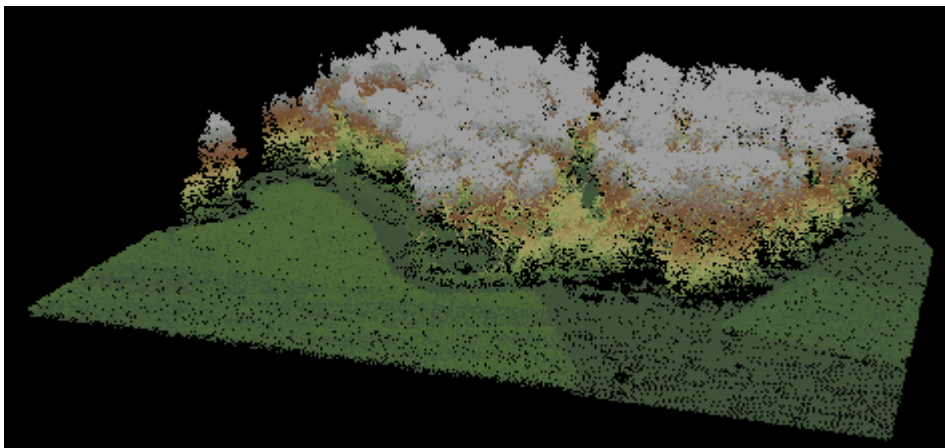


ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT UNR

**Erfolgskontrolle mit LiDAR von Waldrandaufwertungen
im Kanton Aargau**



Bachelorarbeit

von

Isabelle Livebardon

Bachelorstudiengang 2014

26.10.2017

Umweltingenieurwesen

Fachkorrektoren:

Manuel Babbi

ZHAW Life Sciences und Facility Management

Grüntal, 8820 Wädenswil

Christian Ginzler

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf

Impressum

Titelbild: Ausschnitt der LiDAR Daten 2014 von einem Waldrand im Kanton Aargau
(Visualisiert mit Fugro Viewer).

Schlagworte: Erfolgskontrolle, Waldrandaufwertungen, Folgeeingriffe, LiDAR,
Photogrammetrie, Waldrandschlüssel, Waldrand

Adresse:

Isabelle Livebardon

Talwiesenstrasse 41, 8404 Winterthur

Tel. 078 712 00 30

Zitiervorschlag:

Livebardon, I. (2017). Erfolgskontrolle mit LiDAR von Waldrandaufwertungen im Kanton Aargau. *Bachelorarbeit ZHAW*, unveröffentlicht.

Zusammenfassung

Damit den Kantonen in Zukunft ein anwendbares Hilfsmittel für die Auswahl des optimalen Zeitpunktes für Folgeeingriffe von Waldrändern zur Verfügung gestellt werden kann, wurde in der vorliegenden Arbeit die Veränderung der Strukturwerte von aufgewerteten Waldrändern im Kanton Aargau zwischen den Jahren 2001 und 2016 analysiert. Die Strukturwerte, zusammengesetzt aus dem Strauchgürtelanteil, dem Waldrandanteil und dem Verzahnungsgrad, wurden aus einem photogrammetrischen nDOM und aus LiDAR Daten mit einem Bewertungsschlüssel berechnet und mit Felddaten verglichen.

Die Entwicklung der Strukturwerte von aufgewerteten Waldrändern zwischen den Jahren 2001 und 2016 fiel mehrheitlich positiv aus. Beim Vergleich der berechneten Strukturwerte mit den Feldaufnahmen, konnte lediglich eine geringe Korrelation erkannt werden. Ein signifikanter Strukturwertunterschied zwischen Waldrändern mit und ohne Folgeeingriff konnte nicht festgestellt werden.

Die geringen Korrelationen zwischen den berechneten Strukturwerten und den Feldaufnahmen sind auf Ungenauigkeiten im Bewertungsschlüssel sowie auf Unterschiede zwischen den verwendeten Methoden zur Waldrandbewertung zurückzuführen. Der nicht signifikante Strukturwertunterschied zwischen Waldrändern mit und ohne Folgeeingriff kann damit begründet werden, dass bei Folgeeingriffen im Gegensatz zu Ersteingriffen weniger stark in die Waldrandstrukturen eingegriffen wird.

Abstract

In this bachelor thesis the development of structure value from revalued forest edges between the years 2001 and 2016 in the canton Aargau were analysed with the aim to provide the cantons a tool which can choose the right time for foster interventions for forest edges to be implemented. The structure values which are composed of shrub ratio, forest edge ratio and tooth ratio have been calculated with an evaluation key from LiDAR data and from a photogrammetric surface model and were compared with field recordings.

Between 2001 and 2016 the majority of the forest edge structures examined have developed positively. The correlation between the calculated structure of forest edges compared to field records resulted poorly. No significant differences were visible between forest edges with foster interventions and forest edges without foster interventions.

The small correlation between the resulted forest edge structures and the field recordings is due to inexactness of the evaluation key as well as to differences between the evaluation key and the forest edge key used for field records. There is no significant difference between forest edges with foster interventions and forest edges without foster interventions, this might stem from the fact that foster interventions are less intense than first interventions.

Danksagung

An dieser Stelle möchte mich herzlich bei allen bedanken, die mich während der Umsetzung meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Ein spezieller Dank gebührt meinen beiden Korrektoren Manuel Babbi und Christian Ginzler, die mich während des ganzen Arbeitsprozesses begleitet und mir jederzeit mit fachlichen Auskünften weitergeholfen haben.

Weiter möchte ich mich bei Zuyuan Wang bedanken, die mich beim Ausführen des Python Skriptes unterstützt hat.

Reudi Bättig, Iris Wehrli und Stefanie Burger der Abteilung Wald des Kantons Aargau danke ich für ihre wertvollen Auskünfte zu Waldrandaufwertungen im Kanton Aargau.

Bei Bertil O. Krüsi möchte ich mich für das Interesse an meiner Arbeit und die hilfreichen Inputs bedanken.

Meiner Familie möchte ich für ihr grosses Interesse, die zahlreichen Diskussionen und das Durchlesen meiner Bachelorarbeit, Silja Müller für die Englischkorrekturen und Mirjam Schmitz für das Gegenlesen meiner Endfassung danken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufwertung und Bewertung von Waldrändern	3
2.1	Ökologische Bedeutung von Waldrändern	3
2.2	Aufwertung von Waldrändern.....	5
2.2.1	Situation in der Schweiz	5
2.2.2	Naturschutzprogramm Wald Kanton Aargau	8
2.3	Methoden zur Waldrandbewertung	9
2.3.1	Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015)	9
2.3.2	Geodatschlüssel nach Wehrli (2015).....	10
2.4	Methoden zur dreidimensionalen Abbildung von Oberflächenstrukturen.....	11
2.4.1	LiDAR	11
2.4.2	Photogrammetrie.....	13
3	Material und Methoden.....	15
3.1	Untersuchungsgebiet.....	15
3.2	Datengrundlagen	16
3.3	Auswahl der untersuchten Waldränder	19
3.4	Berechnung der Strukturwerte mit dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017)...	19
3.5	Punktevergabe für die strukturelle Qualität	20
3.6	Verifizierung der berechneten Strukturwerte im Feld	23
3.7	Datenauswertung.....	23
4	Ergebnisse	25
4.1	Qualitätsvergleich zwischen den LiDAR Daten und dem photogrammetrischen nDOM	25
4.2	Veränderung der Strukturwerte zwischen den unterschiedlichen Aufnahmejahren ..	27
4.3	Ökologische Qualität der im Feld aufgenommenen Waldränder	33
4.4	Vergleich der LiDAR Daten und des photogrammetrischen nDOMs mit den Feldaufnahmen.....	34
4.5	Veränderung der Strukturwerte hinsichtlich Erstaufwertung und Folgeeingriff.....	38
5	Diskussion.....	41

5.1	Qualitätsvergleich zwischen den LiDAR Daten und dem photogrammetrischen nDOM	41
5.2	Veränderung der Strukturwerte zwischen den unterschiedlichen Aufnahmejahren .	42
5.3	Ökologische Qualität der im Feld aufgenommenen Waldränder	44
5.4	Vergleich der LiDAR Daten und des photogrammetrischen nDOMs mit den Feldaufnahmen.....	46
5.5	Veränderung der Strukturwerte hinsichtlich Erstaufwertung und Folgeeingriff.....	49
5.6	Schlussfolgerung	50
6	Ausblick.....	51
7	Literaturverzeichnis	52
	Abbildungsverzeichnis.....	56
	Tabellenverzeichnis.....	58
	Anhang	

1 Einleitung

Waldränder sind wertvolle Verbindungen zwischen Offenland und geschlossenem Wald (BVU, 2012). Für die Fauna bietet ein ökologisch wertvoller Waldrand ein vielfältiges Nahrungsangebot, Nist- und Unterschlupfplätze sowie Vernetzungskorridore (Rey, 2008).

Die Gesamtlänge der Waldränder beträgt in der Schweiz rund 111'000 km (Abegg, 2014). Da viele Waldränder einen schlechten ökologischen Zustand aufweisen (Krüsi et al., 1997), sollen bis zum Jahr 2030 in der Schweiz geeignete Waldränder aufgewertet werden (Imesch et al., 2015). Der Kanton Aargau hat im Rahmen des Naturschutzprogrammes Wald seit 1996 bereits 200 km Waldrand aufgewertet (BVU, 2012). Um den stufigen Aufbau der aufgewerteten Waldränder langfristig zu erhalten, werden periodisch Folgeeingriffe durchgeführt (BVU, 2013). Durchschnittlich erfolgt pro Waldrand alle sieben Jahre ein Folgeeingriff (BVU, 2009).

Für die Auswahl ökologisch geeigneter Waldränder für Erstaufwertungen wurden bereits Hilfsmittel ausgearbeitet. So führten Babbi et al. (2017) eine GIS-basierte Priorisierung der Waldränder im Kanton St.Gallen hinsichtlich ihres ökologischen Potenzials durch. Hepenstrick & Krüsi (2013) erstellten im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) eine GIS-basierte Priorisierung der Waldränder anhand ökologischer und ökonomischer Kriterien und Dürrenmatt et al. (2009) erstellten mithilfe des GIS eine Hinweiskarte, welche das ökologische Potenzial der Waldränder im Kanton Bern darstellt. Bühler & Zurschmiede (2017) führten eine Erfolgskontrolle von Waldrandaufwertungen anhand von LiDAR Daten durch und überprüften die aus den LiDAR Daten abgeleiteten Merkmale wie z.B. die Neigung des Kronendachs sowie die Anzahl und die Grösse der Bestandslücken im Feld. Wehrli (2015) entwickelte basierend auf dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (2013) einen Geodatenschlüssel, um die ökologische Qualität von Waldrändern mithilfe von LiDAR Daten zu berechnen. Die ökologische Qualität wird aufgrund der Struktur und des Potenzials eines Waldrandes bestimmt. Die Struktur setzt sich aus den Waldrandstrukturen, dem Verzahnungsgrad, den Überhängen sowie den Lichtspots zusammen. Das Potenzial bezieht sich auf die Naturnähe, die Artenvielfalt sowie auf die Umgebung des Waldrandes.

Der Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) kann für Erfolgskontrollen von Waldrändern eingesetzt werden oder Hinweise auf Waldränder mit hohem Aufwertungspotenzial liefern. Er ist zur Ergänzung zu Feldaufnahmen gedacht.

Wang (2017) erstellte basierend auf dem Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) einen Bewertungsschlüssel für LiDAR Daten (vgl. Kapitel 2.4.1). Darin enthalten ist lediglich der Strukturwert, da dieser im Gegensatz zur Artenvielfalt der Gehölze und des Krautsaums sowie kleinräumigen Strukturen wie Ast-, Steinhaufen und Totholz gut mit LiDAR Daten erfasst

werden kann (Bühler & Zurschmiede, 2017). Der Strukturwert des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) setzt sich aus dem Strauchgürtelanteil, dem Waldrandanteil und dem Verzahnungsgrad zusammen. Je ausgeprägter diese Waldrandstrukturen sind, desto höher fällt der Strukturwert aus.

Für die Kantone wäre ein zusätzliches Hilfsmittel für die Auswahl des optimalen Zeitpunktes für Folgeeingriffe hilfreich. Dieses Hilfsmittel könnte aufzeigen, wie sich die Strukturvielfalt der Waldränder in den letzten Jahren entwickelt hat und bei welchem Waldrand ein Folgeeingriff nötig wäre.

Damit in Zukunft ein solches Hilfsmittel zu Verfügung gestellt werden kann, wird im Rahmen dieser Arbeit der Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) auf bereits aufgewerteten Waldrändern im Kanton Aargau angewendet. Anhand der resultierenden Strukturwerte wird anschliessend eine Erfolgskontrolle von Waldrandaufwertungen im Kanton Aargau durchgeführt. Diese soll aufzeigen, wie sich der Strukturwert der Waldränder nach der Erstaufwertung entwickelt hat, um daraus auf die Dringlichkeit eines Folgeeingriffes schliessen zu können. Zusätzlich werden die Strukturwerte mit Feldaufnahmen verglichen, um zu überprüfen, wie gut der Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) die Realität widerspiegelt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen folgende Fragen beantwortet werden:

1. Können die LiDAR Daten 2001, die LiDAR Daten 2014 und das photogrammetrische nDOM 2016 aufgrund ihrer unterschiedlichen Aufnahmemethoden miteinander verglichen werden?
2. Wie haben sich die Strukturwerte der aufgewerteten Waldränder zwischen den Jahren 2001 und 2014, 2014 und 2016 sowie 2001 und 2016 verändert?
3. Bei welchen Waldrandstrukturen der anhand des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) ausgewerteten LiDAR Daten 2014 und photogrammetrischen nDOMs 2016 besteht eine Korrelation mit den Waldrandstrukturen der Feldbegehungen mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (Krüsi 2013, Krüsi 2015) in den Jahren 2014 und 2017?
4. Sind die Folgeeingriffe zwischen den Jahren 2001 und 2016 aufgrund der berechneten Strukturwerte ersichtlich?

2 Aufwertung und Bewertung von Waldrändern

2.1 Ökologische Bedeutung von Waldrändern

Der Waldrand ist ein Übergangsbereich zwischen Wald und Freiland (BVU, 2012). Ein Waldrand entsteht an Standorten, wo die weitere Ausbreitung des Waldes verhindert wird. Dazu zählen die obere Waldgrenze, Hochmoore sowie landschaftsdynamische Ereignisse wie Hangrutsche und Überschwemmungen. Die meisten Waldränder sind jedoch durch anthropogene Eingriffe entstanden. Dazu gehören auch landwirtschaftliche Tätigkeiten (Ott & Helbling, 2013). Für Flora und Fauna ist ein Waldrand von grosser Bedeutung (Rey, 2008). Er besteht im optimalen Fall aus einem Krautsaum, einem Strauchgürtel und einem Waldmantel (Abbildung 1) (Ott & Helbling, 2013). Die drei Waldrandbereiche sind oft verzahnt oder gehen ineinander über (Rey, 2008).

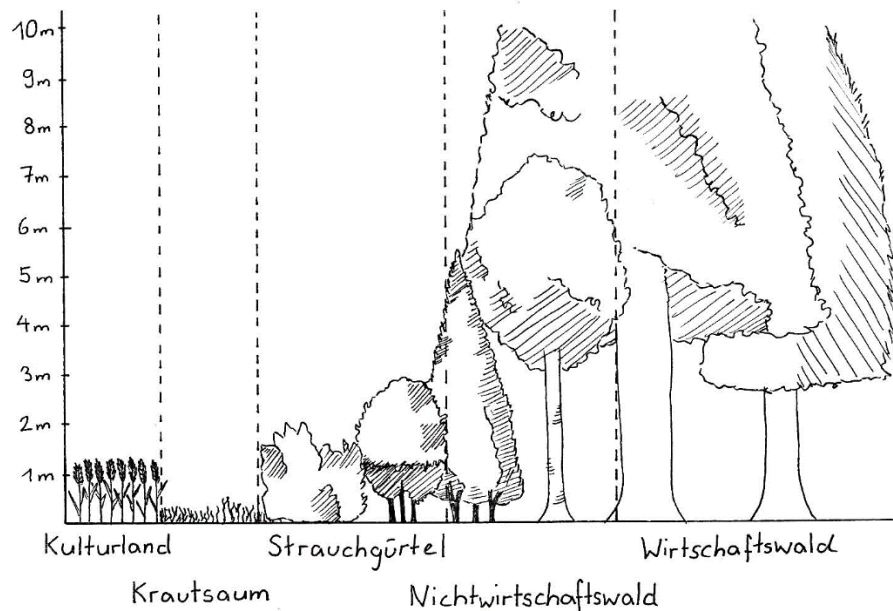


Abbildung 1: Optimaler Waldrand gemäss den Definitionen aus dem Bewertungsschlüssel nach Krüsi (2015).

Der **Krautsaum** besteht hauptsächlich aus Gräsern, Seggen, Binsen und Wiesenblumen. Verschiedene Kleinstrukturen wie Stein- und Asthaufen sowie Brombeer- und Brennesseldickichte sind im Übergang zum Strauchgürtel vorhanden (Rey, 2008). Der Krautsaum grenzt an das Kulturland und agiert als Pufferzone. Er wird extensiv bewirtschaftet und nicht gedüngt (Ott & Helbling, 2013). Im Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) wird die maximale Wuchshöhe der Kräuter, Sträucher oder Bäume auf 0.99 Meter festgelegt.

Der **Strauchgürtel** ist geprägt von Jungbäumen und Sträuchern mit Beeren und Dornen (Rey, 2008). Optimalerweise ist er stark mit dem Waldmantel und dem Krautsaum verzahnt (Ott & Helbling, 2013). Im Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) liegt die Wuchshöhe der Gehölzarten

zwischen einem und vier Metern. Im Strauchgürtel sind laut Krüsi (2015) ebenfalls Zwergsträucher und niederwüchsiger *Rubus sp.* mit einer Wuchshöhe von weniger als einem Meter vorhanden.

Der **Waldmantel** gilt als Pufferzone zwischen Freilandklima und Waldinnenklima. Er besteht hauptsächlich aus Randbäumen des Waldes (Rey, 2008) und bildet somit den Übergang zwischen geschlossenem Wald und Strauchgürtel (Ott & Helbling, 2013). Totholz ist häufig vorzufinden (Rey, 2008). Der Begriff *Waldmantel* kann auch mit dem Nichtwirtschaftswald gleichgesetzt werden. Ein Nichtwirtschaftswald ist gemäss Krüsi (2015) definiert durch Bäume und Sträucher, die grösser als vier Meter sind und deren BHD grösser als 16 Zentimeter ist.

Form, Struktur, Tiefe, Länge und Artenvielfalt sind bei jedem Waldrand unterschiedlich und können auf kleinstem Raum variieren (Costa, 2001). Ein optimaler Waldrand verfügt über eine hohe Anzahl standortgerechter Arten und weist eine möglichst grosse Strukturvielfalt auf, ist aber strukturell nicht festgelegt (Tidow et al., 1997).

Für die Fauna ist ein Waldrand aufgrund des vielfältigen Nahrungsangebotes, der Nist- und Unterschlupfplätze sowie auch als Vernetzungskorridor von grosser Bedeutung (Rey, 2008). Kleinstrukturen wie Steinhäufen, tote Äste oder Laubstreu werden von Tieren bewohnt (Costa, 2001). Ein Waldrand bietet Insekten und Spinnen, die in der Landwirtschaft von Nutzen sind, Überwinterungsmöglichkeiten (BVU, 2007). Insgesamt wird der Waldrand von ca. 40 Vogel-, 20 Säugetier- und 1200 Kleintierarten genutzt (Rey, 2008).

Da sich Licht- und Wärmeverhältnisse auf engstem Raum ändern können, bietet ein Waldrand vielen unterschiedlichen Pflanzenarten einen geeigneten Lebensraum. Unter anderem sind die Wachstumsbedingungen für lichtliebende Baumarten wie die Traubenkirsche (*Prunus padus*), den Wildapfel (*Malus sylvestris*) und die Sommerlinde (*Tilia platyphyllos*) gegeben.

2.2 Aufwertung von Waldrändern

Ende des 19. Jahrhunderts wurde die landwirtschaftliche Nutzung des Waldes mehrheitlich aufgegeben. Es entstand eine Trennung zwischen Landwirtschaft und Wald. Die Wälder wurden einförmiger und dichter. Struktureiche und lichte Waldränder verschwanden. Im 20. Jahrhundert breitete sich der Wald zwar aus, die biologische Vielfalt aber nahm ab (Imesch et al., 2015).

Mit gezielten Eingriffen können Waldlebensräume hinsichtlich Biodiversität aufgewertet und die ökologische Qualität langfristig erhalten werden. Die Entwicklung im 20. Jahrhundert kann aber nicht vollständig rückgängig gemacht werden (Imesch et al., 2015).

Für die Aufwertung von Waldrändern stehen diverse Hilfsmittel zu Verfügung. Einige Kantone haben Informationsbroschüren zur ökologische Bedeutung von Waldrändern und deren Pflegemassnahmen verfasst (Costa, 2001, Rey, 2008 und BVU, 2009). Pro Natura hat einen Leitfaden für die Praxis mit eigenem Bewertungsschlüssel entwickelt (Ott & Helbling, 2013). Krüsi et al. (2017) erstellten eine Praxishilfe für Aufwertungen von Waldrändern in der Schweiz.

2.2.1 Situation in der Schweiz

Im Landesforstinventar (LFI) wird seit dem Jahr 1981 die Entwicklung der Wälder in der Schweiz festgehalten (Brändli, 2010). Der aktuellste Ergebnisbericht vom LFI3 liegt mit den Aufnahmejahren 2004 bis 2006 vor (Brändli, 2010). Da die Aufnahmen des LFI4 nicht abgeschlossen sind, wurde noch kein Ergebnisbericht verfasst. Erste Resultate aus den Jahren 2009 bis 2011 wurden aber bereits publiziert (Schrade, 2012).

Die gesamte Waldrandlänge der Schweiz beträgt 111'000 km (Abegg, 2014). Laut dem LFI3 hat die Strukturvielfalt der Waldränder nur geringfügig zugenommen. Deutliche Verbesserungen wurden in der Zunahme der Waldmantel- und Krautsaumbreite festgestellt, die Strauchgürtelbreite hat sich hingegen nicht verändert. Insgesamt konnte eine Verbreiterung des Waldrandes beobachtet werden. Die Artenvielfalt hat sich in der montanen Stufe positiv und in der kollinen/submontanen Stufe nicht verändert. Werden beide Höhenstufen betrachtet, wurden pro Waldrand im Durchschnitt zwölf verschiedene Gehölzarten gezählt. Der Totholzanteil in den Wäldern hat zugenommen (Brändli, 2010).

Aufgrund des Ökotonwertes des LFI3 im Vergleich zum LFI2 zeigte sich insgesamt eine leicht positive Entwicklung der Waldränder (Abbildung 2) (Brändli, 2010). Viele Waldränder weisen dennoch eintönige Strukturen auf. Die Alpensüd- und Alpennordflanken besitzen die geringste und die östlichen Zentralalpen die grösste Strukturvielfalt (Brändli, 2010).

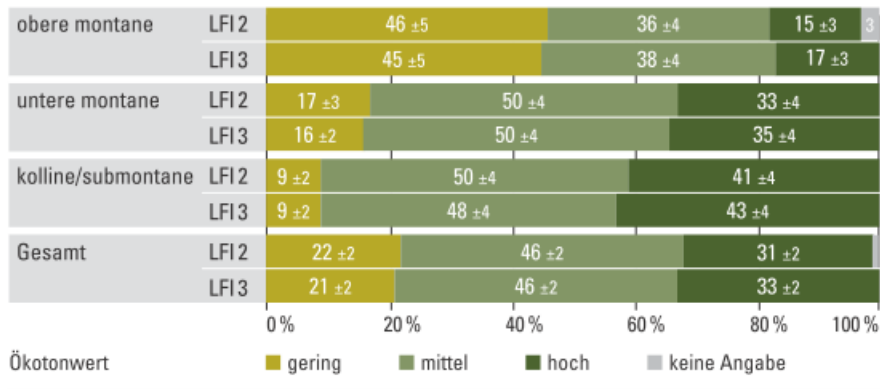


Abbildung 2: Waldrandbewertung nach dem Ökotonwert des LFI für die montanen und kollinen/submontanen Stufen (Brändli, 2010).

Die Bewertung der Waldränder nach dem LFI wurde vom Bund mit der Studie nach Krüsi et al. (1997) verglichen (Imesch et al., 2015). Die Schlussfolgerung des Bundes war, dass in allen Regionen der Schweiz ökologisches Aufwertungspotenzial vorhanden ist (Abbildung 3) (Imesch et al., 2015).

