mehr Datenpunkte, was jedoch mit einer Zunahme der Streuung erkauft wird. Insgesamt scheinen laut dieser Abbildung die Lückenanteile der Süd- und Südostexposition grösser zu sein als jene der West- oder Nordexposition.

Die Daten werden nun in acht Höhenabschnitte gesplittet und für jede dieser acht Unterteilungen wird der Lückenanteil je Exposition dargestellt (**Abbildung 52**). Die Höhenabschnitte gliedern sich von der niedrigsten bis zur höchsten vorhandenen Feldhöhe in gleich grosse Intervalle. Das jeweilige Höhenintervall ist in jedem separaten Plot in der Titelzeile angegeben. Die Lückenanteile je Exposition sind zur besseren Ablesbarkeit in Boxplots dargestellt. Die Exposition ist dabei immer in acht Kategorien unterteilt (Ost, Südost, Süd, etc.) und jeder Boxplotbalken steht für die Daten einer dieser Kategorien. Mit dieser Höhensplittung der Daten sieht die Verteilung etwas differenzierter aus als in der **Abbildung 51**. Die oben gemachte Aussage, dass die Lückenanteile an süd- und südostexponierter Lage eher grösser sind als jene an West- und Nordexposition, trifft nicht auf alle Höhenlagen gleichermaßen zu. Während zwischen 1914 und 2027 m ü. M. der kleinste Median der Lückenanteile an nordexponierten Flächen liegt und der grösste Median der Lückenanteile an südostexponierten Lagen anzutreffen ist, verlagert sich die Box mit dem kleinsten Median mit steigender Höhe eher in Richtung Südwesten. In Lagen unter 1914 m ü. M. hingegen ist der grösste Median der Lückenanteile eher an nordexponierter Lage und der kleinste Median an Lagen mit Südostexposition anzutreffen. Für die tiefer liegenden Regionen ist somit genau das Gegenteil der Aussage ohne Höhensplittung feststellbar. Wie man in der Abbildung erkennen kann, weichen die Werte der Expositions-kategorie Nordost relativ stark von denen der übrigen Expositionen ab. Dies hat damit zu tun, dass Flächen dieser Exposition im Datensatz relativ spärlich vorhanden sind. Die Werte der Nordost-Boxplots können deshalb etwas verfälscht sein und sollten somit kritisch betrachtet werden.

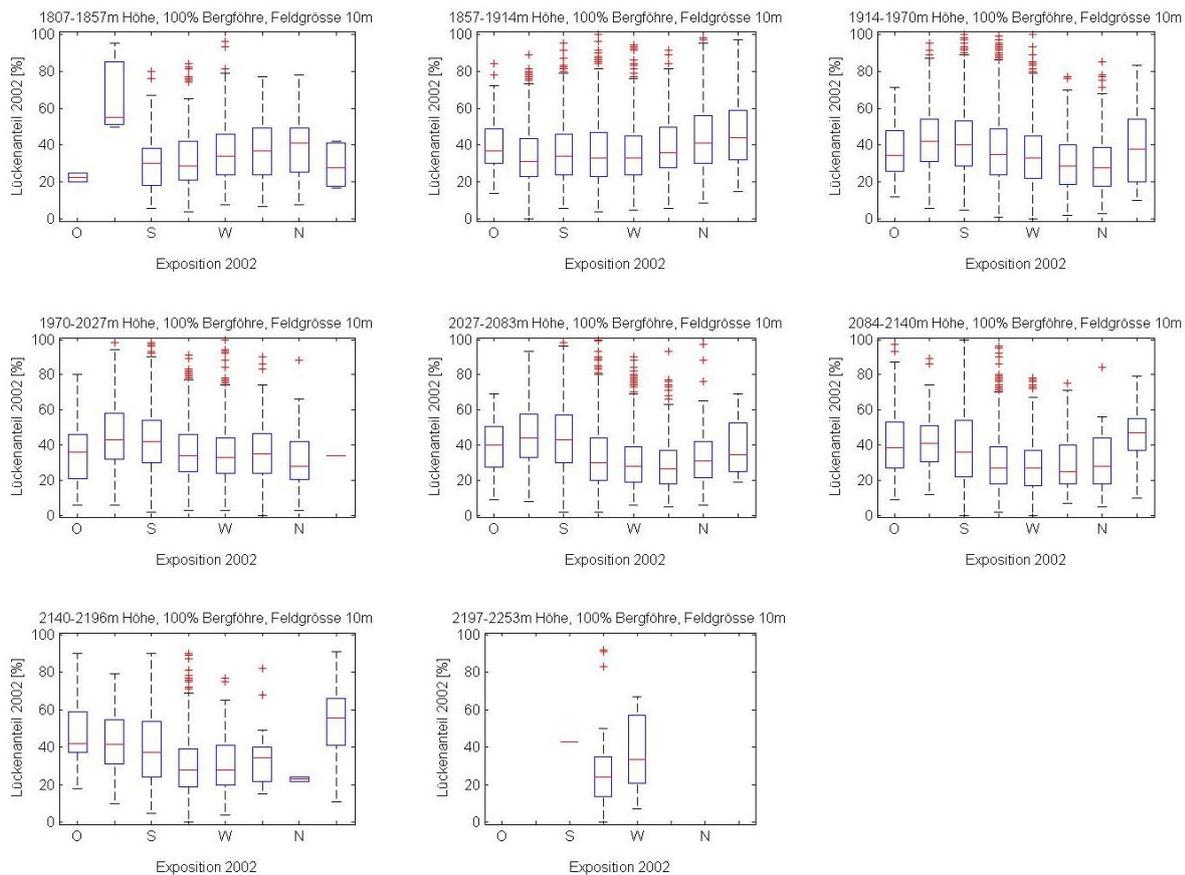


Abbildung 52 - Die Verteilung der Lückenanteile je Exposition ist in den verschiedenen Höhenlagen unterschiedlich. Während zum Beispiel die Felder mit den tiefsten durchschnittlichen Lückenanteilen auf der untersten Höhenstufe an südwest- bis südostexponierter Lage anzutreffen sind, weisen mit steigender Höhe diese Expositionen den höchsten Lückenanteil auf. Zwischen 1914 m ü. M. wandert der tiefste Medianwert der Lückenanteile von der Exposition Nord (1914 - 2027 m) über Nordwest (2027 - 2140 m) hin zu West und Südwest (2140 - 2196 m). Die letzte Höhenstufe ist aufgrund der geringen Anzahl Datenpunkte nicht aussagekräftig.

Die soeben besprochenen Analysen wurden für die Felder mit einem Bergföhrenanteil von 100% gemacht. Weitet man den Datensatz auf alle Felder mit einem Nadelholzanteil von 100% aus, so bleibt dieselbe Charakteristik wie für den 100% Bergföhrenbestand erhalten. Die Boxplots sind nahezu identisch und darum wird auf deren Abbildung verzichtet.

Wie weiter oben festgehalten wurde, korrelieren die Lückenanteile leicht positiv mit der Feldneigung (**Abbildung 49** auf Seite 38). Somit macht es Sinn, die Lückenanteile je Exposition entsprechend der Unterteilung in Höhenabschnitte auch in Neigungsklassen zu splitten. Hierfür werden die Neigungen zwischen 0 und 100% in acht Klassen unterteilt und für jede Neigungsklasse die Boxplots erstellt (**Abbildung 53**). Bei dieser Splittung zeigt sich, dass sich mit steigender Feldflächenneigung die Mediane der Lückenanteile in den verschiedenen Expositionen mehr und mehr unterscheiden. Bis zu einer Neigung von 25% sind sich die Medianwerte jeweils sehr ähnlich. Die Lückenanteile zeigen in flachen Gebieten der Untersuchungsfläche somit keine grosse Expositionsabhängigkeit. Mit steigender Hangneigung vergrössern sich die Unterschiede der Medianwerte in den einzelnen Expositionen jedoch stark. Vor allem in den mittleren Neigungsklassen kommt wieder die Erkenntnis zum Zuge, dass an süd- und südostexponierter Lage die Lückenanteile etwas höher sind, als in den übrigen Expositionen. Insgesamt ist auch hier wieder zu erwähnen, dass aufgrund der geringen Flächenzahl mit Nordostexposition die entsprechenden Nordost-Boxplots etwas verfälscht sein können.

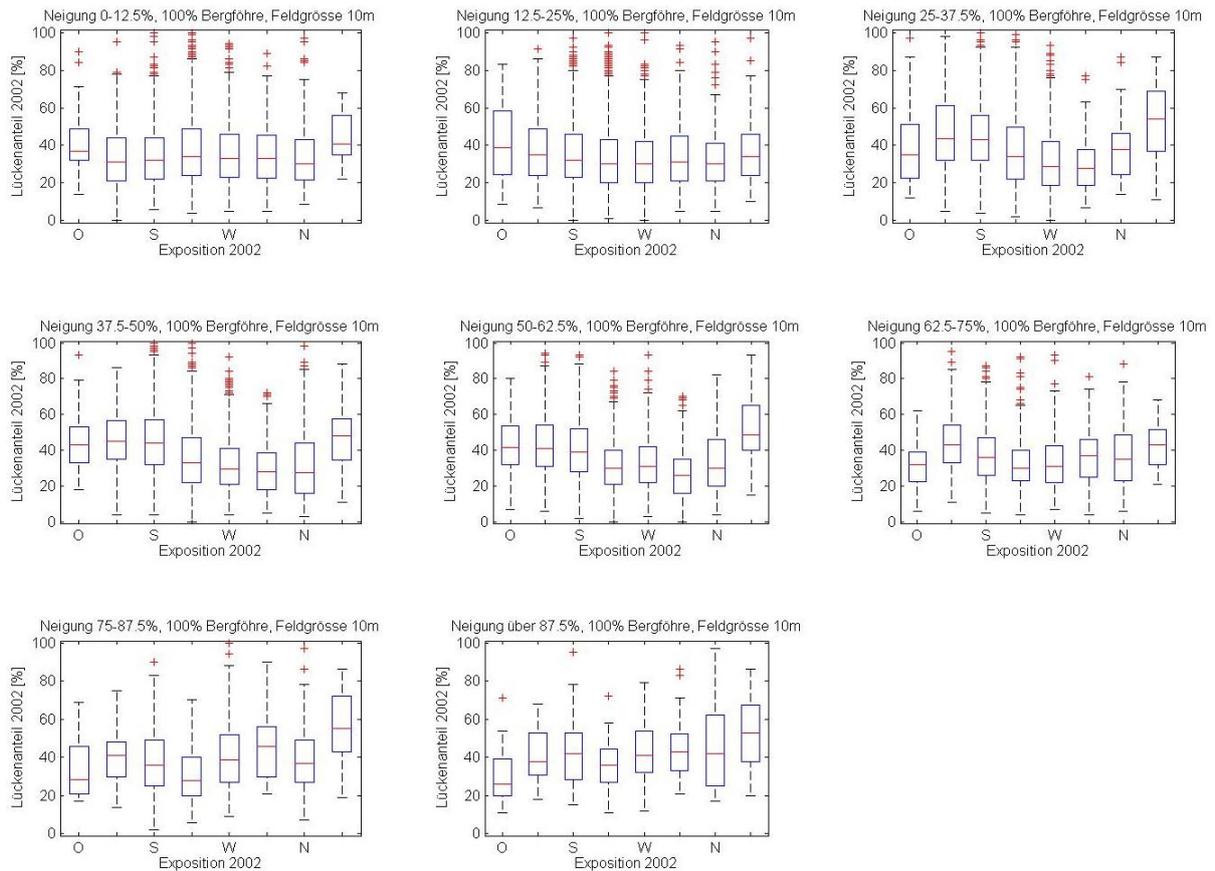


Abbildung 53 - Die Flächen mit einer Neigung bis 25% weisen in allen Expositionen relativ ähnliche Medianwerte der Lückenanteile auf. Mit steigender Neigung steigen auch die Unterschiede der Medianwerte in den verschiedenen Expositionen. Die Datenwerte der Nordostexposition sind kritisch zu betrachten, denn sie werden durch die geringe Flächenzahl mit dieser Exposition ein wenig verfälscht.

Bei der Darstellung der Lückenanteile je Höhe (**Abbildung 48** auf Seite 38) wurde eine parabelförmige Tendenzkurve beobachtet. In tieferen und höheren Lagen waren die Lückenanteile geringer als in den mittleren Höhenlagen. Diese Daten können nun nach der Hangneigung ihrer Felder gesplittet werden. Hierbei zeigt sich, dass sich die Lückenanteile je Höhe in den verschiedenen Neigungsstufen unterschiedlich verhalten (**Abbildung 54**). Während bei Bodenreibungen bis 37.5% die mittleren Höhenstufen (um 2000 m ü. M.) bei den Lückenanteilen einen höheren Median aufweisen als die unteren und oberen Höhenstufen, bleiben alle Medianwerte bei Bodenreibungen von 50 - 62.5% relativ konstant (ausser in den obersten beiden Höhenstufen H7 und H8). Bei noch höheren Neigungen zeigt sich genau das entgegengesetzte Bild der Neigungen von unter 37.5%. Denn ab einer Neigung von 62.5% liegen die höheren Medianwerte in den tieferen und höheren Lagen und die tieferen Medianwerte befinden sich bei den mittleren Höhenlagen. Bei den Daten mit 100% Nadelholzanteil resultiert dieselbe Charakteristik (ohne Abbildung).

