



Master's Thesis

**Die Nadelholzmistel in Bayern - Analyse von Befallssituation,
Ursachen und Auswirkungen anhand von Langzeitmonitoringdaten**

**The European white mistletoe in Bavaria - Analysis of the state of
infection, causes and impacts by long term monitoring data**

zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science (M.Sc.)

Eingereicht von	Behrendt, Kai; Matrikelnummer 03626045; Forst- und Holzwissenschaft
Leiter der Arbeit, 1. Prüfer	Dr. Bernd Stimm, Technische Universität München, Lehrstuhl für Waldbau
Betreuer, 2. Prüfer	Dr. Hans-Joachim Klemmt, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Abt. 2 – Boden und Klima
Eingereicht am	21.12.2017



„Wordle“ aus dem gesamten Text – je häufiger ein Wort vorkommt, desto größer und zentraler wird es dargestellt

Vorwort

Diese Masterarbeit entstand von Juni bis Dezember 2017 an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Abt. 2 – Boden und Klima. Bereits seit Februar 2014 bin ich dort als studentische, seit April 2015 als wissenschaftliche Hilfskraft beschäftigt. Zu meinem Hauptaufgabenbereich zählt die Betreuung der jährlich stattfindenden Waldzustandserhebung in Bayern, insbesondere die Vor- und Nachbereitung der Aufnahmen, die Kartenerstellung, das Auswerten von Daten und das Management des Aufnahmeinventars.

Im Rahmen meiner Tätigkeit dort konnte ich viele tiefe Einblicke in den Arbeitsablauf einer Ressortforschungseinrichtung, in die Organisation und Durchführung von Forstinventuren und wertvolle Erfahrungen im Umgang mit geographischen Informationssystemen, Datenbanken und Datenverarbeitungssoftware gewinnen.

Immer wieder stieß ich bei meiner Arbeit auch auf die Mistel. Schon früh war ich von dieser Pflanze fasziniert. Mein erster Kontakt mit Misteln war auf den Streuobstwiesen in meiner Heimat, dem Odenwald, wo viele der Obstbäume starken Mistelbewuchs zeigen. Die Kronen dieser Laubbäume mitten im Winter fast komplett grün zu sehen, war ein erstaunliches Naturschauspiel. Auch bei der intensiven Lektüre der Asterix und Obelix-Hefte in meiner Jugend stieß ich des Öfteren auf die Mistel, verlieh sie als Grundzutat von Miraculix Zaubertrank den Comic-Helden doch immense Kräfte. Von ihr ging schon immer eine ganz eigene Faszination aus. Und so lag es nicht fern, meine Masterarbeit über die Mistel anzufertigen.

Genauer gesagt über die Nadelholzmistel an Kiefer und Tanne. Ich muss ehrlich zugeben, vor Beginn der Arbeit war mir, wie vielen, mit denen ich während der Anfertigung über das Thema sprach, gar nicht bewusst, dass Misteln auch an Nadelbäumen vorkommen können. Doch gerade in forstlicher Hinsicht ist die Nadelholzmistel von besonderer Bedeutung, da sie es ist, die in Waldbeständen am häufigsten anzutreffen ist. Und so bot es sich an, Auswertungen zur Nadelholzmistel anhand der Langzeitmonitoringdaten, mit denen ich bereits seit Jahren vertraut war, auf statistischer und räumlicher Ebene anzustellen. An der LWF bestand aufgrund sich häufender Beobachtungen von immer stärkeren Mistelbefällen in Bayern großes Interesse an dem Thema, sodass im Jahr 2016 bereits eine Bachelorarbeit zur Kartierung von Misteln aus extra dafür angefertigten hochauflösenden Luftbildern einer Drohnenbefliegung erstellt wurde. Hier war ich bereits in die Auswertungen eingebunden und konnte erste Erkenntnisse sammeln.

Während meiner gesamten Arbeitszeit wurde ich stets mit den aktuellsten Daten, Informationen und Tipps von allen beteiligten Mitarbeitern versorgt. Mein Dank gilt insbesondere Dr. Hans-Joachim Klemmt, Leiter der Abt. 2 der LWF, als Betreuer dieser Arbeit für die wertvollen Hinweise und Tipps während der gesamten Planungs- und Anfertigungsphase der Arbeit, Dr. Alexandra Wauer, Abt. 2 der LWF, als meiner Fachvorgesetzten für fast vier Jahre lehrreiche, vertrauensvolle und offene Zusammenarbeit und Beratung bei der Anfertigung dieser Arbeit, und Dr. Bernd Stimm, Lehrstuhl für Waldbau der TU München, für die Betreuung der Arbeit und die vielen konstruktiven Beiträge zum Vorgehen bei der Bearbeitung. Außerdem möchte ich mich bedanken bei Wolfgang Stöger und Joachim Stiegler, beide Abt. 3 der LWF, für die Bereitstellung von Daten aus der Bundeswaldinventur, bei Martin Lauterbach, Abt. 6 der LWF, für die Beratung und die Bereitstellung von Literatur zu mistelverbreitenden Vögeln, bei Simon Ecke für die Bereitstellung der Ergebnisse und Rohdaten seiner Bachelorarbeit zur drohnengestützten Mistelerkennung und zu guter Letzt bei Julia Kemmerer für die Beratung bei der Formulierung von Zusammenfassung und Abstract sowie für seelische und moralische Unterstützung während der Erstellung der Arbeit und gute Freundschaft.

Ich wünsche viel Freude und interessante neue Erkenntnisse bei der Lektüre der Arbeit!

Kai Behrendt

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1. Ziel der Arbeit.....	3
2. Stand des Wissens.....	4
2.1. Biologie der Mistel.....	4
2.1.1. Systematik und Morphologie.....	4
2.1.2. Befall von Wirtsbäumen.....	5
2.1.3. Physiologie und Ernährung.....	6
2.1.4. Ökologie.....	8
2.2. Verbreitung.....	8
2.2.1. Verbreitungsgebiet.....	8
2.2.2. Landschafts- bis Bestandesebene.....	9
2.2.3. Baumebene.....	10
2.3. Vektoren.....	11
2.3.1. Verhalten und Mistelverbreitung.....	11
2.3.2. Misteldrossel.....	12
2.3.3. Mönchsgrasmücke.....	13
2.3.4. Seidenschwanz.....	14
2.3.5. Andere Arten.....	15
2.4. Auswirkungen auf Wirtspflanzen.....	15
2.4.1. Physiologie.....	15
2.4.2. Photosynthese und Stoffwechsel.....	16
2.4.3. Stress.....	17
2.4.4. Wachstum und Zuwachs.....	18
2.4.5. Mortalität.....	19
3. Material und Methoden.....	20
3.1. Datengrundlage.....	20
3.1.1. Level 1 (Waldzustandserhebung).....	20
3.1.2. Level 2 (Waldklimastationen).....	22
3.1.3. Bundeswaldinventur (BWI).....	24
3.2. Level 1 (Waldzustandserhebung).....	24
3.2.1. Befallsentwicklung.....	24
3.2.2. Bestandesstruktur.....	25
3.2.3. Waldrand.....	26
3.2.4. Umweltvektor.....	27
3.2.5. Topographie.....	29

3.3. Level 2 (Waldklimastationen)	29
3.3.1. Aufnahmeverfahren	29
3.3.2. Befallsentwicklung	30
3.3.3. Horizontale Verteilung	30
3.3.4. Zuwachs und soziale Stellung	35
4. Ergebnisse	36
4.1. Level 1 (Waldzustandserhebung)	36
4.1.1. Befallsentwicklung	36
4.1.2. Bestandesstruktur	40
4.1.3. Waldrand	41
4.1.4. Umweltvektor	44
4.1.5. Topographie	55
4.2. Level 2 (Waldklimastationen)	60
4.2.1. Aufnahmeverfahren	60
4.2.2. Befallsentwicklung	65
4.2.3. Horizontale Verteilung	67
4.2.4. Zuwachs und soziale Stellung	69
5. Diskussion	77
5.1. Level 1 (Waldzustandserhebung)	77
5.1.1. Befallsentwicklung	77
5.1.2. Bestandesstruktur	79
5.1.3. Waldrand	81
5.1.4. Umweltvektor	82
5.1.5. Topographie	86
5.2. Level 2 (Waldklimastationen)	88
5.2.1. Aufnahmeverfahren	88
5.2.2. Befallsentwicklung	89
5.2.3. Horizontale Verteilung	90
5.2.4. Zuwachs und soziale Stellung	92
6. Fazit und Ausblick	95
7. Zusammenfassung	99
8. Abstract	101
9. Literaturverzeichnis	102
10. Abbildungsverzeichnis	106
11. Tabellenverzeichnis	110
12. Abkürzungsverzeichnis	111

13. Anhang.....	112
13.1. VBA-Programmroutine zur automatischen Berechnung des GAS-Index	112
13.2. Berechnung von Gauss-Krüger-Koordinaten aus Polarkoordinaten	115
13.3. Programmcode zur logistischen Regressionsmodellierung mit R	116
13.4. ArcPy-Skript zur Zufallsselektion einer bestimmten Anzahl von Features.....	119
13.5. ArcPy-Skript zum CSV-Export gesammelter Daten	119
14. Eidesstattliche Erklärung	120
15. CD mit digitalen Inhalten zur Arbeit.....	121

1. Einleitung

Seit über zweitausend Jahren erregt die Mistel wegen ihrer biologischen Eigenarten, ihrer Bedeutung als Heil- und Kulti pflanze sowie als Kunstmotiv das Interesse der Menschen (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997). Der deutsche Name „Mistel“ geht auf das Wort „Mist“ zurück, da die Mistel durch Vögel verbreitet wird, welche den Samen mit dem Kot ausscheiden (Grundmann et al. 2010; Tubeuf 1923). Im Volksmund wird sie auch „Hexenbesen“, „Hexenkraut“, „Tannenhur“ und „Drudenfuß“ genannt (Tubeuf 1923). Ihr lateinischer Gattungsname „*Viscum*“ rührt daher, dass Carl von Linné bei der Benennung Berichten glaubte, die besagten, dass aus dem klebrigen Schleim der Mistelbeeren früher Vogelleim hergestellt wurde – „*viscum*“ ist lateinisch für Leim. Tatsächlich wurde Vogelleim jedoch nur aus den Beeren der Eichenriemenblume (*Loranthus europaeus*) hergestellt, da dieser nicht eintrocknet (Petercord et al. 2017).

Durch ihre immergrünen Blätter wird die Mistel seit jeher als Lebenselixier, welches die Kälte und Dunkelheit des Winters übersteht, verstanden (Grundmann et al. 2010). Ihre ungewöhnliche Wuchsform als grüne Pflanze ohne sichtbare Wurzel verlieh ihr im Altertum eine besondere kulturelle Stellung, teilweise galt sie sogar als heilig (Petercord et al. 2017).

Die Bedeutung der Mistel als uralte Kulturpflanze zeigt sich bereits in Aufzeichnungen des römischen Gelehrten Plinius des Älteren in seinem Werk „*Naturalis Historia*“, wo er beschreibt, wie weißgekleidete Druiden in die Kronen von Mistelbäumen stiegen und die Misteln mit einer goldenen Sichel ernteten (Ramm 2006). Dies schlug sich nicht zuletzt auch in der zeitgenössischen Darstellung des Zaubers trank brauenden Druiden Miraculix in den „*Asterix und Obelix*“-Heften nieder, welcher stets Misteln als Hauptzutat seines Superkräfte verleihenden Zaubers tranks nutzte.

In der griechischen und römischen Mythologie war die immergrüne Mistel ein Zeichen der Unsterblichkeit. So verwendete der Gott Hermes, bzw. Merkur Mistelzweige, um die Unterwelt für die Seelen von Verstorbenen zu öffnen. Genauso nutzt Aeneas einen Mistelzweig, um auf seiner Reise die Unterwelt wieder zu verlassen (Petercord et al. 2017).

Im Mittelalter wurde die Mistel aufgrund ihrer dichasialen Wuchsform auch als „Kreuzholz“ bezeichnet. Aus Mistelholz wurden deshalb Rosenkränze und Amulette gefertigt. Bis heute hat die Mistel im christlichen Glauben Bedeutung – so wird in einigen Regionen am Palmsonntag den Palmbüschen ein Mistelzweig beigefügt, um für Fruchtbarkeit zu bitten (Petercord et al. 2017).

In der empirischen Volksmedizin werden Mistelextrakte bei Bluthochdruck, Gelenkerkrankungen und Schwindelgefühl angewendet (Grundmann et al. 2010). In der modernen Medizin spielt die Mistel eine wichtige Rolle in der alternativen Krebsbehandlung im Rahmen der komplementärmedizinischen Ansätze von Rudolf Steiner (Ramm 2006).

Für Ökosysteme ist die Mistel eine Schlüsselspezies mit großem Einfluss auf deren Entwicklung (Mathiasen et al. 2008). Sie beeinflusst aktiv die Bestandesstruktur von Wäldern und hat langanhaltende, intensive Effekte auf Entwicklung und Zusammensetzung von Waldökosystemen (Mellado et al. 2017).

In den letzten Jahren wurde im Forstbereich vermehrt die Beobachtung gemacht, dass in ganz Bayern, vor allem in Mittelfranken, Intensität und Ausbreitung des Mistelbefalls zunehmen.

Mögliche Gründe für eine Zunahme des Mistelbefalls sind eine Konkurrenzstärkung der Misteln durch stärker verlichtete Baumkronen, geschwächte Wirtsbäume, z.B. infolge von erhöhtem Trockenstress, und eine längere Assimilationsperiode der immergrünen Mistel in den wärmeren Wintern der letzten Jahre sowie veränderte Lebensgewohnheiten der mistelverbreitenden Vögel (Grundmann et al. 2010). Die Mistel als Parasit, welcher in komplexen Wechselwirkungen mit Wirtspflanzen, Vektoren und der übrigen Umwelt steht, spielt eine Schlüsselrolle in der Organisation von Waldökosystemen: Durch vielfältige Abhängigkeiten zwischen der Mistel und ihrer Umwelt kommt es durch sie zu disproportionalen Veränderungen in der Abundanz und der Biomasseverteilung der Wirts- wie Nicht-Wirtsbaumarten. Sie hinterlässt in den betroffenen Waldökosystemen somit einen subtilen, aber in der räumlichen und zeitlichen Organisation der Lebensgemeinschaft klar erkennbaren Fußabdruck (Mellado et al. 2017).

Der Haupteffekt ist dabei die Bildung von Lücken im Bestand durch die Mortalität von Wirtspflanzen in der Folge eines intensiven Mistelbefalls (Mellado et al. 2017). Aus forstwirtschaftlicher Sicht führt der Mistelbefall also, zumindest langfristig, zu einer Schädigung der Bestände, da er die Holzproduktion vermindert und Bäume ein erhöhtes Risiko haben, vor Erreichen ihres natürlichen Höchstalters oder sogar vor Ende der Umtriebszeit deutliche Wachstumseinbußen bis hin zum Absterben zu zeigen. Der Befall von Waldbäumen mit Misteln, insbesondere der wichtigen Wirtschaftsbaumarten Kiefer (*Pinus sylvestris*) und Tanne (*Abies alba*) mit der Nadelholzmistel, verdient somit dringend forstwissenschaftliche Beachtung.

Zahlreiche vorausgehende Studien beschäftigen sich mit Physiologie, Ökologie, Verbreitung und bestandessozialen Effekten der Mistel im Rahmen von Versuchen in speziell für diesen Zweck ausgewählten Versuchsbeständen sowie auf kleineren Skalenebenen.

Genaue Auswertungen über die großräumige Ausbreitung des Mistelbefalls, über Ursachen, Auswirkungen und Zusammenhänge auf Landschaftsebene und darüber hinaus wurden allgemein, aber insbesondere auch für Bayern, bisher nicht angestellt.

1.1. Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist deshalb, anhand der kombinierten räumlichen und statistischen Auswertung von vorliegenden Langzeitmonitoringdaten aus verschiedenen Monitoringprogrammen wie der Waldzustandserhebung, ICP Forests und der Bundeswaldinventur folgende Fragen zu klären:

1. Wie haben sich Ausbreitung und Intensität des Nadelholzmistelbefalls von Kiefern und Tannen in ganz Bayern sowie in zwei Versuchsbeständen über die vergangenen 10 Jahre entwickelt?
2. Welche Aufnahmeverfahren sind wie gut zur Feststellung und Quantifizierung eines Mistelbefalls geeignet?
3. Hat die Strukturvielfalt von Waldbeständen einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit eines Mistelbefalls?
4. Ist die Wahrscheinlichkeit eines Mistelbefalls an Waldrändern gegenüber dem übrigen Bestand verändert?
5. Welche Umweltfaktoren beeinflussen auf welche Weise die Wahrscheinlichkeit eines Mistelbefalls?
6. Wie wirkt sich die Topographie auf die Wahrscheinlichkeit eines Mistelbefalls aus?
7. Welchen horizontalen Verteilungsmustern zwischen Bäumen in einem Bestand folgt die Ausbreitung eines Mistelbefalls?
8. Wie wirkt sich ein Mistelbefall auf Wachstum und Zuwachs der betroffenen Bäume aus?

2. Stand des Wissens

2.1. Biologie der Mistel

2.1.1. Systematik und Morphologie

Die Weißbeerige Mistel (*Viscum album* L.) ist ein epiphytischer Sprossparasit. Da sie selbst Photosynthese betreiben kann, gilt sie als Hemiparasit (Grundmann et al. 2010). Hemiparasiten können Ihren Energiebedarf durch eigene Assimilation bedienen, während Holoparasiten das Phloem des Wirts als Kohlenstoffquelle nutzen (Escher 2004). Sie ist ein obligater Parasit, d.h. sie ist zur Bildung des ersten Blattpaares vollständig auf einen Wirt angewiesen (Grundmann et al. 2010).

Wegen ihrer Wirtsspezifität und geringer morphologischer Unterschiede wird die Weißbeerige Mistel in drei Unterarten unterteilt: *V. album* L. ssp. *album* (Laubholzmistel), *V. album* ssp. *abietis* (WIESB.) ANCH. (Tannenmistel) und *V. album* ssp. *austriacum* (WIESB.) VOLLM. (Kiefernmistel) (Grundmann et al. 2010). Die Tannenmistel besitzt eine hohe Wirtsspezifität und befällt ausschließlich die Weißtanne (*Abies alba* MILL.). Die Kiefernmistel befällt hauptsächlich die Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.), die Schwarzkiefer (*Pinus nigra* J.F.ARNOLD) und die aufrechte Bergkiefer (*Pinus mugo* ssp. *uncinata* (DC.) DOMIN), in sehr seltenen Fällen kann sie auch auf der Fichte (*Picea abies* (L.) KARST.) gefunden werden. Die Laubholzmistel ist wesentlich wirtsunspezifischer und befällt eine breite Auswahl von Laubbäumen und -sträuchern (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997).

Die Mistel ist ein immergrüner Strauch mit kugeliger Krone von maximal ca. 1-1,5 m Durchmesser, die in den Kronen der Wirtsbäume ausgebildet wird. Sie kann ein Alter von bis zu 30 Jahren erreichen, in seltenen Fällen wurde von bis zu 70 Jahre alten Exemplaren berichtet (Grundmann et al. 2010). Ihre Blätter sind lanzettlich bis spatelig, derb-ledrig, ganzrandig, kahl und sitzend. Die Sprosse können an der Basis im Mittel 5, maximal 8 cm dick werden. Die Jahrestriebe erreichen Maximallängen von 15 cm, im Mittel etwa 7-10 cm (Grundmann et al. 2010).

Der Spross der Mistel ist verholzt und weist ein geringes radiales Wachstum auf. Die Jahrringgrenzen sind schwach ausgeprägt, dennoch sind die Triebe daran gut zu datieren. Das Frühholz weist eine höhere Gefäßdichte auf, im Spätholz ist dagegen ein höherer Faseranteil vorhanden (Grundmann et al. 2010). Mistelbüsche bilden außergewöhnlich kompakte, kugelige Kronen (Pfiz und Küppers 2010). Ihre LAD (Leaf Area Density) liegt selbst noch höher als in einer geschlossenen Hecke. Deshalb zeigt sie nur einen sehr geringen jährlichen Zuwachs des Kronenvolumens.

Die Unterarten unterscheiden sich in LMA (Leaf Mass per Area) – diese ist bei der Kiefernmistel fast doppelt so groß wie bei der Laubholzmistel, die Tannenmistel liegt etwa in der Mitte zwischen beiden – und LAI (Leaf Area Index) – dieser liegt zwischen 2,4 und 5,1 m²/m² und ist bei der Laubholzmistel am größten, bei der Kiefernmistel am geringsten (Pfiz und Küppers 2010).

Die Früchte der Mistel sind weiße bis hell-gelbliche Scheinbeeren (Grundmann et al. 2010). Um eine Scheinbeere handelt es sich, da die Blütenachse mit am Aufbau beteiligt ist (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997). Im folgenden Text wird dennoch der Verständlichkeit halber von „Mistelbeeren“ gesprochen, wohl wissend, dass diese Bezeichnung botanisch nicht exakt ist.

Die Mistel ist ein obligater Lichtkeimer. Auf stark beschatteten Ästen in der Unterkrone oder von unterständigen Bäumen verliert sie schnell ihre Keimfähigkeit (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997).

2.1.2. Befall von Wirtsbäumen

Das Mesokarp der Mistelbeeren besteht aus einem klebrigen, viscinhaltigen Schleim. Dieser ist in zwei Schichten unterteilt: Die äußere Schicht ist zellulosehaltig und somit für Vögel als Hauptvektoren (siehe auch 2.3. Vektoren) leicht verdaulich. Die innere Schicht ist pektinhaltig und bleibt unverdaut als Hülle um den Samen herum erhalten. Der Beerenschleim befindet sich zwischen den beiden Mesokarpschichten und sorgt dafür, dass der Samen an der Beerenhaut hängen bleibt. Er ist entscheidend für die Verbreitungsstrategie der Mistel: Durch ihn bleiben die Samen nach der Deposition durch Vögel (verdaut oder unverdaut, siehe 2.3. Vektoren) am Ast eines Wirtsbaumes kleben, bis sie dort keimen (Grundmann et al. 2010).

Die Konsistenz des Beerenschleims unterscheidet sich zwischen den Unterarten der Mistel: Bei der Laubholzmistel ist er deutlich klebriger und bildet lange Fäden zwischen der inneren Mesokarpschicht und der Beerenhaut, sodass der Samen daran hängen bleibt (Grundmann et al. 2010). Für die Samen der Nadelholzmistel ist es hingegen von Vorteil, wenn der Samen an den Nadeln entlang bis zum Ast herunterrutschen kann. Ihr Schleim ist deshalb fluider und weniger klebrig (Hartmann 1990).

Ist ein Samen am Zweig angekommen und findet passende Bedingungen (vor allem genug Licht) vor, kommt es zur Keimung (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997). Das grüne Hypokotyl wächst durchschnittlich 5,6 mm weit und biegt sich negativ phototropisch zur Rinde des Wirtsastes hin (Grundmann et al. 2010). Im Laufe des Frühjahrs streckt sich die Hypokotylachse. Bei Kontakt mit einer Unterlage heftet sich der Wurzelpol fest und bildet eine abgeflachte Haftscheibe aus (Hartmann 1990). Während sich die Haftscheibe ausdehnt werden die bereits fest mit dem Periderm des Wirtsastes verbundenen Papillen nach oben und zur Seite gezogen, wodurch das äußere Gewebe des Astes auseinandergerissen wird (Grundmann et al. 2010). Mithilfe sekretorischer Zellen dringt der Keimling aktiv durch das Periderm und das Phloem bis zum Kambium des Wirtsastes vor (Grundmann et al. 2010). Das dort gebildete Haustorium wird im nächsten Jahr vom Holz des Astes umwachsen und wächst selbst in gleichem Maße mit. Das Eindringen in den Wirtsast findet ausschließlich mechanisch statt, bisher konnte nirgends ein chemischer Abbau von Wirtsgewebe nachgewiesen werden

(Mathiasen et al. 2008). Hat der Keimling so eine Verbindung zum Saftstrom des Wirtsxylems hergestellt, beginnt die eigentliche parasitische Phase (Hartmann 1990).

Die Verbindung der wasserleitenden Systeme von Wirt und Mistel entsteht durch die aktive Vorwölbung der Misteltracheiden in die Gefäße des Wirtsxylems (Grundmann et al. 2010). Auf der Höhe des Wirtskambiums bildet der Mistelsenker ein Sekundärkambium, sodass die Mistel genau mit dem Radialwachstum des Astes synchron weiterwachsen und so eine Trennung der beiden Gewebe verhindern kann. Eine Verbindung zwischen dem Phloem des Wirts und der Mistel entsteht nicht (Grundmann et al. 2010).

Damit der Mistelsenker überhaupt in einen Wirtsast eindringen kann, ist ein sehr langsames Wachstum und/oder eine geschwächte Abwehrkraft des Wirtsbaums nötig – sonst wird der junge Mistelsenker bereits nach kurzer Zeit durch neu gebildetes Holz überwallt und kann sich nicht etablieren (Hartmann 1997; Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997). Besonders gute Chancen auf einen erfolgreichen Anwuchs bestehen, wenn er an der Abwurfstelle von Kurztrieben der Kiefer stattfindet, da dort der Zugang zum Wirtsxylem leicht zu erreichen ist (Hartmann 1990).

In jedem Fall geschieht die Etablierung einer Mistel nicht ohne Gegenreaktion des Wirtsbaumes: Durch Akkumulation von Abwehrstoffen, insbesondere Polyphenolen, um das junge Haustorium der Mistel herum versucht der Baum den Senker bereits im Initialstadium abzutöten (Grundmann et al. 2010). Der Erfolg dieser Gegenwehr hängt ebenfalls maßgeblich von der Vitalität des betroffenen Baums ab – ist dieser geschwächt, kann er ggf. nicht ausreichend Abwehrsubstanzen produzieren (Hartmann 1997; Tubeuf 1923).

2.1.3. Physiologie und Ernährung

Die Blätter der Mistel erreichen ein durchschnittliches Alter von 17 Monaten (Grundmann et al. 2010). 50% der Blätter werden nach 11,9 Monaten (Laubholzmistel), 18,3 Monaten (Kiefernmistel), bzw. 22,3 Monaten (Tannenmistel) abgeworfen (Pfiz und Küppers 2010). Die Blätter der Nadelholzmistel sind also langlebiger als die der Laubholzmistel, was möglicherweise auf die bessere Wasserversorgung im Winter zurückzuführen ist (Pfiz und Küppers 2010). Während die Blätter der Laubholz- und Tannenmistel mit der Zeit kontinuierlich größer werden, behalten die Blätter der Kiefernmistel über ihre gesamte Lebensdauer die Größe, die sie nach voller Entfaltung in der ersten Saison erreichen (Pfiz und Küppers 2010). Das Verhältnis zwischen neu gebildeten Blättern und Blättern aus vorhergehenden Jahren liegt relativ stabil bei 2:1 (Pfiz und Küppers 2010). Der Abwurf der alten Blätter erfolgt meist nach der vollständigen Entfaltung der neuen Blätter im Spätsommer (Grundmann et al. 2010).

Der Mistelkeimling ist aufgrund seines hohen Fettgehalts frosttolerant bis zu -15 °C. Mistelblätter sind bis -20 °C frosthart (Grundmann et al. 2010).

Früchte trägt die Mistel erstmalig ab einem Alter von 6 Jahren (Tubeuß 1923). Die Laubholzmistel hat die schwersten (ca. 82 mg), die Tannenmistel die kleinsten und leichtesten (ca. 36 mg) Samen. Die Kiefernmistel liegt dazwischen (ca. 53 mg) (Pfiz und Küppers 2010).

Die Aufnahme von Mineralien und Nährstoffen erfolgt durch Haustorien des Senkers im Wirtsast (Mutlu et al. 2016). Durch wesentlich höhere Transpirationsraten, höhere stomatäre Leitfähigkeit und geringeres Blattwasserpotential (Mathiasen et al. 2008) zeigt die Mistel eine deutlich geringere Wassernutzungseffizienz (engl.: Water Use Efficiency; WUE) (Rigling et al. 2010). Bei der Kiefernmistel wurde eine bis zu dreifach geringere Wassernutzungseffizienz festgestellt als in der Waldkiefer (Dobbertin und Rigling 2006). Selbst während einer intensiven Dürreperiode regelt die Mistel ihren Wasserverbrauch nicht herunter (Durand-Gillmann et al. 2014; Dobbertin 2005). Auch ohne eigene Transpiration des Wirtes kann die Mistel seine Leitbahnen durch ihre hohen Transpirationsraten noch für ihre eigene Wasserversorgung nutzen (Grundmann et al. 2010).

Dies kann zu einer wesentlich geringeren hydraulischen Leitfähigkeit des Xylems jenseits des Infektionspunktes und somit zu einem frühzeitigen Nadelabwurf oder sogar zum Absterben des Zweiges führen (Rigling et al. 2010; Mathiasen et al. 2008). Die gegenüber dem Wirt stark erhöhte Wasseraufnahme dient u.a. auch der Nährstoffaquisition der Mistel (Pfiz und Küppers 2010). Trotz niedriger Konzentrationen der Nährstoffe im Xylemwasser der Wirte können die Mistelbüsche so ausreichend hohe Importraten sicherstellen (Escher 2004). Insbesondere der Stickstoffwerb scheint hier relevant zu sein – wachsen Mistelgewächse auf stickstofffixierenden Wirten wie Robinien, zeigen sie in etwa die gleiche Transpirationsrate wie der Wirt (Grundmann et al. 2010).

Misteln sind terminale Senken für Mineralien, da durch den hohen Xylemwasserzustrom Nährstoffe aufgenommen, durch die fehlende Phloemverbindung aber nicht wieder an den Wirt abgegeben werden können (Escher 2004). Besonders Kalium als mobilstes Nährstoffkation akkumuliert überproportional in Misteln (Escher 2004). Die hohen Nährstoffkonzentrationen in der Mistel fördern wiederum die Wasseraufnahme aus dem Wirtsxylem (Mutlu et al. 2016). Die Akkumulation von Mineralien in den Blättern der Mistel spielt eine wichtige Rolle für viele ihrer Stoffwechselprozesse. Um potentiell schädliche Effekte der hohen Konzentrationen zu reduzieren, hat die Mistel verschiedene Mechanismen entwickelt: Durch höhere Wasseraufnahme, leichte Sukkulenz und Export über abgeworfene Blätter und Früchte werden zu hohe Konzentrationen wieder gesenkt (Mutlu et al. 2016; Glatzel 1983).

Im Gegensatz zu anderen Nährstoffen ist Stickstoff in der Mistel gegenüber dem Wirt nicht angereichert (Escher 2004). Vielfach wird deshalb angenommen, dass die Stickstoffversorgung der hauptsächlich limitierende Faktor des Mistelwachstums ist (Hosseini et al. 2007; Grundmann et al. 2010). Dagegen spricht allerdings, dass die im Wirt dominierende Aminosäure Glutamin von der Mistel in Arginin umgewandelt wird, welches als wichtigste Stickstoffspeicherform in den Blättern

akkumuliert. Dabei werden organische Kohlenstoffketten freigesetzt, die von der Mistel zusätzlich zur eigenen Photosynthese eine heterotrophe Kohlenstoffquelle darstellen. „Nebenprodukt“ dieses „heterotrophic carbon gain“ ist somit sogar eine Stickstoffübersorgung (Escher 2004). Der heterotrophe Import von Kohlenstoff ist wesentlich höher als die geringe Zuckerkonzentration im Xylemwasser des Wirtes vermuten ließe (Escher 2004; Rigling et al. 2010). Dies kompensiert die 30 bis 50 Prozent niedrigere Photosyntheserate von Misteln gegenüber dem Wirt (Pfiz und Küppers 2010). Teilweise ist der heterotrophe Kohlenstoffwerb sogar gleich groß oder größer als derjenige aus eigener Photosynthese (Escher 2004). Welcher Anteil des Nahrungserwerbs der entscheidende ist, ist bisher jedoch nicht eindeutig geklärt. Es gibt dabei außerdem große Unterschiede zwischen verschiedenen Mistelarten (Pfiz und Küppers 2010).

2.1.4. Ökologie

Die Mistel ist aufgrund ihrer ökologischen Eigenschaften nicht als „Pionierart“ einzuordnen (Pfiz und Küppers 2010). Dennoch benötigt sie viel Licht, insbesondere für die Keimung (Kołodziejek und Kołodziejek 2013). Gerade in stärker verlichteten Kronen alter, großer Bäume findet sie somit optimale Bedingungen vor (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997).

Aufgrund ihrer epiphytischen Lebensweise hoch oben in Baumkronen hat die Mistel kaum Fraßfeinde. Auch wird sie nur von wenigen Pilzen besiedelt (Grundmann et al. 2010).

Ihr Blüherfolg ist negativ mit dem Befallsgrad korreliert – unabhängig von der Baumgröße ist die entscheidende Größe hierfür also die Dichte der Mistelpopulation je Wirtsbaum. Bei einem sehr starken Befall nimmt der Blüherfolg und somit die Reproduktivität jedes einzelnen Busches deutlich ab (Donohue 1995).

2.2. Verbreitung

2.2.1. Verbreitungsgebiet

Die Weißbeerige Mistel (*Viscum album*) kommt hauptsächlich in temperaten Klimaten vor (Grundmann et al. 2010). Ihr Verbreitungsgebiet wird im Norden ca. durch den 55. Breitengrad, im Westen und Süden durch Atlantik und Mittelmeer begrenzt. Einzig im Osten reicht das Verbreitungsgebiet über Europa hinaus bis nach Vorderasien. Innerhalb dieser Grenzen sind für die Verbreitung hauptsächlich das Vorhandensein geeigneter Wirtspflanzen, das Vorkommen von als Mistelverbreiter geeigneten Vögeln sowie die Verfügbarkeit von Licht und Wärme entscheidend (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997). Das tatsächliche Verbreitungsgebiet zeigt einen deutlichen Schwerpunkt in milden, luftfeuchten Gebieten (Grundmann et al. 2010). Die Verbreitungsgrenzen der Mistel sind, sofern nicht durch vorgenannte Punkte bestimmt, insbesondere Ausdruck ihres Vermögens, sich gegen die Gegenreaktion des Wirtsbaumes zu behaupten und zu

etablieren, was somit indirekt eine negative Abhängigkeit von der Vitalität potentieller Wirtsbäume bedeutet (Hartmann 1997; Tubeuf 1923).

In Regionen mit kühlen Sommern kann die Mistel dennoch vorkommen, wenn diese durch milde Winter kompensiert werden. Ebenso können harte Winter durch entsprechend wärmere Sommer ausgeglichen werden (Grundmann et al. 2010).

2.2.2. Landschafts- bis Bestandesebene

Die Mistel ist in ihrer Samenverbreitung ausschließlich auf Vögel angewiesen (Tubeuf 1923). Die Verbreitung erfolgt hauptsächlich zur Winterzeit (Grundmann et al. 2010). Durch eine lange Koevolution mit bestimmten Vogelarten werden Mistelsamen gerichtet auf besonders geeignete, eng nach Wirtsart und Zweigdurchmesser definierte Plätze verbreitet (Aukema und Martínez del Rio 2002). Die meisten Samen landen wieder auf demselben Baum. Der Großteil der übrigen Samen wird auf die unmittelbaren Nachbarbäume des Wirts verteilt (Overton 1996; Aukema und Martínez del Rio 2002).

Die Dichte von Wirtsbäumen pro Fläche hängt mit der Präsenz, nicht jedoch mit der Intensität eines Mistelbefalls zusammen. In Beständen mit geringerer Dichte sind i.d.R. relativ mehr Bäume pro Fläche befallen als in dichteren Beständen (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Donohue 1995).

Die Verteilung von Misteln unter potentiellen Wirtsbäumen folgt einer negativen Binomialverteilung: Wenige Wirtsbäume tragen eine hohe Anzahl von Mistelbüschen, viele Wirtsbäume tragen sehr wenige Mistelbüsche. Dies weist auf ein aggregiertes Verteilungsmuster hin (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Aukema und Martínez del Rio 2002; Donohue 1995).

Die räumliche Verteilung im Bestand ist hauptsächlich abhängig von Verteilungsmuster und Intensität der initialen Befallsquellen, der Bestandesregeneration und -struktur sowie der Präsenz von Barrieren wie Nicht-Wirtsbäumen und starken Hangneigungsanstiegen (Alfaro et al. 1985).

Gute Bedingungen finden sich somit nur in Beständen, in denen potentielle Wirtsbaumarten überwiegen (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997). Daneben ist die Kronenkonkurrenz im Bestand und somit die Lichtversorgung im Kroneninneren entscheidend für einen Mistelbefall (Hilker et al. 2005). Die stärksten Befälle wurden häufig in offenen, mehrschichtigen Reinbeständen, welche durch selektive Durchforstungseingriffe entstanden waren, festgestellt (Alfaro et al. 1985).

Verschiedene Wirtsbäume sind i.d.R. in unterschiedlichem Maße von einem Mistelbefall betroffen. Gründe hierfür sind zum einen die Wahl von mistelverbreitenden Vögeln, auf welchen Bäumen sie sich bevorzugt niederlassen und wo sie somit die Mistelsamen deponieren, zum anderen spielt die Etablierungsfähigkeit der Mistelkeimlinge eine entscheidende Rolle: Hierfür ist eine Passung der Charakteristika des potentiellen Wirtsbaums und des Mistelkeimlings in Raum und Zeit erforderlich (Levey et al. 2002). Mistelpopulationen können auf Bestandesebene also als Metapopulationen

betrachtet werden, in denen potentielle Wirtsbäume einzelne Wuchsorte darstellen (Levey et al. 2002).

Der Mistelbefall führt auf Bestandesebene zu einer langfristigen, hintergründigen, aber in ihren Effekten deutlichen Strukturierung des Bestandes. Über die Wirkung durch Lückenbildung infolge durch Mistelbefall absterbender Bäume hinaus führt der Mistelbefall langfristig zur Ausdifferenzierung einer stärkeren Strukturierung durch Bildung von Infektionskernen und -nestern sowie weniger betroffenen Flecken (Mellado et al. 2017).

2.2.3. Baumebene

Ein Mistelbefall ist häufig auf großen Bäumen mit starken Zuwachsraten zu finden (Durand-Gillmann et al. 2014; Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Sangüesa-Barreda et al. 2013). Insbesondere spielt die Baumhöhe eine Rolle (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Aukema und Martínez del Rio 2002), in Verbindung mit dem sozialen Status – dominante Bäume werden öfter von Misteln befallen (Sangüesa-Barreda et al. 2012; Durand-Gillmann et al. 2014) (siehe auch 4.2.4. Zuwachs und soziale Stellung). Befallene Bäume sind außerdem häufig weniger buschartig, sondern zeigen lange, gestreckte Wuchsformen (Sangüesa-Barreda et al. 2013).

Vor allem die Erstinfektion in einem Bestand findet häufig an alten, hohen Bäumen statt, da diese mehr und bessere Ruheplätze für mistelverbreitende Vögel bieten (Kołodziejek und Kołodziejek 2013).

Für Keimung und Wachstum der Mistel besonders förderlich ist eine hohe Lichtversorgung in der Krone (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Lamont 1983). Bäume mit hohen Nadel-/Blattverlusten eignen sich somit besonders gut als Mistelhabitat (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997), zumal diese oft sowieso schon geschwächt sind und einer Etablierung der Misteln nicht ausreichend Gegenwehr entgegensetzen können.

Die Kiefernmistel kommt hauptsächlich an den äußeren Zweigen im Kronenmantel vor, teilweise aber auch im Kroneninneren und selten am Stamm (Kołodziejek und Kołodziejek 2013). Häufig beginnt der Befall in der Oberkrone und breitet sich dann nach unten hin aus (Sangüesa-Barreda et al. 2012).

Innerhalb einer Krone kommen Mistelbüsche oft stark geklumpt vor, während andere Teile der Krone wesentlich schwächeren bis gar keinen Mistelbefall zeigen (Sangüesa-Barreda et al. 2012). Hierbei ist zu beachten, dass nicht jeder Mistelbusch aus Vogelsaat hervorgehen muss: Auch eine vegetative Ausbreitung durch Adventivsprosse ist innerhalb eines Wirtsbaumes vereinzelt möglich (Hartmann 1990).

2.3. Vektoren

2.3.1. Verhalten und Mistelverbreitung

In ihrer Verbreitung ist die Mistel vollständig auf Vögel als Vektoren angewiesen (Tubeuf 1923). Dabei handelt es sich häufig um hoch spezialisierte Beziehungen (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Aukema und Martínez del Rio 2002). Unter den Vögeln, die Mistelbeeren als Nahrungsquelle nutzen, gibt es zwei Gruppen: Eine verbreitet die Samen beim Fraß der Beere weiter, die andere vernichtet die Samen (Grundmann et al. 2010).

Freistehende und besonders lichtdurchflutete Bäume werden von Vögeln als Sitzplatz bevorzugt, weshalb dort häufig ein besonders starker Mistelbefall zu finden ist (Grundmann et al. 2010). Insbesondere Singulärbäume außerhalb geschlossener Bestände sind daher oft stark von Misteln befallen (Durand-Gillmann et al. 2014). Innerhalb von Wäldern bevorzugen die mistelverbreitenden Vögel offenere Bestände mit geringer Kronenkonkurrenz (Kołodziejek und Kołodziejek 2013).

Als Sitzplatz, insbesondere für längere Ruhephasen, bevorzugen mistelverbreitende Vögel Plätze mit guter Aussicht, an denen nahende Gefahren früh erkannt werden können (Ramm 2005). Große Bäume, die eine hohe soziale Stellung aufweisen und über den übrigen Bestand hinausragen, sind somit als Habitat für sie besonders geeignet (Kołodziejek und Kołodziejek 2013). Ein weiteres Kriterium ist das vorhandene Nahrungsangebot, sodass Bäume mit einem reichlichen Angebot an Mistelbeeren bevorzugt angefliegen werden (Mellado et al. 2017). Rast- und Schlafplätze der Vögel, an denen die Bäume besonders stark als Sitzplatz frequentiert werden, zeigen häufig sehr hohe Misteldichten (Grundmann et al. 2010; Aukema und Martínez del Rio 2002). Es kommt somit zu einer positiven Rückkopplung: Bereits infizierte Bäume erhalten überproportional mehr neue Samen aufgrund höherer Vogelaktivität (Aukema und Martínez del Rio 2002; Kołodziejek und Kołodziejek 2013).

Exponierte Mistelbüsche am Kronenäußeren werden bevorzugt abgefressen, im Kroneninneren bleiben mehr Beeren an den Büschen hängen (Tubeuf 1923). Die meisten Samen landen wieder auf dem Wirtsbaum oder auf unmittelbar benachbarten Bäumen, da die verbreitenden Vögel nur sehr kurze Zeiten für die Darmpassage der Samen benötigen (Overton 1996). Somit findet durch Vögel nur sehr selten eine Verbreitung über große Distanzen statt, beispielsweise wenn Mistelbeeren sich im Gefieder verkleben. Vielmehr muss von einer langsam fortschreitenden Verbreitung von Fleck zu Fleck ausgegangen werden (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997).

Die durch lange Koevolution entstandene Beziehung zwischen Misteln und ihren Vektoren ist besonders beachtlich. Hierbei handelt es sich um einen in der Natur sehr seltenen echten Mutualismus: Während die Mistel den Vögeln wertvolle Nahrung zu sonst sehr kargen Jahreszeiten bietet, verbreiten diese die Mistelsamen gerichtet auf besonders geeignete Wuchsplätze, wovon sie

selbst wiederum durch ein besseres Nahrungsangebot profitieren (Mathiasen et al. 2008; Aukema und Martínez del Río 2002; Levey et al. 2002).

Bei Betrachtung der Verbreitung von Misteln muss also immer auch die Population und das Verhalten von mistelverbreitenden Vögeln beachtet werden. Entscheidend für Veränderungen ist insbesondere das Zugverhalten: Überwintern mehr Vögel in Mitteleuropa, anstatt über Winter fortzuziehen, ist auch die Mistelverbreitung in besonderem Maße begünstigt (Grundmann et al. 2010; Ramm 2005).

2.3.2. Misteldrossel

Die Misteldrossel (*Turdus viscivorus L.*) ist der wichtigste Vektor der Weißbeerigen Mistel (Grundmann et al. 2010). Unter den Drosselarten ist sie die einzige, die für die Mistel als Vektor von Bedeutung ist. Die Singdrossel verschmäht Mistelbeeren gänzlich, auch die Wacholderdrossel frisst fast nie Mistelbeeren (Tubeuf 1923).

Die Misteldrossel kommt als Brutvogel in der gesamten paläarktischen Region von den britischen Inseln über den Himalaja bis nach China vor, außerdem in Mittel- und Südeuropa vorwiegend in Gebirgen. Ihre nördliche Verbreitungsgrenze als Brutvogel liegt in Lappland bei ca. 68 Grad nördlicher Breite. Im Winter ziehen die Populationen aus den nördlichen Verbreitungsteilgebieten durch die Türkei und Kleinasien bis nach Nordafrika und auf die arabische Halbinsel (Tubeuf 1923).

Im Frühjahr und Sommer, während der Brut und der Aufzucht der Jungen, überwiegt tierische Nahrung wie Insekten, Schnecken, Würmer und andere Kleintiere. Im Herbst und Winter ernährt sie sich dagegen hauptsächlich von den Früchten verschiedener Sträucher und Bäume (Ramm 2005). Mistelbeeren verzehrt sie von Oktober bis März (Ramm 2005). Tubeuf (1923) gab an, dass die Mistelbeeren in Deutschland zwar bereits ab Dezember Großteils reif seien, jedoch noch nicht verzehrt würden, da die Misteldrosseln allesamt in ihrem Winterquartier waren. Er postulierte, dass der Verzehr der Mistelbeeren ausschließlich ab Januar bis März beim Nordzug der Misteldrosseln stattfinde, weil dann der Boden gefroren sei und die Vögel nicht genug Würmer und Schnecken erbeuten könnten (Tubeuf 1923).

Heute können Misteldrosseln jedoch den ganzen Winter über beim Fraß von Mistelbeeren beobachtet werden und es bleiben deutliche Teile der Population als Standvögel auch über Winter in der Region (Ramm 2005).

Die Misteldrossel ist ein Vogel der aufgelockerten Wälder und des Waldrands, sie kann aber auch Parklandschaften mit Einzelbäumen als Habitat nutzen (Guest 2010). Misteldrosseln verteidigen territorial prominente Sitzwarten mit gutem Ausblick und reichlichem Angebot an Mistelbeeren. Sie beobachten ihr Revier dabei von einer erhöhten Position aus und fliegen eindringende Konkurrenten,

darunter auch deutlich größere Vögel wie Eichelhäher (*Garndus glandarius*), direkt an (Guest 2010; Ramm 2005; Tubeuf 1923).

Misteldrosseln sind sehr scheu und meiden die Nähe zu menschlichen Siedlungen (Ramm 2005). Besonders bevorzugen sie freie, mit Nadelwald wechselnde Plätze (Tubeuf 1923). In weiten ungestörten Landschaften gilt die Misteldrossel als Fern- und Offenlandausbreiter, der häufig auch einzelstehende Bäume anfliegt (Stiebel 2003).

Vom frühen Morgen bis zum Mittag und wieder gegen Abend nimmt die Misteldrossel durchschnittlich zwei- bis viermal pro Stunde mehrere Mistelbeeren zu sich. Am frühen Nachmittag legt sie häufig längere Ruhephasen ohne Nahrungsaufnahme ein (Ramm 2005). Die Beeren zupft sie rasch nacheinander vom Mistelbusch ab und verschluckt sie als Ganzes. Danach sucht sie zu Verdauungszwecken einen ruhigen Platz auf (Ramm 2005). Ihre Verdauung benötigt oft nur zwischen zehn und fünfzehn Minuten, dann werden die unverdauten Mistelsamen wieder ausgeschieden (Ramm 2005). Die Kerne sind i.d.R. ganz und hängen oft auch nach der Verdauung noch mit den Beerenhäuten zusammen (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997). Zwar frisst die Misteldrossel viele Kerne, nur einige davon treffen nach der Ausscheidung jedoch einen gut geeigneten Anwuchspunkt für Misteln (Ramm 2005).

Der Mistelsamen braucht um keimen zu können nicht zwingend eine Darmassage. Viele Kerne werden von den Vögeln auch direkt beim Fraß oder in Gewöllen wieder ausgeworfen (Tubeuf 1923).

In den letzten Jahren ist zunehmend eine Veränderung des Zugverhaltens der Misteldrossel zu beobachten. Mehr und mehr Vögel überwintern statt nach Süden zu ziehen in tieferen Lagen in Mitteleuropa, wo sie sich hauptsächlich von Mistelbeeren ernähren. Zusätzlich bieten sich ihr durch Parkanlagen, insbesondere in tendenziell wärmeren Stadtgebieten, künstliche Verbreitungsmöglichkeiten mit reichem Nahrungsangebot durch mistelbefallene Parkbäume (Guest 2010).

2.3.3. Mönchsgrasmücke

Die Mönchsgrasmücke (*Sylvia atricapilla*) gilt als Nah- und Buschlandausbreiter von Mistelsamen. Sie fliegt kaum einzelne Bäume oder Sträucher an (Stiebel 2003). In größerer Zahl kehrt sie erst ab Mitte März nach Mitteleuropa zurück (Ramm 2005).

Im Gegensatz zur Misteldrossel bevorzugt die Mönchsgrasmücke Mistelbeeren im inneren und unteren Kronenbereich, welcher gleichzeitig ihren hauptsächlichen Aufenthaltsort darstellt (Ramm 2005). Beim Fraß entfernt die Mönchsgrasmücke zuerst den Kern der Beere, indem sie den Kopf schwenkend den Zweig entlangläuft, bis die verbindenden Fäden zwischen Kern und Fruchthülle

abreißen. Erst dann verschluckt sie die Beerenhaut samt dem anhaftenden äußeren Mesokarp. Meist erfolgt dies auf demselben Baum, an dem die Mistelbeere aufgenommen wurde (Ramm 2005).

Der Samen wird von der Mönchsgrasmücke also direkt vor Ort zurückgelassen (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997). Im Gegensatz zur Misteldrossel, bei der viele Kerne ihr Ziel verfehlen, frisst die Mönchsgrasmücke zwar absolut weniger Mistelbeeren, platziert jedoch fast alle Kerne an optimal für die Mistel geeigneten Wuchsplätzen (Ramm 2005).

2.3.4. Seidenschwanz

Auch der Seidenschwanz (*Bombycilla garrulus*) verzehrt Mistelbeeren ganz und gibt die Samen unverdaut wieder ab (Tubeuf 1923). Einige wenige Exemplare überwintern alljährlich in Teilen Mitteleuropas (Tubeuf 1923). Gelegentlich kommt es im Herbst jedoch zu Massenwanderungen. Dann ziehen viele Tausend Seidenschwänze zur Überwinterung über Deutschland und die Schweiz bis nach Italien und in den Balkan. Dies geschieht regelmäßig alle zehn bis elf Jahre (Ramm 2005).