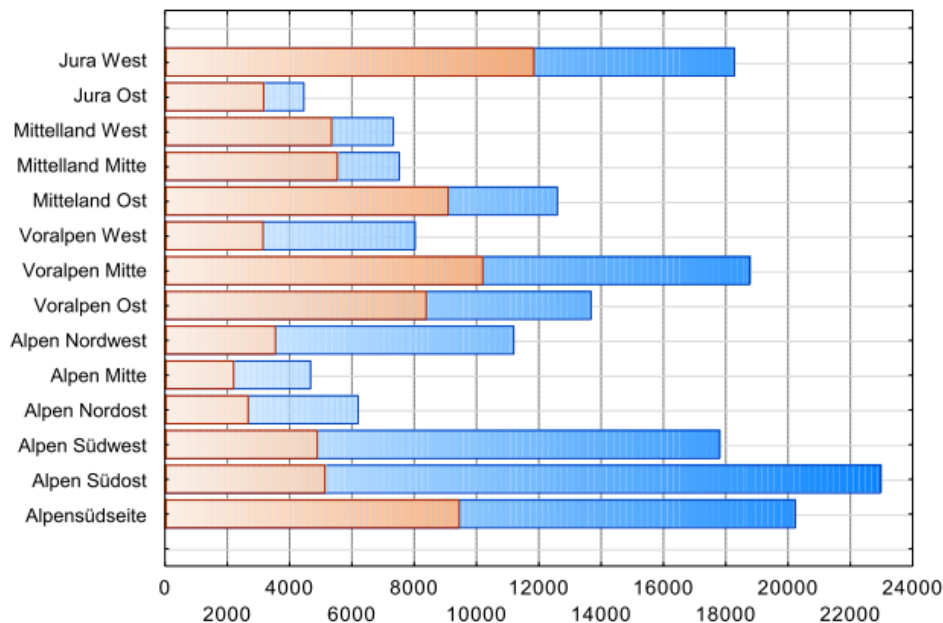


Abbildung 3: Ökologisches Potenzial der Waldränder in Kilometern pro Region der Schweiz (Rot = erste Priorität, blau = zweite Priorität) (Imesch et al., 2015).

Bis zum Jahr 2030 sollen laut Bund in der ganzen Schweiz alle geeigneten Waldränder aufgewertet werden und deren Unterhalt langfristig gewährleistet sein. Bei der Planung von Waldrandaufwertungen sind jeweils die Wald-, Landwirtschafts- und Naturschutzfachstellen miteinzubeziehen (Imesch et al., 2015).

Bei den Waldrandaufwertungen sollen folgende Kriterien berücksichtigt werden (Imesch et al., 2015):

- Hohes ökologisches Aufwertungs- und Standortpotenzial
- Überdurchschnittlicher ökologischer Wert des angrenzenden Grünlandes
- Keine Unterschreitung der standortbezogenen ökologisch wirkungsvollen Waldrandtiefe von minimal 15 Metern
- Förderung von seltenen bzw. ökologisch wertvollen Baum-, Strauch- und Blütenpflanzenarten
- Erhaltung von Biotopbäumen und Dürrständern, sofern kein Sicherheitsrisiko vorhanden ist
- Liegenlassen von Totholz
- Förderung von Kleinstrukturen wie Ast-, Steinhaufen und feuchten Stellen

2.2.2 Naturschutzprogramm Wald Kanton Aargau

Das Naturschutzprogramm Wald wurde im Jahr 1996 aufgrund des Rückganges der Biodiversität infolge der Verdunklung der Wälder, der Defizite an Alt- und Totholz und ungenügender Vernetzung von Wald und Offenland erstellt (BVU, 2012).

Das Naturschutzprogramm Wald basiert auf dem Bundesgesetz über den Wald (AWaG) Art. 1 und Art. 20 sowie auf dem Waldgesetz des Kantons Aargau (AWaG) Paragraph 1 und 5 (BVU, 2012).

Die Ziele des Naturschutzprogrammes sind in die fünf Kategorien Naturschutzreservate, Spezialreservate, Altholzinseln, Eichenwaldreservate und Waldränder eingeteilt und sollen bis zum Jahr 2020 erreicht werden (BVU, 2013). Für die vorliegende Arbeit ist die Kategorie Waldränder relevant, weshalb im Folgenden näher darauf eingegangen wird.

Die Teilziele der Kategorie Waldrand sind (BVU, 2013):

- Aufwertung und stufige Gestaltung der Waldränder auf einer Länge von insgesamt 200 km
- Durchführung periodischer Pflegeeingriffe zur Erhaltung des stufigen Aufbaus
- Aufwertungen vorwiegend von Waldrändern, bei denen wertvolle Lebensräume oder ökologische Ausgleichsflächen an Landwirtschaftsflächen angrenzen

Erst- und Folgeeingriffe werden gemäss den Waldrandregeln (BVU, 2009) durchgeführt. Die Minimalanforderungen eines Ersteingriffes sind unter anderem:

- Mindesttiefe eines Ersteingriffes von 15 Metern
- Mindestlänge eines Ersteingriffes von 100 Metern
- Deckungsgrad nach einem Ersteingriff von 30% oder weniger
- Schonen wertvoller Einzelbäume

Bei einem Folgeeingriff ist unter anderem zu beachten:

- Schonen von Sträuchern
- Variieren der Eingriffsintensität bei grossen Waldrandlängen (> 100 Meter)
- Förderung von Totholz
- Schutz einzelner aufkommenden Licht- und Pionierbaumarten und deren Verjüngung

Zur Umsetzung der Ziele werden die Strategie des Vertragsnaturschutzes verfolgt, mit WaldeigentümerInnen zusammengearbeitet, Beratungen und Weiterbildungen für das Forstpersonal durchgeführt und Entschädigungen an Forstbetriebe für Leistungen im Bereich Biodiversität vergeben (BVU, 2012).

Finanziert wird das Naturschutzprogramm Wald vom Bund. Seit dem Jahr 2012 flossen zusätzlich 200'000 Franken aus den Einnahmen der Jagdpachtzinsen in das Naturschutzprogramm (BVU, 2012).

Die Erfolgskontrolle des Naturschutzprogrammes Wald erfolgt durch die Kreisforstämter und die Sektion Koordination und Ökologie des Kantons Aargau. Ebenfalls wird eine flächendeckende, langfristige Überwachung und Wirkungskontrolle an ausgesuchten Objekten durchgeführt. (BVU, 2012)

Im Jahr 2013 erschien ein Zwischenbericht des Departementes Bau, Verkehr und Umwelt (BVU, 2012) zu den Zielen und dem Handlungsbedarf der vierten Etappe (2014 bis 2019). In diesem wurde vermerkt, dass bis zum Jahr 2013 bereits drei Viertel der Ziele erreicht wurden. Nach Realisierung aller festgelegten Ziele im Jahr 2020 wird der Fokus beim Unterhalt der Naturvorranggebiete im Wald liegen. Während des Ausführens der Aufwertungsmassnahmen bei Waldrändern wurde bemerkt, dass diese sehr unterschiedlich auf Eingriffe reagieren. Der Zeitpunkt eines Unterhaltes in Form von Pflegeeingriffen hängt von der jeweiligen Entwicklung des Waldrandes ab. Ursprünglich vorgesehen waren Pflegeeingriffe, die alle sieben Jahre erfolgen. Es werden neue Lösungsansätze für das Bestimmen der Zeitabstände von Pflegeeingriffen gefordert. Laut dem Zwischenbericht aus dem Jahr 2013 wurde noch keine Lösung verabschiedet (BVU, 2012).

2.3 Methoden zur Waldrandbewertung

Es wurden bereits einige unterschiedliche Methoden zur Waldrandbewertung erstellt. Unter anderem wurde von Pro Natura ein Schlüssel zur ökologischen Bewertung von Waldrändern erarbeitet (Ott & Helbling, 2013). Dieser Schlüssel bewertet ein Waldrand aufgrund des ökologischen Potenzials, der Strukturvielfalt und des Aufwertungspotenzials. Das Landesforstinventar (LFI) beurteilt den Zustand und die Entwicklung des gesamten schweizerischen Waldes und bewertet Waldränder anhand eines Ökotonwertes (Brändli et al., 2010). Der Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) beurteilt einen Waldrand anhand der Waldrandstrukturen und ergänzenden Angaben. Der Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) berechnet die ökologische Qualität eines Waldrandes mithilfe von LiDAR Daten. Der Schlüssel nach Krüsi (2015) und der Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) werden in der vorliegenden Arbeit immer wieder aufgegriffen, weshalb sie in den folgenden Unterkapiteln kurz beschrieben werden.

2.3.1 Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015)

Für die Bewertung des Waldrandes wird gemäss dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) (Anhang E) ein 100 Meter langer Waldrandabschnitt ausgewählt. Parallel zum Waldrand wird eine Beurteilungslinie mit fünf Stichprobenpunkten im Abstand von je 25 Metern festgelegt. Die Beurteilung erfolgt an jedem Stichprobenpunkt auf einem 50 cm breiten Beurteilungstreifen, der senkrecht zur Beurteilungslinie in den Waldrand verläuft (Krüsi, 2015).

Der Waldrand Schlüssel enthält einen Hauptschlüssel und Ergänzungen. Anhand des Hauptschlüssels werden die Strukturen des Waldrandes bewertet. Dazu zählen die Tiefe des Waldrandes, des Strauchgürtels und des Krautsaums, die Länge des Strauchgürtels und des Krautsaums, die Belaubungsdichte, die Gehölzarten und die Dornstraucharten. In den Ergänzungen werden unter anderem der Krautsaumtyp, der Verzahnungsgrad und Kleinstrukturen aufgenommen. Bei der Auswertung werden die Punkte anhand einer Tabelle berechnet und der Waldrand einer Einstufung zugeordnet. Nach der Punktevergabe folgt eine Plausibilitätskontrolle, bei der der Waldrand subjektiv eingeschätzt wird. Entspricht die Einschätzung nicht der Einstufung des Waldrandes, wird der Beurteilungstreifen um 12.5 Meter verlegt und der Waldrand nochmals beurteilt (Krüsi, 2015).

2.3.2 Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015)

Der Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) ist dazu geeignet, die ökologische Qualität von Waldändern anhand von LiDAR Daten zu berechnen. Er basiert auf dem Waldrand Schlüssel nach Krüsi (2013). Die Auswertungskriterien sind in Struktur und Potenzial unterteilt. Die Struktur ist in Grob- und Feinstruktur und das Potenzial in Naturnähe und Artenvielfalt sowie Umgebung gegliedert (Tabelle 1) (Wehrli, 2015).

Tabelle 1: Aufbau des Geodatenschlüssels nach Wehrli (2015).

Struktur		Potenzial	
Grobstruktur	Strauchgürtel Waldrandfläche Zonenkomplexität	Naturnähe und Artenvielfalt	Naturnähe Baumartenmischung Exposition Waldrandgesellschaft
Feinstruktur	Verzahnungsgrad 2D Verzahnungsgrad 3D Überhälter Lichtspots WR	Umgebung	Ökowerk Umfeld Störungen / Barrieren

Die Auswertung erfolgt anhand eines Modells im Programm ArcMap. Zusätzlich zu den LiDAR Daten wurden noch weitere Daten unter anderem zu Waldausscheidungen, zu Strassen und Wegnetzen sowie zu Seen und Weihern in die Auswertung miteinbezogen. Im Folgenden werden die Schritte des Modells zusammengefasst.

Der zu beurteilende Waldrand wird anhand eines Koordinatenpunktes, der sich in der Mitte des Waldrandstückes befindet, angegeben. Der Koordinatenpunkt wird auf die Waldrandausscheidungslinie verschoben, und von diesem ausgehend werden auf der Waldrandausscheidungslinie beidseitig 50 Meter abgemessen. Die daraus resultierende 100

Meter lange Linie wird als Beurteilungslinie bezeichnet. Auf beiden Seiten der Beurteilungslinie wird ein 30 Meter breiter Puffer angelegt. Diese beiden Puffer bilden die Beurteilungsfläche. Die Struktur und das Potenzial werden für die erstellte Beurteilungsfläche berechnet (Wehrli, 2015).

Der Geodatenschlüssel kann Hinweise auf Waldränder mit einem hohen Aufwertungspotenzial liefern oder für Wirkungskontrollen von Waldrandaufwertungen eingesetzt werden. Er kann die bereits bestehenden Feldschlüssel nicht ersetzen, da anhand von LiDAR Aufnahmen keine Informationen zur Artenvielfalt oder Kleinstrukturen gewonnen werden können. Der Geodatenschlüssel ist als Ergänzung gedacht (Wehrli, 2015).

2.4 Methoden zur dreidimensionalen Abbildung von Oberflächenstrukturen

Zur Abbildung von dreidimensionalen Waldrandstrukturen sind zwei unterschiedliche Methoden bekannt. Mit LiDAR werden Laserpulse ausgesendet, welche an einem Objekt reflektiert werden. Aufgrund der Lichtgeschwindigkeit und der Laufzeit des Pulses kann die Höhe des Objektes berechnet werden. Mittels der Photogrammetrie werden fotografische Aufnahmen festgehalten und jedem Geländepunkt ein eindeutiger Bildpunkt zugewiesen.

Mit beiden Methoden kann die Vegetationsoberfläche abgebildet werden.

2.4.1 LiDAR

LiDAR ist die Abkürzung von *Light Detection and Ranging* (Esri, 2011) und beschreibt ein aktives, optisches Verfahren, welches hochaufgelöste dreidimensionale Strukturen erfassen kann (Lefsky et al., 2002). Seit Mitte der 1990er Jahren hat die Nutzung von Airborne laser scanning (ALS) im Bereich Forstwirtschaft und Waldökologie grosses Interesse hervorgerufen. Erste Literaturangaben zu LiDAR stammen bereits aus dem Jahr 1960 (Vauhkonen et al., 2014).

Zur Erfassung der LiDAR Daten sendet ein Laserscanner, welcher meist an einem Flugzeug befestigt ist, Laserpulse aus (Abbildung 4). Die Laserpulse werden an der Oberfläche eines Objektes reflektiert und gelangen als Echo zurück zum Laserscanner (Vauhkonen et al., 2014). Da der Laserpuls durch die Vegetation dringen kann, werden pro Laserpuls mehrere Echos aufgenommen. So wird im Wald ein Echo einmal vom Kronendach, ein bis mehrmals von den Ästen und Blättern und einmal von der Bodenoberfläche reflektiert. Daraus resultieren Punktwolken (Abbildung 5) (Campbell & Wynne, 2011).

Die Entfernung vom Flugzeug zum Objekt wird anhand der Lichtgeschwindigkeit und der Laufzeit des Pulses ermittelt. Mit diesen Werten kann die Höhe der Vegetation berechnet werden (Kappas, 2012). Anhand der Laufzeit des Laserpulses eines GPS und INS werden die x- und y- Koordinaten des Punktes, an dem der Laserpuls reflektiert wird, abgeleitet (Vauhkonen et al., 2014).

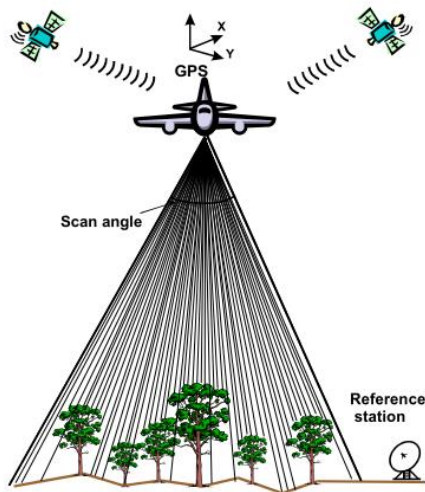


Abbildung 4: Bildliche Darstellung der Aufnahme von LiDAR Daten (Hyypä et al., 2000).

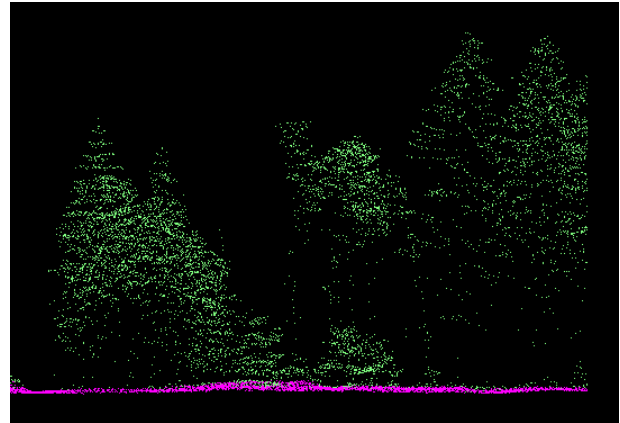


Abbildung 5: Punktwolke der LiDAR Daten 2014.

Der Öffnungswinkel, auch bezeichnet als Scanwinkel (Scan angle), bestimmt die Durchdringungsrate. Je kleiner der Scanwinkel, desto grösser ist die Punktedichte und desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass ein Impuls auf die Waldbodenoberfläche trifft (Morsdorf, 2011). Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Lichtkegel. Der Lichtkegel ist der Durchmesser des emittierten Laserstrahles am Boden und hängt vom Einfallswinkel des Strahles am Objekt und von der Flughöhe ab. Für forstliche Aufträge werden oft Lichtkegel mit einem Durchmesser von einem Meter oder weniger bevorzugt, da so einzelne Bäume präzise wiedergegeben werden können (Vauhkonen et al., 2014). Die Befliegungen werden meist im unbelaubten Vegetationszustand durchgeführt (Milan Geoservice GmbH, 2014). Die erzeugten Rohdaten enthalten pro reflektiertem Punkt die Information zur absoluten Höhe (Höhe über Meer).

Aus den Rohdaten kann ein digitales gerastertes Geländemodell (DGM, DTM) und ein digitales gerastertes Oberflächenmodell (DOM, DSM) erstellt werden (Kappas, 2012). Das digitale Geländemodell wird anhand von Laserpulsen, welche direkt vom Boden reflektiert werden, abgeleitet (Hyypä et al., 2000) und stellt die Höhe des Bodens ohne Bewuchs dar. Ist ein künstliches Objekt vorhanden, wird dessen Höhe interpoliert und die Bodenstruktur möglichst genau nachgestellt (Navratil et al., 2011). Das digitale Oberflächenmodell wird anhand der ersten reflektierten Impulse erstellt (Campbell & Wynne, 2011) und beschreibt die Höhe des Bewuchses und der künstlichen Bauwerke (Navratil et al., 2011). Wird das digitale Oberflächenmodell vom digitalen Geländemodell abgezogen, entsteht ein normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDOM), welches die Höhe der Vegetation beschreibt (Abbildung 6) (Campbell & Wynne, 2011).

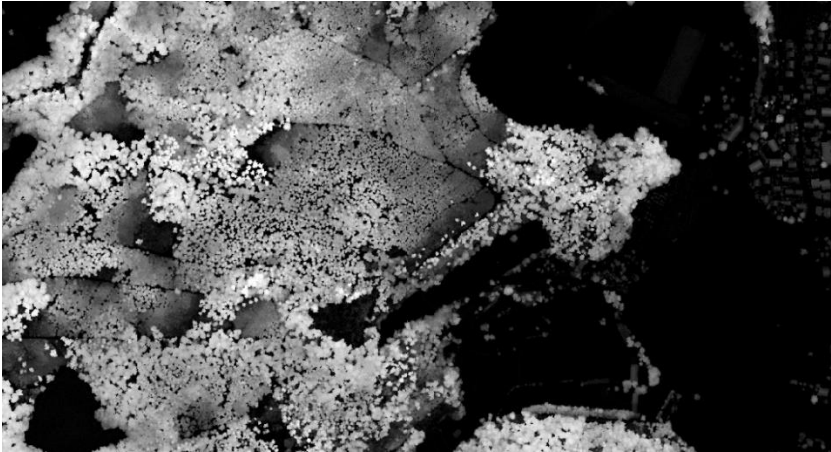


Abbildung 6: Ausschnitt aus den LiDAR Daten 2014 (Je heller die Rasterzelle, desto höher ist die Vegetation. Je dunkler die Rasterzelle, desto weniger hoch ist die Vegetation).

Zusätzlich können aus den Rohdaten Informationen wie Baumhöhe, Kronendichte, Waldstruktur oder Kronenprofil abgeleitet (Kappas, 2012) und damit Aussagen zur Waldschichtung und Verjüngungssituation gemacht werden (Koch, 2011). Nicht möglich ist jedoch die Erfassung der Bestandestypen sowie der Kleinstrukturen wie Totholz und Asthaufen. (Koch et al., 2010). Ebenfalls kann anhand von LiDAR Daten nicht zwischen krautiger Vegetation und Sträuchern unterschieden werden. Zusätzlich kann im Sommer ein sehr dichtes Kronendach der Laubblätter Probleme bereiten, da es kaum von Laserstrahlen durchdrungen werden kann (Morsdorf, 2011).

2.4.2 Photogrammetrie

Photogrammetrie basiert auf überlappenden fotografischen Aufnahmen von einem Flugzeug oder Satellit aus (Campbell & Wynne, 2011). In der Fotografie werden die reflektierten Strahlen der Sonne aufgenommen und auf eine lichtempfindliche Schicht projiziert. Es ist daher ein passives Verfahren.

Mithilfe der Photogrammetrie können abgebildete Gelände und Objekte messtechnisch erfasst werden. Bei der Aufnahme wird jedem Geländepunkt (x, y und z) ein eindeutiger Bildpunkt zugewiesen (Albertz, 2009). So entstehen detaillierte Bilder mit geometrischen Beziehungen (Campbell & Wynne, 2011).

Die Vorteile fotografischer Bildaufnahmen sind, dass die fotografische Schicht, auf dem das Bild entsteht, zugleich als Speichermedium dient. Dadurch können riesige Datenmengen auf kleinem Raum gespeichert werden. Die Auswertung der Bildaufnahmen bietet vielseitige Möglichkeiten. Zudem fallen die Kosten bei fotografischen Bildaufnahmen gering aus (Albertz, 2009). Fotografische Bilder werden im Vergleich zu LiDAR Aufnahmen häufiger aktualisiert. Für ein Monitoring oder die Erfassung von dreidimensionalen Veränderungen in der Landschaft ist die Photogrammetrie daher eine attraktive Alternative zu LiDAR.

Bei komplexen Oberflächenstrukturen stossen photogrammetrische Verfahren allerdings an Grenzen, da Schattenwurf und Textur die Genauigkeit der Oberflächenmodelle beeinflussen können (Morsdorf, 2011). Auch können mit der Photogrammetrie, im Gegensatz zu LiDAR, keine Informationen unterhalb der Kronenoberfläche gewonnen werden.

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchungsgebiet

Der Kanton Aargau liegt im Mittelland und weist eine Fläche von 1'404 km² auf. Die Bevölkerungsdichte beträgt 469 Personen pro km² (BFS, 2017). Im Kanton Aargau beträgt die gesamte Waldrandlänge 4'999 km (Abegg et al., 2014). Wird das Verhältnis zwischen Kantonsfläche und Waldrandlänge betrachtet, liegt der Kanton Aargau verglichen mit den übrigen Kantonen an neunter Stelle. Appenzell Innerrhoden besitzt im Verhältnis zur Kantonsfläche die grösste Waldrandlänge, gefolgt von Appenzell Ausserrhoden, Schwyz und Jura (BFS, 2017).

Der Kanton Aargau kann in die zwei Landschaftstypen Jura und Mittelland eingeteilt werden (Stocker et al., 2002). Der Jura besteht aus dem Kettenjura, welcher sich von der Wasserfluh bis zur Lägern, und aus dem Tafeljura, welcher sich über den nördlichen Kantonsteil bis zum Rhein erstreckt. Das Mittelland liegt südlich des Juras und ist geprägt von Tälern und Molasse-Hügelzügen. Zwischen den Molasse- und Moränenlandschaften sowie dem Jura bilden die grossen Flusstäler von Aare, Reuss, Limmat und Rhein weite Ebenen (Abbildung 7) (Stocker et al., 2002).

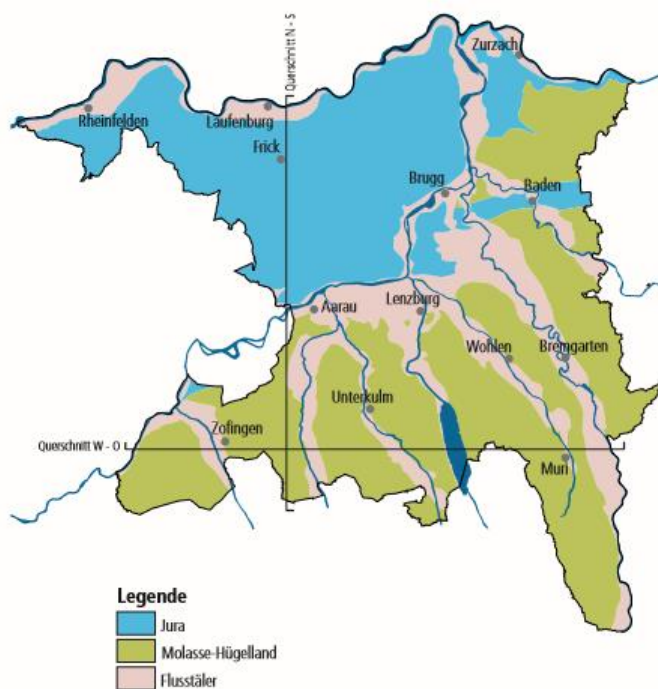


Abbildung 7: Einteilung des Kantons Aargau in die Landschaftstypen Jura und Molasse-Hügelland (Stocker et al., 2002).

In grossen Teilen des Kantons ist ein submontanes (mild bis ziemlich mildes) Klima vorzufinden. In den Flusstälern und an den Jurasüdhängen befinden sich auch ziemlich warme

und in den höchsten Jurahöhen und Molassehöhenzügen (Lindenberg) sehr kühle Lagen (Stocker et al., 2002).

Von der gesamten Fläche des Kantons Aargau wurden 35% als Waldfläche ausgeschieden (Abegg et al., 2014). Die Waldfläche dient zu 88.5% der Holzproduktion, zu 8.2% dem Naturschutz, zu 0.8% dem Landschaftsschutz und zu 2.5% der Erholung. Alle Waldränder im Kanton Aargau befinden sich in Tieflagen, wobei 9.5% der Waldränder in den unteren montanen und 90.5% in den kollinen/submontanen Vegetationshöhenstufe liegen (Abegg et al., 2014).

