

Universität für Bodenkultur Wien

Modellierung von Einflussgrößen zum  
Radialzuwachs von Fichten nach  
Blattwespen – Befall im Alpenvorland

---

Masterarbeit

Thomas D'Isep

Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz

Betreuer:

PD Dr. Christa Schafellner

Univ. Prof. Dipl.-FW. Dr. Arne Nothdurft

Wien 2019

# Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Wien, im Juli 2019

Thomas Jörg D'Isep

## **Danksagung**

Mein ausdrücklicher Dank gebührt in erster Linie meiner Betreuerin Frau PD Dr. Christa Schafellner. Sie hat ein außergewöhnlich hohes Maß an Geduld während der Betreuung dieser Arbeit aufgebracht. Überdies betrachtete sie die Beantwortung von Fragen jeglicher Art und zu jeder Tageszeit wie selbstverständlich. Diese Fürsorge bei der Betreuung und Mitarbeit musste ich nur allzu oft in Anspruch nehmen. Dafür meinen herzlichen Dank.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Nothdurft für die nie drängende, aber stets intensive Betreuung und Anteilnahme während dieser Arbeit.

Ein Dank gilt auch den Forstschutzreferenten von Oberösterreich, Herrn DI Johann Reisenberger, und von Salzburg, Herrn DI Dr. Ludwig Wiener. Sie sind mir während der Aufnahmen mit Rat und Tat zur Seite gestanden und lieferten unverzichtbare Beiträge bei der Datenfindung.

Ein weiterer Dank gilt den Mitarbeitern des Forstschutzes, Herrn Zabransky Petr, sowie Herrn DI Zelinka Peter. Sie haben mir mit großer Geduld bei der Bohrkerngewinnung sowie bei den Aufnahmen geholfen.

Darüber hinaus möchte ich den Mitarbeitern des Institutes für Waldwachstum, namentlich Gollob Christoph und Wasserman Clemens danken, die mir bei der Vermessung der Bohrkerns sowie der Auswertung hilfreich zur Seite standen.

Ein besonderer Dank ergeht auch an meinen Studienkollegen Stefan Stelzer. Auch er hat sich Zeit genommen, mich bei den Aufnahmen zu unterstützen.

In der Danksagung hervorzuheben sind die Grundeigentümer der Untersuchungsflächen – sie haben es ermöglicht, dass diese Analyse durchgeführt werden konnte.

Allen Freunden und Mitwirkenden aus meinem Bekanntenkreis sowie aus dem Bokuheim gilt ein großes Dankeschön. Viele haben mich persönlich unterstützt und so einen kleinen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet.

Zu guter Letzt möchte ich meinen Eltern von Herzen danken. Sie haben immer ein großes Maß an Verständnis für ihren studierenden Sohn aufgebracht und ihn stets in persönlicher als auch materieller Hinsicht wie selbstverständlich unterstützt.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	8
1.1.	Fragestellungen .....	13
1.2.	Hypothesen.....	13
1.3.	Biologie der Blattwespen .....	14
1.3.1	Die Fichtengebirgsblattwespe <i>Pachynematus montanus</i> .....	14
1.3.2	Die Kleine Fichtenblattwespe <i>Pristiphora abietina</i> .....	15
1.4.	Blattwespen in Fichtenwäldern des nördlichen Alpenvorlands .....	16
2	Material und Methoden .....	18
2.1	Standorte.....	19
2.1.1	Gennersberg.....	19
2.1.2	Bergheim .....	20
2.1.3	Mondseeberg .....	20
2.1.4	Lambach.....	21
2.1.5	Hasenkopf.....	22
2.2	Auswahl der Probebäume und Bohrkernentnahme .....	23
2.3	Vermessung der Bohrkernkerne .....	25
2.4	Witterungsdaten.....	26
2.5	Statistische Auswertung .....	28
2.5.1	Crossdating und Gleichläufigkeit .....	28
2.5.2	Kovariablen .....	29

3	Ergebnisse .....	34
3.1	Witterungsverlauf und Durchforstungen im Zeitraum 1960-2017 .....	34
3.2	Einfluss einzelner Variablen auf die Jahrringbreite .....	37
3.3	Tests der Modellgüte .....	43
3.4	Gegenüberstellung der Modellberechnungen.....	45
3.5	Hypothesentest .....	54
4	Diskussion .....	55
5	Schlussfolgerung/Ausblick.....	63
6	Zusammenfassung .....	64
7	Literaturverzeichnis.....	66
8	Anhang .....	70

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1. Lageskizze Untersuchungsstandorte LB: Lambach 350 m, GB: Gennersberg 450 m, HK: Hasenkopf 850 m, BH: Bergheim 430 m, MB: Mondseeberg 800-1000 m.	17
Abb. 2. Baumkennzeichnung G: Gesund Nr. 2 am Standort Lambach (Nov 2017).	24
Abb. 3. Baumkennzeichnungen und Zuwachsbohrung am Standort Lambach (Jän 2018).	24
Abb. 4. Jahresgesamtniederschlag am Standort Gennersberg mit negativen Weiserjahren.	26
Abb. 5. Digitalpositiometer zum Vermessen des Radialzuwachses.	26
Abb. 6. Untersuchungsstandorte (rot) und Wetterstationen (blau).	26
Abb. 7. Residuenhäufigkeit und Residuen in Q-Q Darstellung.	31
Abb. 8. Logarithmierte Zuwächse, Häufigkeit der Residuen und Q-Q Darstellung.	31
Abb. 9. Witterungsentwicklung der einzelnen Standorte von 1960 bis 2017.	36
Abb. 10. Verteilung der einzelnen Zufallseffekte um den geschätzten Mittelwert von 0 (Imm1.log).	39
Abb. 11. Histogramm des Restfehlers der Schätzung (Imm1.log).	40
Abb. 12. Histogramm des Zufallseffekts Jahr (Imm1.log).	40
Abb. 13. Verteilung der einzelnen Zufallseffekte um den geschätzten Mittelwert von 0 (Imm1x.log).	42
Abb. 14. Histogramm des Zufallseffekts Jahr (Imm1x.log).	43
Abb. 15. Histogramm des Restfehlers der Schätzung (Imm1x.log).	43
Abb. 16. Befallsstandorte mit Zeiträumen einer Massenvermehrung (MV) von Blattwespen und Zeitpunkte von Durchforstungen (DF) inklusive Jahre mit Durchforstungseffekten.	48
Abb. 17. Standort Gennersberg, gemittelte Jahrringbreiten (1/100 mm) (grün), Indexverhältnis Nq2 (blau), Indexverhältnis Tq2 (rot), MV... Massenvermehrung; Pa... <i>Pristiphora abietina</i> (Kleine Fichtenblattwespe), Pm... <i>Pachynematus montanus</i> (Fichtengebirgsblattwespe)	51
Abb. 18. Standort Bergheim, gemittelte Jahrringbreiten (1/100 mm) (grün), Indexverhältnis Nq2 (blau), Indexverhältnis Tq2 (rot), MV... Massenvermehrung; Pa... <i>Pristiphora abietina</i> (Kleine Fichtenblattwespe), Pm... <i>Pachynematus montanus</i> (Fichtengebirgsblattwespe)	51
Abb. 19. Standort Mondseeberg, gemittelte Jahrringbreiten (1/100 mm) (grün), Indexverhältnis Nq2 (blau), Indexverhältnis Tq2 (rot), MV... Massenvermehrung; Pa... <i>Pristiphora abietina</i> (Kleine Fichtenblattwespe), Pm... <i>Pachynematus montanus</i> (Fichtengebirgsblattwespe)	52

Abb. 20. Standort Hasenkopf, gemittelte Jahrringbreiten (1/100 mm) (grün), Indexverhältnis Nq2 (blau),  
Indexverhältnis Tq2 (rot), MV... Massenvermehrung; Pa... *Pristiphora abietina* (Kleine Fichtenblattwespe),  
Pm... *Pachynematus montanus* (Fichtengebirgsblattwespe) \_\_\_\_\_ 52

Abb. 21. Standort Lambach, gemittelte Jahrringbreiten (1/100 mm) (grün), Indexverhältnis Nq2 (blau),  
Indexverhältnis Tq2 (rot), MV... Massenvermehrung; Pa... *Pristiphora abietina* (Kleine Fichtenblattwespe),  
Pm... *Pachynematus montanus* (Fichtengebirgsblattwespe) \_\_\_\_\_ 53

Abb. 22. Allgemeine Formel von gemischten linearen Modellen (Knapp, 2017). \_\_\_\_\_ 60

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1. Koordinaten und Seehöhe der Wetterstationen und Verwendung für die jeweiligen Probestandorte</i>	27
<i>Tabelle 2. Gleichläufigkeit der Jahrringbreiten von Befalls- und Referenzbäumen an den Untersuchungsstandorten.</i>	29
<i>Tabelle 3. Ergebnisse der Imm1log Auswertung.</i>	37
<i>Tabelle 4. lme1.log signifikante Einflussgrößen in % und relativer Einfluss in %.</i>	39
<i>Tabelle 5. Ergebnisse der Imm1x.log Auswertung (R-Code siehe Anhang).</i>	41
<i>Tab. 6. Imm1x.log signifikante Einflussgrößen in % und relativer Einfluss in %.</i>	42
<i>Tabelle 7. Vergleich Imm1.log und Imm1x.log, Value, p-value, % Einfluss auf intercept, Relativ: %-Angabe in Bezug auf den Gesamteinfluss.</i>	46
<i>Tabelle 8. Massenvermehrungen von Blattwespen und Durchforstungseffekt.</i>	47
<i>Tabelle 9. Anzahl Jahre, in denen Massenvermehrung (MV) und Durchforstung (DF) zusammenfallen, sowie DF- Effekte von 5 Jahren nach einer MV</i>	48

## Abstract

Over the past decades, irregular, but frequently recurring outbreaks of spruce sawflies, specifically of the small spruce sawfly, *Pristiphora abietina* (Hym., Tenthredinidae), and the mountain spruce sawfly, *Pachynematus montanus* (Hym., Tenthredinidae), have been observed in secondary spruce forests of the northern foothills of the Alps. The aim of the present thesis was to assess possible effects of sawfly feeding damage on the radial growth of the attacked Norway spruce (*Picea abies*) trees. Thus, a number of quantifiable and non-quantifiable effects on radial growth were included in a linear mixed-effects model computed with the statistical program R.

The most important factors affecting radial growth of trees are temperature and precipitation as well as inter-individual tree competition at the stand that changes with time. In a first step, five study sites (three at altitudes between 350-400 m a.s.l., two at altitudes between 850-900 m a.s.l.) in Upper Austria and Salzburg with documented years of sawfly mass outbreaks were selected and from each site, 20 formerly infested spruce trees and 20 non-infested control trees were included in the study. Of these 200 trees, two drill cores per tree were taken at 1.5 m trunk height in winter 2017/18 for tree ring analyses. Depending on the site, the age of the spruce trees varied from 50 to 110 years. Former years with sawfly infestations and thinning were included in the model as dummy variables. Because thinning events have an impact on tree growth for some time, two dummy variables were used. The first one indicates the first five years after a thinning event, while the second is coded ordinally and sums up the years from one thinning event to the next. Data for the monthly amount of precipitation and the means of temperature were provided by the Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Salzburg, from meteorological stations closest to the study sites. The monthly means were related to the long-term mean of 1961-1990. The calculated indices for precipitation and temperature were combined to quarterly values including three months each (January-March, April-June, July-September, October-December) for the whole evaluation period (1960-2017). Both, the age of the stands as well as the elevation of the sites (lowland, highland) were included as variables into the model. Since the data was hierarchically structured (the variance among the groups accounted for a

significant proportion of the total variance), a linear mixed-effects model with fixed and random effects was chosen. Fixed effects in the model were the four quarterly values per year for temperature and precipitation, years with thinning or sawfly outbreaks, tree age and elevation of the site. As random effects, “area” was defined as the first group at level 2 and the subgroup “year” at level 1.

Results obtained with the linear mixed-effects model clearly showed that the weather conditions (precipitation and temperature) in the first two quarters of the year (January-March and April-June) accounted for more than 83 % of the annual tree ring width. Temperature and precipitation in the second quarter accounted for more than 45 % and 18 %, respectively. If temperature in the second quarter doubled compared with the 30-year mean (1961-1990), radial growth decreased by 45 %. Years with sawfly mass outbreaks also had a significant negative impact on spruce growth; the annual growth increment decreased by 8 % on average during outbreak years throughout the observation period (1960-2017). Thinning had a highly significant positive effect (6 %) on the annual ring width, however, this effect was only observed during the first five years after the event. Increasing tree age decreased the growth increment by 0,8 %. The weather conditions during the third and fourth quarters of the year and the elevation of the site had no significant effects on radial growth of the spruce trees.

# 1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten waren in sekundären Fichtenwäldern des österreichischen Alpenvorlandes mehrfach Massenvermehrungen von Fichtenblattwespen zu beobachten. Die Befallsgebiete befanden sich in Höhenlagen von 350-500 m und erreichten in den Zeiträumen von 1950 bis 2017 eine Ausdehnung von über 32.000 ha in Österreich. Hier waren vor allem die Bundesländer Oberösterreich und Salzburg betroffen (Schafellner & Schopf, 2014). Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten hatten zum Ziel die Biologie der auftretenden Blattwespenarten sowie ihre Auswirkungen auf den Baumwuchs und eine mögliche Bekämpfung zu erforschen (Schwerdtfeger 1981; Schwenke 1982; Heller 1993; Schatteiner, 1996; Tataw 2006; Egginger 2013).