Der Seidenschwanz trifft i.d.R. von Anfang November bis Dezember in Mitteleuropa ein und bleibt bis Ende Februar, selten auch bis Anfang April (Tubeuf 1923). Gerade in harten Wintern ist er somit ein wichtiger Mistelverbreiter (Tubeuf 1923). Ausbreitungswellen der Mistel werden häufig mit seinen Massenwanderungen in Verbindung gebracht (Grundmann et al. 2010).

Höchstwahrscheinlich sind die Massenwanderungen vom Futterangebot in den Heimatregionen der Seidenschwänze abhängig – während dieses jährlich stark variiert, bietet die Mistel jedes Jahr etwa gleich viele Beeren und stellt somit ein geeignetes Ausweichfutter dar (Grundmann et al. 2010). Der Seidenschwanz nimmt diese jedoch erst als Notfutter an, wenn andere Früchte zur Neige gehen, und wenn sie bereits sehr reif und somit auch für ihn als schlechten Nahrungsverwerter gut verdaulich sind (Ramm 2005).

Der Seidenschwanz braucht nur sehr kurze Zeiten zur Verdauung: Die meisten Mistelsamen passieren seinen Darmtrakt in unter zehn Minuten. Im Gegensatz zu Misteldrossel und Mönchsgrasmücke verbreitet der Seidenschwanz die Mistelsamen ausschließlich über seinen Kot (Tubeuf 1923).

In geschlossenen Wäldern sind nur sehr selten Seidenschwänze zu beobachten. Hauptsächlich sind sie Vögel des Offenlandes, die sich in nur durch einzelne Gebüsche und Baumreihen unterbrochenen Landschaften aufhalten. Im Wald sind sie höchstens am Waldrand und in den ersten Baumreihen sowie in sehr lichten Beständen zu finden (Tubeuf 1923).

2.3.5. Andere Arten

Neben den Hauptverbreitern Misteldrossel, Mönchsgrasmücke und Seidenschwanz werden Mistelbeeren vereinzelt auch von anderen Vogelarten angenommen und verbreitet. Dazu zählen Elster, Eichelhäher und vereinzelt Tannenhäher, Blutfink, Fasan, Rohkehlchen, Schwarzspecht, Ringeltaube, große Wildtaube, Krähen, Dohlen, Drosselarten und Stare (Tubeuf 1923).

Außerdem stellen Mistelbeeren ein Ausweichfutter für verschiedene Meisenarten dar (Grazi und Urech 1996). Meisen zerstören den Mistelsamen beim Fraß durch gezieltes Aufpicken der Samen und Verzehr der Mistelembryonen (Grazi und Urech 1996). Sie wirken dadurch der Verbreitung der Mistel entgegen (Blaschke et al. 2004). Meisen und Kleiber fressen Mistelsamen vor allem im Frühwinter – bei hohen Meisenpopulationen wurden in Versuchsbeständen im Dezember und Januar Ausfälle von 100% aller Mistelsamen festgestellt. Ab April, wenn wieder andere Nahrung verfügbar ist, nimmt der Fraß von Mistelsamen durch Meisen deutlich ab (Grazi und Urech 1996).

Beachtenswert ist, dass Meisen erst im zweiten Jahr nach der Aussaat von Misteln häufig an derselben Stelle Mistelsamen als Nahrung suchen. Dies wird als Lerneffekt interpretiert, der im ersten Jahr stattfindet (Grazi und Urech 1996).

Meisen bevorzugen Samen von Nadelholzmisteln (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997), insbesondere der Kiefernmistel (Grazi und Urech 1996). In Versuchen wurde nachgewiesen, dass tatsächlich die Mistelsubspezies, nicht der Wirtsbaum, für diese Bevorzugung entscheidend ist (Grazi und Urech 1996).

2.4. Auswirkungen auf Wirtspflanzen

2.4.1. Physiologie

Wird ein Wirtsast durch Misteln befallen, kann es zu Änderungen in der Blattfläche, Blattanzahl, Wachstumsrate und Biomasseproduktion des Astes, und, je nach Intensität des Befalls, des ganzen Baums kommen. Hauptgrund der Produktivitätsminderung und der Abnahme von Blattfläche und mittlerem Blattgewicht ist der Wettbewerb des Baums mit der Mistel um Wasser, Nährstoffe und Metabolite (Hosseini et al. 2007). Außerdem zeigen befallene Zweige mitunter abnormales Wachstum in Form, Länge und Verzweigung (Durand-Gillmann et al. 2014).

Durch die Nährstoffabsorption der Mistel wird vor allem das Wachstum der Blätter, bzw. Nadeln behindert. Kiefern mit Mistelbefall zeigen häufig geringere mittlere Nadel-Trockengewichte und geringere Nadellängen (Mutlu et al. 2016). Außerdem sind die Nadeln mistelbefallener Kiefern kurzlebiger (Durand-Gillmann et al. 2014).

Ähnliche Effekte wurden nach intensiven Dürreperioden beobachtet. Da die Mistel neben dem Nährstoffentzug auch die Wasserversorgung des Baums stört, ist ein kombinierter Effekt beider

Parameter denkbar (Bigler et al. 2006). Der Effekt ist bei intensivem Mistelbefall auch in der Kronenarchitektur durch geringere Zweiglängen zu bemerken (Rigling et al. 2010).

Bäume mit Mistelbefall zeigen häufig geringere Fruktifikation als unbefallene Bäume (Kanat et al. 2010). Ihre Kronen sind, insbesondere nach Trockenjahren, deutlich lichter (Sangüesa-Barreda et al. 2013; Dobbertin und Rigling 2006). Ohne Mistelbefall sind ihre Kronen deutlich dichter benadelt (Sangüesa-Barreda et al. 2012). Teilweise sind an befallenen Bäumen höhere Anteile von toten Zweigen und Feinreisig zu beobachten (Kołodziejek und Kołodziejek 2013).

2.4.2. Photosynthese und Stoffwechsel

Auch bei intensiver Dürre reguliert die Mistel ihren Wasserverbrauch nicht herunter und verdunstet weiter Wasser, selbst wenn der Wirtsbaum seine Stomata bereits vollständig geschlossen hat (Dobbertin 2005; Durand-Gillmann et al. 2014; Sangüesa-Barreda et al. 2013). Sie erhöht so den Trockenstress (Dobbertin 2005), stört die Wasser-Homöostase des Wirts und reduziert seine Möglichkeit zur C-Assimilation (Mutlu et al. 2016). Der Wassergehalt der Nadeln befallener Äste geht stark zurück (Mutlu et al. 2016). Da die Mistel mit dem Xylemwasser auch Kohlenstoff aufnimmt (siehe auch 2.1.3. Physiologie und Ernährung) (Rigling et al. 2010), verschiebt sich im betroffenen Baum langfristig das C-Quellen-Senken-Verhältnis (Sangüesa-Barreda et al. 2013).

Misteln sind terminale Senken für Mineralien (Escher 2004), ihre Blätter haben deutlich höhere Nährelementgehalte als die Nadeln befallener Kiefern (mit der Ausnahme von Eisen und Nickel) (Mutlu et al. 2016). Befallene Bäume verändern ihren Metabolismus, um mehr Mikronährstoffe aus dem Boden aufzunehmen (Hosseini et al. 2007). Hohe Kalium-Konzentrationen erhöhen die Abwehrkraft von Pflanzen gegen Parasiten und schwierige Umweltbedingungen (Marschner 2011). Wird ein Baum durch Misteln befallen, ist insbesondere ein starker Anstieg der Kaliumaufnahme aus dem Boden zu beobachten (Hosseini et al. 2007). Gleichzeitig ist zu beachten, dass durch die Akkumulation von Vogelkot unter stark befallenen Bäumen durch häufige Besuche mistelverbreitender Vögel dort eine bessere Nährstoffverfügbarkeit herrscht (Mellado et al. 2017).

Vergleicht man befallene und unbefallene Bäume, so sind bei Ersteren die Gehalte aller Elemente außer Schwefel in den Nadeln dennoch deutlich geringer als bei Letzteren (Mutlu et al. 2016). Der Nährelementmangel wirkt sich direkt auf den Stoffwechsel der Bäume aus: Beispielsweise Magnesium spielt als Zentralatom des Chlorophylls und, neben Eisen und Mangan, als Aktivator vieler Enzyme eine sehr wichtige Rolle in der Kohlenstofffixierung. Bei einem Mangel ist die Photosynthesekapazität des Baums durch Chlorophyllmangel stark eingeschränkt und es kommt zu Chlorosen (Mutlu et al. 2016). Neben den ernährungsphysiologischen Auswirkungen auf die Photosynthesekapazität muss außerdem die rein mechanistische Wirkung der Raumeinnahme der Mistelbüsche in der Krone betrachtet

werden, die dazu führt, dass die gesamte potentielle Oberfläche photosynthetisch aktiver Gewebe des Baums reduziert wird (Durand-Gillmann et al. 2014; Rigling et al. 2010).

2.4.3. Stress

Bei Auftreten einer Stresssituation reagiert der Baum darauf. Bleibt der Stress kontinuierlich vorhanden, passt der Baum sich an (Restitution und Abhärtung) und erreicht danach entweder geringere, identische oder höhere Level von Stressresistenz. Bleibt der Stress über lange Zeit erhalten oder kommt ein weiterer Stressfaktor hinzu, kann der Baum unter eine Resistenzschwelle fallen, unterhalb derer er irreversible Schädigungen erfährt. Permanente Schäden können einen geringeren Vitalitätslevel und sozialen Status zur Folge haben oder sogar bedeuten, dass keine Erholung mehr möglich ist (Dobbertin 2005).

Stressfaktoren können den Baum entweder direkt durch Störung der photosynthetischen Prozesse oder indirekt durch reduzierte Verfügbarkeit von Ressourcen beeinträchtigen (Dobbertin 2005). Es gibt verschiedene Kategorien von Stressfaktoren: Prädisponierende Faktoren (engl. predisposing) wie z.B. Wettbewerb oder Luftverschmutzung beeinträchtigen den Baum über Jahre hinweg. Anstoßende Faktoren (engl. inciting) beeinträchtigen die physiologische Funktionsfähigkeit eines Baums und reduzieren deutlich seine Vitalität und Abwehrkraft gegen Pathogene. Mitwirkende Faktoren (engl. contributing) verstärken den schon vorhandenen Stress über kurze oder lange Zeit. Beispiele hierfür sind sekundäre Insekten und Phytopathogene (Bigler et al. 2006). In welche Kategorie die Mistel einzuordnen ist, ist nicht eindeutig zu entscheiden, da es zu einer Rückkopplung zwischen Baumvitalität und Mistelbefall kommt. Bereits geschädigte Bäume können leichter von Misteln befallen werden, von Misteln befallene Bäume werden durch diese wiederum ab einer bestimmten Befallsintensität weiter geschwächt (Grundmann et al. 2010). Höchstwahrscheinlich ist hier das Befallsstadium entscheidend: Während zunächst eine durch andere Faktoren reduzierte Vitalität des Baumes den stärkeren Mistelbefall begünstigt, so führt dieser erst ab einer gewissen Intensität selbst zur weiteren Verschlechterung des Baumzustandes und prädisponiert ihn für weitere Schädigungen (Grundmann et al. 2010). Ein leichter Mistelbefall beeinflusst den Baum generell kaum (Noetzli et al. 2003). Wird jedoch die kritische Schwelle des Befalls überschritten, können weitere Pathogene wie Insekten und Pilze eindringen, welche zusammen häufig zu Schädigungen bis hin zum Absterben des Baums führen (vgl. 2.4.5. Mortalität) (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Hawksworth und Scharpf 1986). Von besonderer Bedeutung ist hier auch die Dauer der Schädigung – bildet sich ein Merkmal nach kurzer Zeit wieder zurück, ist weniger von einer irreversiblen Schädigung auszugehen, als wenn mit einer über die Zeit immer stärker werdenden Ausprägung gerechnet werden muss (Schmid-Haas 1993).

Durch ihre Langlebigkeit ist die Mistel somit sowohl als wichtiger prädisponierender Faktor durch Nadelverlust und Reduktion der photosynthetischen Kapazität, als auch als mitwirkender Faktor durch

Erhöhung von vorhandenem Wasserstress einzuordnen (Dobbertin und Rigling 2006; Sangüesa-Barreda et al. 2012; Hartmann 1990).

Mistelbefallene Bäume zeigen häufig höhere Nadel-/Blattverluste, Abnahmen im Durchmesserzuwachs und stärkere Reaktionen auf Trockenstress als unbefallene Bäume (Sangüesa-Barreda et al. 2012). Die Reaktion auf den Trockenstress erfolgt häufig verzögert, teilweise erst in der nächsten Vegetationsperiode (Dobbertin und Rigling 2006). Insgesamt ist die Stärke der Reaktion eines Baums immer abhängig von individuellen Faktoren wie Vitalität, Alter und genetischen Voraussetzungen (Grundmann et al. 2010). Somit kann nicht ohne weiteres eine generelle Aussage über eine kritische Schwelle von Stress getroffen werden. Vielmehr handelt es sich um ein kompliziertes Konstrukt verschiedener Faktoren, die untereinander in verschiedensten Ursache-Wirkungs-Beziehungen stehen.

2.4.4. Wachstum und Zuwachs

Wachstumsprozesse von Bäumen können ihrer Wichtigkeit nach (absteigend) wie folgt eingestuft werden: Blattwachstum, Wurzelwachstum, Knospenwachstum, Speichergewebewachstum, Stammwachstum, Bildung von Verteidigungssubstanzen, reproduktives Wachstum (Dobbertin 2005). Ein leichter Mistelbefall hat generell keine Auswirkungen auf die Wachstumsprozesse von Bäumen (Sangüesa-Barreda et al. 2013). Oft dauert es viele Jahre, bis die Befallsintensität den Punkt erreicht, an dem Zuwachs und Reproduktion des Wirtsbaumes in forstwirtschaftlich relevanten Maßen beeinträchtigt werden (Mathiasen et al. 2008).

Nach Erreichen einer kritischen Befallsintensität stellten viele Studien deutliche Durchmesserzuwachsrückgänge der betroffenen Bäume fest (Durand-Gillmann et al. 2014; Sangüesa-Barreda et al. 2012; Sangüesa-Barreda et al. 2013; Kanat et al. 2010; Noetzli et al. 2003; Barbu 2009). Je stärker die Bäume befallen sind, desto stärker ist dann auch der Zuwachsrückgang ausgeprägt (Kanat et al. 2010; Barbu 2009). Ein guter Indikator für den Zuwachsverlust ist die Kronenverlichtung: Mehrfach konnten in stark befallenen Beständen gute Zusammenhänge zwischen Nadel-/Blattverlust und Zuwachsrückgang durch den Mistelbefall festgestellt werden (Sangüesa-Barreda et al. 2012; Dobbertin 2005).

Reduzierter Zuwachs vor allem über längere Zeiträume ist ein klares Zeichen einer dauerhaften Schädigung des Baums durch widrige Umweltbedingungen und/oder andere Stressfaktoren (Schmid-Haas 1993). Während einzelne Trockenjahre durchaus anhand deutlich kleinerer Jahresringe erkannt werden können, kommt es bei sonst vitalen Bäumen i.d.R. schnell zu einer Resilienz und Rückkehr zur normalen Wuchsleistung. Wirkt ein Stressfaktor wie der Befall mit Misteln langfristig, kann eine Resilienz der Durchmesserzuwächse nach einer Dürre nur wesentlich langsamer und schwächer

stattfinden. Oft stellt ein solches Ereignis den Beginn langfristiger Wachstumsdepressionen dar (Bigler et al. 2006).

Ursächlich für die geringeren Zuwächse in Trockenjahren ist eine Limitierung der kambialen Aktivität, da sich aufgrund von Wassermangel die neu gebildeten Zellen nicht ausreichend ausdehnen können (Eilmann et al. 2011). Bei extremem Trockenstress kann es an der Stammbasis sogar zum Ausfall von Jahrringen kommen (am Kronenansatz ist dies fast nie der Fall) (Noetzli et al. 2003). Die Reaktion des Durchmesserwachstums ist also nicht auf der gesamten Stammlänge gleich stark ausgeprägt: Die stärkste Korrelation zwischen Befallsgrad und Zuwachs findet sich in apikalen Holzproben, die schwächste auf Brusthöhe (Sangüesa-Barreda et al. 2012). Auch an Ästen kann der Zuwachsrückgang beobachtet werden (Rigling et al. 2010).

Neben der Jahrringbreite kann auch der Frühholz/Spätholz-Übergang durch Trockenstress nach vorne verschoben werden (Eilmann et al. 2011).

2.4.5. Mortalität

Ist der kritische Punkt des Befalls überschritten und es kommt zu einer längerfristigen, irreversiblen Schädigung der betroffenen Bäume, so endet der Befall oft mit ihrem Absterben. Als mitwirkender Stressfaktor intensiviert die Mistel schon vorhandene negative Umweltbedingungen und trägt somit zur Mortalität der Wirtsbäume bei (Grundmann et al. 2010).

Je stärker Bäume schon durch Standortfaktoren und andere Pathogene geschädigt sind, desto geringer ist die kritische Schwelle der Befallsintensität, bei deren Überschreiten der Absterbeprozess eines Baums beginnt (Dobbertin 2005; Dobbertin und Rigling 2006). Der Nadel-/Blattverlust als Maß für die Kronenverlichtung infolge von Umweltschäden sagt dies relativ gut voraus (Dobbertin und Rigling 2006).

Insbesondere in der auf starke Trockenjahre folgenden Vegetationsperiode sind auf trockenen Standorten die Mortalitätsraten mistelbefallener Bäume besonders hoch (Rigling et al. 2010). Neben dem Niederschlag in der Vegetationsperiode ist auch die Bodenmächtigkeit, die Bodenart und daraus resultierend die Wasserspeicherkapazität des Bodens entscheidend für die Stärke des Trockenstress – auf flachgründigen Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität finden sich die höchsten Mortalitätsraten (Dobbertin und Rigling 2006).

Neben der direkten Schädigung durch die Mistel als mitwirkenden Faktor muss auch ihre Rolle als prädisponierender Faktor betrachtet werden: So sind durch Mistelbefall geschwächte Bäume eher empfänglich für weitere Pathogene, welche dann letztendlich zur Mortalität führen oder beitragen können (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Bigler et al. 2006).

3. Material und Methoden

3.1. Datengrundlage

Im Rahmen der Waldsterbensdiskussion in den 1980er Jahren wurde, um eine verlässliche Datengrundlage für Aussagen über den Zustand der Wälder zu schaffen, das „Internationale Kooperationsprogramm Wälder“ (ICP Forests) ins Leben gerufen (BMEL 2016). Dieses Programm koordiniert europaweit die Durchführung des Langzeit-Waldmonitorings. Seit Anfang der 1980er Jahre wurden extensive Waldschäden in ganz Europa beobachtet und in einem breiten gesellschaftlichen Diskurs thematisiert. Seit 1985 steht als Antwort darauf nach den Vorgaben der „Genfer Luftreinhaltekonvention“ (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, CLRTAP) der UNECE der Zustand der Wälder auf zwei Intensitäts-Levels unter Langzeitmonitoring (BMEL 2016; ICP Forests 2017).

3.1.1. Level 1 (Waldzustandserhebung)

Ziel des Level 1-Monitorings ist die flächenmäßig repräsentative Gewinnung von Aussagen über den Vitalitätszustand der Wälder. Seit 1984 (neue Bundesländer: seit 1990) werden deutschlandweit auf einem 16 x 16 km-Raster an jedem Rasterkreuzungspunkt, der im Wald liegt, in einer Stichprobe der Belaunungs-, bzw. Benadelungszustand sowie weitere abiotische und biotische Schäden an den Bäumen aufgenommen (BMEL 2016).

In Bayern wurde dieses Raster 2006 dem Raster der Bundeswaldinventur (siehe 3.1.3. Bundeswaldinventur (BWI)) angeglichen. Neben den Bäumen der Kreuztrakte mit vier Sechsbäumstichproben (Prodan 1968), welche an der Traktecke 1 angelegt werden, werden auch alle Probebäume der BWI an den vier Traktecken selbst angesprochen (vgl. Abbildung 1). Zusätzlich wurden in einigen Aufnahmejahren in bestimmten Gebieten auch die Punkte des 8 x 8 km Rasters aufgenommen (BMEL 2016; Wauer 2017).

Für diese Arbeit wurden die bayerischen Daten des Level 1-Monitoringnetzes verwendet. Die Daten lagen jahresweise in einzelnen Microsoft Excel-Tabellen und uneinheitlicher Formatierung vor. Außerdem enthielten die Daten an mehreren Stellen Verschlüsselungs-, Formatierungs- und Plausibilitätsfehler. Vor Beginn der Arbeit wurden zunächst ggf. veränderte Schlüsselzahlen und Notationsweisen angeglichen, die Tabellen in ein einheitliches Format gebracht und in eine Gesamtdatenbank importiert. Außerdem wurden in der Programmiersprache VBA Prüfroutinen zur Überprüfung der Plausibilität innerhalb der Datensätze programmiert und die Datenbank damit analysiert. Wo möglich wurde anhand der Betrachtung desselben Baums in anderen Jahren oder anderer verbundener Parameter manuell die ursprüngliche Situation rekonstruiert und die vorhandenen Fehler korrigiert. Teilweise konnten Daten nicht rekonstruiert werden, in diesen Fällen wurde „systembedingt fehlend“ eingetragen.

Aufgrund des häufigen Wechsels des Aufnahme­rasters von Jahr zu Jahr (gebietsweise oder bayernweite Verdichtung auf engere Raster) können für viele Bäume keine durchgehenden Aussagen getroffen werden, oft liegen nur einzelne oder zeitlich weit auseinanderliegende Aufnahmen vor. Wo durchgehende Zeitreihen nötig sind wurde deshalb das gemeinsame Kollektiv an Trakten, das in allen Jahren von 2007 bis 2017 aufgenommen wurde, betrachtet.

Vor 2007 lässt sich anhand der Daten keine Aussage über den Mistelbefall treffen. Baumweise Ansprachen dazu finden sich in den Daten zum einen in der Schadtabelle (aufgenommen ab 2007), zum anderen werden seit 2013 die Anzahl der großen, mittleren und kleinen Mistelbüsche je Baum und seit 2014 die Mistelstufe (Wauer 2017) aufgenommen.

Für das gesamte Raster liegt aus dem Projekt „WP-KS-KW“ (Waldproduktivität–Kohlenstoffspeicherung–Klimawandel) je Traktecke eine Reihe an Umweltvektordaten wie z.B. Basensättigung, Niederschlagsmenge und viele weitere vor, welche teilweise aus Daten der Bodenzustandserhebung, welche ebenfalls auf dem Level 1-Raster durchgeführt wurde, und teilweise aus anderen Datenquellen wie Rasterausstichen aus Übersichtskarten oder aus Indexberechnungen stammen.

Um Aussagen abzuleiten, wurden die Datenbank-Tabellen über SQL-Abfragen mit weiteren Informationen (beispielsweise zu Topographie, Baumpositionen und traktweisen Aussagen) verbunden und die Abfragetabellen ausgewertet.

Wurden trakteenweise Aussagen getroffen, so wurden jeweils alle Bäume einer Ecke betrachtet. Für Ecken mit Kreuztrakt bedeutet dies, dass alle Bäume der BWI-Probe an dieser Ecke und zusätzlich alle Bäume des Kreuztraktes enthalten sind. Wurden traktweise Aussagen getroffen, so beziehen sich diese regelmäßig auf alle im entsprechenden Jahr für diesen Trakt aufgenommenen Ecken, inklusive der Kreuztrakte.

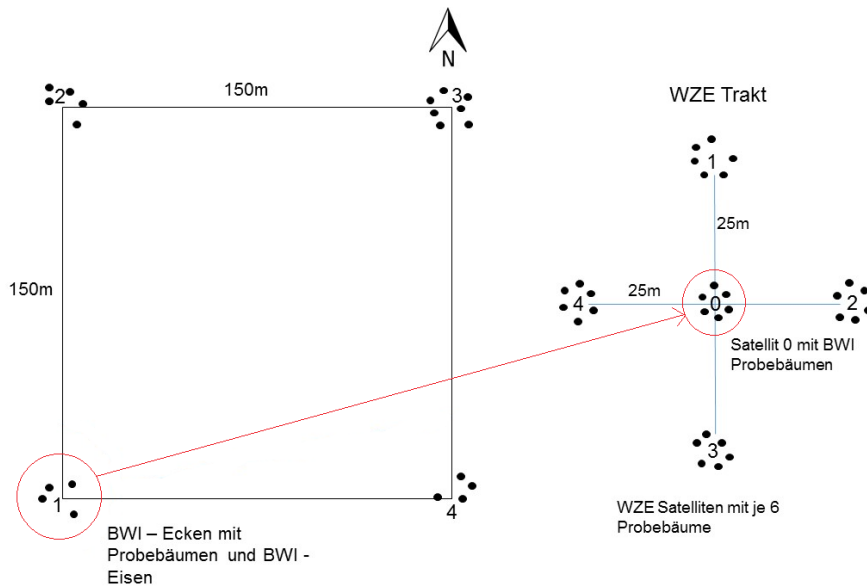


Abbildung 1 - Schematischer Aufbau eines Level 1-Traktes der Waldzustandserhebung. Ein Trakt besteht aus vier Stichprobenmittelpunkten, die die Ecken eines Quadrats mit einer Seitenlänge von 150 m darstellen. Dort werden alle Bäume, die in einer Winkelzählprobe mit Faktor 4 gezählt werden, aufgenommen. Zusätzlich wird an Ecke 1 in je 25 m Entfernung in jede Haupthimmelsrichtung eine Sechsbäumstichprobe nach Prodan (1968) angelegt („Kreuztrakt“). Quelle: Wauer (2017), verändert

3.1.2. Level 2 (Waldklimastationen)

Zusätzlich zu den flächenhaften Aussagen des Level 1-Monitorings werden europaweit auf über 500 Intensivmonitoringflächen (Deutschland 68, Bayern 19; siehe BMEL 2016), welche häufig auch als Waldklimastationen bezeichnet werden, kontinuierlich eine Reihe von Daten zu Stoffkreislauf und Wachstum in den Beständen erhoben und ausgewertet, um Erkenntnisse über Ursache-Wirkungs-Beziehungen in Waldökosystemen zu gewinnen (Institut für Waldökosysteme 2017). Die 19 bayerischen Waldklimastationen sind jeweils in typischen Waldregionen Bayerns in repräsentativen Beständen eingerichtet. Es werden Daten zu Witterung, Stoffein- und -austrägen und Lebensabläufen rund um die Uhr gesammelt und kontinuierlich ausgewertet (LWF 2017).

Zusätzlich wird auch in diesen Beständen jährlich eine Ansprache des Kronenzustands (u.a. Nadel-/Blattverlust und abiotische wie biotische Schäden) nach der Methodik der Waldzustandserhebung durchgeführt (vgl. Wauer 2017).



Abbildung 2 - Karte der Bayerische Waldklimastationen. Die hier untersuchten Flächen sind rot umrandet. Quelle: LWF (2017), verändert

Für diese Studie wurden Daten von zwei dieser Intensivmonitoringflächen ausgewertet. Die beiden Waldklimastationen (WKS) Altdorf (ALT) und Dinkelsbühl (DIN) befinden sich in Kiefernreinbeständen. In beiden Beständen ist ein Befall der Bäume durch die Kiefernmistel (*Viscum album* ssp. *austriacum*) vorhanden.

Da der Zustand der Bäume an Waldklimastationen mit derselben Methode aufgenommen wird wie auf dem Level 1-Raster können aufgrund der Datenverfügbarkeit Aussagen über den Mistelbefall dort ab dem Jahr 2007 getroffen werden.

Die Daten zur Waldzustandserhebung an Waldklimastationen (Level 2-Flächen) mussten zunächst analog zum Vorgehen bei den Level 1-Daten (siehe 3.1.1. Level 1) gesammelt und vorbereitet werden.

Zusätzlich lagen für die Level 2-Flächen die Koordinaten der Stammfußpunkte aller Bäume, Zuwachsdaten von permanenten Zuwachsmaßbändern vor. Außerdem waren aus einer Drohnenbefliegung im Jahr 2016 und Kartierung aus den daraus entstandenen digitalen Orthophotos Kronenprojektionsflächen und Informationen über den Mistelbefall aller Probestämme vorhanden (Ecke 2017).

3.1.3. Bundeswaldinventur (BWI)

Die Bundeswaldinventur wurde in Deutschland bisher dreimal durchgeführt, zuletzt 2012. Ziel ist die deutschlandweite Erfassung der großräumigen Waldverhältnisse und forstlichen Produktionsmöglichkeiten auf Basis einer Stichprobenerhebung nach einem einheitlichen Verfahren (BMEL 2012). Alle 10 Jahre werden an permanenten Probepunkten (alle Kreuzungspunkte eines gleichmäßigen Rasters, an denen Wald vorhanden ist) Daten zu Bäumen und Beständen erhoben (Institut für Waldökosysteme 2017).

Für diese Studie wurden Daten der Bundeswaldinventur zu Vorhandensein und Lage von Waldrändern an den Inventurpunkten verwendet. Aufgrund der Übereinstimmung des Traktnetzes mit demjenigen der Waldzustandserhebung können zu jeder Traktecke, die in beiden Programmen aufgenommen wird, direkt Aussagen über die Zusammenhänge mit Waldzustand und insbesondere Mistelbefall abgeleitet werden.

3.2. Level 1 (Waldzustandserhebung)

3.2.1. Befallsentwicklung

Als Eingangsdaten dienten die im Zuge der Waldzustandserhebung seit 2007 erhobenen Daten zum Mistelbefall der Probebäume an den Aufnahmepunkten des Level 1-Rasters (siehe 3.1.1. Level 1). Es wurden sowohl die Traktecken als auch die Kreuztrakte betrachtet (vgl. Abbildung 1).

Aufgrund der zwischen den Inventurpunkten verschiedenen Baumanzahl wurden alle Werte zum Mistelbefall relativ zur Anzahl der je Trakt aufgenommenen Bäume berechnet.

Fällt an einem Kreuztrakt-Probepunkt ein Baum aus, so wird die Stichprobe durch den vom Satellitenmittelpunkt aus nächsten bisher nicht enthaltenen Baum wieder auf 6 Bäume ergänzt. Um den Einfluss von sich verändernden Gesamtzahlen von Bäumen durch hinzukommende Probebäume anderer Nichtwirtsbaumarten auf die Ergebnisse auszuschließen, wurden alle Kennzahlen relativ zur Anzahl der Bäume der Wirtsarten der Nadelholzmistel, Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) und Weißtanne (*Abies alba*), berechnet.

Zunächst wurden aus den baumweise vorliegenden Datensätzen traktweise Aussagen zum Mistelbefall aggregiert. Für jedes Jahr wurde daraus der Anteil von Trakten mit Mistelbäumen an der gesamten Traktanzahl, der mittlere Anteil der Mistelbäume an der Gesamtanzahl aller Kiefern und Tannen je Trakt, ab 2013 (Datenverfügbarkeit) die mittlere Mistelanzahl und ab 2014 die mittlere Mistelstufe bezogen auf die Gesamtanzahl von Kiefern und Tannen je Trakt berechnet und grafisch dargestellt.

In ArcGIS wurden die Trakte mit Kiefern und Tannen sowie die jeweilige Mistelbefallsintensität (Anteil der Mistelbäume an der gesamten Kiefern- und Tannenanzahl) in Bayern räumlich dargestellt und eine Animation (siehe 15. CD mit digitalen Inhalten zur Arbeit) sowie eine Bilderserie zur Entwicklung über

die Jahre (siehe Abbildung 7 - Räumliche Entwicklung des Anteils mistelbefallener Kiefern und Tannen an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen je Trakt. Dargestellt sind nur die in jedem der Jahre 2007 bis 2017 aufgenommenen Trakte und Abbildung 8 - Räumliche Entwicklung des Anteils mistelbefallener Kiefern und Tannen an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen je Trakt. Dargestellt sind alle im jeweiligen Jahr aufgenommenen Trakte mit Kiefern und Tannen sowie nicht aufgenommene Trakte und Trakte ohne Kiefern und Tannen in weiß (n.a. = nicht aufgenommen). sowie 15. CD mit digitalen Inhalten zur Arbeit) erstellt.

3.2.2. Bestandesstruktur

Um Rückschlüsse über den Einfluss der Bestandesstruktur auf den Mistelbefall zu gewinnen, wurde für jede Traktecke der GAS-Index (Grundflächen- und Artenzahlgewichteter Strukturindex) nach Springer (2014) berechnet. Hierbei handelt es sich um eine dimensionslose Maßzahl, deren Wert mit steigender Anzahl von Baumarten sowie mit zunehmender horizontaler Strukturierung von Waldbeständen ansteigt. Der Index wurde für Probepunkte von Forstinventuren, insbesondere für die BWI-Probepunkte entwickelt (Springer 2014), und eignet sich so auch zur Analyse der Bestandesstruktur von Level 1-Punkten der Waldzustandserhebung, da diese mit den BWI-Probepunkten identisch sind.

Der GAS-Index besteht aus zwei verknüpften Termen. Der erste Term stellt die „Artenzahlbezogene Strukturkomponente“ dar. Die Verwendung von fixen Größen begrenzt den möglichen Wertebereich nach unten auf 0,01 – dies entspricht dem Grundflächenanteil einer Art am Inventurpunkt von 5%. Der zweite Term quantifiziert die innerartliche horizontale (und wegen allometrischer Grundzusammenhänge indirekt auch die vertikale) Strukturierung des Bestandes an einem Inventurpunkt (Springer 2014).

Für Reinbestände mit geringer Durchmesserspreitung hat der GAS-Wert somit geringe Werte, bei Steigerung der Artenzahl und/oder stärkerer Durchmesserspreitung erhöht sich der Wert. Typische Werte liegen zwischen 1,5 für sehr gleichförmige und 15 für sehr stark strukturierte Bestände (Springer 2014).

Für die Berechnung wurden ausschließlich die Bäume an den Traktecken betrachtet. Die Bäume der Kreuztrakte wurden nicht einbezogen, da diese nach einem anderen Schema (Sechsbaumstichprobe statt Winkelzählprobe mit Zählerfaktor 4) angelegt sind.

Für das Jahr 2017 lagen für 663 der 676 aufgenommenen Traktecken Daten zum Brusthöhendurchmesser sowie zum Mistelbefall aus der Waldzustandserhebung vor. Für diese wurde jeweils der GAS-Index berechnet.

Der GAS-Index berechnet sich nach folgender Formel (Klemmt 2016):

$$GAS_e = \sum_{j=1}^n \left(\left(\frac{21 - G_{rel}(j)}{20} \right) * \left(1 + \sum_{t=1}^x \left| \frac{G_t - \overline{G_x}}{\overline{G_x}} \right| \right) \right)$$

mit

GAS_e: Grundflächen- und Artenzahlbezogener Strukturindex an der Traktecke e

n: Anzahl der Baumarten j an der Traktecke e

G_{rel}(j): relativer Grundflächenanteil einer Art j an der Gesamtgrundfläche der Traktecke e

x: Anzahl der Bäume t einer Art j an der Traktecke e

G_t: Grundfläche eines Baumes t der Art j an der Traktecke e

$\overline{G_x}$: Mittlere Grundfläche aller Bäume einer Art j an der Traktecke e

Um für die in der Datenbank vorliegenden Baumdaten der WZE automatisch den GAS-Index zu berechnen wurde eine VBA-Programmroutine für Excel entwickelt (siehe Anhang 1).

Um festzustellen, ob ein Mistelbefall regelmäßig an mehreren, bzw. allen Ecken eines Traktes oder nur an einzelnen Ecken vorkommt, wurden außerdem für die Jahre 2014 bis 2017 (erst ab 2014 wurden alle bewaldeten Ecken der BWI-Trakte aufgenommen, davor nur Ecke 1) je Trakt die Anzahl bewaldeter Ecken sowie die Anzahl von Ecken mit Mistelbefall berechnet und der Quotient daraus gebildet.

Ist dieser gleich 1, kommt die Mistel an allen Traktecken des Traktes vor, ist er beispielsweise 0,25, kommt nur an einer von vier Traktecken ein Mistelbefall vor.

3.2.3. Waldrand

Aus den Daten der Bundeswaldinventur liegen je Traktecke Informationen über Waldränder in bis zu 25 m Entfernung vom Eckenmittelpunkt vor. Eingemessen wurden für je einen Start- und Endpunkt und ggf. einen Knickpunkt einer den Waldrand bestmöglich repräsentierenden Linie die Entfernung und der Winkel gegen Norden (Azimut) vom Eckenmittelpunkt aus. Außerdem wurde die Art des Waldrands und das vorgelagerte Terrain aufgenommen.

Tabelle 1 - Randarten (Rart) nach BMELV (2011)

Rart	Beschreibung	Bedeutung
1	Waldaußenrand	Abstand zur Grenzlinie des gegenüberliegenden Waldrandes mindestens 50m
2	Waldinnenrand	Abstand zur Grenzlinie des gegenüberliegenden Waldrandes zwischen 30 und 50 m
3	Bestandesgrenze	Bestandesgrenze zwischen unmittelbar aneinandergrenzenden Beständen (bis 30 m Abstand) mit mindestens 20 m geringerer Bestandeshöhe des vorgelagerten Bestandes (das kann auch eine Blöße oder Nichtholzboden sein)
4	sonstige	sonstige eingemessene Bestandesgrenze

Da bei einer trakteckenweisen Betrachtung erhebliche Unterschiede der sehr kleinräumig variierenden Waldrandlage der Probestämme vernachlässigt würden, wurde die Auswertung auf Einzelbaumebene durchgeführt. Verwendet wurden die Daten der Waldzustandserhebung 2017. Nur Kiefern und Tannen wurden in die Auswertung einbezogen, um eine Verfälschung der Ergebnisse durch Nichtwirtsarten der Nadelholzmistel zu vermeiden (zur Koordinatenberechnung der Bäume siehe Anhang 2).

Mit ArcGIS wurde für jeden Baum, der in max. 25 m Entfernung von einem Waldrand steht, die kürzeste Entfernung zur Waldrandlinie berechnet.

In SPSS 21 (IBM Corp. 2012) wurde für alle beteiligten Bäume eine Kreuztabelle zu den Informationen „Waldrand ja/nein“ und „Mistelbefall ja/nein“ erstellt und ein χ^2 -Unabhängigkeitstest durchgeführt.

Nach Waldrandart getrennt wurden die Anteile der mistelbefallenen und der unbefallenen Bäume in Abhängigkeit vom Waldrandabstand in 5 m weiten Abstandsklassen dargestellt. Für diese Auswertung wurden nur Kiefern und Tannen, für die innerhalb von 25 m ein Waldrand aufgenommen wurde, betrachtet.

3.2.4. Umweltvektor

Im Rahmen des Projektes „Waldproduktivität - Kohlenstoffspeicherung - Klimawandel (WP-KS-KW)“ wurden an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft für jeden Inventurpunkt der Bundeswaldinventur diverse Umweltparameter bestimmt.

Aus dem Katalog der verfügbaren Umweltvektordaten wurde eine Reihe sinnvoller Umwelt- und Standortparameter ausgewählt und mit den Eckenmittelwerten der Gesamtzahl von Mistelbüschen je Baum sowie dem Anteil von Bäumen mit Mistelbefall an der Gesamtbaumzahl je Traktecke

zusammengeführt. Für jeden Parameter wurden die Werte an Kiefer- und Tannenbeständen in Traktecken mit und ohne Mistelbefall verglichen.

Tabelle 2 - Erklärung der verwendeten Umweltvektor-Codes

Code Umweltvektor	Erklärung
BS_perc	Basensättigung [%]
Ca_aus_vor_kmolha	austauschbares Calcium (effektiv) als Vorrat pro Hektar bis max. 1m Tiefe [kmol/ha]
K_aus_vor_kmolha	austauschbares Kalium (effektiv) als Vorrat pro Hektar bis max. 1m Tiefe [kmol/ha]
Mg_aus_vor_kmolha	austauschbares Magnesium (effektiv) als Vorrat pro Hektar bis max. 1m Tiefe [kmol/ha]
Corg_Gehalt	Organischer Kohlenstoff als Gehalt pro kg Boden bis max. 1m Tiefe [M-%]
N_Vor_tha	Stickstoffvorrat [t/ha]
T_5to9	Durchschnittstemperatur [°C] der Monate Mai bis September
T_678	Durchschnittstemperatur [°C] der Monate Juni bis August
P_5to9	Niederschlagssumme [mm] der Monate Mai bis September
P_678	Niederschlagssumme [mm] der Monate Juni bis August
nFK	nutzbare Feldkapazität [mm] bis max. 1 m
Tdiff	Transpirationsdifferenz [mm] der Monate Mai bis September
ETp_5to9_Turc	potentielle Evapotranspiration [mm] nach Turc (1961) für die Monate Mai-September
KWB_5to9_Turc	klimatische Wasserbilanz [mm]: Niederschlag minus ETP nach Turc (1961), summiert für die Monate Mai bis September
WB_5to9_Turc	Wasserbilanz [mm]: Niederschlag plus nFK minus ETP nach Turc (1961), summiert für die Monate Mai bis September
BFI	Bodenfeuchteindex, Grad der reliefabhängigen Feuchteverteilung (SAGA-WETNESS-Index nach Beven und Kirkby (1979))

Um eine Beeinflussung des Ergebnisses dieser Analyse durch die vielen Ecken ohne Mistelbefall zu vermeiden und den Fokus auf die Ursachen des vorhandenen Mistelbefalls zu legen wurden nur Traktecken mit Kiefern und Tannen, an denen mindestens ein Mistelbefall registriert worden war, in die Betrachtung einbezogen.

In R (R Core Team 2017) wurde in iterativen Versuchen ein logistisches Regressionsmodell zur Erklärung der Streuung des faktoriellen Parameters „Mistel ja/nein“ anhand von Umweltvektor-Parametern konstruiert (Programmcode siehe Anhang 3).

3.2.5. Topographie

Als Eingangsdaten dienten die Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2017 sowie das frei verfügbare digitale Geländemodell DGM50 mit einer Kachelgröße von 50x50 m (Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de). Aus den Daten der Waldzustandserhebung wurden je Traktecke Kennzahlen zum Mistelbefall je Baumartart berechnet. Es wurden ausschließlich die Anzahlen von Kiefern, bzw. Tannen sowie der auf diesen wachsenden Misteln betrachtet.

Um einem möglichen Störeffekt durch unterschiedliche geographische Verteilungsschwerpunkte (Tanne eher im montanen bis alpinen, Kiefer eher im planaren bis kollinen Bereich) vorzubeugen, wurden die Berechnungen für beide Baumarten separat durchgeführt.

Für jede 2017 aufgenommene Traktecke wurden in ArcGIS Meereshöhe, Hangneigung und Hangrichtung bestimmt. Durch die relativ grobe Rasterzellengröße war sichergestellt, dass keine lokalen topographischen Effekte das Ergebnis verfälschen, sondern über eine etwas größere Fläche integriert wurde und so Aussagen nicht nur für den Eckenmittelpunkt, sondern für die ganze Ecke getroffen werden konnten.

Für jeden Parameter wurden die Werte an Traktecken mit und ohne Mistelbefall anhand von eingeschnürten Boxplots (Chambers et al. 1983) verglichen.

Außerdem wurde mit SPSS 21 (IBM Corp. 2012) für die Traktecken mit Mistelbefall die Befallsintensität in Abhängigkeit von der Ausprägung der topographischen Parameter in Streudiagrammen (Scatterplots) dargestellt, eine lineare Regressionsgerade angepasst und die Erklärungsgüte durch diese mithilfe des Bestimmtheitsmaßes R^2 beschrieben (aufgrund der Skalierung nicht für die Hangrichtung).

3.3. Level 2 (Waldklimastationen)

3.3.1. Aufnahmeverfahren

Der Mistelbefall wird im Zuge der terrestrischen Aufnahmen der Waldzustandserhebung seit 2007 als Schaden angesprochen. Seit 2013 wird die Anzahl der Mistelbüsche je Baum aufgenommen, seit 2014 zusätzlich die Mistelstufe in einer dreistufigen Intensitätsskala erhoben (vgl. 3.1.1. Level 1). Um zu beurteilen, wie sicher Mistelbäume korrekt als solche angesprochen werden, wurde über Mehrjahresperioden die Anzahl der terrestrisch festgestellten Bäume mit Mistelbefall kumuliert und in einer Verteilungsfunktion dargestellt.

Im Jahr 2016 führte Ecke (2017) eine Befliegung der beiden betrachteten Bestände mit einem UAV („Unmanned Aerial Vehicle“, ugs. auch „Drohne“) durch und kartierte die auf den daraus entstandenen hochauflösenden digitalen Orthophotos sichtbaren Misteln. Aus dieser Arbeit lagen die

Kronenprojektionsflächen der Bäume auf den Probeflächen als ESRI Shapefiles vor. Diese wurden zur grafischen Darstellung des Mistelbefalls verwendet.

Um festzustellen, ob so dieselben Bäume als Mistelbäume kartiert wurden wie durch die terrestrische Erhebung, wurde ein χ^2 -Unabhängigkeitstest der durch die jeweilige Methode als befallen aufgenommenen Bäume durchgeführt.

3.3.2. Befallsentwicklung

Als Ausgangsdaten lagen aus den Daten der Walzustandserhebung an Waldklimastationen die Informationen, ob ein Baum einen Mistelbefall hat (Aufnahme seit 2007), sowie die Anzahl großer, mittlerer und kleiner Misteln je Baum (Aufnahme seit 2013) und die Mistelstufe (Wauer (2017), Aufnahme seit 2014) vor. Für das Jahr 2010 war für die Waldklimastation Altdorf keine Schadtabelle verfügbar, sodass dort eine Lücke in den Daten vorhanden ist.

Verschiedene Parameter zum Mistelbefall wurden grafisch dargestellt. Zur Signifikanzabschätzung wurde der Standardfehler als Fehlerbalken in die Grafik eingetragen.

3.3.3. Horizontale Verteilung

Aus Ecke (2017) lagen für die Waldklimastationen Altdorf (ALT) und Dinkelsbühl (DIN) die Kronenprojektionsflächen aller Probebäume als Polygone in ESRI Shapefiles vor.

Um Aussagen über die Klumpung, bzw. Gleichverteilung des gesamten Baumkollektivs sowie von Subkollektiven zu treffen, wurde der „Aggregation Index“ R von Clark&Evans (Clark und Evans 1954) berechnet.

$$R = \frac{\bar{r}_{beobachtet}}{\bar{r}_{erwartet}}$$

mit

$$\bar{r}_{beobachtet} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \text{ und } \bar{r}_{erwartet} = \frac{1}{2\sqrt{\frac{n}{F}}}$$

wobei r_i den Abstand des Baumes i zu seinem nächsten Nachbarn in m, n den Stichprobenumfang (also die Größe der betrachteten Population) und F die Größe der Fläche, die die beprobte Population mit dem Umfang n einnimmt, in m^2 bezeichnen (Kramer und Akça 2008).

Der so berechnete Index R nimmt Werte zwischen 0 (maximale Klumpung) und 2,1491 (streng hexagonales Verteilungsmuster) an. Bei einer zufälligen Verteilung nimmt R den Wert 1 an (Biber 1997). Werte unter 1 zeigen eine Tendenz zur Klumpung an, über 1 ist eine regelmäßige Verteilung indiziert (Biber 1997; Pretzsch 1996).

Der Index R zeigt also an, wie stark das beobachtete Verteilungsmuster von einer Zufallsverteilung abweicht. Eine Verwendung ist sowohl für die Betrachtung des Gesamtbestandes als auch für einzelne Subkollektive darin einsetzbar (Pretzsch 1996; Overton 1996).

Um eine räumlich korrekte Nachbarschaftsaussage der Kronen zu treffen, wurde anstatt der Verwendung von Stammfußpunkten für jeden Probebaum der Schwerpunkt der Kronenprojektionsfläche in ArcGIS berechnet.

Der Index R wurde je Waldklimastation für die Baumkollektive „Gesamtbestand“, „in mindestens einem der Jahre 2013 bis 2016 Mistelbefall terrestrisch festgestellt“ (kurz „terr“), „Mistelbefall 2016 per Drohne festgestellt“ (kurz „drohne“) sowie das Kollektiv, das sich aus der Summe der beiden vorgenannten Kollektive ergibt (kurz „beide“) und für das Kollektiv, an dem mit beiden Verfahren ein Mistelbefall festgestellt wurde (kurz „overlap“), berechnet (vgl. auch Tabelle 11).

Overton (1996) merkt an, dass die einfache Berechnung des Klumpungsindex nicht ausreicht, um die Klumpung der Mistelbäume beurteilen zu können. Um verlässlich aussagen zu können, ob die Subkollektive mit Mistelbefall einen vom Gesamtbestand signifikant abweichenden Clark&Evans-Index aufweisen oder ob es sich bei der beobachteten Abweichung nur um einen zufälligen Unterschied handelt, der aus der Verschiedenheit zwischen Gesamtbestand und Subkollektiv resultiert, wurde ein multipler Randomisierungstest (vgl. Rohde 2011) durchgeführt. Nach dem Vorschlag von Overton (1996) wurden je Subkollektiv 10^3 zufällige Subkollektive mit der gleichen Anzahl an Bäumen wie das jeweils untersuchte Subkollektiv mit Mistelbefall ausgewählt und für diese der Clark&Evans-Index berechnet. Somit wurde je eine „künstliche“ Grundgesamtheit simuliert, in der zufällige Effekte zwischen Subpopulationen durch die Varianz abgebildet werden (vgl. Overton 1996).

Um dies umzusetzen wurde im ArcGIS Modelbuilder ein Set aus drei ineinander verschachtelten Modellen konstruiert, das diese Berechnung automatisch durchführt.