Im Kanton Aargau sind insgesamt 87 Waldgesellschaften vorzufinden. Die Waldmeister-Buchenwälder nehmen 59.7%, die Kalk-Buchenwälder 23.4% und die Waldhirschen-Buchenwälder 5.7% der Waldfläche ein. Die restlichen Waldgesellschaften sind nur selten vertreten (Stocker et al., 2002).

Mehr als die Hälfte der Waldflächen sind Eigentum von Ortsbürgergemeinden, weniger als ein Viertel Privateigentum und jeweils weniger als 10% Eigentum des Kantons und öffentlicher Körperschaften (BVU, 2007).

In den letzten 100 Jahren sind im Kanton Aargau die Waldflächen praktisch konstant geblieben, die Siedlungsgebiete hingegen haben an Fläche zugenommen (Abbildung 8) (BVU, 2007).



Abbildung 8: Entwicklung der Siedlungsgebiete und Waldflächen im Raum Aarau zwischen den Jahren 1840 und 2007 (BVU, 2007).

3.2 Datengrundlagen

Für die Berechnung der Strukturwerte von aufgewerteten Waldrändern wurden LiDAR Daten aus den Jahren 2001 und 2014 sowie ein photogrammetrisches normalisiertes digitales Oberflächenmodell aus dem Jahr 2016 verwendet. In den weiteren Kapiteln wurden die LiDAR Daten aus dem Jahr 2001 als LiDAR Daten 2001, die LiDAR Daten aus dem Jahr 2014 als LiDAR Daten 2014 und das photogrammetrische normalisierte digitale Oberflächenmodell aus dem Jahr 2016 als photogrammetrisches nDOM 2016 bezeichnet.

Die LiDAR Daten 2001 wurden von der Firma swissphoto in den Monaten Januar und März aufgenommen. Zu dieser Aufnahme konnten keine zusätzlichen Informationen gefunden werden. Im Jahr 2014 wurde eine LiDAR Befliegung im belaubten und im unbelaubten Zustand durchgeführt. Für die vorliegende Auswertung wurden die Daten der Befliegung im belaubten Zustand verwendet, da die Daten aus dem Jahr 2016 und die Feldaufnahmen ebenfalls im belaubten Zustand erhoben wurden. Die LiDAR Daten 2014 stammen aus achtzehn Flugsessionen zwischen dem 19. Juni 2014 und dem 25. Juli 2014. Die Flugsessionen wurden von der Milan Geoservice GmbH mit einem LMS-Q680i in einer Höhe von 700 Metern über Grund durchgeführt. Diese Daten wurden in das Zielsystem SWISS GRID - CH1903 LV03 transformiert (Milan Geoservice GmbH, 2014).

Die LiDAR Daten 2001 und 2014 lagen bereits in normalisierter Form vor. Alle Punkte innerhalb der LiDAR Daten wurden mit dem digitalen Oberflächenmodell normalisiert, indem die absolute Höhe über Meer zur relativen Höhe über Grund berechnet wurde. Die Normalisierung wurde an der WSL durchgeführt.

Das photogrammetrische nDOM 2016 wurde aus der Differenz zwischen dem photogrammetrischen digitalen Oberflächenmodell (DOM) und dem digitalen Geländemodell (DTM) berechnet. Das DOM wurde am 23. Juni 2016 mittels Photogrammetrie aufgenommen und besitzt eine Auflösung von 0.25 Metern. Das DTM wurde aus der LiDAR Befliegung vom 05.04.2014 erstellt und besitzt eine Auflösung von 0.5 Metern (AGIS, 2017). Zusätzlich wurden weitere Datensätze des Kantons Aargaus benötigt. Angaben zu den Waldrandaufwertungen konnten aus dem Datensatz «Waldrandaufwertung» und Angaben zur Waldfläche aus dem Datensatz «Waldausscheidung» bezogen werden. Alle verwendeten Datensätze werden in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Verwendete Daten mit Informationen zum Typ, Datenherr und Aufnahmedatum.

Verwendete Bezeichnung in der vorliegenden Arbeit	Beschreibung	Typ	Datenherr	Aufnahmedatum
Waldrandaufwertung	AGIS.aw_wara: Aufwertungen von Waldrändern, ausgeführt vom Naturschutzprogramm Wald (Erst- und Folgeeingriffe)	Vektor (Polyline)	@Aargauisches Geografisches Informationssystem (AGIS)	Ältester Zeitstand: 28.07.2015 Aktueller Zeitstand: 12.01.2017
Waldausscheidung	AGIS.aw_wa: Walderhebung (Waldflächen) des ganzen Kantons Aargau, basierend auf Plänen im Massstab 1:5'000	Vektor (Polygon)	@Aargauisches Geografisches Informationssystem (AGIS)	Ältester Zeitstand: 16.11.1998 Aktueller Zeitstand: 31.03.2017
LiDAR Daten 2001	LiDAR Daten des Kantons Aargau	Punktwolken	@Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)	2001
LiDAR Daten 2014	LiDAR Daten des Kantons Aargau, Vegetation im belaubten Zustand	Punktwolken	@Aargauisches Geografisches Informationssystem (AGIS)	2014
Photogrammetrisches nDOM 2016	AGIS.kai_photodom: Normalisiertes DOM, 0.25-Meter Raster (photogrammetrisch)	Raster	@Aargauisches Geografisches Informationssystem (AGIS)	2016

3.3 Auswahl der untersuchten Waldränder

Im Rahmen des Naturschutzprogrammes Wald des Kantons Aargau wurden bis ins Jahr 2016 (Stand Januar) insgesamt 934 Waldränder aufgewertet (Datensatz Waldrandaufwertungen). In der vorliegenden Arbeit konnten 548 der aufgewerteten Waldränder ausgewertet werden. Da die Strukturwerte der Waldränder anhand der Daten aus den Jahren 2001, 2014 und 2016 verglichen wurden, mussten die zu untersuchenden Waldränder nach dem Jahr 2001 und vor dem Jahr 2014 aufgewertet worden sein. Das Aufwertungsdatum wurde aus dem Abrechnungsdatum, welches im Datensatz «Waldrandaufwertung» vermerkt ist, hergeleitet. Die Aufwertung erfolgte in den sechs Monaten vor dem Abrechnungsdatum (pers. Mitteilung Ruedi Bättig, Abteilung Wald Kanton Aargau, 04.09.2017). In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb das Datum des Aufwertungsbeginnes und nicht das Abrechnungsdatum berücksichtigt. Die Strukturwerte der ausgewählten Waldränder wurden mit dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) berechnet.

3.4 Berechnung der Strukturwerte mit dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017)

Der Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) basierte auf dem Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) (vgl. Kapitel 2.3.2) und lag in Form eines Python Skriptes vor. Der Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) berechnete anhand von LiDAR Daten den Strauchgürtelanteil (A) und den Waldrandanteil (B) einer bestimmten Waldfläche sowie den Verzahnungsgrad der Waldrandlinie. Der Strauchgürtel wurde als Vegetation mit einer Höhe von 0.5 bis 4 Metern und der Waldrand als Vegetation mit einer Höhe von 0.5 bis 16 Metern definiert. Vegetation mit einer Höhe von mehr als 16 Metern gehörte zum Wirtschaftswald (C). Mit dem Python Skript wurde Folgendes berechnet:

$$\text{Strauchgürtelanteil: } \frac{A}{A+B+C}$$

$$\text{Waldrandanteil: } \frac{A+B}{A+B+C}$$

Da die verwendeten normalisierten Datensätze LiDAR Daten 2001, LiDAR Daten 2014 und photogrammetrisches nDOM 2016 sehr unterschiedliche Punktdichte beziehungsweise Auflösungen besaßen, wurde eine einheitliche Auflösung von 2 Metern pro Pixel festgelegt. Zur Berechnung der Strukturparameter wurde jedem Pixel ein Wert zugeteilt. Der Wert entsprach der höchsten z-Koordinate und somit dem Wert des höchsten Objektes innerhalb eines Pixels.

Um Datenlücken zu vermeiden, wurden einige Filter im Python Skript angewendet. Unter anderem wurden Bereiche mit fehlenden LiDAR Punkten für das gerasterte Oberflächenmodell bis zu einem Durchmesser von 16 Metern gefüllt (Parameter fill = 8 im verwendeten Tool LASGRID). Dabei wurde die Höhe der Pixel an den Lückenrändern übernommen. Sofern die

Pixel an den Rändern unterschiedliche Höhen aufwiesen, entstand in der Mitte der Lücke ein Höhenunterschied. Je grösser die Lücke war, desto stärker wurden die Daten verfälscht.

Zur Ausführung des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) wurden die LASTools «lasclip» und «lasgrid», die ArcGis Toolbox «CreatePointsLines» und das Python Package «xlutils 2.0.0» benötigt. Die Resultate wurden in eine Excel Tabelle übertragen.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Waldrandstrukturen der Jahre 2001, 2014 und 2016 anhand des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) im Python 2.7.10 ausgerechnet.

Zur Berechnung der Strukturwerte wurden zusätzlich zu den LiDAR Daten 2001, den LiDAR Daten 2014 und dem photogrammetrischen nDOM 2016 die Waldrandlinien sowie die Koordinatenpunkte der zu untersuchenden Waldränder benötigt. Dazu wurden diejenigen Waldränder, welche für die vorliegende Arbeit nicht relevant waren, aus dem Datensatz Waldraudaufwertung (Tabelle 2) entfernt. Für die verbliebenen Waldränder wurden im ArcMap (Esri, 2016) die Mittelpunkte anhand des Tools Feature Vertice To Points (Data Management) berechnet. Die Mittelpunkte wurden als Koordinatenpunkte der Waldränder verwendet.

Die Visualisierung der berechneten Strukturwerte erfolgte in den Programmen ArcMap 10.4.1 und FugroViewer Version 2.2. Je nach Fragestellung wurden die mit dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) erstellte Exceltabelle vereinfacht und zusätzlich notwendige Parameter (vgl. Kapitel 3.7) berechnet. Die statistische Auswertung erfolgte mit der Statistiksoftware R (R Core Team, 2015) Version 3.2.3 und Excel. Das R-Skript ist im Anhang B und die Resultate des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) sind im Anhang C aufgeführt.

3.5 Punktevergabe für die strukturelle Qualität

Das Punktetotal jedes Waldrandes wurde berechnet, indem jedem Waldrand anhand des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) berechneten Strukturwertes eine Punktzahl zugeordnet wurde.

Die Punktevergabe basierte auf dem Geodaten Schlüssel nach Wehrli (2015). Dieser wiederum wurde aufgrund des Waldrandschlüssels nach Krüsi (2013) erstellt. Die Punkteverteilung erfolgte, wie beim Geodaten Schlüssel nach Wehrli (2015), ausgehend vom Punktetotal über die Einteilung in eine Grob- und Feinstruktur bis hin zu den Unterkategorien. Der Geodaten Schlüssel nach Wehrli (2015) verfügte über ein Total von 70 und der Waldrandschlüssel nach Krüsi (2013) über ein Total von 77 Punkten.

Da im Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) nur drei Beurteilungskriterien (Strauchgürtelanteil, Waldrandanteil und Verzahnungsgrad) miteinbezogen wurden, wurde das Punktetotal in der vorliegenden Arbeit wesentlich tiefer, auf 32 Punkte, festgelegt.

Im Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) wurde der Grobstruktur (Tabelle 3) ein Punktetotal von 25 und der Feinstruktur (Tabelle 3) ein Punktetotal von 15 Punkten vergeben. Dies entsprach einem Verhältnis von 62.5% zu 36.5%. In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, ein möglichst ähnliches Verhältnis der Punktetotale zwischen Grob- und Feinstruktur zu erreichen, ohne dass der Verzahnungsgrad eine zu hohe Gewichtung erhielt. Das Verhältnis wurde auf 78% zu 22% festgelegt und somit der Grobstruktur ein Punktetotal von 25 und der Feinstruktur ein Punktetotal von 7 Punkten gegeben.

Die Grobstruktur wurde in der vorliegenden Arbeit in die beiden Beurteilungskriterien «Strauchgürtelanteil» und «Waldrandanteil» eingeteilt. Im Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) war das Punktetotal des Strauchgürtels um den Faktor 2 und im Waldrandschlüssel nach Krüsi (2013) um den Faktor 1.75 grösser als das Punktetotal des Waldrandes. In der vorliegenden Arbeit war das Verhältnis zwischen dem Punktetotal des Strauchgürtelanteils und des Waldrandanteils mit dem Faktor 1.8 ähnlich.

Die Feinstruktur enthielt in der vorliegenden Arbeit das Beurteilungskriterium Verzahnungsgrad.

Strauchgürtelanteil

Der Strauchgürtelanteil lag in den Resultaten des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) als Faktor vor und wurde für die Punktevergabe in Prozent umgerechnet. Wie im Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) und im Waldrandschlüssel nach Krüsi (2013) wurde in der vorliegenden Arbeit die maximale Punktzahl bei einem Flächenanteil von 33% vergeben. Die weiteren Punktzahlen wurden nach dem Schema des Geodatenschlüssels nach Wehrli (2015) verteilt. Je höher die Prozentanteile der Fläche, desto weniger streng erfolgte die Punktevergabe.

Waldrandanteil

Der Waldrandanteil lag in den Resultaten des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) als Faktor vor und wurde für die Punktevergabe in Prozent umgerechnet. Die maximale Punktzahl des Bewertungskriteriums Waldrandfläche betrug im Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) 7 und wurde, basierend auf der Verteilung nach Krüsi (2013), bei einem Flächenanteil von 67% vergeben. In der vorliegenden Arbeit wurde bei einem Flächenanteil von 67% ein Höchstwert von 9 Punkten vergeben. Die restlichen Punktzahlen wurden nach einem vergleichbaren Verteilungsschema wie im Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) festgesetzt.

Verzahnungsgrad

Bei der Punktevergabe des Verzahnungsgrades wurde auf die gleiche Weise wie bei der Punktevergabe des Waldrandanteils vorgegangen. Die maximale Punktzahl wurde wie im

Geodatenschlüssel nach Wehrli (2015) bei einem Verzahnungsgrad von mindestens 3.4 vergeben.

In Tabelle 3 sind die Einteilung der Bewertungskriterien in Grob- und Feinstruktur sowie deren Punktevergabe und in Tabelle 4 ist die Punktevergabe der einzelnen Beurteilungskriterien aufgeführt.

Tabelle 3: Einteilung der Bewertungskriterien in Grob- und Feinstruktur sowie deren Punktevergabe.

Grobstruktur 25 P.	Strauchgürtelanteil 16 P.
	Waldrandanteil 9 P.
Feinstruktur 7 P.	Verzahnungsgrad 7 P.
Total 32 P.	

Tabelle 4: Punktevergabe der drei Bewertungskriterien.

Punkte	Strauchgürtelanteil (%)	Waldrandanteil (%)	Verzahnungsgrad
0	0	≤ 7	≤ 1.1
1	1	8 – 11	1.2 – 1.3
2	2	12 – 16	1.4 – 1.6
3	3	17 – 21	1.7 – 1.9
4	4	22 – 26	2.0 – 2.3
5	5 – 6	27 – 32	2.4 – 2.8
6	7 – 8	33 – 43	2.9 – 3.3
7	9 – 10	44 – 54	≥ 3.4
8	11 – 12	55 – 66	
9	13 – 14	≥67	
10	15 – 16		
11	17 – 18		
12	19 – 21		
13	22 – 24		
14	25 - 28		
15	29 - 32		
16	≥ 33		

3.6 Verifizierung der berechneten Strukturwerte im Feld

Die mit dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) berechneten Resultate der Waldränder aus dem photogrammetrischen nDOM 2016 und den LiDAR Daten 2014 – d.h. die damit ermittelten Punktzahlen der Waldränder – wurden anhand von Felderhebungen mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (Krüsi 2013, Krüsi 2015) verifiziert. Die Felderhebungen im Jahr 2014 erfolgten mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (2013) und diejenige im Jahr 2017 mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015). Die unterschiedlichen Versionen des Waldrandschlüssels haben vermutlich keinen Einfluss auf die Resultate, da sie sich nur geringfügig unterscheiden.

Zur Verifizierung der Resultate des photogrammetrischen nDOMs 2016 wurden im Jahr 2017 insgesamt 25 Waldränder untersucht (Anhang D). Die Auswahl der Waldränder für die Felderhebung erfolgte aufgrund der Resultate nach dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017). Sofern vorhanden, wurden je fünf Waldränder, die mit 1, 8, 16, 24 und 32 Punkten bewertet wurden, ausgewählt. Waren weniger Waldränder vorhanden, wurden diejenigen ausgewählt, die am nächsten bei der jeweiligen Punktzahl lagen. Waren mehr vorhanden, so wurde nach Erreichbarkeit der Standorte entschieden.

Zur Überprüfung der Resultate der LiDAR Daten 2014 wurden die Felddaten von Spörri (2014) sowie diejenigen von Blattner & Widmer (2015) herangezogen. Darin waren 39 der vom Naturschutzprogramm Wald aufgewerteten Waldränder im Kanton Aargau enthalten. Für die LiDAR Daten 2001 lagen keine zeitnahen Felddaten vor.

3.7 Datenauswertung

Für den Vergleich der LiDAR Daten 2001, LiDAR Daten 2014 und des photogrammetrischen nDOMs 2016 wurden die Qualitätskriterien Aufnahmemethode, Datentyp, durchschnittliche Punktdichte pro Quadratmeter und Vegetation während der Befliegung einander gegenübergestellt. Die Punktdichte der einzelnen Datensätze wurde anhand des LASTools «Lasinfo» berechnet. Für einen visuellen Vergleich wurde ein geeigneter Waldrand ausgewählt und für jeden Datensatz mit ArcMap visualisiert.

Für das Aufzeigen der Veränderung der Strukturwerte zwischen den Jahren 2001 und 2016, wurde die Differenz der berechneten Punktetotale pro Waldrand innerhalb der Jahre 2001 und 2014, 2014 und 2016 sowie 2001 und 2016 ausgerechnet. Mit einem statistischen Test wurde überprüft, ob innerhalb dieser Zeiträume signifikante Veränderungen der Waldrandstrukturen vorlagen. Da es sich um ordinale und abhängige Stichproben handelte, wurde der Wilcoxon-Test durchgeführt. Alpha wurde auf den Wert 0.05 festgelegt. Zusätzlich wurde für jeden Zeitraum der durchschnittliche Strukturwertunterschied pro Aufwertungsjahr berechnet.

Zur Überprüfung der LiDAR Daten 2014 und des photogrammetrischen nDOMs 2016 mit den Feldaufnahmen mussten die Strukturparameter des Waldrandschlüssels nach Krüsi (2015) an die Strukturparameter des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) angepasst werden. Lediglich der Parameter «Verzahnungsgrad» war in beiden Bewertungsmethoden vorhanden. Der Strauchgürtelanteil konnte anhand der Parameter «Strauchgürteltiefe» und «Strauchgürtellänge» und der Waldrandanteil anhand der Parameter «Waldrandtiefe» und «Belaubungsdichte» aus den Resultaten der Feldaufnahmen berechnet werden:

Strauchgürtel in Prozent: $\frac{\text{Strauchgürteltiefe} \cdot \text{Strauchgürtellänge}}{\text{Fläche des untersuchten Waldrandes}}$

Waldrandfläche in Prozent: $\frac{\text{Waldrandtiefe} \cdot \text{Belaubungsdichte}}{\text{Fläche des untersuchten Waldrandes}}$

Die Fläche des untersuchten Waldrandes setzte sich aus einer Länge von 100 Metern (Länge der Beurteilungslinie nach Krüsi (2015)) und einer Breite von 30 Metern (Breite des zu untersuchenden Waldrandbereiches nach dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017)) zusammen. Im Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) war die Breite der Untersuchungsfläche nicht festgelegt, weshalb die Breite vom Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) übernommen wurde.

Das Total der Strukturwerte wurde aus der Summe des Strauchgürtelanteils, des Waldrandanteils und des Verzahnungsgrades berechnet.

Für den Vergleich der Strukturwerte hinsichtlich Erstaufwertung und Folgeeingriff konnten nicht alle berechneten Waldränder miteinbezogen werden. Es wurden nur Waldränder miteinbezogen, bei denen noch kein Folgeeingriff stattgefunden hatte.

Beim Vergleich hinsichtlich Erstaufwertung anhand der LiDAR Daten 2001 und 2014 wurden demnach alle Waldränder, bei denen vor dem 25. Juli 2014 ein Folgeeingriff durchgeführt wurde, entfernt. Beim Vergleich hinsichtlich Erstaufwertung anhand der LiDAR Daten 2001 und dem photogrammetrischen nDOM 2016 wurden alle Waldränder, bei denen vor dem 23. Juni 2016 ein Folgeeingriff stattgefunden hatte, nicht miteinbezogen.

Beim Vergleich der Strukturwerte hinsichtlich Folgeeingriff wurde der Prozentanteil pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2016 von Waldrändern mit und ohne Folgeeingriff ausgerechnet. In die Berechnung der Prozentanteile von Waldrändern, bei denen ein Folgeeingriff stattgefunden hatte, wurden nur diejenigen Waldränder, bei denen vor dem 23. Juni 2016 bereits ein Folgeeingriff durchgeführt wurde, miteinbezogen. Anhand des U-Tests wurde berechnet, ob sich Waldränder mit Folgeeingriff signifikant von den Waldrändern ohne Folgeeingriff unterscheiden. Der U-Test wurde durchgeführt, da es sich um ordinale und unabhängige Strichproben handelte. Alpha erhielt den Wert 0.05.

4 Ergebnisse

4.1 Qualitätsvergleich zwischen den LiDAR Daten und dem photogrammetrischen nDOM

In der vorliegenden Arbeit wurden die LiDAR Daten 2001, die LiDAR Daten 2014 und das photogrammetrische nDOM 2016 miteinander verglichen. Die für die Arbeit relevanten Qualitätskriterien wurden in der Tabelle 5 einander gegenübergestellt. Zusätzlich wurde von jedem Datensatz ein Ausschnitt des normalisierten digitalen Oberflächenmodelles visualisiert (Abbildungen 9, 10, und 11).

Tabelle 5: Qualitätsvergleich der LiDAR Daten 2001 und 2014 sowie dem photogrammetrischen nDOM 2016. ALS ist die Abkürzung von Ariborne Laser Scanning und wird im Kapitel 2.4.1 genauer erläutert.

Kriterien	LiDAR Daten 2001	LiDAR Daten 2014	Photogrammetrisches nDOM 2016
Aufnahmemethode	ALS	ALS	Photogrammetrie
Datentyp	Normalisierte Punktwolken	Normalisierte Punktwolken	Normalisierte Punktwolken (Für die Auswertung mit dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) wurden die Punktwolken aus dem nDOM wieder hergeleitet.)
Durchschnittliche Punktdichte pro m ²	1.4	15.5	16
Vegetation während der Befliegung	Unbelaubt (Februar und März)	Belaubt (Juni und Juli)	Belaubt (Juli)

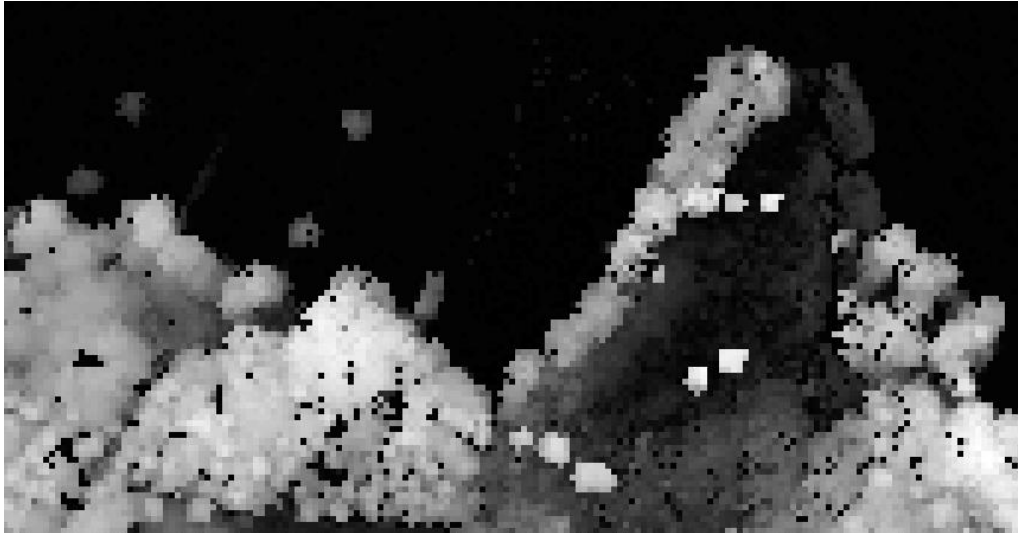


Abbildung 9: nDOM der LiDAR Daten 2001 eines Waldausschnittes bei Teufenthal (AG).