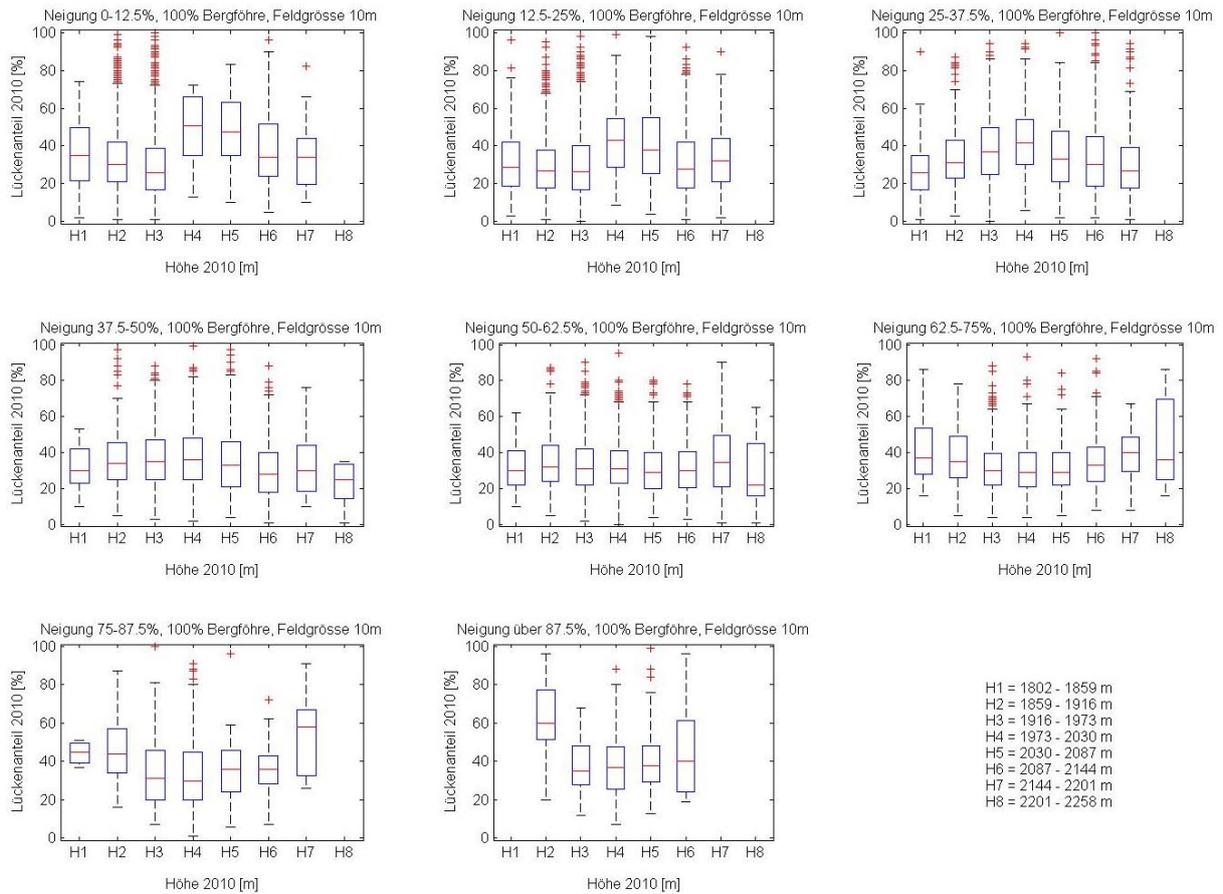


Abbildung 54 - Die Boxplots der Lückenanteile je Höhe zeigen je nach Feldflächenneigung eine andere Charakteristik. Bei einer geringen Hangneigung ist der Lückenanteil der Felder in mittlerer Höhenlage am grössten. Bei einer mittleren Feldflächenneigung ist der Lückenanteil über alle Höhenstufen praktisch gleich. Hingegen weisen bei grösseren Hangneigungen die unteren und oberen Höhenstufen einen grösseren Lückenanteil in ihren Feldern auf.

Die Lückenanteile versus Höhe können auch nach ihrer Exposition gesplittet werden. Hier ist interessant festzustellen, dass mit steigender Höhe an südexponierter Lage der Median der Lückenanteile tendenziell eher abnimmt und an nordexponierter Lage dieser mit steigender Höhe zunimmt (**Abbildung 55**). Bei den West- und Ostexpositionen ist hingegen kein deutlicher Trend auszumachen.

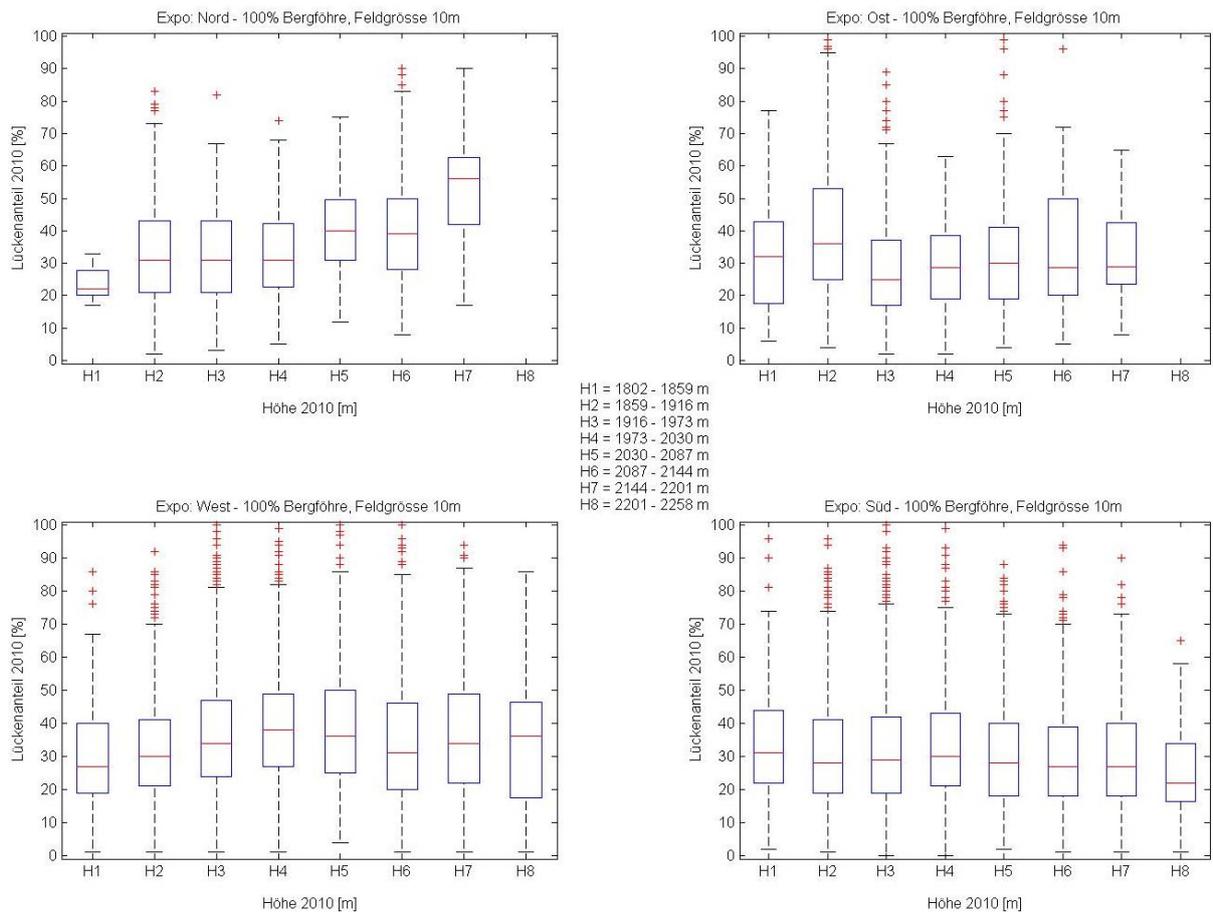


Abbildung 55 - Mit steigender Höhenlage weisen die Lückenanteile der Feldflächen mit Nordexposition grössere Werte auf. Das umgekehrte ist bei den Flächen mit Südexposition der Fall. Diese zeigen die Tendenz, dass deren Lückenanteil mit steigender Höhenlage eher abnimmt. Bei den west- und ostexponierten Flächen sind hingegen keine deutlichen Trends ersichtlich.

4.5.3 Differenzen der Lückenanteile

Nach der Betrachtung der Lückenanteile der einzelnen Felder für die separaten Jahresabschnitte richtet sich der Fokus auf die Veränderungen, welche die Felder vom Jahr 2002 zu 2010 erfahren haben. Als erstes folgt die Differenz der Lückenanteile der Feldflächen je Höhe. Laut den Daten haben die Lückenanteile in den tieferen und mittleren Höhenregionen der Untersuchungsfläche im Durchschnitt abgenommen (**Abbildung 56**). Der Wald ist somit in den unteren und mittleren Lagen in den Jahren 2002 bis 2010 etwas zugewachsen. Die Differenzen sind mit Extremwerten bis zu -25% für die Feldgrösse von 30 m x 30 m relativ hoch. Der Grossteil der Mediandifferenzen bewegt sich jedoch um -5%. Anders sieht es in den höheren Lagen aus, da fiel die Differenz eher leicht positiv aus. Das heisst, die Waldfläche hat dort laut dieser Darstellung leicht abgenommen.

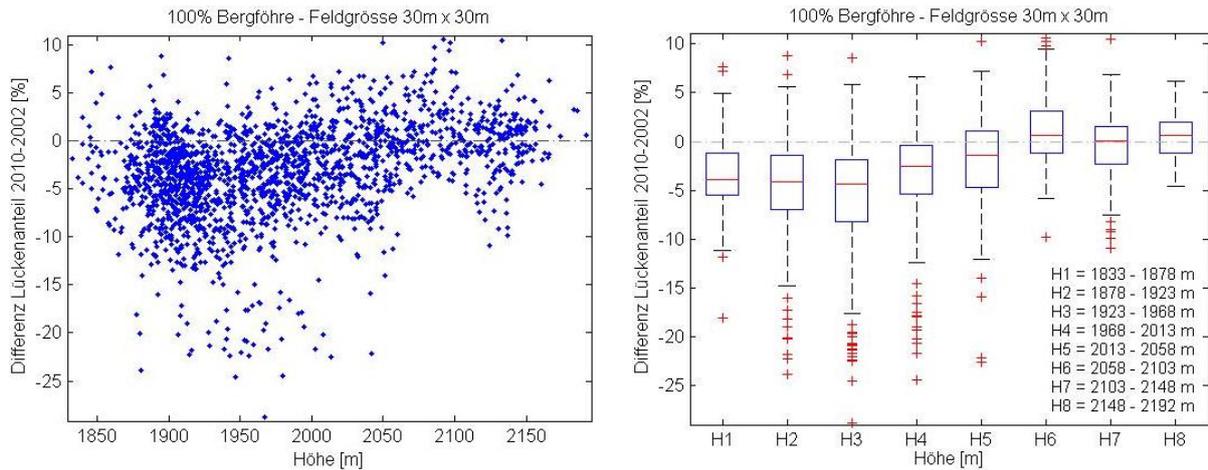


Abbildung 56 - Die Lückenanteile scheinen vom Jahr 2002 auf 2010 in den tieferen Lagen im Durchschnitt um bis zu -5% abgenommen zu haben. In den höheren Lagen offenbart sich die Tendenz zu einer leichten Zunahme.

Zu den besprochenen Differenzwerten muss man erwähnen, dass diese kritisch betrachtet werden sollen. Die besprochenen Veränderungen gelten nur für die Feldgröße von 30 m x 30 m. Wählt man eine kleinere Feldgröße wie z.B. 10 m x 10 m, dann fallen die Medianwerte der Differenzen ein wenig anders aus (**Abbildung 57**). Auf der Höhenstufe H8 (2148 - 2192 m) resultiert eine negative Differenz, während diese Differenz bei den Feldseitenlängen von 30 m und 50 m jeweils positiv ausfällt. Wie in der **Abbildung 56** zu entnehmen ist, existieren ab einer Höhe von 2148 m (Höhenkategorie H8) nicht mehr viele Datenpunkte. Bei wenigen Datenpunkten fallen Extremwerte viel stärker ins Gewicht als bei einer grossen Anzahl von Daten. Für steigende Feldseitenlängen nimmt die Anzahl Datenpunkte ab und somit kann sich der Median sprunghaft ändern. Wie gesagt ist die Differenz für H8 bei der Feldseitenlänge von 10 m negativ. Erst ab einer Seitenlänge von 20 m wird der Median von H8 positiv. Die Streuungen werden zudem kleiner je grösser die Feldgröße gewählt wird. Dies ist nachvollziehbar, denn in kleineren Flächen hat ein umgefallener Baum einen grösseren Einfluss auf die prozentuale Lückenausweitung als in einer grösseren Fläche. Insgesamt bleibt die Charakteristik der Medianwerte über alle Feldgrössen in etwa gleich.

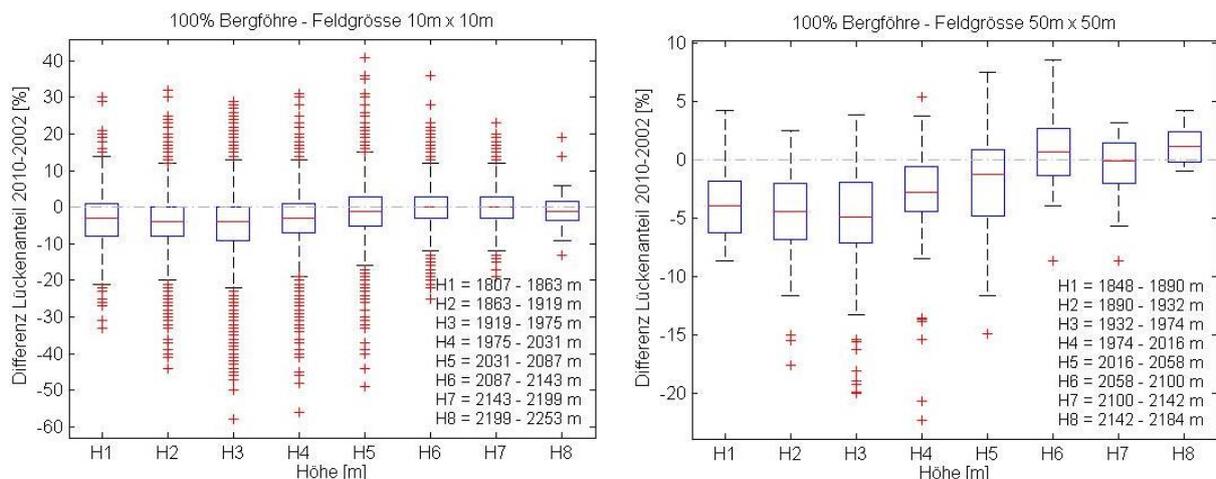


Abbildung 57 - Die Medianwerte der Lückendifferenzen 2010 - 2002 können mit verschiedenen Feldgrössen unterschiedlich ausfallen. Während für eine Feldseitenlänge von 10 m der H8-Medianwert negativ ausfällt, ist dieser bei einer Feldseitenlänge von 50 m positiv. Zudem nimmt die Streuung der Daten mit verringerter Feldgröße zu. Die Charakteristik der Grafiken bleibt hingegen unverändert.

Um erkennen zu können, welchen Positionen Veränderungen in den Lückenanteilen erfahren haben, wurde die gesamte Untersuchungsfläche (**Abbildung 22** auf Seite 21 unten), unabhängig ihres Bedeckungsgrades und unabhängig der Nadelholzanteile, in Felder der Grösse 10 m x 10 m unterteilt. Zu jedem Feld kann nun die Differenz der Lückenanteile 2010 - 2002 angegeben werden. Die Veränderungen der Lückenanteile bewegen sich im Rahmen von weniger als - 60% bis über 40%. Die verschiedenen Differenzen der Feldflächen verteilen sich nicht gleichmässig auf die Fläche. Eher treten die Lückenabnahmen und -zunahmen gruppiert auf. So befinden sich zum Beispiel die vielen roten Punkte unten links in der **Abbildung 58** in einem relativ steilen Gebiet. Zum Beispiel können durch Hangrutsche oder Steinschlag viele Bäume auf einmal umgeschlagen werden, was eine grosse Zunahme der Lückenanteile bewirken kann und in dieser Grafik durch eine positive Differenz ausgedrückt wird. Im Folgenden sollen nun diese Verteilungsmuster hin auf ihre topografischen Abhängigkeiten wie Exposition, Höhe und Neigung untersucht werden.