Von April 2013 bis Sommer 2015 wurden im Rahmen des Interreg-Projekts „Forstschädlinge und Klimawandel“ eine Untersuchung von Blattwespen-Massenvermehrungen im bayerisch-österreichischen Alpenvorland durchgeführt. Dieses von der EU geförderte Projekt war Grundlage für weitere Vorhaben, in welchen neben der Risikoabschätzung eines Sekundärbefalls der betroffenen Bestände durch Borkenkäfer auch ein Maßnahmenkatalog zur Prävention und Behandlung der Fläche mit Blattwespen-Massenvermehrungen erstellt werden sollte (Schafellner & Schopf, 2014). In dieser Arbeit wurden mögliche Auswirkungen des Nadelfraßes der Blattwespen auf den Radialzuwachs der Fichten untersucht. Über die Ursachen von Massenvermehrungen forstlich relevanter Blattwespen ist trotz intensiver Forschung relativ wenig bekannt. Es scheinen sowohl standörtliche als auch klimatische Faktoren ausschlaggebend zu sein. Viele Blattwespen sind standortstreu. Darüber hinaus weiß man, dass die meisten Arten besonders in standortsfremden Beständen außerhalb des natürlichen Verbreitungsgebiets der Wirtsbaumart Fichte zu Gradationen neigen, während Massenvermehrungen im Heimatgebiet der Fichte nur sehr selten vorkommen. Beobachtet wurde überdies auch, dass Reinbestände anfälliger sind für Massenvermehrungen als Mischbestände (Schedl, 1953). Schwenke (1982) vermutet, dass bei manchen Blattwespenarten eine Verschiebung des Geschlechterverhältnisses zugunsten der Weibchen zum Ausbruch einer Massenvermehrung führen kann.

Auch über den Zusammenbruch einer Massenvermehrung ist wenig bekannt. Hier wird vermutet, dass die Retrogradation durch biotische Einflüsse, Standortfaktoren sowie durch Überbevölkerung verursacht wird. Besonders ungünstige Witterung in für die Art wichtigen Entwicklungsphasen, wie zum Beispiel beim Schwärmen im Frühjahr oder während des Raupenfraßes in der Krone, wird oft als mögliche Ursache für den Zusammenbruch einer Massenvermehrung angegeben. Aber auch biotische Faktoren wie Parasiten (Drahtwürmer z.B. *Athous subfuscus*, *Cleptes semiauratus*) oder Räuber (Ameisen, Vögel, Spinnen) spielen für die Einleitung der Retrogradation eine wichtige Rolle. Festzustellen ist, dass im Laufe einer Gradation der Weibchenanteil abnimmt (Schedl, 1953; Schwerdtfeger, 1981; Schwenke, 1982; Altenkirch, et al. 2002).

Die Rote Waldameise (*Formica rufa*) gehört laut Wiener (1983) zu den bedeutendsten Räufern von Blattwespen, besonders auch in Kombination mit plurivoltinen Parasiten. Es konnte ein Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Ameisenhöfen und plurivoltinen Parasitenarten festgestellt werden. Dieses gleichzeitige Auftreten wird damit begründet, dass Ameisen und Parasiten ähnlich warme und trockene bestandesklimatische Verhältnisse bevorzugen. Überdies machten Vertrocknung und Verpilzung der Tiere im Kokon in der Bodenstreu einen großen Anteil an der Mortalität der Blattwespen aus.

Abiotische Faktoren haben auf die Populationsdichte sowie auf die räumliche Verbreitung einer Schädlingsart einen entscheidenden Einfluss. Dieser Einfluss erscheint jedoch sehr komplex, da eine vorherrschende Witterung nicht nur auf den Pflanzenschädling wirkt, sondern auch auf dessen Umwelt. Daraus Gesetzmäßigkeiten bzw. Zusammenhänge zwischen abiotischen Faktoren und Gradationen von Schädlingen ableiten zu können, ist besonders schwierig. Das synökologische Optimum eines Schädlings muss sich nicht automatisch mit dem klimatischen Optimum decken. Hier kommen Faktoren wie das Verbreitungsgebiet der Wirtspflanze sowie die Verbreitungszone eines wirksamen Gegenspielers der Schädlingpopulation hinzu. Die Beziehungen zwischen Schädling und Gegenspieler beruhen auf Wechselwirkungen. Der Schädling wird von seiner Umwelt beeinflusst und umgekehrt. Durch die Aktivität einer Art entstehen Lebensumstände, welche auch den Schädling selbst beeinflussen. Oft handelt es sich um eine sogenannte „negative Rückkoppelung. Ein Schädling

verändert seine Umwelt dermaßen, dass dies negative Auswirkungen auf die Population hat. Selten tritt eine positive Rückkoppelung ein. Hier wird die Umwelt durch den Schädling so beeinflusst, dass sie für das Überleben und die Ausbreitung der Art förderlich ist. Diese Wechselwirkungen können sich in ihrem zeitlichen Auftreten abwechseln (Ohnesorge, 1991). Schedl (1953) beschreibt den Fraß der Kleinen Fichtenblattwespe (*Pristiphora abietina*) in einer Fichtendickung mit 15 Jahren als ein Beispiel für eine negative Rückkoppelung, da durch den Fraß der Larven an den Maitrieben das Nahrungsangebot fast vollständig verschwindet. Positive Rückkoppelungen können auch artübergreifend sein. So können Fichten durch den Fraß von Blattwespen so geschwächt werden, dass Folgeschädlinge wie Borkenkäfer die Baumabwehr (Harzfluss) leichter überwinden.

Bei näherer Betrachtung sind die Auswirkungen von Klima bzw. Witterungseinflüssen auf die Schädlingspopulation vom Entwicklungsstadium abhängig, in dem sich die Blattwespen befinden. Warme, wenn auch durch Regen unterbrochene, Witterung während der Eiablage fördert die Entwicklung einer Population, wohingegen Witterungsextreme wie z.B. Spätfrost oder Starkregenereignisse während dieser Periode sich negativ auf das Populationswachstum auswirken. Darüber hinaus können Wind sowie Starkregenereignisse in der Phase des Larvenfraßes dazu führen, dass Larven von den Kronen auf den Boden fallen und dort umkommen. Auch Trockenheit wirkt sich indirekt negativ auf die Entwicklung der Larven aus. Hohe Sonneneinstrahlung mit trockener Witterung sorgen für eine vorzeitige Verhärtung der jungen Nadeln, was wiederum die Nahrungsqualität für die Larven mindert. Die Eier der Kleinen Fichtenblattwespe sind durch ihre Lage in der Knospe vor Witterungseinflüssen weitgehend geschützt. Auch als Imago ist die Kleine Fichtenblattwespe im Vergleich zu anderen Schadinsekten weniger anfällig gegenüber Witterungseinflüssen. Die Larven allerdings werden während ihrer Entwicklung in der Krone sehr stark von der Witterung beeinflusst (z.B. Kälteeinbruch, Spätfrost, Starkregen etc.). Aufgrund der sehr kurzen Entwicklungsdauer der Larven (4-6 Wochen) wirken sich günstige aber auch ungünstige Witterungsbedingungen rasch auf die Populationsentwicklung der Tiere aus. Während der Überwinterung liegen die Nymphen (Ruhelarven) geschützt in einem Kokon im Boden. Die Witterung spielt hier eine relativ geringe Rolle und beeinflusst die Mortalität der Tiere kaum (Schedl, 1953).

Die Kleine Fichtenblattwespe kann als ein typischer Schädling der Fichte außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebietes bezeichnet werden. Die Auswirkungen eines massiven des Befalls sind neben Qualitäts- und Vitalitätseinbußen die Minderung des Höhen-, Radial- und Massenzuwachses (Klemmt et al., 2009). Es kann davon ausgegangen werden, dass der Höhenzuwachsverlust in älteren Beständen stärker ist als in Jungbeständen. Die Angaben zum Massenzuwachsverlust gehen von jährlich 2,7 Festmeter pro Hektar bis zu 10 Festmeter pro Hektar. Beim Radialzuwachs beschreibt Nägeli (1936) Verluste auf Brusthöhe von bis zu 33 % der Zuwachsleistung vor der Gradation. Die Verluste beim Radialzuwachs betreffen nicht nur die Jahre der Massenvermehrung, sondern wirken auch mehrere Jahre danach (Schedl, 1953). Bei diesen Angaben wurde jedoch keine Rücksicht auf abiotische Einflussfaktoren auf das Zuwachsverhalten der Fichten genommen.

### **1.1. Fragestellungen**

Folgende Fragen sollen in dieser Arbeit beantwortet werden sollen.

1. Wird der Radialzuwachs von Fichten in Jahren mit starkem Nadelfraß durch Blattwespen beeinträchtigt?
2. Lassen sich klimatische Einflussfaktoren wie Temperatur und Niederschlag auf den Radialzuwachs von Jahren mit starken Nadelverlusten in einem Modell voneinander trennen?

### **1.2. Hypothesen**

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden zwei Hypothesen formuliert. Die biologische Hypothese  $H_x$  sowie die Nullhypothese  $H_0$ , die in zwei Unterthesen ( $H_{01}$ ,  $H_{02}$ ) gegliedert ist.  $H_x$  kann nicht direkt angenommen werden, nur durch Verwerfung von  $H_0$  wird  $H_x$  indirekt bestätigt.

$H_x$ : Nadelverluste durch starken Insektenfraß führen zu Zuwachsverlusten bei der Fichte. Diese Abweichungen im Radialzuwachs beziehungsweise in den Jahrringbreiten lassen sich von Schwankungen, die durch klimatische Verhältnisse verursacht werden, herausfiltern.

H<sub>01</sub>: Variablen, die den Insektenfraß quantifizieren, haben keinen signifikanten Einfluss auf den Radialzuwachs.

H<sub>02</sub>: Klimatische Faktoren haben keinen signifikanten Einfluss auf den Radialzuwachs.

### **1.3. Biologie der Blattwespen**

Die Echten Blattwespen (Tenthredinidae) bilden mit weltweit 9000 Arten die größte Familie der Unterordnung Symphyta (Pflanzenwespen), die zu den Hautflüglern (Hymenoptera) gehört. Davon sind in Europa etwa 800 bis 900 Arten beheimatet. Die Unterfamilie Nematinae ist daraus die artenreichste und beinhaltet die Gattungen *Pristiphora* (über 60 mitteleuropäische Arten) sowie *Pachynematus* (mit etwa 30 Arten). Die Systematik der Blattwespen ist noch nicht abgeschlossen, da viele Arten und Artengruppen miteinander verbunden sind und es entsprechend schwierig ist Gattungen eindeutig zu definieren. In der Unterfamilie Nematinae sind drei Arten forstlich relevant, die Kleine Fichtenblattwespe *Pristiphora abietina*, die Fichtengebirgsblattwespe *Pachynematus montanus* und die Gestreifte Fichtenblattwespe *Pachynematus scutellatus* (Schwenke, 1982).

#### **1.3.1 Die Fichtengebirgsblattwespe *Pachynematus montanus***

Die Fichtengebirgsblattwespe kommt in Mitteleuropa vorwiegend in Mittelgebirgslagen über 800 m Seehöhe vor. Die Lebensdauer der adulten Wespen, die im Frühjahr beziehungsweise Frühsommer (Mai und Juni) aus dem Boden kommen, liegt bei etwa zwei Wochen. Die Männchen schwärmen in der Regel etwas früher als die Weibchen (Protandrie). Zum Schwärmen bevorzugen die Wespen Bestandesränder und Lücken mit ausreichender Wärme und Sonneneinstrahlung. Die Paarung findet in Bodennähe statt. Die Eiablage erfolgt an Nadeln ausgetriebener Fichtenknospen, wobei die Maitriebe auch schon deutlich gestreckt sein können (maximal bis zu 5 cm). Die Eier werden im Gegensatz zu den meisten Fichten-Nematinen nicht versenkt, sondern oberflächlich an die Fichtennadel mit einem Sekret geheftet. Für die Eiablage werden Terminaltriebe gemieden und vorwiegend der untere Kronenbereich an warmen Bestandesrändern bevorzugt. Je nach Temperatur (15-18 °C) schlüpfen die Larven nach etwa 4-9 Tagen. Die Gesamtentwicklungsdauer der Larven beträgt etwa 17-23 Tage, die

Larven durchlaufen vier Stadien. Im Gegensatz zu Kleinen Fichtenblattwespe fressen ältere Larven der Fichtengebirgsblattwespe auch Nadeln des Vorjahres. Die Afterraupe verbleibt 1-2 Tage am Zweig ohne zu fressen und baumt anschließend mit einem Faden auf den Boden ab. Die Afterraupe spinnt sich in einen Kokon ein. Im Kokon entwickelt sich die Afterraupe (Nymphe) vom Eonymphen- ins Pronymphenstadium. Die Tiere fressen nicht mehr. Die Bildung des Kokons erfolgt in den oberen Bodenhorizonten wie Streuschicht oder oberster Mineralboden. Nach der Überwinterung als Pronymphe erfolgt die Verpuppung im Frühjahr. Die Puppenruhe dauert etwa 14 Tage. Vielfach werden Überlieger beobachtet, die erst im Folgejahr oder nach mehreren Jahren schlüpfen (Schwenke, 1982).