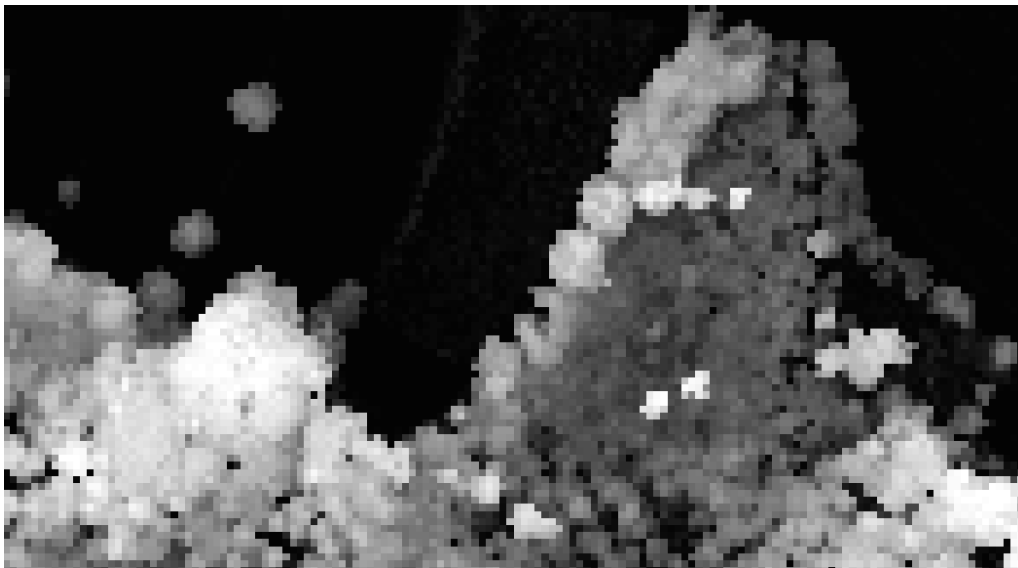


Abbildung 10: nDOM der LiDAR Daten 2014 eines Waldausschnittes bei Teufenthal (AG).

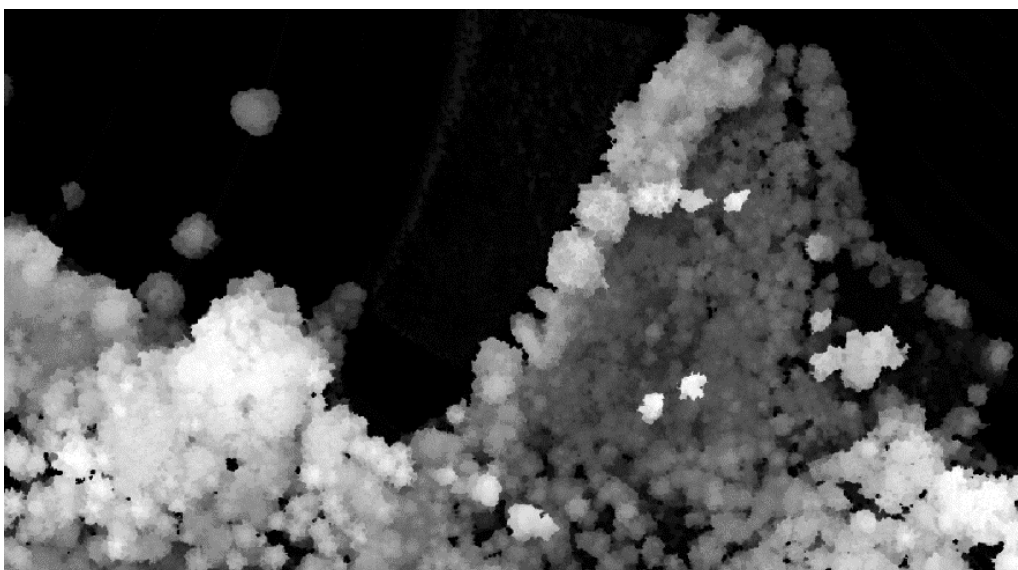


Abbildung 11: nDOM der photogrammetrisch gewonnenen Daten 2016 eines Waldausschnittes bei Teufenthal (AG).

4.2 Veränderung der Strukturwerte zwischen den unterschiedlichen Aufnahmejahren

Die Strukturwerte der Waldränder wurden zwischen 2001 und 2014, 2014 und 2016 sowie 2001 und 2016 miteinander verglichen. Die Entwicklung fiel mehrheitlich positiv aus (Abbildung 12). In allen drei betrachteten Zeiträumen entwickelte sich der Strukturwert von etwa 300 Waldrändern positiv, von etwa 150 Waldrändern negativ und bei etwa 50 Waldrändern wurde keine Veränderung festgestellt. Die grösste Anzahl an Waldrändern, welche in ihrer Entwicklung stagnierten, wurde in den Jahren 2014 bis 2016 gemessen. Die Strukturwerte haben sich zwischen 2001 und 2014, 2014 und 2016 sowie 2001 und 2016 jeweils hochsignifikant verändert ($p = <0.00001$) (Anhang B).

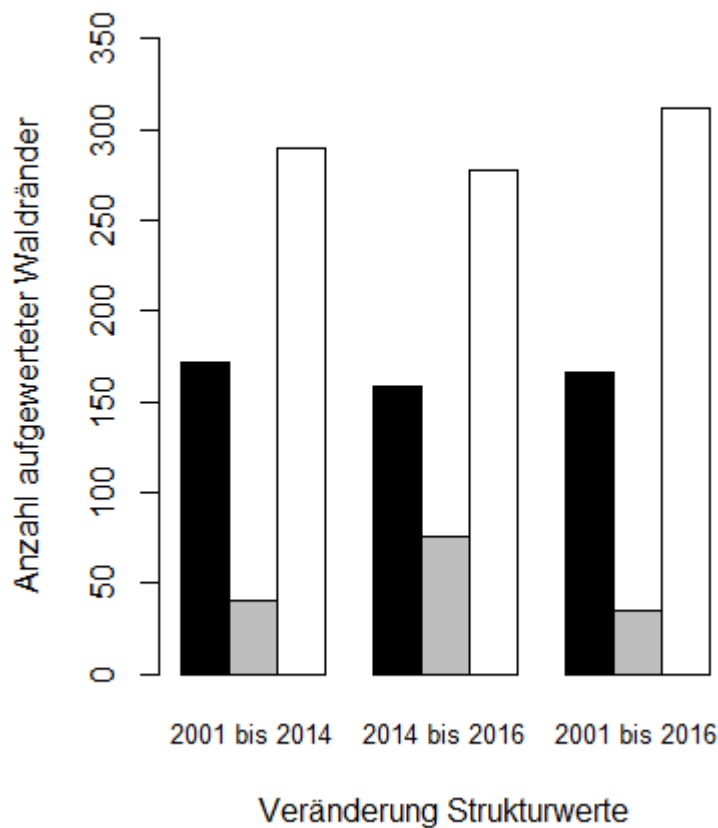


Abbildung 12: Veränderung der Strukturwerte von aufgewerteten Waldrändern zwischen den Jahren 2001 und 2016 (Schwarz = negative Veränderung, grau = keine Veränderung, weiss = positive Veränderung).

In einem weiteren Schritt wurden die drei Zeiträume genauer betrachtet. Zwischen den Jahren 2001 und 2014 lagen die Strukturwertunterschiede vorwiegend im Bereich von -5 bis 6. Die höchste Anzahl Waldränder hatten einen Strukturwertunterschied von 1 (Abbildung 13). Nur wenige Waldränder entwickelten sich stark positiv oder stark negativ.

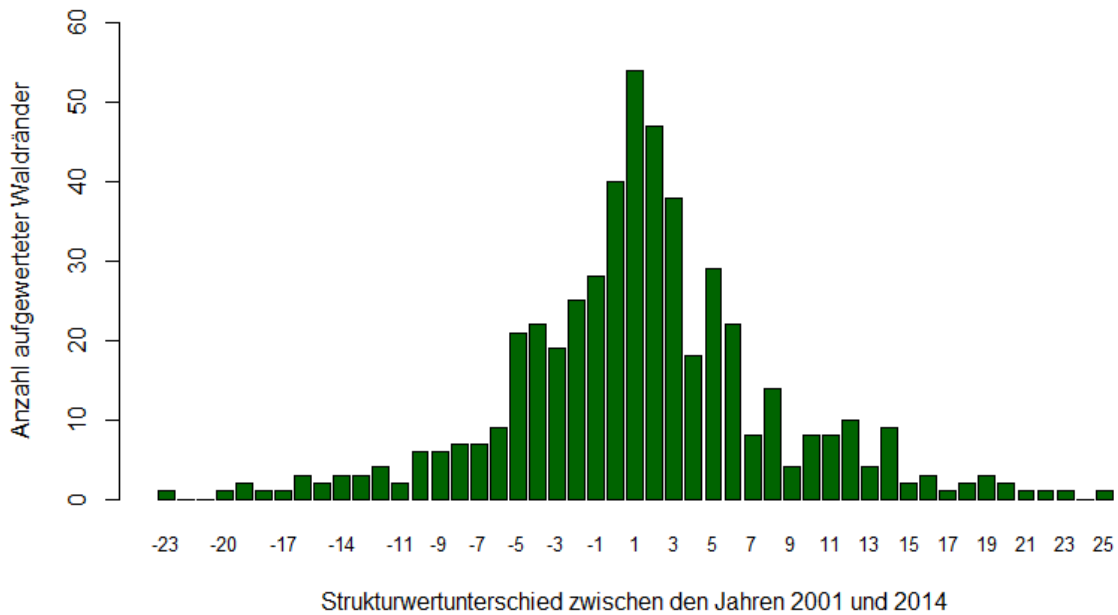


Abbildung 13: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2014.

Die Strukturwertunterschiede zwischen den Jahren 2014 und 2016 lagen vorwiegend im Bereich von -4 bis 5 (Abbildung 14). Beim Strukturwertunterschied Null (keine Veränderung) wurde mit 76 Waldrändern die höchste Anzahl festgestellt.

Im Gegensatz zu den Resultaten zwischen den Jahren 2001 und 2014 konzentrierten sich die Anzahl Waldränder auf eine geringere Anzahl an Strukturwertunterschieden.

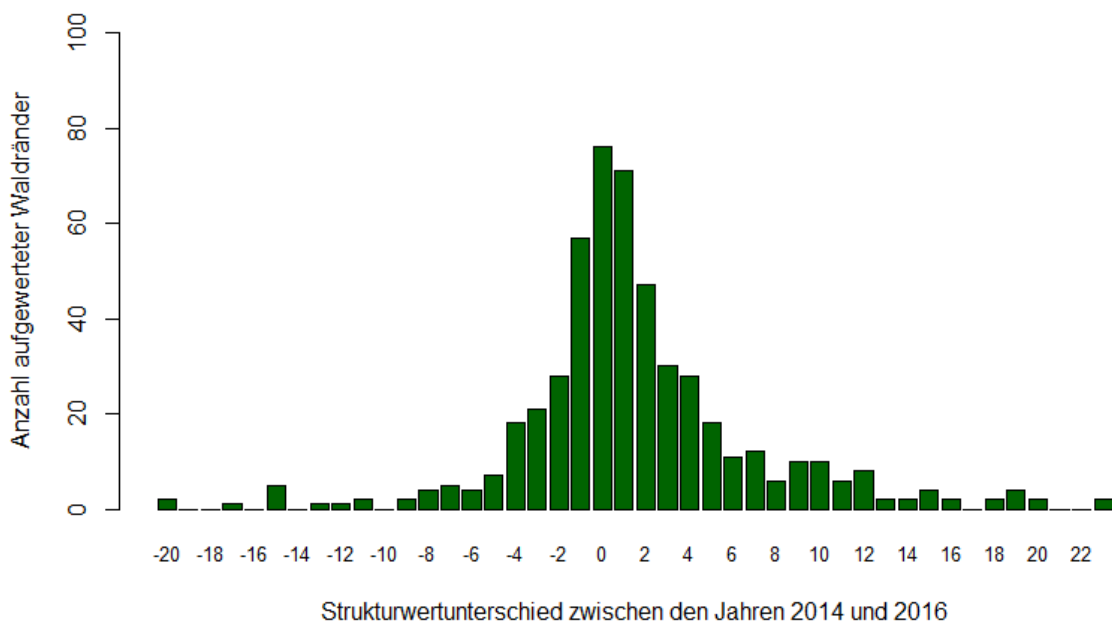


Abbildung 14: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2014 und 2016.

Zwischen den Jahren 2001 und 2016 lagen die Strukturwertunterschiede vorwiegend im Bereich von -5 bis 10 (Abbildung 15). Die höchste Anzahl Waldränder resultierte beim Strukturwertunterschied von 1, wobei eine Anzahl von 37 Waldrändern gezählt wurde. Die Verteilung fiel verglichen mit den beiden anderen Zeiträumen homogener aus.

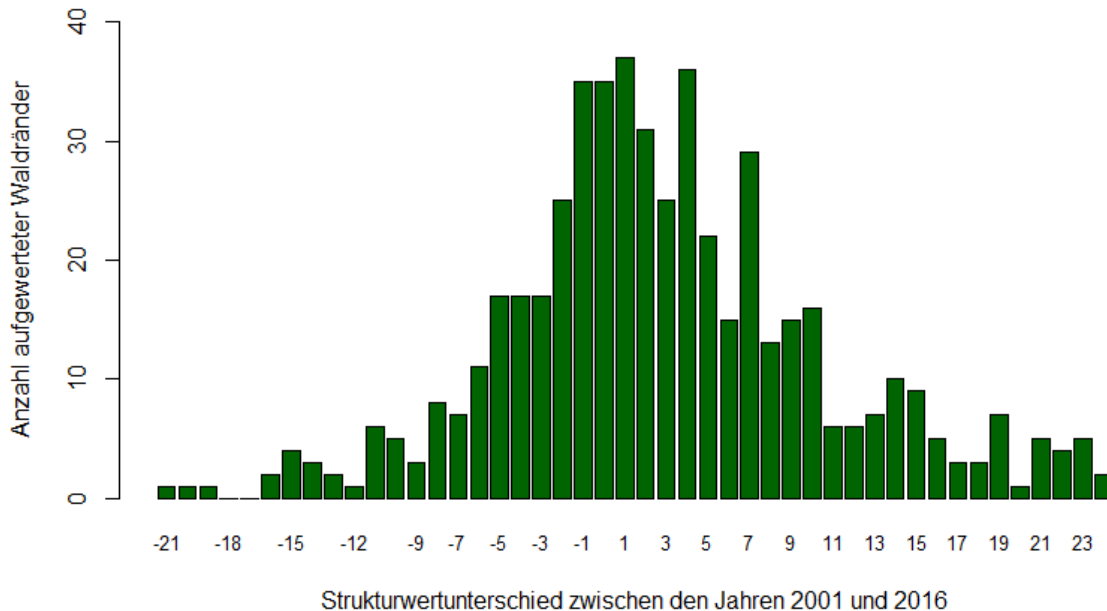


Abbildung 15: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2016.

In allen drei Zeiträumen gab es einzelne Waldränder mit stark positiven oder negativen Entwicklungen. Nachfolgend werden exemplarisch ein Waldrand mit einer stark negativen Entwicklung zwischen den Jahren 2001 und 2014 sowie den Jahren 2001 und 2016 (Waldrand IDD 331) (Tabelle 6 und Abbildung 16) und ein Waldrand mit einer stark positiven Entwicklung zwischen den Jahren 2014 und 2016 sowie den Jahren 2001 und 2016 (Waldrand IDD 80) (Tabelle 7 und Abbildung 17) genauer betrachtet.

Die Strukturwerte des Waldrandes mit der IDD 331 entwickelten sich zwischen den Jahren 2001 und 2014 negativ. Im Jahr 2014 war kein Strauchgürtelanteil mehr vorhanden. Der Waldrandanteil nahm um zwei Drittel und der Verzahnungsgrad um die Hälfte ab. Bis zum Jahr 2016 entwickelte sich der Waldrand insgesamt positiv. Der Strauchgürtel- und der Waldrandanteil nahmen zu und der Verzahnungsgrad verringerte sich um 0.5. Die Erstaufwertung fand zwischen März und Oktober 2009 statt (Tabelle 6 und Abbildung 16).

Die Strukturwerte des Waldrandes mit der IDD 80 entwickelten sich zwischen den Jahren 2014 und 2016 positiv. Erst zwischen den Jahren 2014 und 2016 entstand gemäss dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) ein Strauchgürtel. Der Waldrandanteil verdoppelte

sich und der Verzahnungsgrad blieb gleich. Die Erstaufwertung des Waldrandes erfolgte zwischen Dezember 2012 und Mai 2013 (Tabelle 7 und Abbildung 17).

Tabelle 6: Attribute und Resultate des Waldrandes mit der IDD 331 mit stark negativer Entwicklung zwischen den Jahren 2001 und 2014 sowie den Jahren 2001 und 2016.

Attribute und Resultate	Werte
IDD	331
Koordinaten des Waldrandmittelpunktes	671757 / 228975
Abrechnungsdatum der Erstaufwertung	19.10.2009
Abrechnungsdatum des Folgeeingriffs	Kein Folgeeingriff
Strukturwertunterschied zwischen 2001 bis 2014 [Punkte]	-23
Strukturwertunterschied zwischen 2014 bis 2016 [Punkte]	2
Strukturwertunterschied zwischen 2001 bis 2016 [Punkte]	-21
Strauchgürtelanteil im Jahr 2001 [%]	40.66
Strauchgürtelanteil im Jahr 2014 [%]	0
Strauchgürtelanteil im Jahr 2016 [%]	4.10
Waldrandanteil im Jahr 2001 [%]	63.75
Waldrandanteil im Jahr 2014 [%]	22.29
Waldrandanteil im Jahr 2016 [%]	26.32
Verzahnungsgrad 2001	4.1
Verzahnungsgrad 2014	2.1
Verzahnungsgrad 2016	1.6

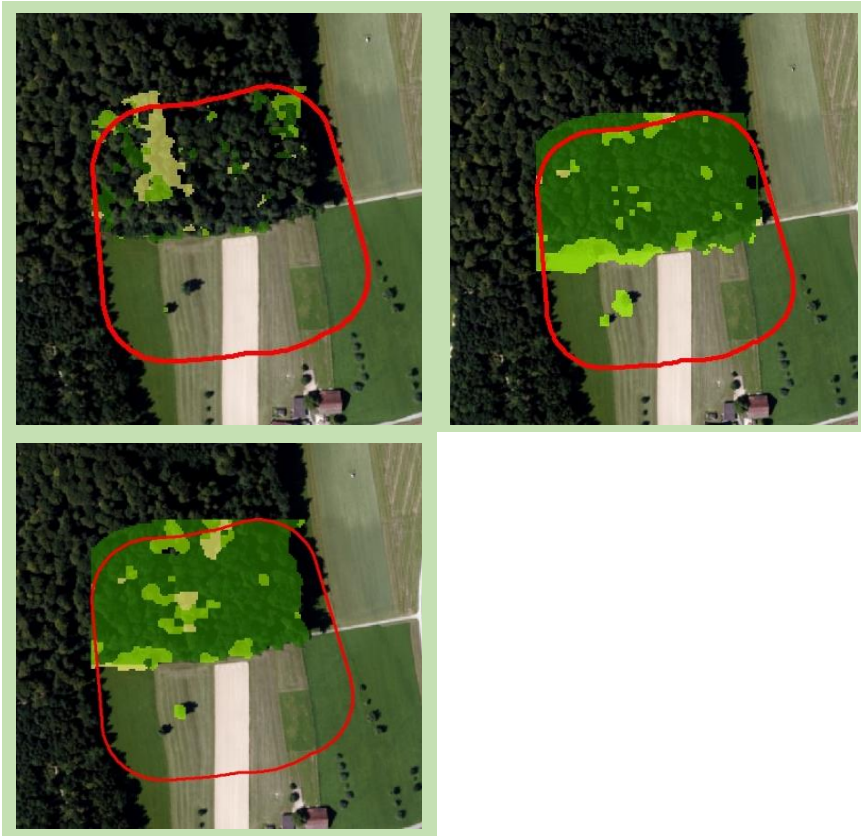


Abbildung 16: Darstellung der Waldrandstrukturen des Waldrandes mit der IDD 331 in den Jahren 2001 (links oben), 2014 (rechts oben) und 2016 (links unten), eingezeichnet auf dem Orthophoto des Jahres 2014 (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118)), (Dunkelgrün = Wirtschaftswald, hellgrün = Waldrand, gelb = Strauchgürtel, rot = Eingrenzung des bewerteten Waldrandes) (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118)).

Tabelle 7: Attribute und Resultate eines Waldrandes mit der IDD 80 mit stark positiver Entwicklung zwischen den Jahren 2014 und 2016 sowie den Jahren 2001 und 2016.

Attribute und Resultate	Werte
IDD	80
Koordinaten des Waldrandmittelpunktes	644263 / 252236
Abrechnungsdatum der Erstaufwertung	15.05.2013
Abrechnungsdatum des Folgeeingriffes	Kein Folgeeingriff
Strukturwertunterschied zwischen 2001 bis 2014 [Punkte]	0
Strukturwertunterschied zwischen 2014 bis 2016 [Punkte]	23
Strukturwertunterschied zwischen 2001 bis 2016 [Punkte]	23
Strauchgürtelanteil im Jahr 2001 [%]	0
Strauchgürtelanteil im Jahr 2014 [%]	0
Strauchgürtelanteil im Jahr 2016 [%]	4.50
Waldrandanteil im Jahr 2001 [%]	4.48
Waldrandanteil im Jahr 2014 [%]	2.36
Waldrandanteil im Jahr 2016 [%]	4.50
Verzahnungsgrad 2001	0
Verzahnungsgrad 2014	0
Verzahnungsgrad 2016	0

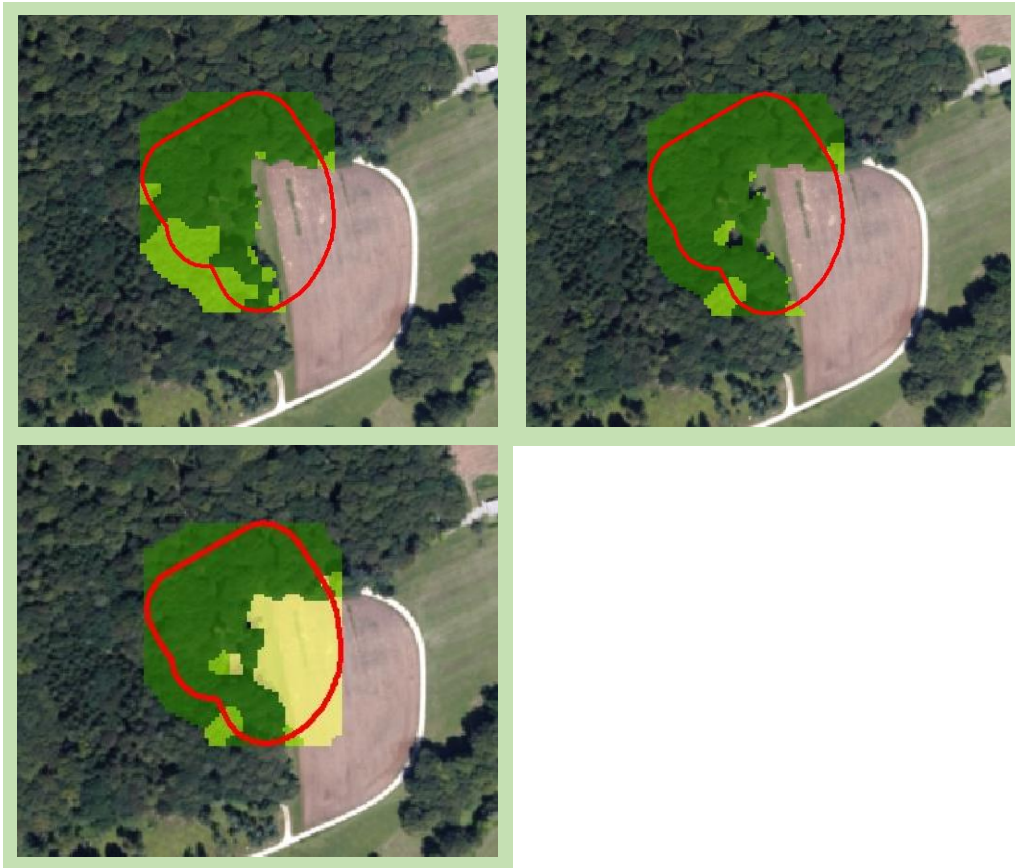


Abbildung 17: Darstellung der Waldrandstrukturen des Waldrandes mit der IDD 80 in den Jahren 2001 (links oben), 2014 (rechts oben) und 2016 (links unten), eingezeichnet auf dem Orthophoto des Jahres 2014 (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118)), (Dunkelgrün = Wirtschaftswald, hellgrün = Waldrand, gelb = Strauchgürtel, rot = Eingrenzung des bewerteten Waldrandes).

4.3 Ökologische Qualität der im Feld aufgenommenen Waldränder

Im Feld wurden 25 Waldränder mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) untersucht. Die Bewertungen der Waldränder lagen im Bereich von ökologisch ungenügend bis ökologisch sehr wertvoll. Dabei wurde ein Waldrand als ungenügend, 12 Waldränder als befriedigend, 11 Waldränder als wertvoll und einer als sehr wertvoll bewertet. Die durchschnittliche Gesamtpunktzahl der 25 Waldränder betrug 47.52 und wurde als ökologisch befriedigend eingestuft.

Folgend wurde pro Einstufung ein untersuchter Waldrand porträtiert. Die Bewertungen der restlichen Waldränder wurden dem Anhang D beigefügt.

