

Der Einfluss von Baumarten und -durchmesser auf Habitatstrukturen

Eine Datenanalyse zum Sihlwald



Bachelorarbeit von Nathalie Ehrbar

Departement Umweltsystemwissenschaften

Zürich, Juli 2019

Betreuung:

Prof. Dr. Harald Bugmann, ETH Zürich

Dr. Peter Brang, Eidg. Forschungsanstalt WSL

Zusammenfassung

Habitatstrukturen sind wichtige Elemente eines Waldes, da sie verschiedene Oberflächen schaffen und somit die Biodiversität fördern. Für viele Tiere sind gewisse HS lebensnotwendig, da sie als Lebensraum, Rückzugsort oder Nahrung dienen. Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren der Fokus der Forschung immer wieder auf die Entstehung, Bedeutung und die Einteilung dieser Habitatstrukturen gelegt, um die Zusammenhänge besser zu verstehen.

Mit den erhobenen Daten aus der Stichprobeninventur 2017 im Sihlwald wurde herausgefunden, dass sowohl die Baumart als auch der Brusthöhendurchmesser (BHD) eines Baumes für die Dichte und die Diversität der Habitatstrukturen entscheidend sind. Bei Rindenverletzungen steigt die Anzahl Habitatstrukturen mit dem BHD an. Zudem sind Eiben besonders anfällig auf Rindenverletzungen, da die hohe Population des Schalenwildes zu Verbiss und Abnagen der Baumrinde führt. Beim Kronentotholz und beim Kronenbruch nimmt die Wahrscheinlichkeit für den Baum, betroffen zu sein, mit seinem Durchmesser ab. Die jüngeren Bäume in der Unterschicht sind unterdrückt und leiden unter Konkurrenz. Wenn sich Baumteile aus der Oberschicht lösen, so fallen diese auf die kleineren Bäume und beschädigen ihre Krone. Dies führt zu Kronenbrüchen. Bei Kronentotholz sind Krankheiten bedeutende Auslöser. Davon ist die Esche aktuell am stärksten betroffen: Das Eschentriebsterben führt im Sihlwald zu hohen Anteilen an Eschen mit Kronentotholz.

Abstract

Tree related microhabitats (TreMs) are important elements for a forest because they create different surfaces and thus promote biodiversity. For many animals, certain TreMs are essential because they serve as habitat, hideaway or food. For this reason, research in recent years has repeatedly focused on the development, significance and classification of these TreMs in order to understand the correlations better.

With the data collected at the sample inventory 2017 in the Sihlwald, it was found that both the tree species and the Diameter at Breast Height (DBH) of a tree are relevant for the density and diversity of the TreMs. In bark injuries, the number of TreMs increases with the DBH. In addition, yews are particularly susceptible to bark injuries, because the high population of deer leads to biting and eating off the tree bark. For crown deadwood and broken crowns, the probability of the tree being affected decreases with its diameter. The younger trees in the lower layer are suppressed and suffer from competition. If parts of the tree detach from the upper layer, they fall on the smaller trees and damage their crown. This leads to crown fractures. With crown deadwood, diseases are important factors. Ash is currently the most severely affected wood species: The death of ash shoots leads to a high proportion of ashes affected by crown deadwood in the Sihlwald.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	
Abstract	
1. Einleitung.....	1
2. Methoden.....	5
2.1 Gebietsprofil - Sihlwald	5
2.2 Inventurmethode n	8
2.3 Habitatstrukturen.....	9
2.3.1 Entstehung.....	12
2.3.2 HS als Lebensraum	12
2.4 Statistische Analysen	13
3. Resultate.....	14
3.1 Datengrundlage	14
3.2 Auswertungen	15
3.2.1 Habitatstrukturen allgemein	17
4. Diskussion.....	23
4.1 BHD.....	23
4.2 Baumarten	24
5. Schlussfolgerung.....	27
Danksagung	28
Literaturverzeichnis.....	29
Anhang	31
A. Glossar.....	31
B. Zustand-Aufnahme.....	32
C. Einteilung der Habitatstrukturen	33
D. Baumarten	33
E. Datensätze.....	34
F. R-Outputs.....	35
Modell für alle HS	35
Modelle für Rindenverletzungen.....	36
Modelle für Kronentotholz.....	37
Modelle für Kronenbruch	38
G. Eigenständigkeitserklärung.....	39

1. Einleitung

Habitatstrukturen (HS) sind spezielle Strukturen am Baum, die oft durch äussere Einflüsse entstehen können. Verletzungen der Baumrinde führen je nach Grösse zu verschiedenen HS wie zu flächigen Rindenverletzungen oder zu Saftfluss, wenn der Baum versucht, die Wunde wieder zu verschliessen. Dies dient der Verhinderung von potenziellen Infizierungen durch Bakterien, Viren, Pilze oder Tiere. Wirken mechanische Kräfte auf den Baum, wie durch einen herunterfallenden Ast, so kann dies zu Rindenverletzungen, Kronenbruch oder Rissen am Stamm führen. Die dadurch entstandenen, offenen Holzflächen dienen diversen Lebewesen als Lebensraum und sind für deren Lebenszyklus bedeutend. Deshalb gelten HS als wichtige Grundlage für die Biodiversität und haben im Waldmanagement, im Naturschutz und in der Forschung an Bedeutung gewonnen. Sie können für spezielle Arten sogar ein möglicher Vorkommens-Indikator sein, wenn die Art nur auf einem spezifischen Substrat vorkommen kann (Larrieu u. a. 2018).

Biodiversität ist wichtig für die Erhaltung diverser (regulierender) Leistungen der Natur wie zum Beispiel dem Schutz vor Naturgefahren, dem Erholungswert, dem Erhalten des Wasserkreislaufs und der Produktion von Lebensmitteln und anderen Rohstoffen. Die Artenvielfalt nimmt mit der steigenden Waldfläche, der vorhandenen Naturverjüngung und dem vermehrten Totholz zu. Früher übliche Waldbewirtschaftungsformen wie der Mittel- oder Niederwaldbetrieb, die sich positiv auf die Biodiversität ausgewirkt haben, werden aber nicht mehr genügend betrieben und so fehlen lichte Waldgesellschaften mit jungen, verstreut wachsenden Bäumen. Da die Wälder in der Schweiz stark bewirtschaftet sind (Baur u. a. 2004), werden die Bäume gefällt, wenn sie einen bestimmten Zieldurchmesser erreicht haben, noch bevor sie alt geworden sind. Deshalb sind weit entwickelten Wälder mit dicken, alten Bäumen ebenfalls untervertreten gegenüber den mittelalten Waldbeständen.

Biodiversität ist ein Konstrukt, das nur schwer quantifizierbar ist (Santana 2014). Einige Indikatoren erlauben aber eine approximative Einschätzung des Biodiversitätsgrades. Beispiele wären: die Artenvielfalt, die Habitatvielfalt oder die Vielfalt der Umweltparameter (Sarkar 2002). Eine weitere Möglichkeit ist die durchschnittliche Anzahl und Art der HS auf einer Fläche. Je diverser und häufiger die HS sind, desto höher ist die Lebensraumvielfalt und somit die Biodiversität. Um die Werte der Habitatbäume besser einschätzen zu können, ordnet das Computerprogramm «Integrate +» einem Baum einen bestimmten Habitatwert zu, indem die vorher festgelegten Punktzahlen der einzelnen HS aufaddiert werden. So können die Seltenheit und die Entstehungsdauer miteinbezogen werden (Kraus u. a. 2018). Damit eine reproduzierbare Aufnahme der HS garantiert werden kann, schlagen Larrieu u. a. (2018) eine einheitliche Definition und Typologie für alle gemässigten und mediterranen Wälder Europas vor. Dies führt zu rekonstruierbaren, einheitlichen Ergebnissen. Es ist wichtig, die Bedeutung der HS zu verstehen und die HS gezielt fördern zu können. Deshalb werden zurzeit immer wieder Studien zu diesem Thema durchgeführt. Um die Aufnahmemethoden zeitsparender und reproduzierbarer machen zu können, forscht die WSL an halbautomatischen Techniken, die mittels Laserscan HS erfassen (Rehush u. a. 2018). Mit diesen vereinfachten Aufnahmemöglichkeiten könnten breitflächigere Analysen gemacht werden.

Habitatstrukturen sind für diverse Lebewesen essenziell als Lebensraum oder als Nahrungsquelle. Gewisse Arten sind gebunden an spezifische HS, welche somit als Indikatoren für das Vorkommen dieser Arten dienen. Der Unterschied zwischen Natur- und Wirtschaftswald ist auch ein wichtiger Faktor. So leben zum Beispiel der Dreizehenspecht (*Picoides tridactylus*) und der Weissrückenspecht (*Dendrocopos leucotos*), die beiden seltensten Spechtarten Europas, fast ausschliesslich in

naturbelassenen Wäldern. Während es im Wirtschaftswald nur 1.7 Dreizehenspecht-Brutpaare/10 km² gibt, sind es 13.6 Paare/10 km² im Naturwald (Bütler u. a. 2011). Die 8-fache Brutpaar-Menge zeigt deutlich, dass der Naturwald den Ansprüchen der Spechte besser gerecht wird, da der Alt- und Totholzanteil höher ist und es weniger Störungen wie Lärmbelastung gibt. Auch bei Pilzen ist dieses Phänomen deutlich zu erkennen: Während der Zunderschwamm (*Fomes fomentarius*) in den untersuchten Naturwäldern über 200 Mal/ha vorkommt, kommt er in den Wirtschaftswäldern praktisch nicht vor (Bütler u. a. 2011).

Habitatstrukturen ziehen auch diverse xylobionte Käfer, Fliegen und Mücken an. Für ein funktionierendes Ökosystem im Wald sind Holz-bewohnende Insekten notwendig: Sie zersetzen das Holz des abgestorbenen Baumes und fördern so den Totholzabbau (Lachat u. a. 2014). «Am Anfang besiedeln Borken-, Pracht-, Bock- oder Werftkäfer sowie Holzwespen die frisch abgestorbenen Bäume und fressen erste Gänge ins Holz» (Bütler u. a. 2011). Mit der Fortschreitung des Abbauprozesses entstehen neue Habitate für andere Lebewesen, da das Holz besser zugänglich gemacht worden ist. Diverse Zerfallsstadien vergrössern die Habitatdiversität und dies fördert wiederum die Artenvielfalt. Aus diesem Grund ist es erstrebenswert, eine hohe Menge Totholz und Anzahl verschiedener Käfer in einem Ökosystem zu haben, um wiederum eine hohe Biodiversität zu gewährleisten. So bleibt der Lebenskreislauf des Waldes intakt und der Wald kann seine Funktionen (wie Schutz vor Naturgefahren und Produktion von Nahrungsmitteln) erfüllen.

Vögel profitieren von HS am meisten bei der Suche nach Nistplätzen und Nahrung, zu welcher die bereits erwähnten Käfer gehören (Bunnell und Houde 2011). Höhlen-Erst-Bewohner wie Spechte bauen sich ein Loch in einen Baumstamm und brüten dort. Verlassen sie die Höhle, wird diese von andere Tieren wie Käuzen, Hohltauben und Fledermäusen, aber auch von weiteren Säugern wie dem Baumarder oder kleinen Nagern (Eichhörnchen und Siebenschläfer) als Lebensraum weitergenutzt. Auch bodenbewohnende Kleinsäuger wie Mäuse nutzen Baumhöhlen als Versteck, Nistplatz und Nahrungs-speicher, wenn sie vom Boden aus erreichbar sind (Bütler u. a. 2011).

Das Forschungsprojekt „Monitoring Naturwaldreservate Schweiz“ ist eine Kooperation der WSL, der ETH und dem BAFU und befasst sich mit der Entwicklung von Naturwaldreservaten. In die einst stark bewirtschafteten Wälder wird nun nicht mehr eingegriffen. Die Wälder sollen sich langsam wieder in den natürlichen Zustand zurückentwickeln und deren Veränderungen genau dokumentiert werden. Das Ziel ist eine Analyse der gewonnenen Daten und «Bereitstellung von Indikatoren zu Naturwäldern für die Umweltbeobachtung des Bundes». Der Bund hat ein Interesse daran, zu sehen, wie effektiv seine Reservatspolitik ist. Der Sihlwald gehört zu den knapp 50 untersuchten Reservaten (WSL 2019). In dieser Arbeit werden Daten aus der Stichprobeninventur 2017 (SPI 2017) im Sihlwald untersucht.

Der Sihlwald ist seit dem Jahr 2000 ein Naturwaldreservat ohne forstwirtschaftliche Eingriffe (Kilchenmann 2019) und steht noch ganz am Anfang der Waldentwicklung hin zum Naturwald. Um die Veränderungen des Sihlwaldes besser bewerten und einordnen zu können, wird parallel ein Referenzwald mitanalysiert. Hierfür eignet sich der 9000 ha grosse Buchenurwald im geschützten Uholka Shyrokyi Luh – Massiv in den ukrainischen Karpaten (Commarmot u. a. 2013). Das Gebiet in den Karpaten hat ähnliche Standortbedingungen wie sie im Sihlwald vorherrschen. So beispielsweise das Gestein (Sandstein und Mergel), die durchschnittliche Jahrestemperatur von 7° C und die Niederschläge von 1000 m. Trotz intensiver Waldnutzung im 18. Jahrhundert «blieben einige teils grosse Waldgebiete weitgehend unangetastet» (Commarmot u. a. 2009). Die ursprünglichen Waldgebiete sind in einem zeitlich fortgeschrittenen, unangetasteten Zustand, welcher der Sihlwald mit seinem 150-jährigen Bestand im Verlaufe der Zeit ebenfalls erreichen kann (Commarmot und

Schmidt 2011). Während die Buche (*Fagus sylvatica*) in Uholka einen Stammzahl-Anteil von 97% hat, sind es im Sihlwald zurzeit lediglich gut 40% (K. Brändli u. a. (in Arbeit)). Dies lässt sich auf die Bewirtschaftung der letzten Jahrhunderte zurückschliessen, da die Tannen (*Abies alba*) und Fichten (*Picea abies*) dazumal aufgrund des ertragreicheren, geraden Holzes gefördert wurden (Commarmot und Schmidt 2011).

Die Baumart und der -durchmesser haben einen Einfluss auf das Vorkommen, die Dichte und die Vielfalt von HS. (Larrieu und Cabanettes 2012; Bütler u. a. 2013). Die Buche hat anzahlmässig viel häufiger HS als die Tannen, aber die HS-Diversität ist bei den Tannen höher (Larrieu und Cabanettes 2012).

In einem Wald in den Pyrenäen beispielsweise wurden an 70% der lebenden Buchen und an nur 18% der Tannen HS gefunden. Andererseits wies die Tannen mehr HS-Typen auf. Während die Buchen vermehrt Löcher aufwiesen, wurden unter anderem alle Saftfluss-Vorkommen an Tannen festgestellt (Larrieu und Cabanettes 2012). Laubbäume wie Buchen oder Eichen (*Quercus spp.*) haben also häufiger und Nadelbäume diversere HS (Vuidot u. a. 2011). Auch Bäume mit grossen BHD tragen zu einer höheren HS-Vielfalt bei. «Der BHD war der beste Indikator für das Auftreten der meisten Mikrohabitate» (Regnery u. a. 2013).

Das Vorkommen und die Vielfalt der HS steigen ebenfalls mit der Dauer der nicht bewirtschafteten Zeit an (Vuidot u. a. 2011). 10 - 15 Jahren nach einem Eingriff hat ein Wald signifikant mehr HS, sowohl in der Dichte als auch in der Diversität als nur 1 - 5 Jahren danach. Ein weiterer deutlicher Anstieg war nach 70 - 80 Jahren zu erkennen (Larrieu u. a. 2017). Ebenfalls entscheidend ist die Art der Ernte: Bei privaten Eingriffen ohne Waldbewirtschaftungsplan gab es nach dem Holzschlag weniger HS als bei Wäldern, die mit Konzept bewirtschaftet wurden. Für eine HS-Förderung empfehlen Larrieu u. a. , mehr HS-Bäume (besonders solche mit Höhlen) bei dem Eingriff stehen zu lassen und einen Teil des Waldes nicht mehr zu bewirtschaften, dass dieser sich ungestört entwickeln kann (Larrieu u. a. 2017).