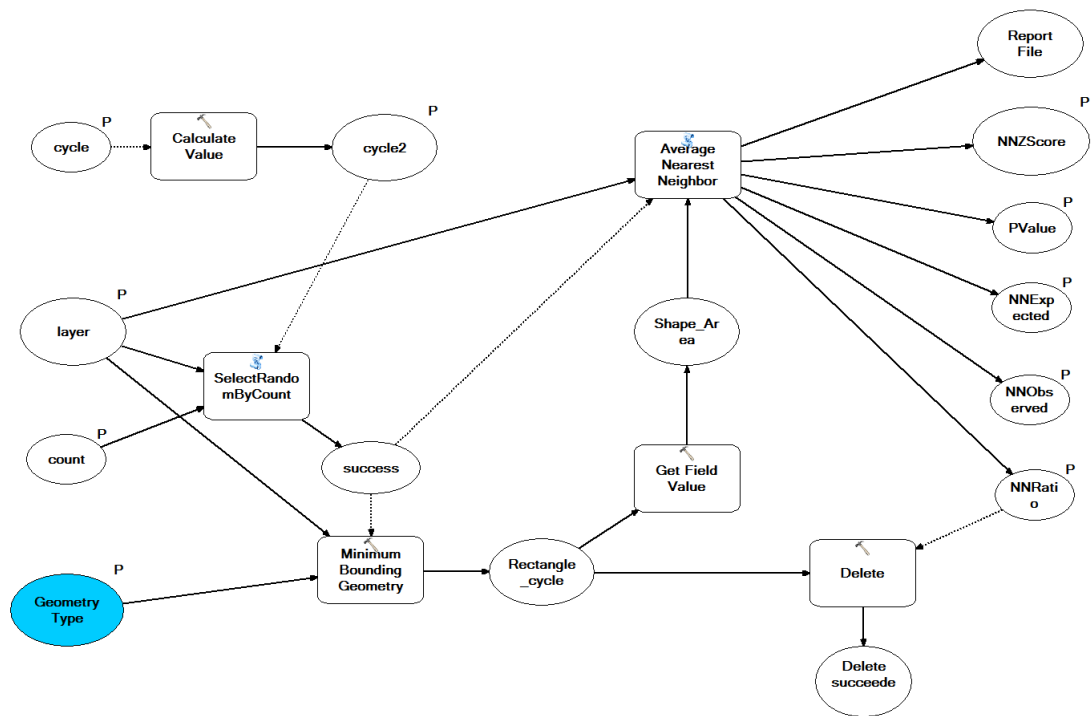


Abbildung 3 - Inneres Modell zur Durchführung des multiplen Randomisierungstests zur Signifikanzberechnung des Clark&Evans-Index

Die innerste Modellebene (Abbildung 3) verwendet als Eingabeparameter den Layer, der das zu analysierende Punktkollektiv enthält (layer), die Anzahl an Punkten, die zufällig ausgewählt werden sollen (count), den Geometrietyp (Geometry Type) der geometrischen Form, die zur Ermittlung der Fläche F des Subkollektivs verwendet werden soll (in der vorliegenden Untersuchung immer ein Rechteck) sowie die Nummer des aktuellen Durchlaufs (cycle).

Zunächst wird mit dem ArcPy-Skript „SelectRandomByCount“ (abgewandelt nach Brundage@StackExchange 2015, siehe Anhang 4) ein Subkollektiv der gewünschten Größe aus dem Gesamtbestand selektiert. Danach wird mit „Minimum Bounding Geometry“ ein Rechteck (oder andere Geometrie) erstellt, welches die selektierten Punkte genau umschließt. Aus der Attributtabelle dieses Rechtecks wird mit „Get Field Value“ die Fläche (Shape_Area) abgelesen und als Eingangsgröße für die Berechnung des Clark&Evans-Index („Average Nearest Neighbor“) verwendet. Dieses Tool gibt als Ausgabeparameter u.a. den Indexwert R („NNRatio“) aus. Sobald die Ausgabe vollständig ist, wird das umschließende Rechteck um Speicher freizugeben wieder gelöscht („Delete“).

Der eingegebene Wert, der die Nummer des Durchlaufs angibt (cycle) wird unverändert wieder ausgegeben (cycle2).

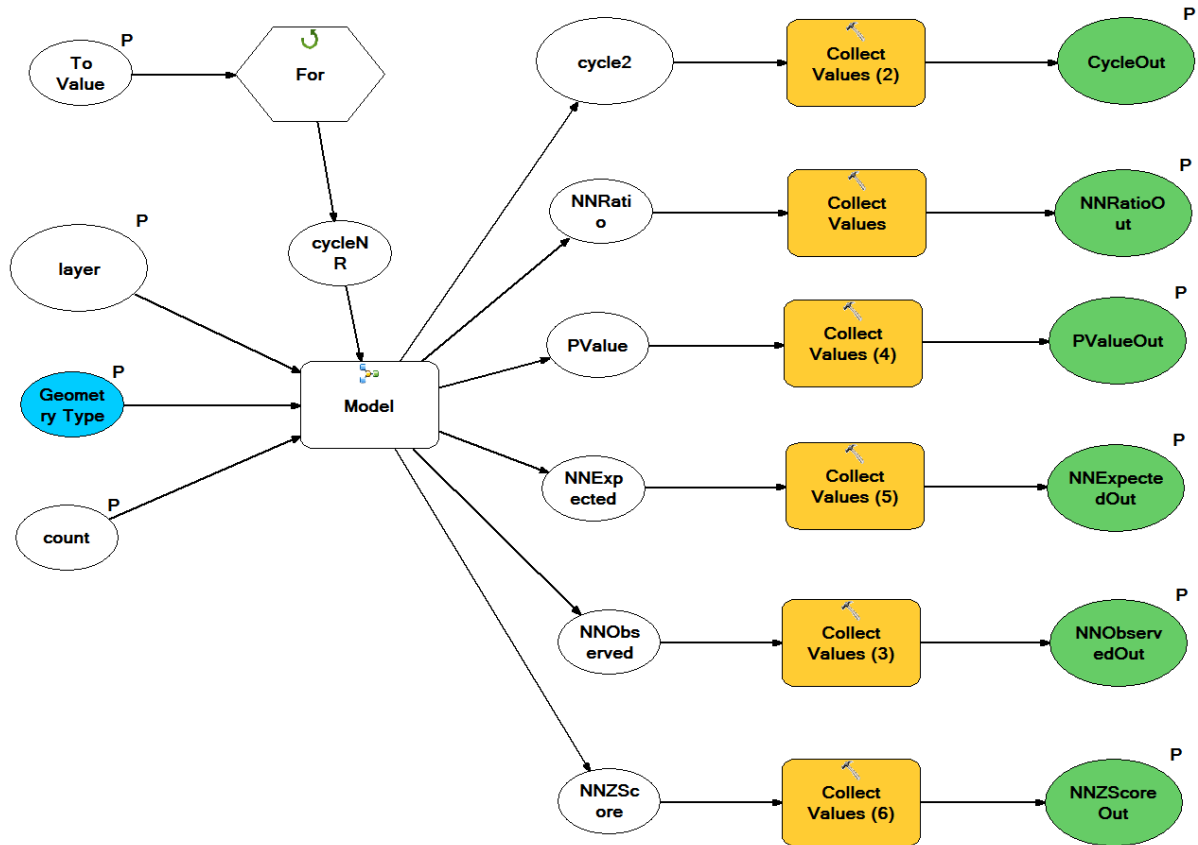


Abbildung 4 - Mittleres Modell zur Durchführung des multiplen Randomisierungstests zur Signifikanzberechnung des Clark&Evans-Index

Die mittlere Modellebene (Abbildung 4) übernimmt die Eingabeparameter „layer“, „count“ und „Geometry Type“ vom äußersten Modell und gibt sie bei jeder Ausführung an das innere Modell weiter, damit nur das äußerste Modell durch den Benutzer ausgeführt werden muss. Außerdem kommt der Eingabeparameter „To Value“ hinzu, über den der Benutzer steuern kann, wie viele Durchläufe (hier 10^3) zur Randomisierung durchgeführt werden sollte. Eine For-Schleife führt das innere Modell (siehe Abbildung 3) genau sooft aus, wobei sich der Eingabeparameter „cycle“ des inneren Modells in jedem Durchgang um eins erhöht („cycleNR“ im mittleren Modell). Jeder Durchlauf des inneren Modells gibt die Ausgabewerte des Clark&Evans-Index sowie die unveränderte Zahl des Durchgangs („cycle2“) aus. Jeder dieser Werte wird über alle Durchläufe des inneren Modells durch „Collect Values“ gespeichert. Schließlich wird für jeden Parameter ein Array mit den gesammelten Werten als Ausgabeparameter ausgegeben.

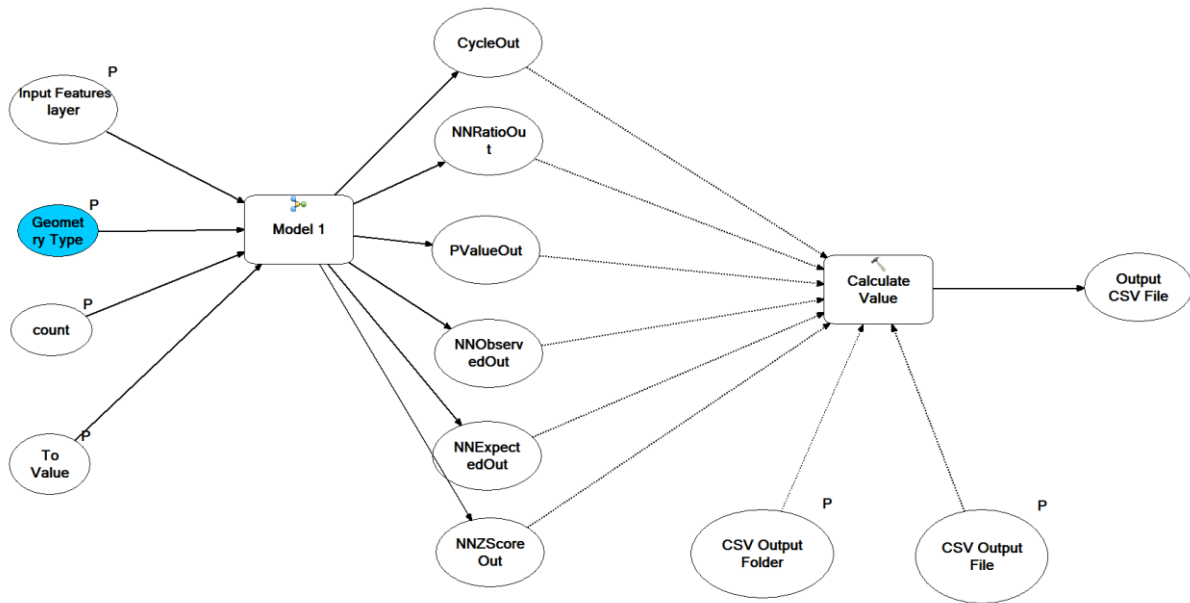


Abbildung 5 - Äußeres Modell zur Durchführung des multiplen Randomisierungstests zur Signifikanzberechnung des Clark&Evans-Index

Die äußere Modellebene (Abbildung 5), also diejenige, die der Benutzer aufruft, fragt beim Aufruf die Eingabeparameter des mittleren („To Value“) und inneren Modells (übrige) ab und gibt diese unverändert an das mittlere Modell weiter. Seine Aufgabe ist es, die durch das mittlere Modell ausgegebenen Arrays mit Daten so umzustellen, dass eine CSV-Datei (Comma Separated Values, mit z.B. Microsoft Excel lesbar) ausgegeben wird. Der Benutzer kann außerdem Ordner und Name der auszugebenden Datei auswählen („CSV Output Folder/File“). Dazu wird ein ArcPy-Skript (abgewandelt nach blah238@StackExchange 2012, siehe Anhang 5) verwendet, welches die Arrays zunächst als Zeilen einer Tabelle interpretiert, diese danach transponiert und im CSV-Format im angegebenen Ordner abspeichert („Calculate Values“).

Um nun festzustellen, ob sich die Klumpung der Subkollektive mit Mistelbefall signifikant von derjenigen anderer, zufälliger Subkollektive gleicher Größe unterscheidet, wurden aus den Ergebnissen der multiplen Randomisierungstests nach Import der CSV-Dateien in Microsoft Excel jeweils Mittelwert und Standardabweichung berechnet und eine Standardnormalverteilungsfunktion angepasst. Für die beobachteten Werte von R der mistelbefallenen Baumkollektive wurde die Wahrscheinlichkeit p berechnet, dass diese signifikant von der Normalverteilung der zufälligen Werte abweichen. Bei $p < 0,05$ wurde die Nullhypothese abgelehnt und es konnte von einer signifikant höheren Klumpung des Subkollektivs mit Mistelbefall ausgegangen werden.

3.3.4. Zuwachs und soziale Stellung

Auf Level 2-Flächen des ICP Forests-Programms wird der Durchmesser der Probestämme über permanente Zuwachsmaßbänder, die in 1,30 m Höhe angebracht sind, erfasst (ICP Forests 2010). Der Durchmesser wird jährlich im Oktober bis November, also nach Abschluss der Vegetationsperiode, gemessen (ICP Forests 2010). Daraus wurde der jährliche Grundflächenzuwachs je Baum und Jahr berechnet. Kontinuierliche Zuwachsdaten liegen seit dem Jahr 2001 vor. Daten der Waldzustandserhebung liegen ab 2006, Daten zum Mistelbefall ab 2007 vor.

Anhand der über die Jahre kontinuierlichen Baumnummern wurden die Grundflächenzuwachsdaten mit den Informationen über den Mistelbefall (Subkollektive terr, drohne, beide, overlap; siehe Tabelle 11) verbunden.

Die Bäume mit und ohne Mistelbefall wurden auf Unterschiede im Zuwachs verglichen. Hierzu wurden für die beiden Extremkollektive beide0 und overlap1 jeweils der mittlere Grundflächenzuwachs, die mittlere Kraft-Klasse und die mittlere Anzahl der Mistelbüsche pro Jahr berechnet und grafisch dargestellt. Die Berechnung wurde sowohl für alle Probestämme zusammen als auch getrennt für jeweils ausschließlich die Bäume der Kraft-Klassen 1 und 2 durchgeführt. Außerdem wurden je Baumkollektiv die Grundflächenzuwachswerte verglichen.

Des Weiteren wurden für dieselben Gruppen jeweils eingeschnürte Boxplots (Chambers et al. 1983) zur Darstellung der Kronenprojektionsfläche aus Ecke (2017) sowie der sozialen Stellung anhand der Kraft-Klasse (Kraft 1884) erstellt.

4. Ergebnisse

4.1. Level 1 (Waldzustandserhebung)

4.1.1. Befallsentwicklung

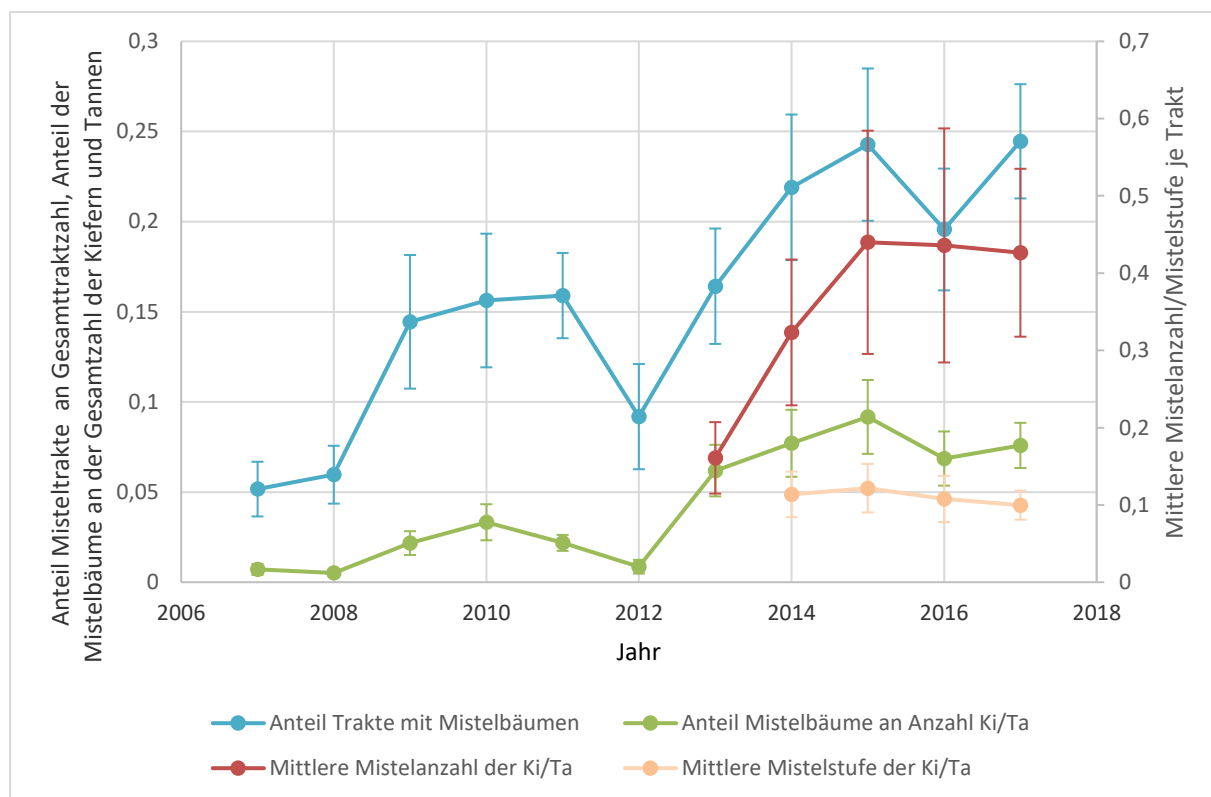


Abbildung 6 - Entwicklung des Anteils von Misteltrakten an der gesamten Traktanzahl (blau) und von Mistelbäumen an der gesamten Kiefern- und Tannenanzahl je Trakt (grün) sowie Entwicklung der mittleren Mistelanzahl (rot) und Mistelstufe (beige) der Kiefern und Tannen von 2007 bis 2017. Daten zur Mistelanzahl wurden ab 2013, zur Mistelstufe ab 2014 aufgenommen. Die Fehlerbalken stellen den einfachen Standardfehler dar.

Aus Abbildung 6 lässt sich ablesen, dass seit Beginn der Aufnahme 2007 der Mistelbefall der Tannen und Kiefern in Bayern im Schnitt deutlich zugenommen hat. Während 2007 noch rund 1% der aufgenommenen Kiefern und Tannen einen Mistelbefall aufwiesen, waren es 2017 schon ca. 7,5%. Auch die mittlere Anzahl von Misteln je Trakt bezogen auf die gesamte Anzahl von Kiefern und Tannen an diesem Trakt hat sich seit Beginn der Aufnahme 2013 von 0,1 auf über 0,4 erhöht, der Standardfehler dieser Aufnahme liegt jedoch sehr hoch und es kommt zu deutlichen Überlappungen der Fehlerrahmen. Die Mistelstufe zeigt seit Aufnahmebeginn 2014 keinen klaren Trend und lässt noch keine eindeutige Aussage zu. Insgesamt kann jedoch von einer deutlichen Zunahme des Mistelbefalls in Bayern ausgegangen werden.

Bei diesem Phänomen handelt es sich nicht um eine punktuelle starke Vermehrung an einzelnen Orten. Die Betrachtung des Anteils der Trakte mit Mistelbefall (siehe Abbildung 6) zeigt, dass der Mistelbefall an immer mehr Inventurtrakten in Bayern vorkommt. Es findet also eine Ausbreitung der Nadelholzmistel auch auf bisher unbefallene Flächen statt.

Das Aufnahmeraster wurde über die Jahre immer wieder verändert. Es fanden Verdichtungen auf feinere Raster in verschiedenen Gebieten und Jahren statt, sodass von einem im Aufnahmedesign begründeten statistischen Fehler ausgegangen werden muss. Da jedoch alle Größen immer relativ auf die Gesamtzahl von Bäumen, bzw. Trakten bezogen sind, kommt es zu keinen Verzerrungen durch veränderte Anzahlen von aufgenommenen Bäumen.

Es fällt auf, dass 2012 ein deutlich geringerer Anteil der Trakte einen Mistelbefall aufwies als 2011 und 2013. 2012 wurde ein wesentlich weiteres Raster mit weniger Trakten aufgenommen als 2011 und 2013 – es wäre also möglich, dass mehr Trakte mit als ohne Mistelbefall 2012 nicht aufgenommen wurden. Deshalb wurde gesondert überprüft, ob dieser Effekt tatsächlich eine Auswirkung hatte:

Tabelle 3 – Entwicklung der Anzahl von Trakten mit Mistelbefall von 2011 bis 2013

2011	2012	2013	Anzahl Trakte
Mistel	Mistel	Mistel	6
Mistel	nicht aufgenommen	Mistel	2
Mistel	keine Mistel	Mistel	7

An einigen Trakten wurde 2011 und 2013 ein Mistelbefall festgestellt, 2012 jedoch nicht. Dagegen sind lediglich 2 Trakte, an welchen 2011 und 2013 ein Befall festgestellt wurde, durch Rasterveränderungen 2012 nicht aufgenommen worden. An 6 Trakten wurde in allen drei Jahren ein Mistelbefall festgestellt. Die Veränderung des Aufnahmerasters hat also keinen entscheidenden Einfluss auf den Anteil der Trakte, vielmehr ist dieser wahrscheinlich in Witterungs- und Sichtbedingungen sowie darin, wie stark die Trupps für die Mistelerkennung sensibilisiert wurden, zu suchen.

Zur Darstellung der räumlichen Entwicklung des Mistelbefalls wurden zwei verschiedene Darstellungsformen gewählt. Zuerst ist, um die Entwicklung kontinuierlich darzustellen, eine Übersicht ausschließlich der Punkte, die von 2007 bis 2017 jedes Jahr aufgenommen wurden, dargestellt, danach eine Übersicht mit allen im jeweiligen Jahr aufgenommenen Punkten und somit auf einem veränderlichen Aufnahmeraster.

Beide Bilderserien sind auch als Animation unter 15. CD mit digitalen Inhalten zur Arbeit hinterlegt.

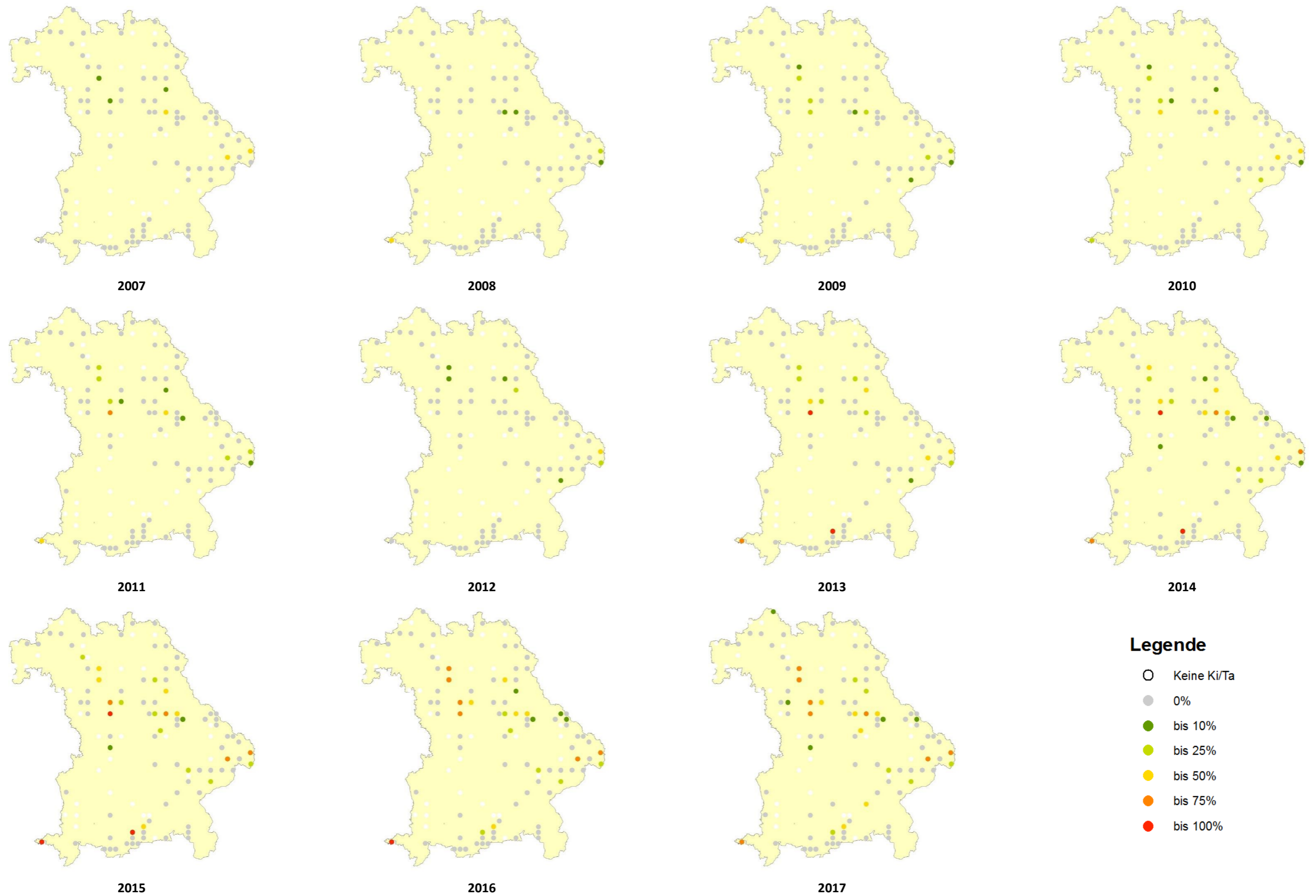


Abbildung 7 - Räumliche Entwicklung des Anteils mistelbefallener Kiefern und Tannen an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen je Trakt. Dargestellt sind nur die in jedem der Jahre 2007 bis 2017 aufgenommenen Trakte.

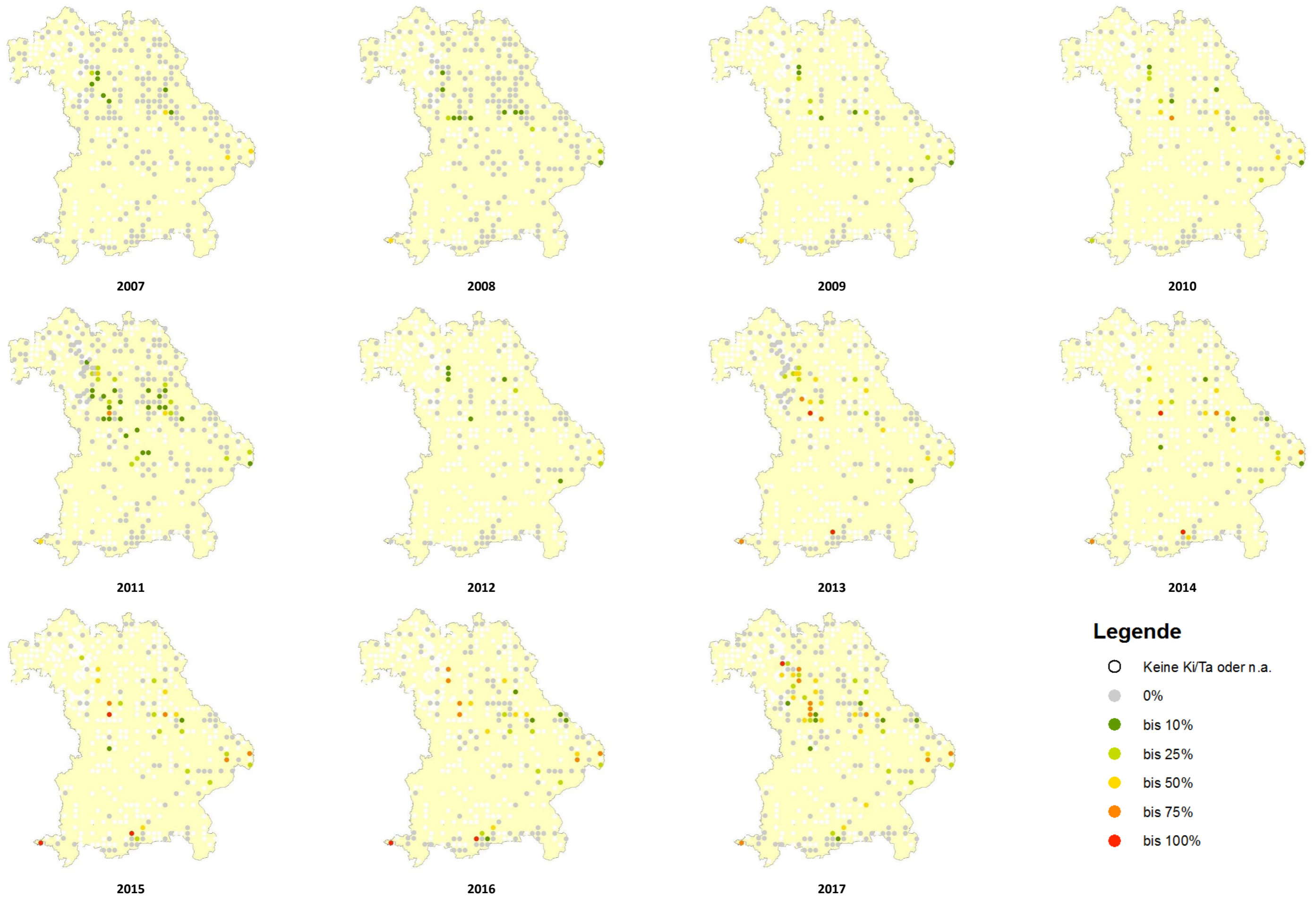


Abbildung 8 - Räumliche Entwicklung des Anteils mistelbefallener Kiefern und Tannen an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen je Trakt. Dargestellt sind alle im jeweiligen Jahr aufgenommenen Trakte mit Kiefern und Tannen sowie nicht aufgenommene Trakte und Trakte ohne Kiefern und Tannen in weiß (n.a. = nicht aufgenommen).

Bei Betrachtung der räumlichen Entwicklung (Abbildung 7 und Abbildung 8) fällt auf, dass zum einen die Zahl von Punkten mit Mistelbefall, zum anderen aber auch die Befallsintensität über die Jahre in ganz Bayern, vor allem aber im Raum Mittelfranken und in den letzten Jahren auch im Bayerischen Wald deutlich zugenommen hat. Vereinzelt finden sich starke Befälle auch an Trakten im Alpenraum.

4.1.2. Bestandesstruktur

4.1.2.1. GAS-Index

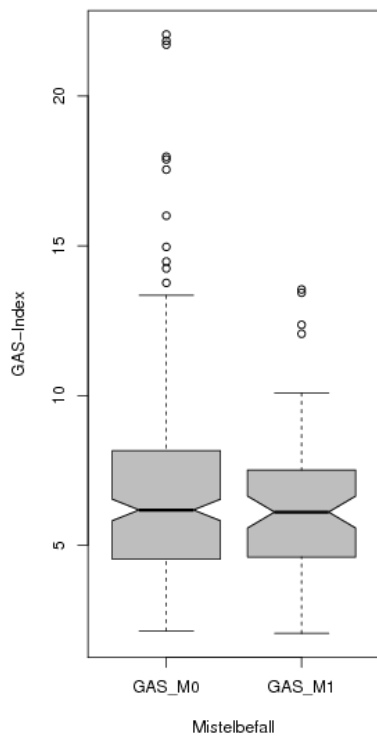


Abbildung 9 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede des GAS-Index zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1). Zwei extreme Ausreißer der Gruppe M0 mit einem GAS-Index über 30 wurden aus Lesbarkeitsgründen nicht dargestellt.

Der GAS-Index (Klemmt 2016; Springer 2014) unterscheidet sich zwischen Traktecken mit und ohne Mistelbefall nicht wesentlich. Die Mediane beider Vergleichskollektive sind nicht signifikant unterschiedlich, da sich die Einschnürungen in Abbildung 9 überschneiden.

An Traktecken mit sehr hohen GAS-Indizes kommen keine Misteln vor. Während der Großteil der Ausreißer an den Ecken ohne Mistelbefall unterhalb von 30 liegt, ist der höchste Wert an den Ecken mit Mistelbefall noch unter 15. In sehr stark gemischten und strukturierten Waldbeständen waren somit keine Mistelvorkommen zu beobachten.

Auch bei der Verteilung der Mistelbefallsintensität innerhalb befallener Trakte lässt sich keine Abhängigkeit vom GAS-Index nachweisen.

4.1.2.2. Befallene Ecken je Trakt

Die Auswertung wurde für die Zeiträume „2014 bis 2017“ sowie „nur 2017“ separat durchgeführt. Für den Zeitraum „2014 bis 2017“ wurden die Ecken insgesamt aufsummiert. Die Vergleichbarkeit ist über die relativen Anteile gegeben.

Tabelle 4 - Anteile der Ecken mit Mistel an der gesamten Zahl bewaldeter Ecken

Anteil Ecken mit Mistel je Trakt	2017		2014-2017	
	Anzahl	Anteil in %	Anzahl	Anteil in %
0 (keine)	220	82,71	626	83,58
0,1 – 0,25 (1 von 4)	7	2,63	24	3,20
0,26 – 0,34 (1 von 3)	2	0,75	3	0,40
0,35 – 0,5 (1 von 2, 2 von 4)	7	2,63	14	1,87
0,51 – 0,67 (2 von 3)	1	0,38	4	0,53
0,68 – 0,75 (3 von 4)	5	1,88	10	1,34
0,76 – 1 (alle)	24	9,02	68	9,08

Für beide Zeiträume fällt auf, dass neben den Trakten ohne Mistelbefall die größten Anteile auf Trakte entfallen, an denen alle Ecken einen Mistelbefall aufweisen. Trakte, an denen nur einzelne Ecken einen Mistelbefall aufweisen und andere nicht sind im Vergleich wesentlich seltener.

Insgesamt kann also von einem geklumpten Vorkommen der Mistel auf Landschaftsebene ausgegangen werden. Wenn in einem Bestand an einer Stelle Misteln vorkommen, ist es sehr wahrscheinlich, dass auch in der Umgebung Misteln vorkommen.

4.1.3. Waldrand

Tabelle 5 - Kreuztabelle der Anzahl der Kiefern und Tannen mit den kombinierten Merkmalen Mistel ja/nein und Waldrand ja/nein

		Waldrand		Gesamt
		Nein	Ja	
Mistel	Nein	1809	348	2157
	Ja	299	50	349
Gesamt		2108	398	2506

Tabelle 6 - Statistischer Test auf Unabhängigkeit der Faktoren „Waldrandlage“ und „Mistelbefall“

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	,734	1	,392
Kontinuitätskorrektur	,605	1	,437
Likelihood-Quotient	,751	1	,386
Exakter Test nach Fisher			
Zusammenhang linear-mit-linear	,734	1	,392
Anzahl der gültigen Fälle	2506		

Keiner der Tests ist auf einem Niveau von 95% signifikant. Die Nullhypothese der Unabhängigkeit wird somit beibehalten. Zwischen Waldrandlage und Mistelbefall bei Kiefern und Tannen besteht kein signifikanter Zusammenhang, beide Merkmale sind unabhängig voneinander ausgeprägt.

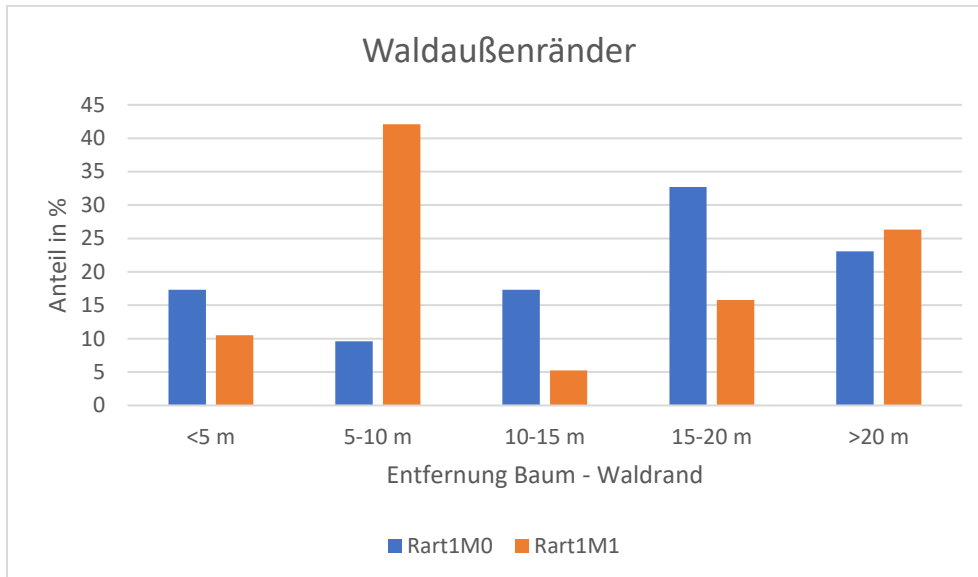


Abbildung 10 - Anteile der von Misteln befallenen (M1, orange, n=19) und der unbefallenen (M0, blau, n=52) Kiefern und Tannen an den Klassen des Waldrandabstandes für Waldaußenränder (Rart1, siehe auch Tabelle 1). Die Gesamtzahl aller betrachteten Kiefern und Tannen je Traktecke entspricht 100%.

An Waldaußenrändern zeigt sich ein verstärktes Mistelvorkommen vor allem in 5 bis 10 m Entfernung vom Waldrand – dort kommen über 40% der mistelbefallenen, jedoch nur unter 10% der unbefallenen Bäume vor (Abbildung 10). Für die übrigen Abstandsklassen zeigt sich kein klarer Trend. Auch weiter als 20 m vom Waldrand entfernt gibt es noch deutliche Mistelvorkommen. Die Mistel ist also nicht auf die waldrandnahen Bereiche beschränkt - dort nimmt sie jedoch den größten Anteil ein.

In bis zu 25 m Entfernung zu Waldinnenrändern (Rart 2) wurde in ganz Bayern 2017 nur ein einziger Baum mit Mistelbefall aufgenommen – eine statistische Auswertung war deshalb nicht möglich.

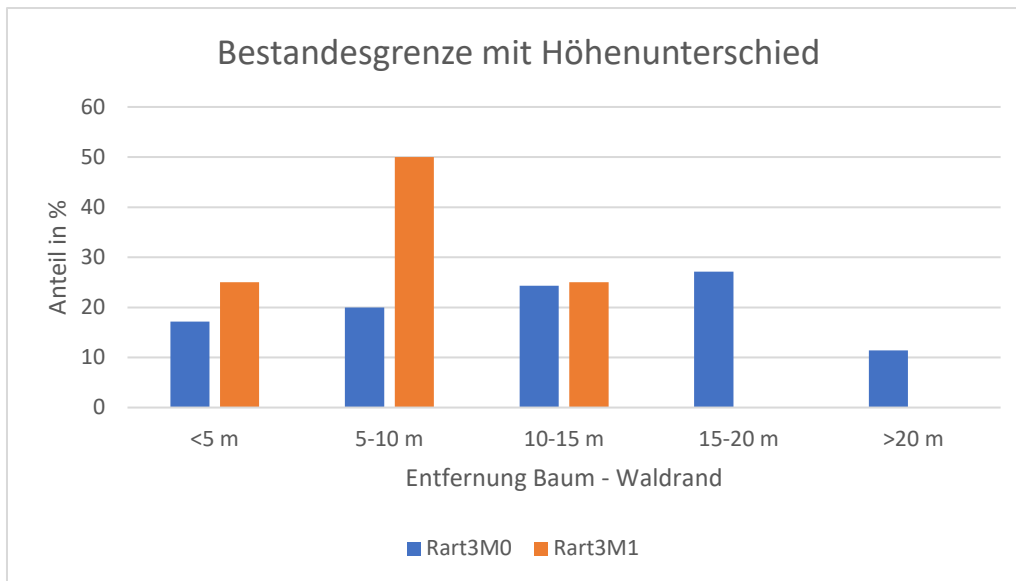


Abbildung 11 - Anteil der von Misteln befallenen (M1, orange, n=4) und der unbefallenen (M0, blau, n=70) Kiefern und Tannen an den Klassen des Waldrandabstandes für Bestandesgrenzen mit starkem Bestandeshöhenunterschied (Rart3, siehe auch Tabelle 1). Die Gesamtzahl aller betrachteten Kiefern und Tannen je Traktecke entspricht 100%.

Auch an Bestandesgrenzen fällt ein erhöhter Anteil von Mistelbäumen gegenüber unbefallenen Bäumen in 5 bis 10 m Entfernung zur Grenze auf (Abbildung 11). Bei der Interpretation ist jedoch Vorsicht geboten, da nur 4 Mistelbäume im Umkreis von 25 m einer Bestandesgrenze aufgenommen wurde.

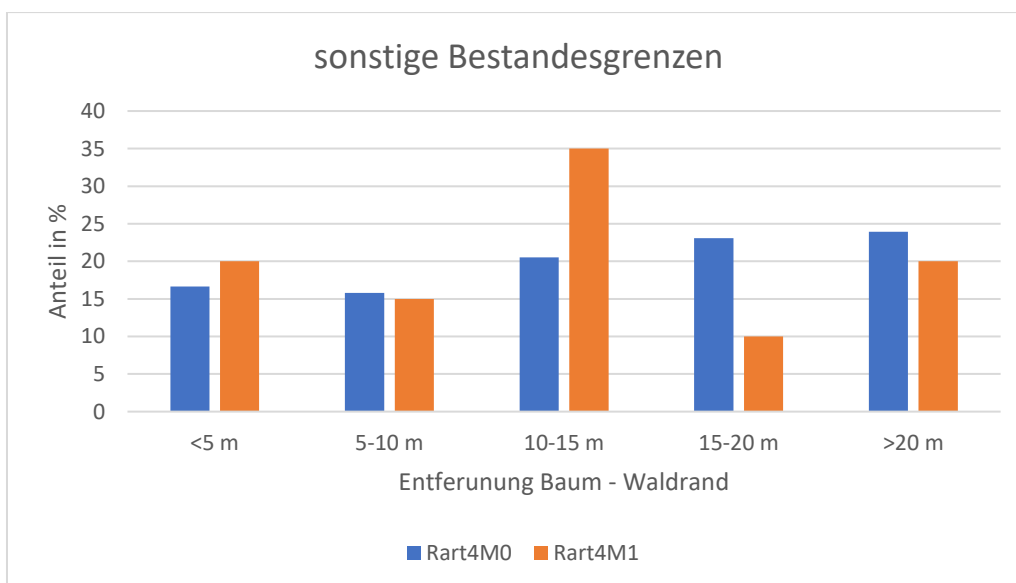


Abbildung 12 - Anteil der von Misteln befallenen (M1, orange, n=20) und der unbefallenen (M0, blau, n=234) Kiefern und Tannen an den Klassen des Waldrandabstandes für sonstige eingemessene Bestandesgrenzen (Rart4, siehe auch Tabelle 1). Die Gesamtzahl aller betrachteten Kiefern und Tannen je Traktecke entspricht 100%.

Für die sonstigen Bestandesgrenzen (Abbildung 12) ist kein Trend in der Verteilung von befallenen und unbefallenen Bäumen zu erkennen. Außerdem kann aufgrund der weiten Definitionsspanne von „sonstige Bestandesgrenzen“ keine klare Aussage abgeleitet werden.

4.1.4. Umweltvektor

Tabelle 7 - Darstellung der Modellansätze zur Erklärung der kategorialen Variablen „Mistel ja/nein“ durch Umweltvektorparameter mit einer logistischen Regression. Auf 90% signifikante Parameter sind mit * markiert. Der AIC-Wert gibt die Erklärungsgüte des Modells unter Einbeziehung von residualer Abweichung und Freiheitsgraden an. Zur Erklärung der Bedeutung der Umweltvektorparameter siehe Tabelle 2. Die Verknüpfung der Parameter erfolgte entweder ohne (+) oder mit (*) Betrachtung der Wechselwirkungen untereinander.

Nr.	Parameter 1		Parameter 2		Parameter 3		Parameter 4	Residuale Abweichung	AIC
1	P_5to9*							325,10	329,10
2	P_5to9	+	T_5to9*					304,49	310,49
3	P_5to9	*	T_5to9*					302,85	310,85
4	T_5to9*							304,87	308,87
5	T_5to9*	+	BS_perc					304,87	310,87
6	T_5to9*	+	Ca_aus_vor_kmolha					304,27	310,27
7	T_5to9*	*	Ca_aus_vor_kmolha					303,86	311,86
8	T_5to9*	+	K_aus_vor_kmolha					304,82	310,82
9	T_5to9*	*	K_aus_vor_kmolha					301,87	309,87
10	T_5to9*	+	Mg_aus_vor_kmolha					304,67	310,67
11	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*					301,39	309,39
12	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha	+	Corg_Gehalt			300,46	310,46
13	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	*	Corg_Gehalt			296,50	312,50
14	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	+	N_Vor_tha			300,91	310,91
15	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	*	N_Vor_tha			292,86	308,86
16	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	+	P_5to9			300,84	310,84
17	T_5to9	*	Mg_aus_vor_kmolha*	*	P_5to9			294,24	310,24
18	T_5to9*	*	P_5to9					302,85	310,85
19	T_5to9*	+	P_5to9					304,49	310,49
20	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	+	nFK			299,14	309,14
21	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	*	nFK			295,45	311,45
22	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	+	Tdiff*			298,04	308,04
23	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	*	Tdiff			283,45	299,45
24	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	+	Tdiff	+	KWB_5to9_Turc*	296,01	308,01
25	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	+	Tdiff	+	WB_5to9_Turc*	293,99	305,99
26	T_5to9*	*	Mg_aus_vor_kmolha*	*	Tdiff	+	WB_5to9_Turc	288,97	306,97

Das am besten geeignete Modell zur Erklärung des faktoriellen Parameters „Mistel ja/nein“ anhand der Kombination verschiedener Umweltvektorparameter ist das Modell Nr. 23, welches die Temperatur von Mai bis September (T_5to9), den Magnesiumvorrat (Mg_aus_vor_kmolha) und die Transpirationsdifferenz (Tdiff), inklusive der Betrachtung aller Wechselwirkungen, als erklärende Parameter heranzieht. Alle drei Parameter sind auf einem Niveau von 90% signifikant. Dennoch ist der gesamte Anteil der durch das Modell erklärten Streuung gering, es verbleibt ein sehr großer Teil residueller Abweichungen.

Im Folgenden werden für ausgewählte Parameter einzeln die Unterschiede zwischen mistelbefallenen und nicht befallenen Traktecken dargestellt.

Die Umweltvektorparameter BS_perc, nFK und BFI zeigten weder bei der Modellierung noch bei der einzelnen Auswertung mit Boxplots signifikante Einflüsse. Auf sie wird deshalb nicht weiter eingegangen.

4.1.4.1. Nährelemente und Boden

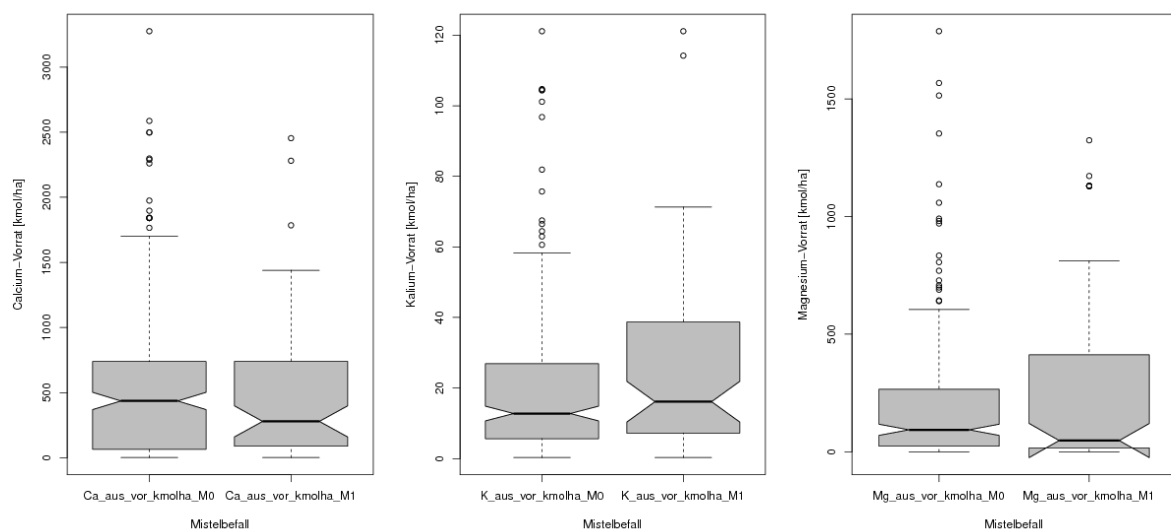


Abbildung 13 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Umweltvektoren *Ca_aus_vor_kmolha* (Calciumvorrat), *K_aus_vor_kmolha* (Kaliumvorrat) und *Mg_aus_vor_kmolha* (Magnesiumvorrat) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)

Die Vorratswerte für Calcium liegen bei Traktecken mit Mistelbefall niedriger: Obwohl erstes und drittes Quartil etwa identisch sind, liegt der Median des Ca-Vorrats bei ihnen deutlich tiefer. Auf 95% signifikant ist der Unterschied der Mediane beider Gruppen jedoch nicht, da sich die Einschnürungen soeben überschneiden (Abbildung 13 links).

Der Kaliumvorrat unterscheidet sich ebenfalls nicht signifikant zwischen den Traktecken mit und ohne Mistelbefall. Lediglich seine Varianz scheint bei den Traktecken mit Mistelbefall etwas größer zu sein (Abbildung 13 Mitte).

Der Vorrat von Magnesium scheint sich zwischen den Gruppen auf den ersten Blick deutlich zu unterscheiden – Traktecken mit Mistelbefall weisen augenscheinlich höhere Magnesiumvorräte auf. Ein auf 95% signifikanter Unterschied kann auf Basis der Boxplots jedoch nicht angenommen werden, da sich die Einschnürungen überschneiden. Lediglich das dritte Quartil liegt bei Traktecken mit Mistelbefall deutlich höher (Abbildung 13 rechts). Die logistische Regressionsmodellierung zeigt jedoch, dass Unterschiede im Magnesiumvorrat deutliche Auswirkungen auf den Mistelbefall haben (vgl. Tabelle 7).

Bei Betrachtung der Vorräte der wichtigen basisch wirkenden Nährelemente im Boden von Traktecken mit Mistelbefall fällt auf, dass hohe mittlere Mistelanzahlen und Mistelbaumanteile vermehrt bei geringen Vorräten vorkommen, während bei höheren Vorräten zwar auch noch Misteln vorkommen, die Befallsintensität jedoch meist geringer ist. Hohe Mistelanzahlen und Mistelbaumanteile finden sich v.a. an Standorten mit sehr geringen Vorräten der betrachteten Nährstoffe. Auch geringe Befallsgrade sind dort jedoch häufiger zu beobachten als an Standorten mit höheren Vorräten.