Einstufung «ungenügend»

Waldrand IDD 232

Ort: Brittnau

Koordinate: 636822 / 233128

Gesamtpunktzahl: 34

Waldrandstrukturen	Werte
Waldrandtiefe (m)	5.02
Strauchgürteltiefe (m)	0.66
Krautsaumtiefe (m)	2.92
Strauchgürtellänge (%)	60
Krautsaumlänge (%)	80
Belaubungsdichte (%)	30
Verzahnungsgrad	1.6



Abbildung 18: Waldrand IDD 232, aufgenommen am 13.07.2017.

Einstufung «befriedigend»

Waldrand IDD 299

Ort: Schneisingen

Koordinate: 669912 / 264850

Gesamtpunktzahl: 44

Waldrandstrukturen	Werte
Waldrandtiefe (m)	15.08
Strauchgürteltiefe (m)	7.06
Krautsaumtiefe (m)	1.14
Strauchgürtellänge (%)	85
Krautsaumlänge (%)	75
Belaubungsdichte (%)	40
Verzahnungsgrad	1.7



Abbildung 19: Waldrand IDD 299, aufgenommen am 21.07.2017

Einstufung «wertvoll»

Waldrand IDD 527

Ort: Magden

Koordinate: 629101 / 262663

Gesamtpunktzahl: 52

Waldrandstrukturen	Werte
Waldrandtiefe (m)	13.14
Strauchgürteltiefe (m)	6
Krautsaumtiefe (m)	5.74
Strauchgürtellänge (%)	95
Krautsaumlänge (%)	100
Belaubungsdichte (%)	65
Verzahnungsgrad	1.8



Abbildung 20: Waldrand IDD 527, aufgenommen am 14.07.2017

Einstufung «sehr wertvoll»

Waldrand IDD 98

Ort: Villnachern

Koordinate: 653487 / 258193

Gesamtpunktzahl 60

Waldrandstrukturen	Werte
Waldrandtiefe (m)	14.42
Strauchgürteltiefe (m)	3.76
Krautsaumtiefe (m)	10.1
Strauchgürtellänge (%)	85
Krautsaumlänge (%)	100
Belaubungsdichte (%)	90
Verzahnungsgrad	1.4



Abbildung 21: Waldrand IDD 98, aufgenommen am 15.07.2017.

4.4 Vergleich der LiDAR Daten und des photogrammetrischen nDOMs mit den Feldaufnahmen

Zur Verifizierung der anhand des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) berechneten Resultate wurden die berechneten Strukturwerte der LiDAR Daten 2014 mit den Feldaufnahmen des Jahres 2014 (Spörri, 2014 und Blattner & Widmer, 2015) und die berechneten Strukturwerte des photogrammetrischen nDOMs 2016 mit den Feldaufnahmen des Jahres 2017 verglichen.

Im Folgenden werden die LiDAR Daten 2014 mit den Feldaufnahmen des Jahres 2014 verglichen.

Obwohl der Korrelationskoeffizient (R^2) zwischen den Summen der Waldrandstrukturen – d.h. Waldrandanteil, Strauchgürtelanteil und Verzahnungsgrad – pro Waldrand aus den LiDAR Daten 2014 und der Feldaufnahmen des Jahres 2014 relativ niedrig ausfiel ($R^2= 0.017$), wurde eine schwache Korrelation festgestellt.

Wurden der Waldrandanteil (Abbildung 22) und der Strauchgürtelanteil (Abbildung 23) einzeln betrachtet, konnte eine höhere Korrelation erkannt werden.

Zwischen dem Waldrandanteil der LiDAR Daten 2014 und den Feldaufnahmen des Jahres 2014 konnte ein Korrelationskoeffizient von 0.057 berechnet werden (Abbildung 22). Den Waldrandanteilen wurden mit dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) Werte zwischen 0 und 6 vergeben. Bei den Feldaufnahmen wurden hingegen nur Werte zwischen 0 und 1.2 berechnet.

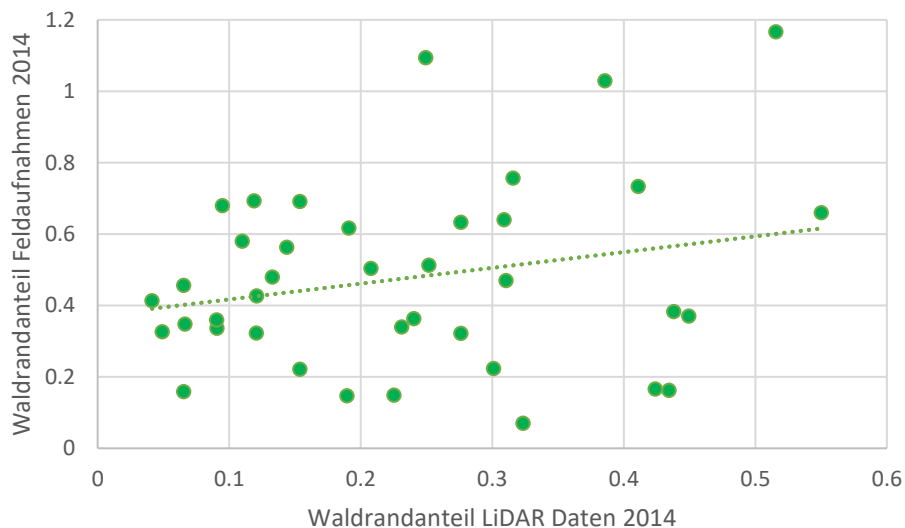


Abbildung 22: Korrelation des Waldrandanteils zwischen den Feldaufnahmen 2014 (Spörri, 2014 und Blattner & Widmer, 2015) und den LiDAR Daten 2014 ($r^2=0.057$).

Der Korrelationskoeffizient aus dem Vergleich des Strauchgürtelanteils der LiDAR 2014 mit den Feldaufnahmen des Jahres 2014 fiel tiefer aus als beim Vergleich des Waldrandanteils. Die Werte der LiDAR Daten häuften sich im Bereich 0 bis 0.02 des Strauchgürtelanteils LiDAR Daten 2014 (Abbildung 23). Bei den Feldaufnahmen wurden den Strauchgürtelanteilen Werte zwischen 0 und 0.6 vergeben. Mit dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) wurden hingegen nur Werte zwischen 0 und 0.14 berechnet.

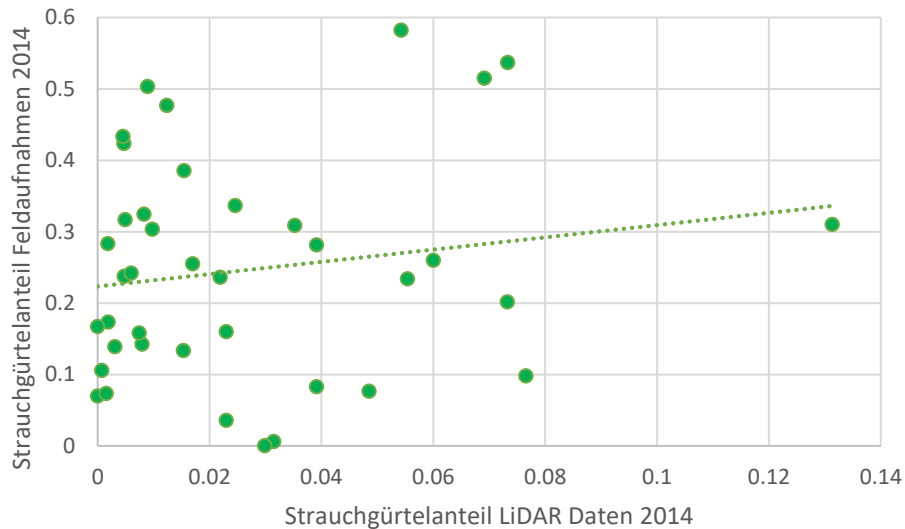


Abbildung 23: Korrelation des Strauchgürtelanteils zwischen den Feldaufnahmen 2014 (Spörri, 2014 und Blattner & Widmer, 2015) und den LiDAR Daten 2014 ($R^2=0.027$).

Die Korrelation des Verzahnungsgrades fiel negativ und relativ niedrig aus ($R^2=0.013$). In den Auswertungen der LiDAR Daten resultierten viel höhere Verzahnungsgrade als im Feld aufgenommen wurden. In den Feldaufnahmen wurden einem Grossteil der Waldränder ein Verzahnungsgrad von 1 vergeben.

Die Summe der Strukturwerte der Feldaufnahmen aus dem Jahr 2017 und des photogrammetrischen nDOMs 2016 korrelierten schwach ($r^2 = 0.011$). Wurden der Waldrandanteil (Abbildung 24) und der Strauchgürtelanteil (Abbildung 25) einzeln betrachtet, konnte eine höhere Korrelation erkannt werden.

Zwischen dem Waldrandanteil des photogrammetrischen nDOMs 2016 und den Feldaufnahmen des Jahres 2017 konnte ein Korrelationskoeffizient von 0.036 berechnet werden (Abbildung 24).

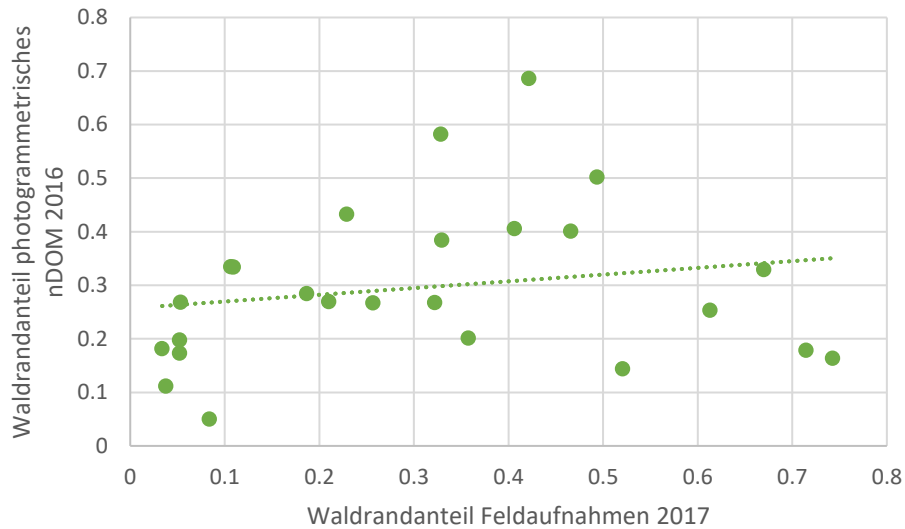


Abbildung 24: Korrelation des Waldrandanteils zwischen den Feldaufnahmen des Jahres 2017 und dem photogrammetrischen nDOM 2016 ($R^2=0.036$).

Beim Strauchgürtelanteil wurde eine geringere Korrelation als beim Waldrandanteil berechnet (Abbildung 25). In den Auswertungen des photogrammetrischen nDOMs 2016 resultierten tiefere Werte des Strauchgürtelanteils als im Feld aufgenommen wurden, wobei der Grossteil der Waldränder einen Wert zwischen 0 und 0.07 erhielt.



Abbildung 25: Korrelation des Strauchgürtelanteils pro Waldrand zwischen den Feldaufnahmen des Jahres 2017 und dem photogrammetrischen nDOM 2016 ($R^2=0.014$).

Zwischen dem Verzahnungsgrad des Höhenmodelles 2016 und den Feldaufnahmen des Jahres 2017 wurde eine geringe und negative Korrelation berechnet ($R^2=0.039$). Verglichen mit den Auswertungen des Höhenmodelles 2016 wurde der Verzahnungsgrad der Feldaufnahmen teilweise gegensätzlich bewertet.

4.5 Veränderung der Strukturwerte hinsichtlich Erstaufwertung und Folgeeingriff

Um die Entwicklung der aufgewerteten Waldränder auszuwerten, wurde das Punktetotal der aufgewerteten Waldränder zwischen den Jahren 2001 und 2014 sowie den Jahren 2001 und 2016 verglichen, wobei nur Waldränder, bei denen noch kein Folgeeingriff stattfand, miteinbezogen wurden.

Die Strukturwertunterschiede zwischen den Jahren 2001 und 2014 lagen hauptsächlich im Bereich von -5 bis 6 (Abbildung 26). Die höchste Anzahl Waldränder resultierte beim Strukturwertunterschied von 1, wobei eine Anzahl von 38 Waldrändern gezählt wurde. Insgesamt wurden für 114 Waldränder negative Werte, für 207 Waldränder positive Werte und für 27 Waldränder ein Strukturwertunterschied von Null berechnet. Stark positive oder stark negative Strukturwertveränderungen wurden nur bei einzelnen Waldrändern festgestellt.

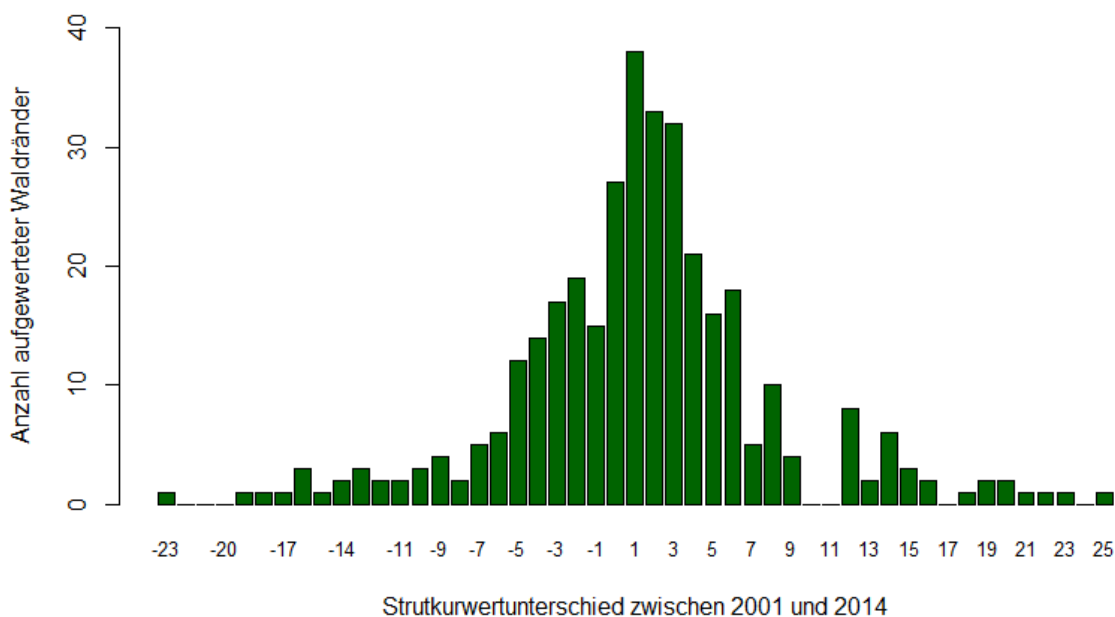


Abbildung 26: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2014, bei denen kein Folgeeingriff durchgeführt wurde.

Werden die Strukturwertunterschiede zwischen den Jahren 2001 und 2016 betrachtet, ist zu erkennen, dass sich ein grosser Teil der Waldränder positiv entwickelt hat (Abbildung 27). Beim Strukturwertunterschied Null wurde die höchste Anzahl Waldränder festgestellt. Die Anzahl betrug 38 Waldränder. Für 133 Waldränder wurden negative und für 266 Waldränder positive Werte berechnet.

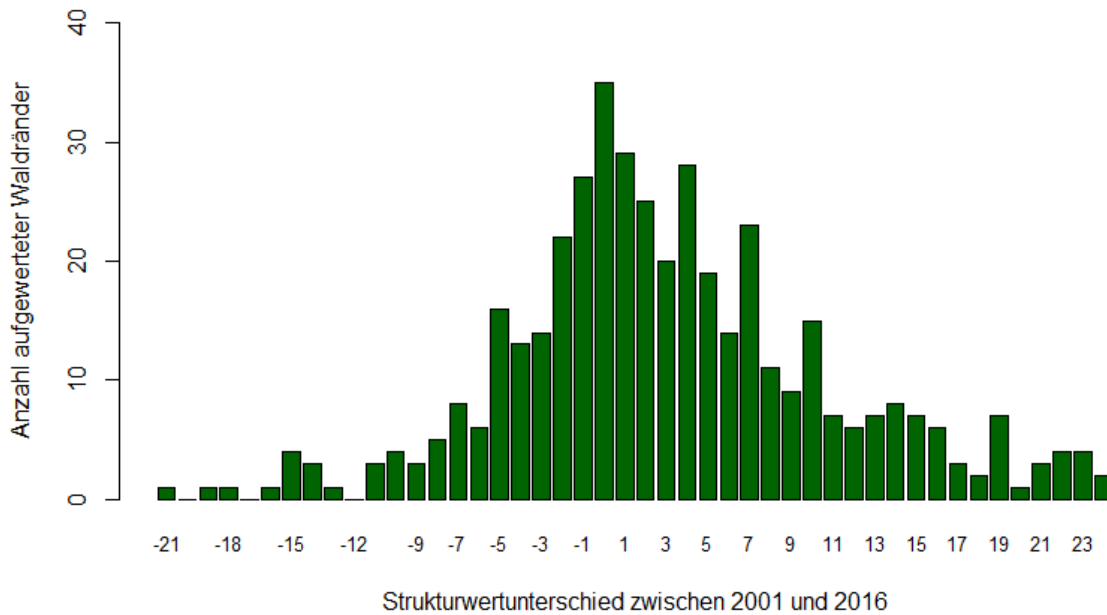


Abbildung 27: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2016, bei denen kein Folgeeingriff durchgeführt wurde.

Um die Auswirkung der Folgeeingriffe zu analysieren, wurden die Strukturwertunterschiede zwischen den Jahren 2001 und 2016 von Waldrändern mit und ohne Folgeeingriffe verglichen (Abbildung 28). Nach dem Entfernen derjenigen Waldränder, bei denen vor dem 23. Juni 2016 ein Folgeeingriff stattgefunden hat, konnten 150 Waldränder mit und 362 Waldränder ohne Folgeeingriff verglichen werden. Da die Anzahl an Waldrändern mit und ohne Folgeeingriffe unterschiedlich ausfiel, basierte der Vergleich auf Prozentzahlen.

Bei Waldrändern mit Folgeeingriffen lagen insgesamt 35% der Waldränder im negativen und 62% der Waldränder im positiven Bereich. 3% der Waldränder wiesen einen Strukturwertunterschied von Null auf.

Bei Waldrändern ohne Folgeeingriffe lagen insgesamt 31% der Waldränder im negativen und 61% der Waldränder im positiven Bereich. 8% der Waldränder wiesen einen Strukturwertunterschied von Null auf.

Wird die gesamte Verteilung der Anzahl Waldränder bezüglich Strukturwertunterschiede von Waldrändern mit und ohne Folgeeingriffe verglichen, konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden ($p = 0.2369$) (Anhang B).

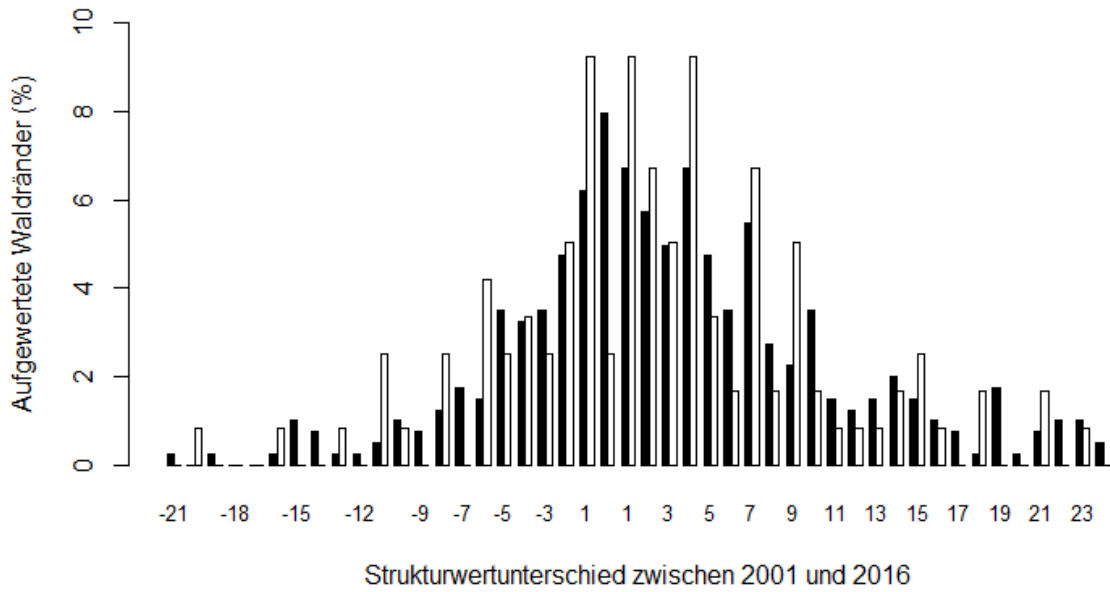


Abbildung 28: Vergleich der Prozentangaben von aufgewerteten Waldrändern mit (weiss) und ohne (schwarz) Folgeeingriffe.

5 Diskussion

5.1 Qualitätsvergleich zwischen den LiDAR Daten und dem photogrammetrischen nDOM

Die LiDAR Daten und das photogrammetrische nDOM weisen unterschiedliche Qualitäten auf. Die Qualitätsunterschiede beruhen vorwiegend auf den verschiedenen Aufnahmemethoden und dem technischen Fortschritt der vergangenen Jahre. Die LiDAR Daten 2014 schliessen aufgrund der untersuchten Qualitätskriterien am besten ab, da die Auflösung den kleinsten Wert besitzt und es sich um Punktwolken handelt. Nun stellt sich die Frage, wie stark sich die Qualitätsunterschiede auf die Resultate der vorliegenden Arbeit auswirken.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen LiDAR Daten und photogrammetrischen Daten besteht darin, dass bei LiDAR Daten mehrere Echos pro Laserpuls zurückgesendet werden und bei der Photogrammetrie nur der höchste Punkt aufgenommen wird (vgl. Kapitel 2.4.1 und 2.4.2). Mit photogrammetrischen Daten können Strukturen unterhalb des Baumkronendaches nicht festgehalten werden. Laut Morsdorf (2011) kann ein photogrammetrisches nDOM komplexe Oberflächenstrukturen nicht präzise wiedergeben, da Schattenwurf und Textur die Genauigkeit der aufgenommenen Daten reduzieren. Die Ungenauigkeit der Textur ist in der Abbildung 11 zu erkennen. Die Vegetation des nDOMs aus dem Jahr 2016 wirkt abgerundeter und «verschmierter». Ausserdem sind kleine Lücken zwischen den Baumkronen nicht erkennbar.

Ein weiteres Qualitätsmerkmal der Datensätze ist die Auflösung. Nach Morsdorf (2011) wird eine Auflösung (Punktedichte) von mehr als fünf Punkten pro Quadratmeter benötigt, um die Geometrie von Einzelbäumen ableiten zu können.

Die LiDAR Daten 2014 und das photogrammetrische nDOM 2016 haben eine ähnliche Auflösung und mit 15.5 resp. 16 Punkten pro m² sind sie deutlich grösser als die nach Morsdorf (2011) minimal nötigen fünf Punkte pro m². Die Auflösung der LiDAR Daten 2001 liegt unter fünf Punkten pro m², weshalb Einzelbäume gemäss Morsdorf (2011) nicht präzise wiedergegeben werden können.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die LiDAR Daten 2001, die LiDAR Daten 2014 und das photogrammetrische nDOM 2016 zu unterschiedlichen Vegetationszeiten aufgenommen wurden. So fällt die Vegetation im Sommer höher und dichter aus als im Winter und im Frühling. Heurich (2005) erkannte im Sommer Probleme bei der Aufnahme der Bodenoberfläche, da die Laserstrahlen das Kronendach von Buchen kaum durchdringen konnten.

Die LiDAR Daten sowie das photogrammetrische nDOM können nur unter Vorbehalt miteinander verglichen werden, da Qualitätsunterschiede vorhanden sind.

Mit dem Ausführen des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) wurden die Datensätze bereits verändert und angepasst (vgl. Kapitel 3.4). Die Auflösung wurde auf 2 mal 2 Meter festgelegt. Jedes Pixel erhielt den Wert des höchsten darin gelegenen Punktes. Somit entstand aus jedem Datensatz ein generalisiertes Oberflächenmodell, was den Unterschied zwischen den photogrammetrischen und den LiDAR Daten wesentlich verringerte. Anpassungen bezüglich der unterschiedlichen Vegetationsstadien konnten nicht vorgenommen werden.

Aufgrund der Anpassungen innerhalb des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) konnten wesentliche Qualitätsunterschiede angeglichen werden. Somit sind die Datensätze im Rahmen der vorliegenden Arbeit vergleichbar.

5.2 Veränderung der Strukturwerte zwischen den unterschiedlichen Aufnahmejahren

Innerhalb der untersuchten Zeiträume haben sich die Strukturwerte signifikant verändert. Die Nullhypothese «Die Strukturwerte haben sich in den Jahren nicht signifikant verändert» konnte verworfen werden. Die Entwicklung der Strukturwerte fiel mehrheitlich positiv aus, d.h. die Waldrandaufwertungen haben vermutlich mehrheitlich zu einer Verbesserung der ökologischen Qualität der Waldränder geführt. Der Kanton Aargau hat nur Waldränder aufgewertet, welche ein hohes Aufwertungspotenzial besaßen (BVU, 2009). Deshalb wurden in der vorliegenden Arbeit lediglich Waldränder mit einem hohen Aufwertungspotenzial betrachtet.