In dieser Arbeit wird der Fokus auf das Vorhanden-Sein der HS im Sihlwald gelegt und folgende Hypothesen zum Vorkommen von HS untersucht:

1) Je älter ein Baum wird, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für ihn, verletzt zu werden und als Folge davon eine HS auszubilden.

Zum einen wird der Baum mit dem Alter dicker und erhöht somit seine Trefferoberfläche und zum anderen steigt die Wahrscheinlichkeit mit der Zeitdauer an. Bei Rindenverletzungen kann diese Erklärung eine entscheidende Rolle spielen, denn je älter der Baum wird, desto höher ist die Chance, von einem Stein oder einem umfallenden Baum getroffen zu werden. Bei Pilzen oder Höhlen sind andere Faktoren, wie klimatische Bedingungen oder die Verbreitungsradien von Pilzen und Tieren, ebenfalls wichtig. Kronen- und Stammbrüche werden womöglich durch Einflüsse wie extreme Umweltereignisse (z.B. Sturm oder Schneedruck) verursacht.

Der BHD eignet sich als repräsentativer Indikator für das Alter des Baumes. In einem ehemals stark bewirtschafteten Wald wie dem Sihlwald ist diese Annäherung plausibel, da die Bäume proportional in die Höhe und in die Breite wachsen konnten. Hier gibt es wenig unterdrückte Bäume, die zwar klein, aber doch alt sind. In einem «Urwald» wie dem Buchenurwald in Uholka dagegen könnte keine lineare Entwicklung zwischen Alter und Baumdurchmesser angenommen werden.

2) Die Baumart ist ein entscheidender Faktor für die Häufigkeit und das Auftreten bestimmter HS.

Wie Larrieu, Regnery und Vuidot bereits in ihren Studien belegt haben, unterscheidet sich die Dichte und Diversität der HS für gewisse Baumarten signifikant. So weisen Nadelbaumarten (Ta, Fi) oftmals eine geringere Anzahl an HS auf, als dies die Laubbäume (Ei, Bu) tun. Die Baumart an sich kann anfälliger sein auf gewisse HS, aber auch externe Umweltbedingungen könnten eine Erklärung sein. So beispielsweise die Elastizität oder Stärke des Holzes, die Eigenschaften der Rinde oder Krankheiten, auf die nur einige Arten befällt.

2. Methoden

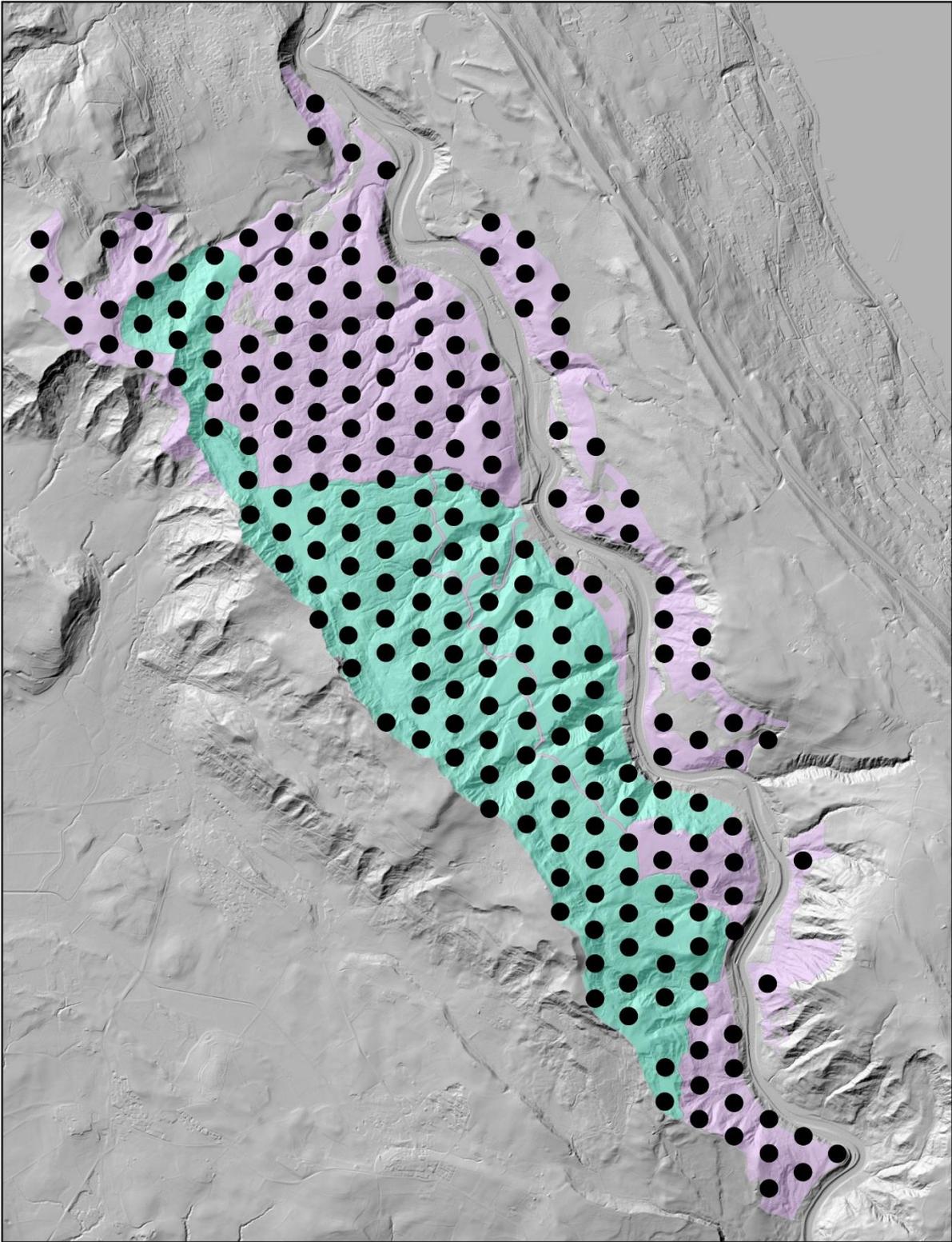
2.1 Gebietsprofil - Sihlwald

Der Sihlwald (Siehe Abbildung 1) liegt südwestlich des Zürichsees an der Albiskette und umfasst eine Fläche von rund 1100 ha. Der Wald verläuft dem Sihltal entlang, durch welches die Sihl fliesst und später nördlich des Zürichsees in die Limmat mündet. Das Gebiet liegt in der submontanen Höhenstufe und erstreckt sich von 467 bis 915 m. ü. M. Die Region hat einen jährlichen Niederschlag von gut 1300 mm und eine mittlere Jahrestemperatur um die 7° C. Die Albiskette gehört geologisch zur oberen Süswassermolasse und besteht grösstenteils aus Mergel und Sandstein. Durch die Verwitterung entstanden tiefgründige, nährstoffreiche Braunerden (Commarmot und Schmidt 2011).

Seit dem 14. Jahrhundert wurde der Sihlwald 500 Jahre lange als Nutzwald der Stadt Zürich gebraucht, um Brennholz zu liefern. Der Wald ist nahe der Stadt gelegen und die Sihl bietet ein ideales Transportmittel, um die Baumstämme ohne grossen Aufwand vom Sihlwald aus bis in die Stadt hinein zu flössen (Commarmot und Schmidt 2011). Lange Zeit wurde der Wald im Saumschlagbetrieb bewirtschaftet. Dabei wurden Streifen für Streifen abgeholzt und die Bäume danach 80 - 100 Jahre bis zum nächsten Schlag wachsen gelassen (Krebs 1947).

In den 80er Jahren beschloss man, im Sihlwald keine Eingriffe mehr durchzuführen und seine natürliche Entwicklung als Naturwald zu beobachten und zu analysieren. Nach Jahren der Planung wurde die Bewirtschaftung im Jahr 2000 eingestellt. Im Jahr 2007 unterzeichneten die Stadt und der Kanton Zürich einen langfristigen Waldreservatsvertrag für das Naturwaldprojekt Sihlwald. Heute besteht der Sihlwald aus zwei Teilen: der Naturerlebniszone (Waldschutzzone IVA) und der Kernzone (Waldschutzzone IVS2) (Siehe Abbildung 1). Während der Wald in der Naturerlebniszone Feuerstellen hat und betreten werden darf, herrscht in der Kernzone striktes Weggebot, um den Wald möglichst nicht zu stören (Kilchenmann 2019).

Im Sihlwald, der als Monitoring-Objekt dient, werden immer wieder Bestandesaufnahmen gemacht und die Daten ausgewertet, um Veränderungen der Waldstruktur erfassen zu können. Im Jahr 1981 wurde die erste Stichprobeninventur gemacht, in den Jahren 1989, 2003 und 2017 folgten weitere. So lassen sich verschiedene Entwicklungsprozesse genau analysieren und auswerten (Commarmot und Schmidt 2011). Bei der SPI 2017 wurden auf 226 Probeflächen (PF) insgesamt 3874 lebende Bäume erfasst. Die PF sind regelmässig über den ganzen Wald verteilt, um eine möglichst repräsentative Auswertung zu erhalten (Siehe Abbildung 1).



Legende

- Probeflächen (N = 226)
- Schutzzonen**
- Waldschutzzone IVA
 - Waldschutzzone IVS1

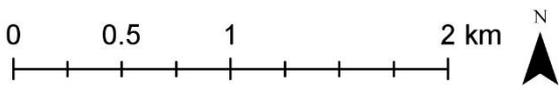


Abbildung 1: Karte vom Sihlwald mit den Schutzzonen und den Probeflächen (nicht massstabgetreu)

Im Sihlwald dominieren Buchen-Waldgesellschaften (Bu-Waldgesellschaften) des neutralen und basischen Bereichs. Vertreten sind vor allem Waldhirschen-Bu-, Waldmeister-Bu-, Zahnwurz-Bu- oder Aronstab-Bu-Waldgesellschaften. Da das Gebiet landschaftlich sehr divers ist, gibt es viele Standorte mit speziellen Bedingungen, sodass auch Eschen-, Erlen- oder Föhren-Birkenwälder vorkommen (Commarmot und Schmidt 2011). Von den 26 Baumarten im Sihlwald ist die Buche mit einem Stammzahl-Anteil von über 40% die dominierende Baumart. Ebenfalls relativ häufig vertreten sind die Fichte mit 19%, die Esche (*Fraxinus excelsior*) mit 13% und der Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) mit 10% (K. Brändli u. a. (in Arbeit)). Die restlichen 22 Baumarten kommen selten vor (Siehe Abbildung 2).

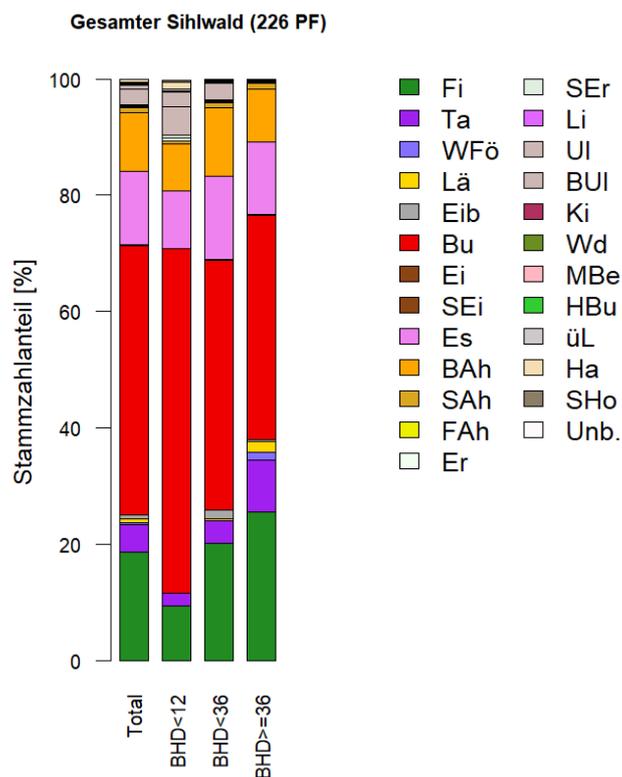


Abbildung 2: Stammzahlverteilung der Baumarten im Sihlwald bei der SPI 2017 nach BHD-Klassen (K. Brändli u. a. (in Arbeit))

Im Sihlwald ist die Baumartenvielfalt mit den 26 Arten, die auf den PF gefunden wurden, sehr hoch. Da die PF aber nur 1.23% der gesamten Waldfläche ausmachen, repräsentieren sie die tatsächliche Baumartenanzahl nur bis zu einem gewissen Grad.

Langfristig wird sich die konkurrenzstarke Buche ohne anthropogene Eingriffe noch weiter ausbreiten und die anderen, schwächeren Bäume verdrängen (Commarmot u. a. 2005). Die Kirschbäume (*Prunus avium*) beispielsweise konnten in einer Zeit aufwachsen, wo der Sihlwald noch stark bewirtschaftet wurde und sie genügend Platz und Licht hatten, um zu gedeihen. Mit der Zeit wird die Buche aber mehr Raum und Licht beanspruchen und sich weiter ausbreiten. Eine Verjüngung der lichtbedürftigen Kirschbäume wird dann unwahrscheinlich.

Der Holzvorrat und die Stammzahl nahmen in den 80er Jahren ab und in den 2000ern wieder deutlich zu. Bis 2017 stieg die Grundfläche deutlich an, während die Stammzahl stabil blieb. (K. Brändli u. a. (in Arbeit)) Im Jahr 2017 lag die Stammzahl bei 458 Bäumen/ha, die Grundfläche bei 35.8 m²/ha und der Holzvorrat bei 553.8 m³/ha (K. Brändli u. a. (in Arbeit)). Der Holzvorrat lag somit fast 60% über dem Schweizer Durchschnitt von 350 m³/ha (U.-B. Brändli 2010).

2.2 Inventurmethode

Die bei der SPI 2017 im Sihlwald verwendete Methodik folgt Tinner u. a. (2013). Diese Anleitung definiert die auf den PF zu erfassenden Merkmale. Ein detailliertes Aufnahmeprotokoll garantiert, dass die Daten sowohl innerhalb als auch zwischen verschiedenen Inventuren vergleichbar sind.

Die festgelegten PF werden mit zwei unterschiedlich grossen, konzentrischen Kreisen vermessen. Bei der kleineren Fläche von 200 m² (7.98 m Radius) werden alle stehenden Bäume ab 7 cm BHD aufgenommen, deren Stammmittelpunkt auf 1.30 m Höhe im Kreisradius liegt. Bei der grösseren Fläche von 500 m² (12.62 m Radius) werden dickere Bäume ab 36 cm BHD erfasst. Bei der SPI 2017 im Sihlwald wurde für den kleineren Kreis eine vergrösserte Fläche von 300 m² gemessen, damit der Radius mit den bisherigen Inventuren übereinstimmt und die Daten verglichen werden können (K. Brändli u. a. (in Arbeit)).

Diese Methodik ermöglicht ein genaueres Bild über den Waldbestand der PF und bietet eine Mischung zwischen einer breitflächigen Messung für die weit auseinanderstehenden, grossen Bäume und einer zeitsparenden Messung kleinerer Bäume auf engerem Raum.