### **1.3.2 Die Kleine Fichtenblattwespe *Pristiphora abietina***

Die Kleine Fichtenblattwespe gehört ebenfalls zur Familie der Tenthredinidae. Die in der Bodenstreuaufgabe bzw. in der obersten Bodenschicht in Kokons überwinternden Tiere schlüpfen im Frühling bei einer Temperaturschwelle von 7-8 °C, sofern diese Schwelle bis in eine Tiefe von 5 cm erreicht und dauerhaft überstiegen wird. Bei einer Lufttemperatur von 10-14 °C beginnt das Schwärmen und erreicht seinen Höhepunkt bei einer Temperatur von etwa 20 °C, vor allem um die Mittagsstunden bei Sonnenschein. Das Weibchen, welches eine Lebensdauer von etwa 12-14 Tagen hat, legt 40 bis 100 Eier. Die Lebensdauer der Männchen beträgt im Durchschnitt 9 Tage (Schwerdtfeger, 1981). Im Gegensatz zur Fichtengebirgsblattwespe sind die Weibchen der Kleinen Fichtenblattwespe bei der Eiablage auf Knospen frisch abgesprengter Knospenschuppen, aber mit noch nicht gespreizten Nadeln angewiesen. Die Nadel wird mit dem Sägefortsatz am Legerohr angeritzt und das Ei in die dadurch entstehende Tasche eingelegt. Warme, lichte und windgeschützte Bäume mit einem Alter zwischen 10-60 Jahren werden bei der Eiablage bevorzugt. Wie bei allen Blattwespen entwickeln sich aus unbefruchteten Eiern männliche Larven und aus befruchteten weibliche. Pro Nadel wird ein Ei und pro Knospe etwa 3-6 Eier abgelegt. Laut Berger (1990) werden pro Trieb bis zu 88 Eier vorwiegend in den oberen, freiliegenden Teilen der Krone abgelegt. Die Larven schlüpfen nach etwa 2-5 Tagen. Die durchschnittliche Fraßmenge der Larven beträgt etwa 65 mg Nadelmasse, die Tiere fressen ausschließlich Mainadeln. Die Dauer der Larvenentwicklung ist bei

den Männchen mit 14-25 Tagen kürzer als bei den Weibchen, die für die Entwicklung 16-27 Tage benötigen. Die voll entwickelten Afterraupen baumen ab und überwintern als Nymphen in Kokons im Boden. Dies geschieht in einer Tiefe von etwa 2-3 cm in der Bodenstreu oder im oberen Mineralboden. Mitte November ist die Pronymphe ausgebildet. Die Verpuppung findet im Frühjahr statt und dauert etwa 14 Tage. Ein Teil der Population kann als Eonymphe bis zu 6 Jahre überliegen (Schwerdtfeger, 1981).

#### **1.4. Blattwespen in Fichtenwäldern des nördlichen Alpenvorlands**

Von allen Blattwespen-Befallsflächen können für Zuwachsuntersuchungen der Fichte nur jene herangezogen werden, für die Aufzeichnungen von Massenvermehrungen über einen längeren Zeitraum vorhanden sind. Für diese Arbeit wurden 5 Standorte in ehemaligen Befallsgebieten im nördlichen Alpenvorland ausgewählt, die seit den 1950er Jahren untersucht wurden. Die drei Tieflagenstandorte (TL) liegen auf 300-500 m, die zwei Hochlagenstandorte (HL) in 850-950 m Seehöhe. Die Untersuchungsstandorte Gennersberg (TL) und Bergheim (TL) liegen im Bundesland Salzburg, die Standorte Lambach (TL), Mondseeberg (HL) und Hasenkopf (HL) liegen in Oberösterreich (Abb. 1).

Der Hochlagenstandort Mondseeberg (MB) befindet sich auf einer Seehöhe von etwa 950 m und ist mit 110 Jahren der älteste Bestand. Die Aufzeichnungen über Massenvermehrungen reichen bis in die 1950er Jahre zurück. Der zweite Standort in Oberösterreich ist Lambach (LB), in der Nähe des Stifts Lambach. Der Hochlagenstandort Hasenkopf (HK) liegt in Oberösterreich an der Grenze zu Salzburg. Die Standorte Gennersberg (GB) bei Nussdorf am Haunsberg und Bergheim (BH) liegen im Norden von Salzburg. Die Aufzeichnungen über Massenvermehrungen von Fichtenblattwespen für den Standort Gennersberg reichen bis in die 1960er Jahre zurück. Auf allen Untersuchungsstandorten war es notwendig über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg nicht befallene Bestände zu finden, die als Referenz einen Vergleich der Zuwächse mit den befallenen Beständen erlaubten.



**Abb. 1. Lageskizze Untersuchungsstandorte LB: Lambach 350 m, GB: Gennersberg 450 m, HK: Hasenkopf 850 m, BH: Bergheim 430 m, MB: Mondseeberg 800-1000 m.**

## 2 Material und Methoden

Für die Datenanalyse wurden standortsabhängige Faktoren (Niederschlag, Temperatur), Bestandesdaten (Alter, Durchforstungsmaßnahmen), Daten über Massenvermehrungen von Blattwespen und der Radialzuwachs von Fichten über einen Zeitraum von 1960 bis 2017 einbezogen.

Auf den insgesamt fünf Standorten konnte die Untersuchung von Jahrringbreiten durchgeführt werden. Von diesen Befallsstandorten sind Jahre mit Massenvermehrungen von Blattwespen und auch teilweise Informationen über die Intensität des Befalls bekannt. Neben Informationen über die Bestandeshistorie wurden Informationen von den Grundeigentümern bzw. vom Betreuungspersonal über forstliche Eingriffe sowie auch über den Blattwespenbefall eingeholt.

Pro Untersuchungsstandort wurden jeweils ein befallener Bestand und ein nicht befallener Referenzbestand ausgesucht, die möglichst homogene Standortsbedingungen aufwiesen. Die Befallsbestände waren aufgrund von Aufzeichnungen über Massenvermehrungen bekannt und wurden in Zusammenarbeit mit den Forstschutzreferenten von Salzburg, Dr. Ludwig Wiener, und dem Forstschutzreferenten von Oberösterreich, DI Johann Reisenberger, ausgewählt.

In der schlagwirtschaftlichen Bewirtschaftung im Hochwald haben Durchforstungsmaßnahmen neben abiotischen und biotischen Größen einen entscheidenden Einfluss auf den Radialzuwachs von Bäumen. So war es für diese Untersuchung von größter Bedeutung, dass die Jahre, in denen Durchforstungen durchgeführt wurden, bekannt waren. Informationen dazu kamen von Forsteinrichtungen bzw. den Revierbetreuern. Auch die beiden oben genannten Forstschutzreferenten machten Angaben über Eingriffszeitpunkte. Bei Durchforstungsmaßnahmen innerhalb der letzten 10-15 Jahre konnten die Zeitpunkte auch an Hand von sog. stummen Zeugen, wie zum Beispiel Stöcke von bei der Durchforstung gefällten Bäumen, als Hilfe für die Feststellung des Eingriffszeitpunktes herangezogen werden.

## 2.1 Standorte

### 2.1.1 Gennersberg

Dieser Standort befindet sich im Wuchsgebiet 7.1 Nördliches Alpenvorland-Westteil und liegt auf einer Seehöhenstufe von 400-500 m. Der Gennersberg bildet ein geschlossenes Waldgebiet mit etwa 47 ha und ist von landwirtschaftlich genutzten Flächen umgeben. Diese 47 ha teilen sich 11 private Waldeigentümer. Der Gennersberg wurde von Moränenmaterial, welches durch Gletscher aus den Zentral- und Kalkalpen in das Alpenvorland verfrachtet wurde, gebildet. Daraus entstanden gut durchlüftete Braunerde und teilweise auch semipodsolierte Bodenhorizonte. Die in den letzten Jahrzehnten stark eingebrachte und geförderte Fichte bildet mächtige Streuhumusauflagen, welche zur Versauerung der Böden führen. Teilweise kommt es durch Verdichtung zu Staunässe. Die potentiell natürliche Waldgesellschaft auf diesem Standort ist ein Buchenwald mit Einmischungen von Tanne, Eiche sowie Hainbuche. In den kurzkopierten Gräben würde sich ein Eschen-Ahornwald bilden (Schopf, 2013).

Der nicht befallene Referenzbestand am Standort Gennersberg liegt etwa 150 m Luftlinie vom Befallsbestand entfernt. Die Hangneigung auf der Befallsfläche liegt bei 5 %, jene der Referenzfläche bei 15 %. Beide Bestände liegen im Mittelhang und sind nordöstlich exponiert. Der Bodentyp entspricht einer Parabraunerde mit einer mächtigen Rohhumusauflage von 10 cm in beiden Beständen. Auf beiden Untersuchungsflächen stockt zu 100 % Fichte. Der Befallsbestand weist ein Alter von 88 Jahren und eine Oberhöhe von 39 m auf. Das ergibt eine Bonität von 16,11 und mit einer Grundfläche von 40 m<sup>2</sup> ergibt sich ein Bestockungsgrad von 0,61. Im Gegensatz dazu beträgt die Oberhöhe beim 56-jährigen Referenzbestand 29 m und die Grundfläche 36 m<sup>2</sup>. Daraus folgen eine Bonität von 24,26 und ein Bestockungsgrad von 0,50. Dieser extrem hohe Wert lässt sich dadurch begründen, dass es bei der Bonitierung mit der Oberhöhe in Jungbeständen zu einer Überschätzung kommt.

Die Befallssituation durch Fichtenblattwespen am Standort Gennersberg ist durch drei Massenvermehrungen in den vergangenen Jahrzehnten charakterisiert. Laut Wiener (pers. Mitteilung) wurde die erste Gradation in den Jahren von 1963 bis 1968 beobachtet, die zweite von 1989 bis 1998 und das

jüngste Massenaufreten in den Jahren 2010 bis 2013. Die Kleine Fichtenblattwespe war der Verursacher der ersten beiden Massenvermehrungen, wo hingegen die Fichtengebirgsblattwespe für die letzte verantwortlich gemacht werden konnte (Egginger, 2013).

### **2.1.2 Bergheim**

Auf diesem Untersuchungsstandort liegen Befalls- und Referenzfläche im selben Bestand. Dieser ist leicht südöstlich exponiert, weist eine Hangneigung von circa 5 % auf und liegt im Mittelhang in einer Höhenlage von 400-500 m. Der Mineralboden wurde als Parabraunerde mit Moderhumusaufgabe definiert. Der Bestand setzt sich ebenfalls zu 100 % aus Fichte zusammen. Der 47-jährige Untersuchungsbestand hat eine Oberhöhe von 27,4 m und eine Grundfläche von 36 m<sup>2</sup>. Daraus resultieren eine Bonität von 16,11 und ein Bestockungsgrad von 0,70. Laut Revierförster Unterberger wurden zwei Durchforstungen durchgeführt, jeweils in den Wintermonaten 2003/04 und 2015/16. Dies wurde auch bei der Betrachtung der Zuwachsverläufe bestätigt.

Am Standort Bergheim gab es zwei Gradationen von Fichtenblattwespen, von 1989 bis 1993 sowie von 2012 bis 2014 (Wiener, persönliche Mitteilung). Das erste Massenaufreten konnte der Kleinen Fichtenblattwespe zugeschrieben werden, wohingegen die Fichtengebirgsblattwespe der Verursacher der zweiten Massenvermehrung war (Unterberger, persönliche Mitteilung).

### **2.1.3 Mondseeberg**

Der Standort Mondseeberg liegt im Wuchsgebiet 4.1 Nördliche Randalpen Westteil auf einer Seehöhe von 800-1000 m. Die vorhandenen Bodentypen beschränken sich auf frische Braunerde, Preudogley, Podsole sowie podsolige Braunerde. Diese Bodentypen wechseln auf engstem Raum, je nach Ausgangsmaterial und Hangneigung. Die potentiell natürliche Waldgesellschaft ist ein Mischwald mit Tanne, Esche, Ahorn und Buche. Nadelhölzer wie die Fichte würden in den Hintergrund treten (Heller, 1993). Der Standort liegt in einem größeren, zusammenhängenden Waldgebiet, Eigentümer sind die Österreichischen Bundesforste.