Spörri et al. (2014) führten bereits im Jahr 2014 eine Erfolgskontrolle von 20 aufgewerteten Waldrändern in Kanton Aargau durch. Das Resultat fiel ebenfalls positiv aus. 12 Waldränder wurden als ökologisch wertvoll oder sehr wertvoll und kein einziger als schlecht oder nicht vorhanden beurteilt.

In der vorliegenden Arbeit wies der Strukturwertunterschied Null (keine Veränderung) zwischen den Jahren 2014 und 2016 verglichen mit dem Strukturwertunterschied Null zwischen den Jahren 2001 und 2014 sowie den Jahren 2001 und 2016 die grösste Anzahl Waldränder auf. Dies kann damit begründet werden, dass in diesem Zeitabschnitt keine Aufwertungen durchgeführt wurden und Waldränder sich innerhalb von zwei Jahren nur geringfügig entwickeln können.

Bei allen drei untersuchten Zeiträumen – 2001 bis 2014, 2001 bis 2016 und 2014 bis 2016 – wurden extreme Strukturwertunterschiede vorgefunden.

Der **Waldrand mit der IDD 331** entwickelte sich stark negativ (Tabelle 6). In der Abbildung 16 ist zwischen den Jahren 2001 und 2014 ein Wachstum des Waldes und aus diesem Grund eine stark negative Veränderung des Waldrandes zu erkennen. Gemäss Ginzler & Kienast (2015) haben sich die Wälder in der Schweiz bis ins Jahr 2009 stark ausgebreitet. Aufgrund dessen wuchsen Waldflächen zusammen und ökologisch wertvolle Waldränder verschwanden. Zwischen den Jahren 2014 und 2016 hat sich der Wald nicht weiter ausgebreitet und die Strukturvielfalt des Waldrandes verbesserte sich um 2 Punkte. Die Zunahme der Strukturwerte zwischen den Jahren 2014 und 2016 könnte aufgrund der Aufwertung im Jahr 2009 erfolgt sein.

Der **Waldrand mit der IDD 80** erreichte im Jahr 2016 einen Strukturwert, welcher um 23 Punkten höher war als im Jahr 2014. In der Abbildung 17 ist zu erkennen, dass bei der Auswertung des photogrammetrischen nDOMs 2016 das angrenzende Kulturland als Strauchgürtelanteil miteinbezogen wurde. Im gleichen Zeitraum verdoppelte sich der Waldrandanteil und der Verzahnungsgrad blieb gleich. Die extreme Veränderung des Waldrandes basiert vor allem auf einer nicht korrekten Auswertung anhand des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017).

Extreme Strukturwertunterschiede können wie beim Waldrand mit der IDD 331 aufgrund von Veränderungen des Umlandes oder wie beim Waldrand mit der IDD 80 aufgrund von Fehlern in der Auswertung entstehen. Zusätzlich können extreme Strukturwertunterschiede auch nach einer Erstaufwertung oder einem Folgeeingriff eintreten, da bei Aufwertungen grosse Eingriffe in die Waldstrukturen vorgenommen werden. Gemäss BVU (2009) muss der Deckungsgrad nach einer Erstaufwertung kleiner oder gleich 30% der gesamten aufgewerteten Fläche sein. Ebenfalls können Buchten mit einer minimalen Tiefe von 15 Metern, einer minimalen Breite von 20 Metern und einem Restdeckungsgrad von 0% angelegt werden. Die Flächenanteile der Waldrandstrukturen werden somit stark reduziert und der Waldrand erhält aufgrund der Berechnungen anhand des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) geringe Strukturwerte.

Die unterschiedlichen Entwicklungen der Waldränder können damit begründet werden, dass diese in unterschiedlichen Jahren aufgewertet und bei einigen von ihnen bereits Folgeeingriffe durchgeführt wurden. Gemäss BVU (2012) entwickeln sich Waldränder nach einem Eingriff individuell. Um die Ausreisser genauer begründen zu können, müssten zusätzlich die Standorte der Waldränder betreffende Informationen miteinbezogen werden. Laut Babbi et al. (2016) beeinflussen die Wüchsigkeit und die Exposition die Entwicklung von aufgewerteten Waldrändern. Waldränder an südexponierten Standorten auf mageren Böden erreichten signifikant bessere ökologische Werte. Die Untersuchungen von Hondong et al. (1993) unterstützen die Aussage, dass an südexponierten Stellen Waldränder eine bessere ökologische Qualität erreichen können. Im Priorisierungsmodell für Waldränder hinsichtlich

ihres ökologischen Potenzials von Babbi et al. (2017) wurden Waldränder unter anderem aufgrund der Intensität der Sonneneinstrahlung ausgewählt.

Wie bereits erwähnt wurden in der vorliegenden Arbeit nur Waldränder mit hohem ökologischen Potenzial miteinbezogen, da der Kanton Aargau für die Auswahl der aufzuwertenden Waldränder eine Priorisierung der Waldränder anhand der Kriterien des Waldrandgesetzes durchgeführt hat (BVU, 2009) (vgl. Kapitel 2.2.1). Dies schliesst aber nicht aus, dass diese Waldränder unterschiedliche Expositionen und Wüchsigkeiten vorweisen.

5.3 Ökologische Qualität der im Feld aufgenommenen Waldränder

Die untersuchten Waldränder schnitten in der Bewertung gut ab. Lediglich ein Waldrand wurde mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) als ökologisch ungenügend bewertet. Die durchschnittliche Gesamtpunktzahl von 47.52 wird als ökologisch befriedigend eingestuft, liegt jedoch nahe bei ökologisch wertvoll. Die hohen Gesamtpunktzahlen deuten auf gelungene Aufwertungen und Folgeeingriffe hin.

Verglichen mit dem Ökotonwert des LFI4 der Waldränder im Mittelland wurden mehr Waldränder in einem ökologisch guten und weniger in einem ökologisch schlechten Zustand vorgefunden (Abegg et al., 2014). Gemäss LFI4 wurde der ökologische Zustand von 11.2% der Waldränder als gering, 49.3% als mittel und 39.5% als hoch eingestuft (Abegg et al., 2014). In der vorliegenden Arbeit wurden 4% der untersuchten Waldränder als nicht vorhanden bis ungenügend (gering), 48% als befriedigend (mittel) und 48% als wertvoll bis sehr wertvoll (hoch) eingestuft. Die beiden Bewertungen können aber nur mit Vorbehalt verglichen werden, da es sich um verschiedene Bewertungsmethoden handelt und eine unterschiedliche Anzahl an Waldrändern untersucht wurde.

Der Waldrand, welcher als ökologisch ungenügend bewertet wurde, besass eine sehr geringe Belaubungsdichte von 30%. Die restlichen Waldrandstrukturen waren ebenfalls gering ausgeprägt. Im Jahr 2001 besass dieser Waldrand gemäss den berechneten Strukturwerten einen Wert von 6. Nach der im Jahr 2009 erfolgten Aufwertung erreichte er einen Strukturwert von 14 und verschlechterte sich bis ins Jahr 2016 auf einen Strukturwert von 8. Die ungenügende Bewertung des Waldrandes kann unter anderem damit begründet werden, dass die Aufwertung lange zurückliegt und noch kein Folgeeingriff durchgeführt wurde.

Werden alle in der vorliegenden Arbeit bewerteten Waldränder betrachtet, ist auffallend, dass fast alle ausser zwei Waldränder die Höchstpunktzahl bei den Kleinstrukturen und toten Bäumen erhielten. Negativ auf die Gesamtpunktzahl wirkte sich die Längenausdehnung von Problemarten und invasive Neophyten, welche im Durchschnitt eine Ausbreitung von 42.08% erreichte, aus.

Verglichen mit der Felduntersuchung im Kanton Aargau von Spörri (2014) lagen die in der vorliegenden Arbeit bewerteten Waldränder in einem ökologisch ähnlichen Zustand, wobei sie sich lediglich um 0.62 Punkte unterschieden (Tabelle 8). Alle Waldrandstrukturen ausser die Krautsaumtiefe erhielten ähnliche Werte. Die Abweichung bei der Krautsaumtiefe könnte auf die unterschiedliche Interpretation des Begriffes Krautsaumtiefe zurückgeführt werden.

Bei der Felduntersuchung im Kanton Aargau von Blattner & Widmer (2015) resultierten im Durchschnitt höhere Werte als in der vorliegenden Arbeit (Tabelle 8). Die durchschnittliche Gesamtpunktzahl liegt bei ökologisch wertvoll. Lediglich bei der Krautsaumlänge wurde ein tieferer Wert gemessen.

Die Untersuchungen von Spörri (2014) und Blattner & Widmer (2015) erfolgten mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (2013). Da dieser nur geringfügig vom Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) abweicht, sind die Resultate vergleichbar.

Tabelle 8: Vergleich der Felduntersuchungen der vorliegenden Arbeit mit den Untersuchungen nach Spörri (2014) und Blattner & Widmer (2015). Es handelt sich um durchschnittliche Werte der jeweiligen Feldaufnahmen.

Bewertungskriterien	Aufnahme 2017	Aufnahme 2014 (Spörri, 2014)	Aufnahme 2015 (Blattner & Widmer, 2015)
Waldrandtiefe (m)	12.4	10.7	17.5
Strauchgürteltiefe (m)	5.9	4.8	9.7
Krautsaumtiefe (m)	4.0	10.8	5.5
Strauchgürtellänge (%)	82.4	69.5	83.6
Krautsaumlänge (%)	91.2	94.3	85.6
Belaubungsdichte (%)	71.6	72.5	92.3
Gesamtpunktzahl	47.5	46.9	51.0

5.4 Vergleich der LiDAR Daten und des photogrammetrischen nDOMs mit den Feldaufnahmen

Alle Korrelationen fielen schwach aus (Abbildungen 22, 23, 24, 25). Die tiefen Werte des Korrelationskoeffizienten können von den Unterschieden zwischen den angewendeten Bewertungsmethoden stammen.

Ein allgemeiner Unterschied zwischen den Feldaufnahmen mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (Krüsi 2013, Krüsi 2015) und der Bewertung anhand des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) besteht darin, dass im Feld die Höhe jeder Pflanze miteinbezogen und mit dem Python Skript pro Pixel lediglich die Höhe des höchsten Objektes betrachtet wurde. Zusätzlich wurden anhand des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) Vegetationslücken bis zu einem Durchmesser von 16 Metern aufgefüllt (vgl. Kapitel 3.4). Die Strukturvielfalt konnte demnach mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (Krüsi 2013, Krüsi 2015) präziser erfasst werden.

Die Korrelation basierend auf den Waldrandanteilen erreichte in beiden Vergleichen (2014 und 2016) im Gegensatz zu den Korrelationen basierend auf den übrigen Strukturwerten den höchsten Wert.

Abweichungen in der Korrelation basierend auf dem Waldrandanteil können damit begründet werden, dass der Waldrandanteil im Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) nicht gleich wie im Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) definiert wurde. Im Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) zählen alle Gehölze ab 1 Meter bis zu den ersten Bäumen mit einem BHD grösser als 16 cm zum Waldrand und im Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) besteht der Waldrandanteil aus den Gehölzen mit einer Höhe von 0.5 bis 16 Metern.

Abweichungen in der Korrelation basierend auf dem Strauchgürtelanteil können damit begründet werden, dass der Strauchgürtel im Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) als Vegetation mit einer Höhe von 0.5 bis 4 Metern und im Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) als Vegetation mit einer Höhe von 1 bis 4 Metern definiert wurde. Demnach resultierten mit dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) grössere Strauchgürtelflächen.

Mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) wird für die Breite des Strauchgürtels bis zum innersten Blatt des letzten Gehölzes gemessen. Wie bereits erwähnt, beschreibt das photogrammetrische nDOM 2016 lediglich die höchsten Vegetationspunkte. Ineinandergreifende Strukturen können daher nicht erkannt werden.

Zur Berechnung der Strauchgürtelfläche des photogrammetrischen nDOMs 2016 wurden demzufolge nur Gehölze von 1 bis 4 Metern, welche nicht von höherer Vegetation überwachsen sind, miteinbezogen.

Beim Verzahnungsgrad wurde die schwächste Korrelation festgestellt.

Die Definition des Verzahnungsgrades nach dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) weicht leicht von der Definition nach dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) ab. Im Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) beschreibt der Verzahnungsgrad das Verhältnis der Länge der Linie entlang der äusseren Grenze des Strauchgürtels zur Länge der Beurteilungslinie. Im Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) wird, wenn die äussere Grenze des Wirtschaftswaldes länger ist als die äussere Grenze des Strauchgürtels, das Verhältnis der äusseren Grenze des Wirtschaftswaldes zur Länge der Beurteilungslinie berechnet.

Bei der Erhebung von Felddaten kann es vorkommen, dass der Wert des Verzahnungsgrades sehr ungenau ausfällt, da die Länge der äusseren Grenze des Strauchgürtels oder des Wirtschaftswaldes im Feld nicht gemessen, sondern lediglich geschätzt wird. Die Schätzung basiert auf subjektivem Empfinden.

Beim Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) traten in den Berechnungen des Verzahnungsgrades Fehler auf. Innerhalb der untersuchten Fläche wurden die Ränder von sämtlichen Objekten, welche sich in unmittelbarer Nähe des untersuchten Waldrands befanden, miteinbezogen (Abbildung 29). Dies erklärt, weshalb der Verzahnungsgrad in den Resultaten sehr hohe Werte (bis 14 Punkte) erreichte. Waren innerhalb der untersuchten Flächen keine zusätzlichen Objekte vorhanden, wurde im Vergleich zu den Feldaufnahmen einen genaueren Verzahnungsgrad berechnet (Abbildung 30).

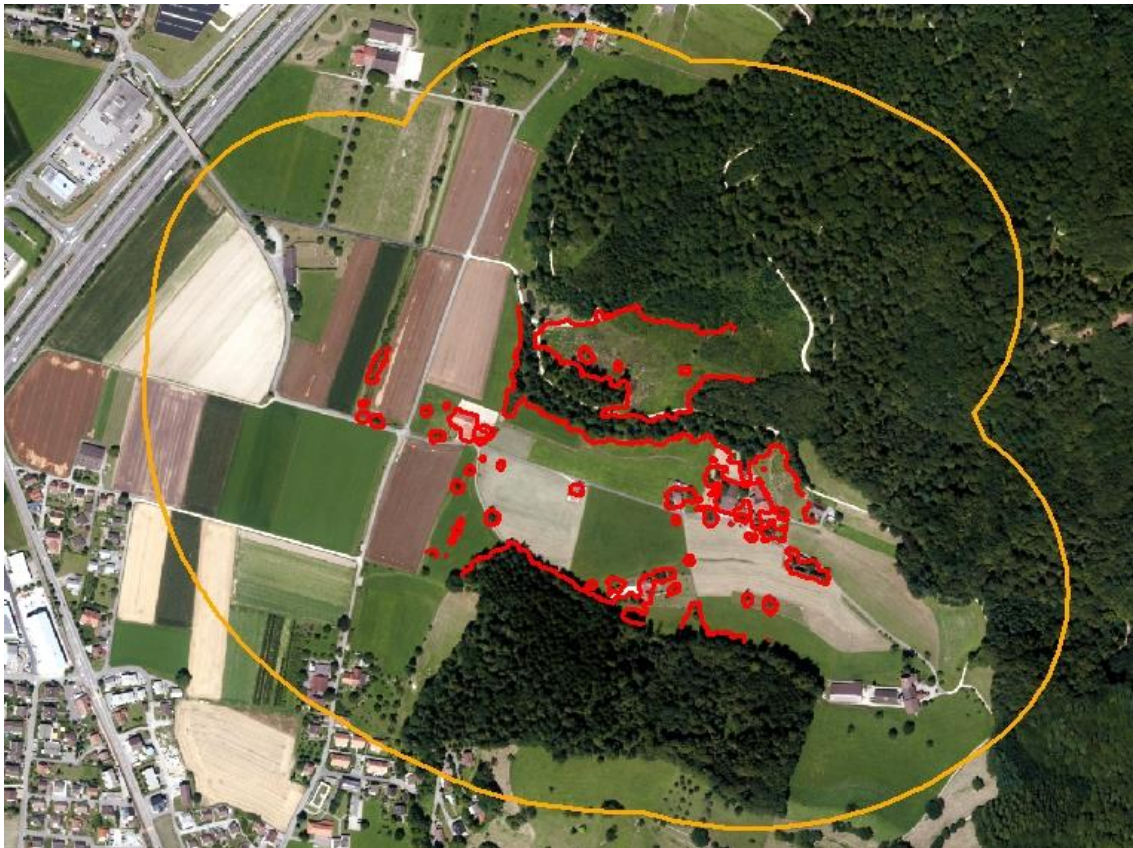


Abbildung 29: Waldrand IDD 540 mit rot eingezeichneten Linien, welche in die Berechnung des Verzahnungsgrades miteinbezogen wurden und deswegen zu Fehlern führten (Orange = untersuchter Waldrandbereich) (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118)).



Abbildung 30: Waldrand IDD 27 mit rot eingezeichneter Waldrandlinie, welche in die Berechnung des Verzahnungsgrades miteinbezogen wurde. Der Verzahnungsgrad wurde korrekt berechnet (Orange = untersuchter Waldrandbereich) (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118)).

Der Korrelationskoeffizient wurde für die Summe der Waldrandstrukturen ohne Einbezug des Verzahnungsgrades nochmals ausgerechnet. Die Korrelation zwischen der Summe der Waldrandstrukturwerte aus den LiDAR Daten 2014 und aus den Feldaufnahmen des Jahres 2014 erhielt den Wert $R^2 = 0.059$ und die Korrelation zwischen der Summe der Waldrandstrukturwerte aus dem photogrammetrischen nDOM 2016 und aus den Feldaufnahmen des Jahres 2017 erhielt den Wert $R^2 = 0.035$.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Resultaten der LiDAR Daten 2014 und der Feldaufnahmen aus dem Jahr 2014 verglichen mit den Korrelationskoeffizienten zwischen den Resultaten des photogrammetrischen nDOMs 2016 und der Feldaufnahmen aus dem Jahr 2017 fielen höher aus. Die Gründe dafür liegen möglicherweise bei den im Kapitel 4.1 aufgezeigten Qualitätsunterschieden zwischen LiDAR Daten und photogrammetrischen Daten, bei Fehlern in den Auswertungen und bei qualitativ unterschiedlichen Feldaufnahmen. In der Arbeit von Bühler & Zurschmiede (2017) wurden ebenfalls LiDAR Daten mit Feldaufnahmen verglichen. Die Ergebnisse waren ernüchternd. Lediglich bei 2 von 6 untersuchten Merkmalen konnten qualitativ ähnliche Ergebnisse zwischen den LiDAR Daten und den Feldaufnahmen gemessen werden.

5.5 Veränderung der Strukturwerte hinsichtlich Erstaufwertung und Folgeeingriff

Die Entwicklung von Waldrändern, bei denen nur Erstaufwertungen durchgeführt wurden, fiel mehrheitlich positiv aus. Die Ausreisser können gleich wie in Kapitel 5.2 begründet werden. Sie entstanden möglicherweise durch starke Eingriffe in die Struktur des Waldrandes infolge von Erstaufwertungen (BVU, 2009), durch Unterschiede in der Exposition und Wüchsigkeit der Waldstandorte (Babbi et al., 2016) und aufgrund unterschiedlicher Reaktionen auf die erfolgten Erstaufwertungen und Folgeeingriffe (BVU, 2012).

Zwischen der Entwicklung der Strukturen von Waldändern mit und ohne Folgeeingriff konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Die Nullhypothese «Zwischen den Waldrändern mit und ohne Folgeeingriffe sind keine signifikanten Veränderungen hinsichtlich deren Strukturwerte ersichtlich» konnte nicht verworfen werden. Es lagen zwar prozentual mehr Waldränder im positiven, jedoch auch mehr Waldränder im negativen Bereich. Beim Strukturwertunterschied von Null waren prozentual weniger Waldränder vorhanden.

Bei einem Folgeeingriff wird im Gegensatz zu einer Erstaufwertung weniger in die Struktur eines Waldrandes eingegriffen, da eine Reduktion des Deckungsgrades auf maximal 30% nicht vorgeschrieben ist. Bei einem Folgeeingriff werden lediglich schnellwachsende Baumarten entfernt sowie Sträucher und seltene Baumarten gefördert. Falls nötig werden unter anderem Kleinstrukturen angelegt oder Massnahmen gegen Problemarten durchgeführt

(BVU, 2009). Ebenfalls ist zu beachten, dass die Erstaufwertungen und Folgeeingriffe in unterschiedlichen Jahren durchgeführt wurden. Die Folgeeingriffe erfolgten zwischen den Jahren 2006 und 2016 und die Erstaufwertungen zwischen den Jahren 2001 und 2014.

Für eine genauere Überprüfung der Erstaufwertungen und der Folgeeingriffe müssten die Strukturwerte der Waldränder innerhalb kurzer Zeit vor und nach dem Eingriff verglichen werden. Diese Daten sind leider nicht vorhanden. Da bei einem Folgeeingriff weniger in die Struktur eines Waldrandes eingegriffen wird, wäre es sinnvoll, weitere Parameter wie die Artenvielfalt oder Anzahl Problemarten miteinzubeziehen.

5.6 Schlussfolgerung

Die LiDAR Daten 2001 und die LiDAR Daten 2014 sowie das photogrammetrische nDOM 2016 wiesen unterschiedliche Qualitäten auf. Aufgrund der Anpassungen mit dem Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) können die Datensätze in der vorliegenden Arbeit verglichen werden.

Die Strukturwerte der aufgewerteten Waldränder zwischen den Jahren 2001 und 2014, 2014 und 2016 sowie 2001 und 2016 haben sich mehrheitlich positiv entwickelt. Extreme Strukturwertunterschiede basieren auf Veränderungen im Umland der Waldränder und auf Ungenauigkeiten im Bewertungsschlüssel nach Wang (2017).

Die geringen Korrelationen zwischen den berechneten Strukturwerten und den Feldaufnahmen sind auf Ungenauigkeiten im Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) sowie auf Unterschiede zwischen den verwendeten Waldrandbewertungsmethoden zurückzuführen. Der Korrelationskoeffizient des Waldrandanteils fiel am höchsten und der Korrelationskoeffizient des Verzahnungsgrades am niedrigsten aus.

Beim Vergleich der Waldränder mit und ohne Folgeeingriff war kein signifikanter Unterschied ersichtlich. Dies kann damit begründet werden, dass bei einem Folgeeingriff im Vergleich zu einer Erstaufwertung weniger stark in die Waldrandstrukturen eingegriffen wird.

6 Ausblick

In einem weiteren Schritt wäre es sinnvoll, den Bewertungsschlüssel nach Wang (2017) zu überarbeiten. Unter anderem sollte der Verzahnungsgrad angepasst werden und für einen besseren Vergleich mit den Feldaufnahmen sollte die Vegetation des Strauchgürtelanteils wie im Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015) bei einem Meter anstatt bei 0.5 Metern beginnen.

Da sich Waldränder unterschiedlich entwickeln, ist es umso wichtiger, die Veränderungen der Waldrandstrukturwerte laufend zu beobachten und zu dokumentieren. Sofern die finanziellen Mittel vorhanden sind, wäre es hilfreich, jährlich Daten der Waldrandentwicklung zu generieren, um die Entwicklung der Waldränder nach Erst- und Folgeeingriffen vertiefter analysieren zu können. So könnte früh erkannt werden, bei welchen Waldrändern der Strukturwert abnimmt und ein Folgeeingriff notwendig wäre. Das Potenzial dazu ist im Kanton Aargau mit einer alle zwei Jahre im belaubten Zustand durchgeführten Stereo-Luftbildbefliegung und der Erstellung eines photogrammetrischen nDOMs gegeben.

Anhand einer Weiterentwicklung des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017) und jährlichen Datenerhebungen wäre es möglich, ein Tool für Kantone zu erarbeiten, welches Waldränder anzeigt, die einen Folgeeingriff benötigen.

7 Literaturverzeichnis

- Abegg, M., Brändli, U.-B., Cioldi, F., Fischer, C., Herold-Bonardi, A., Huber M., Keller, M., Meile, R., Rösler, E., Speich, S., Traub, B., & Vidondo, B. (2014):
Viertes Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnistabellen und Karten im Internet zum LFI 2009-2013 (LFI4b). Abgerufen am 14.06.2017 von <http://www.lfi.ch/resultate/>
- AGIS (2017). *Datendokumentation. Normalisiertes DOM 0.25-Meter Raster (photogrammetrisch)*. Aarau: Aargauisches Geografisches Informationssystem (AGIS).
- Albertz, J. (2009). *Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern* (4. Auflage). Darmstadt: WGB (Wissenschaftliche Buchgesellschaft).
- Babbi, M., Widmer, S., Blattner, M., & Krüsi, B. O. (2016). Waldrandaufwertungen: Einfluss von Exposition und Wüchsigkeit des Standorts. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 167 (5), S. 286-293.
- Babbi, M., Hediger, M., & Geilhausen, M. (2017). *GIS-basierte Priorisierung der Waldränder im Kanton St.Gallen hinsichtlich ihres ökologischen Potentials*. Wädenswil: Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW.
- BFS (2017). *Regionalporträts 2017: Kantone*. Neuchâtel: Bundesamt für Statistik BFS.
- Blattner, M., & Widmer, S. (2015). Einfluss von Wüchsigkeit und Exposition eines Standorts auf den Erfolg von ökologischen Waldrandaufwertungen. *Semesterarbeit ZHAW*, unveröffentlicht.
- Brändli, U.-B. (2010). *Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006*. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL. Bern: Bundesamt für Umwelt, BAFU.
- Bundesgesetz über den Wald (Waldgesetz, WaG). (4. Oktober 1991). SR 921.0 (Stand am 1. Januar 2017).
- Bühler, C., & Zurschmiede, G. (2017). Pflege von Waldrändern – Erfolgskontrolle mit Laserscanning (LIDAR). *Zürcher Wald*, (2), S. 29-32.
- BVU (2007). *Bericht zur Entwicklung des Waldes im Aargau. Waldentwicklung AARGAU*. Aarau: Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau.