In diesen PF werden nun diverse, genau vorgegebene Merkmale aufgenommen. Neben allgemeinen Angaben zur PF wie z.B. Neigung oder Relief werden an lebenden Probestämmen die folgenden Merkmale erfasst:

- Baumart (Siehe Anhang D)
- Wuchsform, Stammform, Stockausschlag, Wurzelteller, Zwiesel usw.
- Distanz [m] und Azimut [gon]
- Baumhöhe [m]
- Zustand [ahc] (Siehe Anhang B)
- BHD (= Brusthöhendurchmesser, bei 1.30 m) [cm]
- Schicht
- Habitatstrukturen (= HS)

Bei den toten Bäumen werden Insektenfrass und die folgenden HS aufgenommen: Höhlen und Löcher, Hohler Stamm und Konsolenpilze (inkl. Beschreibung der Art). Zusätzlich wird beim Dürrständer der Totholzabbau aufgezeichnet: Mit einem Sackmesser wird getestet, wie gut die Klinge in das Holz parallel und quer zu den Holzfasern eindringen kann. Die Stufen gehen von 1 bis 5, wobei 1 für frisches und 5 für pulvriges, stark zersetztes Totholz steht.

Die Verjüngung wird 10 m in westlicher Richtung weg vom Kreiszentrum in unterschiedlichen Radien erfasst. Im Kreis mit dem kleinsten Radius werden kleine Bäumchen bis 40 cm Höhe aufgenommen, im mittleren bis 130 cm und im dritten Radius die Bäume mit einem BHD bis 7 cm. Ist die Verjüngungsdichte spärlich, so verdreifachen sich die Radien, um mehr Fläche abzudecken und eine genauere Auswertung zu erhalten.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den HS und deshalb werden die anderen Messvorgaben nicht genauer ausgeführt. Die ausgewerteten HS wurden wie die ganze SPI 2017 nach der SPI-Anleitung (Tinner u. a. 2013) erfasst und nicht nach der vorgeschlagenen Typologie von Larrieu (Larrieu u. a. 2018), da die SPI 2017 gleich aufgenommen werden sollte, wie die letzten SPI, um vergleichbare Datensätze zu erhalten.

2.3 Habitatstrukturen

Habitatstrukturen (HS) sind wichtige, eigenständige Strukturen, welche verschiedenen Lebewesen zumindest zeitweise als Substrat oder Lebensraum dienen und zur Entwicklung, Ernährung, Unterschlupf oder Fortpflanzung beitragen (Larrieu u. a. 2018). Jede HS bietet eine differenzierte Oberfläche und stellt einen eigenen Lebensraum dar, auf die gewisse Lebewesen spezialisiert sind. Die HS dienen somit als Biodiversitätszeiger.

Bei der SPI 2017 wurden die HS in zwölf verschiedene Typen eingeteilt und total 504 HS an 473 Bäumen aufgenommen (Tinner u. a. 2013). In der Tabelle 1 werden die zehn HS, die an lebenden Bäumen gefunden wurden und ihre Effekte einzeln aufgeführt (Siehe Anhang C für die präzisen Abstufungen der HS). Wo keine spezifische Einteilung erwähnt wird, gibt es nur die Einordnung zwischen «vorhanden» und «nicht-vorhanden».



Abbildung 3: Rindenverletzung mit beginnender Überwallung

Habitatstrukturen	Definition	Effekt
Loch im Stamm	Loch mit einem Durchmesser von mindestens 3 cm und einer Tiefe von 5 cm in den Stamm hinein. Erfasst wird, ob es ein oder mehrere Löcher hat. (Siehe Abbildung 4)	Löcher und Höhlen bieten gepufferte Klimabedingungen und einen Unterschlupf für eine Vielzahl von Arten von Käfern bis grossen Säugern. Die Höhe entscheidet, welches Tier sich einquartieren wird. Sind die Höhlen am Grund des Stammes, so werden sie von verschiedenen kleinen Säugern bewohnt, oben werden sich Vögel einnisten. Primäre Höhlenbewohner sind beispielsweise Spechte, die das Loch noch formen und ausbauen. Sekundär ziehen dann Fledermäuse oder andere Vögel wie Eulen oder Käuze ein. Mulm dient Käfern zusätzlich als Nahrungsquelle.
Höhle mit Mulm	Höhle am Stammfuss (bis 1.5 m Höhe) mit einer faust-grossen Öffnung und Mulm (stark zersetztes, pulvriges Holz)	
Hohler Stamm	Hohler Stamm hat eine Höhle, die die Öffnung bis 1.5 m Höhe hat, mind. 50 cm hoch ist und 50% des Durchmessers einnimmt.	
Flächige Rindenverletzungen	Flächige Rindenverletzungen haben eine Minimalfläche eines A5-Blattes und gehen bis ins Holz hinein. Mögliche Ursachen sind ein umgefallener Baum, Steinschlag, Wildtiere, Sonnenbrand oder Käferbefall. Die Rindenverletzungen werden eingeteilt in 1-4 Handflächen und grösser.	Vögel profitieren von Nistplätzen oder Futterversteckmöglichkeiten unter der abgebrochenen Rinde und von den vorhandenen Pilzen und Insekten. Freiliegendes Holz kann sich mit der Zeit zu einem Fäulnisloch entwickeln, wenn der Baum nicht in der Lage ist, die Wunde zu versiegeln.
Saft-/ Harzfluss	Saft-/Harzfluss entsteht bei einem Baum als Reaktion auf eine Verletzung, um die Wunde zu versiegeln.	Der Saft und das Harz sind Nahrungsquellen für Insekten.
Risse	Risse sind Spalten, welche über einen Meter lang sind und bis ins Holz hinein reichen. (Siehe Abbildung 5) Risse werden in verschiedene Klassen eingeordnet: 1-2 m langer Riss, > 2 m langer Riss oder mehrere Risse	Diese Verletzungen des Baumes erleichtern Pilzen das Eindringen in den Baum und somit dessen Befall. Mit den Pilzen kommen auch saproxyliche Insekten in den Stamm hinein, welche den Holzzersetzungsprozess ankurbeln. Tiefe Risse dienen Vögeln und Fledermäusen als Unterschlupf.
Konsolenpilze	Konsolenpilze werden bei der Inventur angegeben, wenn ihre Fruchtkörper mindestens 5 cm Durchmesser haben.	Rindenpilze können das Auftreten von Holzfäulen fördern und bilden das Substrat für mykophage Pilze oder Insekten.
Kronentotholz	Von Kronentotholz spricht man, wenn mindestens 10% des Kronenvolumens eines Baumes abgestorben ist.	Hat ein Baum abgestorbene, aber mehrheitlich intakte Äste in der Baumkrone, so bietet er (xero-)thermophilen Käfern einen Lebensraum und den insektenfressenden Vögeln eine Nahrungsstelle. Zusätzlich können sich auch diverse Pilze auf dem toten Holz ansiedeln. Je nach Zerfallsstadium siedeln sich andere Pilze an und werden voneinander abgelöst.
Kronenbruch	Mind. 10% der Baumkrone sind abgebrochen und die Bruchstellen noch offen. Kronenbruch wird in die zwei Stufen 10-50% und > 50% eingeteilt. (Siehe Abbildung 6)	
Stammbruch	Von Stammbruch spricht man, wenn die ganze Krone abgebrochen ist. Eingeteilt wird in einfacher/ gesplitterter Kronenbruch mit/ohne Ersatzkrone	

Tabelle 1: Habitatstrukturen im Überblick ((WSL 2010) und (Tinner u. a. 2013))



Abbildung 4: Höhle im Stamm



Abbildung 5: 2 Meter langer Riss

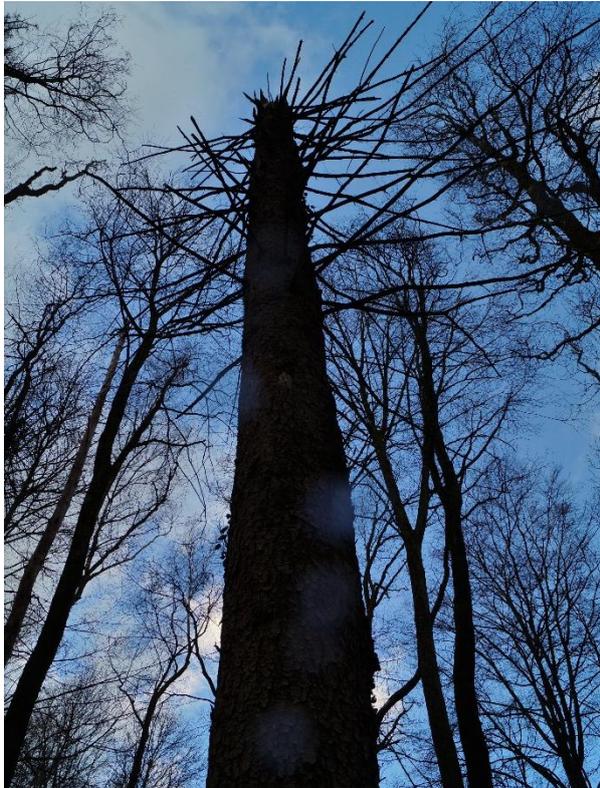


Abbildung 6: Kronenbruch



Abbildung 7: Abgebrochener Ast

2.3.1 Entstehung

Zur Entstehung der HS ist noch nicht viel bekannt. Es gibt gewisse Faktoren, die das Auftreten von HS erwiesenermassen fördern. So zum Beispiel der BHD, die Baumart oder die Zeit der Nicht-Bewirtschaftung (Larrieu und Cabanettes 2012; Bütler u. a. 2013; Vuidot u. a. 2011). Es gibt auch Umweltbedingungen, wie Schnee und Sturm, die mechanische Schäden verursachen, welche zu HS führen. Weitere Gründe können Präferenzen von Tieren oder Pilzen, die nur die einen Baumarten besiedeln oder befallen oder die physische Verfassung der Baumarten sein.

Ist ein Baum verletzt, so wird er viel anfälliger auf Infizierungen von Krankheiten und auf den Befall von xylobionten Tieren. Ein Beispiel ist das Eschentriebsterben, welches Kronentotholz hervorruft und in fortgeschrittenem Stadium die Esche abtötet. Das Eschentriebsterben wird von einem epidemischen Pilz (*Hymenoscyphus fraxineus*) aus Ostasien verursacht und ist verantwortlich für das Sterben unzähliger Eschen. Infiziert der Pilz ein Eschenblatt, so bildet er ein Myzel aus, welches sich von den Blattspreiten über die Blattspindeln bis in die Triebe ausbreitet, wo er Rinde und Kambium befällt und olivbraun bis orange Rindennekrosen entstehen. Dies führt zur Zerstörung der Transport- und Wachstumsgewebe und zum Triebsterben. Auch die Stammbasis wird befallen und Stammfussnekrosen werden verursacht. Oftmals sterben jüngere Bäume schneller am Eschentriebsterben als ältere (Rigling u. a. 2016).

Die Fichten sind zurzeit in der Schweiz ebenfalls gefährdet durch den Fichtenborkenkäfer. Der Buchdrucker (*Ips typographus* L.) ist ein R-Strategie, der sich schnell vermehrt. Er besiedelt sterbende und abgestorbene Bäume und fördert so den Abbau des Baumes (Wermelinger 2004). Seit Ende 20. Jahrhundert befällt er immer wieder epidemieartig Fichtenbestände, wenn die Wälder durch starke Stürme oder heisse, trockene Sommer geschwächt waren (Meier, Gall, und Forster 2003).

2.3.2 HS als Lebensraum

Die HS sind mit ihrer Strukturvielfalt für diverse Lebewesen sehr wichtig und unerlässlich. Sie dienen als Rückzugsort, als Nistplatz, als Nahrung (für xylobioten Arten) oder als Lebensraum der Beute (für insektenfressende Tiere). Alte, dicke Bäume weisen sehr häufig solche ausgeprägten Strukturen auf und werden «Habitatbäume» genannt. Für Vögel dienen diese Bäume zum einen als Nahrungsquelle (Insekten) und zum anderen als Nistplätze. Ist ein Baum noch unbeschädigt, so werden primäre Höhlenbrüter wie Spechte selbst ein Loch in den Stamm schlagen und sich eine Höhle formen. Wird die Höhle dann irgendwann verlassen, so kommen sekundäre Höhlenbrüter, wie Eulen oder Singvögel und nisten sich in den vorgefertigten Höhlen ein. Xylobionte Insekten dagegen nutzen das Holz zum einen als Nahrung und zum anderen als Lebensraum und Larvenablage. Unter den Säugetieren sind die Fledermäuse als sekundäre Höhlenbewohner am stärksten auf Höhlen angewiesen. Es gibt aber auch Arten, die lieber an Ästen oder Stämmen hängen (WSL 2010). Zudem gibt es auch diverse Bakterien, Pilze, Moose und Flechten, die HS oder tote Bäume besiedeln.

2.4 Statistische Analysen

Für die statistische Auswertung der Daten wurden generalisierte lineare Modelle (GLM) verwendet. Die verwendeten Datentypen waren sowohl Integer als auch Boolean (Siehe Anhang E). Bei dem Modell wurden das Auftreten der HS als Zielvariable und der BHD, die Baumart, Entwicklungsstufe und das Relief als erklärende Variablen und somit potenzielle Einflussfaktoren festgelegt. Das GLM zeigt die Einflüsse der erklärenden Variablen auf die Zielvariable «HS». Bei der Resultatausgabe wird jeweils die geschätzte Veränderung (Ansatz), die Standardabweichung, der Z-Wert und der P-Wert angegeben (Siehe Anhang F). Der Z-Wert ist der Ansatz dividiert durch die Standardabweichung. Der P-Wert gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass das Ergebnis oder ein Extremes eintritt, wenn die Unterschiede rein zufällig sind. Bei einer kleinen resultierenden Wahrscheinlichkeit wird das Ergebnis als signifikant eingestuft. Ist der P-Wert kleiner als 0.1%, so ist das Ergebnis hochsignifikant, zwischen 0.1 und 1% gilt der Zusammenhang als signifikant und von 1 - 5% als leicht signifikant.

Der BHD zeigt zum einen die Angriffsfläche an, die ein Baum bietet für allfällige Verletzungen und zum anderen auch eine Annäherung des Alters. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen eines Zufallereignisses steigt dementsprechend mit der Zeit. Ebenfalls ist der BHD ein annähernder Wert für die Baumhöhe und somit für die Schicht, in welcher der Baum steht.

Die Baumart bestimmt die physikalischen Eigenschaften eines Baumes (Elastizität oder Dichte des Holzes, Dicke der Rinde oder die Wuchsform). Gewisse bestimmte Holzbesiedler haben sich auf eine Baumart spezialisiert und schwächen so nur diese ausgewählte Art.

Die Entwicklungsstufe besagt, in welcher Höhe der Baum lebt und was seine Rolle im System ist. Lebt ein Baum in der Unterschicht, so ist er unterdrückt von den dominierenden Bäumen und konkurrenziert die anderen Bäume um die wenigen verfügbaren Ressourcen.

Bei bestimmten HS kann auch das Relief einen Einfluss haben auf die Auftretenswahrscheinlichkeit. Steht ein Baum direkt unter einem steilen Hang, so löst sich öfters ein Stein, fällt hinunter und verletzt ihn als dies bei flacherem Gelände der Fall wäre.

Für alle statistischen Analysen wurde die Statistiksoftware «R» Version 3.5.3 (R Core Team 2019) und «RStudio» Version 1.0.153 (R Studio Team 2016) verwendet. Die genutzten Packages sind folgende: Das Package «Stats» wurde für GLMs verwendet (R Core Team 2019) und aus dem Package «DHARMA» wurde der Befehl «simulateResiduals» genutzt, um das GLM anschliessend zu testen (Hartig 2019). Die Funktion «allEffects» in dem Package «effects» (Fox und Weisberg 2019) wurde für die Darstellungen der einzelnen Einflüsse der erklärenden Variablen des GLM genutzt und die Funktion «radarchart» in «fmsb» (Nakazawa 2018) für das Erstellen eines Netzdiagrammes (Radarplots).