Die beiden Bestände (Referenz- und Befallsbestand) liegen etwa 200 m in gleicher Höhenschichtlinie voneinander entfernt. Die Befallsfläche befindet sich im Oberhang und weist eine Hangneigung von unter 5 % auf. Die Referenzfläche liegt ebenfalls im Oberhang und hat eine Hangneigung von 10 %. Am Referenzstandort wurden ein starker Oberflächenabfluss sowie Binsengewächse festgestellt. Diese Umstände lassen auf einen starken hydromorphen Einfluss im Oberboden schließen; beim Befallsbestand wurde dies nicht beobachtet. Beide Untersuchungsbestände sind zu 100 % mit Fichte bestockt. Der 90-jährige Befallsbestand hat eine Oberhöhe von 37,5 m und eine Grundfläche von 52 m<sup>2</sup>. Daraus resultieren eine Bonität von 14,58 und ein Bestockungsgrad von 0,83. Der nicht befallene Referenzbestand hat ein Alter von 110 Jahren und weist eine Oberhöhe von 39,5 m sowie eine Grundfläche von ebenfalls 52 m<sup>2</sup> auf. Das ergibt eine Bonität von 14,27 und einen Bestockungsgrad von 0,78.

Vom Standort Mondseeberg sind drei Gradationen von Blattwespen seit den 1950er Jahren bekannt, welche alle die Fichtengebirgsblattwespe betrafen. Massenvermehrungen der Fichtengebirgsblattwespe wurde in den Jahren 1953-1957, 1968-1971 und 1987-1992 beobachtet. Danach kam es zu keinem neuerlichen Massenaufreten von Blattwespen (Heller, 1993; Reisenberger, persönliche Mitteilung).

#### **2.1.4 Lambach**

Der im Unter-/Oberwald gelegene Untersuchungsstandort befindet sich in einem etwa 65 ha großen Waldstück, das von landwirtschaftlich genutzten Flächen umgeben ist. Dieses nördlich des Ortskerns Lambach gelegene Waldstück befindet sich im Wuchsgebiet 7.2 Nördliches Alpenvorland-Ostteil (Bellos et al., 2003). Der Standort befindet sich auf einer Seehöhe von rund 350 m. Der Eigentümer des Untersuchungsstandorts Lambach ist das Benediktinerstift Lambach, die Flächen werden von der Österreichischen Bundesforste AG betreut. Aufgrund der starken hydromorphen Beeinflussung der Untersuchungsflächen lässt sich eine potentiell natürliche Waldgesellschaft ableiten, welche durch Eiche sowie Tanne geprägt ist. Die in diesen Beständen künstlich eingebrachte Fichte neigt unter diesen Standortsbedingungen extrem flach zu wurzeln, was die Windwurfgefahr deutlich erhöht.

Die Befalls- und Referenzflächen auf diesem Standort liegen etwa 450 m von einander entfernt. In Bezug auf die Standortbedingungen weisen beide Flächen idente Eigenschaften auf. So wurde auf beiden Flächen eine starke Pseudovergleyung mit darauf befindliche Moderhumus festgestellt. Der 92-jährige Befallsbestand weist eine Oberhöhe von 37,5 m sowie eine Grundfläche von 48 m<sup>2</sup> auf. Daraus ergeben sich eine Bonität von 14,37 und ein Bestockungsgrad von 0,77. Dem gegenüber hat der Referenzbestand ein Alter von 102 Jahren und eine Oberhöhe von 40,8 m. Die Bonität beträgt 16,03. In Verbindung mit der Grundfläche von 36 m<sup>2</sup> ergibt sich ein Bestockungsgrad von 0,53.

Am Standort Lambach wurde eine Massenvermehrung zwischen 1997 und 2004 beobachtet. Zu Beginn war dafür die Kleine Fichtenblattwespe verantwortlich. In den Jahren 2003 und 2004 trat diese jedoch in Kombination mit der Fichtengebirgsblattwespe in Erscheinung (Tataw, 2006).

### **2.1.5 Hasenkopf**

Der Befallsbestand am Untersuchungsstandort Hasenkopf liegt etwa 350 m vom nicht befallenen Referenzbestand entfernt. Die Befallsfläche liegt im Oberhang und hat eine Geländeneigung von etwa 15 %, während die Referenzfläche im Mittelhang liegt und eine Hangneigung von 25 % aufweist. Der Bodentyp auf beiden Flächen ist Parabraunerde, die Humusaufgabe wurde als Moderhumus kategorisiert. Auf beiden Untersuchungsbeständen stockt zu 100 % Fichte. Der an der Landesgrenze zwischen Salzburg und Oberösterreich liegende Befallsbestand weist ein Alter von 79 Jahren und eine Oberhöhe von 35,1 m auf. In Verbindung mit einer Grundfläche von 56 m<sup>2</sup> ergeben sich eine Bonität von 14,18 und ein Bestockungsgrad von 0,95. Der Referenzbestand hat dagegen ein Alter von 54 Jahren und eine Oberhöhe von 34,5 m. Die Grundfläche beträgt 60 m<sup>2</sup>. Daraus resultieren eine Bonität von 18,76 und ein Bestockungsgrad von 0,96. Im Befallsbestand wurde im Jahr 1993 nach einer Massenvermehrung der Fichtengebirgsblattwespe eine Durchforstung durchgeführt (Reisenberger, persönliche Mitteilung).

Auf diesem Standort gab es nur eine Blattwespen-Gradation. Diese fand in den Jahren zwischen 1989 und 1993 statt und wurde durch die Fichtengebirgsblattwespe verursacht (Reisenberger, persönliche Mitteilung).

## 2.2 Auswahl der Probebäume und Bohrkernentnahme

Auf jedem Untersuchungsstandort (Befalls- sowie Referenzfläche) wurden jeweils 20 Bäume ausgewählt, um ausreichend Datenmaterial für eine statistische Auswertung zu bekommen. Die Befallsflächen waren aus früheren Untersuchungen bekannt (Heller, 1993; Tataw, 2006; Egginger, 2013). Auf den Standorten Gennersberg und Hasenkopf waren während der Massenvermehrungen praktisch alle Bäume stark befallen (Wiener, persönliche Mitteilung; Reisenberger, persönliche Mitteilung). Auf diesen Standorten wurde ein zentraler Punkt im Bestand festgelegt und 20 Bäume im Umkreis von 100 m ausgewählt. Auf den Standorten Bergheim, Lambach sowie Mondseeberg waren während der Blattwespengradationen nicht alle Bäume des Bestandes betroffen. In diesem Fall wurden die Kronen jedes einzelnen Baumes mit dem Fernglas auf Spuren abgesucht, die auf ehemals starken Larvenfraß hinweisen (Astquirl). Durch das Zählen der Astverzweigungen konnte in etwa das Jahr dieser Verbuschung festgestellt werden. Wenn dies mit bekannten Massenvermehrungsjahren übereinstimmte, wurde der Baum als Befallsindividuum ausgewiesen. Am Standort Mondseeberg, wo die letzte Massenvermehrung 1992 endete, konnte keine retrospektive Befallsansprache mehr durchgeführt werden. Hier erleichterten die ehemaligen Markierungen an den Stämmen die Auswahl der Bäume.

Bei der Wahl des Referenzbestandes musste sichergestellt werden, dass über den gesamten Betrachtungszeitraum keine Massenvermehrungen von Blattwespen stattgefunden hatten. Überdies hinaus muss der Referenzbestand möglichst gleiche Standortsbedingungen wie der Befallsbestand aufweisen. In diesen Beständen wurde ein Mittelpunkt festgelegt und wiederum 20 nächst stehende Bäume als Untersuchungsindividuen festgelegt.

Alle Probebäume wurden farblich markiert und mit einem Code zur Unterscheidung ehemaliger befallener (B) beziehungsweise nicht befallener (G) Bäume versehen (Abb. 2 und 3). Die Auswahl der Bäume erfolgte gemeinsam mit den Forstschutzreferenten von Salzburg und Oberösterreich (Wiener, Reisenberger) im November 2017. Die Bohrkernentnahme wurde in den Monaten Jänner bis März 2018 durchgeführt.

Jahringbreiten sind über die Kreisfläche nicht homogen verteilt. Je nach Licht- und Kronenverhältnissen können starke Schwankungen auftreten. Um bei der Auswertung der Radialzuwächse fehlende Jahrringe zu erkennen sowie um die Messgenauigkeit zu erhöhen, wurden pro Baum jeweils 2 Bohrkerne in Brusthöhe gezogen (Blatter, 2015). Die Position dieser Bohrkerne war von der Hangoberseite jeweils 45° links und rechts, somit standen die Bohrungen im 90° Winkel zu einander (Kindermann, BFW, Institut für Waldwachstum und Waldbau, persönlicher Mitteilung). Bei 20 Bäumen pro Bestand, 2 Beständen pro Standort sowie 5 Standorten ergab sich eine Gesamtzahl von 400 Bohrkernproben.

Die Bohrkerne wurden mit einem Zuwachsbohrer von 40 cm Länge im rechten Winkel zum horizontalen Stamm gezogen. Beim Erreichen der Mitte wurde die Nadel eingeführt und mit einer halben Umdrehung jeweils nach rechts und links herausgedreht. Es wurde darauf geachtet, dass an jedem Standort bei mindestens 5 Bäumen das Mark getroffen wurde, um eine exakte Altersbestimmung der Bäume zu ermöglichen. Bei der Auswertung wurden die bis zum Mark abgezählten Jahrringe plus sieben Jahre genommen. Diese „zusätzlichen“ Jahre wurden für die Erreichung der Brusthöhe angenommen. Für Bohrproben ohne Sprünge oder Risse war es wichtig, dass der Zuwachsbohrer geschärft war. Die Bohrproben wurden in Kartonhüllen geschoben und diese mit Klebeband geschlossen und beschriftet.



**Abb. 2. Baumkennzeichnung G: Gesund Nr. 2 am Standort Lambach (Nov 2017).**



**Abb. 3. Baumkennzeichnungen und Zuwachsbohrung am Standort Lambach (Jän 2018).**

## 2.3 Vermessung der Bohrkerne

Die Bohrproben wurden vor der Messung in eine Seifenlösung eingelegt und danach in einen Schlitten eingespannt, dass die Stirnfläche der Jahrringe nach oben zeigte, um die exakte Erkennung von Jahrringen zu ermöglichen, und dann mit einem Handhobel bearbeitet. Damit waren die Bohrproben messbereit.

Die Vermessung wurde mit einem Leica Mikroskop und der Software WinTsap durchgeführt (Abb. 4). Die Messrichtung führte von außen (Borke) nach innen (Mark). Da die Bohrkerne in den Wintermonaten 2017/18 gezogen wurden, war 2017 das letzte Jahr, in dem ein Jahrring vollständig ausgebildet worden war. Dazu musste man das Programm auf 999 bis 0 stellen und das Ausgangsjahr zu Beginn der Vermessung angeben. Jede Bohrprobe wurde in der Software zur Datenspeicherung gleich wie auf den Hülsen codiert. Das Fadenkreuz wurde im rechten Winkel zu den Jahrringen gestellt. Dies ist besonders wichtig, da man beim Bohren nicht immer das Mark trifft, somit waren die Jahrringe nicht immer im rechten Winkel zur Bohrprobe. Die Software bildet während der Vermessung ein Kurvendiagramm, dieses wurde mit dem Kurvendiagramm der letzten Bohrkernvermessung vom selben Standort optisch abgeglichen. So konnte man sehr schnell erkennen, ob Jahrringe fehlten beziehungsweise Messfehler auftraten. Sofern eine fehlerhafte Vermessung auftrat, wurde die Bohrprobe erneut vermessen. Besonderheiten wie zum Beispiel Harzgallen oder unscharf zu erkennende Jahrringe sowie auch das Treffen des Marks wurden vermerkt.

Mittel sogenannter „Weiserjahre“ hat man einen Anhaltspunkt, ob eine Fehlmessung aufgetreten ist. Als Weiserjahre werden Jahre bezeichnet, die im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt extrem geringe Niederschläge beziehungsweise hohe Durchschnittstemperaturen aufweisen. So waren die Jahre 1969, 2003 und 2015 mit extrem geringen Niederschlägen solche Weiserjahre (Schüler, BFW, Institut für Waldwachstum und Waldbau, persönliche Mitteilung). Dies war auch in den Jahresgesamtniederschlägen ersichtlich (Abb. 5).

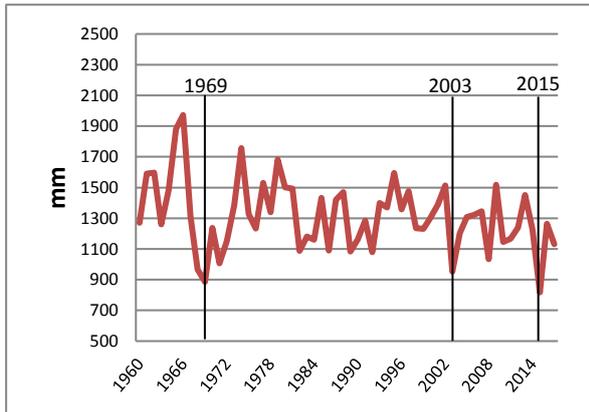


Abb. 4. Jahresgesamtniederschlag am Standort Gennersberg mit negativen Weiserjahren.



Abb. 5. Digitalpositioniergerät zum Vermessen des Radialzuwachses.

## 2.4 Witterungsdaten

Die Witterungsdaten wurden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Kundenservice Salzburg und Oberösterreich, bezogen. Für die Untersuchungsstandorte wurden die Daten von nächst gelegenen Wetterstationen herangezogen. Abb. 6 zeigt die Wetterstationen (blau) und die Untersuchungsstandorte (rot). Für die Standorte Gennersberg (GB) war dies die Wetterstation „Mattsee“, für den Standort Bergheim (BH) wurde die Station „Salzburg Flughafen“ und für den Standort Lambach (LB) die Wetterstation „Kremsmünster“ verwendet. Für die Standorte Mondseeberg (MB) und Hasenkopf (HK) wurden die Niederschlagsdaten von der Wetterstation „Mondsee“ und die Temperaturdaten von der Station „Wolfsegg“ verwendet, da die letztgenannte Wetterstation sich auf etwa derselben Höhenstufe wie die Hochlagenstandorte befindet (Tab. 1).

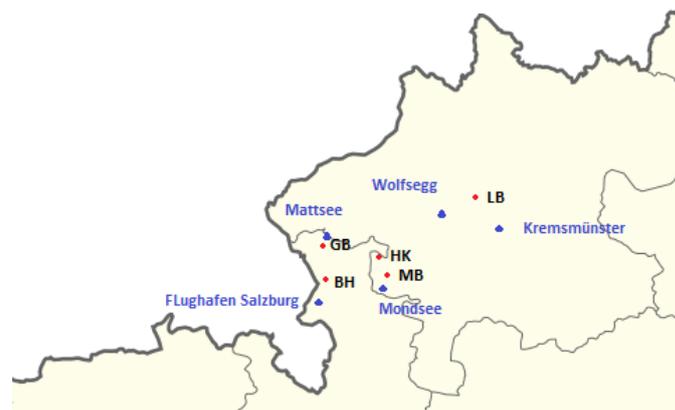


Abb. 6. Untersuchungsstandorte (rot) und Wetterstationen (blau).

**Tabelle 1. Koordinaten und Seehöhe der Wetterstationen und Verwendung für die jeweiligen Probestandorte**

Wetterstationen	Standorte		Seehöhe	GPS Koordinaten	
	Niederschlag	Temperatur		Breite	Höhe
Kremsmünster	LB	LB	183 m	48,05°	14.13°
Flughafen Salzburg	BH	BH	430 m	47.80°	13.00°
Mattsee	GB	GB	502 m	47.98°	13.11°
Mondsee	MB und HK	-	481 m	47.84°	13.32°
Wolfsegg	-	MB und HK	635 m	48.11°	13.66°

Bei den Daten für den Niederschlag handelt es sich um Monatssummenwerte, bei den Temperaturangaben um die Tagesmitteltemperatur bezogen auf das Monat. Von den Stationen Kremsmünster (Oberösterreich) und Flughafen Salzburg (Salzburg) gehen diese Aufzeichnungen bis zum Jahr 1900 zurück, bei den Stationen Mondsee und Mattsee jedoch nur bis 1960. Daher beschränkt sich der Betrachtungszeitraum der gesamten Auswertungen auf 58 Jahre (1960-2017). In einem ersten Schritt wurden die Monatswerte in Quartale mit je 3 Monaten zusammengefasst (Jänner-März, April-Juni, Juli-September, Oktober-Dezember) und daraus ein Mittelwert gebildet. Dadurch haben einzelne Monate mit „Extremwerten“ einen geringeren Einfluss auf die statistische Auswertung. Die dadurch entstandenen Datenwerte mit vier Quartalen pro Jahr wurden ins Verhältnis gesetzt, um eine Vergleichbarkeit von Niederschlags- und Temperaturangaben gewährleisten zu können. Dieses Verhältnis wurde mit dem 30-jährigen Mittel von 1961-1990 gebildet. Der daraus entstandene Indexwert pro Quartal und Jahr wurde für die weiteren Auswertungen verwendet. Diese Standardisierung ist notwendig, da sonst kein Vergleich optionaler Einflüsse möglich ist. Wenn dieser Indexwert z.B. um 1 ansteigt, verdoppelt sich folglich der Niederschlag bzw. die Tagesmitteltemperatur im Verhältnis zum 30-jährigen Mittel. Damit ist eine Vergleichbarkeit gewährleistet.

## 2.5 Statistische Auswertung

### 2.5.1 Crossdating und Gleichläufigkeit

Beim Crossdating wird den Jahrringen das richtige Jahr zugeordnet. Dies ist für dendrochronologische Auswertungen von größter Bedeutung, da man in den meisten Fällen keine konkrete Zuweisung eines Jahrrings zu einem Jahr zur Verfügung hat. Bei der vorliegenden Untersuchung war das Jahr der Probengewinnung sowie das letzte Jahr, in dem ein Jahrring ausgebildet wurde, bekannt. Nichtsdestotrotz spielt das Crossdating auch bei dieser Untersuchung eine wesentliche Rolle.

Als erster Schritt erfolgte das visuelle Crossdating. Bei der Vermessung der Bohrkerne wurden jeweils die Kurvendiagramme des aktuell vermessenen Untersuchungsbaumes sowie die beiden Bohrproben des vorangegangenen Baums übereinander gelegt. Damit konnte man bereits während der Vermessung mit dem Auftreten von Weiserjahren die Zuordnung eines Jahrringes zu einem bestimmten Jahr vornehmen. Sofern erkennbar war, dass Jahrringe im Vergleich zu den vorherigen Messungen fehlten oder zu viele auftraten, wurde die Bohrprobe erneut vermessen. Wäre danach immer noch keine Übereinstimmung in den Weiserjahren sichtbar gewesen, so hätte man durch ein Tool in der Software ein Jahr hinzufügen oder entfernen können. Ein zusätzliches Jahr erhält üblicherweise 0,01 mm und einen Vermerk im Vermessungsprotokoll (Blatter, 2015).

Im nächsten Schritt erfolgte das statistische Crossdating. Neben dem visuellen Crossdating ist dies ein wichtiger Teil bei der Aufbereitung und Datierung. Hierzu wurden die Jahrringbreiten der beiden Bohrkernproben eines Baumes gemittelt. Des Weiteren wurde die Gleichläufigkeit (GLK als Maß für die Ähnlichkeit der erhaltenen Kurven) berechnet. Dazu beobachtet man den Verlauf der beiden Kurven in einem Intervall (z.B. ein Jahr). Wenn beide Kurven in dieselbe Richtung (nach oben oder unten) zeigen, erhalten sie den Wert 1. Sind sie gegenläufig, d.h. die Kurven zeigen in unterschiedliche Richtungen, bekommen sie den Wert 0. Damit wurde der Prozentsatz von Intervallen in einer Kurve mit gleicher Laufrichtung berechnet (Blatter, 2015). Aus den Mittelwerten der Jahrringbreiten der einzelnen Standorte (getrennt für Befall- und Referenzstandort) wurden

Chronologien gebildet und daraus für jeden Bestand eine Jahrringbreitenkurve. Nun wurde die Gleichläufigkeit der einzelnen Referenzbestände mit den Befallsbeständen überprüft (Tab. 2).

**Tabelle 2. Gleichläufigkeit der Jahrringbreiten von Befalls- und Referenzbäumen an den Untersuchungsstandorten.**

Mondseeberg: Befall } : 75,86 % Referenz }	Hasenkopf: Befall } : 60,34 % Referenz }	Lambach: Befall } : 80,00 % Referenz }	Bergheim: Befall } : 65,21 % Referenz }	Gennersberg: Befall } : 78,57 % Referenz }
--	--	--	---	--

## 2.5.2 Kovariablen

Die Aufbereitung, Digitalisierung sowie Sortierung der Daten wurde mit Software Microsoft Excel (Office 2010) durchgeführt. Insgesamt wurden 178 415 Datenpunkte eingegeben und in einem Datensatz digitalisiert.

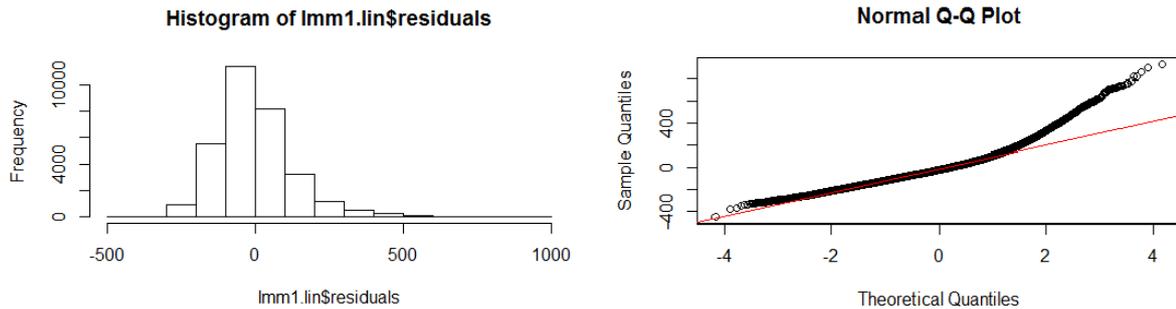
Für die Auswertung der Daten mit dem Programm „R“ wurden jedem untersuchten Jahrring (in Summe 10 495) bestimmte Einflussfaktoren im jeweiligen Jahr zugeteilt. Dazu wurden im ersten Schritt die Daten der Jahrringbreiten für alle 10 Bestände (5 Standorte mit jeweils Befalls-/Referenzbestand) nach dem Kalenderjahr in Spaltenform sortiert. Hinzu kamen Angaben über das jeweilige Alter der Bestände sowie Parameter der Standorte (Höhenlage und Standort).

Im nächsten Schritt wurden zwei Variablen zum Blattwespenbefall hinzugefügt. Dies wurde mit zwei Dummyvariablen gelöst. Der erste Dummy wurde „Befall“ benannt. Hier wurden alle Bäume der Befallsbestände mit einer 1 versehen, die nicht befallenen Referenzbestände bekamen den Wert 0 zugeordnet. Die zweite Dummyvariable beschreibt Massenvermehrungen der Blattwespe. Jahre, in denen eine Gradation auf den Befallsflächen stattfand, wurden mit einer 1 versehen, Jahre ohne Massenvermehrung bekamen eine 0.

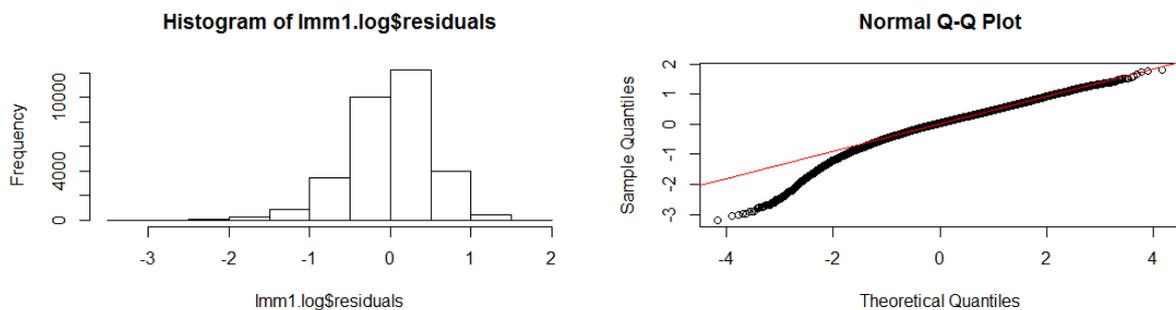
Nun erfolgte die Datierung von Durchforstungsmaßnahmen und deren Auswirkungen auf den Zuwachs der Bäume im jeweiligen Bestand. Dazu wurde ein Interaktionskoeffizient zwischen zwei Variablen gebildet. Die erste Variable wurde als „nach Eingriff“ definiert und beschreibt die Jahre

nach einer Durchforstungsmaßnahme bis zur nächstfolgenden Durchforstung. Zum Beispiel wurden am Standort Bergheim in den Wintermonaten 2003/04 sowie 2015/16 Durchforstungsmaßnahmen durchgeführt. Die Auswirkungen der ersten Durchforstungsmaßnahme auf den Radialzuwachs waren entsprechend im Jahr 2004 zum ersten Mal wirksam. Somit wurde ab diesem Jahr begonnen die Jahre numerisch aufsteigend zu skalieren und bis zum letzten Jahr vor der nächsten Durchforstung gezählt. In diesem Fall waren es 12 Jahre. So erhielt das Jahr 2004 eine Wertigkeit bei der Variable „nach Eingriff“ von 1, das Jahr 2005 den Wert 2 usw. bis zum Jahr 2015 (letztes Jahr vor dem nächsten Eingriff), das den Wert 12 erhielt. Mit dem Jahr 2016 begann wieder die Zeitspanne nach dem zweiten Eingriff. Da 2017 das letzte Untersuchungsjahr war, erhielt 2016 den Wert 1 und 2017 den Wert 2. Damit kann jedoch nicht die Dauer des Durchforstungseinflusses auf die Jahrringbreiten berücksichtigt werden. Daher wurde definiert, dass Durchforstungsmaßnahmen fünf Jahre nach dem Eingriff einen signifikanten Einfluss auf die Jahrringbreite haben. Diesem Durchforstungseffekt wurde Rechnung getragen durch das Hinzufügen einer weiteren Dummyvariablen. Die ersten 5 Jahre nach einem Eingriff (am Beispiel Bergheim 2004 bis 2008 und 2016 bis 2017) wurden mit dem Wert 1 versehen. Jahre ohne Durchforstungseffekt bekamen eine 0. Aus diesen beiden Variablen ergab sich ein Interaktionskoeffizient.

Für die Auswertung der Datensätze mit den Funktionen ist es notwendig, dass diese annähernd normalverteilt sind. Die Abbildungen 7 und 8 lassen erkennen, dass durch Logarithmieren der Zuwachsbreiten die Residuen (bzw. geschätzte Störgrößen) einer Normalverteilung ähnlicher sind als die nicht logarithmierten. In der Abbildung „Normal Q-Q Plot“ wird die wahrscheinliche Anordnung in einer Normalverteilung (Theoretical Quantiles) und die tatsächliche Verteilung (Sample Quantiles) der Residuen dargestellt. Man erkennt, dass die Verteilung der geschätzten Störgrößen leicht linksschief ist.



**Abb. 7. Residuenhäufigkeit und Residuen in Q-Q Darstellung.**  
 x Achse = 1/100 mm Jahrringbreite  
 y Achse = Häufigkeit



**Abb. 8. Logarithmierte Zuwächse, Häufigkeit der Residuen und Q-Q Darstellung.**  
 x Achse = 1/100 mm Jahrringbreite  
 y Achse = Häufigkeit

Nun erfolgte das Hinzufügen der Witterungsdaten (Temperatur und Niederschlag als Quartalsindexwerte). Die insgesamt acht standortsspezifischen Datenwerte pro Jahr (vier Quartalsniederschlagswerte und vier Quartalstemperaturwerte) wurden den jeweiligen Kalenderjahren zugeordnet.

Für die Erstellung eines Modells zur Beschreibung des Einfluss von Umweltfaktoren auf den Radialzuwachs wurden eine abhängige Variable  $y$  (Jahrringbreite in 1/100 mm) und 16 unabhängig gruppierte Variablen verwendet. Um festzustellen, ob und welche Faktoren die Jahrringbreite beeinflussen, wurde aufgrund der hierarchischen Strukturierung der gruppierten Einflussgrößen ein „Linear Mixed Effects Models“ als statistisches Modell gewählt. Dieses Modell mit festen und zufälligen Effekten kommt dann zum Einsatz, wenn unbeobachtete oder schwer zu erhebende

Variablen (als Gesamtheit individuelle Heterogenität genannt) in keiner Korrelation mit den erklärenden Variablen stehen (Günther, 2015). Diese Mehrebenenanalyse ist ein Spezialfall der multiplen Regressionsanalyse. Standardisierte Analyseverfahren (Regressions- oder Varianzanalysen) setzen die Unabhängigkeit der Stichproben voraus. Liegt eine hierarchische Clusterstruktur vor, so werden bei der Anwendung dieser Analyseverfahren Schätzfehler unterschätzt und eine Signifikanzprüfung wird fehlerhaft. Die Intergruppenvarianz hat einen signifikanten Anteil an der Gesamtvarianz (siehe Ergebnisse). Somit liegt eine Mehrebenenstruktur vor. Der erste Cluster sind die Jahre des Untersuchungszeitraums, wohingegen der zweite Cluster höherer Ebene die Gebiete, in denen die Standorte liegen, darstellt. Die Zuwächse sind von den Gruppen (Bestand sowie Standort) abhängig. Die IID Annahme (independently and indentially distributed residuals), die bei einem regulären Regressionsmodell zugrunde liegt, ist hier verletzt (Meyer, 2015).

Für diese Analyse wurde das Programm R benützt (R Core Team, 2017). Folgende Packages wurden verwendet:

- tidy
- dplyr
- lmfor
- lme4
- Matrix

Mit der Funktion „lme“ wurde das „Linear Mixed Effect Model“ erstellt. Dazu wurde der logarithmierte Zuwachsverlauf in Abhängigkeit zu den Einflussvariablen gestellt. Als zufällige Effekte (Random effects) wurden das Jahr und das Gebiet gewählt. Diese Störgrößen sind mit den abhängigen Variablen nicht korreliert und ihnen wird ein erwarteter Mittelwert von 0 unterstellt. Aufgrund dessen werden Zufallseffekte als Gauß'sche Zufallsvariablen ausgedrückt. Sie modellieren die Korrelation zwischen den Beobachtungen (Meyer, 2015). Das Gebiet ist der erste Zufallseffekt auf Level 2 und die darin enthaltene Subgruppe (Jahr) ist auf Level 1. Für die Angabe des Durchforstungseffekts wurde ein Interaktionskoeffizient zwischen den Variablen „nach Eingriff“ und der Dummyvariable „Durchforstungseffekt“ gebildet (dies erreicht man durch ein „\*“ zwischen den beiden Variablen).

Darüber hinaus wurden einerseits die Einflüsse der Dummyvariable „Befall“ und „Massenvermehrung“ einzeln, sowie auch der Interaktionskoeffizient ermittelt. Dieser Interaktionskoeffizient (Interact) wurde als neue Variable definiert, da diese Funktion keine Interaktion zwischen zwei Faktoren (Dummys) erlaubt. Nun konnte mit dieser Funktion überprüft werden, ob eine Massenvermehrung von Blattwespen von den herrschenden Parametern Temperatur und Niederschlag beeinflusst wird. Hierzu wurden Massenvermehrung und Befall nicht als Interaktion genommen, sondern separat als einzelne Einflussgrößen behandelt (R-Codes siehe Anhang).

## **3 Ergebnisse**

### **3.1 Witterungsverlauf und Durchforstungen im Zeitraum 1960-2017**

#### **Gennersberg**

Aus den Zuwachsverläufen lassen sich im Befallsbestand Durchforstungsmaßnahmen in den Jahren 1963, 1974 sowie 1987 ableiten. Im Referenzbestand wurden Durchforstungen in den Jahren 1977, 1987, 1996 und 2012 in den Zuwachsverläufen sowie anhand der stummen Zeugen (alte Stöcke) festgestellt. Von 1960 bis 2017 betrug der durchschnittliche Jahresgesamtniederschlag am Untersuchungsstandort Gennersberg 1 316 mm und die Jahresdurchschnittstemperatur im selben Betrachtungszeitraum lag bei 8,6 °C.

#### **Bergheim**

Am Standort Bergheim wurden Durchforstungen in den Wintermonaten der Jahre 2003/04 und 2015/16 festgestellt (Revierförster Meingasser, persönliche Mitteilung). Dies konnte auch anhand der Zuwachsverläufe bestätigt werden. Die Jahresdurchschnittstemperatur von 1960-2017 betrug 8,7°C und der durchschnittliche Jahresgesamtniederschlag 1 148 mm.

#### **Mondseeberg**

Bei beiden Beständen konnten anhand der Zuwachsverläufe keine Durchforstungseingriffe im Untersuchungszeitraum von 1960 bis 2017 festgestellt werden. Von 1960 bis 2017 lag der durchschnittliche Jahresgesamtniederschlag bei 1 551 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur im selben Betrachtungszeitraum bei 8,0 °C.

#### **Lambach**

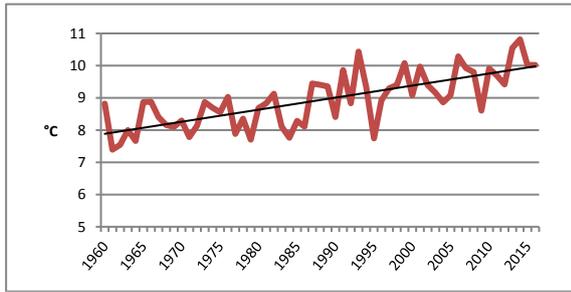
Im Befallsbestand konnten bei Betrachtung der Zuwachsverläufe Durchforstungseingriffe in den Jahren 1974 und 1994 festgestellt werden. Beim Referenzbestand zeigten die Zuwachsverläufe Durchforstungsmaßnahmen in den Jahren 1964, 1982 sowie 1995. Dies wurde vom Abt des

Benediktinerstifts, Herrn Maximilian Neulinger, bestätigt. Die Jahresdurchschnittstemperatur von 1960 bis 2017 lag bei 8,9°C und der durchschnittliche Jahresgesamtniederschlag bei 997 mm. Am Standort Lambach war darüber hinaus noch 1978 ein negatives Weiserjahr mit extrem geringen Niederschlagsmengen (Abb. 9).

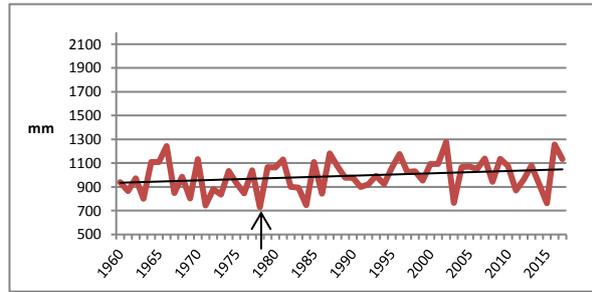
### **Hasenkopf**

Anhand der Zuwachsverläufe konnte man Durchforstungseingriffe im Befallsbestand in den Jahren 1966, 1980 und 1993 feststellen, dies bestätigte auch der Forstschutzreferent von Oberösterreich DI Reisenberger. Im Referenzbestand wurden keine Durchforstungsmaßnahmen durchgeführt. Von 1960 bis 2017 betrug der durchschnittliche Jahresgesamtniederschlag am Untersuchungsstandort Hasenkopf 1 551 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur im selben Betrachtungszeitraum lag bei 8,0 °C.

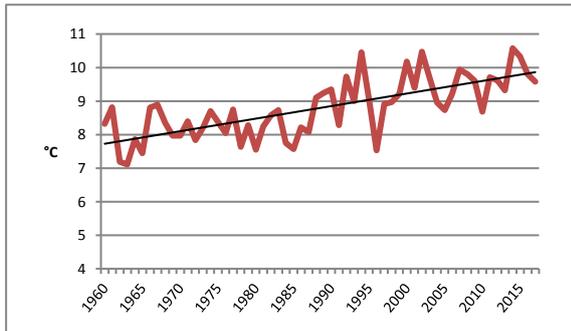
Niederschlag und Temperatur haben unter allen abiotischen Wirkungsgrößen den wohl entscheidendsten Einfluss auf das Wachstum der Bäume. Im zeitlichen Jahresverlauf ändert sich die Wirkungsintensität der Einflussgrößen. Im Frühjahr (2. Quartal April-Juni) kann vermutet werden, dass in Tieflagen der Niederschlag der wachstumslimitierende Faktor ist. In höheren Lagen begrenzt jedoch die Tagestemperatur das Wachstum der Bäume. Die folgenden Abbildungen zeigen die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur sowie des Jahresgesamtniederschlags von 1960 bis 2017 (Abb. 9). Bis auf die Niederschlagswerte der Wetterstation Mattsee (für den Standort Gennersberg) weisen die Temperatur- und Niederschlagsentwicklungen aller anderen Messstationen einen positiven Trend auf, wobei der Anstieg der Jahresmitteltemperaturen besonders auffällig ist.



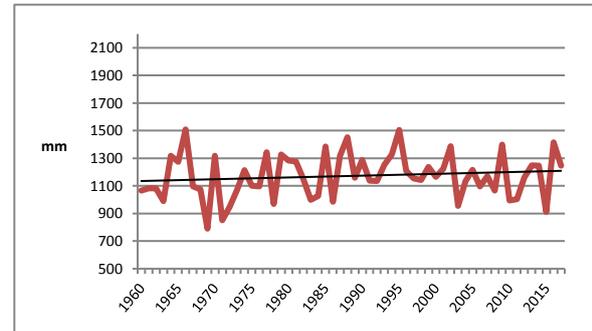
**Krefsmünster Jahresmitteltemperatur für LB.**



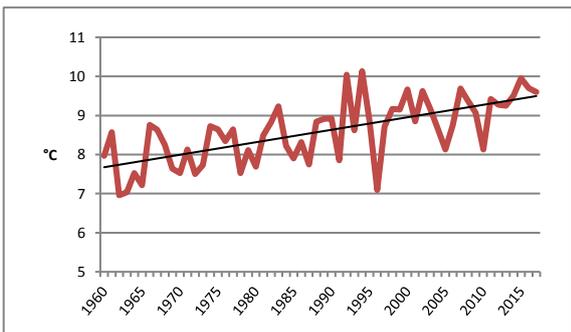
**Krefsmünster Jahresgesamtniederschlag für LB (Pfeil negatives Weiserjahr 1978).**



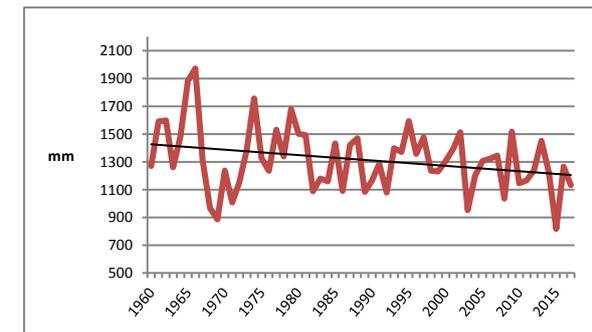
**Flughafen Salzburg Jahresmitteltemperatur für BH.**