- BVU (2009). *Waldrandregeln 2009*. Aarau: Departement Bau, Verkehr und Umwelt Kanton Aargau.
- BVU (2012). *Naturschutzprogramm Wald. Zwischenbericht 2013. Ziele und Handlungsbedarf vierte Etappe (2014 – 2019)*. Aarau: Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau.
- BVU (2013). *Naturschutzprogramm Wald in Kürze*. Aarau: Departement Bau, Verkehr und Umwelt (BVU) Kanton Aargau.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5. Auflage). New York: The Guilford Press.
- Costa, R. (2001). *Waldrand. Lebensraum voller Überraschungen*. Faktenblatt 1 (1. Ausgabe). Chur: Amt für Wald Graubünden.
- Dürrenmatt, R., Eisenhut, A., & Beer, W. (2009). Erfassung des ökologischen Potenzials der Waldränder im Kanton Bern. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 160 (9), S. 275-281.
- Esri (2011). *Lidar Analysis in ArcGIS 10 for Forestry Applications*. Redlands: CA Environmental Systems Research Institute.
- Esri (2016). *ArcMap Release 10.4.1*. Redlands: CA Environmental Systems Research Institute.
- Ginzler, C., & Kienast, F. (2015). Wald in der Landschaft. In: A. Rigling, & H. P. Schaffner, *Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- Hepenstrick, D., & Krüsi, B. O. (2013). *GIS-basierte Priorisierung von Waldrandaufwertungen mit ökologischen und ökonomischen Kriterien*. Wädenswil: Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW.
- Heurich, M. (2005). Erfassung vertikaler Waldstrukturen mit flugzeuggetragenen Laserscanner. *AFZ-DerWald*, S. 2-4.
- Hondong, H., Langner, S., & Coch, T. (1993). *Untersuchungen zum Naturschutz an Waldrändern*. Schaan: Bristol-Stiftung Ruth und Herbert Uhl-Forschungsstelle für Natur- und Umweltschutz.
- Hyypä, J., Pyysalo, U., Hyypä, H., & Samberg, A. (2000). Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. *EARSeL e Proceedings*, (1), S. 139-147.

- Imesch, N., Stadler, B., Schneider, M. (2015). *Biodiversität im Wald: Ziele und Massnahmen. Vollzugshilfe zur Erhaltung und Förderung der biologischen Vielfalt im Schweizer Wald* (Nr. 1503). Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Kappas, M. (2012). *Geographische Informationssysteme*. Braunschweig: westermann druck GmbH.
- Krüsi, B. O., Schütz, M., & Tidow, S. (1997) Ökologischer Zustand botanischer Vielfalt und Aufwertungspotential. *Schweizer Wald*, 97(4), S. 5-26.
- Krüsi, B. O. (2013). *Waldrandschlüssel*. Wädenswil: Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW, Forschungsgruppe Vegetationsanalyse.
- Krüsi, B. O. (2015). *Waldrandschlüssel*. Wädenswil: Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW, Forschungsgruppe Vegetationsanalyse.
- Krüsi, B.O., Arquint, D., Babbi, M., Widmer, S. & Wildhaber, T. (2017). *Praxishilfe für die Aufwertung von Waldrändern in der Schweiz. – Von der Priorisierung bis zur Wirkungskontrolle* (2. Auflage). Wädenswil: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Forschungsgruppe Vegetationsanalyse.
- Koch, B., Walentowski, H., Dees, M., & Seitz, R. (2010). Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten von amtlichen Laserscannerdaten für den Wald-Forst-Bereich. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, (9), S. 23-37.
- Koch, B. (2011). Stand und Perspektiven der Nutzung neuer Fernerkundungstechnologien im Waldbereich. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 162 (6), S. 156-163.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., & Harding, D. J. (2002). Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience*, 52 (1), S. 19-30.
- Milan Geoservice GmbH (2014). Projektdokumentation. Spremberg: Milan Geoservice GmbH.
- Morsdorf, M. (2011). Erfassung struktureller Waldparameter mithilfe von flugzeuggetragendem Laserscanning. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 162 (6), S. 164-170.
- Navratil, G., Wieser, M., & Mayr, C. (2011). Qualitätsprüfung für Geländemodelle aus ALS-Daten. In: J. Strobl, T. Blaschke, G. Griesebner. (Hrsg.), *Angewandte Geoinformatik 2011. Beiträge zum 23. AGIT-Symposium Salzburg*. Berlin: Wichmann.
- Ott, M., & Helbling, L. (2013). Waldränder ökologisch aufwerten: Leitfaden für die Praxis. *Beiträge zum Naturschutz in der Schweiz*, (33), S. 3-43.

- R Core Team. (2015). *R Version 3.2.3. A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Abgerufen am 10. Dezember 2015 von www.r-project.org
- Rey, J. (2008). *Schaffung und Pflege von stufigen Waldrändern*. Kanton Freiburg: Amt für Wald, Wild und Fischerei (AWWF).
- Schrade, B. (2012). *Faktenblatt LFI4: Viertes Schweizerisches Landesfortinventar LFI4 (2009-2011) – Zwischenergebnisse*. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern: Bundesamt für Umwelt, BAFU.
- Spörri, K. (2014). 20 Jahre ökologische Aufwertung von Waldrändern im Kanton Aargau: Erfolgskontrolle. *Semesterarbeit ZHAW*, unveröffentlicht.
- Spörri, K., Babbi, M. & Krüsi, B. O. (2014). 20 Jahre ökologische Aufwertung von Waldränder im Kanton Aargau: erste Erfolgskontrolle. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 165 (10), S. 313-320.
- Stocker, R., Burger, T., Elsener, O., Liechti, T., Portmann-Orlowski, K., & Zantop, S. (2002). *Die Waldstandorte des Kantons Aargau*. Wohlen: Kasimir Meyer AG.
- Tidow, S., Schütz, M., & Krüsi, B. O. (1997). Probleme bei Bewertung und Pflege von Waldrändern. *Informationsblatt des Forschungsbereiches Landschaftsökologie*, 33, S. 1-6.
- Vauhkonen, J. Maltamo, M., McRoberts, R. E., & Næsset, E. (2014). Introduction to Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. In: M. Maltamo, E. Næsset., & J. Vauhkonen. (Hrsg.), *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning (Volume 27)*. Dordrecht: Springer.
- Waldgesetz des Kantons Aargau (AWaG). (1. Juli 1997). *SR 921.0* (Stand am 1. August 2013).
- Wang, Z. (2017). Ecotone simple zone. *Python Skript WSL*. unveröffentlicht.
- Wehrli, I. (2015). Erfassung der Struktur und ökologische Bewertung von Waldrändern mit LiDAR- und anderen räumlichen Daten. Entwicklung eines Schlüssels zur ökologischen Waldrandbewertung mit Geodaten für den Kanton Aargau. *Masterarbeit ETH*, unveröffentlicht.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Optimaler Waldrand gemäss den Definitionen aus dem Bewertungsschlüssel nach Krüsi (2015).....	3
Abbildung 2: Waldrandbewertung nach dem Ökotonwert des LFI für die montanen und kollinen/submontanen Stufen (Brändli, 2010).....	6
Abbildung 3: Ökologisches Potenzial der Waldränder in Kilometern pro Region der Schweiz (Rot = erste Priorität, blau = zweite Priorität) (Imesch et al., 2015).....	6
Abbildung 4: Bildliche Darstellung der Aufnahme von LiDAR Daten (Hyypä et al., 2000).....	12
Abbildung 5: Punktwolke der LiDAR Daten 2014.....	12
Abbildung 6: Ausschnitt aus den LiDAR Daten 2014 (Je heller die Rasterzelle, desto höher ist die Vegetation. Je dunkler die Rasterzelle, desto weniger hoch ist die Vegetation).....	13
Abbildung 7: Einteilung des Kantons Aargau in die Landschaftstypen Jura und Molasse-Hügelland (Stocker et al., 2002).....	15
Abbildung 8: Entwicklung der Siedlungsgebiete und Waldflächen im Raum Aarau zwischen den Jahren 1840 und 2007 (BVU, 2007).....	16
Abbildung 9: nDOM der LiDAR Daten 2001 eines Waldausschnittes bei Teufenthal (AG).....	26
Abbildung 10: nDOM der LiDAR Daten 2014 eines Waldausschnittes bei Teufenthal (AG).....	26
Abbildung 11: nDOM der photogrammetrisch gewonnenen Daten 2016 eines Waldausschnittes bei Teufenthal (AG).....	26
Abbildung 12: Veränderung der Strukturwerte von aufgewerteten Waldrändern zwischen den Jahren 2001 und 2016 (Schwarz = negative Veränderung, grau = keine Veränderung, weiss = positive Veränderung).....	27
Abbildung 13: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2014.....	28
Abbildung 14: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2014 und 2016.....	28
Abbildung 15: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2016.....	29
Abbildung 16: Darstellung der Waldrandstrukturen des Waldrandes mit der IDD 331 in den Jahren 2001 (links oben), 2014 (rechts oben) und 2016 (links unten), eingezeichnet auf dem Orthophoto des Jahres 2014 (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118)), (Dunkelgrün = Wirtschaftswald, hellgrün = Waldrand, gelb = Strauchgürtel, rot = Eingrenzung des bewerteten Waldrandes) (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118)).	31
Abbildung 17: Darstellung der Waldrandstrukturen des Waldrandes mit der IDD 80 in den Jahren 2001 (links oben), 2014 (rechts oben) und 2016 (links unten), eingezeichnet auf dem Orthophoto des Jahres 2014 (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118)),	

(Dunkelgrün = Wirtschaftswald, hellgrün = Waldrand, gelb = Strauchgürtel, rot = Eingrenzung des bewerteten Waldrandes).....	32
Abbildung 18: Waldrand IDD 232, aufgenommen am 13.07.2017.	33
Abbildung 19: Waldrand IDD 299, aufgenommen am 21.07.2017	33
Abbildung 20: Waldrand IDD 527, aufgenommen am 14.07.2017	34
Abbildung 21: Waldrand IDD 98, aufgenommen am 15.07.2017.	34
Abbildung 22: Korrelation des Waldrandanteils zwischen den Feldaufnahmen 2014 (Spörri, 2014 und Blattner & Widmer, 2015) und den LiDAR Daten 2014 ($r^2=0.057$).....	35
Abbildung 23: Korrelation des Strauchgürtelanteils zwischen den Feldaufnahmen 2014 (Spörri, 2014 und Blattner & Widmer, 2015) und den LiDAR Daten 2014 ($R^2=0.027$).....	36
Abbildung 24: Korrelation des Waldrandanteils zwischen den Feldaufnahmen des Jahres 2017 und dem photogrammetrischen nDOM 2016 ($R^2=0.036$).....	37
Abbildung 25: Korrelation des Strauchgürtelanteils pro Waldrand zwischen den Feldaufnahmen des Jahres 2017 und dem photogrammetrischen nDOM 2016 ($R^2=0.014$).	37
Abbildung 26: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2014, bei denen kein Folgeeingriff durchgeführt wurde.....	38
Abbildung 27: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2016, bei denen kein Folgeeingriff durchgeführt wurde.....	39
Abbildung 28: Vergleich der Prozentangaben von aufgewerteten Waldrändern mit (weiss) und ohne (schwarz) Folgeeingriffe.	40
Abbildung 29: Waldrand IDD 540 mit rot eingezeichneten Linien, welche in die Berechnung des Verzahnungsgrades miteinbezogen wurden und deswegen zu Fehlern führten (Orange = untersuchter Waldrandbereich) (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118)).	48
Abbildung 30: Waldrand IDD 27 mit rot eingezeichneter Waldrandlinie, welche in die Berechnung des Verzahnungsgrades miteinbezogen wurde. Der Verzahnungsgrad wurde korrekt berechnet (Orange = untersuchter Waldrandbereich) (Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (JA100118)).....	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufbau des Geodatenschlüssels nach Wehrli (2015).....	10
Tabelle 2: Verwendete Daten mit Informationen zum Typ, Datenherr und Aufnahmedatum.	18
Tabelle 3: Einteilung der Bewertungskriterien in Grob- und Feinstruktur sowie deren Punktevergabe.....	22
Tabelle 4: Punktevergabe der drei Bewertungskriterien.....	22
Tabelle 5: Qualitätsvergleich der LiDAR Daten 2001 und 2014 sowie dem photogrammetrischen nDOM 2016. ALS ist die Abkürzung von Ariborne Laser Scanning und wird im Kapitel 2.4.1 genauer erläutert.	25
Tabelle 6: Attribute und Resultate des Waldrandes mit der IDD 331 mit stark negativer Entwicklung zwischen den Jahren 2001 und 2014 sowie den Jahren 2001 und 2016.	30
Tabelle 7: Attribute und Resultate eines Waldrandes mit der IDD 80 mit stark positiver Entwicklung zwischen den Jahren 2014 und 2016 sowie den Jahren 2001 und 2016.	31
Tabelle 8: Vergleich der Felduntersuchungen der vorliegenden Arbeit mit den Untersuchungen nach Spörri (2014) und Blattner & Widmer (2015). Es handelt sich um durchschnittliche Werte der jeweiligen Feldaufnahmen.....	45

Anhang

Anhang A: Aufgabenstellung

Anhang B: R-Skript

Anhang C: Resultate des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017)

Anhang D: Waldrandbewertungen der Felderhebung 2017 mit dem Waldrandschlüssel nach
Krüsi (2015)

Anhang E: Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015)

<p>Aufgabenstellung</p> <ul style="list-style-type: none">• Ausgangslage• Zielsetzungen• Zusätzliche Auftragsmodalitäten	<p>Ausgangslage</p> <p>Im Kanton Aargau werden seit 1996 Waldränder im Rahmen des Naturschutzprogramms Wald ökologisch aufgewertet. Bis im Jahr 2025 sollten 200 Kilometer Waldränder aufgewertet werden. Jeweils sieben Jahre nach einer Aufwertung wird ein Folgeeingriff durchgeführt. Vom Kanton Aargau sind nicht für alle Folgeeingriffe genügend finanzielle Mittel vorhanden. Deshalb sollen diejenigen Waldränder, welche sich am geringsten zu einem ökologisch wertvollen Waldrand entwickelt haben, ausgeschieden werden.</p> <p>Zielsetzung</p> <p>In der Bachelorarbeit wird anhand von LiDAR Daten der Strukturwert vor und nach der Aufwertung der Waldränder im Kanton Aargau verglichen. Der Strukturwert setzt sich aus den Waldrandelementen Krautsaum, Strauchgürtel und Waldmantel zusammen. Je ausgeprägter diese Waldrandelemente sind, desto höher fällt der Strukturwert aus. Mit dem Vergleich der Strukturwerte können Empfehlungen abgegeben werden, welche Waldränder ausgeschieden werden sollen.</p> <p>Für die Auswertung stehen LiDAR Daten aus den Jahren 2001 und 2014 sowie ein photogrammetrisches nDOM aus dem Jahr 2016 zur Verfügung. Somit können nur Waldränder analysiert werden, die nach dem Jahr 2001 aufgewertet wurden. Bei der Auswertung muss berücksichtigt werden, dass die Waldränder in unterschiedlichen Jahren aufgewertet wurden und sich in verschiedenen Entwicklungsstadien befinden. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die LiDAR Daten und das photogrammetrische nDOM in unterschiedlicher Qualität vorhanden sind.</p> <p>Die Resultate werden im Feld, gemäss dem erarbeiteten Modell, an einigen erfolgreich und nicht erfolgreich aufgewerteten Waldrändern mit dem Schlüssel nach Krüsi überprüft und verglichen.</p>
--	---

	<p>Zusätzliche Auftragsmodalitäten</p> <p>Provisorisches Inhaltsverzeichnis</p> <p>Abstract</p> <p>Zusammenfassung</p> <p>Inhaltsverzeichnis</p> <p>Liste der Abkürzungen</p> <p>1. Einleitung</p> <p>2. Aufwertung und Bewertung von Waldrändern</p> <p>2.1 Ökologische Bedeutung von Waldrändern</p> <p>2.2 Aufwertung von Waldrändern</p> <p>2.2.1 Situation in der Schweiz</p> <p>2.2.2 Naturschutzprogramm Wald Kanton Aargau</p> <p>2.3 Methoden zur Waldrandbewertung</p> <p>2.4 LiDAR</p> <p>3. Material und Methoden</p> <p>3.1 Untersuchungsgebiet</p> <p>3.2 Datengrundlagen</p> <p>3.3 Auswahl der zu untersuchenden Waldränder</p> <p>3.4 Verifizierung des Modells im Feld</p> <p>3.5 Waldrandbewertung im Feld</p> <p>3.6 Datenauswertung</p> <p>4. Ergebnisse</p> <p>4.1 Resultate der Auswertung</p> <p>4.2 Empfehlungen für den Ausschluss von Waldrändern</p> <p>4.3 Vergleich der Auswertung mit LiDAR Daten und im Feld</p> <p>4.4 Methodische Resultate</p> <p>5. Diskussion</p> <p>5.1 Resultate der Auswertung</p> <p>5.2 Empfehlungen für den Ausschluss von Waldrändern</p> <p>5.3 Vergleich der Auswertung mit LiDAR Daten und im Feld</p> <p>5.3 Methodische Resultate</p> <p>6. Literaturverzeichnis</p> <p>Abbildungsverzeichnis</p> <p>Tabellenverzeichnis</p> <p>Anhang</p>

Aufgaben	Kalenderwochen																	
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
LiDAR Datenbear- beitung	■	■	■															
Dokumentation	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
Feldarbeit			■	■	■	■	■	■										
Auswertung Feldarbeit			■	■	■	■	■	■	■	■	■							
Statistische Auswertung								■	■	■	■	■						
Abgabe Roharbeit														▲				
Überarbeitung															■	■	■	■
Definitive Abgabe																		▲

Meilensteine (als ▲ gekennzeichnet)

23.02.17 Abgabe Aufgabenstellung

26.09.17 Abgabe Roharbeit

26.10.17 Definitive Abgabe

Anhang B: R-Skript

Abbildungen**Abbildung 12: Veränderung der Strukturwerte von aufgewerteten Waldrändern zwischen den Jahren 2001 und 2016.**

```

Ver1=c(172,40,290)
Ver2=c(158,76,277)
Total=c(166,35,312)
vera=as.data.frame(cbind(Ver1,Ver2,Total))
str(vera)
barplot(as.matrix(vera),beside=TRUE,col=c("darkred","darkblue","darkgreen"),ylab="Anzahl
aufgewerteter Waldränder",xlab="Veränderung Strukturwerte",ylim=c(0,350),names.arg =
c("2001 bis 2014","2014 bis 2016","2001 bis 2016"),cex.names=0.8)

```

Abbildung 13: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2014.

```

vereins=read.delim("Vereinsvierzehnan.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
barplot(as.matrix(vereins), ylab = "Anzahl aufgewerteter Waldränder",xlab=
"Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2014",names.arg = c("-23","-22","-
21","-20","-19","-18","-17","-16","-15","-14","-13","-12","-11","-10","-9","-8","-7","-6","-5","-4","-
3","-2","-
1","0","1","2","3","4","5","6","7","8","9","10","11","12","13","14","15","16","17","18","19","20","21
","22","23","24","25"),cex.names=0.8,ylim=c(0,60),col="darkgreen")

```

Abbildung 14: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2014 und 2016.

```

vervierzehn=read.delim("vervierzehnsechzehnan.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
barplot(as.matrix(vervierzehn), ylab = "Anzahl aufgewerteter Waldränder",xlab=
"Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2014 und 2016",names.arg = c("-20","-19","-
18","-17","-16","-15","-14","-13","-12","-11","-10","-9","-8","-7","-6","-5","-4","-3","-2","-
1","0","1","2","3","4","5","6","7","8","9","10","11","12","13","14","15","16","17","18","19","20","21
","22","23"),cex.names=0.8,ylim=c(0,100),col="darkgreen")

```

Abbildung 15: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2016.

```
versechzehn=read.delim("vereinssechzehnan.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
barplot(as.matrix(versechzehn), ylab = "Anzahl aufgewerteter Waldränder",xlab=
"Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2016",names.arg = c("-21","-20","-
19","-18","-17","-16","-15","-14","-13","-12","-11","-10","-9","-8","-7","-6","-5","-4","-3","-2","-
1","0","1","2","3","4","5","6","7","8","9","10","11","12","13","14","15","16","17","18","19","20","21
","22","23","24"),cex.names=0.8,ylim=c(0,40),col="darkgreen")
```

Abbildung 26: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2014, bei denen kein Folgeeingriff durchgeführt wurde.

```
erst=read.delim("Erst.csv", sep=";",dec=".")
barplot(as.matrix(erst),names.arg = c("-23","-22","-21","-20","-19","-18","-17","-16","-15","-
14","-13","-12","-11","-10","-9","-8","-7","-6","-5","-4","-3","-2","-
1","0","1","2","3","4","5","6","7","8","9","10","11","12","13","14","15","16","17","18","19","20","21
","22","23","24","25"),cex.names=0.8,col=c("darkgreen"),xlab="Strukturwertunterschied
zwischen 2001 und 2014",ylab="Anzahl aufgewerteter Waldränder",ylim=c(0,40))
```

Abbildung 27: Anzahl aufgewerteter Waldränder pro Strukturwertunterschied zwischen den Jahren 2001 und 2016, bei denen kein Folgeeingriff durchgeführt wurde.

```
erstsechs=read.delim("Erstsechs.csv", sep=";",dec=".")
barplot(as.matrix(erstsechs),names.arg = c("-21","-20","-19","-18","-17","-16","-15","-14","-
13","-12","-11","-10","-9","-8","-7","-6","-5","-4","-3","-2","-
1","0","1","2","3","4","5","6","7","8","9","10","11","12","13","14","15","16","17","18","19","20","21
","22","23","24"),cex.names=0.8,col=c("darkgreen"),xlab="Strukturwertunterschied zwischen
2001 und 2016",ylab="Anzahl aufgewerteter Waldränder",ylim=c(0,40))
```

Abbildung 28: Vergleich der Prozentangaben von aufgewerteten Waldrändern mit und ohne Folgeeingriffe.

```
folge=read.delim("folgebe.csv", sep=";",dec=".",header=FALSE)
barplot(as.matrix(folge), ylab = "Aufgewerteter Waldränder (%)", beside=TRUE,
xlab="Strukturwertunterschied zwischen 2001 und 2016", names.arg = c("-21","-20","-19","-
18","-17","-16","-15","-14","-13","-12","-11","-10","-9","-8","-7","-6","-5","-4","3","2","1","0","1",
"2","3","4","5","6","7","8","9","10","11","12","13","14","15","16","17","18","19","20","21","22",
"23","24"),cex.names=0.8,col=c("black","white"),ylim=c(0,10))
```


Statistische Tests

Veränderung der Strukturwerte von aufgewerteten Waldrändern zwischen den Jahren 2001 und 2014

```
data=read.delim("Daten.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
wilcox.test(data$eins,data$vierzehn, paired=TRUE)
```

Veränderung der Strukturwerte von aufgewerteten Waldrändern zwischen den Jahren 2014 und 2016

```
data=read.delim("Daten.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
wilcox.test(data$vierzehn,data$sechzehn, paired=TRUE)
```

Veränderung der Strukturwerte von aufgewerteten Waldrändern zwischen den Jahren 2001 und 2016

```
data=read.delim("Daten.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
wilcox.test(data$eins,data$sechzehn, paired=TRUE)
```

Vergleich der Strukturwerte von Waldrändern mit und ohne Folgeeingriff

```
data=read.delim("data.csv", sep=";",dec=".",header=TRUE)
wilcox.test(data$vor,data$nach, paired=FALSE)
```

Anhang C: Resultate des Bewertungsschlüssels nach Wang (2017)

IDD	Strukturwert LiDAR Daten 2001	Strukturwert LiDAR Daten 2014	Strukturwert photogram- metrisches nDOM 2016	Strukturwert- unterschied zwischen den Jahren 2001 und 2014	Strukturwert- unterschied zwischen den Jahren 2014 und 2016	Strukturwert- unterschied zwischen den Jahren 2001 und 2016
0	6	26	6	20	-20	0
1	10	9	6	-1	-3	-4
2	6	20	20	14	0	14
3	11	10	12	-1	2	1
4	7	13	9	6	-4	2
5	16	12	17	-4	5	1
6	6	6	10	0	4	4
7	9	9	10	0	1	1
8	25	13	20	-12	7	-5
9	14	9	10	-5	1	-4
10	4	8	20	4	12	16
11	10	16	12	6	-4	2
12	6	13	12	7	-1	6
13	9	6	7	-3	1	-2
14	12	16	16	4	0	4
15	21	12	13	-9	1	-8
16	9	23	8	14	-15	-1
17	3	6	6	3	0	3
18	5	19	23	14	4	18
19	7	8	9	1	1	2
20	12	8	8	-4	0	-4
21	5	23	8	18	-15	3
22	10	13	19	3	6	9
23	15	10	10	-5	0	-5
24	20	14	15	-6	1	-5
25	13	18	20	5	2	7
26	11	9	10	-2	1	-1
27	13	17	20	4	3	7
28	14	27	21	13	-6	7
29	8	4	4	-4	0	-4
30	8	9	8	1	-1	0
31	14	13	11	-1	-2	-3
32	12	18	23	6	5	11
33	10	8	21	-2	13	11
34	14	15	23	1	8	9
35	14	10	10	-4	0	-4
36	9	6	13	-3	7	4
37	12	4	14	-8	10	2
38	4	19	28	15	9	24