3. Resultate

Für die Auswertungen dieser Arbeit wurde der Fokus auf die HS der lebenden Bäume gelegt und deshalb wurden alle Daten der toten Bäume nicht weiter berücksichtigt. Dies führt dazu, dass nicht-aussagekräftige Daten von der Analyse ausgeschlossen und die Auswertungsqualität erhöht wurde.

3.1 Datengrundlage

Auf den 226 PF der SPI 2017 im Sihlwald wurden 4176 Bäume aufgenommen, davon 3874 lebende und 302 tote Bäume waren. Zudem wurden 504 HS auf 473 Bäumen aufgenommen. Somit gibt es durchschnittlich 2 Habitatbäume bzw. 2.2 HS pro Probefläche.

Habitatstrukturen-Verteilung

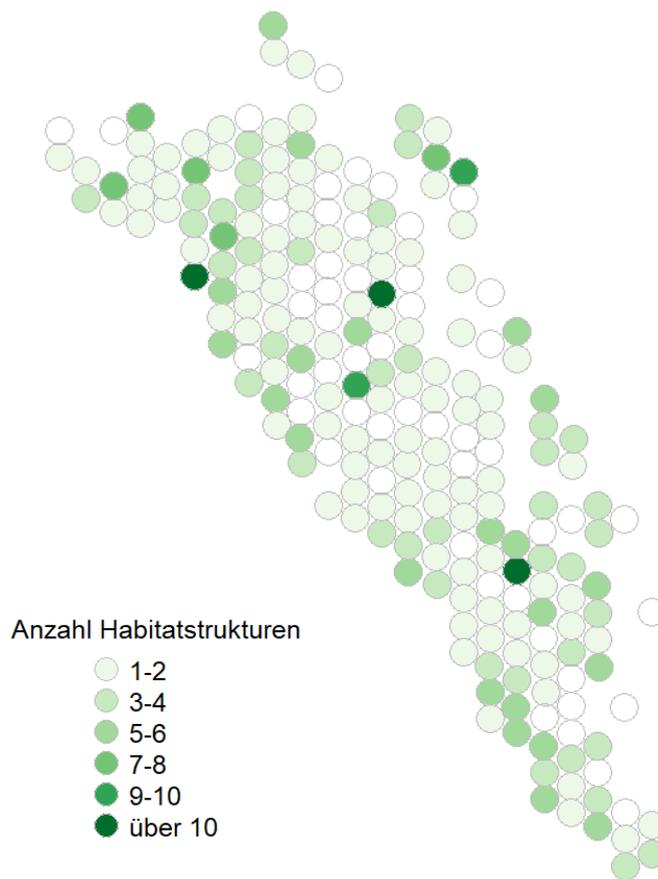


Abbildung 8: Habitatstrukturen-Verteilung über den gesamten Sihlwald

Bei einem Blick auf die Verteilungskarte erscheinen die HS zufällig und ohne auffällige Gesetzmässigkeit verteilt (Siehe Abbildung 8). Die verschiedenen HS treten sehr unterschiedlich häufig auf: Während es über 200 Bäume mit Kronentotholz gibt, haben gerade einmal 8 Bäume ein Loch im Stamm (Siehe Tabelle 2). Der Fokus wurde auf diejenigen HS gelegt, welche mehr als 50 Mal aufgenommen wurden. Die häufigsten drei HS sind Rindenverletzung, Kronentotholz und Kronenbruch. Diese wurden im Kapitel «3.2 Auswertungen» genauer analysiert.

Tabelle: HS an Lebenden Bäumen

HS	HS bei lebenden Bäumen	BHD-Bereich (in cm)	Median (in cm)	Baumarten
Löcher im Stamm	8	18 - 77	32.5	Fi Bu Es BAh BUI
Höhle mit Mulm	8	24 - 64	38.5	Fi Ta Eib Bu BAh
Hohler Stamm	2	22, 103	-	Fi Bu
Flächige Rindenverletzungen	90	7 - 103	35.5	Fi Ta Fö Eib Bu Esch Bah SpAh SEr UI MBe
Saft-/ Harzfluss	28	13 - 103	44.5	Fi Ta Bu
Risse	11	10 - 103	20	Fi Ta Eib Bu Esch
Konsolenpilze	1	50	50	BAh
Kronentotholz	220	7 - 80	23	Fi Ta Bu Ei Esch BAh UI Ki
Kronenbruch	133	7 - 74	17	Fi Ta Fö Eib Bu Esch BAh SpAh SEr UI MBe
Stammbruch	3	10, 55, 57	55	Bu Esch
HS total	504	7 - 103	24	Fi Ta Fö Eib Bu Ei Esch BAh SpAh SEr UI BUI Ki MBe

Tabelle 2: HS an den lebenden Bäumen der 226 PF der SPI 2017 mit der Anzahl HS, dem BHD und der Baumart

3.2 Auswertungen

Auf den 226 PF befinden sich insgesamt 504 HS sowohl an sehr dünnen als auch an sehr dicken Bäumen. Es gibt mengenmässig sehr viele dünne Bäume, da diese weniger Fläche beanspruchen. Je dicker die einzelnen Bäume werden, desto mehr Platz nehmen sie ein und desto weniger Bäume werden es pro Fläche. Aus diesem Grund liegt der durchschnittliche BHD bei tiefen 24 cm.

Bei den dünnen Bäumen von 7 bis 12 cm haben 10.5% aller Bäume eine HS, bei den mittleren Bäumen von 12 - 36 cm liegt der HS-Anteil bei 15.5%, während die dicken Bäume mit einem BHD über 36 cm zu 14% eine HS aufweisen. Die Wahrscheinlichkeit für einen Baum, eine HS zu haben, ist am Anfang bei gut 10%, steigt mit dem BHD an und fällt wieder, wenn der Baum eine gewisse Dicke (36 cm) erreicht hat.

BHD-Verteilung der lebenden Bäume

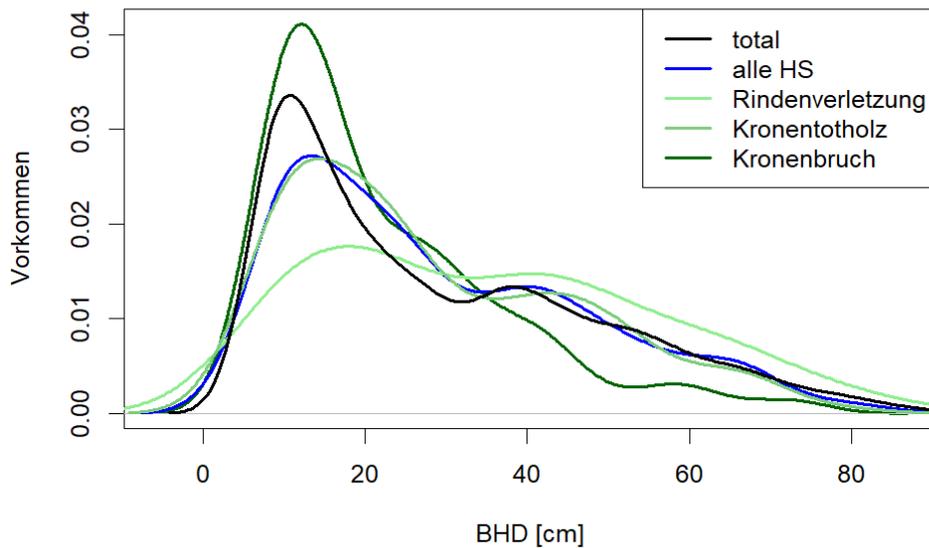


Abbildung 9: BHD-Verteilungen der verschiedenen HS und der Gesamtheit aller Bäume.

Die BHD-Verteilung der Bäume mit HS verläuft bei allen HS-Typen ähnlich (Abbildung 9). Die Kurve «alle HS» ist etwas weniger stark ausgeprägt bei einem BHD unter 20 cm als die Verteilung aller Bäume und fällt etwas weniger stark. Kronenbrüche treten dagegen verstärkt bei dünneren Bäumen auf. Die Verteilung der Bäume mit Rindenverletzungen ist viel regelmässiger und Rindenverletzungen kommen bei den Bäumen bis zu einem hohen BHD und somit hohem Alter vermehrt vor.

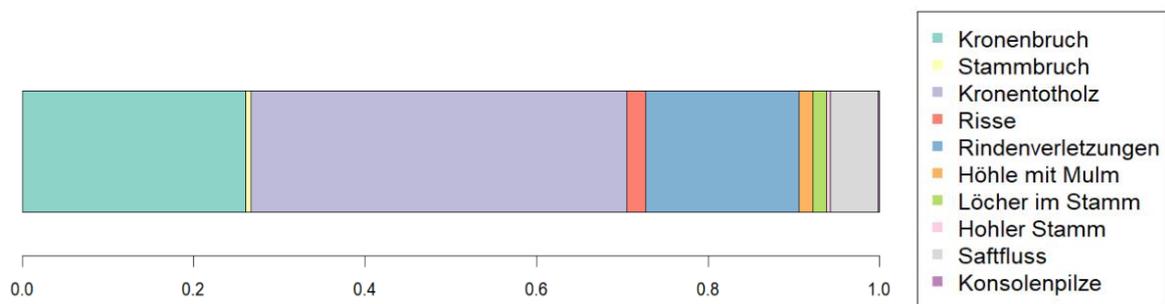


Abbildung 10: prozentuale Anteile der einzelnen HS

Anteilmässig sind vor allem Kronentotholz, Kronenbruch und Rindenverletzungen als HS stark vertreten, und ergeben zusammen einen Anteil von 88%, während die restlichen HS-Typen sehr selten auftreten (Abbildung 10). Aus diesem Grund wurden nur diese drei HS genauer analysiert, da bei den anderen auf Grund der wenigen Daten keine aussagekräftigen Auswertungen gemacht werden konnten.

3.2.1 Habitatstrukturen allgemein

Um die Einflüsse der Baumarten optisch darzustellen, wurden die Z-Werte der Baumarten aus den GLMs in ein Netzdiagramm gefügt. So sind Abweichungen einzelner Baumarten auf einem Blick erkennbar. Der innerste Kreis stellt den negativen Einfluss der Baumart auf HS dar, der zweite die Nulllinie und die restlichen Kreise gegen aussen sind positiv.

Einfluss der Baumarten

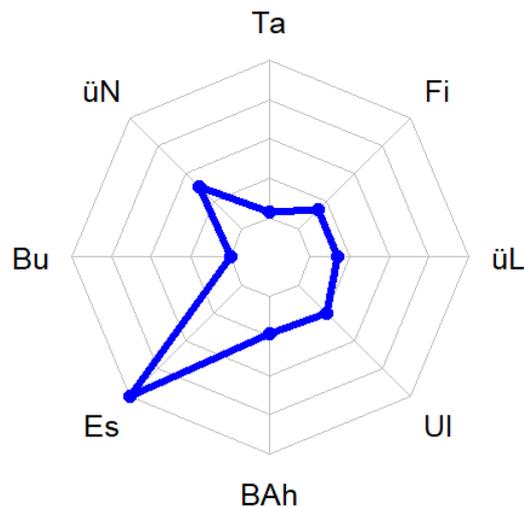


Abbildung 11: Netzdiagramm über den Einfluss der Baumarten auf das Vorkommen aller aufgenommenen HS

Bei diesem Netzdiagramm sind zwei Ausprägungen ersichtlich (Abbildung 11): Die beiden Baumarten mit einem Einfluss auf die HS sind die Esche (Es) und die Eibe (*Taxus baccata*; in üN zusammengefasst). Die Esche hat einen starken, hoch signifikanten Einfluss auf das Vorkommen der HS. Wenn die Fichte (Fi) als Referenzwert eine HS mehr bekommt, so steigen die HS der Esche um 2 an. Die Chance für eine Esche ist also doppelt so hoch, eine HS zu haben wie für eine Fichte.

Ebenfalls einen positiven Effekt hat die Baumarten-Gruppe «übrige Nadelbäume» (üN) im Vergleich zur Fichte. Bei genauerer Betrachtung hat die Eibe einen ebenfalls hochsignifikanten, starken Einfluss auf die Auftretenswahrscheinlichkeit der HS, während die Föhre und die Lärche keine Ausprägungen zeigen. Steigt die Anzahl HS bei der Fichte um eins, so haben die Eschen 1.8 HS mehr.

Bei der Tanne und der Buche ist der Zusammenhang Baumart – HS dagegen signifikant negativ. Dies bedeutet, dass sie vergleichsweise weniger HS haben als restlichen Bäume.

Bei den restlichen Baumarten sind keine signifikanten Abweichungen zu der Fichte zu erkennen. Auch der BHD, das Relief und die Bestandesstruktur zeigen keine deutlichen Effekte auf das HS-Vorkommen.

3.2.2 Rindenverletzungen

Die Verteilung der Bäume mit Rindenverletzungen verschiebt sich auf der BHD-Kurve deutlich in die höheren BHD-Stufen, während die dünneren Bäumen sichtbar weniger häufig betroffen sind (Siehe Abbildung 13). Der deutlichste Effekt auf das Rindenverletzungs-Vorkommen ist bei den üN zu sehen (Siehe Abbildung 12). Die üN werden noch einmal genauer angeschaut (Siehe Anhang F: Abbildung 23), und in Eibe, Waldföhre (*Pinus sylvestris*) und Lärche (*Larix decidua*) aufgeteilt. Bei der Eibe gibt es eine hochsignifikante, positive Korrelation zwischen der Baumart und dem Vorkommen der flächigen Rindenverletzungen. Pro Rindenverletzung mehr an einer Fichte, gibt es 4 zusätzliche an Eiben. Ein Drittel der 39 Eiben ist von dieser HS betroffen. Während der Rindenverletzungs-Anteil der Buche bei 40% liegt und ist somit gleich hoch ist wie der Stammanzahl-Anteil, machen die Eiben im Sihlwald lediglich einen Stammanzahl-Anteil von 0.8% aus (K. Brändli u. a. (in Arbeit)) und trotzdem sind 14% der betroffenen Bäume mit Rindenverletzungen Eiben.

Bei den Laubbäumen hat der Bergahorn eine höhere Wahrscheinlichkeit, eine Verletzung zu bekommen. Die Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) und die Mehlbeere (*Sorbus aria*) haben ebenfalls ein leicht signifikant erhöhtes Risiko, wobei beide Baumarten eine einzige Rindenverletzung aufweisen. Da sie aber sehr selten vorkommen, ist eine HS schon genug, um einen leicht signifikanten Effekt hervorzurufen.

Bei den flächigen Rindenverletzungen spielt auch der BHD eine entscheidende Rolle: Je dicker ein Baum wird, desto grösser ist seine Chance, verletzt zu werden.