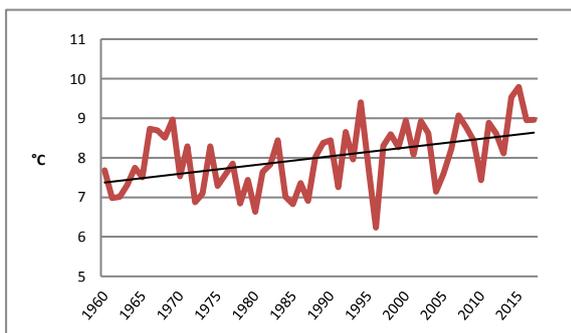
**Flughafen Salzburg Jahresgesamtniederschlag für BH.**



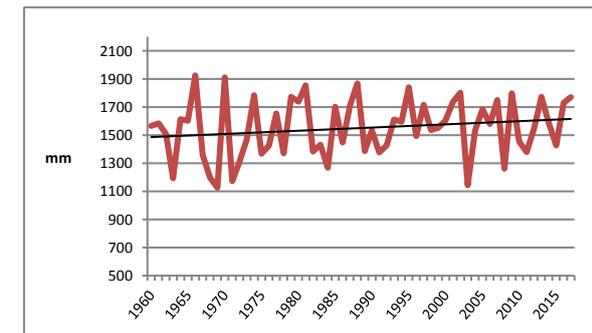
**Mattsee Jahresmitteltemperatur für GB.**



**Mattsee Jahresgesamtniederschlag für GB.**



**Wolfsegg Jahresmitteltemperatur für MB und HK.**



**Mondsee Jahresgesamtniederschlag für MB und HK.**

**Abb. 9. Witterungsentwicklung der einzelnen Standorte von 1960 bis 2017.**

## 3.2 Einfluss einzelner Variablen auf die Jahrringbreite

Bei der Erstellung eines „Linear Mixed Effect Model“ mit der Funktion „lme“ ist die Einflussintensität einzelner Variablen auf die Jahrringbreite von unterschiedlichen Faktoren abhängig. So ändert sich die Einflussintensität, wenn man die Summe der Einflussgrößen reduziert beziehungsweise den Charakter der Variablen ändert. Es war das Ziel alle zur Verfügung stehenden möglichen Einflussvariablen auf den Radialzuwachs der Fichte in die Auswertung einfließen zu lassen. Es wurden zwei Berechnungen mit der lme Funktion durchgeführt. Die Formelsyntax ist im Kapitel Anhang aufgelistet. Insgesamt wurden 10 495 Beobachtungen in die Berechnung einbezogen.

**Tabelle 3. Ergebnisse der lmmlog Auswertung.**

(R-Code siehe Anhang), Beschreibung der Variablen siehe Kapitel Kovariablen

```
Random effects:
Formula: ~1 | gebiet
(Intercept)
StdDev:    0.221584

Formula: ~1 | Jahr %in% gebiet
(Intercept) Residual
StdDev:    0.1706476 0.491628

Fixed effects: log(y) ~ massenv + befall + alter + nacheingriff * factor(durchf) +
factor(lage) + nq1 + nq2 + nq3 + nq4 + tq1 + tq2 + tq3 +
tq4 + Jahr
```

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	21.841987	2.0236719	10199	10.793245	0.0000
massenv	-0.093665	0.0234326	10199	-3.997185	0.0001
befall1	-0.021458	0.0116809	10199	-1.837014	0.0662
alter	-0.008892	0.0006030	10199	-14.747240	0.0000
nacheingriff	-0.013369	0.0017039	10199	-7.845725	0.0000
factor(durchf)1	-0.268352	0.0439130	10199	-6.110998	0.0000
factor(lage)tief	0.007520	0.2040577	3	0.036853	0.9729
nq1	0.133720	0.0413141	10199	3.236681	0.0012
nq2	-0.205219	0.0505454	10199	-4.060094	0.0000
nq3	0.047038	0.0520746	10199	0.903286	0.3664
nq4	0.044026	0.0394341	10199	1.116453	0.2643
tq1	0.044351	0.0161041	10199	2.754017	0.0059
tq2	-0.610531	0.1597415	10199	-3.821991	0.0001
tq3	-0.345321	0.2489973	10199	-1.386845	0.1655
tq4	0.011845	0.0571658	10199	0.207197	0.8359
Jahr	-0.007376	0.0011119	276	-6.633799	0.0000
nacheingriff:factor(durchf)1	0.058596	0.0124606	10199	4.702513	0.0000

Diese Ergebnisdarstellung ist aufgeteilt in Random Effects und Fixed Effects (Tab. 3). Beim Zufallseffekt „Gebiet“ lag die Varianz um den erwarteten Mittelwert von 0 bei 15,35 % und beim Zufallseffekt „Jahr“, auf Level 1 in „Gebiet“ verschachtelt, lag sie bei 9,1 %, mit einer Varianz des Restwertes von 75,55 %. Bei den fixen Effekten beschreibt die Variable „Intercept“ den Start der Zuwachsfunktion. „Value“ gibt den logarithmierten Radialzuwachs in 1/100 mm an. Dieser Wert kommt zustande, wenn keine Außeneinflüsse (u.a. Witterung, Durchforstungseffekte, Fraßtätigkeit von Insekten) auf den Baum wirken. Da diese Annahme nicht realistisch ist, bildet dieser Wert auch lediglich eine theoretische Angabe des Zuwachses. „Std.Error“ ist der Standardfehler und „DF“ sind die Freiheitsgrade der jeweiligen Variablen. Der t-Wert („t-value“) ergibt sich aus dem Quotient des Schätzers und dem Standardfehler. Der P-Wert beziffert die Wahrscheinlichkeit einen noch extremeren Wert für die Teststatistik (t-Wert) bei Zutreffen der Nullhypothese zu erlangen. Die Irrtumswahrscheinlichkeit, d.h. die Wahrscheinlichkeit für Fehler 1. Art, wurde auf 5 % festgesetzt. Alle grau hinterlegten Variablen in Tab. 3 und 5 haben einen P-Wert von  $\leq 0,05$  und somit einen signifikanten Einfluss auf den Radialzuwachs. Alle Werte (values) der Variablen „massenv“ bis „nacheingriff:factor(durchf)1“ sind Angaben, die dessen Einflussgröße beschreiben. Sie können jedoch nicht in Summe betrachtet werden. Den einzelnen Angaben wird unterstellt, dass nur sie allein ohne weitere Einflüsse auf den Zuwachs wirken. So zeigt z.B. die Angabe „Massenvermehrung“ den Wert 0,093665. Die Berechnung  $1 - e^{(-0,093665)*100}$  ergibt, dass eine Massenvermehrung allein, ohne jegliche andere Einwirkungen auf den Zuwachs diesen im Durchschnitt über den Betrachtungszeitraum von 1960 bis 2017 in Jahren mit einer Massenvermehrung um 8,94 % reduziert hat. Dieser Wert ist mit einem P-Wert von 0,0001 höchst signifikant.

In Tab. 4 sind alle signifikanten Einflussgrößen in Prozent sowie die relative Einflussnahme (im Verhältnis aller signifikant wirkenden Faktoren) dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Parameter unterschiedlich skaliert sind. Die Variablen „massenv“, „befall“ und „faktor(durchf)1“ sind Dummyvariablen. Die Witterungsangaben (nq1, nq2, tq1, tq2) sind Verhältniszahlen und „Alter“, „Jahr“ und „nach Eingriff“ sind ordinal skaliert. Die letzte Variable in Tab. 4 („nacheingriff:faktor(durchf)1“) ist eine verbundene Einflussgröße, einzeln wirken die beiden

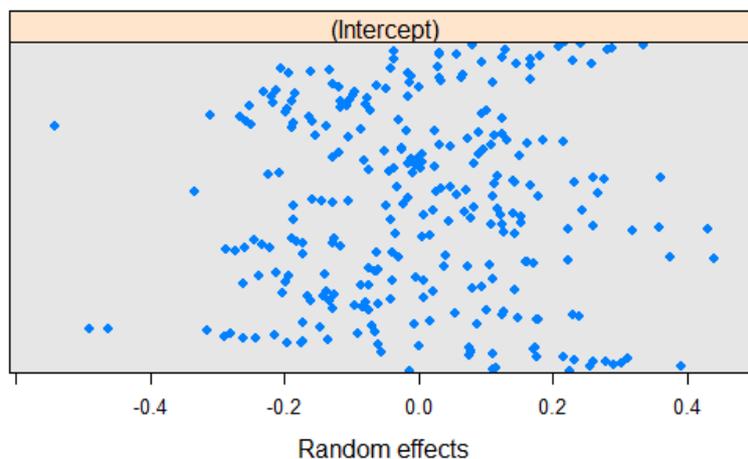
signifikant negativ auf den Zuwachs. Die Interaktion dieser beiden zeigt ebenfalls einen Einfluss auf den Radialzuwachs.

Die Ergebnisse der Witterungsangaben machen deutlich, dass die Niederschlags- sowie Temperaturwerte in den ersten beiden Quartalen des Jahres einen signifikanten Einfluss auf den Radialzuwachs der Fichten haben, das 3. und 4. Quartal aber nicht (Tab. 3).

**Tabelle 4. lme1.log signifikante Einflussgrößen in % und relativer Einfluss in %.**

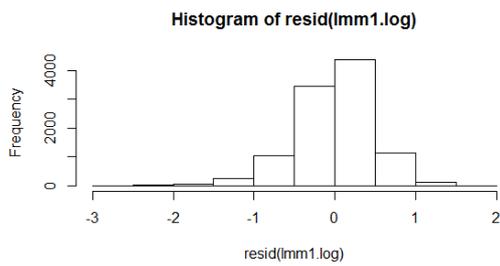
	Value	p-value	%	Relativ
massenv	-0,093665	0,0001	-8,94	7,11
alter	-0,008892	0,0000	-0,89	0,70
nacheingriff	-0,013369	0,0000	-1,33	1,06
factor(durchf)1	-0,28352	0,0000	-24,69	19,64
nq1	0,13372	0,0012	14,31	11,38
nq2	-0,205219	0,0000	-18,55	14,76
tq1	0,044351	0,0059	4,53	3,61
tq2	-0,610531	0,0001	-45,69	36,35
Jahr	-0,007376	0,0000	-0,73	0,58
nacheingriff:factor(durchf)1	0,058596	0,0000	6,03	4,80

Abb. 10 stellt die Varianzverteilung der Zufallseffekte um den erwarteten Mittelwert von 0 dar. Jeder Punkt stellt einen Zufallseffekt „Jahr“ (auf Level 1) in der Gruppe „Gebiet“ (auf Level 2) dar. Man erkennt, dass es kein bestimmtes Muster in der Verteilung gibt, jedoch die Abweichungen um den Mittelwert gering sind.

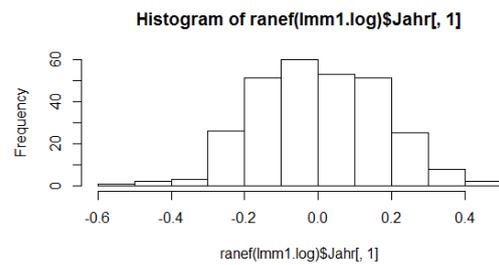


**Abb. 10. Verteilung der einzelnen Zufallseffekte um den geschätzten Mittelwert von 0 (lmm1.log).**

In den Abb. 11 und 12 ist die Häufigkeitsverteilung des Zufallseffekts „Jahr“ sowie des dazugehörigen Restfehlers dargestellt. Der Mittelwert ist 0 und die Häufigkeit soll in Anlehnung an eine Gauß'sche Glockenkurve normalverteilt sein. Diese Unterstellung kann bestätigt werden. Die Häufigkeitsdarstellung der Gebiete ist nicht zweckmäßig, da diese Angabe keine numerische Zahl, sondern nominal skaliert ist, die Bildung eines Mittelwertes ist daher nicht sinnvoll.