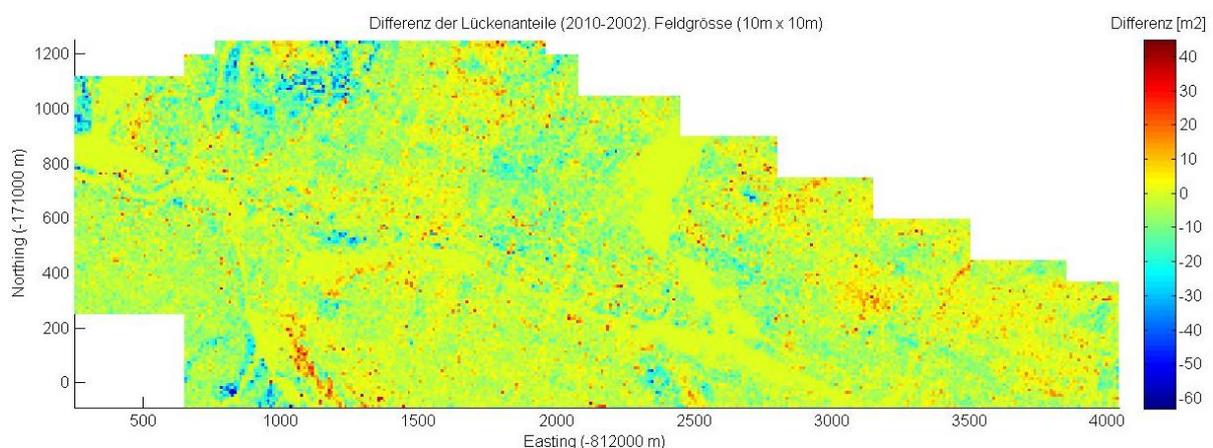


Abbildung 58 - Die Differenzen der Lückenanteile je Feldfläche (hier mit der Auflösung von 10 m x 10 m) treten häufig geklumpt mit ähnlichen Werten auf. Die verschiedenen Differenzwerte sind somit nicht gleichmässig über die gesamte Untersuchungsfläche verteilt. So zeigt zum Beispiel die Region unten links im Bild eine Anhäufung von roten Punkten. Z.B. Hangrutsche oder Steinschläge können in steilen Gebieten innert kürzester Zeit viele Bäume umschlagen und damit neue Lücken schaffen. Dies äussert sich dann in einer Anhäufung grosser Positivdifferenzwerte in dieser Grafik.

Als erstes werden die Differenzen der Lückenanteile versus Höhe auf die Abhängigkeit der Hangneigung untersucht. Dafür wird die Darstellung in vier verschiedene Neigungsklassen gesplittet. Mit dieser Splittung reduziert sich die Anzahl der Datenpunkte bei der Feldgrösse von 50 m x 50 m so stark, dass die Aussagen allgemein sehr ungenau werden. Auch für die Feldseitenlänge von 30 m hat die Neigungsklasse über 75% zu wenige Datenpunkte. Hingegen sind bei der Feldseitenlänge von 10 m wiederum die Streuungen sehr gross. Ein guter Kompromiss stellt sich mit einer Feldgrösse von 20 m x 20 m heraus. Wird nun die Differenz der Lückenanteile je Höhenlage in vier verschiedene Hangneigungsklassen unterteilt, so erkennt man leichte Unterschiede in den einzelnen Klassen (**Abbildung 59**). Bei den flachsten Feldern befindet sich der Median mit dem grössten Zuwachs (grösste negative Lückendifferenz) in der untersten Höhenstufe (1826 - 1877 m). Mit steigender Hangneigung wandert der Median mit dem höchsten Zuwachs in höhere Höhenstufen. In der Abbildung ist auch zu erkennen, dass in den Höhenklassen H1, H7 und H8 keine durchschnittlichen Feldflächenneigungen über 75% vorhanden sind. In der Höhenlage H8 hingegen gibt es keine Hangneigungen unter 25%.

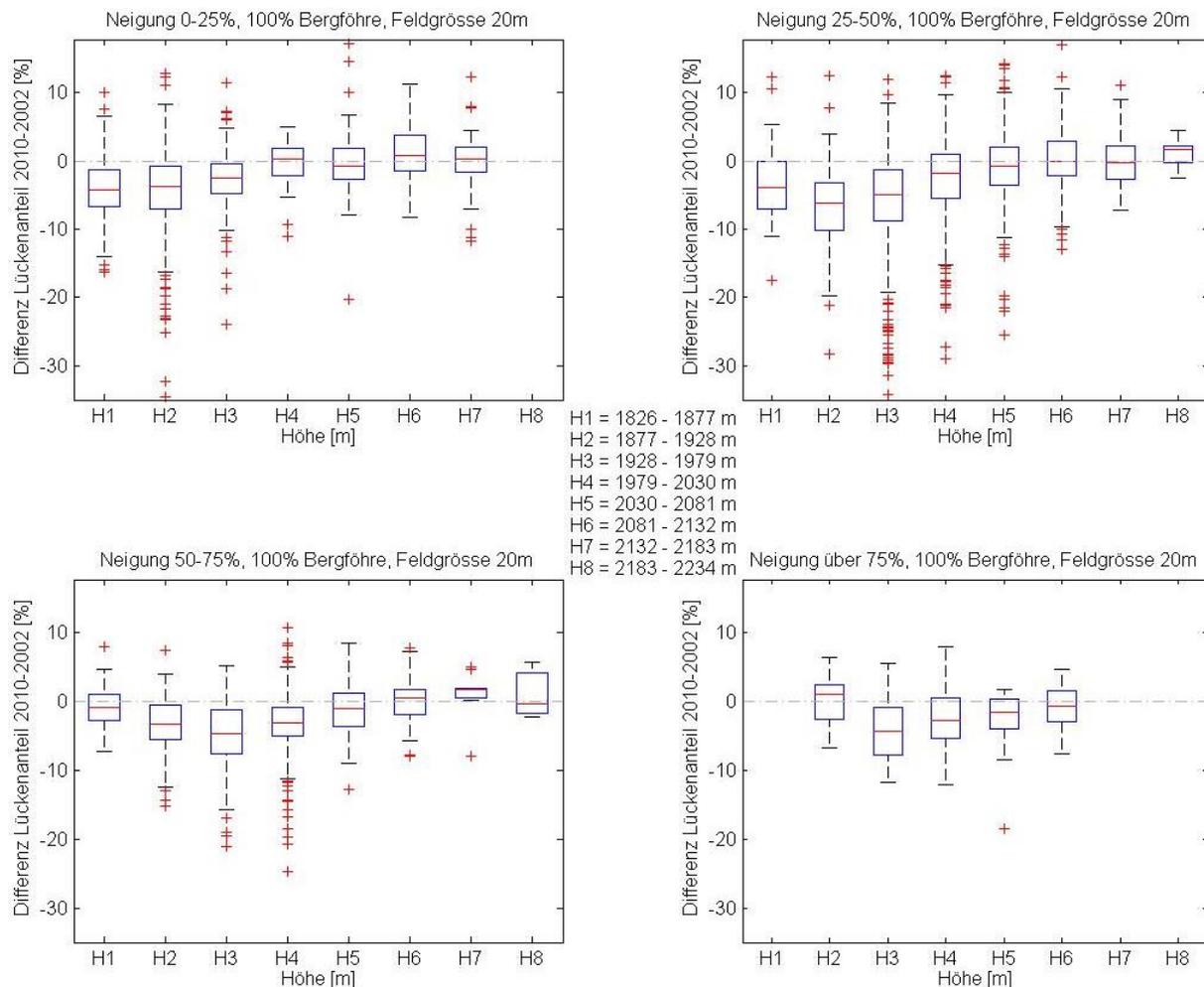


Abbildung 59 - Wird die Differenz der Lückenanteile je Höhe in vier gleich grosse Neigungsklassen unterteilt, so zeigen sich leichte Unterschiede in den Lückendifferenzen. Die grösste Lückenabnahme (grösste Waldflächenzunahme) verschiebt sich mit steigender Hangneigung in höhere Regionen.

Bei der Splittung nach der Exposition (**Abbildung 60**) zeigt sich für die Differenz der Lückenanteile je Höhenklasse dieselbe Charakteristik wie ohne Expositionssplittung. Während in den unteren Lagen die Mediane der Differenzen negativ sind, so gehen diese in den höheren Lagen gegen oder leicht über Null. Erwähnenswert ist an dieser Stelle, dass die Bergföhren an nordexponierter Lage über praktisch alle Höhenstufen hinweg am meisten zugelegt haben (grösste negative Differenz der Lückenanteile). Weil in den Daten gewisse Expositionen relativ schwach vertreten sind, wurde hier eine Feldgrösse von 10 m x 10 m gewählt. Vorsicht ist somit wieder bei der Höhenlage H8 geboten, denn die zeigt bei dieser Feldgrösse negative Werte an, während bei grösseren Feldgrössen diese Werte positiv sind (siehe Erklärung oben). Dass die Höhenlage H8 in den Expositionen Nord und Ost nicht vertreten ist, ist der gewählten Untersuchungsfläche zuzusprechen. Dies deutet also nicht darauf hin, dass diese Höhenkategorie über der Waldgrenze liegt. Weitert man diese Grafik auf die Datenpunkte mit 100% Nadelholz aus, so ändert sich an der Charakteristik nicht viel, ausser, dass keine Mediandifferenzen mehr positiv sind. Die Abbildung hierzu befindet sich im Anhang (**Abbildung 82**).

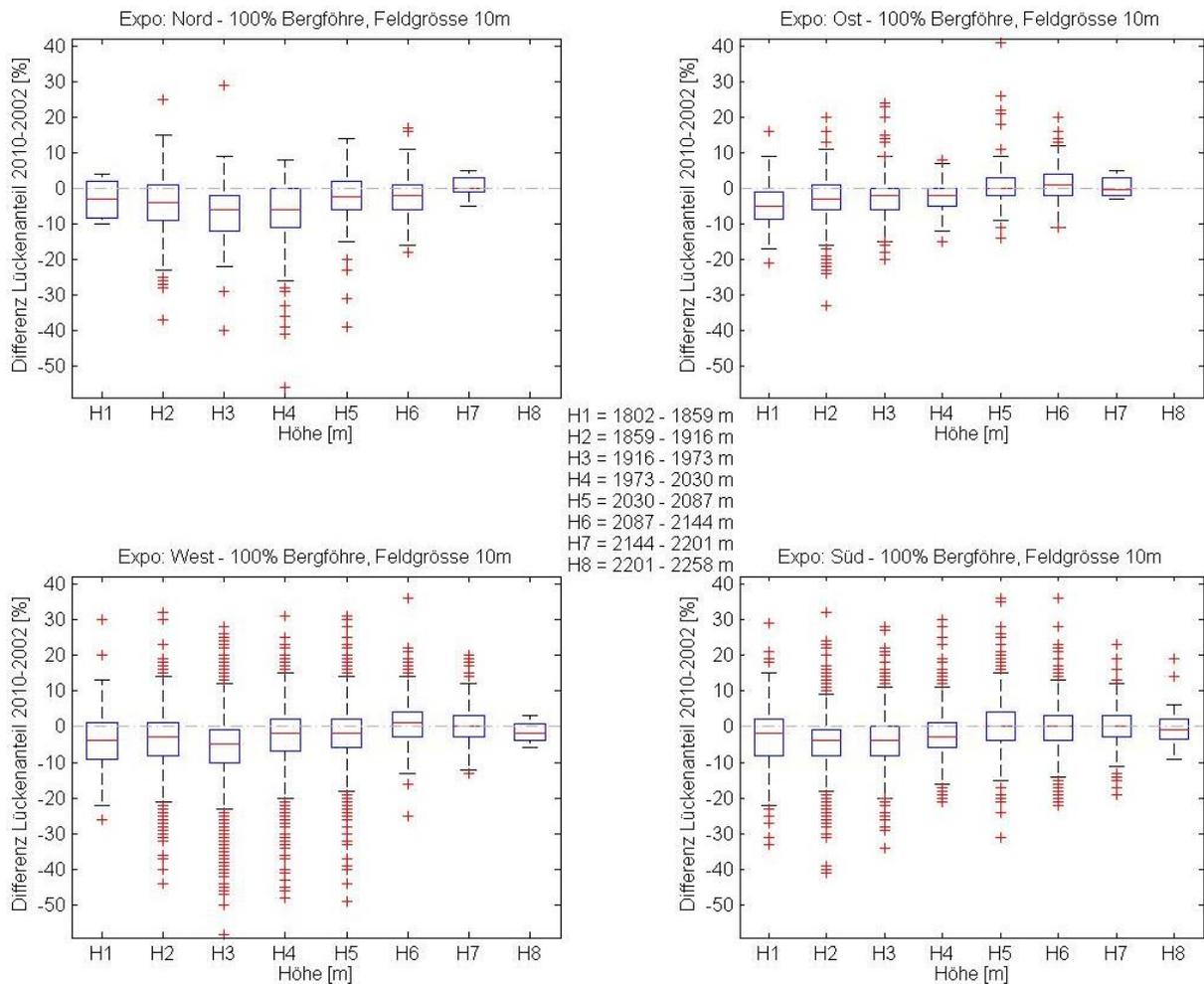


Abbildung 60 - Während der Wald an ostexponierter Lage vor allem in den unteren Regionen an Fläche zugenommen hat, ist an nordexponierter Lage die grösste Zunahme (grösste negative Lückendifferenz) in den mittleren Höhenlagen zu verzeichnen. Interessanterweise haben die Bergföhren an nordexponierter Lage über praktisch alle Höhenstufen hinweg am meisten zugelegt.

4.5.4 Anzahl Lücken und deren Veränderung

Nach den Lückenanteilen je Feldfläche wird nun die Anzahl Lücken pro Feld betrachtet. Hier zeigt sich die Tendenz, dass mit steigender Höhe die Lückenzahlen der Felder im Schnitt kleiner werden. Dies gilt sowohl für das Jahr 2010 (**Abbildung 61**), als auch für die Daten von 2002 (ohne Abbildung). Betrachtet man die Differenz der Lückenzahlen 2010 - 2002, so kann man feststellen, dass die Anzahl Lücken pro Feld im Schnitt insgesamt abgenommen hat. Die Reduktion ist in den tieferen Lagen im Schnitt grösser als in den höheren Regionen (**Abbildung 62**).

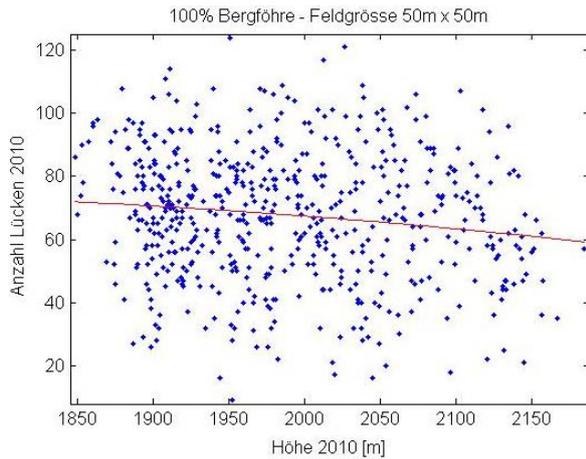


Abbildung 61 - Die Daten zeigen eine Tendenz zu tieferen Lückenzahlen mit steigender Höhe. Die Streuung der Anzahl Lücken je Feldfläche ist jedoch relativ hoch.