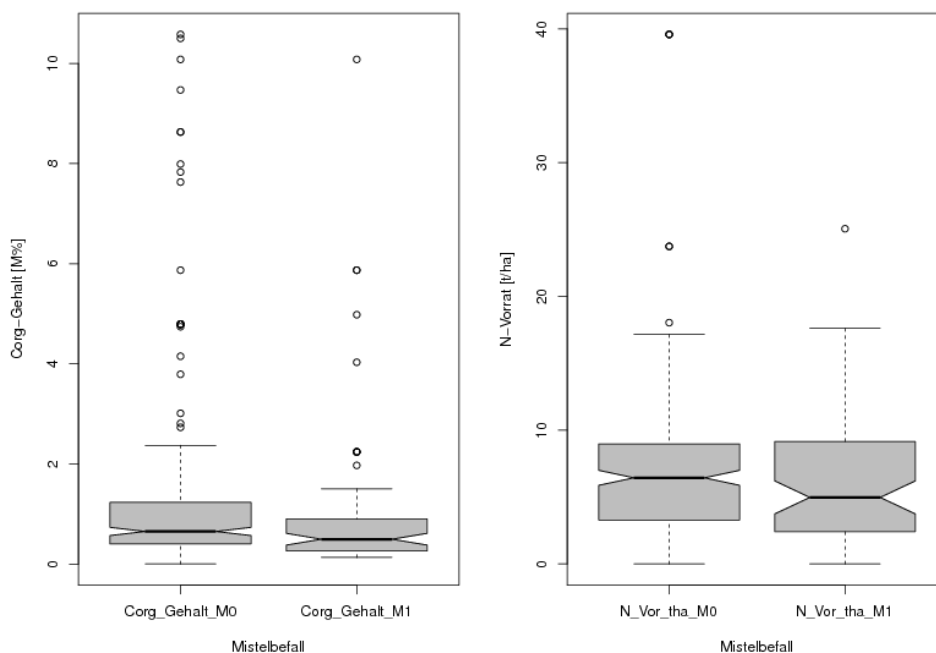


Abbildung 14 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Umweltvektoren Corg (organischer Kohlenstoffgehalt) und N_Vor_tha (Stickstoffvorrat) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)

Der C_{org}-Gehalt im Boden ist zwischen den Traktecken sehr asymmetrisch verteilt. Während der Großteil der Ecken zwischen 0 und 2 Masseprozent organischen Kohlenstoffgehalt im Boden aufweist, kommen viele Ausreißer mit bis über 10% vor (Abbildung 14 links).

Der Median des C_{org}-Gehalts liegt bei Traktecken mit Mistelbefall deutlich niedriger als bei denjenigen ohne Mistelbefall. Die Mediane unterscheiden sich jedoch nicht auf einem 95%-Signifikanzniveau, da sich die Einschnürungen soeben überschneiden.

Bei Betrachtung der Ausreißer fällt auf, dass nur wenige Traktecken mit Mistelbefall überhaupt über 2 Massenprozent C_{org} liegen, der höchste Wert liegt unter 6. Unter den Traktecken ohne Mistelbefall findet sich eine weit höhere Anzahl von Werten über 2 und auch zahlreiche über 6 Massenprozent C_{org} . Der Stickstoffvorrat unterscheidet sich zwischen Traktecken mit und ohne Mistelbefall deutlich. Da sich die Einschnürungen soeben überschneiden, sind die Mediane auf einem Niveau von 95% nicht signifikant unterschiedlich, dennoch kann ausgesagt werden, dass die Stickstoffvorräte an Trakten mit Mistelbefall tendenziell niedriger liegen (Abbildung 14 rechts).

Zwischen Kohlenstoff- und Stickstoffvorrat und der Intensität des Mistelbefalls konnte kein klarer Zusammenhang beobachtet werden. Lediglich an Traktecken mit sehr hohen C_{org} -gehalten (an moorig bis moorig) konnten nur sehr geringe Befallsintensitäten festgestellt werden.

4.1.4.2. Temperatur und Niederschlag

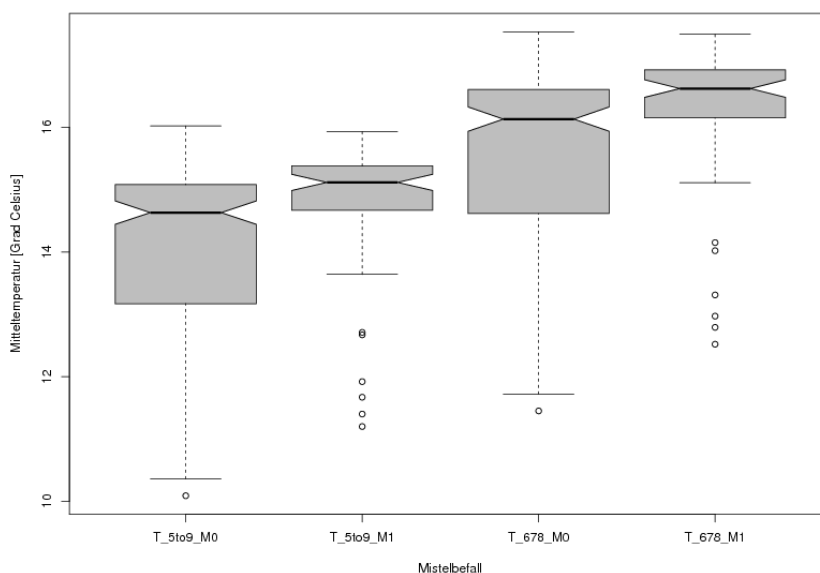


Abbildung 15 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Umweltvektoren T_5to9 (Mitteltemperatur Mai bis September) und T_678 (Mitteltemperatur Juni bis August) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)

Es besteht ein deutlicher Unterschied in der Mitteltemperatur zwischen den Traktecken mit und ohne Mistelbefall. Da sich sowohl bei der Mai-bis-September-Mitteltemperatur als auch bei der Juni-bis-August-Mitteltemperatur die Einschnürungen der Boxplots nicht überlappen, ist davon auszugehen, dass die Mediane der Gruppen auf einem Signifikanzniveau von 95% verschieden sind (Abbildung 15). Beide Umweltvektoren führen bei der logistischen Regressionsmodellierung zu ähnlich guten Aussagen, die Temperatur ist für die Modellierung des Mistelbefalls sogar der wichtigste und aussagekräftigste Umweltvektor.

Bäume mit Mistelbefall kommen insgesamt also an in der Hauptvegetationszeit deutlich wärmeren Standorten vor als Bäume ohne Mistelbefall. Der Unterschied zeichnet für beide Zeitspannen etwa gleich stark.

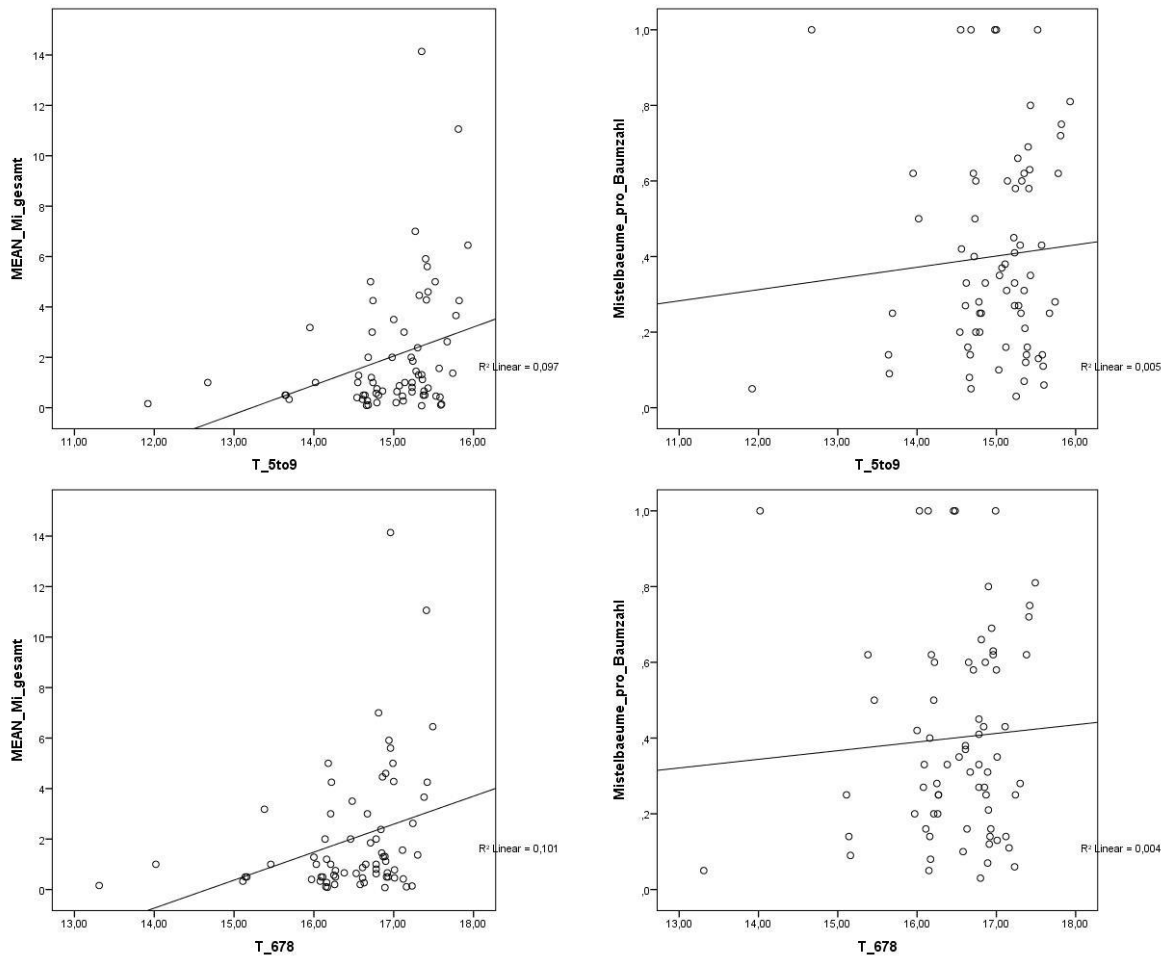


Abbildung 16 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern und Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt), bzw. des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Baumzahl) und den Umweltvektoren T_5to9 (Mitteltemperatur Mai bis September) und T_678 (Mitteltemperatur Juni bis August) (Erklärung siehe Tabelle 2)

Es ist deutlich zu erkennen, dass fast alle Traktecken mit starkem Mistelvorkommen oberhalb einer kritischen Durchschnittstemperatur liegen. Oberhalb der Mai-bis-September-Mitteltemperatur von ca. 15 °C, bzw. oberhalb der Juni-bis-August-Mitteltemperatur von ca. 16 °C ist ein plötzlicher Anstieg des Mistelbefalls zu erkennen, stärkere Befallsgrade kommen unterhalb dieser Temperaturschwelle kaum vor (Abbildung 16). Dieser Effekt zeichnet sowohl bei der mittleren Mistelanzahl wie auch der mittleren Anzahl von Mistelbäumen je Traktecke. Die lineare Regressionsgerade kann den Zusammenhang mit der mittleren Mistelanzahl der Kiefern und Tannen des Traktes ansatzweise und bei annehmbaren Bestimmtheitsmaßen erklären, eine quadratische Funktion (Parabel) wäre zur Vorhersage wahrscheinlich noch besser geeignet. Bei Betrachtung der stärker generalisierten Größe „Anteil der Mistelbäume an der Gesamtanzahl von Kiefern und Tannen“ zeichnet der Effekt wesentlich schlechter.

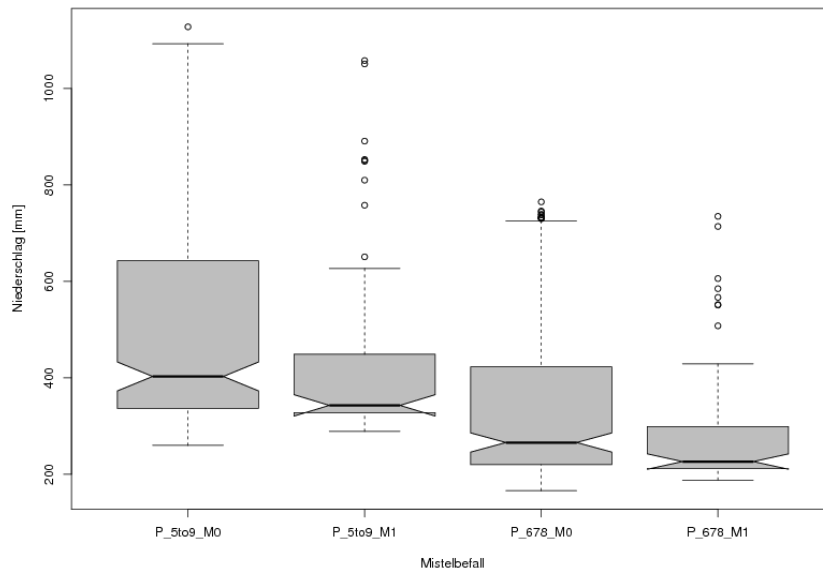


Abbildung 17 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Umweltvektoren P_5to9 (Niederschlagsmittel Mai bis September) und P_678 (Niederschlagsmittel Juni bis August) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)

Wie bei der Mitteltemperatur besteht auch bei der Niederschlagssumme ein deutlicher Unterschied zwischen den Traktecken mit und ohne Mistelbefall. Da sowohl bei der Mai-bis-September-Niederschlagssumme als auch bei der Juni-bis-August-Niederschlagssumme die Einschnürungen der Boxplots sich nicht überlappen, ist davon auszugehen, dass die Mediane der Gruppen auf einem Signifikanzniveau von 95% verschieden sind (Abbildung 17). Dennoch kann der Niederschlagssumme in der logistischen Regressionsmodellierung kein so starker Effekt auf den Mistelbefall nachgewiesen werden wie der Temperatur.

Bäume mit Mistelbefall kommen an in der Hauptvegetationszeit deutlich niederschlagsärmeren Standorten vor als Bäume ohne Mistelbefall. Vereinzelt sind auch bei höheren Niederschlägen Mistelvorkommen zu beobachten. Der Unterschied zeichnet für die Zeitspanne von Mai bis September etwas stärker als für die Zeitspanne von Juni bis August.

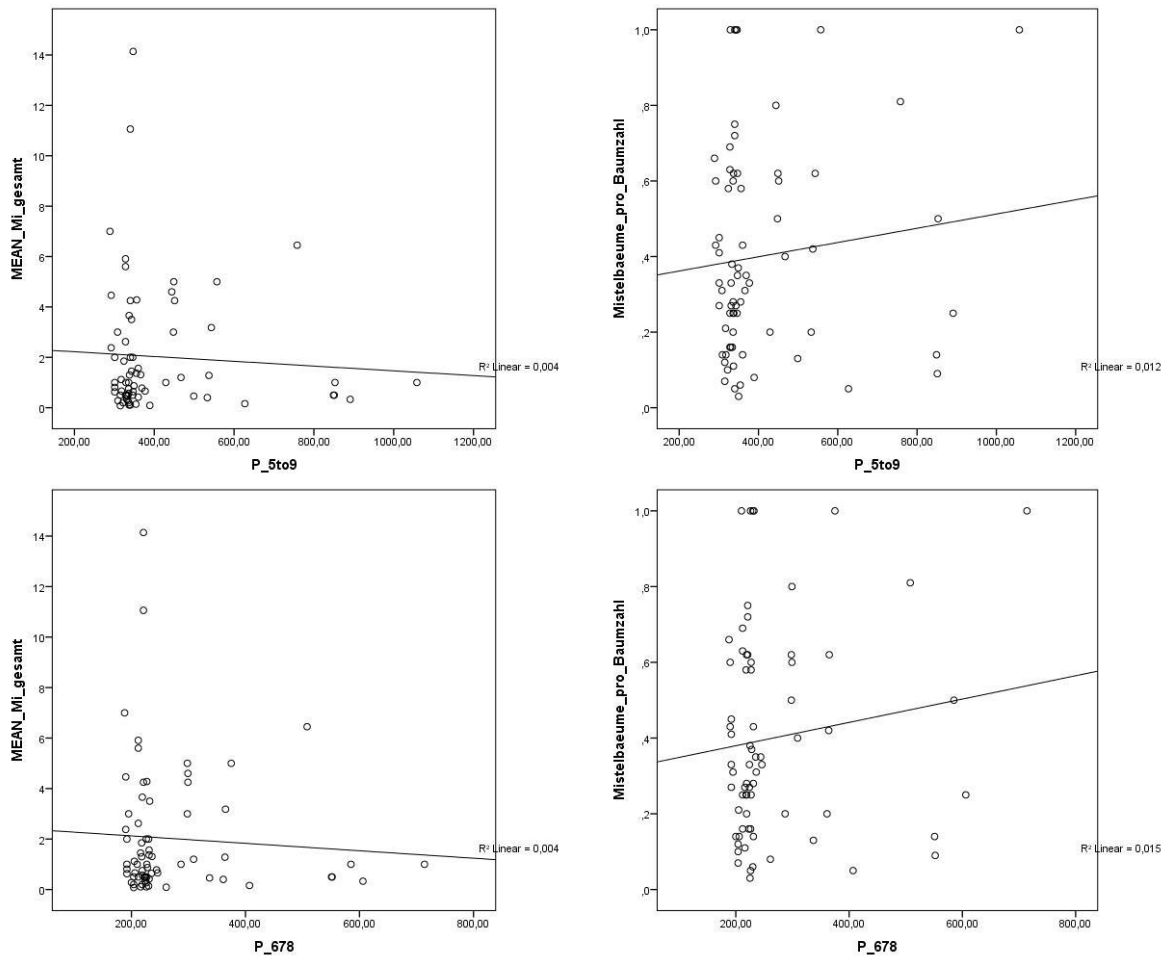


Abbildung 18 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern und Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt), bzw. des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Baumzahl) und den Umweltvektoren P_5to9 (Niederschlagsmittel Mai bis September) und P_678 (Niederschlagsmittel Juni bis August) (Erklärung siehe Tabelle 2)

Analog zur Mitteltemperatur zeigt auch die Niederschlagssumme sowohl von Mai bis September als auch von Juni bis August einen deutlichen Sprung – unterhalb von etwa 400 mm, bzw. unterhalb von 250 mm, sind plötzlich wesentlich stärkere mittlere Mistelanzahlen abzulesen. Auch der Großteil der Punkte mit geringem Mistelbefall befindet sich unterhalb dieser Grenze (Abbildung 18). Die lineare Regressionsgerade kann den Zusammenhang ansatzweise erklären, eine negativ quadratische Funktion (Hyperbel) wäre zur Vorhersage wahrscheinlich noch besser geeignet.

Der Anteil der Mistelbäume pro Trakt zeichnet wesentlich schlechter.

4.1.4.4. Indizes

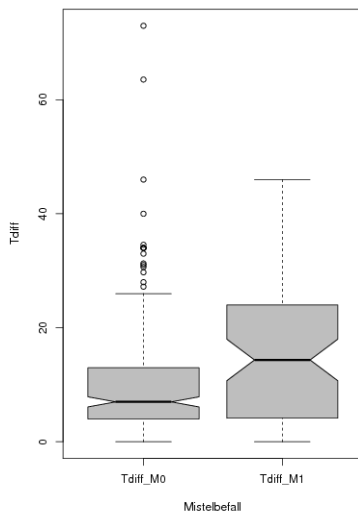


Abbildung 19 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede des Umweltvektors Tdiff (Transpirationsdifferenz) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)

Die Transpirationsdifferenz der Monate Mai bis September liegt an Traktecken mit Mistelbefall wesentlich höher als an Traktecken ohne Mistelbefall. Der Median der Traktecken mit Mistelbefall liegt deutlich über dem dritten Quartil derjenigen ohne, ein 95-prozentig signifikanter Unterschied der Mediane beider Gruppen ist aufgrund sich nicht überschneidender Einschnürungen anzunehmen (Abbildung 19). Zwar weisen die Traktecken ohne Mistelbefall vereinzelt noch höhere Transpirationsdifferenzen auf, hierbei handelt es sich jedoch um Ausreißer. Auch in der logistischen Regressionsmodellierung fließt die Transpirationsdifferenz als wichtige Kenngröße des potentiellen Trockenstresses, den ein Baum ertragen muss, ein und hat signifikanten Einfluss auf die Erklärung des Mistelbefalls.

An Punkten mit Mistelbefall müssen Bäume auch ohne Betrachtung des zusätzlichen Wasserverlustes durch die Transpiration der Mistel schon wesentlich höhere Transpirationsdifferenzen und somit einen angespannteren Wasserhaushalt ertragen.

Einen Zusammenhang zwischen Transpirationsdifferenz und Befallsintensität konnte nicht festgestellt werden.

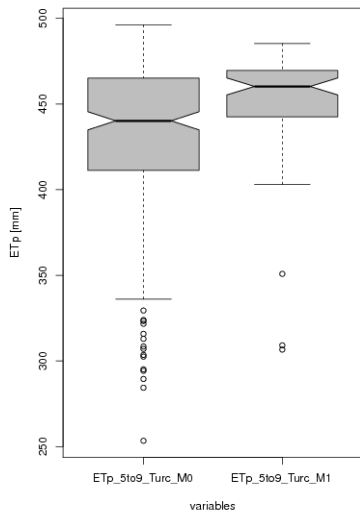


Abbildung 20 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede des Umweltvektors ETp_{5to9_Turc} (potentielle Evapotranspiration) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)

Die potentielle Evapotranspiration nach Turc (1961) von Mai bis September liegt an Traktecken mit Mistelbefall sehr deutlich sichtbar wesentlich höher als an Traktecken ohne Mistelbefall. Die Mediane unterscheiden sich auf einem Niveau von 95% signifikant (Abbildung 20).

Traktecken mit Mistelbefall weisen also schon alleine aufgrund von Standortparametern eine deutlich höhere potentielle Evapotranspiration auf.

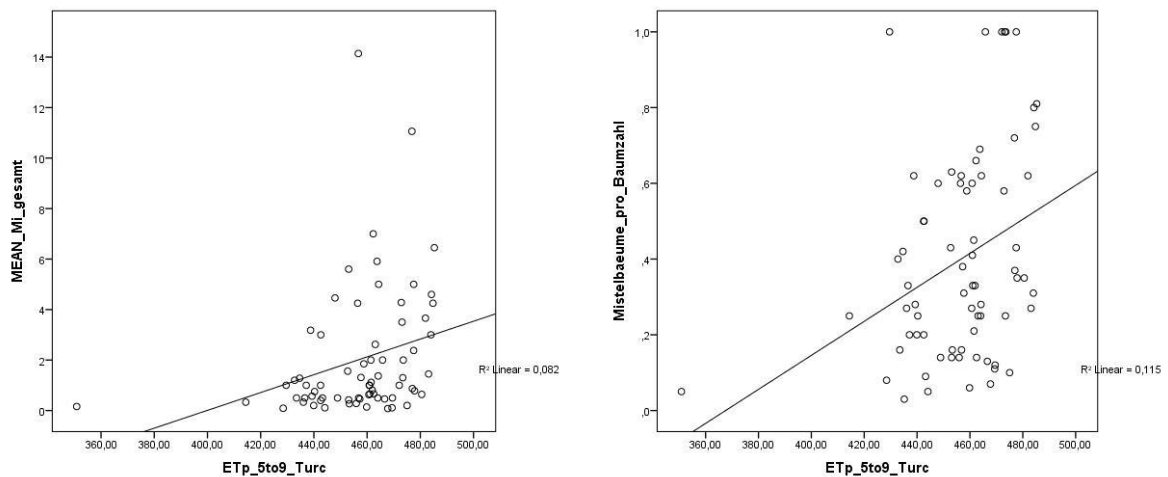


Abbildung 21 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern und Tannen je Traktecke ($MEAN_Mi_gesamt$), bzw. des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen der Traktecke ($Mistelbaeume_pro_Baumzahl$) und dem Umweltvektor ETp_{5to9_Turc} (potentielle Evapotranspiration) (Erklärung siehe Tabelle 2)

Die Werte der Evapotranspiration liegen an allen Traktecken mit Mistelbefall relativ hoch. Ein positiver Zusammenhang zwischen Befallsintensität und Evapotranspiration lässt sich ablesen, die Regressionsgeraden zeigen eine relativ starke Steigung und annehmbare Bestimmtheitsmaße (Abbildung 21).

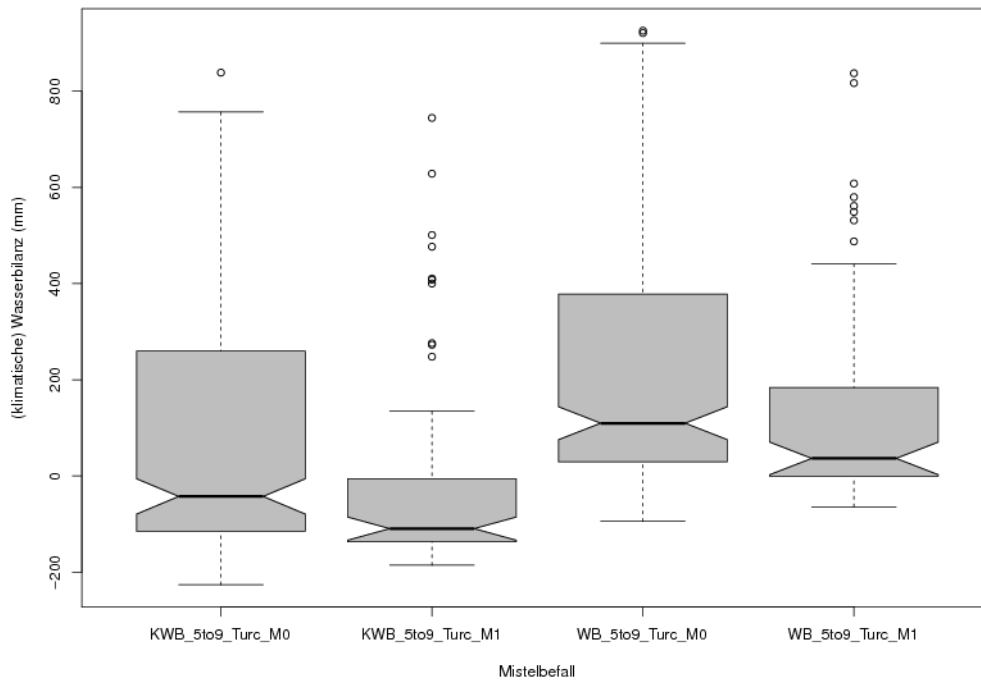


Abbildung 22 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Umweltvektoren KWB_5to9_Turc (klimatische Wasserbilanz) und WB_5to9_Turc (Wasserbilanz) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)

Die Wasserbilanzwerte zeigen deutliche Unterschiede zwischen Traktecken mit und ohne Mistelbefall: Die Evapotranspiration an Traktecken mit Mistelbefall ist im Großteil der Fälle höher als der Niederschlag, sodass der Median der klimatischen Wasserbilanz negativ ist. Die Wasserbilanz, die zusätzlich die nutzbare Feldkapazität einbezieht, ist zwar absolut etwas höher, beide Indizes liegen jedoch an Traktecken mit Mistelbefall deutlich niedriger als an denjenigen ohne Mistelbefall. Die Unterschiede der Mediane sind aufgrund nicht überlappender Einschnürungen mit großer Wahrscheinlichkeit signifikant (Abbildung 22). Bäume, die an Traktecken mit Mistelbefall wachsen, haben deutlich mehr potentiellen Wasserstress als andere, auch ohne die Betrachtung des zusätzlichen Wasserverlustes durch die Mistel.

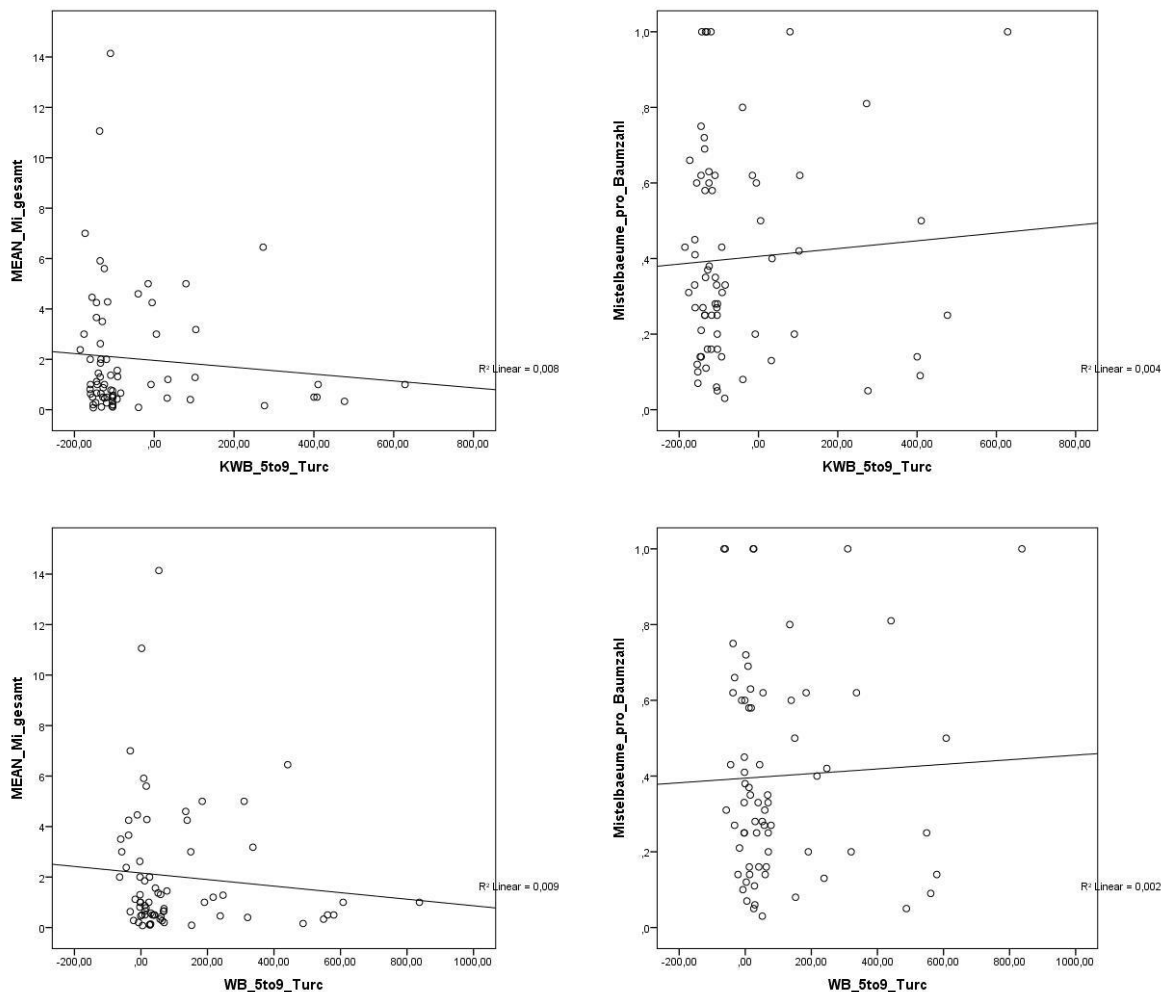


Abbildung 23 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern und Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt), bzw. des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Baumzahl) und den Umweltvektoren KWB_5to9_Turc (klimatische Wasserbilanz) und WB_5to9_Turc (Wasserbilanz)

Die stärksten Befallsintensitäten sind bei den niedrigsten (klimatischen) Wasserbilanzen zu beobachten, je weiter die Bilanzen werden, desto geringer fällt i.d.R. der Mistelbefall aus. Die Regressionsgerade zeigt eine negative Steigung, das Bestimmtheitsmaß liegt in einem sehr niedrigen Bereich (Abbildung 23). Ggf. wäre eine negativ quadratische Funktion (Hyperbel) besser zur Vorhersage geeignet.

So kann gezeigt werden, dass besonders starker Mistelbefall bevorzugt an Standorten vorkommt, an denen Wassermangel vorherrscht und Bäume mit hoher Wahrscheinlichkeit unter Trockenstress leiden, auch ohne den zusätzlichen Wasserverlust durch die Mistel zu betrachten.

Die wichtigsten Größen zur Erklärung des Mistelbefalls sind somit in klimatischen Parametern zu suchen: Vor allem hohe Sommertemperaturen in Verbindung mit angespanntem Wasserhaushalt sind förderlich für einen Mistelbefall. Außerdem hat die Versorgung mit Basenkationen, insbesondere Magnesium, einen Einfluss.

4.1.5. Topographie

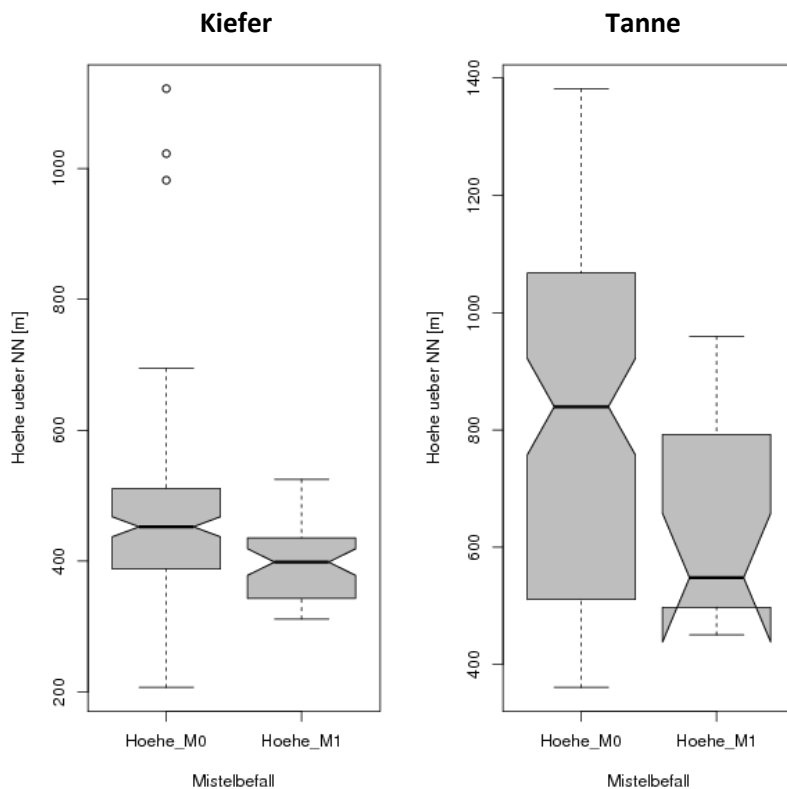


Abbildung 24 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Höhe über NN in m (Hoehe) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)

Traktecken mit Mistelbefall liegen auf deutlich geringeren Meereshöhen. Dieser Effekt tritt sowohl bei Kiefern als auch bei Tannen auf. Da sich die Einschnürungen nicht überschneiden, sind die Mediane sehr wahrscheinlich auf einem Niveau von 95% signifikant unterschiedlich (Abbildung 24).

Bei Betrachtung der absoluten Meereshöhen zeigt sich, dass die untersuchten Kiefern im Schnitt insgesamt auf wesentlich geringeren Meereshöhen vorkommen als die Tannen. Dennoch lässt sich auch innerhalb der Art ein weiterer deutlicher Höhenunterschied zwischen Traktecken mit und ohne Mistelbefall feststellen – die Kiefernmistel kommt vor allem an Trakten unter 450m ü. NN vor. Darüber kommen ebenfalls viele Traktecken mit Kiefern vor, ein Mistelbefall ist dort jedoch sehr selten. Unterhalb von 400 m ü. NN liegen nur noch wenige Traktecken ohne Mistelbefall – der Großteil der unter dieser Marke gelegenen Traktecken zeigt einen Befall durch die Kiefernmistel (Abbildung 24 links).

Ähnliche Effekte können auch bei der Tannenmistel beobachtet werden: während 75% der Traktecken mit Tannenmistelbefall unterhalb von 800 m ü. NN liegen, liegt selbst der Median der Höhe der Traktecken ohne Tannenmistelbefall auf ca. 850 m. Die Mediane beider Gruppen sind hochsignifikant unterschiedlich (Abbildung 24 rechts).

Mit einem Mistelbefall muss also eher im unteren Teil der Höhenverbreitung der jeweiligen Wirtsbaumart gerechnet werden – die Kiefernmistel kommt nach den Ergebnissen dieser Untersuchung mit großer Wahrscheinlichkeit nur unter 450 m ü. NN, die Tannenmistel nur unter 800 m ü. NN vor.

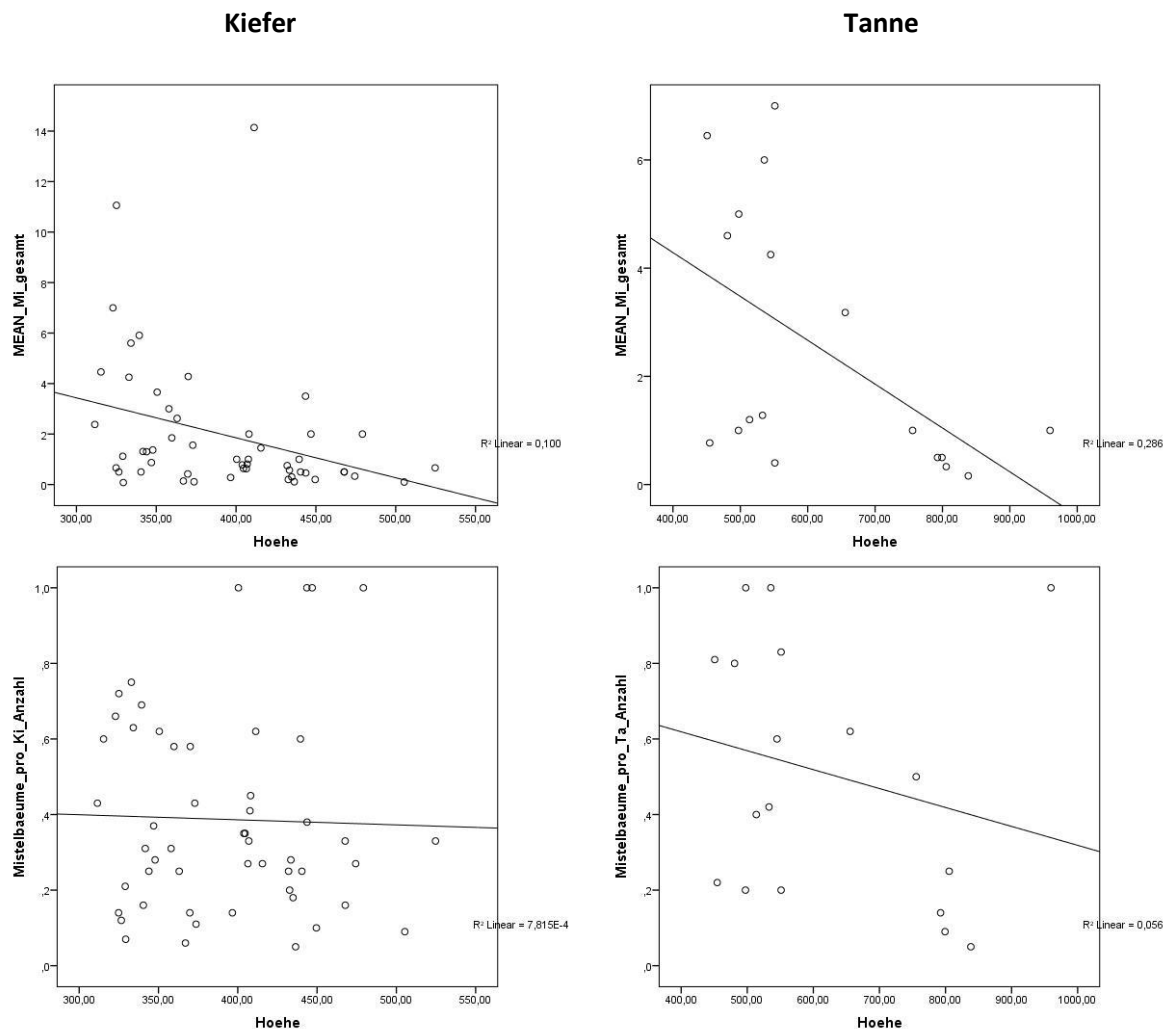


Abbildung 25 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern, bzw. Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt) sowie des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Ki/Ta_Anzahl) und der Höhe über NN in m (Hoehe)

Zwischen Meereshöhe und mittlerer Mistelanzahl ist ein deutlicher Zusammenhang zu beobachten: Nur auf niedrigen Höhen über NN kommen durchschnittlich sehr viele Misteln pro Baum vor, oberhalb von 450 m (Kiefer), bzw. 700 m (Tanne) ist kaum noch ein stärkerer Befall auszumachen (Abbildung 25). Die Regressionsgerade erklärt die Streuung relativ gut. Die Anzahl der befallenen Kiefern, bzw. Tannen je Trakt zeigt keinen klaren Trend.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass nicht nur eine Höhenbegrenzung des Mistelbefalls vorliegt, sondern besonders starke Befälle in den tiefsten Lagen vorkommen, während bei Annäherung an die obere Grenze der Verbreitung der jeweiligen Mistel-Unterarten die Befallsintensität deutlich abnimmt.

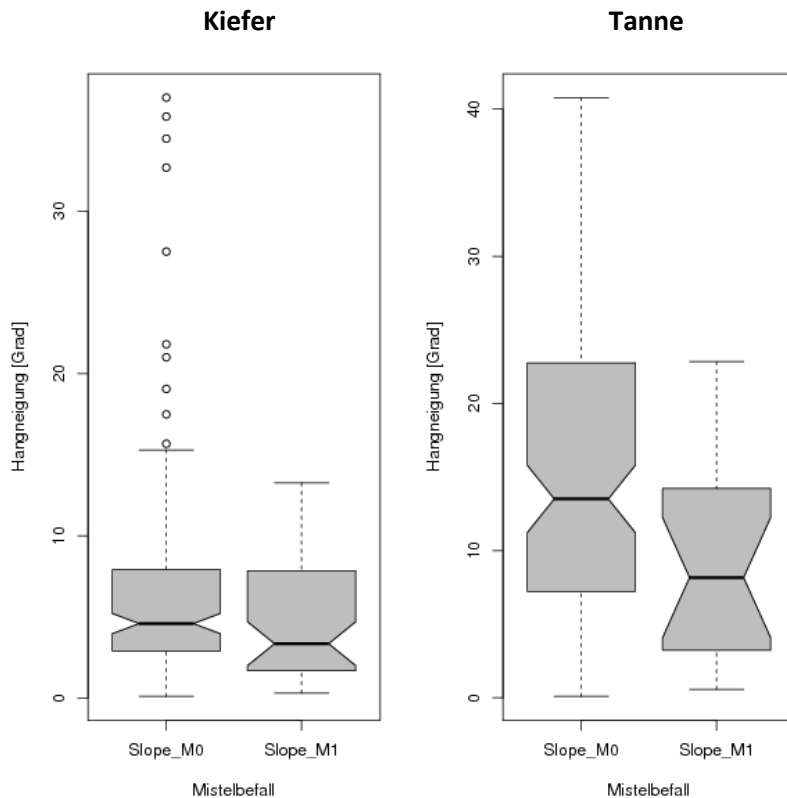


Abbildung 26 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Hangneigung (Slope) in Grad zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)

Traktecken mit Mistelbefall liegen tendenziell an weniger steilen Hängen, ein signifikanter Unterschied der Mediane ist aufgrund überlappender Einschnürungen jedoch nicht anzunehmen (Abbildung 26).

Bei der Tannenmistel ist diese Tendenz deutlich stärker ausgeprägt als bei der Kiefernmistel. Fast 75% der Traktecken mit Tannenmistelbefall liegen an Hängen unter 15°, während unbefallene Traktecken mit Tannenbestand bis in wesentlich stärkere Hangneigungen vorkommen.

Auch bei der Kiefernmistel ist jedoch ein leichter Trend zu erkennen: Der Median der Hangneigung liegt deutlich niedriger als an Traktecken ohne Mistelbefall. An extrem steilen Hängen oberhalb von 15° (Kiefer), bzw. 25° (Tanne) kommt die Nadelholzmistel überhaupt nicht vor.

Zwischen Hangneigung und Befallsintensität ist nur ein schwacher Zusammenhang zu beobachten. Tendenziell kommen höhere relative Mistelanzahlen an weniger steilen Hängen vor, je steiler der Hang, desto geringer Befallsintensität. Der Anteil der befallenen Kiefern und Tannen zeigt keinen klaren Zusammenhang, er ist statistisch kaum nachweisbar.

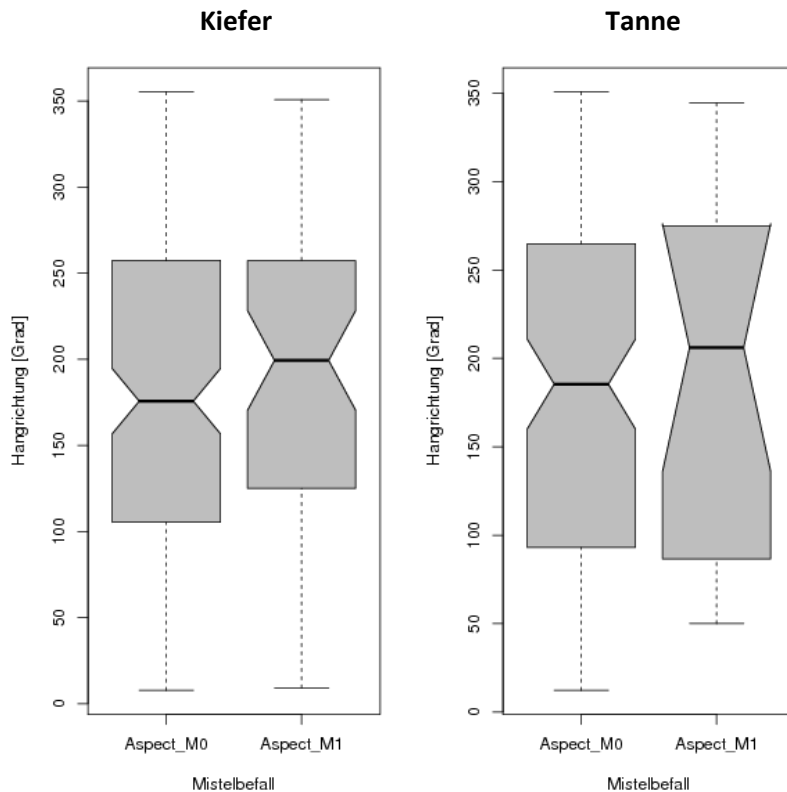


Abbildung 27 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Hangrichtung (Exposition; Aspect) in Grad zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)

Die Darstellung als Boxplot findet in der Anwendung mit Hangrichtungen ihre Grenzen, da es sich nicht um eine Skala im eigentlichen Sinne handelt, sondern in der Grundgesamtheit logischerweise alle Expositionen gleichermaßen vorhanden sein sollten. Die Boxplots für die unbefallenen Traktecken zeigen dies: Der Median liegt relativ genau bei 180°, die Box geht in etwa von 90 bis 270° - diese sind also annähernd normalverteilt.

Bei den Boxplots der Traktecken mit Mistelbefall zeigt sich eine Abweichung: während Box und Whisker bei der Kiefernmistel etwa gleich groß sind, ist der Median von 180° (Süden) nach etwa 200° (Südsüdwest) verschoben. Die Tannenmistel kommt an nord- bis nordostexponierten Traktecken gar nicht vor – bei keinem der Punkte liegt die Exposition zwischen 350° und 50°. Die Unterschiede sind für beide Arten nicht signifikant, es zeigt sich jedoch eine deutliche Tendenz (Abbildung 27).

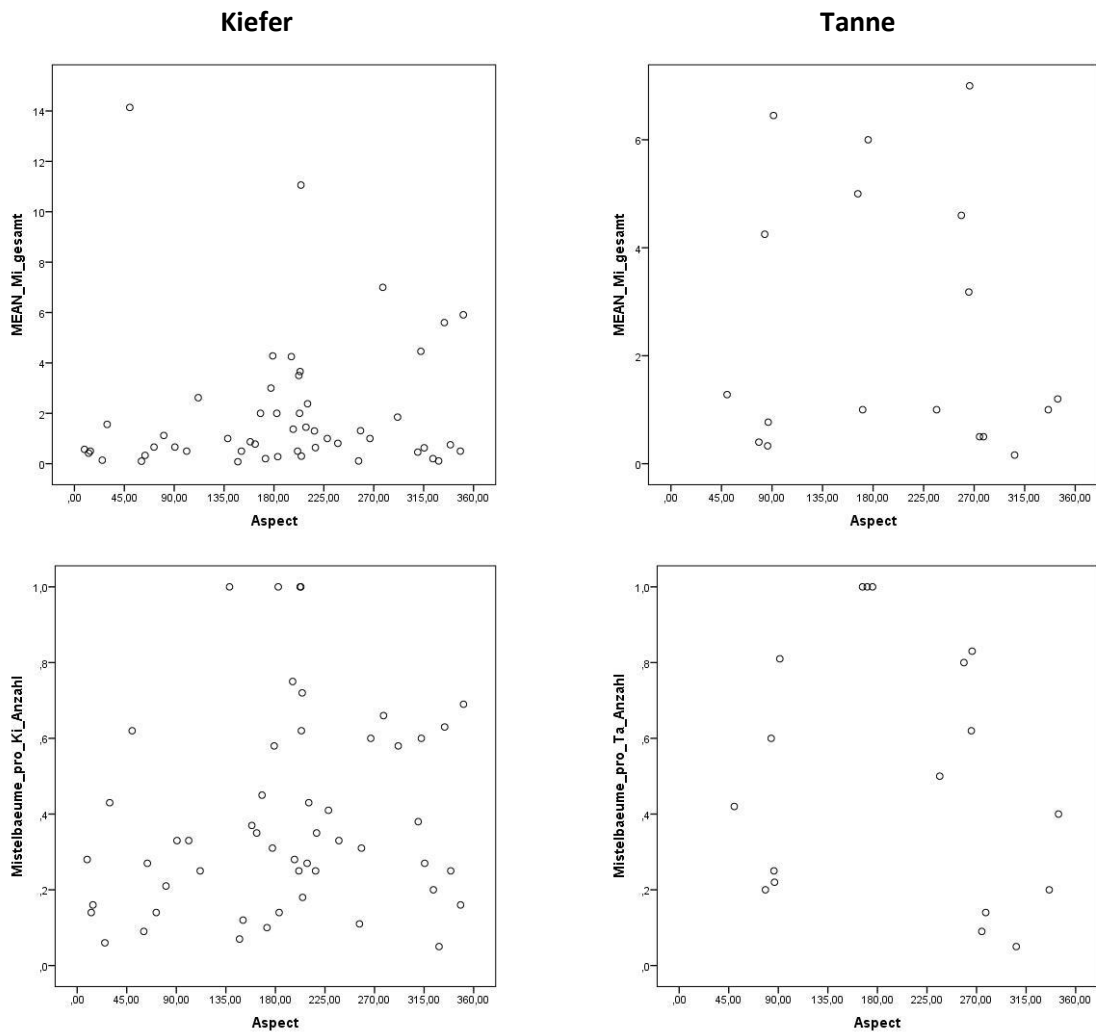


Abbildung 28 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern, bzw. Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt), sowie des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Ki/Ta_Anzahl) und der Hangrichtung (Aspect) in Grad

Zwischen Hangrichtung und Befallsintensität lässt sich für beide Unterarten kein deutlicher Zusammenhang ablesen. Alle Befallsintensitäten sind mehr oder weniger gleichmäßig über die Hangrichtungen verteilt. Lediglich bei der Kiefernmistel ist eine gewisse Tendenz zu einer höheren Anzahl von Mistelbüschen pro Kiefer an süd- bis südwestexponierten Hängen erkennen (Abbildung 28).

Um mögliche Zusammenhänge zwischen Meereshöhe, bzw. Hangneigung und Hangrichtung zu überprüfen, wurden für diese Kombinationen außerdem 3D-Scatterplots erstellt. Hierbei konnte jedoch kein spezielles Muster beobachtet werden.

4.2. Level 2 (Waldklimastationen)

4.2.1. Aufnahmeverfahren

Tabelle 8 - Kumulierte Anzahl der terrestrisch festgestellten Mistelbäume in der jeweiligen Periode. „Periode seit 2014“ bedeutet z.B. die Anzahl der Bäume, an denen in mindestens einem der Jahre 2014, 2015 und 2016 ein Mistelbefall festgestellt wurde.

Periode seit	Beide	ALT	DIN
2007	122	56	66
2008	122	56	66
2009	121	55	66
2010	121	55	66
2011	118	55	63
2012	118	55	63
2013	115	54	61
2014	98	45	53
2015	84	39	45
2016	64	31	33

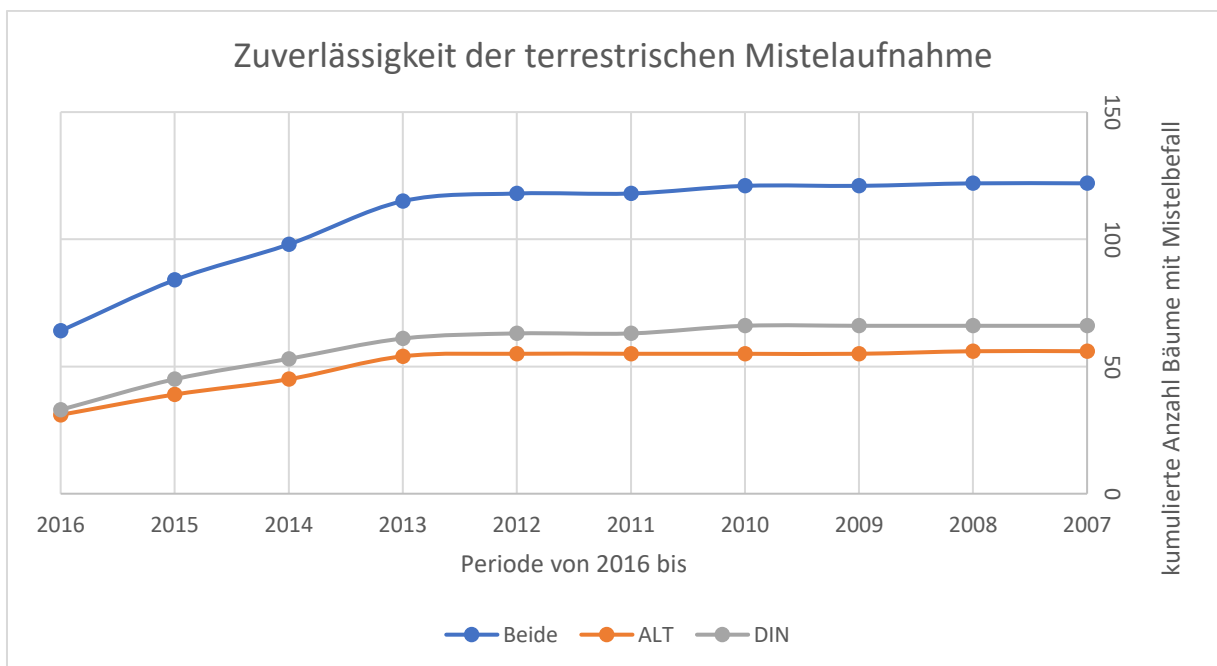


Abbildung 29 - Terrestrisch festgestellte Anzahl Bäume mit Mistelbefall bei kumulierter Betrachtung verschieden langer Mehrjahresperioden vergangener Aufnahmejahre ausgehend von der aktuellsten vorliegenden Aufnahme (2016).

„kumulierte Anzahl der Bäume mit Mistelbefall (y-Achse) in der Periode von 2016 bis 2014 (x-Achse)“ bedeutet z.B. die Anzahl der Bäume, an denen in mindestens einem der Jahre 2014, 2015 und 2016 ein Mistelbefall festgestellt wurde.

Erst bei der Betrachtung einer Aufnahmeperiode ab vier aufeinanderfolgenden Jahren (2016 bis 2013) bleibt die kumulierte Anzahl festgestellter Mistelbäume in etwa konstant (

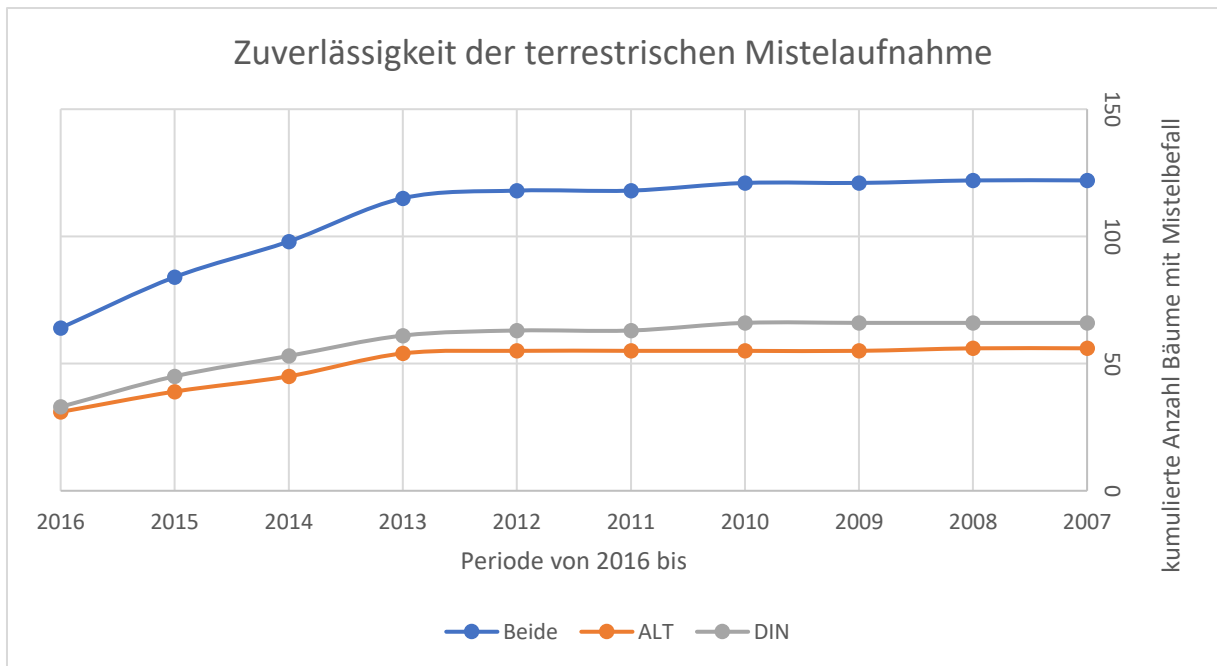


Abbildung 29). Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass bei der terrestrischen Aufnahme Misteln häufig nicht erkannt und ein Befall bei einzelnen Aufnahmen nicht zuverlässig diagnostiziert werden kann.

Tabelle 9 - Kreuztabelle terr * drohne (Erklärung der Abkürzungen siehe Tabelle 11)

		drohne		Gesamt
		0	1	
terr	0	149	42	191
	1	30	33	63
Gesamt		179	75	254

Tabelle 10 - χ^2 -Unabhängigkeitstest zwischen den Variablen terr und drohne (Erklärung der Abkürzungen siehe Tabelle 11)

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	21,028 ^a	1	,000		
Kontinuitätskorrektur ^b	19,593	1	,000		
Likelihood-Quotient	19,837	1	,000		
Exakter Test nach Fisher				,000	,000
Zusammenhang linear-mit-linear	20,945	1	,000		
Anzahl der gültigen Fälle	254				

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 18,60.

b. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

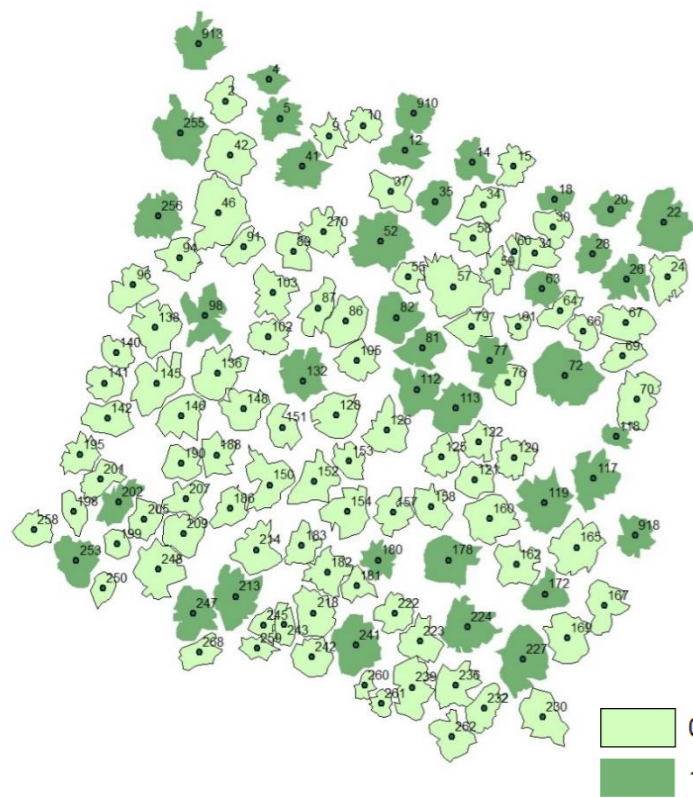
Da für alle Tests $p=0,000$ gilt, ist die Nullhypothese der Unabhängigkeit abzulehnen. Terrestrische Aufnahme und Drohnenaufnahme liefern also abhängige Ergebnisse über den Mistelbefall.

Dennoch zeigt Tabelle 9, dass an 42 Bäumen durch die Drohnenbefliegung Misteln erkannt wurden, welche in der terrestrischen Erhebung nicht als Mistelbäume aufgenommen worden waren. Genauso wurden bei der terrestrischen Erhebung 30 Bäume mit Mistelbefall aufgenommen, die durch die Drohnenbefliegung nicht als solche erkannt wurden. Nur 33 Bäume wurden von beiden Verfahren gleichzeitig als Mistelbäume erkannt. Trotz statistisch nachgewiesener Abhängigkeit beider Aufnahmen muss somit die Frage nach der tatsächlichen Aussagegüte beider Verfahren für sich gestellt werden. In dieser Studie wird deshalb jede Auswertung separat für die nach diesen Verfahren als Mistelbäume identifizierten Baumkollektive durchgeführt:

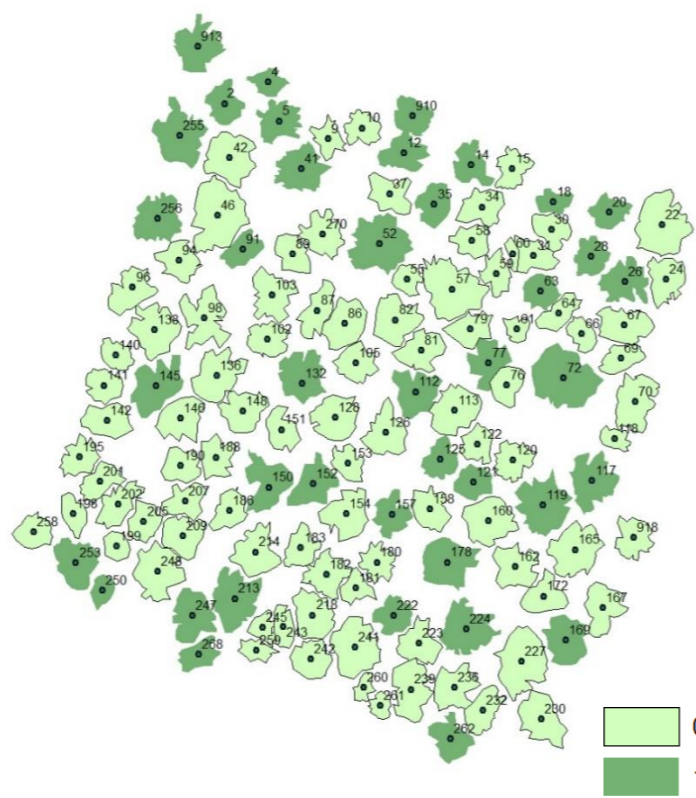
Tabelle 11 - Erklärung der bei der Auswertung verwendeten Baumkollektive

Beschriftung		Bedeutung	n
drohne	0	Bei Drohnenbefliegung 2016 (Ecke 2017) kein Mistelbefall festgestellt	137
	1	Bei Drohnenbefliegung 2016 (Ecke 2017) mindestens eine Mistel festgestellt	64
terr	0	Bei terrestrischer Erhebung in keinem der Jahre 2013 bis 2016 ein Mistelbefall festgestellt	120
	1	Bei terrestrischer Erhebung in mindestens einem der Jahre 2013 bis 2016 mindestens eine Mistel festgestellt	81
beide	0	Sowohl drohne als auch terr = 0	106
	1	Entweder drohne oder terr = 1	95
overlap	1	Sowohl drohne als auch terr = 1	50

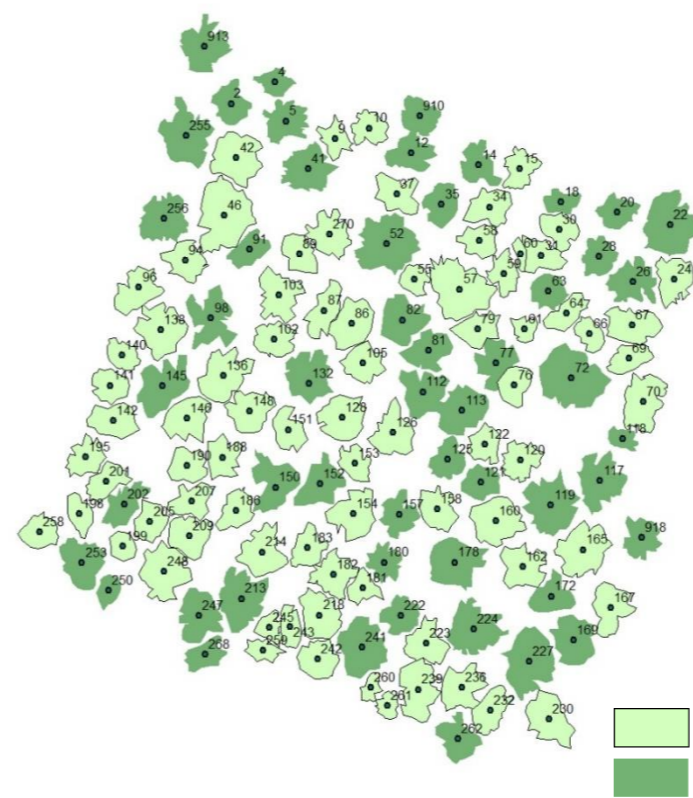
Auch die räumliche Darstellung zeigt auf, wie stark sich die Wahl des Aufnahmeverfahrens auf die erkannten Mistelbäume auswirkt:



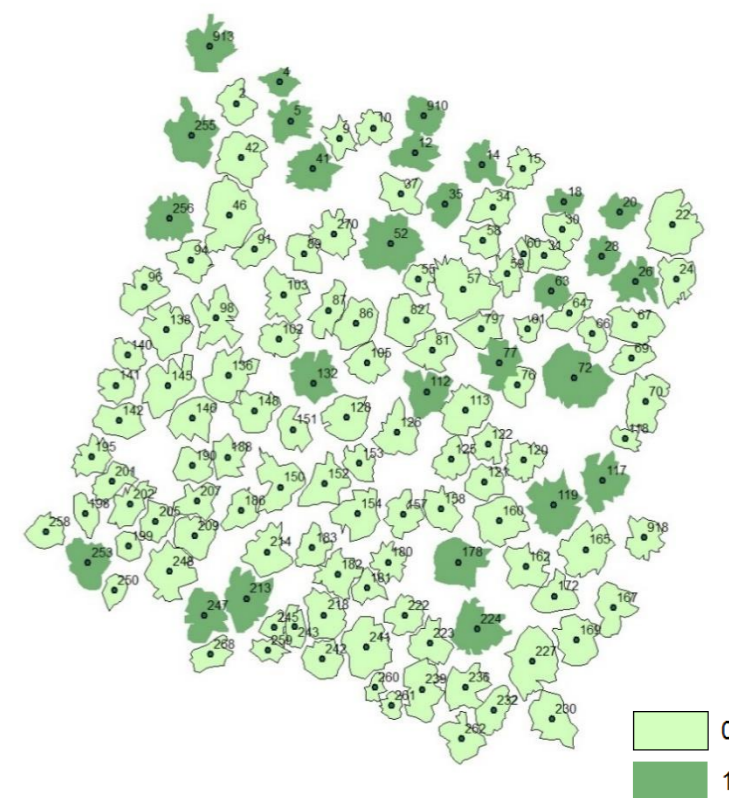
ALT terr



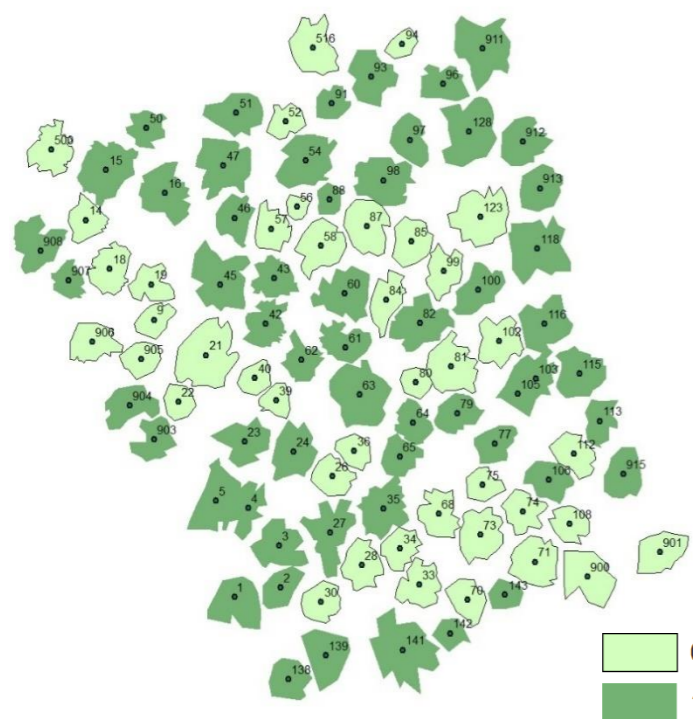
ALT drohne



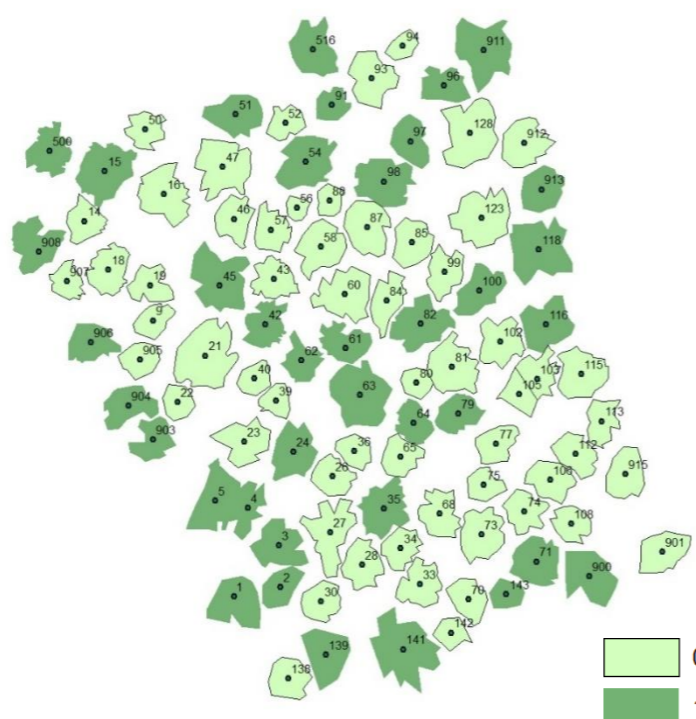
ALT beide



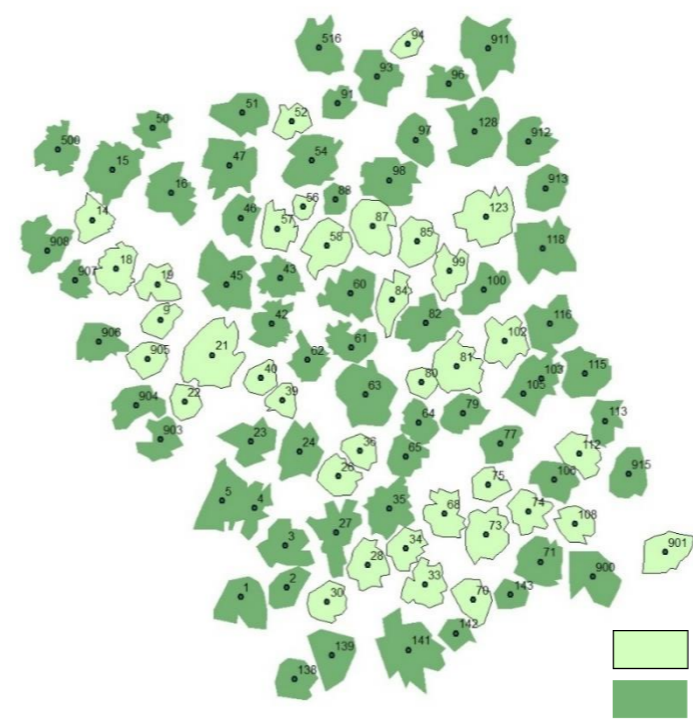
ALT overlap



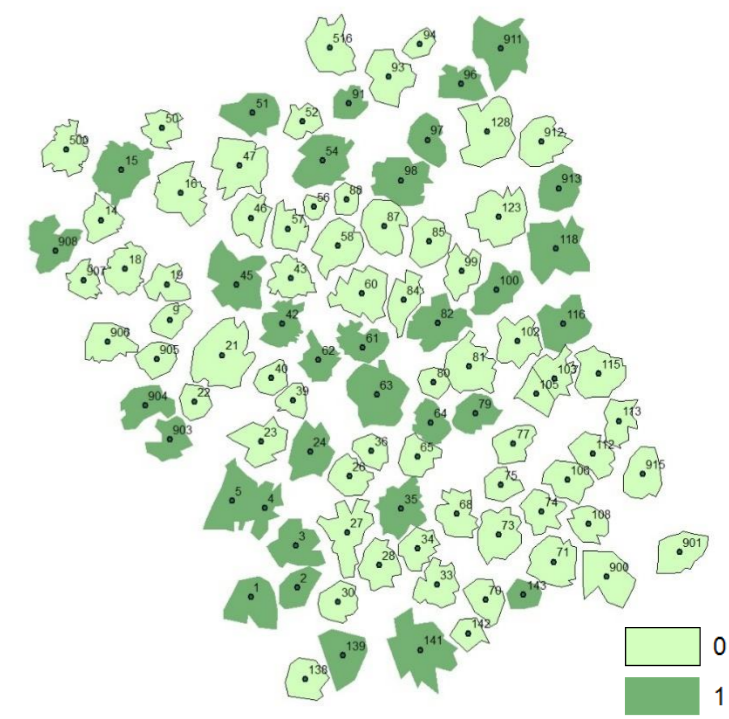
DIN terr



DIN drohne



DIN beide



DIN overlap

Abbildung 30 - Räumliche Darstellung der mistelbefallenen (1) sowie unbefallenen (0) Kiefern an den Waldklimastationen Altdorf (ALT) und Dinkelsbühl (DIN). Zur Erläuterung der Abkürzungen der Vergleichskollektive siehe Tabelle 11.

4.2.2. Befallsentwicklung

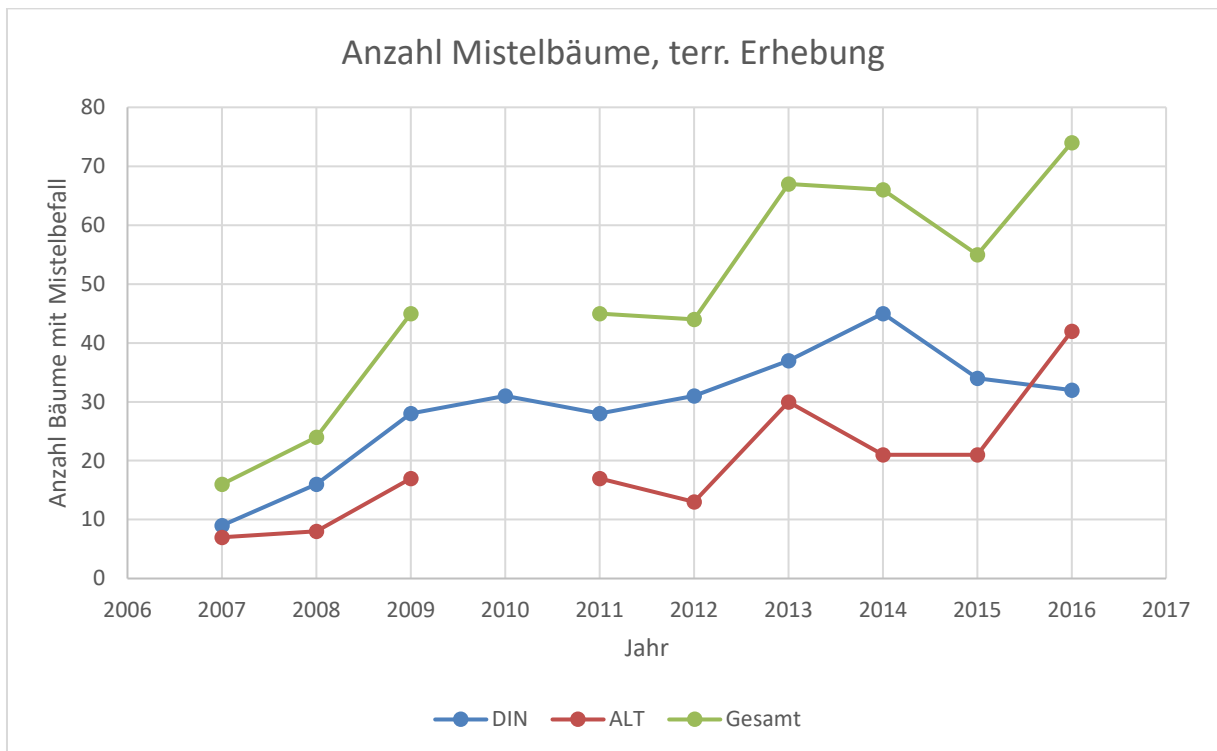


Abbildung 31 - Entwicklung der Anzahl der von Misteln befallenen Bäume (aus terrestrischer Erhebung) für die Level 2-Flächen Waldklimastation Altdorf (ALT) und Dinkelsbühl (DIN). Für ALT waren 2010 keine Daten verfügbar.

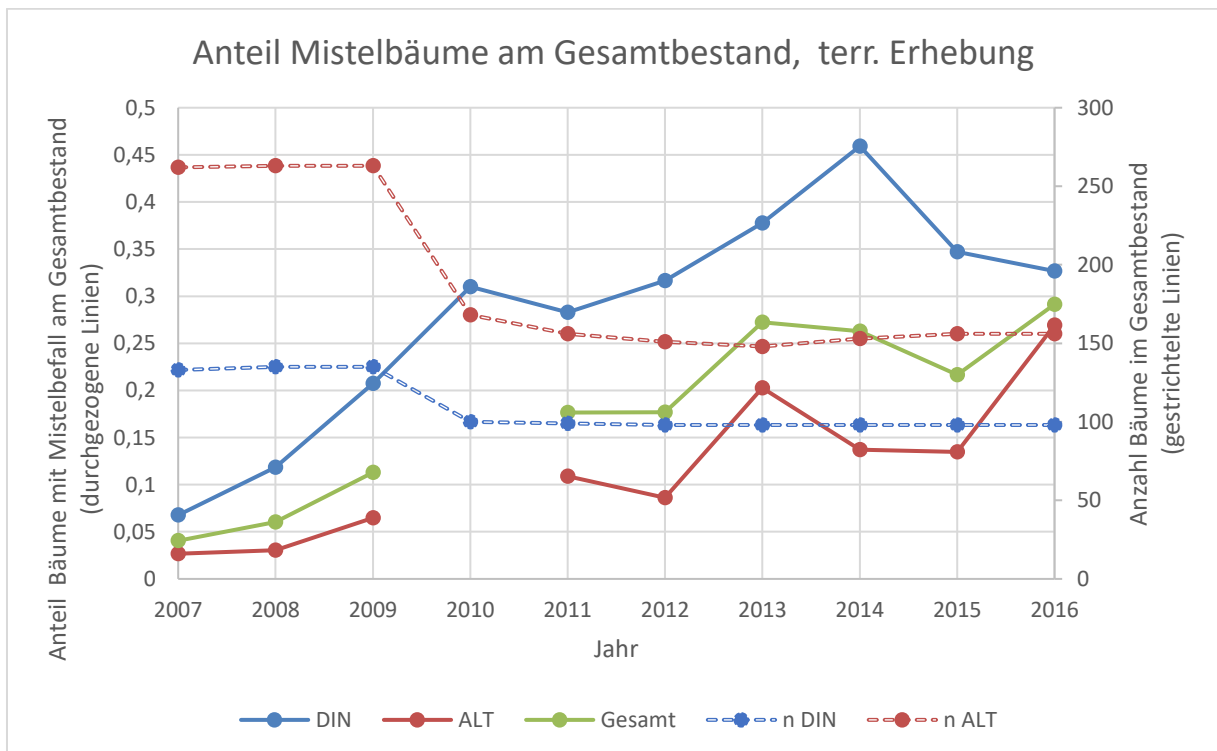


Abbildung 32 - Entwicklung des relativen Anteils der von Misteln befallenen Bäume (aus terrestrischer Erhebung) an der gesamten Baumzahl des Bestandes für die Level 2-Flächen Waldklimastation Altdorf (ALT) und Dinkelsbühl (DIN) und in der Summe (Gesamt) sowie Entwicklung der Anzahl von Bäumen im Gesamtbestand (n ALT; n DIN). Für ALT waren 2010 keine Daten verfügbar.

Es ist für beide Flächen ein deutlich zunehmender Trend erkennbar: Waren im Jahr 2007 noch auf beiden Flächen unter 10% der Bäume vom Mistelbefall betroffen, so waren es im Jahr 2016 auf beiden Flächen schon fast 30% (Abbildung 32).

Zwischen den Erhebungen 2009 und 2010 wurde auf beiden Flächen die Baumzahl im Zuge planmäßiger Durchforstungen reduziert. Zum Jahr 2010, bzw. 2011 erhöhte sich die Mistelanzahl deutlich.

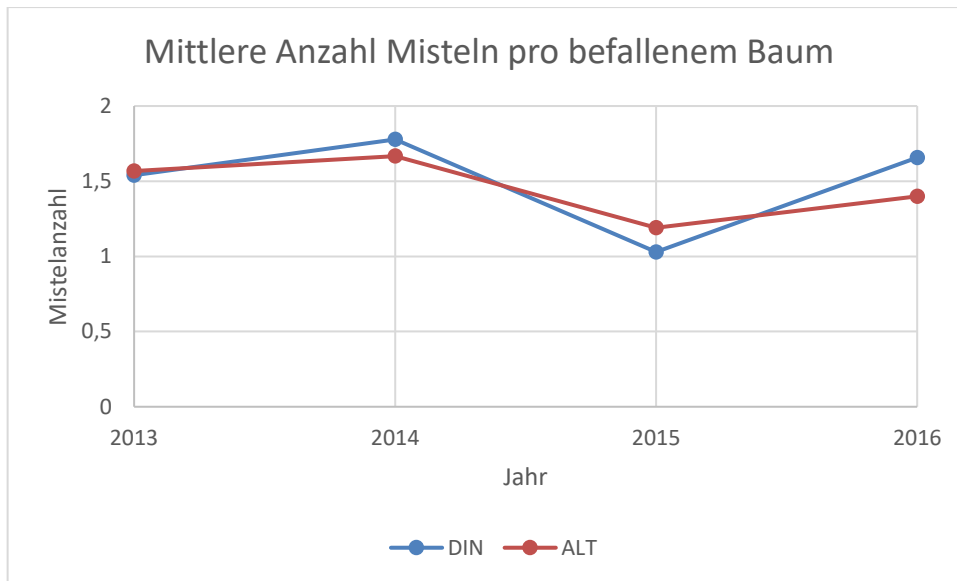


Abbildung 33 - Durchschnittliche Anzahl terrestrisch erhobener Mistelbüsche pro befallenem Baum (Aufnahme ab 2013)

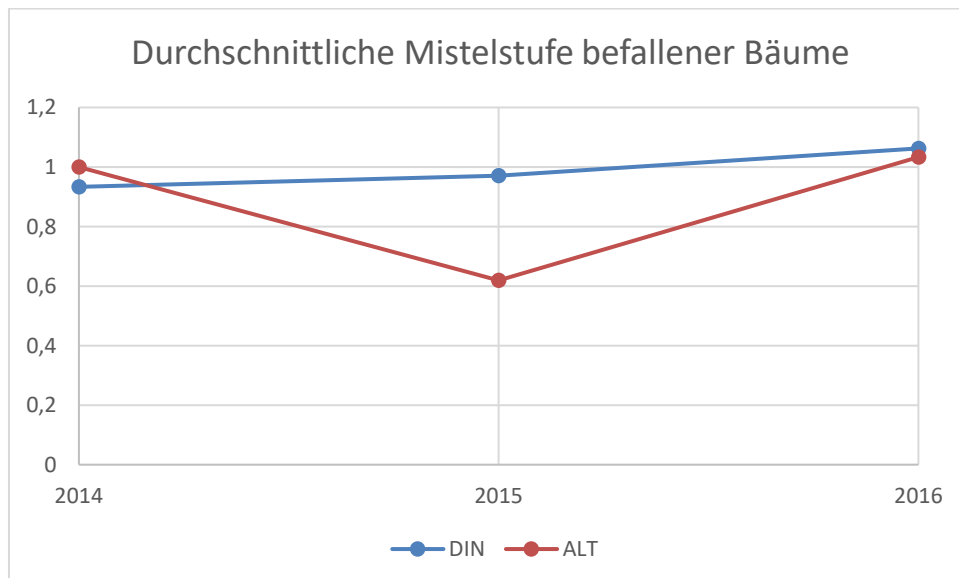


Abbildung 34 - Durchschnittliche Mistelstufe (terrestrische Erhebung) befallener Bäume

Die Mistelanzahl und -stufe können aufgrund der Datenverfügbarkeit erst über einen kurzen Zeitraum dargestellt werden. Ein Trend ist aus der grafischen Darstellung nicht erkennbar (Abbildung 33 und Abbildung 34). Mit einem Durchschnitt von 1 bis 1,8 Misteln pro befallenem Baum (Bäume ohne Mistel nicht mitgezählt!) ist die Befallsintensität jedoch noch als sehr gering einzustufen.

4.2.3. Horizontale Verteilung

Tabelle 12 - Ergebnisse für die Berechnung des Clark&Evans-Index für verschiedene Subkollektive von Probebäumen der Waldklimastationen Altdorf (ALT) und Dinkelsbühl (DIN) (Erklärung der Abkürzungen siehe Tabelle 11) sowie Baumzahl und Fläche des jeweiligen Subkollektiv. Außerdem sind beobachteter und erwarteter mittlerer Abstand und der daraus berechnete Clark&Evans-Index je Kollektiv angegeben. p gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass es sich bei der Berechnung um ein zufälliges Ergebnis handelt.

Subkollektiv	Bäume	$F[m^2]$	$\bar{r}_{\text{beobachtet}}[m]$	$\bar{r}_{\text{erwartet}}[m]$	R	p
ALT alle	131	2847,700065	3,6893	2,3312	1,582586	0,00
ALT terr1	39	2574,121022	5,5852	4,0621	1,374954	0,00
ALT drohne1	40	2629,862129	5,6416	4,0542	1,391531	0,00
ALT beide1	52	2836,741193	5,0594	3,6930	1,36999	0,00
ALT overlap1	27	2319,149163	5,8521	4,6340	1,262868	0,01
DIN alle	97	3145,939222	4,6249	2,8475	1,624217	0,00
DIN terr1	56	3144,783301	5,0654	3,6994	1,369246	0,00
DIN drohne1	38	3131,45269	5,9421	4,5389	1,309149	0,00
DIN beide1	61	3065,620696	5,0927	3,5900	1,418573	0,00
DIN overlap1	33	2928,277560	6,3222	4,7100	1,342298	0,00

Es sind alle Berechnungen statistisch eindeutig, da regelmäßig $p < 0,05$ gilt.

Auf den ersten Blick fällt auf, dass in beiden Versuchsbeständen der Index des Gesamtbestandes deutlich größer ist als derjenige der Subkollektive mit Mistelbefall, die Bäume der mistelbefallenen Subkollektive also geklumpter stehen als der Bestand in Gänze (Tabelle 12).

Die Unterschiede des Clark&Evans-Index R (Verhältnis von beobachtetem zu erwartetem mittlerem Abstand zum nächsten Nachbarbaum) zwischen den verschiedenen Aufnahmeverfahren (drohne, terr, beide, overlap; siehe Tabelle 11) sind deutlich geringer. Unabhängig vom Aufnahmeverfahren lässt sich also ein Unterschied zwischen Gesamtbestand und allen Subkollektiven feststellen.

Ob dieser Unterschied aus dem Mistelbefall der stärker geklumpten Subkollektive resultiert, oder ob es sich um einen zufälligen Effekt bei der Auswahl eines Subkollektivs aus dem Gesamtbestand handelt, wurde anhand des multiplen Randomisierungstests festgestellt.

Tabelle 13 - Anzahl der Bäume und Fläche je Subkollektiv (Erklärung der Abkürzungen siehe Tabelle 11). Aus den zufällig ausgewählten Subkollektiven mit gleicher Baumanzahl wurden Mittelwert und Standardabweichung bestimmt und damit die Mittelwertdifferenz z auf eine Standardnormalverteilung angepasst. Die Wahrscheinlichkeit p , dass die Hypothese H_0 (z liegt innerhalb der Konfidenzintervalle der Normalverteilung) gültig ist, wurde anhand einer Normalverteilungstabelle bestimmt.

Subkollektiv	n	$F[m^2]$	$\mu(R_{random})$	$\sigma(R_{random})$	R_{Mistel}	$ \mu(R_{random}) - R_{Mistel} = z$	$\Phi_{0,1}(z)$	$p(\Phi_{0,1}(z))$
ALT terr1	39	2574,12	1,30348787	0,073251	1,374954	0,071466127	0,975633	0,2479
ALT drohne1	40	2629,86	1,32704872	0,0583524	1,391531	0,064482277	1,105049	0,2166
ALT beide1	52	2836,74	1,32715469	0,05818015	1,36999	0,042835311	0,736253	0,3042
ALT overlap1	27	2319,15	1,31502327	0,09657756	1,262868	0,052155267	0,540035	0,3448
DIN terr1	56	3065,62	1,42383397	0,04677653	1,369246	0,054587974	1,166995	0,2019
DIN drohne1	38	3131,45	1,36486067	0,06920191	1,309149	0,055711668	0,805060	0,2885
DIN beide1	61	3144,78	1,44523375	0,04265739	1,418573	0,02666075	0,624997	0,3282
DIN overlap1	33	2928,27	1,35257734	0,07976313	1,342298	0,010279338	0,128873	0,3956

Durch die große Anzahl an Durchläufen kann von einer Normalverteilung der zufällig ermittelten Werte für R ausgegangen werden, die die Grundgesamtheit der möglichen Subkollektive ausreichend repräsentiert.

In allen Fällen muss die Nullhypothese angenommen werden. Auf einem Signifikanzniveau von 95% unterscheidet sich keines der Subkollektive mit Mistelbefall hinsichtlich seiner horizontalen Bestandesstruktur (Klumpung) signifikant von jedem beliebigen zufälligen Subkollektiv gleicher Größe. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass der Mistelbefall in den untersuchten Beständen keinen Einfluss auf die Klumpung oder Gleichverteilung der entsprechenden Baumkollektive hat, dass Mistelbäume also nicht in besonderer Weise geklumpt im Bestand vorkommen. Bei den Unterschieden zwischen Gesamtbestand und Subkollektiven handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit somit nur um zufällige Effekte (zur räumlichen Darstellung siehe auch Abbildung 30).

Auch bei visueller Auswertung fallen direkt keine besonderen Unterschiede im räumlichen Muster zwischen den verschiedenen Subkollektiven und dem Gesamtbestand auf. Die nach verschiedenen Aufnahmemethoden gebildeten Subkollektive sind zwar unterschiedlich, keines zeigt jedoch eine auffällige Tendenz zu einer horizontal geklumpten Struktur.

4.2.4. Zuwachs und soziale Stellung

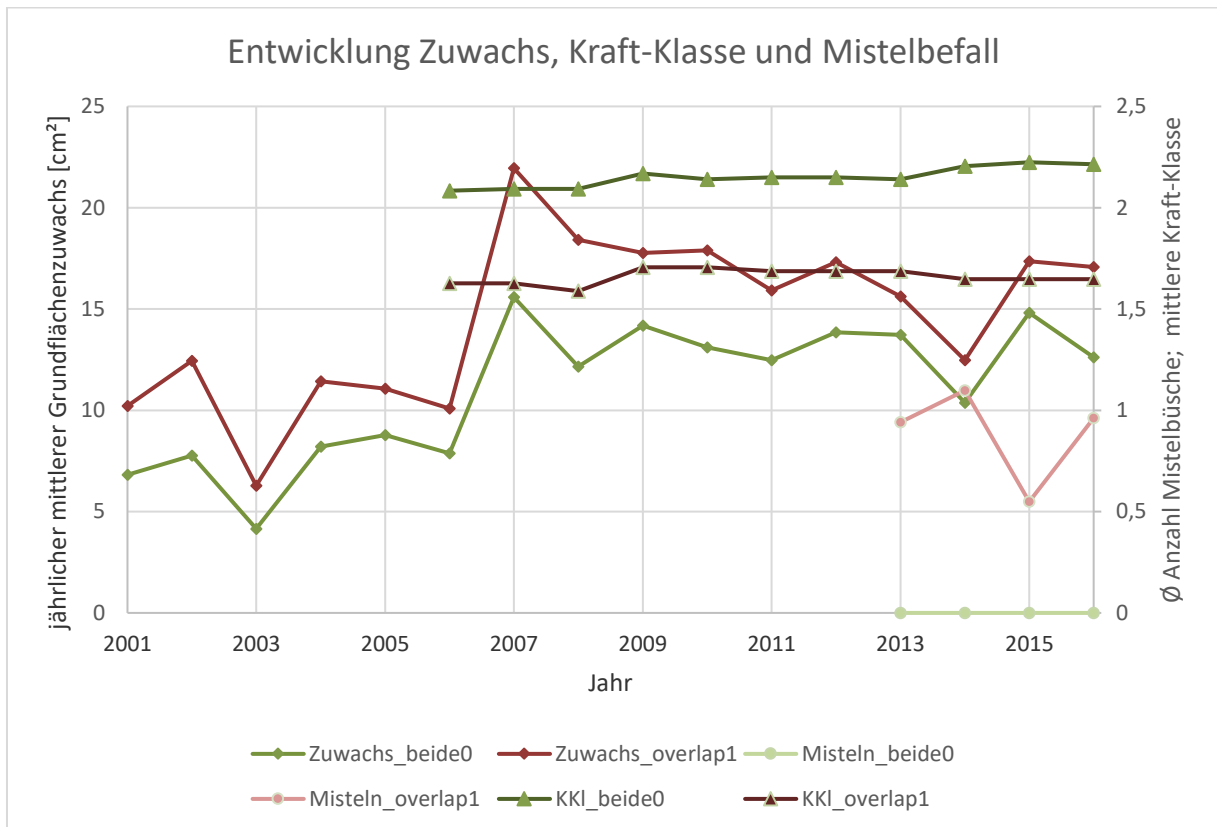


Abbildung 35 - Entwicklung der Mittelwerte von jährlichem mittlerem Grundflächenzuwachs, mittlerer Kraft-Klasse und Anzahl der terrestrisch erfassten Mistelbüsche über die Zeit zwischen den Extremkollektiven „beide0“ und „overlap1“ (Erläuterung der Abkürzungen siehe Tabelle 11)

Die Zuwachskurven der beiden Extremkollektive „weder terrestrisch noch per Drohne Misteln festgestellt“ (beide0) und „Misteln terrestrisch und per Drohne festgestellt“ (overlap1) verlaufen relativ parallel, wobei die Kurve der Mistelbäume stets oberhalb derjenigen der Bäume ohne Misteln verläuft (Abbildung 35).

Die durchschnittliche Anzahl der Mistelbüsche (aufgenommen ab 2013) variiert über den kurzen Aufnahmezeitraum stark.

Die Mistelbäume weisen stets eine höhere soziale Stellung (geringere Zahlenwerte der Kraft-Klasse) auf als die unbefallenen Bäume, die Entwicklung über die Zeit ist nahezu konstant.

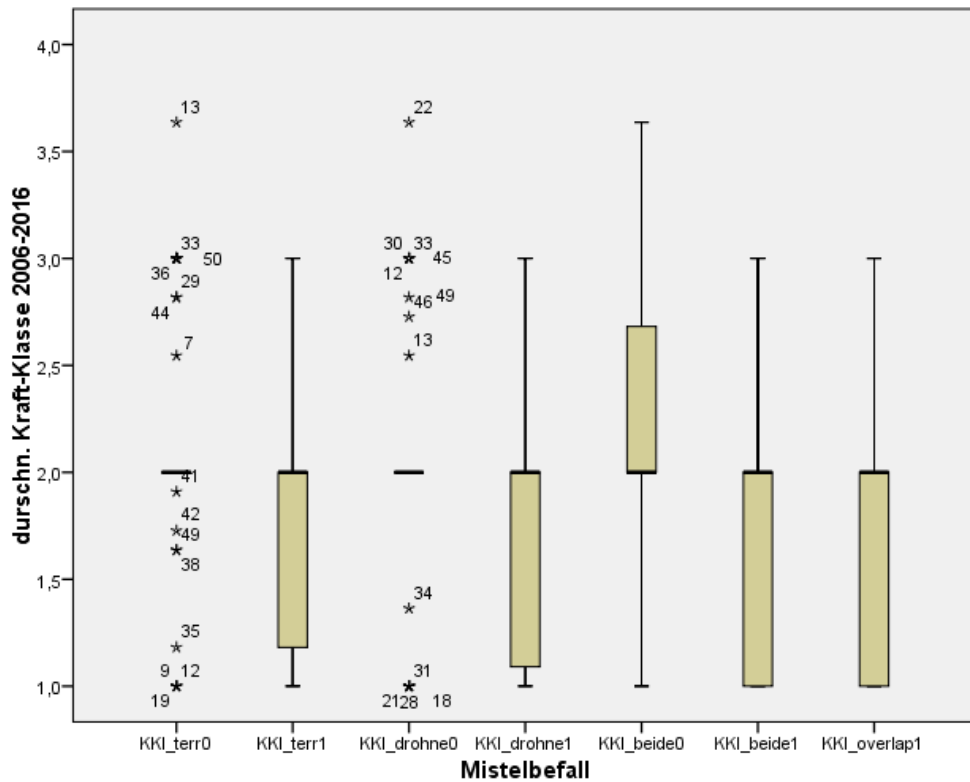


Abbildung 36 - Boxplots zur Darstellung der mittleren Kraft-Klasse (KKI) (Kraft 1884) über die Baumkollektive (Erklärung siehe Tabelle 11) nach Mistelbefall

Der Vergleich der durchschnittlichen Kraft-Klasse zwischen den Baumkollektiven zeigt, dass Bäume mit Mistelbefall sozial besser gestellt sind, d.h. kleinere Zahlenwerte der Kraft-Klasse aufweisen.

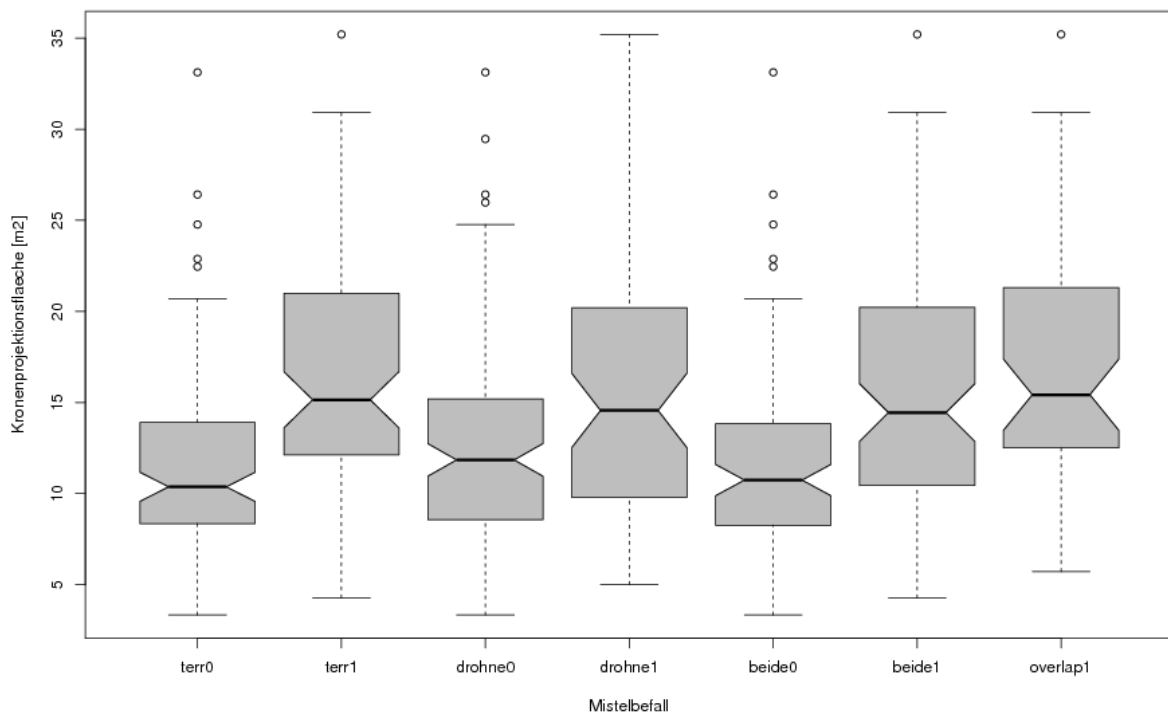


Abbildung 37 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Kronenprojektionsfläche zwischen den Baumkollektiven (Erklärung siehe Tabelle 11) nach Mistelbefall

Mistelbefallene Bäume haben eine deutlich größere Kronenprojektionsfläche, bzw. Bäume mit einer höheren Kronenprojektionsfläche sind eher von Misteln befallen.