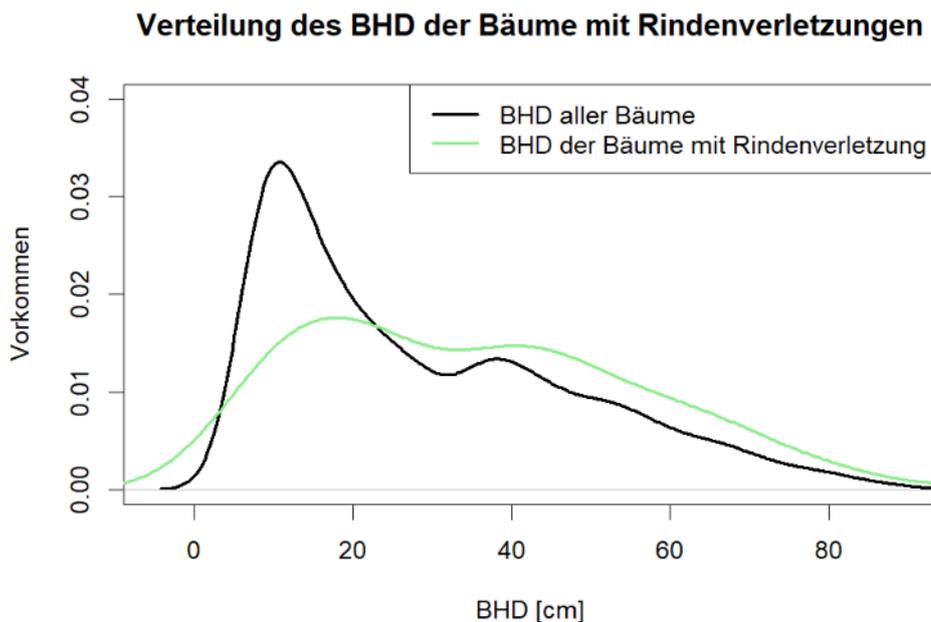


Abbildung 12: Verteilungskurve der BHD für alle Bäume und die Bäume mit Rindenverletzungen

Einfluss der Baumarten

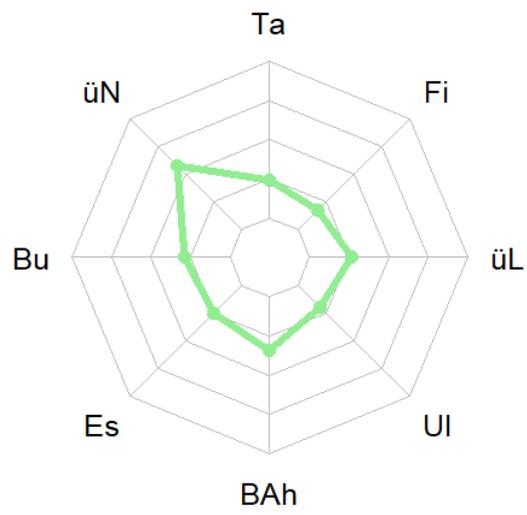


Abbildung 13: Netzdiagramm über den Einfluss der Baumarten auf das Vorkommen der Bäume mit Rindenverletzungen

3.2.3 Kronentotholz

Bei dünneren Bäumen tritt Kronentotholz häufiger auf, der Median der BHD-Verteilung liegt bei 23 cm. Die BHD-Verteilung und der Median der Kronentotholz-Bäume sind nahezu identisch zu der Verteilung der gesamten HS-Bäumen und auch ähnlich zu der Verteilung aller Bäumen.

Im Netzdiagramm ist die Esche besonders auffällig (Siehe Abbildung 14). Sie hat einen hochsignifikant höheren Anteil an Bäumen mit Kronentotholz. Die Wahrscheinlichkeit, dass Kronenholz abstirbt, ist bei der Esche 5-mal höher als bei der Referenzbaumart Fichte. Von den 220 Bäumen mit Kronentotholz sind 85% davon Eschen.

Ein ebenfalls signifikanter Effekt hat der Bergahorn, wobei dieser weniger signifikant und schwächer ausgeprägt ist. Die HS treten bei dem Bergahorn um die Hälfte häufiger auf als bei der Fichte.

Einfluss der Baumarten

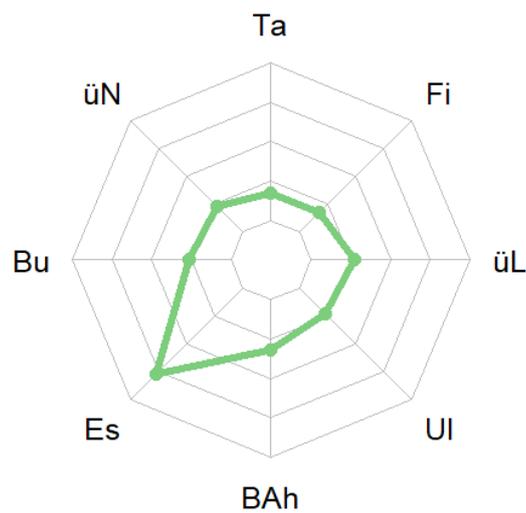


Abbildung 14: Netzdiagramm über den Einfluss der Baumarten auf das Vorkommen der Bäume mit Kronentotholz

3.2.4 Kronenbruch

Bei den Kronenbrüchen gibt es keine auffälligen Unterschiede zwischen den einzelnen Baumarten im Netzdiagramm (Siehe Abbildung 15). Keine Baumart hat einen positiven Effekt auf Kronentotholz – im Gegenteil: Die Esche hat einen hoch signifikanten negativen Effekt. Dies bedeutet, dass die Esche weniger stark von dem Kronentotholz betroffen ist als die Fichte. Derselbe Trend, aber weniger signifikant, ist bei der Buche feststellbar.

Die BHD der Bäume hat einen hoch signifikanten negativ Trend: Je dicker ein Baum wird, desto kleiner ist die Chance auf ein Kronenbruch (Abbildung 16). Dünnere Bäume sind also oft stärker betroffen als ältere, dickere Bäume. Auch bei der BHD-Verteilung steigt die Dichte-Kurve bei den Bäumen bis 20 cm höher an als die BHD-Dichte-Kurve aller Bäume (Abbildung 17). Dafür sinkt die Kurve bei über 40 cm BHD rasch unter die Kurve aller Bäume.

Einfluss der Baumarten

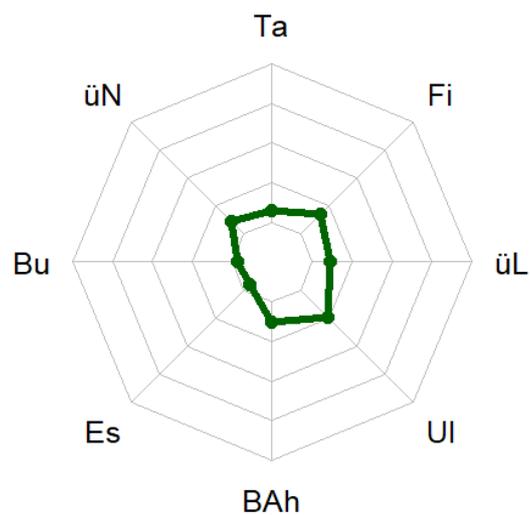


Abbildung 15: Netzdiagramm über den Einfluss der Baumarten auf das Vorkommen der Bäume mit Kronenbrüchen

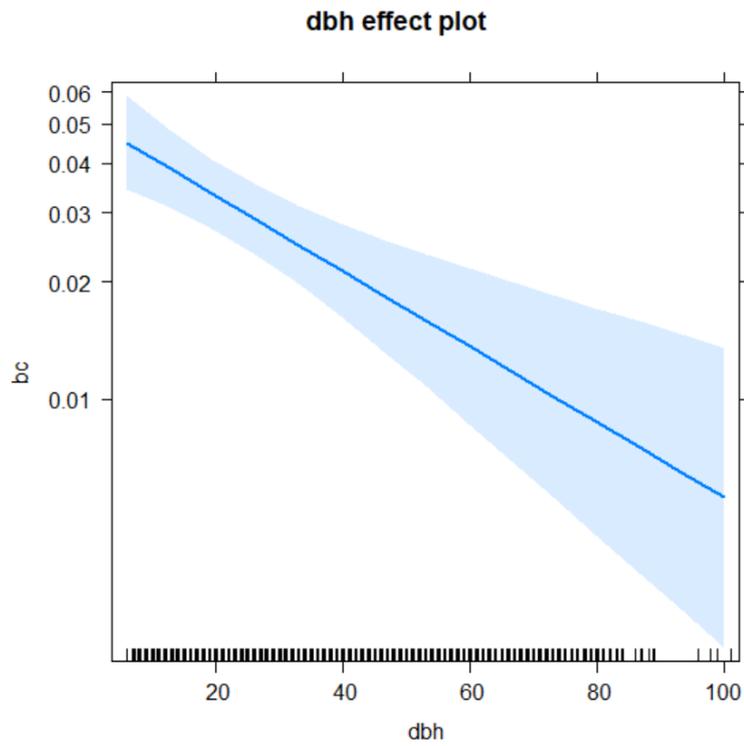


Abbildung 16: GLM-Plot für den Effekt des BHDs

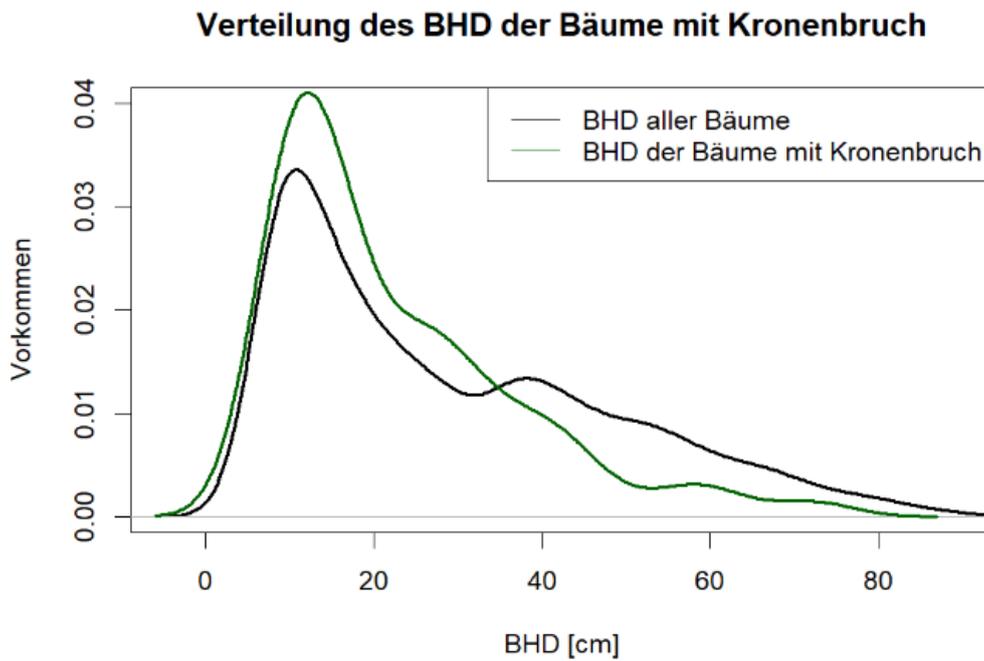


Abbildung 17: Verteilungskurve der BHD für alle Bäume und die Bäume mit Kronenbruch

4. Diskussion

4.1 BHD

Auf den ersten Blick hat der BHD eines Baumes keinen Einfluss auf das HS-Vorkommen. Dies ist aber dadurch zu erklären, dass der BHD unterschiedliche Effekte auf die verschiedenen HS hat:

Bei den **Rindenverletzungen** ist eine signifikant positive Steigung zu erkennen. Mit zunehmendem Baumdurchmesser und somit grösserer Stammoberfläche nimmt auch die Wahrscheinlichkeit für eine Verletzung der Rinde zu. Diese Ergebnisse bestätigen die Hypothese 1. Es gibt aber auch Einwände, die gegen diese Interpretation sprechen: Zum einen ist es eine Frage der Proportion: Für einen 20 cm dicken Baum ist es schwieriger, eine Rindenverletzung mit 20 cm Durchmesser zu überleben, als für einen viel dickeren Baum. Beim dicken Baum ist im Verhältnis ein viel kleinerer Schaden entstanden, den er gut überleben kann. Aus dieser Überlegung lässt sich schliessen, dass diese positive Korrelation BHD-Rindenverletzung nicht die Treffer-Wahrscheinlichkeit für einen Baum zeigt, sondern dass dicke Bäume eine solche Verletzung eher überleben können. Zum anderen reagieren Bäume häufig auf Rindenverletzungen, in dem sie die betroffene Stelle überwallen. Mit diesem langsamen Überwachsen der verletzten Fläche schützt der Baum sein Holz vor dem Befall von Pilzen und Insekten. Innert 10 Jahren kann ein Baum die Wunde eines abgesagten Astes wieder komplett verschliessen (Anderson 1958). Die Fläche von einer Rindenverletzungen nimmt mit den Jahren der Überwallung ab, da der Baum versucht, die Wunde zu verschliessen. So werden die bereits zuwachsenden Rindenverletzungen nicht mehr aufgenommen, wenn sie die Fläche eines A5-Blattes unterschreiten, was eine Verfälschung der Daten zufolge hat.

Bei den anderen beiden HS verhält es sich umgekehrt und die Hypothese 1 wird widerlegt: Der Effekt des BHDs auf das Auftreten von **Kronenbrüchen** ist signifikant negativ, das heisst die Wahrscheinlichkeit, einen Kronenbruch zu bekommen, sinkt mit steigendem BHD. Die Ursachen von Kronenbrüchen sind oft herabfallende Baumteile oder grosse Steine. Ein Baum kann nur von einem herabfallenden Ast getroffen werden, wenn er unter einem anderen Baum steht. Folglich sind Bäume, die in der Mittel- oder Unterschicht sind, eher von Kronenbrüchen betroffen. Bei dem **Kronentotholz** sind ebenfalls vermehrt die dünneren Bäume betroffen. Hier könnten die Unterdrückung und die Lichtknappheit Erklärungen sein, dass Äste absterben, wenn der Baum zu wenig Ressourcen hat, alle Äste mit genügend Energie zu versorgen.

Die Kronenbrüche sind direkt mit der normalen Mortalitätsrate vergleichbar: Im Unterholz hat es unzählige kleine Bäume mit einem BHD über 7 cm, die schnell abbrechen, wenn sie getroffen werden und eine hohe Sterberate besitzen. Wenn ein starker Ast eines Kronendach-bildenden Baumes auf die kleineren Bäume hinunterfällt, dann werden mehr Bäume getroffen, je kleiner sie sind und je näher sie zusammenstehen. Werden die Bäume grösser, so brauchen sie mehr Platz und breiten sich aus. Dabei werden sie automatisch ausgedünnt und nur die konkurrenzstärkeren Bäume überleben, während die schwächeren (ev. sogar verletzten) Bäume absterben. Die Bäume in der Mittelschicht können zwar auch von niederfallenden Baumteilen getroffen und verletzt werden, doch aufgrund der geringeren Standdichte werden weniger Bäume Schaden nehmen, als bei kleineren Bäumen in der Unterschicht.

Ebenfalls ein Aspekt, der nicht vernachlässigt werden darf bei HS in den Kronen, ist die Sichtbarkeit, die teils nicht gewährleistet ist. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die Bäume im Wald so eng stehen, dass nicht klar ist, wo der eine Baum aufhört und wo der nächste anfängt. So sind die abgebrochenen Äste vom Boden aus zum Teil nicht gut sichtbar. Insbesondere Kronentotholz ist

schwierig zu erkennen, da die Krone oft hoch oben ist und die toten Äste nicht als solche erkannt werden, wenn sie noch mit unversehrter Rinde bedeckt sind. Werden die Inventuren im Winter durchgeführt, sind alle Äste kahl und sehen sich zum Verwechseln ähnlich. Im Sommer dagegen sind die toten Äste von den Blättern der lebenden Äste nebenan verdeckt. So könnten weniger HS aufgenommen werden, als es tatsächlich hat.

In der Auswertung bestätigte sich der entscheidende Effekt des BHDs auf die HS-Auftretenswahrscheinlichkeit. Aber gibt es auch HS wie das Kronentotholz, welches vermehrt bei dünneren, kleineren Bäumen auftritt und dessen Auftreten mit zunehmender Baumdurchmesser abnimmt. Bei den Rindenverletzungen dagegen nimmt die Auftretens-Wahrscheinlichkeit einer Rindenverletzung proportional mit dem BHD zu. Daraus lässt sich schliessen, dass die Hypothese 1 weder angenommen noch widerlegt werden kann. Dass der BHD einen wichtigen Einfluss auf die HS-Vorkommen hat, wurde aber schon in diversen Studien festgestellt und wurde in dieser Arbeit bestätigt (Bütler u. a. 2013; Larrieu und Cabanettes 2012; Regnery u. a. 2013; Vuidot u. a. 2011).