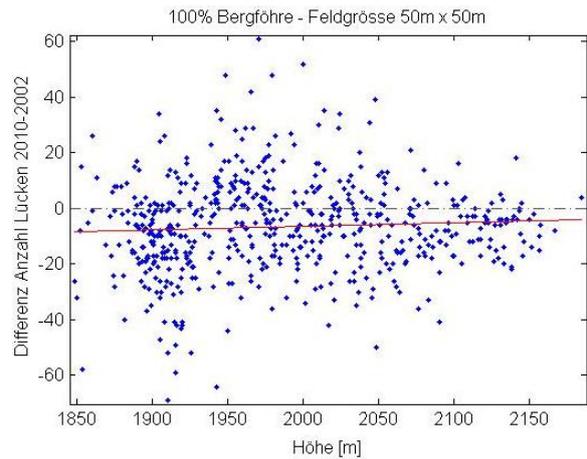


Abbildung 62 - Insgesamt hat die durchschnittliche Lückenzahl je Feldfläche von 2002 auf 2010 abgenommen. In den tieferen Regionen des Untersuchungsgebietes war die Abnahme jedoch grösser als in den höheren Lagen.

Die Differenzen der Lückenzahlen je Feldfläche haben sich auch nicht über alle Expositionen hinweg gleich verändert (**Abbildung 63**). Der Median der Differenz liegt bei den Expositionen Südost und Süd für die Feldfläche von 30 m x 30 m bei Null. In allen anderen Expositionen hingegen haben die Lückenzahlen eher abgenommen. Auch über die verschiedenen Hangneigungen hinweg sind die Differenzen der Lückenzahlen nicht immer gleich hoch (**Abbildung 64**). In den Neigungsklassen N1 (3 - 16%) und N7 (81 - 94%) sind die Differenzen der Lückenzahlen etwas grösser als in den übrigen Klassen.

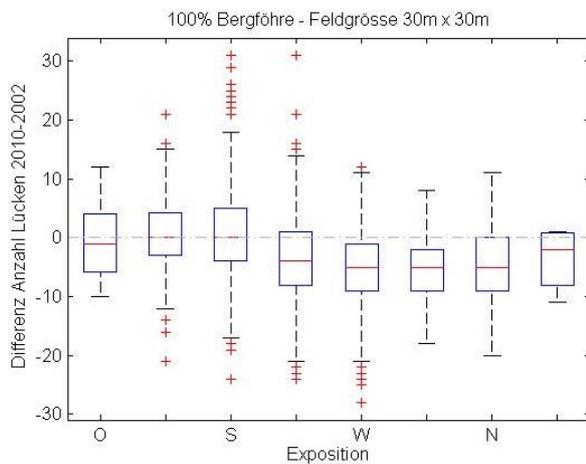


Abbildung 63 - Die Anzahl Lücken je Feldfläche hat sich nicht in allen Expositionen gleich verändert. Während der Median der Lückendifferenzen an süd- und südostexponierten Lagen unverändert blieb, verzeichneten alle übrigen Expositionen im Schnitt eine Abnahme der Lückenzahlen je Feld.

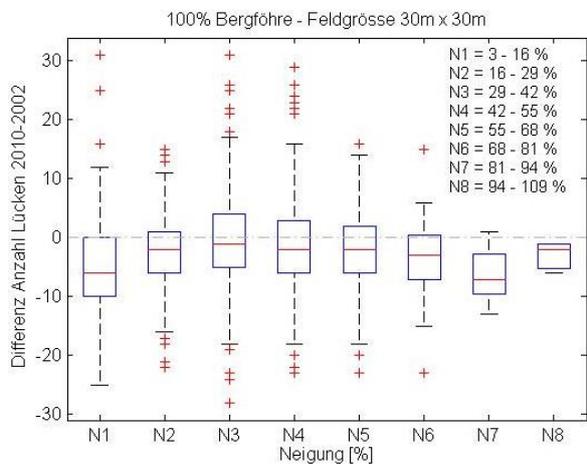


Abbildung 64 - Auch über die verschiedenen Hangneigungen hinweg sind Unterschiede in den Abnahmen der Lückenzahlen ersichtlich. Die Neigungsklassen N1 (3 - 16%) und N7 (81 - 94%) verzeichneten eine etwas grössere Abnahme als die übrigen Neigungsklassen.

Interessant ist noch der Blick auf die Abhängigkeit der Anzahl Lücken in Bezug zum Lückenanteil der Felder. Die Abhängigkeit ist wie schon für die Subfläche (**Abbildung 45** auf Seite 36) festgestellt umgekehrt proportional zueinander. Je grösser der Lückenanteil einer Fläche ist, desto geringer ist die Anzahl dieser Lücken (**Abbildung 65**). Dies ist auch nachvollziehbar, denn wenn eine Lücke der Feldgrösse entspricht, so gibt es genau eine Lücke. Das umgekehrte ist jedoch nur bedingt möglich, denn wenn der Lückenanteil einer

Fläche gegen Null geht, so geht auch die Lückenzahl gegen Null. Die **Abbildung 65** verzeichnet also, wie schon für die Subfläche erwähnt, irgendwo im tieferen Lückenanteilsbereich ein Maximum für die Anzahl Lücken. Etwas besser ersichtlich wird dies, wenn die Daten der Flächen mit 100% Nadelholz betrachtet, die Feldgröße auf 20 m x 20 m reduziert und die Anzahl Lücken versus Lückenanteile in Boxplots dargestellt werden. Damit ergibt sich ein Maximum für die Lückenzahl bei einem Lückenanteil zwischen 15 und 27% (**Abbildung 66**).

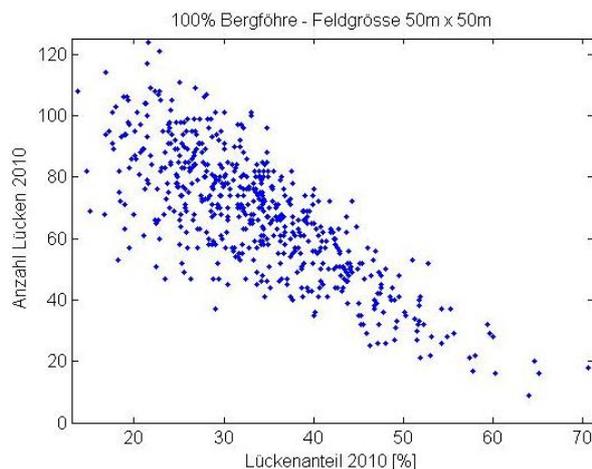


Abbildung 65 - Die Anzahl Lücken verhält sich über einen grossen Bereich umgekehrt proportional zum Lückenanteil der Felder. Die Streuung der Daten ist für die gewählte Feldseitenlänge von 50 m relativ gering.

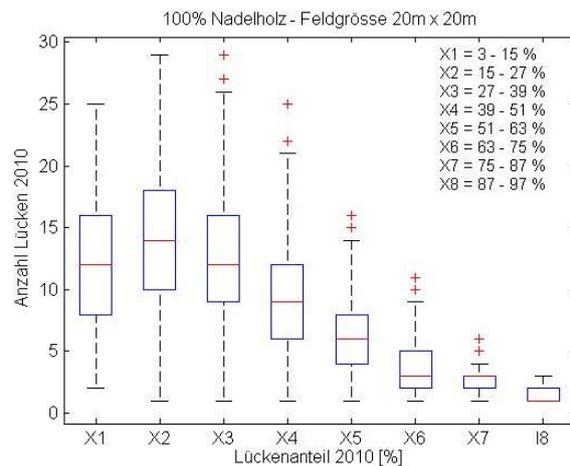


Abbildung 66 - Bei der Lückenzahl versus Lückenanteil und einer Feldgröße von 20 m x 20 m offenbart sich ein Maximum der Lückenzahlen für Lückenanteile zwischen 15 und 27%.

4.5.5 Kernflächen und deren Differenzen

Man nehme an, eine Feldfläche beinhalte keine Lückenflächen und bestehe zu 100% aus Wald. Damit würden auch keine Lückenkernflächen existieren. Der Flächenwert für die Kerne wäre folglich 0 m². Im umgekehrten Fall, wenn die Feldfläche zu 100% aus einer Lücke bestehen würde, müsste folglich auch die Kernfläche den Wert der Gesamtfeldfläche aufweisen (falls die Feldfläche mindestens von einem 1 m breiten Lückengürtel umgeben wäre). Nun werden diese beiden Extrema eher selten vorkommen und damit die üblichen Werte irgendwo dazwischen liegen. Genau dies erkennt man in der Darstellung der Kernflächengrößen je Lückenanteile für das Jahr 2002 (**Abbildung 67**). Offensichtlich scheinen die Anzahl Kernflächen pro Feldfläche exponentiell mit dem Lückenanteil pro Feldfläche zu zunehmen. Bei einer Feldseitenlänge von 30 m läge der maximal mögliche Lückenanteil bei 900 m². Wie weiter oben festgestellt wurde, hängt die Anzahl Lücken innerhalb einer bestimmten Bandbreite umgekehrt proportional von den Lückenanteilen ab (**Abbildung 65**). Folglich kann daraus und mittels der **Abbildung 67** angenommen werden, dass die Kernflächengröße umgekehrt proportional von der Anzahl Lücken pro Feld abhängen wird. Die **Abbildung 68** bestätigt uns diese Annahme.

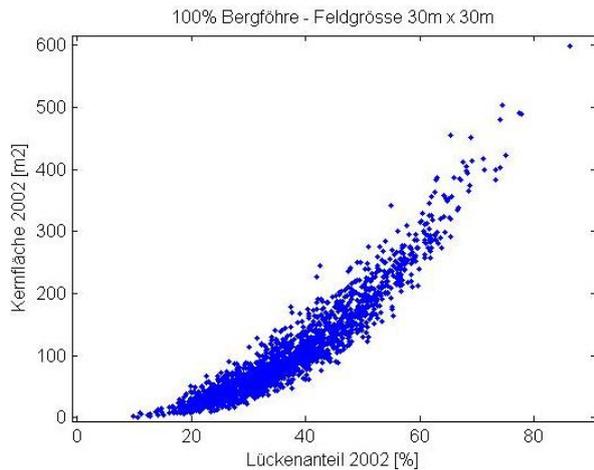


Abbildung 67 - Die Anzahl Lücken Kernflächen scheinen exponentiell von den Lückenanteilen abzuhängen. Für einen Lückenanteil von Null ist auch die Kernflächengröße Null. Für einen Lückenanteil von 100% entspricht die Kernflächengröße der Feldgröße. Für eine Feldseitenlänge von 30 m sind das folglich 900 m^2 .

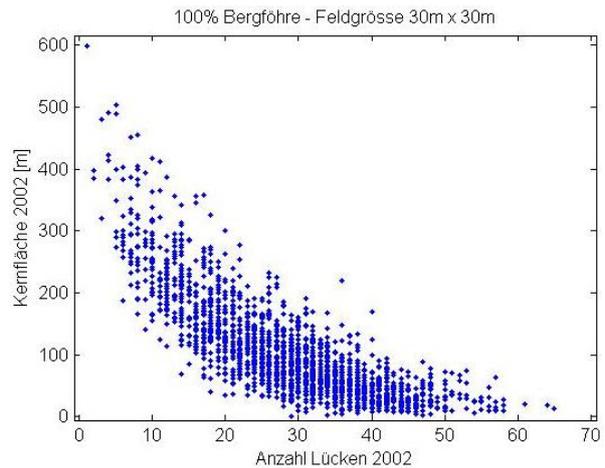


Abbildung 68 - Die Anzahl Lücken hängt umgekehrt proportional von den Lückenanteilen ab. Zudem hängen die Kernflächen exponentiell von den Lückenanteilen ab. Folglich zeigen die Kernflächen einen umgekehrt proportionalen Zusammenhang zu den Anzahl Lücken.

Aufgrund des positiven Zusammenhangs zwischen Kernflächen und Lückenanteilen verhalten sich die Differenzen der Kernflächen je Höhe (**Abbildung 69**) ähnlich zu den Differenzen der Lückenanteile je Höhe (**Abbildung 56** auf Seite 45). In den tieferen Lagen verzeichneten die Kernflächen eine Abnahme, während in höheren Regionen eine Stagnation oder gar eine leichte Zunahme feststellbar ist.

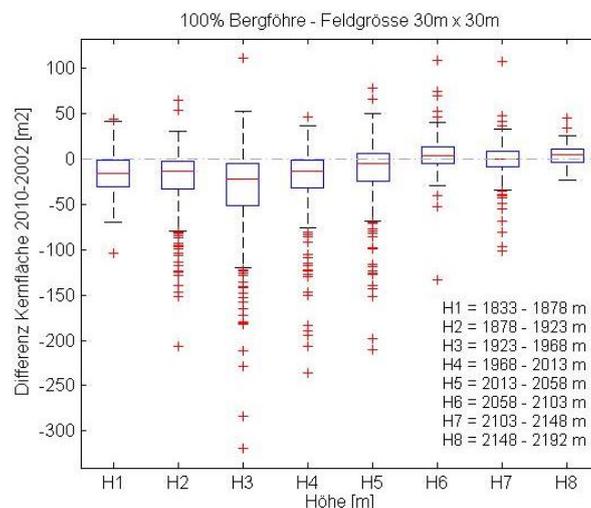


Abbildung 69 - Die Differenzen der Kernflächen je Höhe verhalten sich ähnlich wie die Differenzen der Lückenanteile je Höhe. In den tieferen Lagen ist eine Abnahme zu verzeichnen während die Kernflächengrößen in den höheren Lagen stagnierten oder gar leicht zugenommen haben.

4.5.6 Grenzlängen und deren Differenzen

Ähnliche Überlegungen zu den Maxima der Kernflächen können auch zu den Grenzlängen gemacht werden. Wenn eine Feldfläche keine Lückenfläche beinhalten würde, so läge die Lückengrenzlänge bei 0 m. Dasselbe gilt, wenn eine Lücke die gesamte Feldfläche überdecken würde. Die Lückengrenzlänge läge auch hier bei 0 m. Die Frage ist nun, wie sieht es dazwischen aus. Man kann annehmen, dass mit steigendem Lückenanteil die Grenzlänge

zunimmt, weil sie nicht kleiner als Null werden kann. Geht der Wert der Lückenanteile jedoch gegen 100%, so muss die Grenzlänge wieder abnehmen. Genau dies ist in der **Abbildung 70** ersichtlich. Das Maximum für die Grenzlänge befindet sich offenbar in der Mitte, bei einem Lückenanteil von 50%. Interessant ist an dieser Stelle noch, dass kein Trend zwischen der Grenzlänge und der Lückenzahl feststellbar ist (**Abbildung 71**).