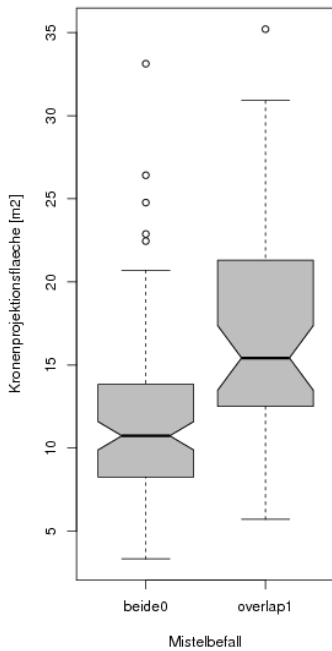


Abbildung 38 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Kronenprojektionsfläche zwischen den Baumkollektiven (Erklärung siehe Tabelle 11) nach Mistelbefall für die zwei Extremgruppen

Bei Gegenüberstellung der beiden Extremgruppen fällt der Unterschied besonders deutlich ins Auge (Abbildung 38). Die Kronenprojektionsflächen der Bäume, auf denen mit beiden Verfahren Misteln festgestellt wurden, sind wesentlich größer als diejenigen der Bäume ohne Hinweise auf Mistelbefall. Betrachtet man beide Faktoren gemeinsam, so muss davon ausgegangen werden, dass zwischen Zuwachs und Kraft-Klasse sowie Kronenprojektionsfläche eine Korrelation besteht.

Tabelle 14 - Nichtparametrischer Spearman-Korrelationstest der Faktoren „Grundflächenzuwachs über die gesamte Periode 2001 bis 2016“ (G_Zuwachs), „Kraft-Klasse“ (KKI) und „Kronenprojektionsfläche“ (KPF)

		KPF	KKI	G_Zuwachs
KPF	Korrelationskoeffizient	1,000	-,671*	,720*
	Sig. (2-seitig)	.	,000	,000
	N	202	202	202
KKI	Korrelationskoeffizient	-,671*	1,000	-,55**
	Sig. (2-seitig)	,000	.	,000
	N	202	202	202
G_Zuwachs	Korrelationskoeffizient	,720*	-,556*	1,000
	Sig. (2-seitig)	,000	,000	.
	N	202	202	202

*: Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Die Korrelationsanalyse ergibt einen Spearman-Korrelationskoeffizienten von $-0,556$ zwischen Grundflächenzuwachs und Kraft-Klasse, also einen deutlich negativ korrelierten Zusammenhang (je kleiner die Kraft-Klasse, desto bessere soziale Stellung). Zwischen Grundflächenzuwachs und Kronenprojektionsfläche besteht ein relativ starker positiver Zusammenhang (Spearman-Korrelationskoeffizient $0,72$) (Tabelle 14). Somit kann der erhöhte Zuwachs nicht ausreichend durch den Mistelbefall erklärt werden, sondern es muss vielmehr davon ausgegangen werden, dass sozial besser gestellte Bäume mit größeren Kronen eher von Misteln befallen werden (siehe 5.2.4. Zuwachs und soziale Stellung) und die höheren Zuwächse aus der besseren sozialen Stellung und größeren potentiellen Photosynthesefläche resultieren.

Somit lässt sich also bei der Betrachtung aller Bäume zusammen aufgrund dieser Störvariable kein Kausalzusammenhang zwischen Mistelbefall und Zuwachs ableiten.

Deshalb wurden die Daten zur Zuwachsentwicklung zusätzlich getrennt jeweils nur für die Bäume der Kraft-Klasse 1 sowie nur für die Bäume der Kraft-Klasse 2 ausgewertet.

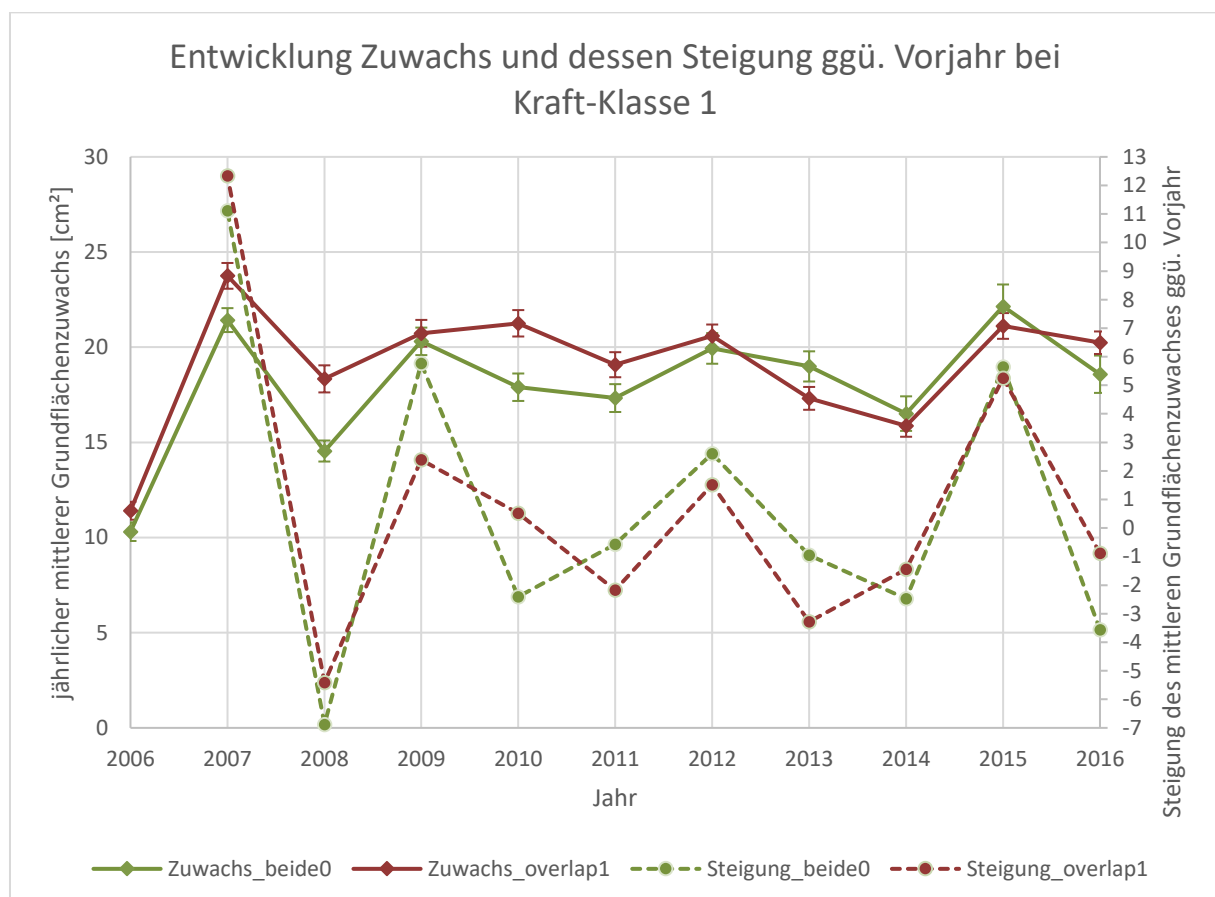


Abbildung 39 - Verlauf des jährlichen mittleren Grundflächenzuwachses der bzgl. Mistelbefall unterschiedlichen Baumkollektive „beide0“ sowie „overlap1“ (Erklärung siehe Tabelle 11) sowie der Steigung der Geraden durch den mittleren Grundflächenzuwachs des aktuellen und des vorherigen Jahres (erste Ableitung) je Kollektiv (Erklärung siehe Tabelle 11) für Bäume der Kraft-Klasse 1. Die Fehlerindikatoren stellen den einfachen Standardfehler des Jahresmittelwertes dar.

Werden nur die vorherrschenden Bäume der Kraft-Klasse 1 betrachtet (Abbildung 39), sind die Zuwachsunterschiede zwischen Bäumen mit und ohne Mistelbefall wesentlich geringer als bei der Auswertung über alle Kraft-Klassen gleichzeitig.

In den Jahren bis 2012 lag der Zuwachs des Baumkollektivs overlap1 regelmäßig leicht über demjenigen des Kollektivs beide0. Von 2013 bis 2015 war der Zuwachs der Mistelbäume dann geringer als derjenige der unbefallenen Bäume, nur im Jahr 2013 jedoch ohne Überschneidung der Standardfehler. 2016 war der Zuwachs der mistelbefallenen Bäume dann wieder etwas höher als derjenige der unbefallenen, der Unterschied war jedoch wesentlich geringer als in den früheren Jahren.

Um die Stärke der Zuwachsreaktion quantifizieren zu können, wurde die Steigung des Grundflächenzuwachses gegenüber dem Vorjahr berechnet. Daraus ist jedoch kein klares Muster erkennbar: Teilweise reagieren Bäume mit Mistelbefall sowohl bei Steigerung als auch bei Verringerung des Zuwachses stärker, teilweise schwächer als unbefallene Bäume.

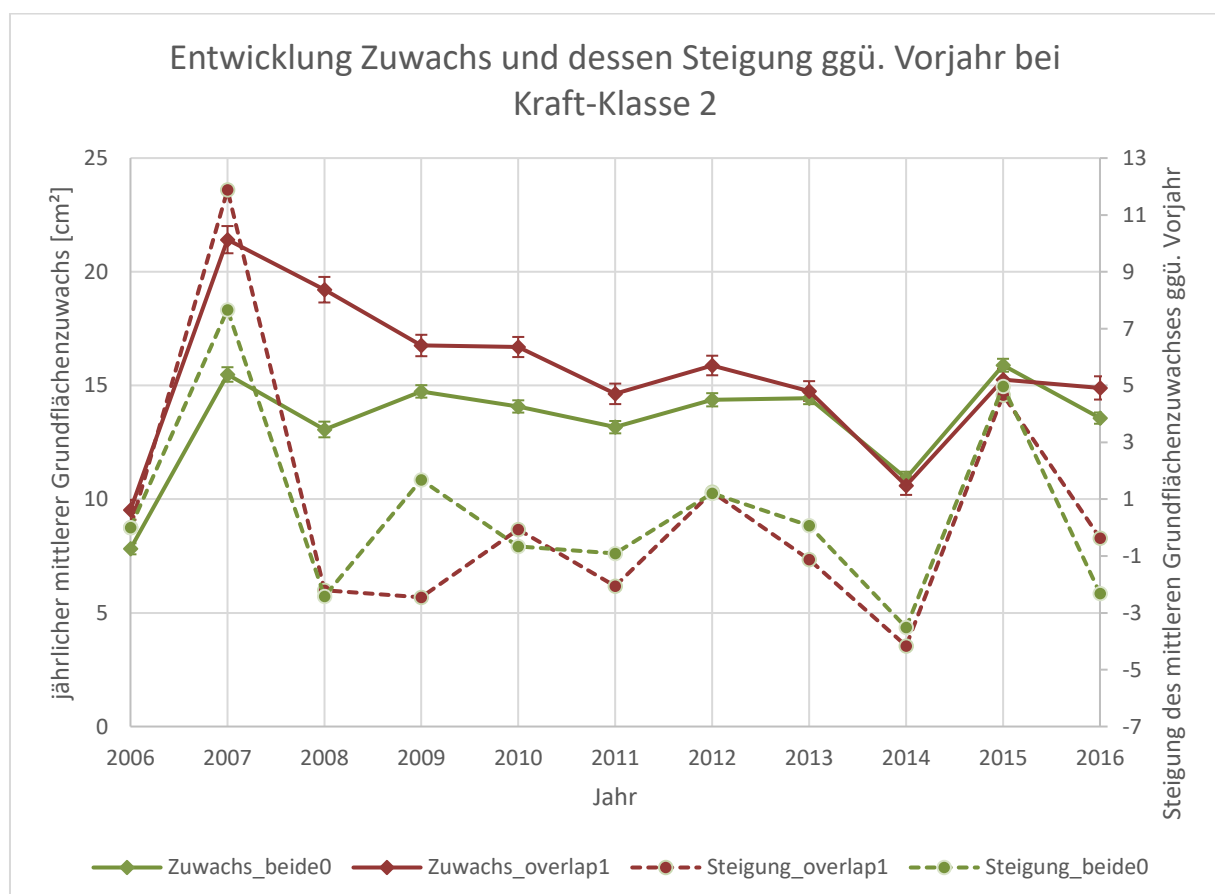
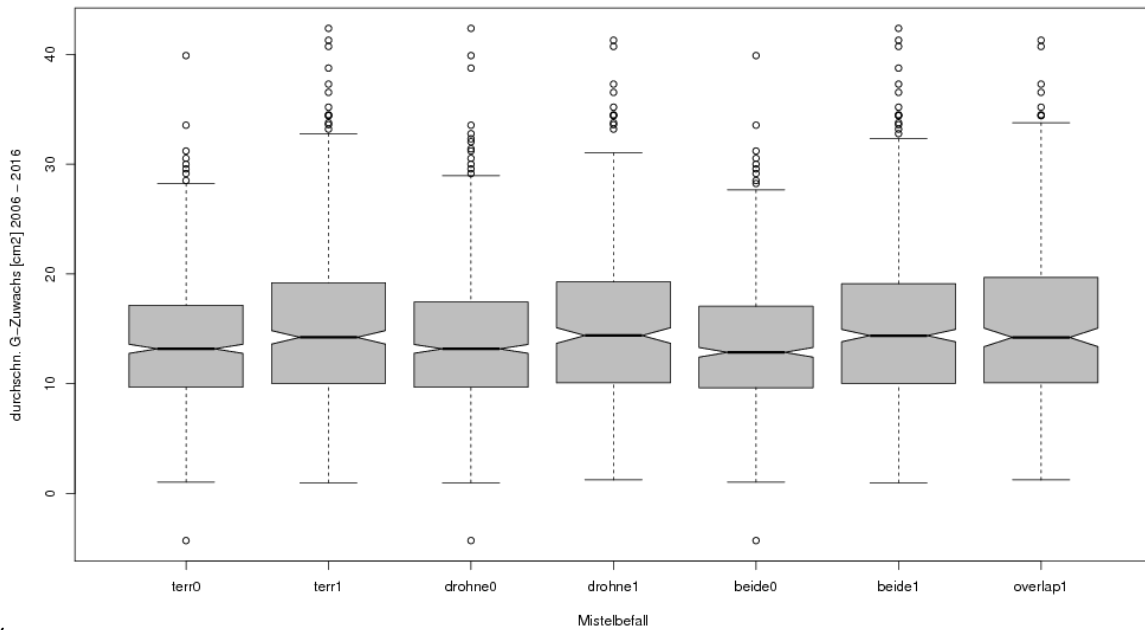


Abbildung 40 - Verlauf des jährlichen mittleren Grundflächenzuwachses der bzgl. Mistelbefall unterschiedlichen Baumkollektive „beide0“ sowie „overlap1“ (Erklärung siehe Tabelle 11) sowie der Steigung der Geraden durch den mittleren Grundflächenzuwachs des vorherigen Jahres (erste Ableitung) je Kollektiv (Erklärung siehe Tabelle 11) für Bäume der Kraft-Klasse 2. Die Fehlerindikatoren stellen den einfachen Standardfehler des Jahresmittelwertes dar.

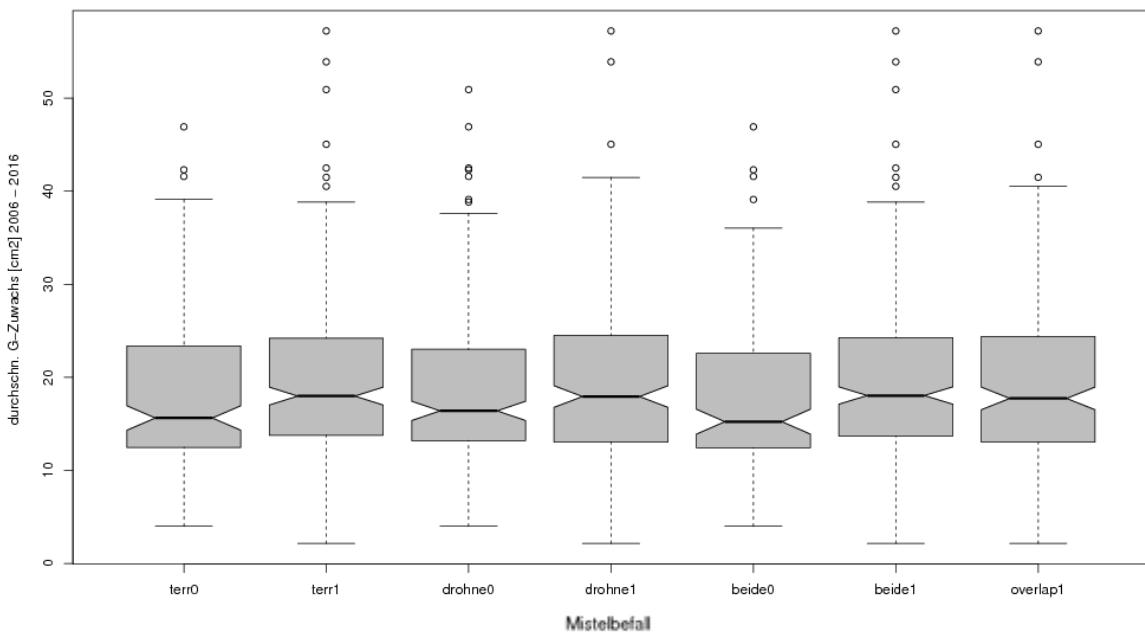
Auch für die Bäume der Kraft-Klasse 2 (Abbildung 40) zeigt sich vor 2013 bei den mistelbefallenen Bäumen ein höherer Zuwachs als bei den unbefallenen. Dieser Abstand verringert sich über die Jahre zunehmend. Ab 2013 liegen beide Kurven sehr eng beieinander – relativ gesehen hat also auch hier der Zuwachs der Mistelbäume gegenüber den unbefallenen Bäumen abgenommen.

Die deskriptive Statistik der Grundflächenzuwachswerte der Kollektive im Vergleich wurde in nach Baumkollektiven gruppierten eingeschnürten Boxplots für die Kraft-Klassen 1 und 2 separat dargestellt



(
Abbildung 41).

Kraft-Klasse 1



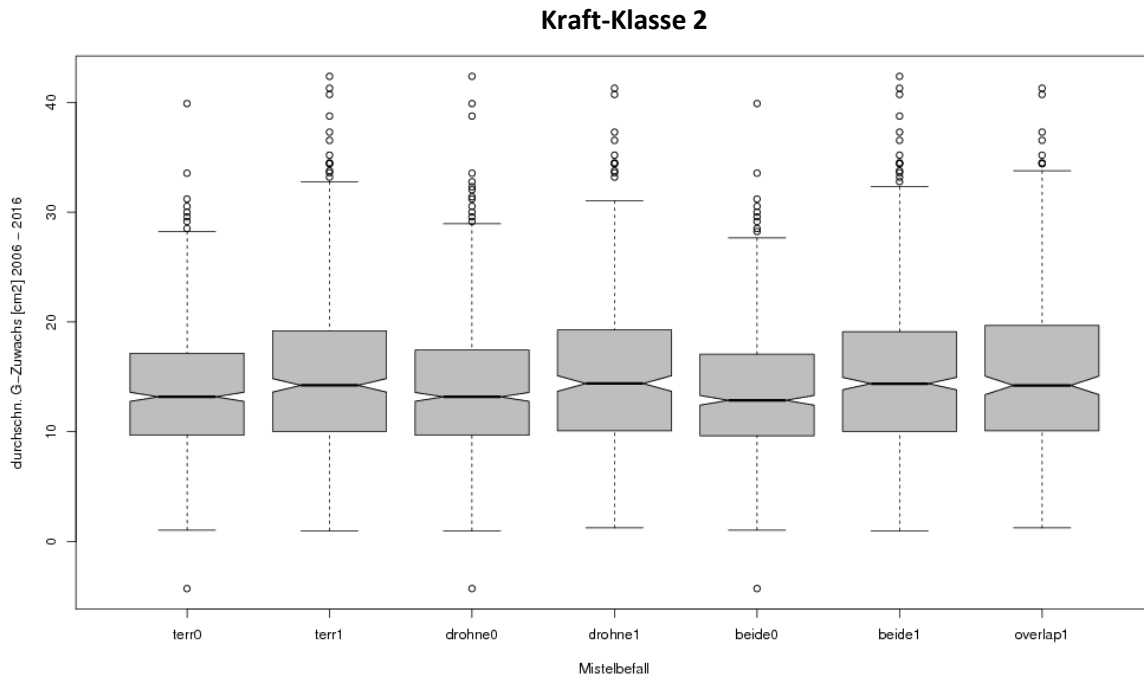


Abbildung 41 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung des mittleren jährlichen Grundflächenzuwachses in cm^2 in der Periode von 2001 bis 2016, gruppiert nach bzgl. Mistelbefall verschiedenen Baumkollektiven (Erklärung siehe Tabelle 11), getrennt für die Kraft-Klassen 1 (oben) und 2 (unten)

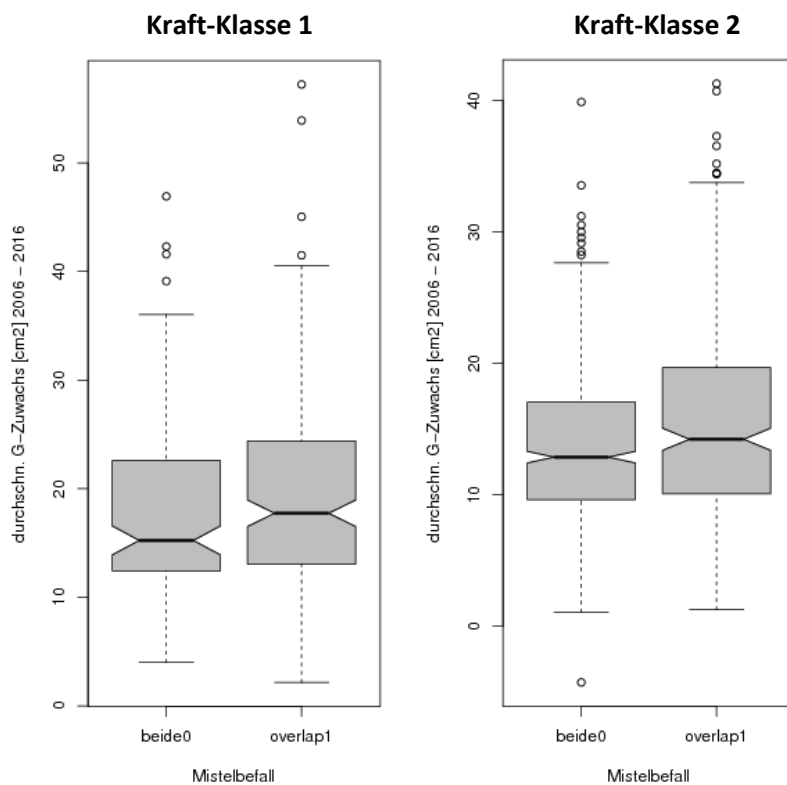


Abbildung 42 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung des mittleren jährlichen Grundflächenzuwachses in cm^2 in der Periode von 2001 bis 2016, gruppiert nach bzgl. Mistelbefall verschiedenen Baumkollektiven für die beiden Extremkollektive (Erklärung siehe Tabelle 11), getrennt für die Kraft-Klassen 1 und 2

Es ist trotz separater Darstellung nach Kraft-Klassen durchgehend ein deutlicher (und da sich die Einschnürungen teilweise nicht überschneiden zwischen einigen Kollektiven signifikanter) Unterschied

zwischen den Medianen der durchschnittlichen Zuwächse zu beobachten. Die Baumkollektive mit Mistelbefall weisen in den untersuchten Beständen durchweg höhere, teilweise signifikant höhere mittlere Zuwächse auf als diejenigen ohne Mistelbefall (

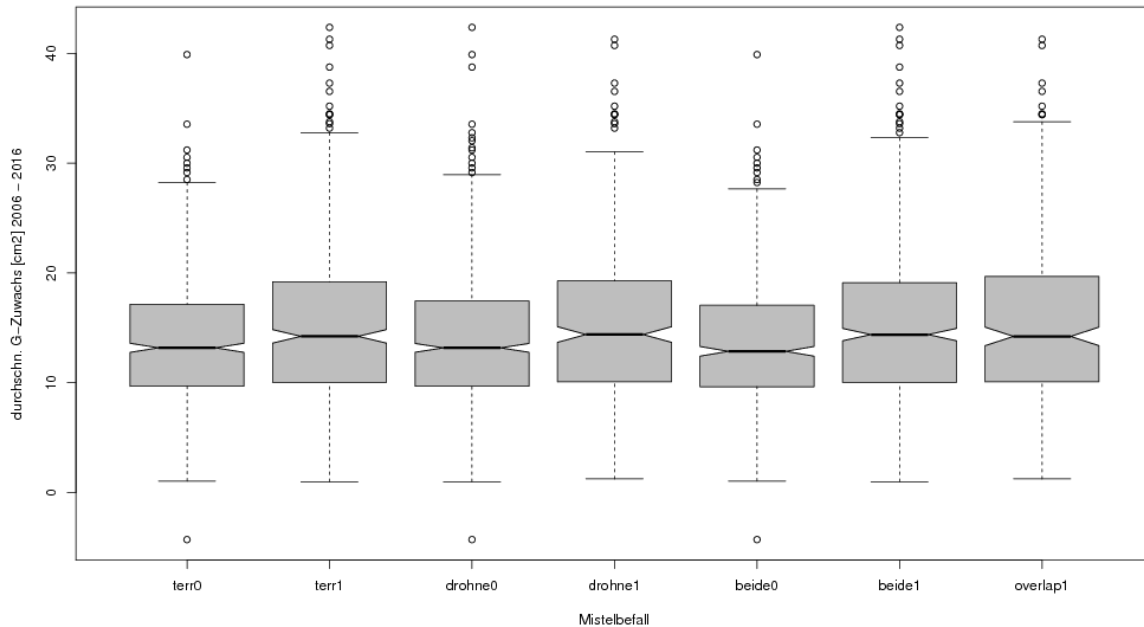


Abbildung 41). Dies gilt für die Kraft-Klassen 1 und 2. Bei Gegenüberstellung der beiden Extremgruppen beide0 und overlap1 zeigt sich der Unterschied besonders deutlich (Abbildung 42).

Es muss davon ausgegangen werden, dass auch bei nach Kraft-Klassen getrennter Auswertung die Mistelbäume innerhalb einer Kraft-Klasse tendenziell größer sind und diese Störvariable durch die getrennte Auswertung nicht komplett eliminiert werden konnte, da die Kraft-Klasse auf gutachterlicher Einschätzung basiert und mit einer Differenzierung in nur 5 Gruppen eine relativ große Baumgrößenspreitung auch innerhalb der Gruppen möglich ist. Außerdem wird durch den Gesamtmittelwert für 2006 bis 2016 die in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellte Veränderung des Zuwachses der Kollektive über die Jahre nicht mit dargestellt.

Zusammenfassend kann also ein deutlicher Unterschied in der Größe und der sozialen Stellung zwischen Bäumen mit und ohne Mistelbefall festgestellt werden. Bei einzelner Betrachtung der Kraft-Klassen 1 und 2 ist über die Jahre jeweils ein geringer Zuwachsabfall der mistelbefallenen gegenüber den unbefallenen Bäumen zu beobachten. Während Mistelbäume vor 2013 höhere Zuwächse zeigten, so wird dieser Abstand zunehmend geringer, ab 2013 sind die Zuwächse gleich oder kleiner als diejenigen der unbefallenen Bäume.

5. Diskussion

5.1. Level 1 (Waldzustandserhebung)

5.1.1. Befallsentwicklung

Das relativ grobe Raster, vor allem bei ausschließlicher Betrachtung konstant aufgenommener Trakte, lässt nur sehr eingeschränkt detaillierte Aussagen über die räumliche Verteilung und Entwicklung des Mistelbefalls in Bayern zu. Die häufige Veränderung des Aufnahmerasters erschwert die Analyse von Entwicklungen, da nur für relativ wenige Trakte konstant Informationen vorliegen. Betrachtet man hingegen die verdichteten Raster in den Jahren 2011 oder 2017, so lassen sich schon wesentlich besser räumliche Muster ablesen.

Für die Zukunft ist geplant, die im Jahr 2017 vorgenommene Verdichtung auf 8x8 Kilometer in den Wuchsgebieten 4, 5 und 6 (Mittelfranken) sowie 15 (Alpen) und an allen Trakten mit Tannen und Eichen des 8x8 km-Rasters beizubehalten. In Bezug auf die Analyse der Entwicklung des Mistelbefalls ist diese Entwicklung sehr positiv. In Zukunft können somit voraussichtlich räumlich wesentlich feiner aufgelöste Analysen zum Mistelbefall durchgeführt werden als dies mit den aktuell vorliegenden Daten möglich ist.

Die Verbreitung der Mistel ist ausschließlich auf Vögel als Vektoren angewiesen (Tubeuf 1923). Dabei handelt es sich um hoch spezialisierte Beziehungen zwischen der Mistel und bestimmten Vogelarten (Kołodziejek und Kołodziejek 2013). Durch eine lange Koevolution entstand eine mutualistische Beziehung zwischen diesen Vogelarten, für die die Mistelbeeren eine attraktive und wertvolle Nahrungsquelle darstellen, und der Mistel, die durch die unbeschadete Passage der Samen durch den Verdauungstrakt der Vögel, durch Anhaftungen am Gefieder oder durch gezielte Deposition der Samen beim Fraß der Beere verbreitet wird (Mathiasen et al. 2008; Levey et al. 2002; Tubeuf 1923). So kommt es zu einer gerichteten Verbreitung der Mistel gezielt auf gut geeignete Wuchsorte, da die verbreitenden Vögel im Laufe der Koevolution Standorte und Bäume mit guten Wuchsbedingungen als bevorzugte Habitate angenommen haben, weil dort wiederum ein besseres Nahrungsangebot an Mistelbeeren für sie herrscht (Aukema und Martínez del Rio 2002; Kołodziejek und Kołodziejek 2013). Die bayernweit unterschiedlich verteilten Mistelvorkommen können somit zum einen natürlich durch das Vorkommen geeigneter Wirtsbaumarten, zu einem großen Teil jedoch auch durch das Verhalten der mistelverbreitenden Vögel erklärt werden.

Die starke Veränderung des Mistelbefalls in den letzten Jahren kann zum einen direkt auf klimatische Parameter zurückgeführt werden. So führt das vermehrte Vorkommen von warmen und trockenen Sommern zu einer verringerten Vitalität und Verteidigungskraft von potentiellen Wirtsbäumen als Folge von Trockenstress, was einen Mistelbefall begünstigt (Grundmann et al. 2010; Hartmann 1990). Die milderen Winter der letzten Jahre verschaffen der immergrünen Mistel v.a. gegenüber

Laubbäumen einen Konkurrenzvorteil, da sie bei den guten Bedingungen weiter Photosynthese betreiben kann, während diese kahl sind (Grundmann et al. 2010). Die Nadelholzmistel hat diesen Vorteil nicht, da ihre Wirtsbäume ebenfalls immergrün sind.

Neben direkten klimatischen Einflüssen auf die Wirtsbäume muss eine weitere Erklärung für den sich ausbreitenden Mistelbefall jedoch auch in veränderten Lebensgewohnheiten von mistelverbreitenden Vögeln gesucht werden (Grundmann et al. 2010).

Entscheidend für die Mistelverbreitung ist deren Rückkehrzeitpunkt und die teilweise komplette Überwinterung vor Ort – bei entsprechenden Witterungsbedingungen, wie sie durch die milden Winter der letzten Jahre gegeben sind, überwintern Misteldrossel und Mönchsgrasmücke in großer Zahl in Mitteleuropa (Grundmann et al. 2010; Ramm 2005). Tubeuf (1923) beobachtete, dass der Rückkehrzeitpunkt der Misteldrosseln witterungsabhängig ist und die schon ab Dezember reifen Mistelbeeren erst nach dem Eintreffen der Misteldrosseln in großer Zahl gefressen werden. Durch die zunehmende Anzahl nicht mehr nach Süden ziehender Misteldrosseln infolge warmer Winter kommt es heute jedoch den gesamten Winter über zum Fraß der Mistelbeeren und in der Folge zur Verbreitung der Mistel durch die Misteldrossel (Ramm 2005). Ähnliche Beobachtungen gelten für die Mönchsgrasmücke: Waren früher regelmäßig erst ab Mitte März rückkehrende Vögel zu beobachten (Ramm 2005; Tubeuf 1923), bleiben in letzter Zeit immer mehr Mönchsgrasmücken den gesamten Winter über in Mitteleuropa und bedienen sich der Mistelbeeren als zuverlässige Nahrungsquelle (Ramm 2005).

Neben den in Mitteleuropa wichtigsten Mistelvektoren, der Misteldrossel und der Mönchsgrasmücke, trägt auch der Seidenschwanz maßgeblich zur Verbreitung der Mistel bei (Tubeuf 1923). In geringer Anzahl sind jedes Jahr Seidenschwänze in den meisten Teilen Bayerns anzutreffen (Tubeuf 1923). Gelegentlich kommt es jedoch zu Massenwanderungen von vielen Tausend Seidenschwänzen über Deutschland (Ramm 2005).

Nur in besonders harten Wintern, im Schnitt alle 6 bis 12 Jahre, kommt es so zu einer zusätzlichen starken Mistelverbreitung durch diese Vogelart (Tubeuf 1923). Auslöser für die Massenwanderungen ist vermutlich das Futterangebot in den weiter nördlich gelegenen Überwinterungsgebieten. Wird dieses zu gering, stellt die Mistel in Mitteleuropa eine wichtige Ausweichnahrungsquelle dar, die von Jahr zu Jahr ähnliche Mengen an Beeren trägt. Die Seidenschwanzinvasionen werden teilweise mit Ausbreitungswellen der Mistel in Verbindung gebracht (Grundmann et al. 2010; Ramm 2005).

Bei Untersuchungen zur Veränderungen in der Verbreitung der Mistel müssen also neben den standörtlichen Bedingungen, die auf die Wirtsbäume wirken, immer auch die Einflüsse veränderter Lebens- und Verhaltensweisen der Vögel als Mistelvektoren betrachtet werden.

Die Datengrundlage hierzu ist jedoch im Vergleich zu den Baumdaten wesentlich schlechter. Während durch seit Jahren durchgeführte Langzeitmonitoringprogramme wie ICP Forests und die Bundeswaldinventur sehr genaue und fein aufgelöste Daten über die Situation der Waldbäume und ihrer Standorte vorliegen, sind quantitative Aussagen über Populationen von Misteldrossel, Mönchsgrasmücke, Seidenschwanz und weiteren ökologisch für die Mistelverbreitung bedeutsamen Arten (siehe 2.3.5. Andere Arten) bisher kaum verfügbar. Vereinzelt finden sich kleinräumige quantitative Aussagen über das Zugverhalten der Arten für bestimmte Regionen, für die vorliegende Untersuchung konnte jedoch trotz intensiver Recherche keine für eine quantitative Betrachtung räumlich und zeitlich ausreichend aufgelöste Datengrundlage zu Vogelabundanzan gefunden werden.

In Zukunft könnten hierfür „Citizen Science“-Ansätze wie das Portal „www.ornitho.de“ des Dachverbands Deutscher Avifaunisten (DDA) vielversprechende Daten liefern. Dieses Portal ermöglicht Amateuren und Hobbyornithologen genauso wie Profis die Meldung von Vogelbeobachtungen einschließlich Angaben zu Vogelart, Ort, Zeit und Anzahl der beobachteten Vögel. Anhand der gesammelten Informationen aus vielen Einzelmeldungen werden so aktuelle Verbreitungskarten und Informationen zum Zugverhalten aggregiert. Bisher sind verlässliche Daten jedoch hauptsächlich für Vogelarten von „besonderem Interesse“ aufgrund Ihrer Auffälligkeit, Seltenheit o.ä. verfügbar. Beobachtungen von Misteldrossel und Mönchsgrasmücke sind bisher noch sehr selten, Verbreitungskarten werden für diese Arten bisher nicht bereitgestellt.

5.1.2. Bestandesstruktur

Der GAS-Index wurde mit dem Ziel verwendet, die Bestandesstruktur anhand einer handlichen, einfach auszuwertenden und kontinuierlich skalierten Größe zu quantifizieren. Anstatt die ordinalskalierten Parameter der Waldzustandserhebung und Bundeswaldinventur zur Bestandesstruktur zu verwenden, welche auf gutachterlicher Ansprache basieren, kann mit dem GAS-Index stichhaltig und reproduzierbar eine Aussage über die strukturelle Diversität von Waldbeständen an Inventurpunkten getroffen werden. An seine Grenzen kommt der Index lediglich an Inventurpunkten mit sehr lockeren Beständen. An Trakt 192, Ecke 1 stehen im Inventurkreis beispielsweise eine Mehlbeere mit 10 cm BHD und eine Fichte mit 41,4 cm BHD, ansonsten kein weiterer Baum. Dort ergibt sich ein GAS-Index von 75,77, was den extremsten Ausreißer aller Traktecken darstellt. Für sehr lockere Bestände eignet sich der Index also nur sehr eingeschränkt, bei der Verwendung über das gesamte Inventurnetz und statistischer Auswertung vermag er jedoch gute Aussagen zu treffen.

Dass kein Zusammenhang mit dem Mistelbefall festgestellt werden konnte, könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Bestandeshöhe und die soziale Differenzierung nur sehr indirekt als allometrische Zusammenhänge mit der Grundfläche in den Index einfließen. Wie jedoch in dieser

Studie (siehe 4.2.4. Zuwachs und soziale Stellung) und einigen vorausgehenden Untersuchungen gezeigt werden konnte, ist gerade die soziale Stellung und die Höhe eines Baumes im Bestand entscheidend für den Mistelbefall (Sangüesa-Barreda et al. 2012; Durand-Gillmann et al. 2014; Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Aukema und Martínez del Rio 2002; Donohue 1995). Um bessere Zusammenhänge mit dem Mistelbefall zu erreichen müsste der Index also ggf. um Betrachtungen zu Baumhöhe und Kraft-Klasse erweitert werden – die Baumhöhe wird auf dem Level 1-Netz jedoch nicht jährlich gemessen. Es könnte lediglich auf Daten der Bundeswaldinventur zurückgegriffen werden, welche jedoch zuletzt für 2012 verfügbar und somit nicht mehr so aktuell sind wie die Daten der Waldzustandserhebung. Alternativ könnten auch Höhendaten aus Airborne Laser Scanning-Projekten wie z.B. LiDAR zum Einsatz kommen.

Die Tatsache, dass bei einem beobachteten Mistelbefall häufig gleich alle und nicht nur einzelne Traktecken befallen sind, erscheint insofern logisch, dass nach einem Erstbefall die Mistelverbreitung durch Vögel hauptsächlich auf demselben Baum und in der nächsten Umgebung von befallenen Bäumen stattfindet (Overton 1996; Aukema und Martínez del Rio 2002). Auch vorausgehende Studien konnten in der vertikalen Verteilung von Mistelbäumen geklumpfte Strukturen feststellen (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Aukema und Martínez del Rio 2002; Donohue 1995). Als Begründung erscheint einleuchtend, dass Bestände und Bäume, an denen bereits ein Mistelbefall vorliegt, als Habitat für mistelverbreitende Vögel attraktiver sind und diese sich mit größerer Wahrscheinlichkeit dort aufhalten, je mehr Nahrungsangebot durch Mistelbeeren vorhanden ist (Mellado et al. 2017; Aukema und Martínez del Rio 2002). In der vorliegenden Studie hingegen konnte auf den untersuchten Level 2-Flächen auf Einzelbaumebene kein besonders geklumpftes Muster in der Mistelverteilung nachgewiesen werden (siehe 4.2.3. Horizontale Verteilung). Hier ist jedoch nicht sicher, inwieweit eine Verallgemeinerung möglich ist, da es sich um nicht repräsentative Fallstudien in gleichförmigen Reinbeständen mitten in größeren Waldgebieten handelt, was auf die Vogelabundanz neben dem Mistelbefall selbst höchstwahrscheinlich einen weiteren Einflussfaktor darstellt (Grundmann et al. 2010; Tubeuf 1923). Möglicherweise stellen die Versuchsbestände der Level 2-Flächen auch einen zu kleinen Ausschnitt dar und eine Klumpung liegt auf einer größeren Flächenskalierung vor.

Viele Kiefernbestände in Bayern sind gleichaltrige, einschichtige Reinbestände, in denen innerhalb von 150 m (Entfernung zwischen zwei Traktecken) häufig keine größeren Strukturänderungen zu erwarten sind. Eine Ausbreitung der Mistel über mehrere Ecken eines Traktes wäre dort also besonders begünstigt (vgl. Grundmann et al. 2010). Die Klumpung ist somit in dieser Studie zwar nicht zwischen Einzelbäumen der Versuchs-Teilbestände, durchaus jedoch auf Ebene größerer Bestände nachzuweisen. Besonders wahrscheinlich ist ein erhöhtes Mistelaufreten gegenüber der

unmittelbaren Umgebung, wenn es sich um gleichaltrige Reinbestände mit einem hohen Anteil an potentiellen Wirtsbäumen handelt.

5.1.3. Waldrand

Zunächst muss betont werden, dass die Datengrundlage für die Auswertungen zum Waldrand vergleichsweise gering ist. Trotz Auswertung von sehr vielen Traktecken in ganz Bayern sind insgesamt nur sehr wenige Bäume an Traktecken mit Waldrändern in weniger als 25 m Entfernung von Misteln befallen. Bei der Interpretation der Auswertungen muss also bedacht werden, dass mitunter eine hohe statistische Unsicherheit besteht.

Bei Betrachtung der Merkmale „Mistel ja/nein“ und „Waldrandlage ja/nein“ ergibt sich eine unabhängige Verteilung der Merkmale. Ein Mistelbefall ist in Waldrandnähe nach dieser Studie also nicht wahrscheinlicher als in größerer Entfernung von Waldrändern.

Einzelbäume und lichtdurchflutete Randbäume zeigten in vorausgegangenen Studien häufiger einen Mistelbefall als andere (Mellado et al. 2017; Durand-Gillmann et al. 2014; Grundmann et al. 2010). Eine stärkere Lichtversorgung, wie sie bei Randbäumen auftritt, führt zu besseren Bedingungen für das Mistelwachstum (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997). Der Anwuchserfolg der Mistel ist bei guter Lichtversorgung bis zu viermal höher als in abgedunkelten, vollbenadelten Kronen mitten im Bestand (Kołodziejek und Kołodziejek 2013).

Rast- und Schlafplätze von Vögeln zeigen häufig sehr hohe Misteldichten (Grundmann et al. 2010). Dass mistelverbreitende Vögel Plätze mit freier Sicht und gegenüber der übrigen Landschaft erhöhtem Sitz als besonders sicher betrachten und diese bevorzugt als Ruheplatz zum Verdauen auswählen (und dort somit viele Mistelsamen ausscheiden) (Ramm 2005) spricht zusätzlich für eine erhöhte Mistelverbreitung an Waldrändern, da Waldrandbäume diese Kriterien in besonderem Maße erfüllen (Kołodziejek und Kołodziejek 2013). Davon ausgehend sollte an Waldrändern eigentlich ein erhöhtes Risiko eines Mistelbefalls zu erwarten sein.

Durch das Design der Stichprobe als regelmäßiges Raster über ganz Bayern konnten insgesamt nur wenige Ecken mit Waldrändern, insbesondere Waldaußenrändern, erfasst werden. Um detaillierte Aussagen über den Zusammenhang zwischen Mistelbefall und Waldrandlage treffen zu können wäre eine Untersuchung in einem Testgebiet in größeren zusammenhängenden Aufnahmen wahrscheinlich aussagekräftiger als die Betrachtung einzelner kleiner Ausschnitte bei zufällig mitten in Waldgebieten oder eben an deren Rand gelegenen Inventurpunkten.

Wieso gerade Bäume in 5 bis 10 m Entfernung von Waldaußenrändern und Bestandesgrenzen mit starkem Höhenunterschied besonders oft von Misteln befallen sind lässt sich mit Erkenntnissen aus vorausgegangenen Studien nicht erklären. Möglicherweise handelt es sich in diesem Abstand teilweise um die erste Baumreihe mit voller Höhe, während die vorgelagerte niedrigere Vegetation die

mistelverbreitenden Vögel nicht so stark anzieht. Zudem müssen Messungenauigkeiten einbezogen werden, da bei gutachterlicher Betrachtung der Daten (Vergleich der erhobenen Waldrandlinien mit hochaufgelösten Orthophotos) teilweise erhebliche Abweichungen um einige Meter zu beobachten sind.

5.1.4. Umweltvektor

Zunächst muss ein kurzer Blick auf die Datenqualität und somit die Verlässlichkeit der Ergebnisse geworfen werden. Der Stichprobenumfang ist mit 676 im Jahr 2017 aufgenommenen Ecken mit 11954 angesprochenen Bäumen, davon 338 Punkte (Umweltvektordaten für 333 davon verfügbar) mit insgesamt 2506 Kiefern und Tannen, als sehr umfangreich und die Grundgesamtheit gut abbildend einzuordnen. Lediglich systematische Fehler, die in der Verteilung der Probepunkte begründet liegen, könnten das Ergebnis ggf. verzerren.

Bei den ausgewerteten erklärenden Variablen muss die unterschiedliche Datenqualität beachtet werden – der Umweltvektor-Datensatz ist als Zusammenfassung vieler standörtlicher Parameter zu einem möglichst vollständigen Bild auf flächendeckender Basis zu verstehen. Natürlich können nicht für jeden Umweltvektor an jedem Inventurpunkt exakt gemessene Daten vorliegen. Nur für einige Werte konnten Messwerte der Bodenzustandserhebung verwendet werden. Vielmehr wurde für die meisten Parameter auf flächendeckend vorliegende Raster-Umweltdaten, die auf Interpolation beruhen, zurückgegriffen, sodass eine größere Unsicherheit der Standortparameter vorliegt als bei direkter Messung.

Dennoch kann auch hier aufgrund der flächendeckenden Auswertung über das gesamte Inventurnetz davon ausgegangen werden, dass die Aussagen ausreichend präzise und genau sind, um daraus verallgemeinernde Schlüsse ziehen zu können.

5.1.4.1. Nährelemente und Boden

Die Verfügbarkeit von Nährstoffen im Boden ist ein für die Vitalität von Bäumen essentiell wichtiger Parameter. Daher wäre zu erwarten, dass sie somit auch den Mistelbefall beeinflusst, da Vitalität und Wachstum der Mistel direkt von der Vitalität des Wirtsbaumes abhängig sind (Tubeuß 1923; Hartmann 1997).

Die Basensättigung gibt als zusammenfassender Parameter den Anteil der mit basisch wirkenden Nährstoffkationen besetzten Austauschplätze an der gesamten Kationenaustauschkapazität des Bodens als Prozentzahl wieder. Dass kein direkter Zusammenhang mit dem Mistelbefall nachgewiesen werden konnte ist möglicherweise dem Umstand geschuldet, dass der Parameter zu stark verallgemeinert ist (die tatsächliche, absolute KAK kann beispielsweise bei gleichem Nährstoffvorrat den Wert stark variieren lassen).

Betrachtet man hingegen die (absoluten) Vorräte der wichtigen Nährstoffe Calcium, Magnesium und Kalium einzeln, so fällt auf, dass zwischen Traktecken mit und ohne Mistelbefall deutliche Unterschiede bestehen. Der Calcium- und Magnesiumvorrat, der als guter Indikator den Fortschritt der Versauerung des Bodens und somit die Verfügbarkeit der Basenkationen insgesamt anzeigt, liegt an Traktecken mit Mistelbefall deutlich niedriger. Mit geringer werdender Magnesiumausstattung ist auch ein Anstieg des Mistelbefalls zu beobachten. Somit könnte der Magnesiumvorrat direkten oder zumindest indirekten Einfluss auf die Vitalität der Bäume haben – sind auf saureren Böden Nährstoffe schlechter verfügbar, so kommt es möglicherweise zu einer Vitalitätsminderung, welche für das erfolgreiche Eindringen der Mistel in das Xylem der Wirtsbäume nötig oder wenigstens förderlich ist (Hartmann 1997). Außerdem könnte ein Mangel an Magnesium als wichtiges Zentralatom des Chlorophyllmoleküls limitierende Effekte auf die Photosynthesekapazität nach sich ziehen, wodurch der Baum eine Vitalitätsminderung erführe.

Es muss hier jedoch auch der Einfluss des Verbreitungsgebiets der Wirtsbaumarten beachtet werden. Die Waldkiefer ist in Bayern am stärksten in Mittelfranken auf eher kalkarmen, sauren Böden verbreitet. Standorte mit höherem Calciumvorrat sind währenddessen besonders im Alpenraum vorherrschend, wo die Waldkiefer nur geringe Vorkommen hat.

Einen gewissen Einfluss auf den Mistelbefall scheint auch der Kaliumvorrat zu haben. Bei Befall nahmen Bäume in einer vorausgegangenen Studie mehr Kalium auf und die Kaliumkonzentrationen in den Organen der Pflanzen waren erhöht (Hosseini et al. 2007). Marschner (2011) beschreibt die Kaliumkonzentration als Schlüsselfaktor, der die Resistenz von Wirtspflanzen gegenüber Parasitenbefall und schwierigen Umweltbedingungen erhöht. Konträr dazu stellt diese Studie jedoch einen nur soeben nicht signifikant höheren Kaliumvorrat an Traktecken mit Mistelbefall als an solchen ohne fest. Ein Zusammenhang zwischen Befallsintensität und Kaliumvorrat konnte nicht nachgewiesen werden. Kalium als mobilstes der Nährkationen akkumuliert in Mistelbüschen durch den hohen Xylemzustrom und die fehlende Phloemverbindung – sie sind also terminale Senken für Nährstoffe (Escher 2004). Zu den hohen Aufnahmen von Nährstoffen kommt es durch die gegenüber dem Wirt erhöhte Transpiration (Pfiz und Küppers 2010; Escher 2004). Die hohe Konzentration von Nährstoffen ist essentiell für wichtige Stoffwechselprozesse der Mistel (Mutlu et al. 2016). Sie hat besondere Schutzmechanismen entwickelt, um eine Toxizität der hoch konzentrierten Nährstoffe zu vermeiden (Glatzel 1983). Die gegenüber dem Wirt höheren Nährelementkonzentrationen ergänzen den durch stärkere Stomataöffnung erzielten Effekt höherer Transpirationsraten der Mistel im Hinblick auf den Wassererwerb durch Aufbau eines osmotischen Potentials (Mutlu et al. 2016; Escher 2004; Dobbartin 2005). Möglicherweise ist der beobachtete Effekt also u.a. durch eine bessere Habitatqualität der Mistel auf gut kaliumversorgten Bäumen zu erklären, während die Abwehrstärkung der Bäume durch gute Kaliumversorgung bei Vorhandensein anderer prädisponierender Faktoren nicht ausreichend für

eine erfolgreiche Verteidigung gegen den Mistelbefall ist. Möglicherweise wird der Baum durch den starken Nährstoffentzug durch die vitalere Mistel stattdessen noch zusätzlich geschädigt. So berichten Mutlu et al. (2016) von geringerem Wasser- und Nährelementgehalt der Nadeln sowie stark verringerten Nadel-Trockengewichten an Bäumen mit starkem Mistelbefall, was wiederum eine Rückkopplung einleiten könnte, da diese Nadeln eine geringere Photosyntheseeffizienz aufweisen (Mutlu et al. 2016).

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff, der an Traktecken mit Mistelbefall in der vorliegenden Studie deutlich geringer ist, lässt sich über zwei Wirkungsmechanismen indirekt als Ursache erklären: Organischer Kohlenstoff im Boden liegt i.d.R. in Form von Humus vor. Dieser trägt nennenswert zur Wasserspeicherfähigkeit des Bodens bei. Ist der Anteil verringert, kann weniger Wasser pflanzenverfügbar gespeichert werden und der Baum bekommt eher Trockenstress, welcher ihn wiederum für einen Mistelbefall prädisponiert. Außerdem dient der Humus als wichtiger Kationenaustauscher, der die Nährstoffverfügbarkeit verbessert. Bei geringerem C_{org} -Gehalt ist also ein wichtiger Teil der Kationenaustauschkapazität verringert.

Einige Studien nennen die Stickstoffverfügbarkeit als wichtigsten limitierenden Faktor des Mistelwachstums (Escher 2004; Grundmann et al. 2010; Hosseini et al. 2007). Zwei Studien nennen sogar eine positive Korrelation zwischen Stickstoffvorrat und Mistelbefallsintensität (Hosseini et al. 2007; Marschner 2011). Dem entgegen steht die Betrachtung, dass die Mistel die im Wirt vorherrschende Aminosäure Glutamin Großteils zu Arginin umwandelt, welches in den Blattorganen akkumuliert. Das Stattfinden dieses Prozesses spricht eher für eine Stickstoffübersversorgung, da dabei organischer Stickstoff als Reaktionsprodukt frei wird (Escher 2004).

In der vorliegenden Studie wurde an Traktecken mit Mistelbefall ein signifikant niedrigerer Stickstoffvorrat festgestellt. Wie zuvor könnte auch hier davon ausgegangen werden, dass die geringere Vitalität des Baumes und die dadurch stärkere Disposition für einen Mistelbefall den Effekt der Stickstoffversorgung der Mistel selbst überwiegen.

5.1.4.2. Temperatur und Niederschlag

Sowohl Temperatur als auch Niederschlag während der Vegetationszeit erwiesen sich in dieser Studie als Faktoren mit großem Einfluss auf den Mistelbefall. Während in der logistischen Regressionsmodellierung unter dem gesamten Spektrum der Bodeneigenschaften nur der Magnesiumvorrat leicht signifikante Modellverbesserungen bewirkte, zeigte sich die Sommertemperatur als wichtigster Vorhersageparameter für einen Mistelbefall. Für beide Faktoren ist zwischen Traktecken mit und ohne Mistelbefall ein signifikanter Unterschied zu beobachten – Traktecken mit Mistelbefall haben ein deutlich wärmeres, trockeneres Klima als solche ohne.

Zwar muss auch hier von einem Effekt des Verbreitungsgebietes der Wirtsbaumarten ausgegangen werden – aufgrund ihrer ökologischen Eigenschaften und geschichtlicher Entwicklungen kommt gerade die Waldkiefer an potentiell deutlich wärmeren und niederschlagsärmeren Standorten in Franken vor, während die kühlen, niederschlagsreichen Standorte im Alpenraum nur selten mit Kiefern bestanden sind.

Es liegt dennoch die Vermutung nahe, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Wasserversorgung der Bäume und dem Mistelbefall besteht. Zum einen setzt die höhere Trockenheit die Vitalität des potentiellen Wirtes herab und erleichtert einen Mistelbefall (Grundmann et al. 2010), zum anderen prädisponieren trocken-warme Standortbedingungen bereits befallene Bäume durch zusätzliche Verstärkung des Trockenstresses für einen weiteren, stärkeren Befall (Mutlu et al. 2016; Sangüesa-Barreda et al. 2012).

Besonders beachtlich ist die beobachtete kritische Temperatur- und Niederschlagsschwelle, oberhalb (Temperatur), bzw. unterhalb (Niederschlag) derer der Schwerpunkt des Befalls liegt und besonders hohe Befallsintensitäten ausschließlich vorkommen. Damit ist der Nachweis eines klimatischen Einflusses auf die potentielle Verbreitung starker Mistelbefälle erbracht.

5.1.4.3. Indizes

Die Transpirationsdifferenz ist die Differenz zwischen potentiell (unter Optimalbedingungen) möglicher und tatsächlicher aktueller Transpiration der Bäume an einem Standort. Sie ist also ein Maß für die Güte der Wasserversorgung – je geringer die Differenz, desto besser für den Baum (Falk et al. 2008). Für die logistische Regressionsmodellierung war die Transpirationsdifferenz ein die Vorhersagegüte signifikant verbessernder Parameter. An Traktecken mit Mistelbefall ist die Transpirationsdifferenz also wesentlich größer – die Bäume haben deutlich mehr Wasserstress. Außerdem wird ihr Wasserhaushalt durch die Mistel zusätzlich belastet. Je größer die Differenz, desto größer ist auch der Mistelbefall – jedoch muss hier die Frage nach Ursache und Wirkung gestellt werden. Einige Studien haben nachgewiesen, dass die Mistel i.d.R. auch gesunde Bäume befällt und selbst als prädisponierender Faktor für weiteren Stress wirkt (Durand-Gillmann et al. 2014; Rigling et al. 2010; Sangüesa-Barreda et al. 2012). Andere Studien bezeichnen die Mistel als Sekundärparasiten, der bereits geschwächte Individuen braucht, um sich etablieren zu können (Hartmann 1997; Grundmann et al. 2010; Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997)

Grundmann et al. (2010) kommen zu dem Schluss, dass das Befallsstadium entscheidend ist: Während ein Baum für einen erfolgreichen Erstbefall bereits etwas geschwächt sein muss, so führt ein fortschreitender Befall zu einer weiteren Schwächung und zur Prädisposition für stärkeren Mistelbefall, schließlich u.U. sogar zum Absterben.

Im Zusammenhang mit Temperatur und Niederschlag zeigen Traktecken mit Mistelbefall eine höhere potentielle Evapotranspiration. Auch klimatische Wasserbilanz und Wasserbilanz (inklusive nutzbarer

Feldkapazität) zeigen schon alleine anhand klimatischer Parameter, dass Bäume an Traktecken mit Mistelbefall unter signifikant höherem potentiellm Wassermangel leiden – ohne, dass der zusätzlich durch Misteln verursachte Wasserstress einbezogen wird. So ist definitiv von einer Schwächung auszugehen, die den Befall durch Misteln gegenüber anderen Standorten wesentlich begünstigt. An einigen Standorten mit Mistelbefall ist im Mittel die potentielle Evapotranspiration sogar höher als die Summe aus Niederschlag und nutzbarer Feldkapazität (Wasserbilanz von Mai bis September negativ), sodass von anhaltendem, intensivem Trockenstress ausgegangen werden muss, welcher in jedem Fall negative Einflüsse auf die Vitalität potentieller Wirtsbäume hat und neben einer Erstbefallsdisposition im Fall eines fortschreitenden Mistelbefalls die bereits geschwächten Bäume zusätzlich schwächt, sodass es ab einer kritischen Befallsschwelle zur positiven Rückkopplung und somit zu Wachstumseinbußen bis hin zur Mortalität kommen kann (siehe auch 4.2.4. Zuwachs und soziale Stellung)(Sangüesa-Barreda et al. 2013; Bigler et al. 2006; Grundmann et al. 2010).

Als wichtigste mit dem Mistelbefall in Verbindung stehende Parameter ergeben sich also allen voran der Wasserhaushalt und die Parameter wie Temperatur und Niederschlag, die ihn bedingen, sowie in geringerem Maße die Nährstoffversorgung, insbesondere mit Magnesium. Betrachtet man die Ökophysiologie der Mistel erscheint dies logisch, da sie dem Baum in erster Linie Wasser und die darin gelösten Nährstoffe entzieht und vorhandene Mängel so verstärkt.

5.1.5. Topographie

Bei Betrachtung der topographieabhängigen Verbreitung der Nadelholzmistel ist auffällig, dass Mistelvorkommen, insbesondere starke Befallsgrade, hauptsächlich im flacheren Gelände und auf niedrigeren Meereshöhen vorkommen.

Besonders interessant ist die Tatsache, dass innerhalb der Höhenverbreitung der jeweiligen Wirtsbaumart vor allem die niedrigeren Meereshöhen wesentlich häufiger einen Mistelbefall aufweisen und die Befallsintensität mit abnehmender Meereshöhe zunimmt. Oberhalb einer oberen Höhengschwelle kommen kaum noch Misteln vor, unterhalb einer unteren Höhengschwelle ist im Fall der Kiefernmistel der Großteil der Traktecken mit Mistel befallen. Bei der Tanne kommt nur im unteren Teil der Höhenverbreitung die Tannenmistel vor, es sind jedoch auch bis zur unteren Verbreitungsgrenze der Tanne unbefallene Traktecken vorhanden.

Die Meereshöhe ist höchstwahrscheinlich als indirekter Parameter zu verstehen, da sich auf geringeren Höhen i.d.R. klimatische Bedingungen wie geringe Niederschläge und höhere Mitteltemperaturen finden, welche den Mistelbefall begünstigen (siehe 4.1.4.2. Temperatur und Niederschlag, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Außerdem ist die Mistel durch kalte Winter begrenzt – diese können bis zu einem gewissen Maß durch

wärmere Sommer ausgeglichen werden (Grundmann et al. 2010). Oberhalb einer gewissen Höhengrenze ist jedoch die Mitteltemperatur über den gesamten Jahresverlauf nicht mehr ausreichend für das Wachstum der Mistel. Hilker et al. (2005) bestätigen diese Beobachtung – auch hier wurde eine Abnahme des Mistelbefalls mit ansteigender Meereshöhe festgestellt.

Interessant wäre in diesem Zusammenhang auch, die Entwicklung dieser Höhengrenzen im Zuge von Klimaveränderungen langfristig zu betrachten. Ist die Annahme der Höhenlimitierung durch klimatische Parameter korrekt, so müsste man bei einer Klimaerwärmung mit einer Verschiebung der Höhengrenzen des Mistelvorkommens nach oben und somit einer Vergrößerung des potentiellen Verbreitungsgebietes der Nadelholzmistel rechnen.

Hilker et al. (2005) konnten außerdem auch eine Abhängigkeit zwischen Höhe und Hangrichtung nachweisen: In sonnenbegünstigten Südlagen waren die maximalen Höhen, in denen ein Mistelbefall vorkam, größer als an Nordhängen (Hilker et al. 2005). Die vorliegende Studie kommt hier zu einem anderen Ergebnis: Traktecken in Nord- bis Ostexposition weisen tendenziell bis in größere Höhen Mistelbefälle auf, diese sind jedoch eher von geringer Intensität und der Trend ist sehr schwach ausgeprägt. Es handelt sich hierbei nur um einige wenige Punkte, sodass möglicherweise ein zufälliger Effekt in Betracht gezogen werden muss. Geht man von einer Temperaturlimitierung der Höhenverbreitung der Mistel aus wäre die Beobachtung von Hilker et al. (2005) wahrscheinlicher.

Bei alleiniger Betrachtung der Hangrichtung ist sowohl für die Kiefern- als auch für die Tannemistel eine Verschiebung der mittleren Hangrichtung der mistelbefallenen Traktecken in Richtung Südwesten gegenüber den unbefallenen Traktecken zu beobachten. Hierbei handelt es sich nur um einen nicht signifikanten Trend, dennoch ist erkennbar, dass Kiefern und Tannen an Traktecken, die an sonnenbegünstigten Süd- bis Südwesthängen liegen, tendenziell häufiger von Misteln befallen werden. Neben der für das Mistelwachstum förderlichen höheren Lichtverfügbarkeit (Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997) muss auch ein an diesen Stellen möglicherweise erhöhter Wasserstress der Wirtsbäume durch höhere Temperaturen, welcher diese für einen Mistelbefall prädisponieren (Grundmann et al. 2010), angenommen werden.

Freistehende, lichtdurchflutete Randbäume werden von mistelverbreitenden Vögeln bevorzugt, sodass auf diesen häufig ein stärkerer Mistelbefall beobachtet werden kann (Grundmann et al. 2010). An steilen Hängen ist jeder Baum einseitig auf der hangabwärts gewandten Seite in gewissem Maße ein Randbaum, sodass seine Krone potentiell häufiger von diesen Vögeln aufgesucht werden müsste. Außerdem müssten diese Bäume ein besseres Mistelhabitat darstellen, da mehr Licht in die Krone vordringt (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Sangüesa-Barreda et al. 2012; Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz 1997).

Dementgegen konnte die vorliegende Studie diesen Effekt nicht bestätigen – v.a. starke Hanglagen

zeigten wesentlich geringere Befallsgrade als ebene Lagen. Auch Alfaro et al. (1985) berichten von einer Verbreitungsgrenze des Mistelbefalls durch steile Hänge. Möglicherweise stellen steile Hänge für die mistelverbreitenden Vögel eine Barriere dar und sie bevorzugen flacheres Gelände als Habitat. Hierzu gibt es jedoch bisher keine gesicherten Beobachtungen.

5.2. Level 2 (Waldklimastationen)

5.2.1. Aufnahmeverfahren

Da Misteln mehrjährige Pflanzen sind, kann davon ausgegangen werden, dass es sich hier nicht um eine hoch dynamische Entwicklung der Population handelt, sondern Misteln oft nicht erkannt werden und erst bei Integration der Ergebnisse über mehrere Aufnahmeperioden eine statistisch ausreichende Aussage über die Anzahl von Mistelbäumen getroffen werden kann, gerade auch da bei Betrachtung einzelner Bäume eine häufige Änderung des Befallsstatus, teilweise zwischen einzelnen Jahren, nicht plausibel erscheint (vgl. Noetzli et al. 2003).

Für die weiteren Auswertungen wurde ein Baum aufgrund dessen in das Kollektiv „Mistelbefall terrestrisch festgestellt“ („terr1“) aufgenommen, wenn in mindestens einem der Jahre 2013 bis 2016 terrestrisch ein Mistelbefall festgestellt wurde.

Dies birgt selbstverständlich die Gefahr, die tatsächliche Mistelanzahl und vor allem die zeitliche Entwicklung verfälscht abzubilden, ist bei der vorhandenen Datenlage aber immer noch als zuverlässiger anzusehen als der Bezug auf ein einzelnes Aufnahmejahr.

Auch die zusätzliche Aufnahme aus per Drohnenbefliegung erstellten Orthophotos liefert keine ausreichend sichere Aussage über den Mistelbefall – beide Verfahren erkennen Bäume als befallen, die das jeweils andere Verfahren nicht erkennt. Durch die Summe beider Verfahren lässt sich eine etwas sicherere Aussage treffen, jedoch ist hier die zeitliche Auflösung problematisch, da dafür eine Drohnenbefliegung jedes Jahr zusätzlich zur terrestrischen Erhebung durchgeführt werden müsste.

Der statistische Nachweis der Abhängigkeit beider Verfahren ist insofern kritisch zu betrachten, als dass in beiden Beständen relativ viele Bäume ohne Mistelbefall vorkommen, und der statistische Test so durch eine nicht normalverteilte Grundgesamtheit, also eine Überzahl der Bäume, die von beiden Verfahren (korrekt) als nicht befallen diagnostiziert werden, verfälscht wird.

Als Konsequenz wurden alle weiteren Tests jeweils für die Kollektive „Mistelbefall in mindestens einem der Jahre 2013 bis 2016 terrestrisch festgestellt ja/nein“ (terr0/terr1), „Mistelbefall 2016 per Drohne festgestellt ja/nein“ (drohne0/drohne1), „Mistelbefall entweder terrestrisch oder per Drohne festgestellt ja/nein“ (beide0/beide1) sowie „Mistelbefall sowohl terrestrisch als auch per Drohne festgestellt“ (overlap1) (siehe Tabelle 11) durchgeführt, um im jeweiligen Vergleich der Ergebnisse zwischen den Kollektiven den Einfluss des Aufnahmeverfahrens auf dieses beurteilen zu können.

5.2.2. Befallsentwicklung

Zunächst muss die Datenqualität kritisch beleuchtet werden. Wie unter 4.2.1. Aufnahmeverfahren gezeigt wurde, führt die terrestrische Ansprache des Mistelbefalls zu sehr unsicheren Ergebnissen, sodass bei allen hier ausgewerteten Daten einkalkuliert werden muss, dass in jedem Jahr mehrere Bäume mit Mistelbefall nicht zuverlässig als solche erkannt wurden.

Dass dennoch ein so klarer Aufwärtstrend im Anteil mistelbefallener Bäume erkennbar ist, zeigt deutlich, dass sich der Mistelbefall innerhalb der vergangenen 10 Jahre in beiden untersuchten Beständen erheblich ausgeweitet hat.

Möglicherweise ist dies jedoch teilweise als Artefakt zu betrachten, da nach Angaben der Landesinventurleitung der Waldzustandserhebung ab 2013 die Aufnahmetrupps insbesondere für den Mistelbefall sensibilisiert wurden und somit evtl. auch schon vorher vorhandene Misteln erst danach durch gezielte Beachtung aufgrund einer veränderten selektiven Wahrnehmung aufgenommen wurden.

Schwankungen des Mistelbefalls können möglicherweise auch durch die Einsehbarkeit erklärt werden: In Jahren, in denen die Bäume unter starkem Stress, beispielsweise durch Wassermangel, leiden, sind ihre Kronen durch stärkere Nadelverluste transparenter (Dobbertin 2005). Dadurch können bei der Aufnahme ggf. mehr Misteln vom Boden aus erkannt werden als in Jahren, in denen die Krone dichter ist, sodass eine Unterschätzung des Mistelbefalls in Jahren mit geringem Stress, bzw. eine höhere (aber der Realität nähere) Einschätzung des Mistelbefalls in Jahren mit hohen Entnadelungsprozenten infolge von starkem Umweltstress möglich ist.

Bemerkenswert ist der starke Anstieg des Mistelbefalls im Jahr nach der Durchforstung der Bestände. Kołodziejek und Kołodziejek (2013) zeigten bereits einen Effekt von Bestandesdichte und Lichtdurchflutung auf die Anzahl von Mistelbäumen. Diese war in dünneren Beständen wesentlich höher. Auch für Akazienbestände im Jemen mit einer anderen spezialisierten Mistelart konnte dies gezeigt werden (Donohue 1995).

Auf die Parameter Bestandesdichte und Lichtdurchflutung hat der Mensch durch selektive Entnahme von Bäumen einen entscheidenden Einfluss. Unbewusst wird somit jedoch auch die Habitatqualität für Misteln und deren Vektoren verbessert (Alfaro et al. 1985). Vor allem die Misteldrossel bevorzugt offene Bestände und freistehende Kronen (Grundmann et al. 2010; Guest 2010; Tubeuf 1923). Lichtraumdurchforstungen führen somit zu einer wesentlich besseren Eignung der Bestände als Habitat für sie (Durand-Gillmann et al. 2014; Noetzli et al. 2003). Als wichtigster Vektor kommt es so zu einer positiven Rückkopplung: Die Misteldrossel hält sich vermehrt in den lichtereren Beständen auf, dort können Misteln besser wachsen, was zu besserem Nahrungsangebot für die Misteldrossel und somit wieder stärkerer Mistelverbreitung durch die Misteldrossel in diesem Bestand führt (Aukema

und Martínez del Rio 2002). Ist ein Mistelbefall einmal in einem Bestand etabliert, so lässt sich aus diesen Beobachtungen schließen, dass er sich höchstwahrscheinlich nicht mehr von selbst kurieren wird, sondern mit einer kontinuierlichen Verstärkung des Befalls zu rechnen ist. Ein Mistelbefall hat i.d.R. langanhaltende Effekte auf Ökosystem und Zuwachsleistung der Bäume. Es kann Jahre bis Jahrzehnte dauern, bis das Wirt-Parasit-System im Tod beider Pflanzen endet (Mellado et al. 2017).

Die durchschnittliche Anzahl von Misteln pro Baum zwischen 1 und 1,8 bei einem Maximum von 7 Mistelbüschen auf einem Individuum lässt trotz des sich deutlich ausbreitenden Befalls noch auf ein initiales Befallsstadium schließen. Stark befallene Bestände zeigen wesentlich höhere Mistelzahlen pro Baum (Sangüesa-Barreda et al. 2013). Bisher konnte bei keinem Baum eine Mortalität, die ursächlich auf den Mistelbefall zurückzuführen wäre, nachgewiesen werden. Obwohl mehrere Studien einen Mistelbefall als prädisponierend für starke Schädigungen und Mortalitäten angeben (Bigler et al. 2006; Grundmann et al. 2010; Kołodziejek und Kołodziejek 2013), traten in deren Beobachtungen die genannten Schäden oft nur in den stark befallenen Untersuchungsbeständen auf. Leichter Mistelbefall hat hingegen oft kaum Auswirkungen auf den Bestand, da die Bäume den Stress durch ausreichende Vitalität ausgleichen können (Noetzli et al. 2003).

Nicht klar bleibt außerdem der temporale Zusammenhang zwischen Mistelbefall und Bestandsschäden – ob der Bestand also von Misteln befallen wird, weil er durch eine Prädisposition, z.B. durch Trockenstress, geschädigt ist, oder ob der Befall gesunder Bäume durch Misteln zu einer Prädisposition für weitere Schädigungen durch mistelinduzierten Trockenstress führt (Noetzli et al. 2003).

5.2.3. Horizontale Verteilung

Die geografischen Daten basieren auf einer manuellen Digitalisierung der Kronenprojektionsflächen der Probebäume anhand von sehr hochauflösenden digitalen Orthofotos aus einer Drohnenbefliegung (Ecke 2017) und können als sehr genau eingestuft werden. Die Positionen der Bäume wurden anhand der geographisch-mathematisch bestimmten Schwerpunkte der Kronenprojektionsflächen dargestellt. Da die Waldkiefer, die auf beiden Probeflächen als Reinbestand vorkommt, dazu neigt, leicht gebogene Schaftformen insbesondere im Kronenbereich auszubilden, wäre die für den Mistelbefall entscheidende horizontale Position der Krone durch die Verwendung von Stammfußpunkten für die Indexberechnung nicht ausreichend genau abgebildet. Die Verwendung der Kronenschwerpunkte hingegen erlaubt eine relativ gute Aussage über die horizontale Verteilung der Kronen der Bäume und somit auch der Misteln.

Kritisch zu betrachten ist die Bestimmung der mistelbefallenen Bäume (siehe 5.2.1. Aufnahmeverfahren). In der vorliegenden Studie wurden verschiedene Methoden der Bestimmung des Mistelbefalls (per Drohne, terrestrisch, beide) separat behandelt. Hinsichtlich der Ergebnisse unterscheiden sich diese verschiedenen Aufnahmemethoden jedoch nicht.

Zunächst fällt bei der Betrachtung der Daten auf, dass alle berechneten Indexwerte deutlich über 1 liegen – die horizontale Verteilung der Bäume ist also deutlich regelmäßiger, als es für eine zufällig verteilte Population zu erwarten wäre. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich um gleichaltrige, einschichtige Reinbestände handelt, in denen regelmäßig forstwirtschaftliche Aktivitäten stattfinden. In derartigen Beständen sind häufig deutlich regelmäßiger Verteilungsmuster zu beobachten als in unbehandelten, naturnäheren Beständen (Pretzsch 1996). Auch Donohue (1995) betont die Wichtigkeit des Einflusses menschlicher Nutzung auf die (horizontale) Bestandesstruktur.

Die räumlichen Verteilungsmuster und die Verbreitungsrate der Mistel stehen in Verbindung mit dem Muster und der Befallsstärke von initialen Befallsquellen (erste infizierte Mistelbäume), der Art der Bestandesbegründung und der daraus resultierenden Struktur sowie der Präsenz von Verbreitungsbarrieren wie eingemischten Baumarten, die nicht als Wirt für die Mistel infrage kommen, oder starken Hangneigungsanstiegen (Alfaro et al. 1985). Aufgrund mangelnder zeitlicher Auflösung kann in dieser Untersuchung keine Aussage über initiale Befallsquellen getroffen werden. Durch die Einschichtigkeit des Bestandes und da es sich um einen Reinbestand handelt, in dem alle Bäume als potentielle Wirtsbäume für Misteln infrage kommen, ist die Mistelausbreitung sicherlich begünstigt. Auch topographisch sind beide Flächen relativ einheitlich.

Viele Studien, in denen ähnliche Analysen durchgeführt wurden, berichten von teilweise stark geklumpem Auftreten von Mistelbäumen in Waldbeständen (Aukema und Martínez del Rio 2002; Overton 1996; Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Grundmann et al. 2010; Donohue 1995). Kołodziejek und Kołodziejek (2013) stellen ein annähernd negativ binomial verteiltes Befallsmuster der Wirtsbäume fest: Wenige Wirte haben sehr große Anzahlen an Misteln, viele Bäume haben sehr wenige Misteln. Als Hauptmerkmal für stark befallene Bäume führen sie eine größere Baumhöhe auf. Donohue (1995) stellt sogar eine stärker als zufällig geklumpete Verteilung der Mistelbäume im Bestand fest, also $R < 1$. Im Gegensatz dazu sind in der vorliegenden Studie bei allen Kollektiven deutlich regelmäßiger Verteilungen zu beobachten, die sich zwischen Baumkollektiven mit und ohne Mistelbefall nicht signifikant unterscheiden. Dabei ist jedoch auch zu beachten, dass über die Infektionsstärke mit dem zugrundeliegenden Datensatz keine ausreichende Aussage getroffen werden kann und nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ausgesagt werden kann, ob ein Baum überhaupt durch Misteln befallen ist oder nicht. Eine sehr starke Infektion kann jedoch noch auf keinem der Individuen festgestellt werden, sodass man zu dem Schluss kommen kann, dass sich beide Probeflächen noch im Anfangsstadium des Befalls befinden und eine deutliche Klumpung sich gegebenenfalls erst bei stärkerer Ausbreitung und Intensivierung des Mistelbefalls, bzw. bei zusätzlicher Auswertung der Befallsintensität nur unter stark befallenen Bäumen ausbilden wird. Vermutlich wird sich diese aufgrund gleichmäßiger Arten- und Bestandesstruktur sowie Topographie außerdem nie so stark ausprägen, wie es wahrscheinlich in stärker strukturierten Beständen mit

natürlichen Hindernissen und an sich schon geklumpter Verteilung der potentiellen Wirtsbäume durch Begründung in Trupp- oder Gruppenstellungen der Fall wäre.

5.2.4. Zuwachs und soziale Stellung

Viele vorausgegangene Studien kamen zu dem Ergebnis, dass höhere Bäume öfter durch Misteln befallen werden (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Sangüesa-Barreda et al. 2013; Aukema und Martínez del Rio 2002).

Mehrfach wurde festgestellt, dass vor allem dominante Bäume (Kraft-Klassen 1 und 2) am stärksten durch Misteln parasitiert wurden (Sangüesa-Barreda et al. 2012; Durand-Gillmann et al. 2014; Sangüesa-Barreda et al. 2013). Auch der Brusthöhendurchmesser ist oft positiv mit der Befallsintensität korreliert (Kołodziejek und Kołodziejek 2013).

Als Gründe hierfür nennen Kołodziejek und Kołodziejek (2013) die rein statistisch höhere Wahrscheinlichkeit eines Mistelbefalls mit zunehmendem Baumalter (und: ältere Bäume haben i.d.R. größere Dimensionen), sowie die höhere Oberfläche der Kronen von höheren und sozial besser gestellten Bäumen, die mehr Platz für die Kolonisation durch Misteln bietet. Außerdem konnte bereits Tubeuf (1923) einen positiven Zusammenhang zwischen Baumvitalität, welche bei herrschenden Bäumen zweifelsohne höher ist, und deren Eignung als Mistelhabitat (in späteren Stadien, nicht für den Erstbefall) feststellen.

Neben diesen allein mechanistischen Betrachtungen muss jedoch auch die Ökologie der Mistel und ihrer Verbreitungsvektoren betrachtet werden.

Große Bäume stellen ein besseres Habitat für Misteln und mistelverbreitende Vögel dar als kleinere, da die Krone größerer Bäume meist lichtdurchfluteter ist und bessere Sitzplätze für Vögel bietet (Kołodziejek und Kołodziejek 2013; Aukema und Martínez del Rio 2002; Overton 1994; Watson 2001).

Neben diesen Erkenntnissen betonen Sangüesa-Barreda et al. (2012) und Nierhaus-Wunderwald und Lawrenz (1997), dass auch die stärkere Exposition gegenüber Umweltfaktoren bei höheren Bäumen und die daraus resultierende höhere Kronentransparenz die Habitatqualität für Misteln und mistelverbreitende Vögel entscheidend verbessern, was eine positive Rückkopplung des Mistelbefalls bedeutet. Eine nur leicht verbesserte Lichtdurchflutung kann den Keimungserfolg der Mistel um das Vierfache steigern (Lamont 1983).

Beobachtungen des Verhaltens der Misteldrossel, die als wichtigster Verbreiter der Mistel in Mitteleuropa gilt, zeigen, dass diese sich mit Vorliebe auf hohen Bäumen, optimalerweise bereits mit Mistelbefall, niederlassen, auf denen Sie die gesamte Umgebung gut im Blick haben, und diese territorial gegen andere Vögel verteidigen (Guest 2010) (siehe auch 2.3.1. Verhalten und Mistelverbreitung und 2.3.2. Misteldrossel).

Anhand dieser Betrachtungen lässt sich auf einen kausalen Zusammenhang zwischen Größe, sozialer Stellung des Wirtsbaumes und Mistelbefall schließen, wie er auch in dieser Studie auffällt.

Auch der Zuwachs mistelbefallener Bäume wurde bereits in einigen Studien untersucht.

Es wäre zu erwarten, dass der durch Mistelbefall erhöhte Trockenstress und der Verlust potentieller Photosynthesefläche (siehe auch 2.1.3. Physiologie und Ernährung) vor allem in Trockenjahren und relativ niederschlagsarmen Gebieten zu Zuwachseinbußen der betroffenen Bäume führen, wie bereits einige vorangegangene Studien feststellen konnten (Sangüesa-Barreda et al. 2013; Kanat et al. 2010; Noetzli et al. 2003), da der Trockenstress durch den Mistelbefall weiter verstärkt wird und den Baum für weitere Schädigungen prädisponiert (Dobbertin und Rigling 2006).

(Sangüesa-Barreda et al. 2013) stellten fest, dass der Zuwachs von befallenen Bäumen vor dem starken Befall stets höher lag als derjenige anderer Bäume, vermutlich begründet auf der auch in dieser Studie festgestellten Beziehung zwischen Mistelbefall und sozialer Stellung.

Ein geringer Mistelbefall wirkt sich in der Regel nicht auf das Dickenwachstum der befallenen Bäume aus (Noetzli et al. 2003). Erst nach Überschreiten einer kritischen Schwelle des Mistelbefalls, wenn die gesamte Krone betroffen ist, ist ein deutlicher Abfall des Dickenwachstums zu beobachten (Sangüesa-Barreda et al. 2013). Höchstwahrscheinlich ist der Befall in den hier betrachteten Beständen noch nicht so weit fortgeschritten, dass er sich in stark reduzierten Radialzuwachsen gegenüber unbefallenen Bäumen niederschlägt. An keinem Baum kann bisher gutachterlich ein besonders starker Befall festgestellt werden (Sangüesa-Barreda et al. (2013) berichten bei extrem stark befallenen Beständen von durchschnittlich 820 Misteln pro Baum!). Wann diese kritische Schwelle an welchem Standort in Bayern erreicht wird, bleibt unklar und bedarf weiterer Beobachtungen und Untersuchungen.

Wie in 4.2.2. Befallsentwicklung dargestellt ist jedoch über die letzten Jahre auf beiden Probeflächen ein Anstieg des Mistelbefalls zu beobachten. Bei separater Betrachtung der Bäume der Kraft-Klassen 1 und 2 schlägt sich dies in gewissem Maße auch in der Entwicklung des mittleren Zuwachses nieder – im Vergleich mit den unbefallenen Bäumen derselben Kraft-Klasse sinkt dieser über die Jahre leicht ab. Während er zu Anfang der betrachteten Periode noch deutlich höher lag als bei den unbefallenen Bäumen, was am ehesten durch die auch innerhalb der Kraft-Klassen noch vorliegenden Größenunterschiede der Bäume und den wie oben erläutert stärkeren Befall größerer Bäume erklärt werden kann, so sinkt der Zuwachs ab 2013 trotz der größeren Dimension der mistelbefallenen Bäume unter denjenigen der tendenziell kleineren nicht mistelbefallenen Bäume.

Im zeitlichen Verlauf des Grundflächenzuwachses spiegelt sich der Mistelbefall kaum in der Steigung der Zuwachskurven zwischen den Jahren wieder. Besonders in extremen Trockenjahren wie z.B. 2003 wäre ein stärkerer Wachstumseinbruch der Bäume mit Mistelbefall als derjenigen ohne zu erwarten, da diese unter zusätzlichem Wasserstress leiden (Hartmann 1997). Selbst wenn der Baum zum Schutz vor Wasserverlust seine Spaltöffnungen schließt, verdunstet die Mistel weiter Wasser, das sie dem

Xylem des Baumes entnimmt, und verstärkt so den Trockenstress (Sangüesa-Barreda et al. 2013). Möglicherweise zeigen sich diese Reaktionen jedoch auch zeitversetzt. Außerdem ist zu beachten, dass vitale Bäume nach einer Schädigung infolge ihrer Resilienz den Stress im Folgejahr teilweise überkompensieren. Überlegt man, dass größere Bäume aufgrund ihrer sozialen Stellung häufig auch besonders vital sind, so erscheint es plausibel, dass mistelbefallene Bäume gerade in Jahren nach starken Zuwachsabfällen teilweise trotz des Mistelbefalls höhere Wachstumssteigerungen zeigen als unbefallene Bäume.

Zudem ist zu beachten, dass das Durchmesserwachstum nicht über den gesamten Stamm hinweg gleichmäßig ist. Sangüesa-Barreda et al. (2012) stellten fest, dass der Zuwachs am stärksten an der Baumspitze absinkt und der Brusthöhendurchmesser am schwächsten die Zuwachseinbußen bei Mistelbefall wiedergibt. Der besonders in Trockenjahren verstärkte Zuwachsabfall war in ihrer Studie regelmäßig am besten in apikalen Bohrkernen zu beobachten. Trotz geringer Reaktion des Brusthöhendurchmessers wird der gesamte Zuwachs an Holzmasse also durch höhere Abholzigkeit reduziert. Daraus folgt die Empfehlung, Zuwachsmessungen und -bohrungen in größeren Höhen durchzuführen, um Rückschlüsse auf den Zuwachs bei Mistelbefall zu ziehen (Sangüesa-Barreda et al. 2012). Die hier registrierten leichten Zuwachsrückgänge in 1,30 m Höhe könnten also möglicherweise sogar einen deutlichen Wachstumsrückgang der Mistelbäume bedeuten, welcher jedoch auf Brusthöhe nur schwach zeichnet.

6. Fazit und Ausblick

Bereits im aus forstlicher Sicht eher kurzen hier betrachteten Zeitraum von 10 Jahren (2007 bis 2017) hat der Mistelbefall der Kiefern und Tannen in Bayern deutlich zugenommen. Eine so starke Zunahme in kurzer Zeit bei vorher geringem Befall legt die Annahme nahe, dass sich die Entwicklung des Mistelbefalls aktuell in Bayern noch in der Anfangsphase befindet und mit einer weiteren deutlichen Zunahme des Mistelbefalls in den nächsten Jahren und Jahrzehnten gerechnet werden muss.

Bisher bestehen bei der Auswertung von Langzeitmonitoringdaten in Bezug auf den Mistelbefall deutliche Unsicherheiten. Insbesondere längere Zeitreihen für Einzelbäume sind aufgrund häufiger Veränderungen des Aufnahmerasters in der Vergangenheit nur für wenige Probepunkte verfügbar. Für die zukünftige Beobachtung der Entwicklung des Waldzustandes und insbesondere des Mistelbefalls wäre somit ein kontinuierliches Beibehalten des Aufnahmerasters im aktuellen Umfang als Mindestanforderung wünschenswert. Gegebenenfalls könnten außerdem zusätzliche Verdichtungen auf engere Raster über ganz Bayern (aktuell sind nur einige Gebiete auf 8x8 km verdichtet) räumlich deutlich besser aufgelöste Informationen über die Entwicklung des Waldzustandes und insbesondere von Schadorganismen wie der Mistel liefern. Hierbei ist langfristig außerdem eine Kombination von terrestrischen und luftbildbasierten Verfahren anzustreben. Die Erkenntnisse dieser Studie legen nahe, dass durch terrestrische Erhebung und Auswertung von Drohnen-Luftbildern häufig verschiedene Mistelbüsche erkannt werden, sodass wahrscheinlich nur eine Kombination beider Verfahren ausreichend sichere Ergebnisse liefern könnte. Eine stetige Verbesserung der Sensortechnik könnte in Zukunft außerdem großflächig vorhandene digitale Orthophotos aus Flugzeugbefliegungen als Datenquelle interessant werden lassen. Vollständige Sicherheit lässt sich jedoch wohl auch in Zukunft ausschließlich durch einen Aufstieg in die Krone und die manuelle Zählung aus dieser Perspektive erreichen.

Diese Studie konnte die Temperatur in der Vegetationszeit als wichtigsten begünstigenden Standortfaktor des Mistelbefalls nachweisen. Geht man von einer weiteren Klimaerwärmung in den nächsten Jahren aus, bedeutet dies sich stetig verbessernde Bedingungen für einen Mistelbefall bei gleichzeitiger Schwächung der Wirtsbäume durch stärkeren Trockenstress und somit eine Verschiebung des Wirt-Parasit-Gleichgewichts. Da in diesem Fall der Parasit durch viele Teilwirkmechanismen begünstigt wird, ist von einer deutlichen Ausweitung und Intensivierung des Befalls auszugehen.

In der vorliegenden Studie konnte außerdem eine Höhenlimitierung des Mistelbefalls festgestellt werden, es war jeweils hauptsächlich der untere Teil der Höhenverbreitung beider Wirtsarten betroffen. Bei erhöhten Temperaturen könnte sich diese Schwelle in Zukunft nach oben verschieben und der Mistelbefall sich zusätzlich geografisch in höher gelegene Gebiete ausweiten, bzw. die

Befallsintensität sich dort erhöhen. Während intensive Befälle momentan hauptsächlich in Mittelfranken zu finden sind, wo viele Kiefernbestände auf niedrigen Meereshöhen vorkommen, ist somit in Zukunft auch mit einer Ausbreitung in den Mittelgebirgen zu rechnen – im Bayerischen Wald konnte in den letzten Jahren bereits eine Ausbreitung der Tannenmistel beobachtet werden.

Ein weiterer Faktor, der große Unsicherheiten bezüglich der künftigen Entwicklung des Mistelbefalls mit sich bringt, sind die Auswirkungen von Veränderungen in der Fauna. Zwei Tiergruppen genießen hier besondere Bedeutung: Zum einen können durch Mistelbefall und ungünstige Umweltbedingungen geschwächte Bäume leichter zum Ziel von Schadinsekten werden und die Mistel als mitwirkender Faktor deutliche Schädigungen der Bäume durch Sekundärschädlinge begünstigen. Zum anderen, und mit wahrscheinlich deutlich größeren und direkteren Effekten, müssen Änderungen in Verhalten und Lebensweise der mistelverbreitenden Vogelarten wie Misteldrossel und insbesondere Seidenschwanz berücksichtigt werden.

Habitatveränderungen durch menschliche Eingriffe können hier ebenso wie ein verändertes Klima die Populationsdynamik deutlich beeinflussen. Wichtigster Faktor sind Veränderungen im Zugverhalten der Vögel: Bleiben immer größere Teilpopulationen als Standvögel aufgrund milder Wintertemperaturen den ganzen Winter über in ihren Verbreitungsgebieten in Mitteleuropa, wird die Verbreitung von Mistelsamen als wichtige Winternahrung der Vögel deutlich begünstigt. Im Fall des nur in gewissen zeitlichen Abständen auftretenden Massenzugs von Seidenschwänzen können Veränderungen des Nahrungsangebotes in deren nördlichen Verbreitungsgebieten durch Klima- und Landnutzungsänderungen zu einer erhöhten Frequenz des Auftretens solcher Massenwanderungen und somit zu häufigeren Ausbreitungswellen von Misteln als deren Haupt-Ersatznahrungslieferant in Mitteleuropa führen.

Während die Mechanismen der Mistelverbreitung durch Vögel gut bekannt sind, ist die Populationsdynamik dieser Arten bisher nur sehr wenig erforscht. Monitoringprogramme mit dem Ziel, mehr Informationen über ihre Lebensweise zu gewinnen und so bessere Rückschlüsse auf die Mistelverbreitung ziehen zu können, sollten in Zukunft verstärkt eingerichtet werden.

Diese Studie konnte keine klaren Aussagen über initiale Befallsquellen in Beständen treffen. In zukünftiger Forschung wäre von großem Interesse nachzuvollziehen, wie der Erstbefall eines Bestandes, von dem ausgehend sich die Misteln weiterverbreiten, stattfindet. Im Abstand von 5-10 m zu Waldrändern konnte ein erhöhter Anteil mistelbefallener Bäume festgestellt werden, auch wenn kein signifikanter Einfluss des Waldrandabstandes auf den Mistelbefall nachgewiesen werden konnte. Das Stichprobendesign dieser Studie ist jedoch nur sehr eingeschränkt für Aussagen über die Befallssituation von Waldrändern geeignet. Weitere Forschung wäre hier anhand von größeren zusammenhängenden Waldrändern und mit speziell dafür geeignetem Aufnahmedesign von Nöten.

Wie Forstbetriebe auf den Mistelbefall reagieren können, ist umstritten. Oft vergeht viel Zeit, bis ein Befall wirtschaftlich relevante Auswirkungen auf Waldbestände hat (Mathiasen et al. 2008). Teilweise wird die Entfernung der Mistelbäume, einzeln oder in Durchforstungen, empfohlen (Grundmann et al. 2010). Dem entgegen steht, dass dadurch für Misteln wie Misteldrosseln die Habitatqualität verbessert wird, da die Kronen des dünneren Bestandes stärker lichtdurchflutet sind und dieser so eher der Habitatvorliebe der Misteldrossel entspricht (Durand-Gillmann et al. 2014; Noetzli et al. 2003).

Bisher ist zur direkten Kontrolle des Mistelbefalls nur die mechanische Entfernung aus den Kronen sinnvoll. Es wurden Forschungsansätze zu chemischen, biologischen und genetischen Kontrollmechanismen angestellt, diese sind bisher jedoch weder ökonomisch sinnvoll noch praxisreif (Mathiasen et al. 2008). Erste Studien konnten Erfolge bei der mechanischen Entfernung von Misteln in stark befallenen Beständen nachweisen, hier endete danach die Zuwachsdepression und die Bäume zeigten wieder höhere Vitalität und Zuwachsraten (Kanat et al. 2010).

Andere, indirekte Ansätze sind die Pflanzung von Beerensträuchern als Ersatznahrung für Vögel, sodass diese seltener auf Mistelbeeren zurückgreifen (Sangüesa-Barreda et al. 2013) sowie die langfristige Anpassung der Wälder. Waldumbaumaßnahmen sind somit nicht nur im direkten Hinblick auf Klimaveränderungen, sondern auch unter Beachtung der Veränderung der Lebensweise von Pathogenen und Parasiten wie der Mistel angezeigt (Grundmann et al. 2010). Die Begründung standortgerechter Mischwälder, in denen für Mistelbefall anfällige Arten nur zu geringen Teilen und optimalerweise nicht gleichmäßig, sondern in Trupp- oder Gruppenstellung verteilt gepflanzt werden, sodass ein Mistelbefall sich schwerer ausbreiten kann, ist somit vermutlich das nachhaltigste und langfristig effektivste Instrument um großflächige wirtschaftliche Schäden durch die Intensivierung des Mistelbefalls zu verhindern.

Bis alle Wälder dementsprechend angepasst sind, wird jedoch aufgrund der langen Lebensdauer von Bäumen noch einige Zeit vergehen. Für aktuell bereits befallene Bestände wären deshalb weitere Forschungen darüber anzustellen, in welchem Ausmaß ein Mistelbefall an welchem Standort und unter welchen Voraussetzungen weitgehend unschädlich ist und wo die kritische Schwelle liegt, oberhalb derer es zu einer kontinuierlichen Ausbreitung und langfristig zur intensiven Schädigung und zum frühzeitigen Absterben von Bäumen und Beständen kommt. Anhand dessen könnte dann auch entschieden werden, in welchen Beständen es noch nicht zu spät ist, Gegenmaßnahmen zu treffen, bzw. ab wann sich eine Bekämpfung der Mistel nicht mehr lohnt.

Neben all diesen Betrachtungen müssen jedoch auch mögliche ökonomisch und/oder ökologisch potentiell positive Effekte der Mistel beachtet werden. Für Ökosysteme ist die Mistel eine Schlüsselspezies in deren natürlicher Entwicklung, sodass aus ökologischer Sicht eine Erhaltung möglicherweise wünschenswerter ist als ihre Bekämpfung (Mathiasen et al. 2008). Sie führt in

Waldökosystemen zu oft positiv konnotierten Effekten wie Heterogenität, Diversität und Produktivität, auch wenn die unmittelbare Holzproduktion der Wirtschaftsbaumarten möglicherweise verringert wird (Mellado et al. 2017).

Außerdem besitzt die Mistel eine Vielzahl medizinisch und pharmazeutisch interessanter Inhaltsstoffe, etwa 40 in Deutschland zugelassene Fertigarzneimittel enthalten Mistelextrakte und -zubereitungen, oft in Kombination mit anderen pflanzlichen Auszügen (Grundmann et al. 2010). Auch für verschiedene Traditionen und Bräuche ist der Verkauf von Mistelbüschen als Einnahmequelle denkbar. Misteln könnten somit für Forstbetriebe auch eine zusätzliche Einnahmequelle darstellen. Mit ihrer Nutzung und ihrem Verkauf wäre gleichzeitig die mechanische Entfernung der Büsche aus befallenen Baumkronen verbunden, wodurch diese ökonomisch ggf. tragbar oder sogar vorteilhaft werden könnte. Im Zuge der weiteren Forschung wären somit auch ökonomische Betrachtungen zu Nutzen und Schaden von Misteln für Forstbetriebe anzustellen.

Abschließend zeigt sich die Mistel also als sehr interessante, facettenreiche und in Zukunft sehr bedeutsame Art. Ihre komplexen Interaktionen und Auswirkungen in Waldökosystemen genauso wie ihre positiven und negativen Effekte für Natur und Forstbetriebe versprechen viele weitere interessante Forschungsmöglichkeiten und bedürfen genauer Betrachtung bezüglich ihrer Auswirkungen auf die forstliche Praxis.

7. Zusammenfassung

Die Weißbeerige Mistel (*Viscum album*) als epiphytischer Halbparasit der forstlich wichtigen Waldbaumarten Kiefer (*Pinus sylvestris*) und Tanne (*Abies alba*) hat intensive, langanhaltende und möglicherweise forstwirtschaftlich negative Effekte auf Waldökosysteme.

Während bisherige Arbeiten sich meist mit Fallstudien in einzelnen oder mehreren Beständen beschäftigten, kombiniert diese Studie landesweit vorliegende Langzeitmonitoringdaten aus verschiedenen Monitoringprogrammen, um auf größerer Skalenebene und mit längeren Zeitreihen Aussagen über die Entwicklung, Ursachen und Auswirkungen des Mistelbefalls in Bayern zu treffen. Neben flächigen Aussagen aus Inventurtrakten in ganz Bayern wurden auch zwei Intensivmonitoringflächen einbezogen.

Terrestrische Aufnahmen des Mistelbefalls wurden mit Mistelvorkommen, die aus hochauflösenden Luftbildern einer Drohnenbefliegung kartiert worden waren, bezüglich ihrer Aussagekraft verglichen. Beide Verfahren für sich eignen sich nur eingeschränkt für detaillierte Aussagen über die Befallssituation einzelner Bäume. Bei der Arbeit mit den Daten musste somit stets eine hohe Unsicherheit der Ergebnisse einkalkuliert werden.

Anhand der terrestrischen Ansprache an den Inventurpunkten wurde der Anteil betroffener Bäume an der Gesamtstichprobe berechnet. Der Mistelbefall hat sich in den letzten Jahren deutlich verstärkt: Sowohl die mittlere Anzahl befallener Kiefern und Tannen (von unter 1% auf über 7%) als auch der Anteil von Inventurtrakten mit Mistelbefall (von ca. 6% auf fast 25%) hat sich seit 2007 deutlich erhöht. Schwerpunkte des Befalls liegen in Mittelfranken und im Bayerischen Wald.

Zur Quantifizierung der Bestandesstrukturvielfalt wurde ein Strukturindex berechnet und seine Werte zwischen Trakten mit und ohne Mistelbefall verglichen. Es konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen Mistelbefall und Strukturvielfalt festgestellt werden. Auch bei Betrachtung der horizontalen Verteilung der Mistelbäume auf den Intensivmonitoringflächen konnte kein besonders geklumpstes Muster festgestellt werden, lediglich beim Vergleich zwischen Traktecken eines Inventurtraktes fiel auf, dass häufig keine oder alle Traktecken, wesentlich seltener nur einzelne Ecken befallen sind.

Für Waldränder konnte gegenüber geschlossenen Waldgebieten kein statistisch sicherer Zusammenhang mit dem Mistelbefall nachgewiesen werden. Das Mistelvorkommen war jedoch in 5 bis 10 m Abstand von Waldrändern gegenüber anderen Abstandsklassen auffällig höher.

Anhand von Umweltvektordaten, welche Informationen zu Standort- und Wasserhaushaltsparametern für alle Inventurtrakte liefern, wurden in einer logistischen Modellierung die Ursachen des Mistelbefalls untersucht. Hauptursachen waren die Temperatur in der

Vegetationszeit, der Magnesiumvorrat im Boden und die Transpirationsdifferenz als Maßzahl für potentiellen Trockenstress.

Topographische Effekte wurden durch den statistischen Vergleich von Höhe, Hangneigung und Hangrichtung zwischen Traktecken mit und ohne Mistelbefall analysiert. Vor allem in der unteren Höhenverbreitung (Kiefer: unter 450 m ü. NN, Tanne: unter 800 m ü. NN) der jeweiligen Wirtsbaumart ist mit häufigem und intensivem Mistelbefall zu rechnen, während in den höheren Lagen wesentlich weniger Traktecken Mistelbefall zeigen. Mistelbefall ist v.a. an weniger geneigten Hängen und in Südsüdwestrichtung zu erwarten. Interaktionen zwischen Topographie und Temperatur als Einflussfaktoren sind sehr wahrscheinlich.

Der Radialzuwachs wird an den Intensivmonitoringflächen mit permanenten Zuwachsmaßbändern gemessen. Mistelbefallene Bäume sind sozial bessergestellt – besonders häufig ist ein Mistelbefall bei vorherrschenden Bäumen zu beobachten. Folglich zeigten mistelbefallene Bäume zweier untersuchter Intensivmonitoringflächen oft einen größeren Zuwachs als unbefallene. Bei getrennter Auswertung nach bestandessozialen Klassen zeigte sich jedoch ein gegenüber dem unbefallenen Baumkollektiv leicht rückläufiger, seit 2013 teilweise auch geringerer Zuwachs der mistelbefallenen Bäume.

Eine kritische Schwelle, ab wann ein Mistelbefall an welchem Standort langfristige und irreversible Auswirkungen auf Vitalität und Zuwachs von Bäumen und Beständen hat, konnte in dieser Studie nicht festgestellt werden. In der weiteren Forschung wäre neben genaueren Betrachtungen hierzu besonderes Augenmerk auf die wirtschaftlichen Auswirkungen des Mistelbefalls zu legen. Während durch Minderzuwächse und erhöhte Mortalitäten wirtschaftliche Verluste in der Holzproduktion zu erwarten sind, könnte die Nutzung von Misteln für andere Zwecke eventuell neue, zusätzliche Einnahmequellen für Forstbetriebe und Waldbesitzer ermöglichen.

8. Abstract

The European Mistletoe (*Viscum album*) as an epiphytic semi-parasite of economically important tree species has long-lasting intense and from an economic point of view possibly negative effects on the development of forest ecosystems. As past studies mainly assessed its effects in small-scale experimental sites, this study's goal is to gather information about the mistletoe infestation of forests, their causes and impacts at a larger scale and all across Bavaria by combining long-term monitoring data derived from different monitoring programs.

Based on the terrestrial recordings, the percentage of affected trees was calculated. Mistletoe infestation has spread in terms of mean number of infested trees per plot and mean number of mistletoes per infested tree as well as the percentage of plots showing mistletoe infestation. Distribution centers in Bavaria are in Middle Franconia and the Bavarian Forest.

Stand structure was expressed in an index and compared between infested and non-infested plots. No statistical differences could be found here. Also, there was no hint of an altered horizontal distribution of infested trees compared with other random subsamples of the same size. On the other hand, examining the number of infested subplots per plot showed that mostly either none or all subplots were infested.

With GIS software, the distance from every individual tree to the next forest edge (within 25 m) was calculated. The distance from forest edges showed no relevant differences between infested and uninfested trees. Still, a higher percentage of trees was found to be infested in 5 to 10 m distance from the forest edge than in all other distance classes.

Data on climate, soil and water supply were used to create a logistic regression model explaining the mistletoe infestation. Most important explaining parameters were the temperature during vegetation time, the magnesium supply from the soil and the potential drought stress expressed as the transpiration difference.

Mistletoes were found to mainly infest trees in the lower part of the altitudinal distribution of each host tree species and to have a limitation in maximum elevation, above which infestation is much less likely. Also, mistletoe infestations tend to occur on less steep slopes and with a peak at south-southwest aspect. A relation between topography and temperature is very likely to be the main influence.

Radial growth of infested trees seemed to be generally higher, but the effect was influenced by a higher infestation probability on trees having a higher social status. Comparing only trees of the same social class, growth was slightly decreasing in infested trees and from 2013 on up to 2017 was also partly lower than in uninfested ones.

A critical limit of infestation severity above which mistletoe infestation caused constant and irreversible impairment of tree vigor and growth in accordance with the site could not be determined. Also, further research would be needed about the economic consequences, negative and positive, of mistletoe infestation.

9. Literaturverzeichnis

- Alfaro, R. I.; Bloomberg, W. J.; Smith, R. B.; Thomson, A. J. (1985): Epidemiology of dwarf mistletoe in western hemlock stands in south coastal British Columbia. In: *Can. J. For. Res.* 15 (5), S. 909–913. DOI: 10.1139/x85-146.
- Aukema, Juliann E.; Martínez del Rio, Carlos (2002): Where does a fruit-eating bird deposit mistletoe seeds? Seed deposition patterns and an experiment. In: *Ecology* 83 (12), S. 3489–3496. DOI: 10.1890/0012-9658(2002)083[3489:WDAFEB]2.0.CO;2.
- Barbu, Cătălina (2009): Impact of mistletoe attack (*Viscum album* ssp. *abietis*) on the radial growth of silver fir. A case study in the North of Eastern Carpathians. In: *Annals of Forest Research* 52 (1), S. 5.
- Beven, K. J.; Kirkby, Michael J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. In: *Hydrological Sciences Journal* 24 (1), S. 43–69.
- Biber, Peter (1997): Analyse verschiedener Struktur Aspekte von Waldbeständen mit dem Wachstumssimulator SILVA 2. In: *Vortrag anlässlich der Jahrestagung*, S. 100–120.
- Bigler, Christof; Bräker, Otto Ulrich; Bugmann, Harald; Dobbertin, Matthias; Rigling, Andreas (2006): Drought as an Inciting Mortality Factor in Scots Pine Stands of the Valais, Switzerland. In: *Ecosystems* 9 (3), S. 330–343. DOI: 10.1007/s10021-005-0126-2.
- blah238@StackExchange (2012): Exporting data from Collect Values output in ArcGIS ModelBuilder? Online verfügbar unter <https://gis.stackexchange.com/questions/25998/exporting-data-from-collect-values-output-in-arcgis-modelbuilder>, zuletzt geprüft am 08.09.2017.
- Blaschke, Markus; Mayer, Franz-Josef von; Holland-Moritz, Holger (2004): Waldschädlicher Schmarotzer oder Goldgrube? In: *LWF aktuell* 47, S. 37.
- BMEL (2012): Bundeswaldinventur. Unser Wald - nutzen und bewahren. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.bundeswaldinventur.de/>, zuletzt geprüft am 15.09.2017.
- BMEL (2016): Forstliches Umweltmonitoring in Deutschland. Durchführungskonzept Forstliches Umweltmonitoring. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin.
- BMELV (2011): Aufnahmeanweisung für die dritte Bundeswaldinventur (2011-2012). Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bonn.
- Brundage@StackExchange (2015): Randomly subsetting X% of selected points using ArcPy? Online verfügbar unter <https://gis.stackexchange.com/questions/78251/randomly-subsetting-x-of-selected-points-using-arcpy>, zuletzt geprüft am 08.09.2017.
- Chambers, John M.; Cleveland, William S.; Kleiner, Beat; Tukey, Paul A. (1983): Graphical methods for data analysis. Belmont, CA: Wadsworth (1).
- Clark, Philip J.; Evans, Francis C. (1954): Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. In: *Ecology* 35 (4), S. 445–453.
- Dobbertin, M.; Rigling, A. (2006): Pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) contributes to Scots pine (*Pinus sylvestris*) mortality in the Rhone valley of Switzerland. In: *Forest Pathology* 36 (5), S. 309–322.
- Dobbertin, Matthias (2005): Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress. A review. In: *Eur J Forest Res* 124 (4), S. 319–333. DOI: 10.1007/s10342-005-0085-3.
- Donohue, Kathleen (1995): The Spatial Demography of Mistletoe Parasitism on a Yemeni Acacia. In: *International Journal of Plant Sciences* 156 (6), S. 816–823.

- Durand-Gillmann, Marion; Cailleret, Maxime; Boivin, Thomas; Nageleisen, Louis-Michel; Davi, Hendrik (2014): Individual vulnerability factors of Silver fir (*Abies alba* Mill.) to parasitism by two contrasting biotic agents: mistletoe (*Viscum album* L. ssp. *abietis*) and bark beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) during a decline process. In: *Annals of forest science* 71 (6), S. 659–673.
- Ecke, Simon (2017): Aufnahme hochaufgelöster Luftbilder mittels UAV zur Visualisierung und räumlichen Analyse von Kiefernmisteln (*Viscum album* ssp. *austriacum* (Wiesb.) Vollmann) an Waldkiefern (*Pinus sylvestris* L.). Bachelorarbeit. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Freising. Fakultät für Wald und Forstwirtschaft.
- Eilmann, Britta; Zweifel, Roman; Buchmann, Nina; Graf Pannatier, Elisabeth; Rigling, Andreas (2011): Drought alters timing, quantity, and quality of wood formation in Scots pine. In: *Journal of experimental botany* 62 (8), S. 2763–2771. DOI: 10.1093/jxb/erq443.
- Escher, H. Peter (2004): Untersuchungen zur C, N und S Akquisition durch *Viscum album*.
- Falk, Wolfgang; Dietz, Elke; Grünert, Sven; Schultze, Bernd; Kölling, Christian (2008): Wo hat die Fichte genügend Wasser?. Neue überregional gültige Karten des Wasserhaushalts von Fichtenbeständen verbessern die Anbauentscheidung. In: *LWF aktuell* (66), S. 21–25.
- Glatzel, G. (1983): Mineral nutrition and water relations of hemiparasitic mistletoes. A question of partitioning. Experiments with *Loranthus europaeus* on *Quercus petraea* and *Quercus robur*. In: *Oecologia* 56 (2), S. 193–201.
- Grazi, Gianfranco; Urech, Konrad (1996): Meisen und Misteln. In: *Gefied. Welt* 21 (6), S. 206–207.
- Grundmann, Britt; Pietzarka, Ulrich; Roloff, Andreas (2010): *Viscum album*. In: *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie*.
- Guest, Jonathan (2010): Misteldrossel *Turdus viscivorus* und Tannenmistel *Viscum album abietis*. In: *Ornithologischer Anzeiger* (49), S. 203–206.
- Hartmann, T. (1990): Die Kiefernmistel im Raum Schwabach/Mittelfranken. In: *AFZ/Der Wald* 45, S. 914–916.
- Hartmann, T. (1997): Ein Plädoyer für die Misteln im Naturhaushalt! Kiefernmistel contra ökologischem Waldbau? In: *AFZ/Der Wald* 52, S. 52.
- Hawksworth, F. G.; Scharpf, R. F. (1986): Spread of European mistletoe (*Viscum album*) in California, USA. In: *Forest Pathology* 16 (1), S. 1–5.
- Hilker, N.; Rigling, A.; Dobbertin, M. (2005): Mehr Misteln wegen der Klimaerwärmung? In: *Wald und Holz* 86 (3), S. 39–42.
- Hosseini, Seyed M.; Kartoolinejad, Davoud; Mirnia, Seyed K.; Tabibzadeh, Zahra; Akbarinia, Moslem; Shayanmehr, Fatemeh (2007): The effects of *Viscum album* L. on foliar weight and nutrients content of host trees in Caspian forests (Iran). In: *Polish Journal of Ecology* 55 (3), S. 579.
- IBM Corp. (2012): IBM SPSS Statistics for Windows, version 21.0. In: *IBM Corp., Armonk, NY*.
- ICP Forests (Hg.) (2010): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests). Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP). UNECE, Hamburg.
- ICP Forests (2017): A programme aiming at a comprehensive compilation of information on the condition of forests in Europe and beyond. ICP Forests. Online verfügbar unter <http://icp-forests.net/>, zuletzt geprüft am 15.09.2017.
- Institut für Waldökosysteme (2017): Internationales Kooperationsprogramm Wälder (ICP Forests). Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Eberswalde. Online verfügbar unter <https://www.thuenen.de/de/wo/arbeitsbereiche/waldmonitoring>, zuletzt geprüft am 15.09.2017.

- Kanat, Mehmet; Alma, M. Hakkı; Sivrikaya, Fatih (2010): The effect of *Viscum album* L. on annual diameter increment of *Pinus nigra* Arn. In: *African Journal of Agricultural Research* 5 (2), S. 166–171.
- Klemmt, Hans-Joachim (2016): Waldränder in Bayern. In: *AFZ/Der Wald* (2), S. 28–30.
- Kołodziejek, Jeremi; Kołodziejek, Adam (2013): The spatial distribution of Pine Mistletoe *Viscum album* ssp. *Austriacum* (WIESB.) Vollmann in a Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) stand in central Poland. In: *Pol. J. Ecol* 61 (4), S. 705–714.
- Kraft, Gustav (1884): Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover: Klindworth.
- Kramer, Horst; Akça, Alparslan (2008): Leitfaden zur Waldmesslehre. 5., überarb. Aufl. Frankfurt am Main: Sauerländer, J D.
- Lamont, B. B. (1983): Mineral nutrition of mistletoes. In 'The biology of mistletoes'. (Eds M Calder, P Berhard) pp. 129–143: Academic Press: Sydney, Australia.
- Levey, Douglas John; Silva, Wesley R.; Galetti, Mauro (2002): Seed dispersal and frugivory. Ecology, evolution, and conservation: CABI.
- LWF (2017): Umweltmonitoring. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Freising. Online verfügbar unter <http://www.lwf.bayern.de/boden-klima/umweltmonitoring>, zuletzt geprüft am 15.09.2017.
- Marschner, Horst (2011): Marschner's mineral nutrition of higher plants: Academic press.
- Mathiasen, Robert L.; Nickrent, Daniel L.; Shaw, David C.; Watson, David M. (2008): Mistletoes. Pathology, Systematics, Ecology, and Management. In: *Plant Disease* 92 (7), S. 988–1006. DOI: 10.1094/PDIS-92-7-0988.
- Mellado, Ana; Zamora, Regino; Barton, Kasey (2017): Parasites structuring ecological communities. The mistletoe footprint in Mediterranean pine forests. In: *Funct Ecol* 31 (11), S. 2167–2176. DOI: 10.1111/1365-2435.12907.
- Mutlu, Salih; Osma, Etem; İlhan, Veli; Turkoglu, Halil Ibrahim; Atici, Okkes (2016): Mistletoe (*Viscum album*) reduces the growth of the Scots pine by accumulating essential nutrient elements in its structure as a trap. In: *Trees* 30 (3), S. 815–824.
- Nierhaus-Wunderwald, Dagmar; Lawrenz, Peter (1997): Zur Biologie der Mistel. In: Merkblatt für die Praxis, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf 28, S. 1–8.
- Noetzli, Konrad Philipp; Müller, Beat; Sieber, Thomas Niklaus (2003): Impact of population dynamics of white mistletoe (*Viscum album* ssp. *abietis*) on European silver fir (*Abies alba*). In: *Annals of forest science* 60 (8), S. 773–779.
- Overton, Jacob McC. (1994): Dispersal and infection in mistletoe metapopulations. In: *Journal of Ecology*, S. 711–723.
- Overton, Jacob McC. (1996): Spatial autocorrelation and dispersal in mistletoes. Field and simulation results. In: *Vegetatio* 125 (1), S. 83–98. DOI: 10.1007/BF00045207.
- Petercord, Ralf; Wauer, Alexandra; Krüger, Florian; Wallerer, Günter (2017): Grüne Mitesser. In: *LWF aktuell* (112), S. 18–22.
- Pfiz, Michael; Küppers, Manfred (2010): Dense crowns of the hemiparasitic mistletoe *Viscum album* L. exhibit shrub-like growth and high dry matter turnover. In: *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 205 (12), S. 787–796.
- Pretzsch, H. (1996): Strukturvielfalt als Ergebnis waldbaulichen Handelns. In: *Allgemeine Forst-und Jagdzeitung* 167 (11), S. 213–221.

- Prodan, M. (1968): Punktstichprobe für die Forsteinrichtung. In: *Der Forst- u. Holzwirt* 23 (11), S. 225–226.
- R Core Team (2017): R: A language and environment for statistical computing. Version. Wien: R Foundation for Statistical Computing. Online verfügbar unter <https://www.R-project.org/>.
- Ramm, Hartmut (2005): Zum Verhalten mistelverbreitender Vögel. In: *Mistilteinn* 6, S. 54–67.
- Ramm, Hartmut (2006): Einfluß bodenchemischer Standortfaktoren auf Wachstum und pharmazeutische Qualität von Eichenmisteln (*Viscum album* auf *Quercus robur* und *petraea*). Dissertation. TU Braunschweig. Online verfügbar unter https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00017211.
- Rigling, Andreas; Eilmann, Britta; Koechli, Roger; Dobbertin, Matthias (2010): Mistletoe-induced crown degradation in Scots pine in a xeric environment. In: *Tree physiology*.
- Rohde, Angelika (2011): Optimal calibration for multiple testing against local inhomogeneity in higher dimension. In: *Probability theory and related fields* 149 (3), S. 515–559.
- Sangüesa-Barreda, Gabriel; Linares, Juan Carlos; Camarero, J. Julio (2012): Mistletoe effects on Scots pine decline following drought events: insights from within-tree spatial patterns, growth and carbohydrates. In: *Tree physiology* 32 (5), S. 585–598. DOI: 10.1093/treephys/tps031.
- Sangüesa-Barreda, Gabriel; Linares, Juan Carlos; Julio Camarero, J. (2013): Drought and mistletoe reduce growth and water-use efficiency of Scots pine. In: *Forest Ecology and Management* 296, S. 64–73. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.01.028.
- Schmid-Haas, P. (1993): Kronenverlichtung und Sterberaten bei Fichten, Tannen und Buchen. In: *Forstw Cbl* 112 (1), S. 325–333. DOI: 10.1007/BF02742162.
- Springer, Simon (2014): Zur Güte von GNSS-Einmessungen im Wald bei Forstinventuren. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Freising. Professur für Waldinventur und Nachhaltige Nutzung.
- Stiebel, Holger (2003): Frugivorie bei mitteleuropäischen Vögeln. Universität Oldenburg.
- Tubeuf, Carl von (1923): Monographie der Mistel. Berlin: Oldenbourg.
- Turc, L. (1961): Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration. A simple climatic formula evolved up to date. In: *Ann. Agron* 12 (1), S. 13–49.
- Watson, David M. (2001): Mistletoe—a keystone resource in forests and woodlands worldwide. In: *Annual Review of Ecology and Systematics* 32 (1), S. 219–249.
- Wauer, Alexandra (2017): Waldzustandsinventur in Bayern. Arbeitsanweisung für die Aufnahme im Gelände. Hg. v. Landesinventurleitung Bayern der Waldzustandserhebung. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Freising.

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Schematischer Aufbau eines Level 1-Traktes der Waldzustandserhebung. Ein Trakt besteht aus vier Stichprobenmittelpunkten, die die Ecken eines Quadrats mit einer Seitenlänge von 150 m darstellen. Dort werden alle Bäume, die in einer Winkelzählprobe mit Faktor 4 gezählt werden, aufgenommen. Zusätzlich wird an Ecke 1 in je 25 m Entfernung in jede Haupthimmelsrichtung eine Sechsstichprobe nach Prodan (1968) angelegt („Kreuztrakt“). Quelle: Wauer (2017), verändert	22
Abbildung 2 - Karte der Bayerische Waldklimastationen. Die hier untersuchten Flächen sind rot umrandet. Quelle: LWF (2017), verändert	23
Abbildung 3 - Inneres Modell zur Durchführung des multiplen Randomisierungstests zur Signifikanzberechnung des Clark&Evans-Index.....	32
Abbildung 4 - Mittleres Modell zur Durchführung des multiplen Randomisierungstests zur Signifikanzberechnung des Clark&Evans-Index.....	33
Abbildung 5 - Äußeres Modell zur Durchführung des multiplen Randomisierungstests zur Signifikanzberechnung des Clark&Evans-Index.....	34
Abbildung 6 - Entwicklung des Anteils von Misteltrakten an der gesamten Traktanzahl (blau) und von Mistelbäumen an der gesamten Kiefern- und Tannenanzahl je Trakt (grün) sowie Entwicklung der mittleren Mistelanzahl (rot) und Mistelstufe (beige) der Kiefern und Tannen von 2007 bis 2017. Daten zur Mistelanzahl wurden ab 2013, zur Mistelstufe ab 2014 aufgenommen. Die Fehlerbalken stellen den einfachen Standardfehler dar.....	36
Abbildung 7 - Räumliche Entwicklung des Anteils mistelbefallener Kiefern und Tannen an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen je Trakt. Dargestellt sind nur die in jedem der Jahre 2007 bis 2017 aufgenommenen Trakte.....	38
Abbildung 8 - Räumliche Entwicklung des Anteils mistelbefallener Kiefern und Tannen an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen je Trakt. Dargestellt sind alle im jeweiligen Jahr aufgenommenen Trakte mit Kiefern und Tannen sowie nicht aufgenommene Trakte und Trakte ohne Kiefern und Tannen in weiß (n.a. = nicht aufgenommen).	39
Abbildung 9 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede des GAS-Index zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1). Zwei extreme Ausreißer der Gruppe M0 mit einem GAS-Index über 30 wurden aus Lesbarkeitsgründen nicht dargestellt.....	40
Abbildung 10 - Anteile der von Misteln befallenen (M1, orange, n=19) und der unbefallenen (M0, blau, n=52) Kiefern und Tannen an den Klassen des Waldrandabstandes für Waldaußenränder (Rart1, siehe auch Tabelle 1). Die Gesamtzahl aller betrachteten Kiefern und Tannen je Traktecke entspricht 100%.....	42
Abbildung 11 - Anteil der von Misteln befallenen (M1, orange, n=4) und der unbefallenen (M0, blau, n=70) Kiefern und Tannen an den Klassen des Waldrandabstandes für Bestandesgrenzen mit starkem Bestandeshöhenunterschied (Rart3, siehe auch Tabelle 1). Die Gesamtzahl aller betrachteten Kiefern und Tannen je Traktecke entspricht 100%.	43

Abbildung 12 - Anteil der von Misteln befallenen (M1, orange, n=20) und der unbefallenen (M0, blau, n=234) Kiefern und Tannen an den Klassen des Waldrandabstandes für sonstige eingemessene Bestandesgrenzen (Rart4, siehe auch Tabelle 1). Die Gesamtzahl aller betrachteten Kiefern und Tannen je Traktecke entspricht 100%.....	43
Abbildung 13 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Umweltvektoren Ca_aus_vor_kmolha (Calciumvorrat), K_aus_vor_kmolha (Kaliumvorrat) und Mg_aus_vor_kmolha (Magnesiumvorrat) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)	45
Abbildung 14 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Umweltvektoren Corg (organischer Kohlenstoffgehalt) und N_Vor_theta (Stickstoffvorrat) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1).....	46
Abbildung 15 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Umweltvektoren T_5to9 (Mitteltemperatur Mai bis September) und T_678 (Mitteltemperatur Juni bis August) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1).....	47
Abbildung 16 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern und Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt), bzw. des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Baumzahl) und den Umweltvektoren T_5to9 (Mitteltemperatur Mai bis September) und T_678 (Mitteltemperatur Juni bis August) (Erklärung siehe Tabelle 2)	48
Abbildung 17 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Umweltvektoren P_5to9 (Niederschlagsmittel Mai bis September) und P_678 (Niederschlagsmittel Juni bis August) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1).....	49
Abbildung 18 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern und Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt), bzw. des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Baumzahl) und den Umweltvektoren P_5to9 (Niederschlagsmittel Mai bis September) und P_678 (Niederschlagsmittel Juni bis August) (Erklärung siehe Tabelle 2)	50
Abbildung 19 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede des Umweltvektors Tdiff (Transpirationsdifferenz) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1).....	51
Abbildung 20 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede des Umweltvektors ETp_5to9_Turc (potentielle Evapotranspiration) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1).....	52

Abbildung 21 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern und Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt), bzw. des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Baumzahl) und dem Umweltvektor ETp_5to9_Turc (potentielle Evapotranspiration) (Erklärung siehe Tabelle 2)	52
Abbildung 22 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Umweltvektoren KWB_5to9_Turc (klimatische Wasserbilanz) und WB_5to9_Turc (Wasserbilanz) (Erklärung siehe Tabelle 2) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern und Tannen der Traktecke größer 0“ (M1).....	53
Abbildung 23 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern und Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt), bzw. des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern und Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Baumzahl) und den Umweltvektoren KWB_5to9_Turc (klimatische Wasserbilanz) und WB_5to9_Turc (Wasserbilanz)	54
Abbildung 24 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Höhe über NN in m (Höhe) zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke größer 0“ (M1).....	55
Abbildung 25 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern, bzw. Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt) sowie des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Ki/Ta_Anzahl) und der Höhe über NN in m (Höhe).....	56
Abbildung 26 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Hangneigung (Slope) in Grad zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke größer 0“ (M1)	57
Abbildung 27 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Hangrichtung (Exposition; Aspect) in Grad zwischen den Gruppen „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke gleich 0“ (M0) und „durchschnittliche Mistelzahl aller Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke größer 0“ (M1).....	58
Abbildung 28 - Streudiagramme zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Mistelanzahl aller Kiefern, bzw. Tannen je Traktecke (MEAN_Mi_gesamt), sowie des Anteils der von Misteln befallenen Bäume an der Gesamtzahl der Kiefern, bzw. Tannen der Traktecke (Mistelbaeume_pro_Ki/Ta_Anzahl) und der Hangrichtung (Aspect) in Grad	59
Abbildung 29 - Terrestrisch festgestellte Anzahl Bäume mit Mistelbefall bei kumulierter Betrachtung verschieden langer Mehrjahresperioden vergangener Aufnahmejahre ausgehend von der aktuellsten vorliegenden Aufnahme (2016). „kumulierte Anzahl der Bäume mit Mistelbefall (y-Achse) in der Periode von 2016 bis 2014 (x-Achse)“ bedeutet z.B. die Anzahl der Bäume, an denen in mindestens einem der Jahre 2014, 2015 und 2016 ein Mistelbefall festgestellt wurde.....	60
Abbildung 30 - Räumliche Darstellung der mistelbefallenen (1) sowie unbefallenen (0) Kiefern an den Waldklimastationen Altdorf (ALT) und Dinkelsbühl (DIN). Zur Erläuterung der Abkürzungen der Vergleichskollektive siehe Tabelle 11.....	64

Abbildung 31 - Entwicklung der Anzahl der von Misteln befallenen Bäume (aus terrestrischer Erhebung) für die Level 2-Flächen Waldklimastation Altdorf (ALT) und Dinkelsbühl (DIN). Für ALT waren 2010 keine Daten verfügbar.....	65
Abbildung 32 - Entwicklung des relativen Anteils der von Misteln befallenen Bäume (aus terrestrischer Erhebung) an der gesamten Baumzahl des Bestandes für die Level 2-Flächen Waldklimastation Altdorf (ALT) und Dinkelsbühl (DIN) und in der Summe (Gesamt) sowie Entwicklung der Anzahl von Bäumen im Gesamtbestand (n ALT; n DIN). Für ALT waren 2010 keine Daten verfügbar.....	65
Abbildung 33 - Durchschnittliche Anzahl terrestrisch erhobener Mistelbüsche pro befallenem Baum (Aufnahme ab 2013).....	66
Abbildung 34 - Durchschnittliche Mistelstufe (terrestrische Erhebung) befallener Bäume.....	66
Abbildung 35 - Entwicklung der Mittelwerte von jährlichem mittlerem Grundflächenzuwachs, mittlerer Kraft-Klasse und Anzahl der terrestrisch erfassten Mistelbüsche über die Zeit zwischen den Extremkollektiven „beide0“ und „overlap1“ (Erläuterung der Abkürzungen siehe Tabelle 11).....	69
Abbildung 36 - Boxplots zur Darstellung der mittleren Kraft-Klasse (KKI) (Kraft 1884) über die Baumkollektive (Erklärung siehe Tabelle 11) nach Mistelbefall	70
Abbildung 37 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Kronenprojektionsfläche zwischen den Baumkollektiven (Erklärung siehe Tabelle 11) nach Mistelbefall.....	70
Abbildung 38 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung der Unterschiede der Kronenprojektionsfläche zwischen den Baumkollektiven (Erklärung siehe Tabelle 11) nach Mistelbefall für die zwei Extremgruppen.....	71
Abbildung 39 - Verlauf des jährlichen mittleren Grundflächenzuwachses der bzgl. Mistelbefall unterschiedlichen Baumkollektive „beide0“ sowie „overlap1“ (Erklärung siehe Tabelle 11) sowie der Steigung der Geraden durch den mittleren Grundflächenzuwachs des aktuellen und des vorherigen Jahres (erste Ableitung) je Kollektiv (Erklärung siehe Tabelle 11) für Bäume der Kraft-Klasse 1. Die Fehlerindikatoren stellen den einfachen Standardfehler des Jahresmittelwertes dar.....	72
Abbildung 40 - Verlauf des jährlichen mittleren Grundflächenzuwachses der bzgl. Mistelbefall unterschiedlichen Baumkollektive „beide0“ sowie „overlap1“ (Erklärung siehe Tabelle 11) sowie der Steigung der Geraden durch den mittleren Grundflächenzuwachs des vorherigen Jahres (erste Ableitung) je Kollektiv (Erklärung siehe Tabelle 11) für Bäume der Kraft-Klasse 2. Die Fehlerindikatoren stellen den einfachen Standardfehler des Jahresmittelwertes dar.....	73
Abbildung 41 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung des mittleren jährlichen Grundflächenzuwachses in cm ² in der Periode von 2001 bis 2016, gruppiert nach bzgl. Mistelbefall verschiedenen Baumkollektiven (Erklärung siehe Tabelle 11), getrennt für die Kraft-Klassen 1 (oben) und 2 (unten).....	74
Abbildung 42 - Eingeschnürte Boxplots zur Darstellung des mittleren jährlichen Grundflächenzuwachses in cm ² in der Periode von 2001 bis 2016, gruppiert nach bzgl. Mistelbefall verschiedenen Baumkollektiven für die beiden Extremkollektive (Erklärung siehe Tabelle 11), getrennt für die Kraft-Klassen 1 und 2	75

11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Randarten (Rart) nach BMELV (2011).....	27
Tabelle 2 - Erklärung der verwendeten Umweltvektor-Codes.....	28
Tabelle 3 – Entwicklung der Anzahl von Trakten mit Mistelbefall von 2011 bis 2013.....	37
Tabelle 4 - Anteile der Ecken mit Mistel an der gesamten Zahl bewaldeter Ecken.....	41
Tabelle 5 - Kreuztabelle der Anzahl der Kiefern und Tannen mit den kombinierten Merkmalen Mistel ja/nein und Waldrand ja/nein	41
Tabelle 6 - Statistischer Test auf Unabhängigkeit der Faktoren „Waldrandlage“ und „Mistelbefall“ ..	41
Tabelle 7 - Darstellung der Modellansätze zur Erklärung der kategorialen Variablen „Mistel ja/nein“ durch Umweltvektorparameter mit einer logistischen Regression. Auf 90% signifikante Parameter sind mit * markiert. Der AIC-Wert gibt die Erklärungsgüte des Modells unter Einbeziehung von residualer Abweichung und Freiheitsgraden an. Zur Erklärung der Bedeutung der Umweltvektorparameter siehe Tabelle 2. Die Verknüpfung der Parameter erfolgte entweder ohne (+) oder mit (*) Betrachtung der Wechselwirkungen untereinander.	44
Tabelle 8 - Kumulierte Anzahl der terrestrisch festgestellten Mistelbäume in der jeweiligen Periode. „Periode seit 2014“ bedeutet z.B. die Anzahl der Bäume, an denen in mindestens einem der Jahre 2014, 2015 und 2016 ein Mistelbefall festgestellt wurde.	60
Tabelle 9 - Kreuztabelle terr * drohne (Erklärung der Abkürzungen siehe Tabelle 11).....	62
Tabelle 10 - χ^2 -Unabhängigkeitstest zwischen den Variablen terr und drohne (Erklärung der Abkürzungen siehe Tabelle 11)	62
Tabelle 11 - Erklärung der bei der Auswertung verwendeten Baumkollektive	63
Tabelle 12 - Ergebnisse für die Berechnung des Clark&Evans-Index für verschiedene Subkollektive von Probestämmen der Waldklimastationen Altdorf (ALT) und Dinkelsbühl (DIN) (Erklärung der Abkürzungen siehe Tabelle 11) sowie Baumzahl und Fläche des jeweiligen Subkollektiv. Außerdem sind beobachteter und erwarteter mittlerer Abstand und der daraus berechnete Clark&Evans-Index je Kollektiv angegeben. p gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass es sich bei der Berechnung um ein zufälliges Ergebnis handelt.....	67
Tabelle 13 - Anzahl der Bäume und Fläche je Subkollektiv (Erklärung der Abkürzungen siehe Tabelle 11). Aus den zufällig ausgewählten Subkollektiven mit gleicher Baumanzahl wurden Mittelwert und Standardabweichung bestimmt und damit die Mittelwertdifferenz z auf eine Standardnormalverteilung angepasst. Die Wahrscheinlichkeit p, dass die Hypothese H_0 (z liegt innerhalb der Konfidenzintervalle der Normalverteilung) gültig ist, wurde anhand einer Normalverteilungstabelle bestimmt.	68
Tabelle 14 - Nichtparametrischer Spearman-Korrelationstest der Faktoren „Grundflächenzuwachs über die gesamte Periode 2001 bis 2016“ (G_Zuwachs), „Kraft-Klasse“ (KKI) und „Kronenprojektionsfläche“ (KPF)	71

12. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Abt.	Abteilung
ALT	Waldklimastation Altdorf
BaSIS	Bayerisches Standortinformationssystem
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
d.h.	das heißt
DIN	Waldklimastation Dinkelsbühl
durchschn.	durchschnittlich
engl.	englisch
evtl.	eventuell
ggf.	gegebenenfalls
i.d.R	in der Regel
KAK	Kationenaustauschkapazität
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
m	Meter
mm	Millimeter
M.Sc.	Master of Science
o.ä.	oder ähnliche(s)
ssp.	Subspezies
u.a.	unter anderem
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, ugs. auch "Drohne"
ugs.	umgangssprachlich
v.a.	vor allem
VBA	Visual Basic for Applications (Programmiersprache)
vgl.	vergleiche
WKS	Waldklimastation
WZE	Waldzustandserhebung
z.B.	zum Beispiel

13. Anhang

13.1. VBA-Programmroutine zur automatischen Berechnung des GAS-Index

```
Sub GASIndex()  
'ueberpruefen ob Voraussetzungen erfuehrt sind, sonst abbrechen  
Check = MsgBox("Das Jahr wird in diesem Skript nicht  
beruecksichtigt. Sat ungleich 0 ist rausgeloescht (nur Ecken werden  
betrachtet). Datei muss wie folgt sortiert sein: 1. Nach Tnr  
aufsteigend 2. Nach Enr aufsteigend 3. nach Ba aufsteigend. Tnr  
steht in Spalte C, Enr in Spalte D, Ba in Spalte H, Grundflaeche in  
cm2 in Spalte L. Ist dies der Fall?", (vbYesNo))  
If Check = vbNo Then  
MsgBox "Bitte Voraussetzungen schaffen und erneut starten"  
Exit Sub  
End If  
'letzte Zeile feststellen  
lastrow = Tabelle1.Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row  
'Damit auch letzter Datensatz bearbeitet wird, Endmarke nach der  
letzten Zeile einfuegen  
Cells(lastrow + 1, 1) = "Ende"  
Cells(lastrow + 1, 2) = "Ende"  
Cells(lastrow + 1, 3) = "Ende"  
Cells(lastrow + 1, 4) = "Ende"  
'letzte Zeile neu feststellen (ist jetzt 1 mehr)  
lastrow = Tabelle1.Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row  
'Noch ist nichts ausgewertet  
AnzahlEcken = 0  
AnzahlBa = 0  
'fuer erste Zeile GEV (Grundflaeche der analysierten Ecke) und nEV  
(Baumzahl der Ecke) setzen  
GEV = Cells(2, 12).Value  
nEV = 1  
'Gesamte Grundflaeche der TnrEnrE (momentan analysierte Ecke)  
feststellen - E angehaengt um von eckenweise von baumweiser Analyse  
zu unterscheiden  
For e = 2 To lastrow  
'Tnr und Enr der aktuellen Zeile auslesen  
TnrE = Cells(e, 3).Value  
EnrE = Cells(e, 4).Value  
TnrEnrE = TnrE & EnrE  
'Tnr und Enr der vorherigen zeile auslesen  
TnrEV = Cells(e - 1, 3).Value  
EnrEV = Cells(e - 1, 4).Value  
TnrEnrEV = TnrEV & EnrEV  
If TnrEnrE = TnrEnrEV Then  
'Gleicher Tnr und Enr wie Zeile vorher  
'Grundflaeche und Baumzahl der TnrEnr weiter aufsummieren  
GEV = GEV + Cells(e, 12).Value  
nEV = nEV + 1  
ElseIf TnrEnrE <> TnrEnrEV Then  
'Neue Ecke beginnt  
'Erste Zeile ausschließen, denn da stehen nur die Spaltentitel  
If e > 2 Then  
'Tieferliegende Schleife über die j Baumarten dieser Ecke ausfuehren  
For j = (e - nEV) To e
```

```

'aktuelle Zeile auslesen
Tnr = Cells(j, 3).Value
Enr = Cells(j, 4).Value
Ba = Cells(j, 8).Value
'vorherige Zeile auslesen
TnrV = Cells(j - 1, 3).Value
EnrV = Cells(j - 1, 4).Value
BaV = Cells(j - 1, 8).Value
TnrEnr = Tnr & Enr
TnrEnrV = TnrV & EnrV
TnrEnrBa = Tnr & Enr & Ba
TnrEnrBaV = TnrV & EnrV & BaV
If TnrEnrBa = TnrEnrBaV Then
'Gleiche TnrEnrBa wie Zeile vorher
'Grundflaeche und Baumzahl der Baumart weiter aufaddieren
G = G + Cells(j, 12).Value
n = n + 1
ElseIf TnrEnrBa <> TnrEnrBaV Then
'Ersten Datensatz abfangen, enthaelt nur die Spaltentitel
If AnzahlBa = 0 Then
'Wenn erster Datensatz: G und n gesondert setzen
G = Cells(j, 12).Value
n = 1
'wenn es nicht der erste Datensatz ist hiernach weitermachen
Else
'Zuerst vorherige TnrEnrBa zusammenfassen, Betrag_t fuer jeden der t
Baeume berechnen und zu Faktor 2 aufsummieren
Gmean = G / n
  For t = 1 To n
    Gt = Cells(j - t, 12).Value
    Betrag_t = Abs(((Gt - Gmean) / Gmean))
    'Betrag dieses Baumes zum Faktor 2 dazuddieren
    Faktor2 = Faktor2 + Betrag_t
    Betrag_t = 0
  Next t
'jetzt entspricht Faktor2 dem zweiten Teil der GAS-Formel fuer diese
Baumart
'Der erste Teil der Formel wird mit der relativen Grundflaeche der
TnrEnr, die aus der auessersten Schleife e stammt (GEV), und der
Grundflaeche G der aktuellen Ba berechnet
relG = G / GEV
Faktor1 = ((21 - relG) / 20)
'Berechnen des GASj fuer die aktuelle Baumart j
GASj = (Faktor1 * (1 + Faktor2))
'Aufaddieren des Baumart j-GAS zum gesamten GAS der Ecke
GAS = GAS + GASj
'Summe über TnrEnrBa zuruecksetzen und G und n neu mit erstem Wert
der naechsten Ba beschreiben
G = Cells(j, 12).Value
n = 1
End If
'Eine Baumart mehr analysiert
AnzahlBa = AnzahlBa + 1
'Berechnungen fuer naechste Ba zuruecksetzen
Faktor1 = 0
Faktor2 = 0
relG = 0

```

```

GASj = 0
End If
Next j
'Alle Baumarten dieser Ecke abgearbeitet
'AnzahlEcken um 1 erhoehen, dadurch ergibt sich die Zeile des
Ausgabeblatts
AnzahlEcken = AnzahlEcken + 1
'Werte fuer GAS dieser Ecke in Tabelle2 schreiben
Tabelle2.Cells(AnzahlEcken + 1, 1).Value = TnrEV
Tabelle2.Cells(AnzahlEcken + 1, 2).Value = EnrEV
Tabelle2.Cells(AnzahlEcken + 1, 3).Value = GAS
'Eckenweise Werte zuruecksetzen, bevor naechste Ecke beginnt
GEV = Cells(e, 12).Value
nEV = 1
GAS = 0
End If
Else
'nichts unternehmen
End If
Next e
'Alle Ecken sind durchlaufen
'Endmarkierungen in der letzten Zeile wieder rausschmeissen
Cells(lastrow, 1).Clear
Cells(lastrow, 2).Clear
Cells(lastrow, 3).Clear
Cells(lastrow, 4).Clear
'Tabelle mit der Auswertung anwaehlen
Tabelle2.Select
End Sub

```


13.2. Berechnung von Gauss-Krüger-Koordinaten aus Polarkoordinaten

$$RW4_{Baum} = RW4_{Ecke} + \left[\frac{\overline{d_{Hori}}}{100} * \sin\left(\frac{2\pi}{400} * \alpha_{Azi}\right) \right]$$

$$HW4_{Baum} = HW4_{Ecke} + \left[\frac{\overline{d_{Hori}}}{100} * \cos\left(\frac{2\pi}{400} * \alpha_{Azi}\right) \right]$$

Mit

$RW4_{Baum}$: Rechtswert der Gauss-Krüger-Koordinaten (Zone 4) des Baums

$HW4_{Baum}$: Hochwert der Gauss-Krüger-Koordinaten (Zone 4) des Baums

$RW4_{Ecke}$: Rechtswert der Gauss-Krüger-Koordinaten (Zone 4) der Traktecke

$HW4_{Ecke}$: Hochwert der Gauss-Krüger-Koordinaten (Zone 4) der Traktecke

$\overline{d_{Hori}}$: Horizontale Entfernung des Baums vom Ecken-, bzw. Satellitenmittelpunkt in cm

α_{Azi} : Azimut des Baums vom Ecken-, bzw. Satellitenmittelpunkt aus in [gon]

Für die Bäume der Kreuztrakte musste zusätzlich ein Term für die Umrechnung der als Polarkoordinaten angegebenen Lage der Satellitenmittelpunkte in kartesische Koordinaten eingefügt werden:

$$RW4_{Baum} = RW4_{Ecke} + \left[\frac{\overline{d_{HoriSat}}}{100} * \sin\left(\frac{2\pi}{400} * \alpha_{AziSat}\right) \right] + \left[\frac{\overline{d_{HoriB}}}{100} * \sin\left(\frac{2\pi}{400} * \alpha_{AziB}\right) \right]$$

$$HW4_{Baum} = HW4_{Ecke} + \left[\frac{\overline{d_{HoriSat}}}{100} * \cos\left(\frac{2\pi}{400} * \alpha_{AziSat}\right) \right] + \left[\frac{\overline{d_{HoriB}}}{100} * \cos\left(\frac{2\pi}{400} * \alpha_{AziB}\right) \right]$$

zusätzlich mit

$\overline{d_{HoriB}}$: Horizontale Entfernung des Baums vom Ecken-, bzw. Satellitenmittelpunkt in cm

α_{AziB} : Azimut des Baums vom Ecken-, bzw. Satellitenmittelpunkt aus in [gon]

$\overline{d_{HoriSat}}$: Horizontale Entfernung des Satellitenmittelpunktes vom Eckenmittelpunkt in cm

α_{AziSat} : Azimut des Satellitenmittelpunktes vom Eckenmittelpunkt aus in [gon]

Für die Datenbankabfrage in Microsoft Access wurde die Formel wie folgt umgesetzt:

$RW4_Baum: WENN([WZE_Baumdaten.Sat]=0;[RW4]+((([Hori]/100)*Sin(((2*3,14159)/400)*[Azi]));$
 $[RW4]+((([HoriS]/100)*Sin(((2*3,14159)/400)*[AziS]))+((([Hori]/100)*Sin(((2*3,14159)/400)*[Azi]))))$

$HW4_Baum: WENN([WZE_Baumdaten.Sat]=0;[HW4]+((([Hori]/100)*Cos(((2*3,14159)/400)*[Azi]));$
 $[HW4]+((([HoriS]/100)*Cos(((2*3,14159)/400)*[AziS]))+((([Hori]/100)*Cos(((2*3,14159)/400)*[Azi]))))$

13.3. Programmcode zur logistischen Regressionsmodellierung mit R

```
grunddaten<-
read.csv2("/Lvl1/Umweltvektor/WZE_Mistel_je_Enr_nur_TaKi_Umweltvektor.csv")

summary(grunddaten)

### Mistelvorkommen faktorisieren
grunddaten$Mistel_janein_fac<-as.factor(grunddaten$Mistel_janein)

grunddaten<-subset(grunddaten, is.na(grunddaten$MEAN_Mi_gesamt)==FALSE)
summary(grunddaten)

### Modell 1
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~P_5to9, data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 2
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~P_5to9+T_5to9, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 3
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~P_5to9*T_5to9, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 4
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9, data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 5
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9+BS_perc, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 6
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9+Ca_aus_vor_kmolha, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 7
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Ca_aus_vor_kmolha, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 8
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9+K_aus_vor_kmolha, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 9
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*K_aus_vor_kmolha, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 10
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9+Mg_aus_vor_kmolha, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)
```

```

### Modell 11
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 12
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha+Corg_Gehalt,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 13
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha*Corg_Gehalt,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 14
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha+N_Vor_tha,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 15
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha*N_Vor_tha,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 16
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha+P_5to9,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 17
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha*P_5to9,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 18
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*P_5to9, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 19
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9+P_5to9, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 20
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha+nFK, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 21
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha*nFK, data=grunddaten,
family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 22
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha+Tdiff,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 23
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha*Tdiff,
data=grunddaten, family=binomial())

```

```

summary(mod1)

### Modell 24
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha+Tdiff+KWB_5to9_Turc,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 25
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha+Tdiff+WB_5to9_Turc,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Modell 26
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha*WB_5to9_Turc+Tdiff,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

### Bestes Modell: Modell 23
mod1<-glm(Mistel_janein_fac~T_5to9*Mg_aus_vor_kmolha*Tdiff,
data=grunddaten, family=binomial())
summary(mod1)

```

13.4. ArcPy-Skript zur Zufallsselektion einer bestimmten Anzahl von Features

Quelle: abgewandelt nach Brundage@StackExchange (2015)

```
import arcpy
#arcpy.env.overwriteOutput = True

def SelectRandomByCount (layer, count):
    import random
    arcpy.SelectLayerByAttribute_management(layer, "CLEAR_SELECTION")
    layerCount = int (arcpy.GetCount_management (layer).getOutput (0))
    if layerCount < count:
        print "input count is greater than layer count"
        return
    oids = [oid for oid, in arcpy.da.SearchCursor (layer, "OID@")]
    oidFldName = arcpy.Describe (layer).OIDFieldName
    path = arcpy.Describe (layer).path
    delimOidFld = arcpy.AddFieldDelimiters (path, oidFldName)
    randOids = random.sample (oids, count)
    oidsStr = ", ".join (map (str, randOids))
    sql = "{0} IN ({1})".format (delimOidFld, oidsStr)
    arcpy.SelectLayerByAttribute_management (layer, "", sql)

layer = arcpy.GetParameter(0)
count = arcpy.GetParameter(1)
SelectRandomByCount (layer, count)
success = True
arcpy.SetParameter(2, success)
```

13.5. ArcPy-Skript zum CSV-Export gesammelter Daten

Quelle: abgewandelt nach blah238@StackExchange (2012)

```
import os, csv

def multivaluesToCsv(csvfilepath, csvfilename, cycle, NNRatio, PValue,
NNEExpected, NNObserved, NNZScore):
    ext = 'csv' # Define output file extension (e.g. csv or txt)
    header = ['cycle', 'NNRatio', 'PValue', 'NNEExpected', 'NNObserved',
'NNZScore'] # Define header row (column names)

    # Join CSV file path and name, adding extension if necessary
    csvfile = os.path.join(csvfilepath, os.extsep.join((csvfilename, ext)))
    if not os.path.splitext(csvfilename)[1].lower().endswith(ext) else
csvfilename)

    # Open text file for writing
    with open(csvfile, 'wb') as f:
        w = csv.writer(f)
        w.writerow(header) # Write header row
        rows = zip(*map(lambda x: x.split(';'), [cycle, NNRatio, PValue,
NNEExpected, NNObserved, NNZScore])) # Transpose the semicolon-delimited
values into rows
        w.writerows(rows)
    return csvfile
```

14. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Freising, 21.12.2017

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'K. Behrendt', with a long horizontal stroke extending to the right.

Kai Behrendt

15. CD mit digitalen Inhalten zur Arbeit

- Digitale Version der Arbeit
- Datenbank mit Primärdaten
- Auswahl verwendeter Literatur
- Grafiken und Animationen zur Befallsentwicklung (Level 1 – Waldzustandserhebung)
- Grafiken zur Visualisierung der verschiedenen Baumkollektive (Level 2 – Waldklimastationen)
- Skripte
 - ArcGIS-Modell für den Multiplen Randomisierungstest (siehe 3.3.3. Horizontale Verteilung)
 - VBA-Skript zur Berechnung des GAS-Index (siehe 13.1. VBA-Programmroutine zur automatischen Berechnung des GAS-Index)
 - R-Skript zur logistischen Regressionsmodellierung (siehe 13.3. Programmcode zur logistischen Regressionsmodellierung mit R)
 - ArcPy-Skripte für Zufallsselektion (siehe 13.4. ArcPy-Skript zur Zufallsselektion einer bestimmten Anzahl von Features) und CSV-Export (siehe 13.5. ArcPy-Skript zum CSV-Export gesammelter Daten)