4.2 Baumarten

Wie die Hypothese 2 annimmt, spielt die Baumart eine wichtige Rolle bei der Auftretenshäufigkeit gewisser HS. Wie im Kapitel «3.2.1 Habitatstrukturen allgemein» gesehen, gibt es bei der Auswertung der gesamten HS zwei Baumarten, deren Effekt signifikant ist: Die Esche und die Eibe.

Bei den **Rindenverletzungen** sticht die Eibe signifikant heraus: Die Eibe macht nur einen Stammanzahl-Anteil von 0.8% aus im Sihlwald, aber 14% aller Rindenverletzungen wurden an Eiben gefunden. Das Schalenwild frisst die Rinde der Eibe ab und fügt dem Baum somit Rindenverletzungen zu (Schütt 2014). Während bei Pferden, Schweinen oder Ziegen nur wenige Gramm pro Kilogramm Körpergewicht ausreichen, um das Tier zu vergiften, machen die Taxine den Rehen und Hirschen offenbar nichts aus – im Gegenteil, das Schalenwild wählt die Eibe bewusst als Nahrung aus (Schütt 2014). Zur Zeit herrschen Rekordbestände bei den Rehen und Hirschen, da die Bestände ungenügend reguliert werden und es zu wenige Fressfeinde des Schalenwildes gibt (Meier u. a. 2013). Somit vermehren sie sich überproportional und brauchen dementsprechend mehr Futter, welches sie durch das Abfressen bestimmter Baumarten bekommen. Betroffen davon sind vor allem die Eiben, die Tannen- und Laubholzverjüngungen. Bei Verjüngungskontrollen wird die Verbissintensität gemessen, also die verbissenen Triebe im Verhältnis zu der totalen Anzahl an vorhandener Verjüngung. Wird vom Schalenwild mehr verbissen als nachwächst, ist die Verjüngung rückläufig und die Regulierung des Wild-Bestandes ungenügend, da es mehr Rehe hat, als der Wald kompensieren kann (Meier u. a. 2013).

Will man den Wald und insbesondere die Eiben und Tannen vor zu starkem Verbiss schützen, so sollten die Wildbestände reguliert und so der Verjüngung die Möglichkeit gegeben werden, ungestört wachsen zu können. Die Rekordpopulation des Schalenwildes fördert mehr HS und einige Lebewesen haben so mehr Lebensräume. In der Schweiz gibt es nur noch wenige Eiben. Von über 3'800 aufgenommenen Bäumen im Sihlwald waren es gerade einmal 39 Eiben. Problematisch ist es auch für die Eibenverjüngung, die unter der hohen Reh-Population leidet. Da im Sihlwald wegen der Naturreservatspolitik bewusst nicht eingegriffen wird, hat das Erhalten der Eibe in diesem Wald keine Priorität und die betroffenen Bäume werden deshalb nicht geschützt.

Die zweite auffallende Baumart ist die Esche. Mit rund 85% der gefundenen Bäume mit **Kronentotholz** haben die Eschen ein starkes Risiko, dass die Äste absterben. Kronentotholz wird häufig von Bakterien, Viren oder Pilzen ausgelöst. Auch bei der Esche ist dies der Fall: Das Eschentriebsterben verbreitete

sich in den letzten Jahren epidemieartig in der ganzen Schweiz und bringt durch den Pilz, *Hymenoscyphus fraxineus*, zuerst die Eschentriebe und dann ganze Eschen zum Absterben (Rigling u. a. 2016). Von den gut 200 Eschen mit HS ist ein grosser Teil der Bäume vom Eschentriebsterben betroffen und haben deshalb so viele HS und einen signifikanten Effekt auf die Auswertung der gesamten HS (Siehe Kapitel «3.2.1 Habitatstrukturen allgemein»).

Bei den **Kronenbrüchen** ist das Auftreten bei keiner Baumart besonders ausgeprägt. Im Gegenteil: Die Esche hat hochsignifikant weniger Kronenbruch als die Fichte und auch die Buche ist weniger betroffen. Dies könnte daher stammen, dass beide Baumarten häufig in der dominierenden Kronenschicht vorherrschen und diese Bäume der Oberschicht nahezu kein Risiko aufweisen, getroffen zu werden. Zusätzlich hat es sehr viele kleine Buchen und Eschen, die nicht von der HS betroffen sind. Somit sind die kleinen Bäume, die tatsächlich von herabfallenden Baumteilen getroffen werden, nur ein kleiner Anteil, der weniger stark gewichtet wird in der Analyse. Bei Nebenbaumarten hingegen gibt es anzahlmässig weniger und alle Bäume sind dem Risiko ausgesetzt, einen Kronenbruch zu erleiden. Eine geringe Anzahl betroffener Bäume führen bereits zu einem hohen Prozentsatz der Bäume mit HS.

Daraus lässt sich schliessen, dass die Baumart von wichtiger Bedeutung ist für das Auftreten von HS. Vor allem Umweltbedingungen, in diesem Fall Pilze oder Wild, beeinflussen gewisse HS und sind zum Teil sogar direkte Verursacher. Dieselben Studien, die den BHD-Einfluss aufgezeigt haben, haben ebenfalls einen entscheidenden Effekt der Baumarten festgestellt (Bütler u. a. 2013; Larrieu und Cabanettes 2012; Regnery u. a. 2013; Vuidot u. a. 2011).

Für umfassendere Aussagen über HS müssten weitere Daten erhoben und ausgewertet werden. Es ist wichtig zu verstehen, was für eine Rolle die HS im ganzen Ökosystem spielen und wie man sie gezielt fördern kann. Denn bei der SPI 2017 wurden bei den über 3'800 lebenden Bäumen lediglich gute 500 HS gefunden, wovon 220 Kronentotholz, 133 Kronenbrüche und 90 Rindenverletzungen sind. Die übrigen sieben HS sind enorm selten und bilden zusammen 61 Datensätze – viel zu wenig, um eine wissenschaftlich fundierte Aussage darüber treffen zu können. Eine deskriptive Beschreibung ist zwar möglich, aber diese HS in Modellen auszuwerten, ist fragwürdig. Um eine Analyse der restlichen HS zu machen, bräuchte es viel mehr Datensätze, um Regelmässigkeiten erkennen zu können. Durch die Integration von weiteren Datensätzen könnten die Gesetzmässigkeiten noch besser herausgearbeitet werden. Damit würde aber der Fokus auf den Sihlwald und auf seine Entwicklung verloren gehen.

Des Weiteren wurden durch die Aussortierung der toten Bäume alle **Insektenfrass**- und nahezu alle **Konsolenpilz**-Datensätze entfernt und somit in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Beide HS treten fast ausschliesslich nach dem Absterben der Bäume bei totem Holz auf. Insektenfrass ist sehr selten und trat im Sihlwald lediglich 3-mal auf, lediglich an Fichten. Dass nur die Fichten vom Insektenfrass betroffen sind, ist auf den Buchdrucker in der Schweiz zurückzuführen (Wermelinger u. a. 2012).

Risse wurden zwar nur 11 aufgenommen, aber alle wurden an lebenden Bäumen gefunden. Dies lässt den Rückschluss zu, dass Risse nicht unmittelbar zum Absterben der Bäume führen.

Beim Saftfluss waren ebenfalls alle betroffenen Bäume lebendig. 25 von 28 Bäumen mit Saftfluss waren Fichten, was die Aussage von Larrieu und Cabanettes (2012) unterstützt: Sie haben in ihrer Studie nur an Fichten Saftfluss festgestellt. Bei der SPI 2017 waren aber zusätzlich auch eine Tanne und zwei Buchen betroffen.

Im Anschluss an diese ergeben sich einige Forschungsfragen, die untersucht werden könnten:

Hat das Relief einen signifikanten Einfluss auf die HS? Bei der SPI 2017 wurde das Relief nur in 5 Kategorien unterschieden: Ebene Fläche, Kuppe/Oberhang, Mittelhang, Hangfuss/Mulde und Unbestimmbar. Diese Einteilung ist nicht genug genau definiert und aufgenommen worden, als dass in dieser Arbeit genauere Aussagen gemacht werden konnten. Es kann entscheidend sein für die Fallgeschwindigkeit und die Aufprallstärke, wie steil und hoch der Hang ist, an dessen Fuss der gemessene Baum steht. Das Ausmass der Verletzung des getroffenen Baumes könnte zunehmen, je schneller und härter ein Stein aufprallt.

Können HS künstlich gefördert und produziert werden? Weiterführende Untersuchungen von HS sind notwendig, um deren Entstehung und Entwicklung besser zu verstehen. Mit diesem Wissen könnten die Wissenschaftler solche HS-Entstehungen eigenhändig hervorrufen und so das Vorkommen solcher HS fördern. So können gewissen Tierarten Strukturen geboten werden, die sie für ihren Lebenszyklus brauchen.

5. Schlussfolgerung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die HS-Daten der SPI 2017 im Sihlwald analysiert und auf Gesetzmässigkeiten bezüglich Baumarten und BHD untersucht. Mit einer Datenanalyse mit «RStudio» wurden die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Variablen ermittelt:

Entgegen der Erwartungen, dass das HS-Vorkommen parallel mit dem BHD ansteigt, verläuft der BHD nicht immer proportional mit der Auftretenshäufigkeit der HS. Bei den Rindenverletzungen wurde die Annahme bestätigt und bei dem Kronentotholz und dem Kronenbruch war der Effekt genau gegenteilig. Häufig kamen diese beiden HS bei dünnen Bäumen häufig vor. Je dicker und somit grösser ein Baum wurde, desto geringer wurde die Wahrscheinlichkeit, dass er verletzt wurde.

Bei den Baumarten gab es zwei hoch signifikante Ergebnisse für die Eibe und die Esche: Bei den Rindenverletzungen war die Eibe viel häufiger betroffen als alle anderen Baumarten. Dies ist auf den erhöhten Wild-Bestand zurückzuführen, der starken Verbiss und viele beschädigte Rindenoberflächen zur Folge hat. Die hohe Anzahl Schalenwild in den Schweizer Wäldern lässt die Menge an Rindenverletzungen ansteigen.

Den zweiten Effekt hatte die Esche: Beim Kronentotholz waren 85% der betroffenen Individuen Eschen. Diese hochsignifikante Auswirkung lässt sich durch das weitverbreitete Eschentriebsterben erklären. Die Situation im Sihlwald spiegelt die schweizweite Ausbreitung gut wieder (Rigling u. a. 2016).

Ein weiteres Forschungsthema wird sein, ob die Entstehung von HS gezielt gefördert werden kann, um optimale Lebensräume für gefährdete Arten zu schaffen. So könnte die Diversität im Wald durch gezielte Eingriffe vergrössert werden. Eine andere offene Forschungsfrage wäre, welchen Einfluss das Relief des Waldes auf die Entstehung und die Vielfalt der HS hat.

Danksagung

Ich möchte mich bei all den Leuten bedanken, die mich in meinem Arbeitsprozess unterstützt und begleitet haben. Auch meinem privaten und studentischen Umfeld, welches mich stets motiviert und mir zugehört hat, wenn ich mit ihnen meine Themen, Herausforderungen oder Erkenntnisse teilen wollte. Sie halfen mir die Perspektiven wieder zu finden, wenn ich diese einmal verloren habe und nahmen sich die Zeit, meine Arbeit am Schluss genau durchzulesen. Bedanken möchte ich mich vor allem bei meinen Betreuungspersonen Peter Brang und Harald Bugmann, dass sie meine Arbeit betreut haben und jederzeit erreichbar waren. Mein grösster Dank gilt aber Jonas Stillhard, der mich nicht nur bei sich im Büro aufgenommen hat, an den Tagen, die ich an der WSL arbeitete, sondern dass er mich während des ganzen Prozesses tatkräftig unterstützt hat und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Wann immer ich mit einem Problem zu ihm kam, nahm er sich Zeit, es mit mir zusammen zu lösen.

Ebenfalls erwähnen möchte ich Gilbert Projer, der mich ins Feld auf eine Aufnahmefläche der WSL mitnahm und mir die Aufnahmeweise und die Habitatstrukturen selbst in Realität zeigte. Dies half mir sehr, die Bedeutung der HS und die erhobenen Daten besser zu verstehen. Zudem teilte auch er das Büro mit mir und war mit seiner guten Laune für so manchen Witz zu haben. Danke auch an die WSL, bei der ich aufgenommen wurde wie ein neues Mitglied mit (fast) eigenem Arbeitsplatz.

Mein Interesse am Sihlwald und seiner Entwicklung zum Naturwald habe ich meinem Urgrossvater Dr. Ernst Krebs zu verdanken. Er war in den 60er Jahren Kantonsoberforstmeister des Kanton Zürichs und im Sihlwald wohnhaft und tätig. Auch seine Dissertation hat er über die Albiskette und den dazugehörenden Sihlwald geschrieben. Dank ihm war der Sihlwald für schon vor meinem ersten Besuch etwas Besonderes und gehörte zur Familiengeschichte. Bei meinen Besuchen des Waldes und des Naturmuseums verstärkte sich mein Interesse und ich beschloss, meine Bachelorarbeit zum Sihlwald zu machen. Als ich dann während meiner Recherche seine Dissertation als Quelle für meine Arbeit nutzen konnte, war ich positiv überrascht und stolz.

Literaturverzeichnis

- Anderson, Eric A. 1958. *Healing time for prined Douglas-fir*. U.S. DEpartement of Agriculture.
- Baur, B u. a. 2004. 1 Zustand, Erhaltung, Perspektiven *Biodiversität in der Schweiz*.
- Brändli, Kathrin, Martina Hobi, Jonas Stillhard, und Peter Brang. «Stichprobeninventur». *in Bearbeitung, noch nicht fertiggestellt*
- Brändli, Urs-Beat. 2010. «Schweizerisches Landesforstinventar». *Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006* (WSL, BAFU).
- Bunnell, Fred L., und Isabelle Houde. 2011. «Down wood and biodiversity — implications to forest practices». *Environmental Reviews* 18(NA): 397–421.
- Bütler, Rita, Markus Bollinger, Beatrice Senn-irlet, und Beat Wermelinger. 2011. «Naturwälder als Lebensraum». In *Waldreservate*, hrsg. Peter Brang, Caroline Heiri, und Harald Bugmann. Haupt, 272.
- Bütler, Rita, Thibault Lachat, Laurent Larrieu, und Yoan Paillet. 2013. «Habitat trees : key elements for forest biodiversity». *Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity* (September 2016): 84–91.
http://www.efi.int/files/attachments/publications/integrate_2013.pdf.
- Commarmot, Brigitte u. a. 2005. «Structures of virgin and managed beech forests in Uholka (Ukraine) and Sihlwald (Switzerland): a comparative study». *Forest Snow and Landscape Research* 79: 45–56.
- Commarmot, Brigitte u. a. 2009. «Entwicklung zum Urwald? Ein Vergleich zwischen dem Zürcher Sihlwald und dem Buchenurwald Uholka in der Westukraine». *Mitteilungen der Hessischen Landesforstverwaltung* 47(June 2014): 42–48.
- Commarmot, Brigitte, Urs-Beat Brändli, Fedir Hamor, und Vasyl Lavnyy. 2013. *77 Inventory of the largest primeval beech forest in Europe: a Swiss-Ukrainian scientific adventure*.
www.wsl.ch/publikationen/pdf/12494.
- Commarmot, Brigitte, und Ronald Schmidt. 2011. «Wildnis für Erholungssuchende im Sihlwald». In *Waldreservate*, hrsg. Peter Brang, Caroline Heiri, und Harald Bugmann. Haupt, 272.
- Fox, John, und Sanford Weisberg. 2019. «An R Companion to Applied Regression». <http://tinyurl.com/carbook>.
- Hartig, Florian. 2019. «DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models». <https://cran.r-project.org/package=DHARMA>.
- Kilchenmann, Martin. 2019. «Wildnispark Zürich». <https://wildnispark.ch/naturerlebnispark/naturwald/> (6. Februar 2019).
- Kraus, Daniel u. a. 2018. «Integrate + Technical Paper Seeing is building better understanding - the Integrate + Marteloscopes». (February).
- Krebs, Ernst. 1947. *Die Waldungen der Albis- und Zimmerbergkette*. Winterthur, CH: Kommissionsverlag der GEnossenschaftsbuchhandlung Winterthur.
- Lachat, Thibault u. a. 2014. «Merkblatt für die Praxis Totholz im Wald». *WSL Merkblatt für die Praxis*.
- Larrieu, Laurent u. a. 2017. «Development over time of the tree-related microhabitat profile: the case of lowland beech–oak coppice-with-standards set-aside stands in France». *European Journal of Forest Research* 136(1): 37–49.

- Larrieu, Laurent u. a. 2018. «Tree related microhabitats in temperate and Mediterranean European forests: A hierarchical typology for inventory standardization». *Ecological Indicators* 84(April 2017): 194–207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.051>.
- Larrieu, Laurent, und Alain Cabanettes. 2012. «Species, live status, and diameter are important tree features for diversity and abundance of tree microhabitats in subnatural montane beech–fir forests 1 This article is one of a selection of papers from the International Symposium on Dynamics and Ecolo». *Canadian Journal of Forest Research* 42(8): 1433–45.
- Meier, Franz u. a. 2013. «Forstschutz-Überblick 2012».
- Meier, Franz, Rolf Gall, und Beat Forster. 2003. «Ursachen und Verlauf der Buchdrucker-Epidemien (*Ips typographus* L.) in der Schweiz von 1984 bis 1999». *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 154(11): 437–441.
- Nakazawa, Minato. 2018. «fmsb: Functions for Medical Statistics Book with some Demographic Data». <https://cran.r-project.org/package=fmsb>.
- R Core Team. 2019. «R: A Language and Environment for Statistical Computing». <https://www.r-project.org/>.
- R Studio Team. 2016. «RStudio: Integrated Development Environment for R». <http://www.rstudio.com/>.
- Regnery, Baptiste, Yoan Paillet, Denis Couvet, und Christian Kerbiriou. 2013. «Which factors influence the occurrence and density of tree microhabitats in Mediterranean oak forests?» *Forest Ecology and Management*: 118–25.
- Rehush, Nataliia, Meinrad Abegg, Lars T. Waser, und Urs Beat Brändli. 2018. «Identifying tree-related microhabitats in TLS point clouds using machine learning». *Remote Sensing* 10(11): 1–23.
- Rigling, Daniel u. a. 2016. «Merkblatt für die Praxis Das Eschentriebsterben».
- Santana, Carlos. 2014. «Save the planet: eliminate biodiversity». *Biology and Philosophy* 29(6): 761–80.
- Sarkar, Sahotra. 2002. «Defining “ Biodiversity ”; Assessing Biodiversity».
- Schütt, Peter. 2014. «*Taxus baccata*». : 1–12.
- Tinner, Raphaela, und Peter Brang. 2013. «Aufnahmemethode für Kernflächen in Schweizer Naturwaldreservaten». *Eidg. Forschungsanstalt WSL*.
- Tinner, Raphaela, Kathrin Streit, Brigitte Commarmot, und Peter Brang. 2013. «Stichprobeninventur in schweizerischen Naturwaldreservaten – Anleitung zu Feldaufnahmen». : 1–43.
- Vuidot, Aurélie, Yoan Paillet, Frédéric Archaux, und Frédéric Gosselin. 2011. «Influence of tree characteristics and forest management on tree microhabitats». *Biological Conservation* 144(1): 441–50.
- Wermelinger, Beat. 2004. «Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* - A review of recent research». *Forest Ecology and Management* 202(1–3): 67–82.
- Wermelinger, Beat, Thibault Lachat, Martin M. Gossner u. a. 2012. «Saproxylic beetles as indicator species for dead-wood amount and temperature in European beech forests». *Ecological Indicators* 23: 323–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.04.013>.
- WSL. 2010. «Alte Bäume mit Habitatstrukturen (Habitatbäume)». https://www.wsl.ch/totholz/lebensraum/habitatbaeume_DE.

WSL. 2019. «Monitoring Naturwaldreservate Schweiz». <https://www.wsl.ch/de/wald/biodiversitaet-naturschutz-urwald/naturwaldreservate.html>.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1, S. 10, Karte vom Sihlwald, von Jonas Stillhard, WSL, in ArcGis erstellt für diese Arbeit, Juni 2019
- Abbildung 2, S. 11 Stammzahlverteilung der Baumarten im Sihlwald, K. Brändli u. a.(in Arbeit)
- Abbildung 18, S. 37 Zustand-Aufnahme, Tinner und Brang 2013

Die Bilder in dieser Arbeit (Titelbild und Abbildungen 3, 4, 5, 6, 7) wurden bei einer Waldbegehung mit Gilbert Projer im Bülacher Wald am 13.März 2019 gemacht.

Die grafischen und statistischen Auswertungen (Abbildungen 8 – 17 und 19 – 27) wurden mit den Daten der SPI 2017 im Sihlwald in «RStudio» erstellt mit Unterstützung von Jonas Stillhard.

Anhang

A. Glossar

HS	Habitatstrukturen = Mikrohabitate
SPI (2017)	Stichprobeninventur (2017)
PF	Probefläche
BHD	Brusthöhendurchmesser =Baumdurchmesser auf 1.30 m Höhe
Schalenwild	Paarhufer wie Rehe und Hirsche, die gejagt werden

B. Zustand-Aufnahme

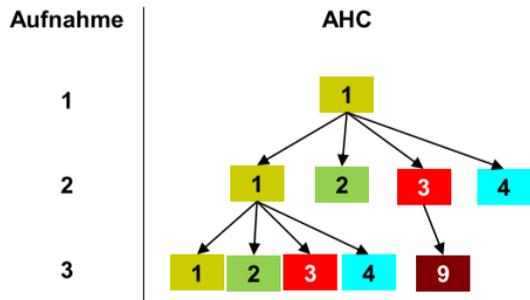


Abbildung 4. Entwicklung des Aushiebcodes AHC über mehrere Aufnahmeperioden. **1 lebender Baum, 2 gefällter Baum, 3 neu toter Baum, 9 alt toter Baum, 4 verschwundener Baum.**

Es werden folgende Zustände unterschieden:

- 11** lebender Baum, stehend
- 15** lebender Baum, liegend (Winkel Stammfuss – Gipfelspitze < 45° zur Horizontalen)
- 20** gefällter Baum
- 35** toter Baum, liegend, bei letzter Aufnahme lebend
- 36** toter ganzer Baum, stehend mit Krone (vollständig, mit Zweigen mit Durchmesser < 3 cm), bei letzter Aufnahme lebend
- 37** toter ganzer Stamm, stehend mit Aststummeln (bei Laubbäumen Hauptäste und Äste mit Durchmesser > 3 cm noch vorhanden), bei letzter Aufnahme lebend
- 38** toter Stammteil, stehend (BHD-Messung möglich)
Toter stehender Strunk von 0,50-1,29 m Höhe, bei dem eine BHD-Messung **nicht** mehr möglich ist: **Zustand 38** eingeben, bei letzter Aufnahme lebend
- 44** Seit letzter Aufnahme verschwunden
- 95** Bei letzter Aufnahme stehend tot, jetzt liegend tot
- 96** Bei letzter Aufnahme stehend tot, jetzt stehend tot, immer noch ganzer Baum mit Krone
- 97** Bei letzter Aufnahme stehend tot, jetzt stehend tot, mit Aststummeln
- 98** Bei letzter Aufnahme stehend tot, jetzt toter stehender Stammteil
- 99** Bei letzter Aufnahme toter stehender Baum/Stamm/Strunk; Holz jetzt nicht mehr messbar, zerfallen oder verschwunden

Abbildung 18: Aufnahmemöglichkeiten des Zustandes eines Baumes für eine Inventur (Tinner und Brang 2013)

C. Einteilung der Habitatstrukturen

Risse	Keine	1-2m	> 2m	Mehrere Risse	
Kronentotholz	<10%	< 50%	50 – 90%	> 90%	
Flächige Rindenverletzungen	Keine	1-4 Handflächen	> 4 Handflächen		
Loch im Stamm	Kein	Ein Loch	mehrere Löcher		
Kronenbruch	Nicht vorhanden		vorhanden (genauere Spezifizierungen: einfach oder aufgesplittert? Ersatzkrone vorhanden?)		
Stammbruch	Nicht vorhanden		vorhanden		
Höhle mit Mulm	Nicht vorhanden		vorhanden (mind. faustgross)		
Hohler Stamm	Nicht vorhanden		vorhanden		
Soft-/ Harzfluss	Nicht vorhanden		vorhanden		
Konsolenpilze (inkl. Artenbestimmung)	Nicht vorhanden		vorhanden		
Insektenfrass	Nicht vorhanden		vorhanden		
Totholzabbau	Frischholz	Festes Totholz	Morschholz	Moderholz	Mulmholz

D. Baumarten

Zahl	Baumart	Lateinischer Name	Abkürzung
101	Fichte	<i>Picea abies</i>	Fi
121	Weisstanne	<i>Abies alba</i>	Ta
141	Waldföhre	<i>Pinus sylvestris</i>	Fö
161	Lärche, Europäische	<i>Larix decidua</i>	Lä
201	Eibe	<i>Taxus baccata</i>	Eib
390	Übriges Nadelholz	(141 + 161 + 201)	üN
411	Rotbuche	<i>Fagus sylvatica</i>	Bu
420	Eiche	<i>Quercus spp</i>	Ei
431	Esche	<i>Fraxinus excelsior</i>	Esch
441	Bergahorn	<i>Acer pseudoplatanus</i>	BAh
442	Spitzahorn	<i>Acer plantanoides</i>	SpAh
491	Schwarzerle	<i>Alnus glutinosa</i>	SER
510	Ulme	<i>Ulmus spp</i>	UI
511	Bergulme	<i>Ulmus glabra</i>	BUI
521	Kirschbaum	<i>Prunus avium</i>	Ki
551	Mehlbeere	<i>Sorbus aria</i>	MBe
800	Übriges Laubholz	(420 + 442 + 491 + 511 + 521 + 551 + weitere)	ül

E. Datensätze

```

> head(datLiv)
  X.1 plot_nr X tree_nr easting_tree northing_tree ba dbh height crown_base ahc measuring_method
1 1 1 3 1 3 686395.3 231196.2 411 54 NA NA 11 1
2 2 2 3 2 5 686396.1 231204.6 411 80 34.0 17.8 11 2
3 3 3 3 3 10 686406.8 231210.6 411 38 26.4 11.5 11 1
4 4 4 3 4 11 686396.6 231197.7 411 35 NA NA 11 1
5 5 5 3 5 13 686399.6 231207.4 411 32 NA NA 11 1
6 6 6 3 6 14 686405.8 231204.0 431 16 23.5 15.7 11 1

  forked layer remark incl_tree coppice crown_length log_form broken_crown broken_log wood_decay
1 1 2 1 <NA> 50 2 2 1 0 0 NA
2 2 2 1 <NA> 50 2 1 1 0 0 NA
3 3 2 2 <NA> 30 2 2 2 0 0 NA
4 4 1 2 <NA> 50 2 2 2 0 0 NA
5 5 2 2 <NA> 10 2 2 1 0 0 NA
6 6 2 2 <NA> 20 2 2 1 0 0 NA

  bark_beetle dead_wood_crown cracks bark_abr cavity_dec cavity hollow sap_flow polypores easting
1 NA 0 0 0 0 0 0 0 0 0 686400
2 NA 0 0 0 0 0 0 0 0 0 686400
3 NA 0 0 0 0 0 0 0 0 0 686400
4 NA 0 0 0 0 0 0 0 0 0 686400
5 NA 0 0 0 0 0 0 0 0 0 686400
6 NA 0 0 0 0 0 0 0 0 0 686400

  northing easting_gps northing_gps incl exp relief dev_stage mixture cro_closure stand_struc
1 231200.1 686401.8 231202 40 18 3 4 3 2 21
2 231200.1 686401.8 231202 40 18 3 4 3 2 21
3 231200.1 686401.8 231202 40 18 3 4 3 2 21
4 231200.1 686401.8 231202 40 18 3 4 3 2 21
5 231200.1 686401.8 231202 40 18 3 4 3 2 21
6 231200.1 686401.8 231202 40 18 3 4 3 2 21

  nTrees baGroup hs Nhs hsfac baFac reliefFac devstFac stand_struc_Fac
1 1947 411 0 0 0 411 3 4 21
2 1947 411 0 0 0 411 3 4 21
3 1947 411 0 0 0 411 3 4 21
4 1947 411 0 0 0 411 3 4 21
5 1947 411 0 0 0 411 3 4 21
6 569 431 0 0 0 431 3 4 21

```

Abbildung 19: Ein Ausschnitt aus den Datensätzen der SPI 2017

F. R-Outputs der GLMs

Modell für alle HS

```
Call:
glm(formula = hsfac ~ dbh + baGroup + reliefFac + stand_struc_Fac,
     family = binomial, data = datLiv)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.1721 -0.4479 -0.3680 -0.3330  2.5540

Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -2.436e+00  4.061e-01  -5.999 1.98e-09 ***
dbh          2.549e-05  2.889e-03   0.009  0.99296
baGroup121  -7.070e-01  3.506e-01  -2.017  0.04371 *
baGroup390   9.045e-01  2.957e-01   3.059  0.00222 **
baGroup411  -4.213e-01  1.652e-01  -2.550  0.01078 *
baGroup431   1.921e+00  1.596e-01  12.039 < 2e-16 ***
baGroup441   1.793e-01  2.136e-01   0.839  0.40143
baGroup510   4.044e-01  3.566e-01   1.134  0.25687
baGroup800   6.480e-03  3.459e-01   0.019  0.98506
reliefFac1   1.256e-01  3.758e-01   0.334  0.73826
reliefFac2  -4.385e-01  4.973e-01  -0.882  0.37792
reliefFac3  -1.789e-01  3.443e-01  -0.520  0.60326
reliefFac4  -1.265e+00  8.201e-01  -1.543  0.12282
stand_struc_Fac 1.710e-02  1.105e-02   1.547  0.12179
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 2873.8 on 3868 degrees of freedom
Residual deviance: 2505.8 on 3855 degrees of freedom
(9 observations deleted due to missingness)
AIC: 2533.8

Number of Fisher Scoring iterations: 5
```

Abbildung 20: GLM für alle HS (mit den seltenen Baumarten mit unter 50 Bäumen in üN und üL)

```
Call:
glm(formula = hsfac ~ dbh + baFac + reliefFac + stand_struc_Fac,
     family = binomial, data = datLiv)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.1701 -0.4469 -0.3681 -0.3335  2.5471

Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -2.443e+00  4.066e-01  -6.007 1.89e-09 ***
dbh          1.331e-03  2.935e-03   0.453  0.6503
baFac121    -7.184e-01  3.508e-01  -2.048  0.0405 *
baFac141     5.808e-01  6.447e-01   0.901  0.3676
baFac161    -1.431e+01  4.378e+02  -0.033  0.9739
baFac201     1.801e+00  3.590e-01   5.016 5.28e-07 ***
baFac411    -4.067e-01  1.654e-01  -2.459  0.0139 *
baFac420     2.186e+00  1.422e+00   1.538  0.1241
baFac421    -1.430e+01  2.400e+03  -0.006  0.9952
baFac431     1.933e+00  1.598e-01  12.093 < 2e-16 ***
baFac441     1.923e-01  2.138e-01   0.899  0.3686
baFac442     3.337e-01  5.512e-01   0.605  0.5449
baFac443    -1.429e+01  1.697e+03  -0.008  0.9933
baFac471    -1.430e+01  2.400e+03  -0.006  0.9952
baFac490    -1.426e+01  7.586e+02  -0.019  0.9850
baFac491     9.583e-01  8.146e-01   1.176  0.2394
baFac500    -1.411e+01  2.400e+03  -0.006  0.9953
baFac510     4.387e-01  3.572e-01   1.228  0.2194
baFac511    -8.246e-01  1.034e+00  -0.798  0.4250
baFac521     5.196e-01  1.089e+00   0.477  0.6334
baFac530    -1.417e+01  1.385e+03  -0.010  0.9918
baFac551     9.093e-01  8.033e-01   1.132  0.2577
baFac561    -1.433e+01  1.697e+03  -0.008  0.9933
baFac591    -1.429e+01  1.697e+03  -0.008  0.9933
baFac901    -1.418e+01  8.421e+02  -0.017  0.9866
baFac905    -1.422e+01  1.385e+03  -0.010  0.9918
baFac920    -1.330e+01  2.400e+03  -0.006  0.9956
reliefFac1   1.026e-01  3.768e-01   0.272  0.7855
reliefFac2  -3.788e-01  4.994e-01  -0.759  0.4481
reliefFac3  -1.927e-01  3.453e-01  -0.558  0.5767
reliefFac4  -1.200e+00  8.269e-01  -1.451  0.1467
stand_struc_Fac 1.555e-02  1.112e-02   1.398  0.1620
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 2873.8 on 3868 degrees of freedom
Residual deviance: 2473.3 on 3837 degrees of freedom
(9 observations deleted due to missingness)
AIC: 2537.3
```

Abbildung 21: GLM für alle HS (mit allen Baumarten einzeln)

Modelle für Rindenverletzungen

```

Call:
glm(formula = rv ~ dbh + baGroup + reliefFac + stand_struc_Fac,
     family = binomial, data = datLiv)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.8796 -0.2253 -0.1865 -0.1708  3.1242

Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -5.110e+00  8.706e-01 -5.870 4.36e-09 ***
dbh          1.594e-02  5.425e-03  2.938  0.0033 **
baGroup121   5.181e-01  5.621e-01  0.922  0.3567
baGroup390   2.653e+00  4.413e-01  6.012 1.84e-09 ***
baGroup411   6.188e-01  3.702e-01  1.672  0.0946 .
baGroup431   4.704e-01  4.691e-01  1.003  0.3160
baGroup441   1.126e+00  4.423e-01  2.547  0.0109 *
baGroup510   3.183e-01  1.070e+00  0.297  0.7662
baGroup800   9.712e-01  6.779e-01  1.433  0.1520
reliefFac1   3.259e-01  8.236e-01  0.396  0.6923
reliefFac2  -3.913e-01  1.031e+00 -0.380  0.7042
reliefFac3   1.777e-01  7.361e-01  0.241  0.8092
reliefFac4  -1.369e+01  5.772e+02 -0.024  0.9811
stand_struc_Fac -2.237e-05  2.351e-02 -0.001  0.9992
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 854.86 on 3868 degrees of freedom
Residual deviance: 804.93 on 3855 degrees of freedom
(9 observations deleted due to missingness)
AIC: 832.93

Number of Fisher Scoring iterations: 16

```

Abbildung 22: GLM für Rindenverletzungen
(mit den seltenen Baumarten mit unter 50 Bäumen in ün und ül)

```

Call:
glm(formula = rv ~ dbh + baFac + reliefFac + stand_struc_Fac,
     family = binomial, data = datLiv)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.1139 -0.2264 -0.1745 -0.1536  3.1558

Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -5.252e+00  8.690e-01 -6.044 1.50e-09 ***
dbh          2.406e-02  5.698e-03  4.222 2.42e-05 ***
baFac121     4.279e-01  5.663e-01  0.756  0.44989
baFac141     1.217e+00  1.080e+00  1.127  0.25987
baFac161    -1.452e+01  1.178e+03 -0.012  0.99017
baFac201     4.106e+00  5.010e-01  8.197 2.47e-16 ***
baFac411     7.253e-01  3.714e-01  1.953  0.05085 .
baFac420    -1.423e+01  4.574e+03 -0.003  0.99752
baFac421    -1.362e+01  6.523e+03 -0.002  0.99833
baFac431     5.647e-01  4.706e-01  1.200  0.23017
baFac441     1.251e+00  4.453e-01  2.810  0.00496 **
baFac442     1.138e+00  1.072e+00  1.061  0.28861
baFac443    -1.364e+01  4.607e+03 -0.003  0.99764
baFac471    -1.400e+01  6.523e+03 -0.002  0.99829
baFac490    -1.352e+01  2.062e+03 -0.007  0.99477
baFac491     2.615e+00  1.123e+00  2.329  0.01986 *
baFac500    -1.381e+01  6.523e+03 -0.002  0.99831
baFac510     5.962e-01  1.075e+00  0.555  0.57916
baFac511    -1.339e+01  1.238e+03 -0.011  0.99137
baFac521    -1.395e+01  2.453e+03 -0.006  0.99546
baFac530    -1.368e+01  3.762e+03 -0.004  0.99710
baFac551     2.645e+00  1.116e+00  2.370  0.01778 *
baFac561    -1.437e+01  4.553e+03 -0.003  0.99748
baFac591    -1.354e+01  4.612e+03 -0.003  0.99766
baFac901    -1.330e+01  2.255e+03 -0.006  0.99529
baFac905    -1.349e+01  3.764e+03 -0.004  0.99714
baFac920     1.101e+00  6.589e+03  0.000  0.99987
reliefFac1   3.245e-01  8.266e-01  0.393  0.69462
reliefFac2  -7.430e-02  1.029e+00 -0.072  0.94241
reliefFac3   1.544e-01  7.398e-01  0.209  0.83470
reliefFac4  -1.453e+01  9.345e+02 -0.016  0.98759
stand_struc_Fac -1.153e-02  2.385e-02 -0.484  0.62867
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 854.86 on 3868 degrees of freedom
Residual deviance: 770.86 on 3837 degrees of freedom
(9 observations deleted due to missingness)

```

Abbildung 23: GLM für Rindenverletzungen
(mit allen Baumarten einzeln)

Modelle für Kronentotholz

```
Call:
glm(formula = dwc ~ dbh + baGroup + reliefFac + stand_struc_Fac,
     family = binomial, data = datLiv)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.2148 -0.1506 -0.1425 -0.0925  3.3334

Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -5.253066   0.865414  -6.070 1.28e-09 ***
dbh          -0.002303   0.004878  -0.472  0.6369
baGroup121  -13.051406  447.323882  -0.029  0.9767
baGroup390    1.006487   1.161773   0.866  0.3863
baGroup411    0.870737   0.629286   1.384  0.1665
baGroup431    5.041638   0.587871   8.576 < 2e-16 ***
baGroup441    1.540594   0.695921   2.214  0.0268 *
baGroup510    1.041348   1.167794   0.892  0.3725
baGroup800    1.393648   0.923305   1.509  0.1312
reliefFac1   -0.408753   0.609603  -0.671  0.5025
reliefFac2   -0.399634   0.827811  -0.483  0.6293
reliefFac3   -0.466569   0.572877  -0.814  0.4154
reliefFac4   -1.371100   1.233322  -1.112  0.2663
stand_struc_Fac 0.015554   0.017359   0.896  0.3703
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 1688.78 on 3868 degrees of freedom
Residual deviance: 991.77 on 3855 degrees of freedom
(9 observations deleted due to missingness)
AIC: 1019.8

Number of Fisher Scoring iterations: 17
```

Abbildung 24: GLM für Kronentotholz
(mit den seltenen Baumarten mit unter 50 Bäumen in üN und üL)

```
Call:
glm(formula = dwc ~ dbh + baFac + reliefFac + stand_struc_Fac,
     family = binomial, data = datLiv)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.2368 -0.1486 -0.1392 -0.0880  3.3410

Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -5.223e+00  8.675e-01  -6.021 1.74e-09 ***
dbh          -3.312e-03  4.916e-03  -0.674  0.500557
baFac121    -1.405e+01  7.374e+02  -0.019  0.984802
baFac141    2.636e+00  1.183e+00   2.228  0.025908 *
baFac161   -1.406e+01  1.961e+03  -0.007  0.994282
baFac201   -1.415e+01  1.722e+03  -0.008  0.993442
baFac411    8.562e-01  6.293e-01   1.361  0.173657
baFac420    5.525e+00  1.531e+00   3.608  0.000309 ***
baFac421   -1.418e+01  1.075e+04  -0.001  0.998948
baFac431    5.035e+00  5.878e-01   8.567 < 2e-16 ***
baFac441    1.529e+00  6.959e-01   2.196  0.028061 *
baFac442   -1.413e+01  1.898e+03  -0.007  0.994060
baFac443   -1.417e+01  7.604e+03  -0.002  0.998513
baFac471   -1.411e+01  1.075e+04  -0.001  0.998953
baFac490   -1.416e+01  3.400e+03  -0.004  0.996676
baFac491   -1.415e+01  3.584e+03  -0.004  0.996851
baFac500   -1.396e+01  1.075e+04  -0.001  0.998964
baFac510    1.012e+00  1.168e+00   0.867  0.386188
baFac511   -1.408e+01  2.101e+03  -0.007  0.994653
baFac521    3.673e+00  1.229e+00   2.988  0.002811 **
baFac530   -1.404e+01  6.205e+03  -0.002  0.998194
baFac551   -1.414e+01  3.400e+03  -0.004  0.996682
baFac561   -1.409e+01  7.602e+03  -0.002  0.998521
baFac591   -1.419e+01  7.604e+03  -0.002  0.998511
baFac901   -1.410e+01  3.790e+03  -0.004  0.997032
baFac905   -1.413e+01  6.205e+03  -0.002  0.998183
baFac920   -1.337e+01  1.075e+04  -0.001  0.999008
reliefFac1  -4.618e-01  6.135e-01  -0.753  0.451636
reliefFac2  -4.831e-01  8.301e-01  -0.582  0.560560
reliefFac3  -4.920e-01  5.770e-01  -0.853  0.393842
reliefFac4  -1.325e+00  1.243e+00  -1.066  0.286406
stand_struc_Fac 1.743e-02  1.741e-02   1.001  0.316810
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 1688.78 on 3868 degrees of freedom
Residual deviance: 976.61 on 3837 degrees of freedom
(9 observations deleted due to missingness)
AIC: 1040.6

Number of Fisher Scoring iterations: 18
```

Abbildung 25: GLM für Kronentotholz
(mit allen Baumarten einzeln)

Modelle für Kronenbruch

```

Call:
glm(formula = bc ~ dbh + baGroup + reliefFac + stand_struc_Fac,
     family = binomial, data = datLiv)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.5472 -0.2958 -0.2426 -0.1766  3.0725

Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -2.529968   0.595415  -4.249 2.15e-05 ***
dbh          -0.022611   0.005787  -3.907 9.34e-05 ***
baGroup121  -0.747165   0.542908  -1.376 0.168751
baGroup390  -0.639989   0.743127  -0.861 0.389122
baGroup411  -0.586911   0.238220  -2.464 0.013750 *
baGroup431  -1.704612   0.489109  -3.485 0.000492 ***
baGroup441  -0.071435   0.308370  -0.232 0.816806
baGroup510   0.553856   0.413773   1.339 0.180717
baGroup800  -0.324026   0.500634  -0.647 0.517482
reliefFac1   0.077624   0.540658   0.144 0.885838
reliefFac2  -1.896536   1.110207  -1.708 0.087586 .
reliefFac3  -0.585618   0.479656  -1.221 0.222119
reliefFac4  -1.134265   1.125971  -1.007 0.313759
stand_struc_Fac 0.037495   0.019729   1.900 0.057370 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 1144.7 on 3871 degrees of freedom
Residual deviance: 1090.0 on 3858 degrees of freedom
(6 observations deleted due to missingness)
AIC: 1118

Number of Fisher Scoring iterations: 7

```

Abbildung 26: GLM für Kronenbrüche
(mit den seltenen Baumarten mit unter 50 Bäumen in üN und üL)

```

Call:
glm(formula = bc ~ dbh + baFac + reliefFac + stand_struc_Fac,
     family = binomial, data = datLiv)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.5937 -0.2966 -0.2391 -0.1696  3.0945

Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -2.520e+00   5.978e-01  -4.215 2.50e-05 ***
dbh          -2.396e-02   5.905e-03  -4.058 4.96e-05 ***
baFac121    -7.534e-01   5.435e-01  -1.386 0.165676
baFac141     6.493e-01   1.056e+00   0.615 0.538516
baFac161    -1.405e+01   7.109e+02  -0.020 0.984229
baFac201    -8.500e-01   1.034e+00  -0.822 0.411001
baFac411    -5.986e-01   2.384e-01  -2.511 0.012038 *
baFac420    -1.476e+01   2.737e+03  -0.005 0.995696
baFac421    -1.491e+01   3.956e+03  -0.004 0.996994
baFac431    -1.712e+00   4.892e-01  -3.500 0.000465 ***
baFac441    -8.214e-02   3.086e-01  -0.266 0.790091
baFac442     7.369e-01   6.402e-01   1.151 0.249683
baFac443    -1.489e+01   2.795e+03  -0.005 0.995748
baFac471    -1.451e+01   3.956e+03  -0.004 0.997074
baFac490    -1.496e+01   1.250e+03  -0.012 0.990451
baFac491     5.934e-01   1.085e+00   0.547 0.584359
baFac500    -1.441e+01   3.956e+03  -0.004 0.997094
baFac510     5.332e-01   4.137e-01   1.289 0.197502
baFac511    -1.488e+01   7.702e+02  -0.019 0.984587
baFac521    -1.443e+01   1.475e+03  -0.010 0.992196
baFac530    -1.467e+01   2.273e+03  -0.006 0.994851
baFac551     5.845e-01   1.075e+00   0.544 0.586611
baFac561    -1.433e+01   2.761e+03  -0.005 0.995860
baFac591    -1.499e+01   2.796e+03  -0.005 0.995723
baFac901    -1.499e+01   1.378e+03  -0.011 0.991322
baFac905    -1.495e+01   2.277e+03  -0.007 0.994762
baFac920    -1.465e+01   3.956e+03  -0.004 0.997046
reliefFac1   1.112e-01   5.426e-01   0.205 0.837679
reliefFac2  -1.837e+00   1.111e+00  -1.654 0.098190 .
reliefFac3  -5.564e-01   4.805e-01  -1.158 0.246962
reliefFac4  -8.751e-01   1.127e+00  -0.777 0.437385
stand_struc_Fac 3.740e-02   1.975e-02   1.894 0.058286 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 1144.7 on 3871 degrees of freedom
Residual deviance: 1078.1 on 3840 degrees of freedom
(6 observations deleted due to missingness)
AIC: 1142.1

Number of Fisher Scoring iterations: 16

```

Abbildung 27: GLM für Kronenbrüche
(für alle Baumarten einzeln)

G. Eigenständigkeitserklärung



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Der Einfluss von Baumarten und -durchmesser auf Habitatstrukturen

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Ehrbar

Vorname(n):

Nathalie

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt „Zitier-Knigge“ beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

Zürich, 12.07.2019

Unterschrift(en)

N. Ehrbar

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.