39	11	17	21	6	4	10
40	9	9	12	0	3	3
41	10	8	10	-2	2	0
42	26	8	7	-18	-1	-19
43	3	22	24	19	2	21
44	7	29	14	22	-15	7
45	11	14	16	3	2	5
46	12	18	22	6	4	10
47	4	12	23	8	11	19
48	6	18	23	12	5	17
49	13	19	19	6	0	6
50	10	9	9	-1	0	-1
51	3	5	24	2	19	21
52	22	16	17	-6	1	-5
53	7	12	11	5	-1	4
54	8	13	12	5	-1	4
55	10	10	17	0	7	7
56	7	13	10	6	-3	3
57	13	25	14	12	-11	1
58	9	20	17	11	-3	8
59	13	15	16	2	1	3
60	10	11	11	1	0	1
61	11	9	28	-2	19	17
62	14	16	21	2	5	7
63	25	12	12	-13	0	-13
64	15	16	15	1	-1	0
65	1	6	5	5	-1	4
66	4	7	9	3	2	5
67	3	28	8	25	-20	5
68	10	19	24	9	5	14
69	20	13	12	-7	-1	-8
70	5	15	17	10	2	12
71	17	11	12	-6	1	-5
72	9	14	15	5	1	6
73	15	19	14	4	-5	-1
74	14	15	23	1	8	9
75	2	3	7	1	4	5
76	12	7	8	-5	1	-4
77	2	6	7	4	1	5
78	9	11	11	2	0	2
79	7	15	14	8	-1	7
80	0	0	23	0	23	23
81	4	5	6	1	1	2
82	12	11	16	-1	5	4
83	10	26	28	16	2	18
84	14	10	11	-4	1	-3

85	10	11	8	1	-3	-2
86	10	18	17	8	-1	7
87	1	6	8	5	2	7
88	7	11	3	4	-8	-4
89	16	17	16	1	-1	0
90	4	10	11	6	1	7
91	17	17	24	0	7	7
92	31	19	21	-12	2	-10
93	11	9	12	-2	3	1
94	7	15	17	8	2	10
95	2	5	3	3	-2	1
96	12	13	11	1	-2	-1
97	15	21	24	6	3	9
98	6	6	16	0	10	10
99	15	20	27	5	7	12
100	14	9	8	-5	-1	-6
101	5	5	8	0	3	3
102	14	12	14	-2	2	0
103	9	23	19	14	-4	10
104	12	18	16	6	-2	4
105	5	4	3	-1	-1	-2
106	14	14	13	0	-1	-1
107	6	9	9	3	0	3
108	10	11	12	1	1	2
109	13	4	5	-9	1	-8
110	8	12	11	4	-1	3
111	11	7	9	-4	2	-2
112	19	19	17	0	-2	-2
113	9	10	20	1	10	11
114	8	4	3	-4	-1	-5
115	11	13	13	2	0	2
116	14	17	14	3	-3	0
117	14	17	18	3	1	4
118	3	8	23	5	15	20
119	6	8	13	2	5	7
120	5	9	24	4	15	19
121	3	4	5	1	1	2
122	11	13	25	2	12	14
123	9	17	18	8	1	9
124	14	15	16	1	1	2
125	14	10	9	-4	-1	-5
126	20	7	9	-13	2	-11
127	2	2	9	0	7	7
128	16	12	15	-4	3	-1
129	19	3	4	-16	1	-15
130	15	17	10	2	-7	-5

131	11	10	11	-1	1	0
132	11	11	8	0	-3	-3
133	9	8	9	-1	1	0
134	12	10	11	-2	1	-1
135	10	14	19	4	5	9
136	24	10	10	-14	0	-14
137	6	8	4	2	-4	-2
138	7	21	23	14	2	16
139	14	14	14	0	0	0
140	27	11	11	-16	0	-16
141	15	17	18	2	1	3
142	12	11	11	-1	0	-1
143	10	7	11	-3	4	1
144	7	10	5	3	-5	-2
145	28	13	13	-15	0	-15
146	15	5	4	-10	-1	-11
147	9	14	12	5	-2	3
148	10	21	13	11	-8	3
149	15	9	8	-6	-1	-7
150	12	15	24	3	9	12
151	14	12	13	-2	1	-1
152	0	23	23	23	0	23
153	5	4	5	-1	1	0
154	6	8	22	2	14	16
155	7	11	11	4	0	4
156	9	5	13	-4	8	4
157	3	3	3	0	0	0
158	18	16	16	-2	0	-2
159	17	13	14	-4	1	-3
160	4	5	5	1	0	1
161	4	5	9	1	4	5
162	13	14	13	1	-1	0
163	20	8	6	-12	-2	-14
164	9	10	10	1	0	1
165	13	12	23	-1	11	10
166	10	13	14	3	1	4
167	8	14	10	6	-4	2
168	13	18	17	5	-1	4
169	3	13	18	10	5	15
170	6	5	24	-1	19	18
171	12	18	19	6	1	7
172	27	27	12	0	-15	-15
173	13	17	24	4	7	11
174	13	11	17	-2	6	4
175	14	8	7	-6	-1	-7
176	25	10	13	-15	3	-12

177	7	8	12	1	4	5
178	18	17	10	-1	-7	-8
179	16	26	29	10	3	13
180	4	9	9	5	0	5
181	14	15	24	1	9	10
182	9	15	11	6	-4	2
183	15	13	13	-2	0	-2
184	11	11	12	0	1	1
185	18	10	8	-8	-2	-10
186	26	28	15	2	-13	-11
187	15	27	22	12	-5	7
188	7	5	6	-2	1	-1
189	7	13	14	6	1	7
190	23	16	15	-7	-1	-8
191	16	15	17	-1	2	1
192	3	14	18	11	4	15
193	4	7	4	3	-3	0
194	17	15	15	-2	0	-2
195	13	11	13	-2	2	0
196	4	2	1	-2	-1	-3
197	3	6	5	3	-1	2
198	13	17	18	4	1	5
199	4	7	10	3	3	6
200	2	4	3	2	-1	1
201	22	10	11	-12	1	-11
202	5	10	6	5	-4	1
203	0	10	10	10	0	10
204	8	13	25	5	12	17
205	16	14	14	-2	0	-2
206	11	3	3	-8	0	-8
207	6	9	11	3	2	5
208	11	6	18	-5	12	7
209	15	17	16	2	-1	1
210	9	10	8	1	-2	-1
211	5	4	3	-1	-1	-2
212	6	16	14	10	-2	8
213	11	13	19	2	6	8
214	8	13	14	5	1	6
215	8	24	12	16	-12	4
216	11	16	17	5	1	6
217	11	16	26	5	10	15
218	10	10	11	0	1	1
219	9	10	5	1	-5	-4
220	3	17	13	14	-4	10
221	14	31	14	17	-17	0
222	13	14	10	1	-4	-3

223	16	16	16	0	0	0
224	10	12	10	2	-2	0
225	11	11	10	0	-1	-1
226	11	12	16	1	4	5
227	18	17	15	-1	-2	-3
228	1	3	3	2	0	2
229	10	15	22	5	7	12
230	16	20	22	4	2	6
231	5	7	9	2	2	4
232	6	14	8	8	-6	2
233	17	11	11	-6	0	-6
234	5	16	14	11	-2	9
235	8	20	21	12	1	13
236	3	1	6	-2	5	3
237	14	17	18	3	1	4
238	9	12	12	3	0	3
239	3	24	26	21	2	23
240	18	13	16	-5	3	-2
241	10	12	9	2	-3	-1
242	13	21	19	8	-2	6
243	12	17	15	5	-2	3
244	10	12	18	2	6	8
245	13	8	14	-5	6	1
246	16	12	11	-4	-1	-5
247	7	6	6	-1	0	-1
248	9	12	9	3	-3	0
249	18	11	12	-7	1	-6
250	5	2	2	-3	0	-3
251	6	14	19	8	5	13
252	2	3	5	1	2	3
253	1	14	24	13	10	23
254	11	12	15	1	3	4
255	0	1	10	1	9	10
256	5	2	2	-3	0	-3
257	29	12	14	-17	2	-15
258	12	16	16	4	0	4
259	12	19	22	7	3	10
260	2	3	6	1	3	4
261	9	25	25	16	0	16
262	1	7	8	6	1	7
263	14	16	19	2	3	5
264	9	9	10	0	1	1
265	8	10	22	2	12	14
266	7	8	8	1	0	1
267	6	17	11	11	-6	5
268	25	12	16	-13	4	-9

269	13	13	12	0	-1	-1
270	7	25	17	18	-8	10
271	3	15	4	12	-11	1
272	12	16	18	4	2	6
273	17	13	15	-4	2	-2
274	10	13	4	3	-9	-6
275	12	13	16	1	3	4
276	9	23	19	14	-4	10
277	8	9	27	1	18	19
278	13	11	22	-2	11	9
279	2	2	25	0	23	23
280	15	14	15	-1	1	0
281	7	7	7	0	0	0
282	20	10	6	-10	-4	-14
283	5	11	8	6	-3	3
284	7	8	8	1	0	1
285	14	14	13	0	-1	-1
286	14	12	16	-2	4	2
287	2	3	3	1	0	1
288	11	10	10	-1	0	-1
289	5	17	18	12	1	13
290	15	26	23	11	-3	8
291	15	19	11	4	-8	-4
292	15	15	18	0	3	3
293	5	9	8	4	-1	3
294	11	12	9	1	-3	-2
295	13	6	7	-7	1	-6
296	19	17	16	-2	-1	-3
297	8	11	10	3	-1	2
298	9	21	28	12	7	19
299	2	22	24	20	2	22
300	3	15	16	12	1	13
301	15	17	19	2	2	4
302	14	15	18	1	3	4
303	9	12	18	3	6	9
304	17	16	16	-1	0	-1
305	10	7	25	-3	18	15
306	8	11	15	3	4	7
307	10	5	9	-5	4	-1
308	18	10	10	-8	0	-8
309	16	17	11	1	-6	-5
310	2	4	1	2	-3	-1
311	7	8	8	1	0	1
312	30	17	19	-13	2	-11
313	14	27	20	13	-7	6
314	11	16	9	5	-7	-2

315	19	10	9	-9	-1	-10
316	12	28	13	16	-15	1
317	2	3	5	1	2	3
318	3	10	5	7	-5	2
319	10	16	13	6	-3	3
320	3	19	17	16	-2	14
321	17	13	12	-4	-1	-5
322	12	14	19	2	5	7
323	9	17	30	8	13	21
324	14	7	9	-7	2	-5
325	11	6	6	-5	0	-5
326	12	20	21	8	1	9
327	15	10	9	-5	-1	-6
328	0	4	8	4	4	8
329	5	17	24	12	7	19
330	10	9	11	-1	2	1
331	31	8	10	-23	2	-21
332	23	18	18	-5	0	-5
333	17	12	8	-5	-4	-9
334	6	21	25	15	4	19
335	15	16	19	1	3	4
336	19	16	17	-3	1	-2
337	4	10	12	6	2	8
338	24	10	11	-14	1	-13
339	15	13	8	-2	-5	-7
340	13	15	17	2	2	4
341	9	13	14	4	1	5
342	7	6	8	-1	2	1
343	14	21	21	7	0	7
344	6	10	12	4	2	6
345	15	17	17	2	0	2
346	11	3	3	-8	0	-8
347	7	8	12	1	4	5
348	14	11	22	-3	11	8
349	5	4	4	-1	0	-1
350	16	12	11	-4	-1	-5
351	10	18	14	8	-4	4
352	11	15	21	4	6	10
353	3	3	3	0	0	0
354	16	14	14	-2	0	-2
355	12	15	19	3	4	7
356	4	3	3	-1	0	-1
357	17	13	15	-4	2	-2
358	5	2	3	-3	1	-2
359	17	12	13	-5	1	-4
360	2	16	26	14	10	24

361	16	22	24	6	2	8
362	8	5	3	-3	-2	-5
363	15	14	13	-1	-1	-2
364	18	20	25	2	5	7
365	14	15	11	1	-4	-3
366	6	6	6	0	0	0
367	6	8	7	2	-1	1
368	19	10	9	-9	-1	-10
369	3	6	8	3	2	5
370	6	16	15	10	-1	9
371	10	5	9	-5	4	-1
372	12	8	12	-4	4	0
373	29	12	11	-17	-1	-18
374	20	9	13	-11	4	-7
375	32	13	16	-19	3	-16
376	13	24	27	11	3	14
377	10	14	12	4	-2	2
378	9	14	12	5	-2	3
379	15	18	16	3	-2	1
380	8	2	4	-6	2	-4
381	5	9	11	4	2	6
382	6	13	28	7	15	22
383	21	11	11	-10	0	-10
384	7	7	8	0	1	1
385	8	5	6	-3	1	-2
386	8	10	22	2	12	14
387	13	4	10	-9	6	-3
388	15	5	14	-10	9	-1
389	3	7	3	4	-4	0
390	17	13	22	-4	9	5
391	8	11	11	3	0	3
392	14	23	21	9	-2	7
393	9	8	24	-1	16	15
394	18	4	20	-14	16	2
395	8	5	5	-3	0	-3
396	21	19	22	-2	3	1
397	12	14	14	2	0	2
398	16	9	28	-7	19	12
399	11	9	10	-2	1	-1
400	10	11	21	1	10	11
401	5	6	6	1	0	1
402	9	8	11	-1	3	2
403	8	3	2	-5	-1	-6
404	29	13	22	-16	9	-7
405	13	12	12	-1	0	-1
406	10	16	16	6	0	6

407	4	5	5	1	0	1
408	7	7	9	0	2	2
409	12	8	19	-4	11	7
410	11	15	18	4	3	7
411	2	2	17	0	15	15
412	0	4	7	4	3	7
413	11	14	7	3	-7	-4
414	12	12	11	0	-1	-1
415	14	8	12	-6	4	-2
416	11	8	7	-3	-1	-4
417	10	10	11	0	1	1
418	9	14	11	5	-3	2
419	8	6	22	-2	16	14
420	5	5	5	0	0	0
421	17	16	17	-1	1	0
422	1	5	4	4	-1	3
423	6	11	10	5	-1	4
424	7	10	10	3	0	3
425	4	9	10	5	1	6
426	4	7	10	3	3	6
427	14	14	14	0	0	0
428	9	10	9	1	-1	0
429	16	19	15	3	-4	-1
430	13	13	17	0	4	4
431	10	10	19	0	9	9
432	10	19	21	9	2	11
433	11	15	15	4	0	4
434	0	2	22	2	20	22
435	12	14	14	2	0	2
436	20	12	17	-8	5	-3
437	10	25	26	15	1	16
438	11	13	12	2	-1	1
439	23	3	3	-20	0	-20
440	11	30	32	19	2	21
441	17	14	18	-3	4	1
442	11	6	7	-5	1	-4
443	19	13	15	-6	2	-4
444	12	13	16	1	3	4
445	15	17	15	2	-2	0
446	14	18	16	4	-2	2
447	16	7	10	-9	3	-6
448	10	12	25	2	13	15
449	18	14	13	-4	-1	-5
450	9	14	13	5	-1	4
451	23	18	17	-5	-1	-6
452	17	6	16	-11	10	-1

453	11	25	26	14	1	15
454	13	20	20	7	0	7
455	9	9	14	0	5	5
456	3	6	12	3	6	9
457	13	11	11	-2	0	-2
458	12	9	10	-3	1	-2
459	11	13	10	2	-3	-1
460	17	17	25	0	8	8
461	11	4	5	-7	1	-6
462	6	9	16	3	7	10
463	11	14	15	3	1	4
464	4	6	16	2	10	12
465	10	12	32	2	20	22
466	11	9	9	-2	0	-2
467	7	3	4	-4	1	-3
468	7	12	21	5	9	14
469	11	6	6	-5	0	-5
470	5	12	9	7	-3	4
471	6	7	15	1	8	9
472	25	9	16	-16	7	-9
473	10	11	15	1	4	5
474	14	9	16	-5	7	2
475	17	12	10	-5	-2	-7
476	13	15	17	2	2	4
477	3	6	3	3	-3	0
478	13	15	12	2	-3	-1
479	2	5	15	3	10	13
480	9	12	13	3	1	4
481	18	14	16	-4	2	-2
482	10	13	9	3	-4	-1
483	3	3	6	0	3	3
484	17	12	10	-5	-2	-7
485	5	13	11	8	-2	6
486	17	18	21	1	3	4
487	6	11	6	5	-5	0
488	2	13	17	11	4	15
489	11	6	6	-5	0	-5
490	5	12	26	7	14	21
491	10	10	9	0	-1	-1
492	3	4	3	1	-1	0
493	5	11	12	6	1	7
494	14	15	15	1	0	1
495	7	7	7	0	0	0
496	28	18	22	-10	4	-6
497	22	12	11	-10	-1	-11
498	8	18	24	10	6	16

499	5	6	4	1	-2	-1
500	7	9	15	2	6	8
501	7	9	8	2	-1	1
502	4	5	4	1	-1	0
503	18	18	18	0	0	0
504	12	17	17	5	0	5
505	12	15	20	3	5	8
506	15	18	15	3	-3	0
507	5	7	18	2	11	13
508	9	9	21	0	12	12
509	10	10	9	0	-1	-1
510	8	7	7	-1	0	-1
511	17	22	22	5	0	5
512	7	6	8	-1	2	1
513	26	18	23	-8	5	-3
514	19	16	17	-3	1	-2
515	17	16	19	-1	3	2
516	12	17	16	5	-1	4
517	8	13	8	5	-5	0
518	6	12	14	6	2	8
519	14	15	16	1	1	2
520	7	12	12	5	0	5
521	3	10	10	7	0	7
522	12	9	14	-3	5	2
523	9	17	16	8	-1	7
524	23	4	16	-19	12	-7
525	0	2	11	2	9	11
526	11	19	10	8	-9	-1
527	12	11	8	-1	-3	-4
528	1	11	20	10	9	19
529	12	24	25	12	1	13
530	9	18	24	9	6	15
531	1	14	19	13	5	18
532	16	13	13	-3	0	-3
533	6	7	8	1	1	2
534	5	24	21	19	-3	16
535	7	9	12	2	3	5
536	11	7	11	-4	4	0
537	15	12	11	-3	-1	-4
538	12	13	13	1	0	1
539	14	18	23	4	5	9
540	11	16	14	5	-2	3
541	8	18	19	10	1	11
542	13	11	15	-2	4	2
543	12	0	13	-12	13	1
544	6	14	10	8	-4	4

545	11	13	21	2	8	10
546	8	13	22	5	9	14
547	9	7	13	-2	6	4

Anhang D: Waldrandbewertungen der Felderhebung im Jahr 2017 mit dem Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015)

IDD	Gesamtpunktzahl	Waldrandtiefe [m]	Strauchgürteltiefe[m]	Krautsaumtiefe [m]	Strauchgürtellänge [m]	Krautsaumlänge [m]	Belaubungsdichte [%]	Laubgehölzarten Baumschicht [#]	Gehölzarten Strauch- und Krautschicht [#]	Dornstraucharten Strauch- und Krautschicht [#]	Krautsaumtyp	Botanische Vielfalt Waldbodenvegetation	Verzahnungsgrad	Kleinstrukturen und tote Bäume [#]	Länge vorgelagerter Strauchgürtel [%]	Längenausdehnung Problemarten und invasive Neophyten [%]	Invasive Neophyten Baum-, Strauch- und Krautschicht [#]
43	55	7.66	5.28	17.84	80	100	70	10	14	1	2	2	2.1	8	30	15	0
85	44	10.78	2.56	1.8	70	100	75	7	12	3	1	2	1.5	7	0	25	1
98	60	14.42	3.76	10.1	85	100	90	13	17	3	4	2	1.4	5	0	10	0
104	54	15.36	6.76	10.1	100	100	75	6	18	3	1	2	1.4	6	0	95	0
179	43	19.76	17.96	1.64	65	60	50	4	13	0	1	2	2.2	5	0	25	1
196	51	6.82	3.32	10.1	85	100	80	5	12	3	3	2	1.5	25	0	10	1
232	34	5.02	0.66	2.92	60	80	30	6	6	1	1	2	1.6	12	0	25	0
250	43	8.94	1.68	8.14	70	100	90	6	12	1	2	2	1.2	12	0	80	0
253	46	10.86	5.32	1.3	90	95	70	7	15	3	1	2	1.9	2	0	40	1
256	42	7.46	4.84	1.62	95	100	45	5	14	2	2	2	1.4	18	0	30	2
258	51	10.02	7.68	0.54	100	100	80	10	15	2	2	2	1.6	5	0	30	0
266	50	19.4	7.82	0.6	100	55	90	6	17	3	2	2	1.2	9	0	40	0
298	46	17.72	1.6	1.52	45	100	85	8	12	3	2	2	1.5	12	0	40	0
299	44	15.08	7.06	1.14	85	75	40	7	13	0	3	2	1.7	5	0	95	1
300	47	14.6	7.52	5.44	75	100	55	5	10	2	1	2	2.1	3	0	70	0
310	55	13.18	7.24	1.32	100	100	45	10	23	3	3	2	1.5	14	0	15	0
323	51	13.36	7.3	1.12	85	100	90	7	17	2	2	2	1.2	9	0	25	0

361	49	27.82	16.34	0.58	80	90	74	7	14	0	3	2	1.7	9	0	97	0
375	47	15.22	7.48	0.74	100	70	80	7	20	0	1	2	1.7	11	0	85	0
398	39	4.8	1.6	1.32	55	75	90	10	10	1	1	2	1.2	6	0	40	0
403	44	11.8	3.44	0.98	60	80	85	9	12	1	3	2	1.4	8	0	55	0
439	50	9.46	4	6.08	90	100	55	5	20	3	2	2	1.7	11	0	50	0
440	50	5.46	3.6	5.28	100	100	90	6	12	2	4	2	1.2	9	0	10	0
527	52	13.14	6	5.74	95	100	65	6	12	3	1	2	1.8	26	0	20	0
533	41	11.16	5.32	1.22	90	100	90	2	14	2	1	2	1.5	2	0	25	0

Anhang E: Waldrandschlüssel nach Krüsi (2015)

<h1 style="margin: 0;">Waldrandschlüssel</h1>		Datum							
© Krüsi (2015)		Ort / Koordinaten							
		BearbeiterIn							
	Transekt	B1	B2	B3	B4	B5	Wert Ø	Punkte	
Hauptschlüssel	Waldrandtiefe [m]						*1		
	Strauchgürteltiefe [m]						*2		
	Krautsaumtiefe [m]						*3		
	Strauchgürtellänge [%]						*4		
	Krautsaumlänge [%]						*4		
	Belaubungsdichte [%]						*4		
	Laubgehölzarten in der Baumschicht [#]						*5		
Gehölzarten in der Strauch- und Krautschicht [#]						*6			
Dornstraucharten in der Strauch- und Krautschicht [#]						*7			
Ergänzungen	Krautsaumtyp [Fett, Fromental, Hochstauden, Mager]						*8		
	Botanische Vielfalt Waldbodenvegetation [Arm, Mittel, Reich]						*9		
	Verzahnungsgrad [Effektive WR-Länge / 100 m Beurteilungslinie]						*10		
	Kleinstrukturen und tote Bäume [#]						*11		
	Länge vorgelagerter Strauchgürtel [%]						*12		
	Längenausdehnung Problemarten und invasive Neophyten [%]						*13		
	Invasive Neophyten in Baum-, Strauch- und Krautschicht [#]						*14		
Bemerkungen:							Gesamtpunktzahl		
							Sehr wertvoll	≥ 59	
							Wertvoll	49 - 58	
							Befriedigend	39 - 48	
							Ungenügend	29 - 38	
							Schlecht	19 - 28	
							Waldrand nicht vorhanden	≤ 18	
Punkte									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
*1	≤ 1.9	2 - 2.5	2.51 - 4	4.1 - 6	6.1 - 8	8.1 - 10	10.1 - 15	15.1 - 20	≥ 20.1
*2	≤ 0.9	1 - 1.5	1.51 - 2	2.1 - 3	3.1 - 4	4.1 - 5	5.1 - 7	7.1 - 10	≥ 10.1
*3	≤ 0.4	0.5 - 1	1.1 - 1.5	1.51 - 2	2.1 - 3	3.1 - 5	5.1 - 7	7.1 - 10	≥ 10.1
*4	≤ 0.9	1 - 5	6 - 10	11 - 25	26 - 50	51 - 75	≥ 76		
*5	1	2	3	4	5	6	7	≥ 8	
*6	≤ 3	4 - 6	7 - 9	10 - 12	13 - 15	16 - 18	19 - 21	≥ 22	
*7	0	1	2	3	4	5	6	≥ 7	
*8	Fett	Fromental	Hochstauden	Mager					
*9	Arm	Mittel	Reich						
*10	≤ 1.1	1.2 - 1.5	≥ 1.6						
*11	1	2	3	≥ 4					
*12	≤ 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	≥ 81				
Abzüge									
	0	- 1	- 2	- 3					
*13	≤ 10	11 - 40	41 - 70	≥ 71					
*14	0	1	2	≥ 3					

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Life Sciences and Facility Management
IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen