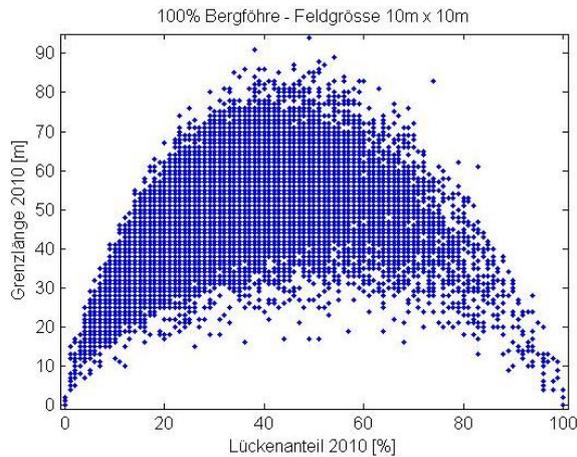


Abbildung 70 - Ohne Lücken ist logischerweise die Grenzlänge Null. Dasselbe gilt für einen Lückenanteil von 100%. Wie die Abbildung nun schön zeigt, befindet sich das Maximum der Grenzlänge bei einem Lückenanteil von 50%.

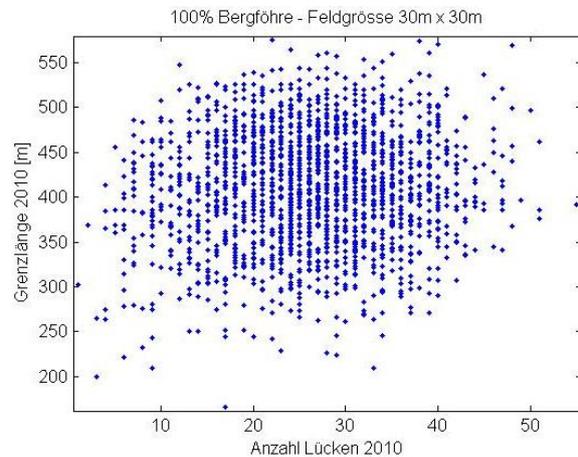


Abbildung 71 - Während ein klarer Zusammenhang zwischen den Lückengrenzlängen und den Lückenanteilen besteht, ist zwischen den Grenzlängen und der Anzahl Lücken keine klare Abhängigkeit zu erkennen.

Während das Maximum der Grenzlänge bei einem mittleren Lückenanteil liegt, kommt diese Spitze beim Vergleich mit den Kernflächen viel früher vor. Bei einer Feldgrösse von 400 m² erreicht die Grenzlänge bei einem Kernflächenwert zwischen 37 und 75 m² das Maximum (**Abbildung 72**). Auch hier geht die Kurve wieder durch den Nullpunkt.

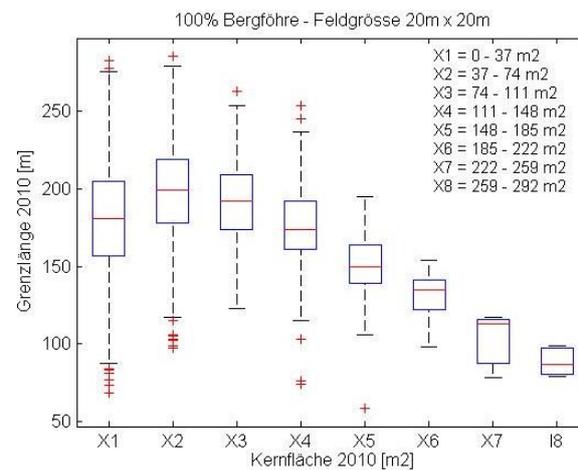
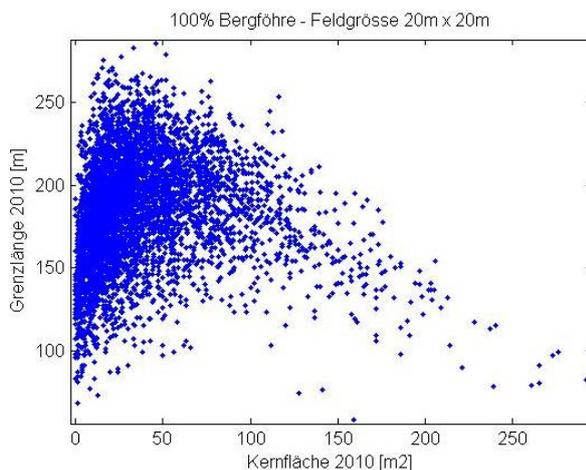


Abbildung 72 - Die Darstellungen der Grenzlänge je Kernfläche für die einzelnen Datenpunkte (links) und in Boxplots (rechts) machen deutlich, dass das Maximum für die Grenzlänge im untersten Kernflächenbereich liegt. Dies ist offenbar der Wert, an dem die Lücken am fragmentiertesten sind.

Bildet man die Grenzlänge versus Höhe ab, so zeigt sich der Trend, dass mit steigender Höhe die Grenzlängen kleiner werden (**Abbildung 73**). Bei den Differenzen macht sich wiederum im Schnitt eine Abnahme der Grenzlängen sichtbar. Offenbar scheinen diese in den tieferen Regionen eine grössere Abnahme zu erfahren als in den höheren Regionen der Untersuchungsfläche (**Abbildung 74**).

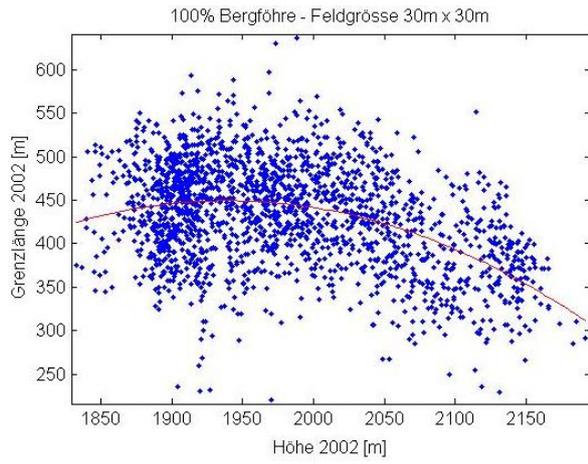


Abbildung 73 - Die Grenzlängen scheinen in höheren Lagen tendenziell kürzer zu sein, als in den tieferen Regionen der Untersuchungsfläche.

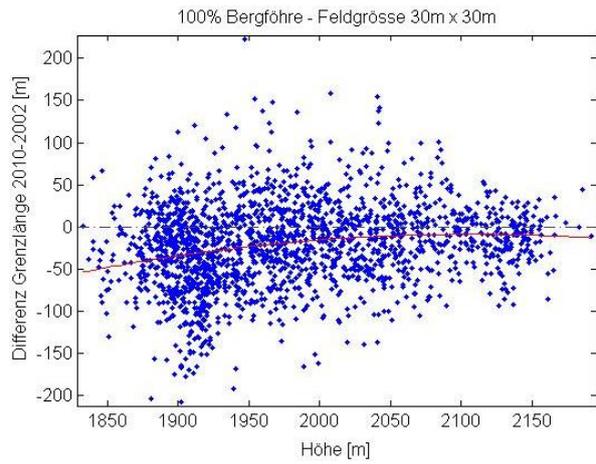


Abbildung 74 - Die Grenzlängen haben in allen Höhenlagen im Schnitt abgenommen. Die Abnahmen sind in den tieferen Lagen etwas grösser als in den höheren Regionen.

5 Diskussion

5.1 Genauigkeit der Daten und der Waldflächenbestimmung

Die Abweichungen der Original-DTM zu den aus den RAW-Daten erstellten DTM liegen innerhalb von 0.5 m. Aus diesem Grund können die Originalraster gut als Ersatz für die artefakthaltigen DTM-Raster verwendet werden. Aufgrund der Genauigkeitsanalyse lässt sich auch sagen, dass die Differenzen der Rasterdaten 2010 zu 2002 minim sind. Das DSM 2010 weist gegenüber 2002 praktisch denselben Höhenshift auf wie das Original-DTM 2010 gegenüber 2002. Und weil für die Vegetationshöhenermittlung diese beiden Raster jeweils subtrahiert werden, eliminieren sich die Höhenshifte des Jahres 2010 gegenüber 2002 gleich selber. Es existieren somit keine nennenswerten systematischen Fehler. Aus den jeweiligen Daten der beiden Jahre können somit die Vegetationshöhen für die vorliegende Arbeit genügend genau ermittelt werden, um daraus in einem weiteren Schritt die Waldfläche zu bestimmen.

Auch wenn noch geringe Höhenunterschiede in den Oberflächenrastern vorkommen, so haben diese nur einen kleinen Einfluss auf die ermittelte Waldfläche. Bei einer Schwellenhöhe von 3 m hat ein um 30 cm in der Höhe verschobener Rasterlayer gerade mal eine relative Waldflächenzunahme von im Schnitt 0.9% zur Folge. Obwohl die Zahl der Stichproben mit vier Testflächen sehr klein ist, kann insgesamt davon ausgegangen werden, dass der Einfluss bei einem Höhenshift von 30 cm sehr gering ist. Die meisten Abweichungen der Rasterpunkte liegen innerhalb dieser Grössenordnung. Etwas grösser hingegen ist der Einfluss der Wahl des Höenschwellenwertes für die Waldflächenbestimmung. Hier hat ein Sprung der Schwellenhöhe von 2 m auf 3 m eine relative Waldflächenzunahme von im Schnitt 3.4% ergeben. Somit lässt sich sagen, dass zur Bestimmung der Waldfläche die vorhandene Höhentoleranz der Oberflächenraster einen markant kleineren Einfluss hat als die Wahl der Schwellenhöhe.

Die Waldanteile in Abhängigkeit der Rastergrössen (**Tabelle 3** auf Seite 25) haben ergeben, dass ausser bei der Auflösung von 0.5 m die Waldanteile im Jahr 2010 mehrheitlich grösser waren als im Jahr 2002. Dass sich der Wald im Schweizerischen Nationalpark nach den noch nicht allzu lange zurückliegenden, starken Eingriffen und Rodungen (Parolini, 2012) und dem standortbedingten langsamen Wachstum immer noch in der Aufbauphase befindet, ist nachvollziehbar. Laut den Daten hat zum Beispiel die Fläche 3 bei einer Rasterauflösung von 1 m und dem Schwellenwert von 3 m einen Waldflächenzuwachs von 3.1% verzeichnet. Ob diese Waldflächenzunahme den realen Zuwachs widerspiegelt oder nicht, das ist jedoch schwer abzuschätzen. Als Grund für die grössere Waldfläche im Jahr 2010 gegenüber 2002 können auch die Technik und die Methoden der Waldflächenermittlung geltend gemacht werden. Eine Überprüfung der verwendeten Raster auf einen Höhenshift einzelner Layer ergab jedoch wie besprochen nur kleine Abweichungen. Der kleine Shift in den Daten 2010 gegenüber 2002 hat sich durch die Vegetationshöhenerstellung sogar selber eliminiert. Ursache für die höheren Waldflächenanteile 2010 gegenüber 2002 könnten neben dem realen Zuwachs auch die unterschiedlichen Punktwolkendichten der beiden Datensätze sein. Die Dichte der LiDAR-Daten 2010 war grösser als jene für 2002. Somit konnten Äste oder Astspitzen erfasst werden, welche im Datensatz 2002 nicht erfasst wurden. Aus diesem Grund könnten für das Jahr 2010 mehr Pixel als Wald eingestuft worden sein als für das Jahr 2002. Weshalb jedoch die Testfläche 1 (innerhalb der LWF-Fläche) als einzige Testfläche für alle Rasterauflösungen praktisch keine Unterschiede in den Waldflächen 2002 und 2010 aufweist, kann damit nicht erklärt werden.

5.2 Grenze der Rasterauflösung und Interpolationsfehler fehlender Datenpunkte

Ein weiteres Phänomen bei den Waldanteilen in Abhängigkeit der Rastergrößen war der Kurvenknick zwischen den Rasterauflösungen 0.5 m und 1 m (**Abbildung 26** auf Seite 24). Dieser Knick kann mittels der Positionsanalyse zu den Interpolationsfehlern fehlender Datenwerte erklärt werden (**Abbildung 28** von Seite 26). Für die Rasterauflösung von 1 m hat sich gezeigt, dass sich überproportional viele Pixel ohne Höheninformation (NaN) in der Kategorie *Wald-Lücke* befinden. Diese Kategorie steht für die Statusveränderung Wald (2002) zu Lücke (2010). Im Rasterdatensatz 2010 waren jedoch keine solchen Datenlecks aufzufinden. Alle diese Punkte mit fehlender Information waren im Datensatz 2002 anzutreffen. Folglich wurden im Raster 2002 verhältnismässig mehr NaN-Pixel als Wald klassiert. Diese *Datenlecks* wurden interpoliert, indem aus den Höhenwerten der Nachbarpixel ein Mittelwert für die fehlenden Pixel berechnet wurde. Befindet sich an solch einem Rasterpunkt mit fehlender Höheninformation real eine kleine Waldlücke (1 m²), wird diese durch die Interpolation ausgeglichen und damit fälschlicherweise als Wald klassiert. Im Datensatz 2010 konnten diese Lücken aufgrund der höheren Datendichte korrekt erkannt und bestehen bleiben. Daraus lässt sich schliessen, dass für das Jahr 2002 für zu viele Pixel mit fehlendem Inhalt ein zu grosser Höhenwert interpoliert wurde und diese Rasterpixel folglich fälschlicherweise als Wald klassiert wurden. Der Anteil der *Wald-Lücken*-Pixel am Pixeltotal lag für die Auflösung von 1 m jedoch bei lediglich 0.4%. Folglich ist der Einfluss der fehlerhaften Interpolation für diese Auflösung relativ klein. Wird die Auflösung auf 0.5 m verfeinert, dann steigt jedoch der Anteil der Datenlecks für das Jahr 2002 rapide an. Es entstehen also noch mehr Pixel mit fehlendem Dateninhalt, welche systembedingt fälschlicherweise als Wald anstatt als Lücke klassiert werden. Dies äussert sich dann im angesprochenen Kurvenknick. Für das Jahr 2010 entstanden aufgrund der grösseren Datendichte auch bei einer Auflösung von 0.5 m nur wenige solche Datenlecks. Kleine Lücken konnten somit bestehen bleiben, weil diese noch erfasst werden konnten. Die 2010er Kurve zeigt deshalb keinen Knick. Die Schlussfolgerung ist trivial: Je höher die Laserdatenauflösung, umso genauer wird die Waldstruktur erfasst. Jedoch ist die Auflösung von 0.5 m für den Datensatz 2002 zu fein.

Visuell klarer wird das Besprochene, wenn die Rasterdaten 2002 mit der Auflösung von 0.5 m dargestellt werden (**Abbildung 75**). Die gesprenkelten, dunklen Punkte sind Pixel mit fehlendem Höhenwert. Diese können zwar mittels Interpolation der umliegenden Höhenwerte ausgeglichen werden, solange die umliegenden Rasterpunkte einen Höhenwert aufweisen. Doch wie besprochen hat diese Methode ihre Grenzen. Häufig fehlen ganze Reihen von Messpunkten, so dass keine Interpolation durch die Nachbarspunkte vollzogen werden kann und damit ein sehr ungenaues Raster resultiert. Die Laserdaten wurden in parallel versetzten Überfliegungsstreifen aufgenommen, wobei die Flächen mit Überschneidung eine ausreichend hohe Punktdichte aufweisen. Hingegen haben die einfach erfassten Flächen für eine Auflösung von 0.5 m eine zu geringe Messpunktdichte.

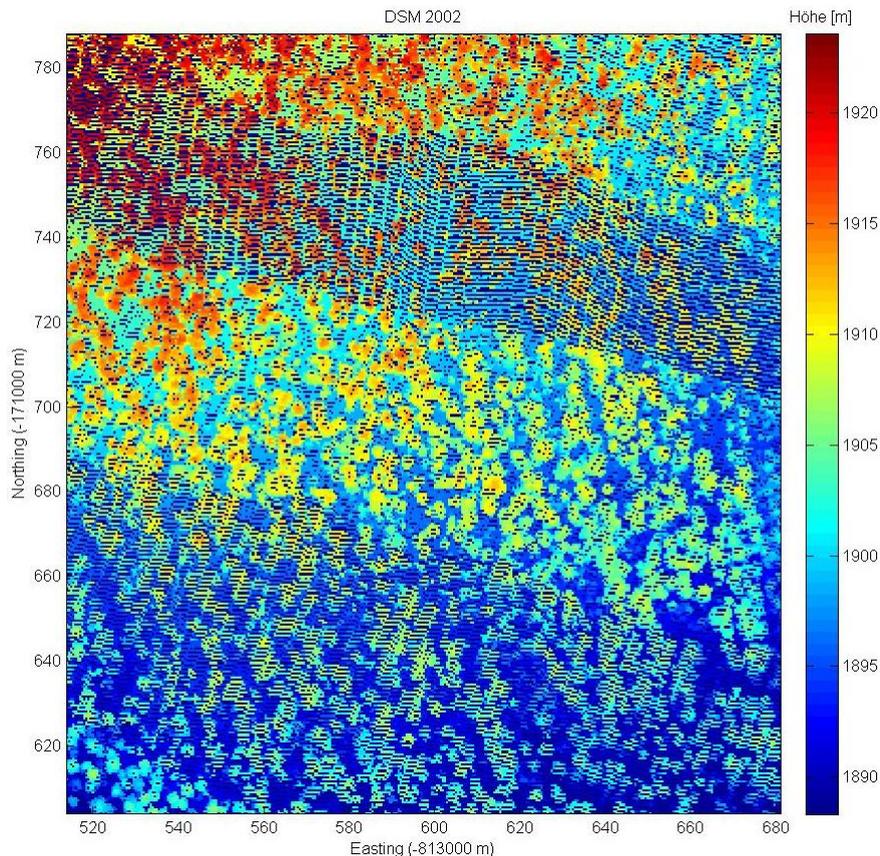


Abbildung 75 - Bei der Betrachtung des Oberflächenrasters (DSM) 2002 mit der Auflösung 0.5 m fallen die parallelen Überfliegungen mit ihren Überschneidungen auf. Die Rasterpunkte in den Überschneidungsflächen weisen eine für die Auflösung von 0.5 m genügend hohe Messpunktdichte auf. Für die restlichen Punkte ist diese Auflösung jedoch zu fein. Somit sollte mit diesem Datensatz mit einer Auflösung von 1 m oder grösser gearbeitet werden.

Um solche Fehlinterpretation auszumerzen, müsste eine geeignetere Interpolationsmethode gefunden werden. Doch wenn eine Waldlücke kleiner ist als die verwendete Rastergrösse, kann auch die beste Interpolationsmethode eine solche Lücke nicht erkennen. Dann bleibt nur noch die Wahl einer grösseren Rasterauflösung, was wiederum einen neuen Waldflächenermittlungsfehler ergibt, denn mit steigender Rasterauflösung steigt auch der ermittelte Waldanteil. Und schon bei einer Rastergrösse von 4 m resultieren für die Flächen im Untersuchungsgebiet Waldanteile gegen 100%. Der Einfluss der Fehlinterpolation solcher Datenlecks ist für eine Auflösung von 1 m insgesamt jedoch eher gering, weil der Anteil undefinierten Pixel im Status Wald-Lücke mit 0.4% an der gesamten Pixelzahl relativ klein war. Bei einer feineren Auflösung wird der Anteil undefinierter Pixel jedoch schnell grösser und somit wird der Waldanteil stärker verfälscht. Aus diesen Gründen erscheint eine Rasterauflösung von 1 m für die Bearbeitung der Fragestellungen (ii) und (iii) als bester Kompromiss.

5.3 Zuwachsrichtungen und Positionen der Mortalität

Während durch das Umfallen von Bäumen ein Rasterpunkt eine grosse Höhenabnahme erfährt, wird der Höhenwert eines als Lücke klassierten Rasterpixels durch das Überwachsen eines Astes stark erhöht. Ebenfalls können Rasterpunkte durch das Abkippen eines Baumes negative Höhenveränderungen erfahren, während wiederum die Rasterpunkte, auf die der Baum kippt, eine Positivveränderung erhalten. Auf der LWF-Fläche wurden für die Differenz der DSM-Raster 2010 - 2002 genau diese Feststellungen gemacht (**Abbildung 29** auf

Seite 27). Grössere Flächen mit einer starken Negativveränderung (bis zu 15 m) deuten dabei auf umgefallene Bäume hin. Hingegen können starke Positivveränderungen (rote Punkte) von Ästen herrühren, welche zwischen 2002 und 2010 über Rasterpunkte gewachsen sind, die für das Jahr 2002 noch als Lücke klassiert waren. Häufig liegen die Negativ- und Positivveränderungen auch nebeneinander, was auf das Kippen eines Baumes schliessen lässt, oder auch Äste zeigt, welche 2002 zum einen Pixel und im Jahr 2010 zum nebenanliegenden Pixel gezählt wurden. Ein Grund hierfür kann sein, dass sich ein schmaler Ast an der Grenze zweier Rasterpunkte befindet und aufgrund der Messtoleranzen im Jahr 2002 zum einen Rasterpunkt und im Jahr 2010 zum anderen Rasterpunkt gezählt wurde. Dabei hat der eine Rasterpunkt eine negative Höhenänderung erfahren, der andere Rasterpunkt hingegen eine positive. Diese beiden Rasterpunkte wären folglich mehr oder weniger symmetrisch links und rechts von der Y-Achse im Differenzhistogramm angeordnet.

Nachdem nun das Prinzip dieser Höhenveränderungen klar sein sollte, werden nun die Resultate der Statusveränderungen besprochen. An dieser Stelle kann sogleich vorabgenommen werden, dass Mortalität und Zuwachs in der Untersuchungsfläche des Schweizerischen Nationalparks keine Richtungstendenzen aufzuweisen scheinen. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass Flächen mit einem 100% Bergföhrenanteil fragmentierter sind als die Flächen mit unterschiedlichen Baumartenanteilen. Die Bergföhrenwälder zeigen vermehrt auch innerhalb der Waldfläche kleine Lücken, was auf einen lückigeren Bestand oder auf aufgelöstere Baumkronen hindeutet. Die Waldflächen mit gemischten Baumbeständen sind hingegen dichter und kleine Baumkronenlücken innerhalb der Waldfläche kommen eher selten vor. Dies hat auch zur Folge, dass die reinen Bergföhrenwälder Zuwachs einzelner Rasterpunkte innerhalb der Waldfläche zeigen können, während die Zuwächse in gemischten Baumbeständen nur an den Waldrändern feststellbar sind. Dasselbe gilt auch für die neu entstanden Lücken mit kleinem Flächenausmass (1 m^2), welche auf abgebrochene Äste oder kippende Bäume hindeuten. Diese kommen in den gemischten Baumbeständen hauptsächlich am Waldrand vor, während im reinen Bergföhrenbestand häufig solche neuen Kleinstlücken auch innerhalb der Waldfläche auftreten.

Grössere Lückenaufweitungen, welche aufgrund umgefallener Bäume entstehen, treten überall hauptsächlich an den Waldrändern auf und wie erwähnt nicht richtungsabhängig. Nur an wenigen Orten konnte festgestellt werden, dass solche grösseren Lücken innerhalb der geschlossenen Waldfläche aufgetreten sind. Es scheint somit, dass die Bäume am Waldrand stärker den mortalitätsverursachenden Bedingungen wie zum Beispiel Pilzbefall (Bendel et al., 2006a und 2006b) oder auch Wind oder Trockenheitseinfluss ausgesetzt sind. Was genau die Ursachen der Mortalität waren, kann an dieser Stelle jedoch nicht beantwortet werden. Für die vorliegende Arbeit wurden keine Feldaufnahmen getätigt.

Eine aktuelle Studie, welche sich explizit mit der Positionen und Anordnungen neuer Lücken auseinandergesetzt hat, ist die von Torimaru et al. (2012). Darin wurde die Dynamik des Bedeckungsgrades via Luftbilder und digitalen Höhenmodellen über eine längere Zeitreihe hin untersucht. Dabei wurden drei unterschiedliche Waldtypen in Japan untersucht. Dies waren ein immergrüner Laubwald der gemässigten Zone, ein borealer Laub- und Mischwald und ein subalpiner Nadelwald. Die Studie kam zum Schluss, dass im untersuchten immergrünen Laubwald und im borealen Laub- und Mischwald neue Lücken signifikant häufiger entlang der Grenze alter Lückenflächen auftraten als innerhalb des geschlossenen Waldes. Mit steigender Distanz zum Waldrand nahm die Zahl der neuen Lücken rapide ab. Jedoch war für den subalpinen Nadelwald kein signifikanter Zusammenhang zwischen der

Position von neuen Lücken und der Position von Lückenrändern zu verzeichnen. Die in dieser Masterarbeit gemachten Feststellungen für Bergföhrenwälder decken sich somit recht gut mit dem in Torimaru et al. (2012) untersuchten subalpinen Nadelwald. Die neuen Lückenpixel befinden sich nicht vermehrt an den Waldrändern. Hingegen sind die Positionen neuer Lückenpixel in den gemischten Lärchen-Arven-Wäldern des Untersuchungsgebiets im Schweizerischen Nationalpark sehr wohl an den Wald-Lücken-Grenzen positioniert. Diese Charakteristik deckt sich somit mit den beiden anderen in Torimaru et al. (2012) untersuchten Waldtypen.

In den Lückenrastern zeigen die Bergföhrenwälder der untersuchten Gebiete eine grössere Fragmentierung der Lücken- und Waldflächen als die Lärchen-Arven-Mischwälder. Dies deutet auf eine aufgelöste Struktur des Bergföhrenwaldes hin. Deutlich wird dies sogleich bei der Betrachtung der **Abbildung 76**, welche einen Bergföhrenwald aus dem Schweizerischen Nationalpark zeigt. Der Wald zeigt in diesem Ausschnitt keine deutliche Grenze zwischen Wald und Lücke. Auch wenn die Struktur des Bergföhrenwaldes im Untersuchungsgebiet nicht überall diese extreme Auflösung zeigt, ist sie trotzdem im gewissen Rahmen charakteristisch für den Bergföhrenwald im Schweizerischen Nationalpark. Zuwachs- oder Ausweitungsrichtungen von Lücken sind in solch einem Wald nur sehr schwer auszumachen, sofern es sie denn überhaupt gibt. Jedenfalls wird nun klar, weshalb die Positionen der neuen Lückenpixel in den reinen Bergföhrenflächen eine solch grosse Verstreuung zeigen.



Abbildung 76 - Der Bergföhrenwald im Schweizerischen Nationalpark zeigt mitunter recht chaotische Strukturen. Der Bestand ist häufig sehr aufgelöst. Neben jungen und alten Bäumen steht und liegt sehr häufig viel Totholz in der Fläche. Hier eine Ausweitungsrichtung der Lücken oder eine Zuwachsrichtung des Waldes ausfindig zu machen, scheint praktisch nicht möglich. (Sven Walker, 2012)

5.4 Räumliche und topografische Einflüsse auf die Lücken und deren Dynamik

Die Auswertung der Feldanalyse hat aufgezeigt, dass es sehr wichtig ist zu wissen, in welchem Umfang eine Aussage und Interpretation gemacht wird. So war zum Beispiel für die kleine, homogene Subfläche für die Lückenanteile 2010 je Höhenlage ein relativ klarer positiver Korrelationstrend sichtbar. Für das Jahr 2002 war der Trend jedoch nicht ganz so deutlich, weil drei Feldflächen in der unteren Höhenstufe mit ihren grossen Lückenanteilen die Trendkurve beeinflussten. Noch einmal anders sah die Auswertung der gesamten Untersuchungsfläche aus. Hier zeigte sich, dass mit einer steigenden Höhe die Lückenanteile zunehmen, diese dann in noch höheren Lagen wiederum abnehmen. Je nach Grösse der Untersuchungsfläche und auch je nachdem welche Jahresdaten betrachtet werden, ergeben sich somit unterschiedliche Abhängigkeitstrends. Auch eine Splittung der Daten, zum Beispiel in verschiedene Höhen- oder Neigungsklassen, ergibt zum Teil sehr unterschiedliche Resultate. So hat die Gesamtdarstellung der Lückenanteile versus Exposition ergeben, dass die Felder mit Südexposition im Schnitt einen höheren Lückenanteil aufweisen als jene der Westexposition. Doch wenn man die Daten in verschiedene Höhenstufen separiert und dieselbe Auswertung für jede Höhenstufe separat noch einmal macht, so kommen ganz andere Resultate zum Vorschein. In der untersten Höhenklasse weisen die südexponierten Flächen im Schnitt einen geringeren Lückenanteil auf, als jene der Westexposition. Dies ist genau die gegenteilige Feststellung der Darstellung ohne Höhenseparierung. Eine solche Separation der Daten sollte jedoch mit Vorsicht gemacht werden, denn werden die Daten zu stark in verschiedene Klassen aufgeteilt, beinhalten einzelne Klassen nur noch wenige Datenpunkte. Eine zu geringe Anzahl Datenpunkte kann die Aussagen verfälschen, weil dabei einzelne Extrempunkte eine zu hohe Gewichtung erhalten.

Die klarsten und deutlichsten Zusammenhänge weisen Parameter auf, welche in einem mathematischen Zusammenhang stehen. So steigt zum Beispiel die Grenzlänge mit dem Lückenanteil 0% von null Meter auf ein Maximum bei einem Lückenanteil von 50%, um dann gegen einen Lückenanteil von 100% auf den Nullwert zurück zu fallen. Während man allgemein wohl sagen darf, dass ein steigender Fragmentierungsgrad eine steigende Grenzlänge zur Folge hat, ist der Umkehrschluss im Allgemeinen aber nicht erlaubt. Zum Beispiel hat eine 10 m² grosse, ovale Fläche eine grössere Grenzlänge als eine gleich grosse, runde Fläche. Die ovale Fläche ist deswegen aber noch lange nicht fragmentierter als die Runde. Somit darf man auch nicht sagen, dass bei einem Lückenanteil von 50% eine Fläche am fragmentiertesten ist. Jedoch darf man sagen, dass fragmentiertere Flächen bei gleichen Lückenanteilen tendenziell grössere Grenzlängen aufweisen.

Auch sehr deutlich ist der Zusammenhang der totalen Kernflächenzahlen mit den Lückenanteilen. Hier ergeben Regressionsanalysen R²-Werte von bis zu 0.943 (*Feldgrösse 50 m, Jahr 2002, 100% Bergföhre*). Topografische Abhängigkeiten zeigen über das gesamte Untersuchungsgebiet jedoch keine solch klaren Trends, ausser man betrachtet die Daten, wie oben erwähnt, auf eng eingegrenzte Höhen-, Neigungs- oder Expositions-klassen. Ebenfalls eher deutliche Trends kann man, wie erwähnt, durch eng eingegrenzte Subflächen erreichen. Doch je kleiner ein Gebiet gewählt wird, desto eher können Trends durch die räumliche Autokorrelation bestimmt werden, als durch allgemeine ökologisch-topographische Einflüsse. Nahe beieinander liegende Punkte weisen mit einer grösseren Wahrscheinlichkeit ähnliche Standortattribute auf als fern voneinander liegende Punkte. Folglich ist die Korrelation der zu untersuchenden Werte, wie zum Beispiel der Lückenanteile, automatisch erhöht.

Insgesamt zeigen die Felddaten gewisse Trends zur Höhenabhängigkeit. Zum Beispiel sind die Lückenanteile in den tieferen und höheren Lagen kleiner als in den mittleren Höhenlagen des Untersuchungsgebiets. Ob diese Korrelation einen Kausalzusammenhang darstellt, lässt sich damit nicht sagen. Interessant wird es, wenn man die Hangneigungen je Höhenlage betrachtet. Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Lückenanteilen. In den tieferen und höheren Lagen sind die Hangneigungen der Feldflächen im Schnitt etwas kleiner als in den mittleren Höhenlagen des Untersuchungsgebiets. Dies lässt den Schluss zu, dass die ermittelten Lückenanteile weniger von der Höhenlage (und damit vom Klimaeinfluss) abhängen, sondern dass eher die Hangneigungen (und damit die Topografie) einen Einfluss auf die Lückenanteile ausüben. Bei der Darstellung der Lückenanteile je Hangneigung wurde denn auch ein positiver Trend festgestellt. Einen Einfluss zeigt auch die Exposition auf die einzelnen Feldflächen. Die Werte der süd- oder südostexponierten Flächen unterscheiden sich merklich von denen mit einer Nord- oder Nordostexposition. Anzumerken ist hierbei jedoch, dass schwach geneigte Flächen (unter 25%), welche wiederum hauptsächlich in den tieferen Lagen der Untersuchungsfläche auftreten (Talboden), eine nur sehr geringe Expositionsabhängigkeit aufweisen. Dies ist gut nachvollziehbar, denn an relativ flachen Standorten ist die Richtung der Sonneneinstrahlung nicht besonders bedeutend. Hingegen macht es bei steilen Flächen einen grossen Unterschied, ob diese gegen Süden oder gegen Norden gerichtet sind. Weil diese Art der Forschung neu ist, sind keine Studien verfügbar, anhand derer die Werte und Tendenzen der vorliegenden Resultate verglichen und auf deren Korrektheit untersucht werden können. Doch aufgrund der Logik scheinen die Aussagen der Laserdatenauswertung schlüssig.

Zum Einfluss der Hangneigung auf die Lückenanteile sollen an dieser Stelle aber noch ein paar kritische Worte geäussert werden. Es hat sich gezeigt, dass mit steigender Neigung eine Tendenz zu grösseren Lückenanteilen besteht. Ob diese Lückenanteile in stärker geneigten Flächen wirklich grösser sind, oder ob die Waldfläche durch die Schwellenwertmethode in stärker geneigten Flächen schlechter ermittelt werden kann, kann an dieser Stelle leider nicht abschliessend geklärt werden. Man stelle sich zum Beispiel einen Baum auf einer geneigten Fläche vor, mit Blickpunkt entlang der Höhenlinie auf die Seitenansicht des Baumes (**Abbildung 77**). Links vom Baum fällt der Hang und rechts vom Baum geht es bergaufwärts. Der Baum erscheint von links unter den Ästen gesehen höher als rechts des Stammes und folglich wird der Baum linksseitig aufgrund eines bestimmten Schwellenwertes eher als Baum klassiert, als in steigender Hangrichtung. Dies ergibt eine leichte Verzerrung, welche sich jedoch insgesamt ausgleichen sollte. Ob nun solch eine Verzerrung über alle Bäume einer Fläche gesehen dazu führt, dass eine stärker geneigte Fläche insgesamt als lückiger erfasst wird, als eine nicht geneigte Fläche, kann in dieser Arbeit leider nicht geklärt werden. Eine weitere Vermutung für grössere Lückenanteile in stärker geneigten Flächen wäre die folgende. In schiefen Flächen ist bei sich neigenden Bäumen die Wahrscheinlichkeit grösser schnell umzufallen, als in nicht geneigten Flächen. Der Grundgedanke ist der, dass sich die kippenden Bäume in geneigten Flächen hangabwärts weniger an stehenden Bäumen anlehnen können und somit weniger am Umfallen gehindert werden. Doch sind die Aussagen mit den Verzerrungen oder den kippenden Bäumen nur Hypothesen und müssten in spezifischen Untersuchungen noch bestätigt oder verworfen werden.

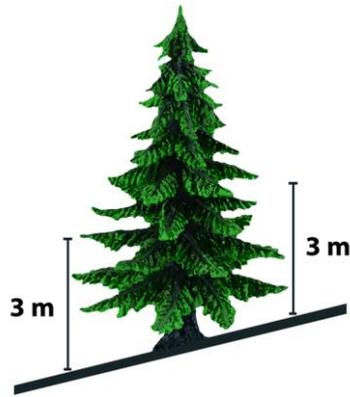


Abbildung 77 - Bäume in geneigten Flächen erscheinen unterhalb des Stammes gesehen höher als oberhalb. Aus diesem Grund besteht die Wahrscheinlichkeit, dass die Bäume anhand eines Schwellenwertes eher asymmetrischer erfasst werden als in flachen Regionen. Dies kann wiederum einen Einfluss auf die ermittelten Lückenanteile einer Fläche haben, denn laut den Daten steigen die Lückenanteile mit zunehmender Feldflächenneigung. Ob nun solche systematischen Baumerfassungsfehler vorliegen, oder ob es andere Gründe für die grösseren Lückenanteile in steileren Hängen gibt, konnte in dieser Arbeit leider nicht mehr geklärt werden.

Bis jetzt war immer von Tendenzen die Rede. Ob die besprochen Tendenzen, zum Beispiel mit den Hangneigungen oder den Expositionen, auch Kausalzusammenhänge aufweisen, kann mit den vorliegenden Daten nur schwer gesagt werden. Ebenfalls ist es schwierig, die Genauigkeit der absoluten Flächenwerte zu beziffern. Diese Tatsache kann jedoch für weitere Betrachtungen umgangen werden, indem man den Fokus auf die Differenzen der Datensätze 2002 zu 2010 legt. Weil beide Datensätze mit denselben Methoden behandelt wurden, können folglich einfach deren Differenzen interpretiert werden. Hier ist nicht mehr entscheidend, ob die Wald- und Lückenflächen absolut korrekt erfasst wurden oder ob systematische Erfassungsfehler vorliegen. Interessant ist nun die Frage, welche Parameter Änderungen von 2002 zu 2010 erfahren haben? Sind die Differenzen in den flachen Flächen grösser oder eher in den steileren Regionen? Sind die Wälder eher in den Nord- oder Südexpositionen zugewachsen? Wie schon vermehrt dargestellt wurde, hat die Waldfläche im Schweizerischen Nationalpark laut Daten insgesamt zugelegt. Anhand der Feldflächenanalyse haben hauptsächlich die tieferen und mittleren Lagen, also jene am Talboden und an den tieferen Seitenhängen an Waldfläche gewonnen, während die höheren Lagen unverändert blieben oder gar eine kleine Waldflächenabnahme verzeichneten. Diese Feststellung macht Sinn, denn so wurde in früheren Jahren hauptsächlich am Talboden und an den unteren Hangabschnitten Holz geschlagen (**Abbildung 78**). Laut Parolini (2012) wurden zwischen Il Fuorn (was übersetzt Schmelzofen bedeutet) und Buffalora zwischen 1850 und 1914 immer noch grössere Holzschläge verzeichnet. Zwischen Il Fuorn und Stabelchod sind zudem 19 Kohlenmeilerstandorte dokumentiert, welche die frühere starke Waldnutzung untermauern (Parolini, 2012). Dass sich der Wald nicht überall im gleichen Aufbaustadium befindet, hat sich darin gezeigt, dass in den meisten Flächen die Unterschiede in den Waldanteilen zwischen den beiden Zeitschritten relativ gross ist, jedoch in der LWF-Fläche fast keine Unterschiede zu sehen sind. Doch jetzt zu sagen, dass die LWF-Fläche das Stadium erreicht hat, an den sich Zuwachs und Mortalität ausgleichen, wäre etwas heikel. Wie gesagt können die Lückenanteile 2002 oder 2010 systematische Fehler aufweisen. Somit darf die Lückendifferenz der LWF-Fläche nur in Relation zu den Differenzen in anderen Flächen interpretiert werden.

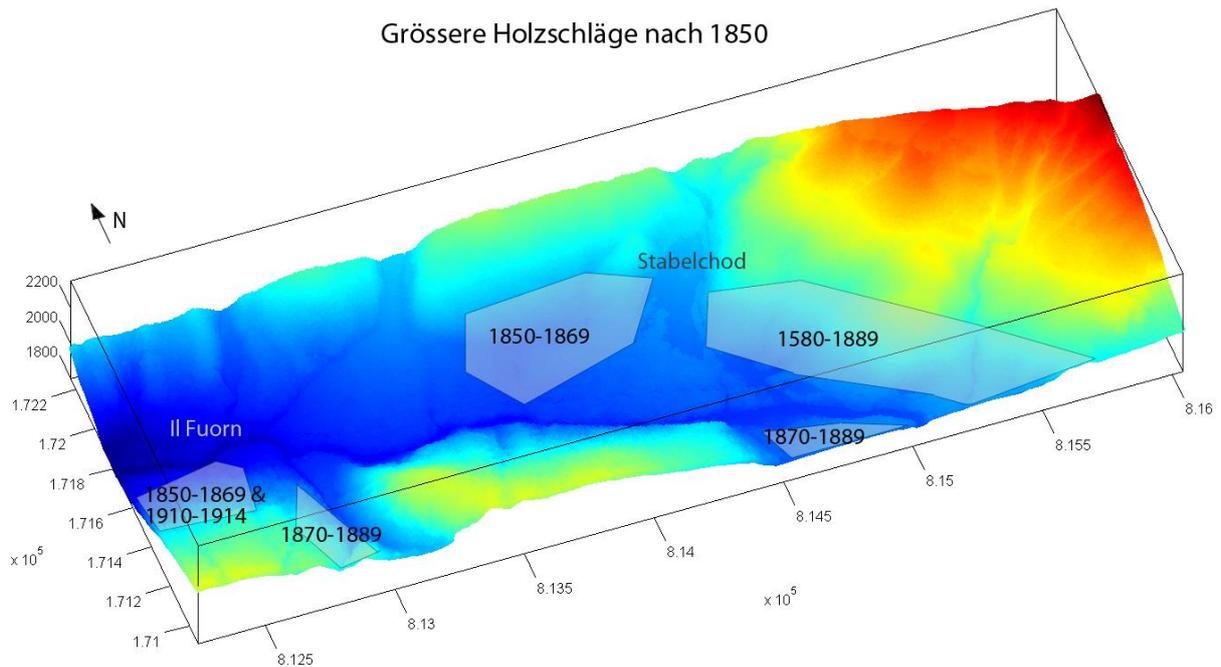


Abbildung 78 - Zwischen Il Fuorn und Buffalora (rechts ausserhalb des Ausschnitts) wurden zwischen 1850 und 1914 immer noch grössere Holzschläge verzeichnet (Parolini, 2012). Zudem sind zwischen Il Fuorn und Stabelchod 19 Kohlenmeilerstandorte dokumentiert, welche als Zeugnis früherer Holzverwendung der Region stehen.

Diese Untersuchung hat also unter anderem gezeigt, dass die Lückenanteile im Schweizerischen Nationalpark eher abnehmen, folglich also der Wald dichter wird. Hauptgrund hierfür ist wohl das seit hundert Jahren geltende Bewirtschaftungsverbot. Der Wald erfährt damit keine Auslichtungen mehr durch den Menschen. Somit verliert die von Bendel et al. (2006a) gemachte Feststellung an Einfluss. Die Begünstigung der Bergföhre gegenüber der Arve könnte aufgrund der sich verkleinernden Lückenflächen längerfristig reduziert oder gar aufgehoben werden. Folglich könnte die Sukzession hin zur Arve langfristig begünstigt werden.

6 Schlussfolgerungen

Diese Arbeit hat unter anderem aufgezeigt, wo Problempunkte bei der Wald- und Lückenerfassung mittels LiDAR-Daten liegen. Kleine Parameterunterschiede in den Erfassungstechniken (z.B. Wahl der Rastergrösse oder der Schwellenhöhe) können grosse Unterschiede in den ermittelten Flächengrössen hervorrufen. Die Technik der Erfassungsmethode wandelt sich über die Jahre und folglich ist es sehr wichtig, dass für vergleichbare Resultate möglichst die gleiche Erfassungstechnik (Datengenauigkeit, Punktwolkendichte, etc.) zur Anwendung kommt. Allenfalls lassen sich die ermittelten Werte nicht mehr absolut, sondern nur noch relativ, als Veränderungen im Vergleich zu weiteren Parametern (z.B. Höhe, Neigung, etc.) miteinander vergleichen.

In dieser Untersuchung wurde zudem deutlich, dass viele Parameter einen Einfluss auf die Waldstruktur haben und dass Abhängigkeitstendenzen zu einzelnen Parametern, wie zum Beispiel der Exposition oder der Hangneigung, nur relativ schwach erkennbar sind. Hingegen konnten mathematische Zusammenhänge recht deutlich aufgezeigt werden, was wiederum beweist, dass die Datenbearbeitung doch recht genau vollzogen wurde.

Um gewisse in dieser Arbeit gemachten Feststellungen zu untermauern, müssten noch weitere Untersuchungen getätigt werden. Zum Beispiel besteht eine positive Korrelation zwischen den Lückenanteilen und den Hangneigungen. Ob hier nun auch ein Kausalzusammenhang besteht, oder ob die Datenerfassung sogar aufgrund einer möglichen und besprochenen Falscherfassung der Bäume beruht, kann mit den vorliegenden Daten leider nicht geklärt werden. Jedoch sollte diese Arbeit gezeigt haben, dass in der Auswertung von LiDAR-Daten ein grosses Potenzial liegt. Gerade in Verwendung mit Langzeiterfassungen wird die Arbeit mit Laserdaten wohl noch viele nützliche Dienste erweisen und Erkenntnisse bringen.

Dank

An dieser Stelle bedanke ich mich herzlichst bei Dr. Christof Bigler für die Ermöglichung und Betreuung dieser für mich interessanten Arbeit. Er war mir für Ideen und Inputs immer eine Hilfe. Auch meinem Zweitbetreuer, Dr. Felix Morsdorf, gebührt ein herzliches Dankeschön. Er hat mir den Zugriff auf die LiDAR-Daten des Schweizerischen Nationalparks ermöglicht und stand mir für technische und Matlab-spezifische Fragen jederzeit kompetent zur Verfügung.

Auch bei Ruedi Haller (Leiter Forschung und Geoinformation, Schweizerischer Nationalpark) bedanke ich mich herzlich. Durch ihn hatte ich Zugriff auf die HABITALP-Daten des Schweizerischen Nationalparks, welche mir von grossem Nutzen waren.

Ein weiterer Dank möchte ich auch meiner lieben Lebenspartnerin aussprechen, welche mir jederzeit unterstützend zur Seite steht.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- Bendel, M., Kienast, F., Bugmann, H., and Rigling, D. (2006a). Incidence and distribution of Heterobasidion and Armillaria and their influence on canopy gap formation in unmanaged mountain pine forests in the Swiss Alps. *European Journal of Plant Pathology* **116**: 85-93.
- Bendel, M., Kienast, F., Rigling, D., and Bugmann, H. (2006b). Impact of root-rot pathogens on forest succession in unmanaged *Pinus mugo* stands in the Central Alps. *Canadian Journal of Forest Research* **36**: 2666-2674.
- Côté, J.F., Fournier, R.A., Frazer, G.W., Niemann, K.O. (2012). A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure. *Agricultural and Forest Meteorology* **166– 167**: 72– 85.
- D'Errico, J. (2012). *Inpaint_nans.m* - Matlabskript für die Interpolation von NaN-Elementen in einem 2D-Array. Untersteht einer BSD-Lizenz: Copyright (c) 2009, John D'Errico All rights reserved. Besucht am 13.02.2013:
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4551>
- Dobbertin, M., Baltensweiler, A., and Rigling, D. (2001). Tree mortality in an unmanaged mountain pine (*Pinus mugo* var. *uncinata*) stand in the Swiss National Park impacted by root rot fungi. *Forest Ecology and Management* **145**: 79-87.
- ESRI (2012). ArcGIS Desktop: Release 10.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Gaulton, R. (2008). Remote sensing for continuous cover forestry: quantifying spatial structure and canopy gap distribution. The University of Edinburgh. Doktorarbeit, 243 Seiten.
- Lotz, A. (2006). Alpine Habitat Diversity – HABITALP – Project Report 2002 - 2006. EU Community Initiative INTERREG III B Alpine Space Programme. Nationalpark Berchtesgaden, 67-80.
- MeteoSchweiz (2013). Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. Klimatabellen zu allen Meteostationen der Schweiz. Besucht am 12.02.2013:
www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_schweiz/tabellen.html
- Morsdorf, F., Meier, E., Kötz, B., Itten, K.I., Dobbertin, M., & Allgöwer, B. (2004). Lidarbased geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sensing of Environment* **92**: 353–362.
- Parolini, J.D. (2012). Vom Kahlschlag zum Naturreservat. Geschichte der Waldnutzung im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks. *Nat.park-Forsch. Schweiz* **96**.
- Reitberger, J. (2010). 3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner. Technische Universität München. Doktorarbeit, 130 Seiten.
- R Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, www.R-project.org.

Schweizerischer Nationalpark (2013).

(a) Zahlen und Fakten zum Schweizerischen Nationalpark. Besucht am 12.02.2013:
www.nationalpark.ch/go/de/about/ueber-uns/zahlen-und-fakten

(b) Alpine Mischwälder. Besucht am 13.02.2013:

<http://www.nationalpark.ch/go/de/flora-und-fauna/lebensraeume/alpine-mischwaelder/>

(c) Bergföhre im Schweizerischen Nationalpark. Besucht am 12.02.2013:

<http://www.nationalpark.ch/go/de/flora-und-fauna/pflanzen/bergfoehre/>

Schweizerisches Landesforstinventar LFI (2013). Walddefinition im LFI. Besucht am 21.02.2013: <http://www.lfi.ch/lfi/methoden3.php>

The MatWorks (2012). Student Version R2013a.

Torimaru, T., Itaya, A., Yamamoto, S. (2012). Quantification of repeated gap formation events and their spatial patterns in three types of old-growth forests: Analysis of long-term canopy dynamics using aerial photographs and digital surface models. *Forest Ecology and Management* **284**: 1–11.

Vepakomma, U., Kneeshaw, D., Fortin, M.J. (2012). Spatial contiguity and continuity of canopy gaps in mixed wood boreal forests: persistence, expansion, shrinkage and displacement. *Journal of Ecology* **100**: 1257–1268.

Web-GIS des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Besucht am 13.02.2013:
<http://map.bafu.admin.ch>

Anhang

Baumartenanteile

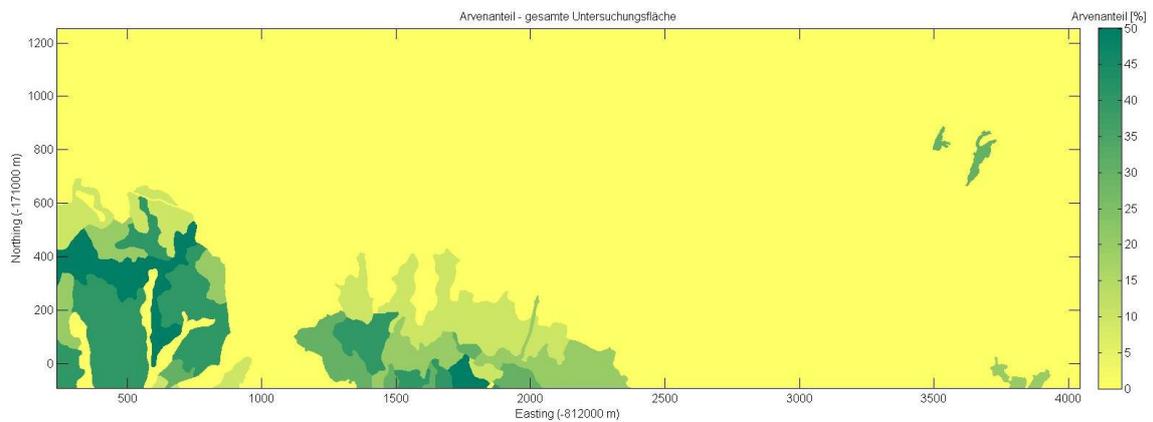


Abbildung 79 - Wie die Lärche ist auch die Arve im Untersuchungsgebiet, ausser weniger Ausnahmen, an nordexponierten Hängen anzutreffen. Hier kommt sie in Anteilen von bis zu 50% vor.

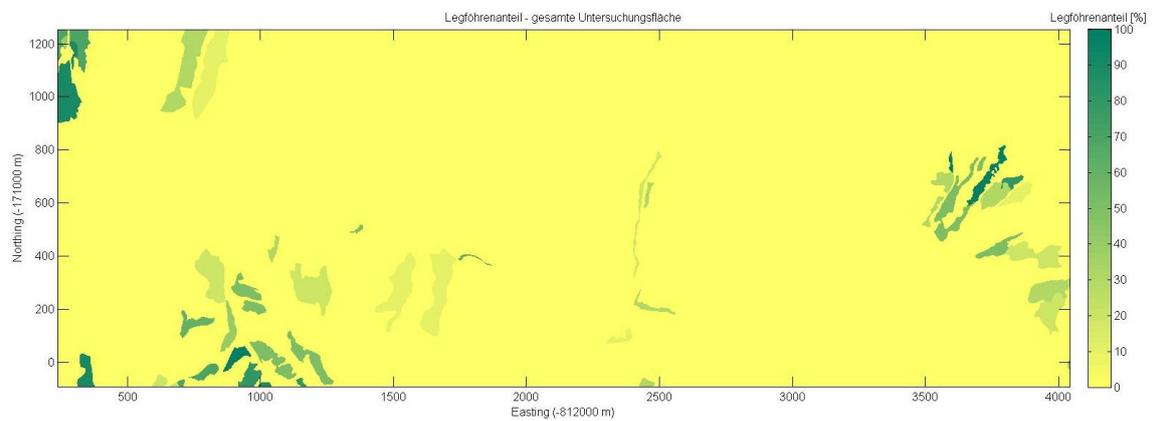


Abbildung 80 - Die Legföhre kommt im untersuchten Gebiet verteilt in allen unterschiedlichen Lagen vor. Sie ist in Anteilen bis zu 100% anzutreffen.

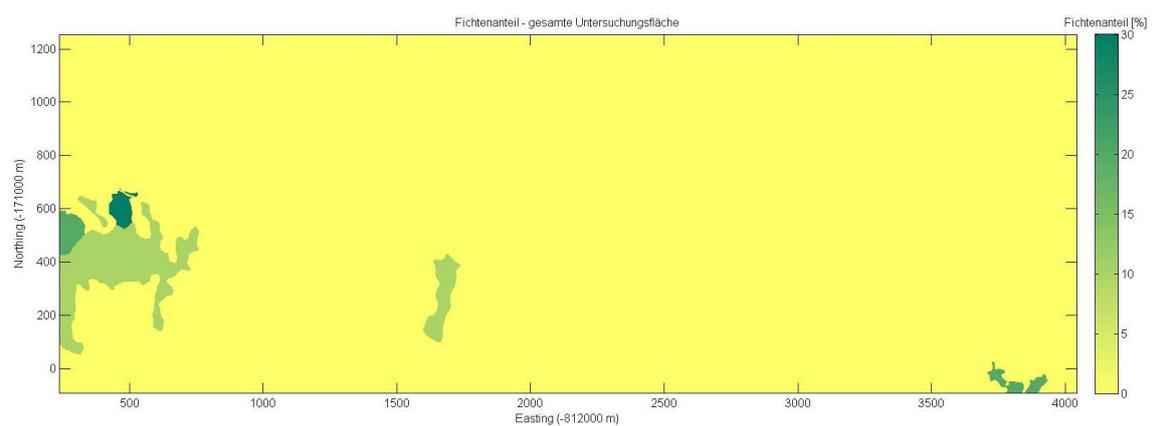


Abbildung 81 - Die Fichte kommt im Untersuchungsgebiet nur an wenigen Orten und hauptsächlich an Nordexpositionen vor. Ihr Anteil beträgt dor bis zu 30%.

Differenz Lückenanteil versus Höhe 2010 (100 % Nadelholz)

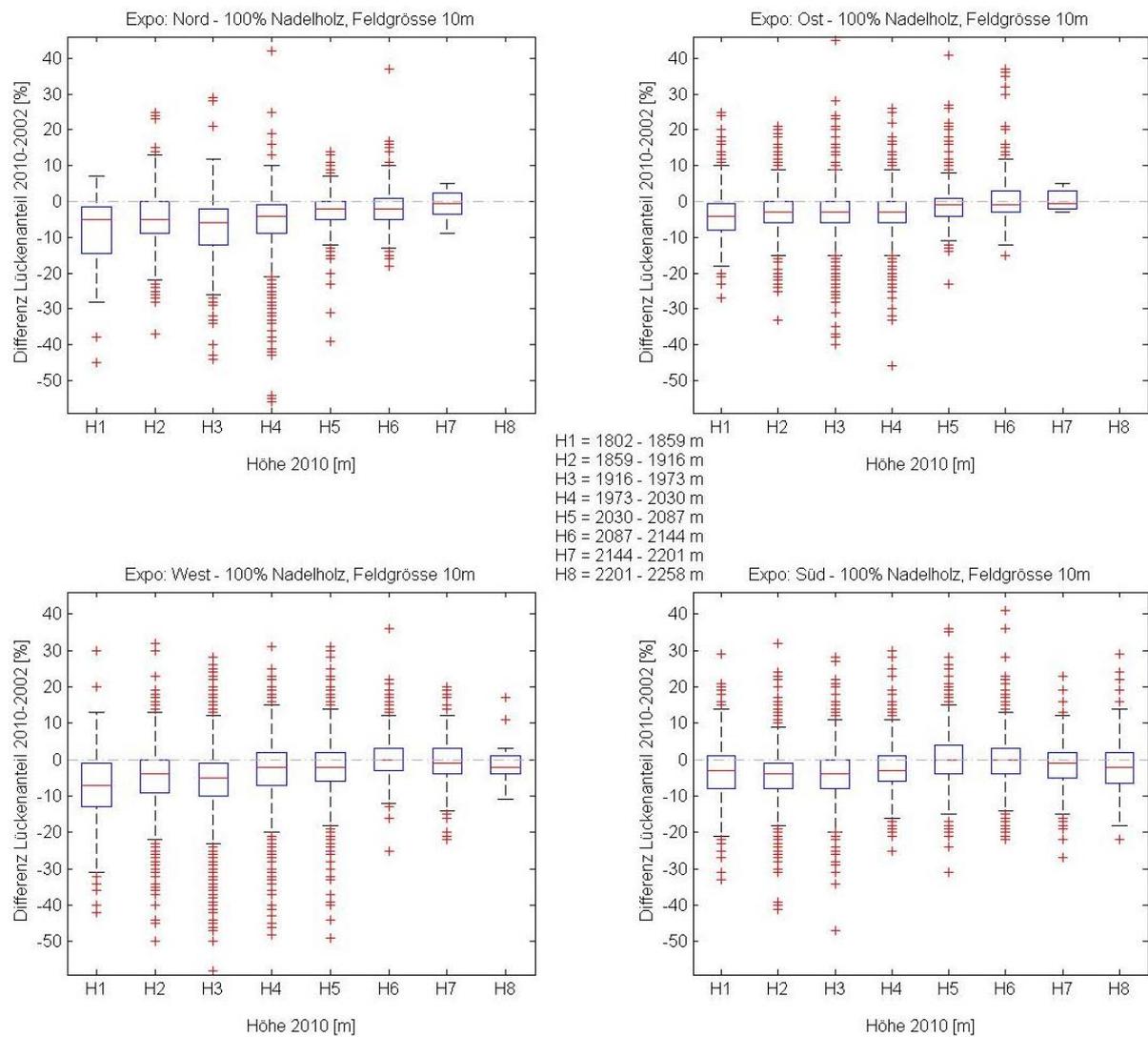


Abbildung 82 - Für die Felder mit einem Nadelholzanteil von 100% zeigt sich eine Zunahme der Waldfläche in den unteren Höhenlagen. Im Unterschied zu den Feldern mit 100% Bergföhre, geht bei diesem Datensatz jedoch kein Medianwert über die Nulllinie geht.