**Abb. 11. Histogramm des Restfehlers der Schätzung (lmm1.log).**



**Abb. 12. Histogramm des Zufallseffekts Jahr (lmm1.log).**

Tabelle 5. Ergebnisse der lmm1x.log Auswertung (R-Code siehe Anhang).

```

Random effects:
Formula: ~1 | gebiet
(Intercept)
StdDev: 0.2230961

Formula: ~1 | Jahr %in% gebiet
(Intercept) Residual
StdDev: 0.1706647 0.4916829

Fixed effects: log(y) ~ factor(interact) + alter + naheingriff * factor(dur
rchf) + factor(lage) + nq1 + nq2 + nq3 + nq4 + tq1 + tq2 + tq3 +
tq4 + Jahr

```

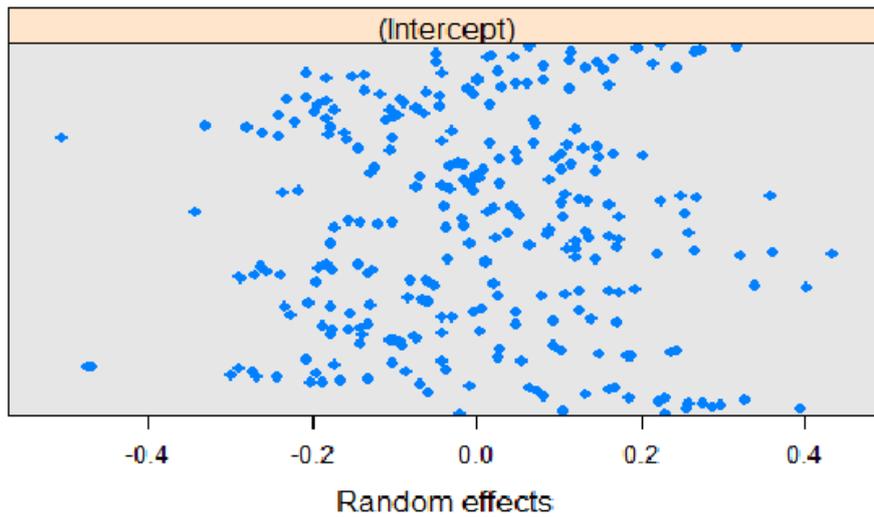
	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	21.119839	1.9854186	10200	10.637474	0.0000
factor(interact)1	-0.110468	0.0215776	10200	-5.119578	0.0000
alter	-0.008705	0.0005946	10200	-14.641757	0.0000
nacheingriff	-0.014628	0.0015605	10200	-9.373485	0.0000
factor(durchf)1	-0.277078	0.0436613	10200	-6.346087	0.0000
factor(lage)tief	0.015882	0.2053764	3	0.077329	0.9432
nq1	0.130938	0.0412905	10200	3.171135	0.0015
nq2	-0.207219	0.0505389	10200	-4.100189	0.0000
nq3	0.047006	0.0520800	10200	0.902568	0.3668
nq4	0.044684	0.0394366	10200	1.133057	0.2572
tq1	0.044527	0.0161055	10200	2.764691	0.0057
tq2	-0.624346	0.1595811	10200	-3.912405	0.0001
tq3	-0.342055	0.2490167	10200	-1.373624	0.1696
tq4	0.014650	0.0571513	10200	0.256336	0.7977
Jahr	-0.007019	0.0010949	276	-6.410507	0.0000
nacheingriff:factor(durchf)1	0.059709	0.0124472	10200	4.796933	0.0000

In die Berechnung wurden mittels Interaktionskoeffizient („factor(interact)1“) die beiden Variablen für Blattwespenbefall („massenv“, „befall“) quantifiziert. Dadurch reduziert sich die Summe der Einflussfaktoren von 16 (bei Lmm1.log) auf 15, die einzelnen Parameter ändern sich geringfügig. Die Varianz des Zufallseffekts „Gebiet“ beträgt 15,35 % um den erwarteten Mittelwert von 0. Die Varianz der Subgruppe „Jahr“ beträgt 9,1 % mit einer Restwertvarianz von 75,55 %. Wenn die neu entstandene Dummyvariable „Interact“ auf 1 steht und keine anderen Einflussgrößen auf das Wachstum wirken, reduziert diese Variable den Radialzuchs der Fichten um 10,46 % im Durchschnitt über den gesamten Betrachtungszeitraum (Tab. 6).

**Tab. 6. lmm1x.log signifikante Einflussgrößen in % und relativer Einfluss in %.**

	Value	p-value	%	Relativ
factor(interact)1	-0,110468	0,0000	-10,46	8,20
alter	-0,008705	0,0000	-0,87	0,68
nacheingriff	-0,014628	0,0000	-1,45	1,14
factor(durchf)1	-0,277078	0,0000	-24,20	18,98
nq1	0,130938	0,0015	13,99	10,97
nq2	-0,207219	0,0000	-18,72	14,68
tq1	0,044527	0,0057	4,55	3,57
tq2	-0,624346	0,0001	-46,44	36,41
Jahr	-0,007019	0,0000	-0,70	0,55
nacheingriff:factor(durchf)1	0,059709	0,0000	6,15	4,82

Die grafische Häufigkeitsverteilung der Zufallseffekte zeigt wie bei der Berechnung des lmm1.log kein klar erkennbares Muster, jedoch eine homogene Verteilung um den Mittelwert 0 (Abb. 13).



**Abb. 13. Verteilung der einzelnen Zufallseffekte um den geschätzten Mittelwert von 0 (lmm1x.log).**

Die Häufigkeitsverteilung der Jahre sowie des dazugehörigen Restwertes der lmm1x.log Auswertung zeigt einen Unterschied gegenüber der lmm1.log Berechnung. Dieser kleine Unterschied ist grafisch zu erkennen. Die Unterstellung, dass die Verteilung einer Gauß'schen Glockenkurve ähnelt, kann bestätigt werden (Abb. 14 und 15).

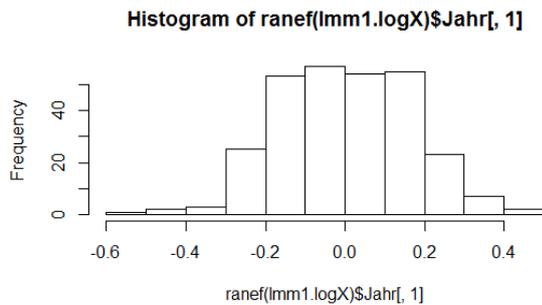


Abb. 14. Histogramm des Zufallseffekts Jahr (lmm1x.log).

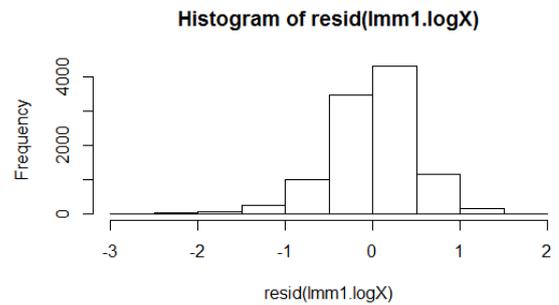


Abb. 15 Histogramm des Restfehlers der Schätzung (lmm1x.log).

### 3.3 Tests der Modellgüte

Die Varianzaufklärung lässt sich in gemischten Modellen aufgrund von fehlenden Freiheitsgraden sowie mehrerer Varianzquellen nur schwer bestimmen. Hierbei eignet sich ein sogenanntes „pseudo- $R^2$ “. Dies berechnet sich aus dem Vergleich eines Modells mit Prädiktor(en) zu einem Basislinienmodell ohne Prädiktor(en). Das neueste und robusteste Maß für pseudo- $R^2$  heißt Marginal Pseudo- $R^2$  for Generalized Mixed-Effect models (Syntax siehe Anhang). Beim Test zeigte sich, dass das Modell (der lmm1log Auswertung) 19,76% der Gesamtvarianz des Radialzuwachses erklärt.

Bei der Lmm1x.log Auswertung hingegen wurden mit dem Pseudo- $R^2$  Test 23,61% der Gesamtvarianz durch das Modell erklärt.

Ein weiterer Weg zur Feststellung der Modellgüte ist ein Varianzvergleich innerhalb der hierarchischen Gruppen. Diese Gruppen sind die Zufallseffekte „Gebiet“ und die darin enthaltene Subgruppe „Jahr“. Dies löst man mit der Berechnung von ICC (1) und ICC (2), wofür man eine einfaktorielle univariate Varianzanalyse braucht (Formelsyntax siehe Anhang). Dieser Varianzvergleich bezieht sich auf den Datensatz und ist unabhängig von der Auswertung. ICC (1) quantifiziert wie viel Varianz des Radialzuwachses durch die Gruppenzugehörigkeit erklärt wird. Der ICC (2) hingegen beschreibt die Homogenität der Messungen innerhalb der Gruppe.

```
iccmodel1 <- aov(y ~ gebiet, data = tab)
summary(iccmodel1)
      Df    Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
gebiet     4 64009642 16002410   751.3 <2e-16 ***
Residuals 10490 223422104    21299
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Hier zeigt sich ein hoch signifikanter Unterschied bezüglich des Radialzuwachses zwischen den Gruppen. Der Radialzuwachs ist nicht unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit.

ICC1(iccmodel1)                      ICC2(iccmodel1)

Das Ergebnis dieser Modellgüteprüfung ist, dass 26,33 % der Varianz des Radialzuwachses durch die Zugehörigkeit in der Gruppe „Gebiet“ erklärt werden sowie 2,13% in der Subgruppe „Jahr“. Die Unabhängigkeitsannahme ist verletzt. Darüber hinaus ist die Homogenität innerhalb der Gruppe „Gebiet“ 99,89% und innerhalb der Subgruppe „Jahr“ 99,13%. Bei dieser Modellgüteprüfung ist zu betonen, dass diesen Varianzen eine einfaktorielle univariate Varianzanalyse zugrunde liegt. Somit ist der Einfluss der fixen Effekte nicht berücksichtigt. Darum ergibt sich auch eine geringe Varianz beim Zufallseffekt „Jahr“. Dem gegenüber stehen die Varianzen der Modellberechnungen.

**Lmm1.log**      Gebiet: 15,35 %                      Jahr: 9,1 %

**Lmm1x.log**      Gebiet: 15,51 %                      Jahr: 9,1 %

Die Varianzen erscheinen auf den ersten Blick ernüchternd zu sein. Dies lässt sich durch mehrere Faktoren begründen, einerseits durch die hohe Anzahl von Freiheitsgraden (10 199) bei allen Parametern außer „Jahr“ und andererseits durch die retrospektiv nicht quantifizierbaren Einflussgrößen wie Bestandesdichte, Konkurrenz der Baumindividuen sowie Intensität des Blattwespenfraßes.

### **3.4 Gegenüberstellung der Modellberechnungen**

Der Unterschied beider Auswertungsvarianten liegt in der Angabe über die Befallserscheinungen der Blattwespen (Tab. 7). Sind die beiden Angaben („massenv“ und „Befall“) bei „lmm1.log“ noch einzeln, interagieren sie in „lmm1x.log“ miteinander. Somit entfällt beim lmm1x.log ein Parameter. Da die Grundgesamtheit gleich bleibt, würde man erwarten, dass sich die einzelnen Werte erhöhen. Diese Unterstellung konnte jedoch nur bei den Witterungsangaben (außer nq2) beobachtet werden. Entscheidend für die Aussagekraft eines Ergebnisvergleichs ist die Signifikanz der einzelnen Einflussgrößen. Hier zeigt sich, dass bei lmm1.log der Befall keinen signifikanten Einfluss auf y (Radialzuwachs) hat. Nach der Bildung von „interact“ jedoch bei lmm1x.log zeigt diese Variable in Verbindung mit der Massenvermehrung einen hoch signifikanten Einfluss. Bei beiden Auswertevarianten liegen ansonsten die gleichen Variablen in einem Vertrauensintervall von 95 %. Auch die Vorzeichen der Values bleiben bei beiden Varianten gleich. lmm1x.log zeigt, ob die Interaktion der Befallsvariablen einen signifikanten Einfluss hat und wie hoch dieser im Vergleich zu den anderen Größen ist. Mit einem relativen Anteil von 8,2 % aller Einflussgrößen ist die Variable „factor(interact)1“ der fünftgrößte Parameter (Tab. 7). Diese Dummyvariable hat einen Wert von -0,110468. Wenn die Variable den Wert 1 hat (Befallsbestand und Massenvermehrungsjahr), dann reduziert diese Einflussgröße den Radialzuwachs um -10,46 %. In Bezug auf die Befallserscheinungen ist lmm1.log die aussagekräftigere Variante. Hier zeigt sich, dass der „Befall“ allein (ohne andere Einflüsse) keinen signifikanten Effekt auf den Radialzuwachs hat. Die Massenvermehrung liegt hingegen mit einem relativen Anteil von 7,11 % an fünfter Stelle. Der Radialzuwachs verringert sich demnach bei Massenvermehrungen der Blattwespen um 8,94 % (Tab. 7). Diese Effekte treten in

Jahren auf, wo die jeweilige Variable auf 1 steht. Beide fixen Effekte sind mit einem P-Wert von 0,000 (bzw. 0,0001 bei „massenv“ in lmm1.log) höchst signifikant. Der Varianzvergleich bei den Zufallseffekten zeigt, dass lmm1.log eine geringfügig bessere Varianz gegenüber lmm1x.log hat.

**Tabelle 7. Vergleich lmm1.log und lmm1x.log, Value, p-value, % Einfluss auf intercept, Relativ: %-Angabe in Bezug auf den Gesamteinfluss.**

	lmm1.log				lmm1x.log				
	Value	p-value	%	Relativ	Value	p-value	%	Relativ	
massenv	-0,093665	0,0001	-8,94	7,11	factor(interact)1	-0,110468	0,0000	-10,46	8,20
alter	-0,008892	0,0000	-0,89	0,70	alter	-0,008705	0,0000	-0,87	0,68
nacheingriff	-0,013369	0,0000	-1,33	1,06	nacheingriff	-0,014628	0,0000	-1,45	1,14
factor(durchf)1	-0,28352	0,0000	-24,69	19,64	factor(durchf)1	-0,277078	0,0000	-24,20	18,98
nq1	0,13372	0,0012	14,31	11,38	nq1	0,130938	0,0015	13,99	10,97
nq2	-0,205219	0,0000	-18,55	14,76	nq2	-0,207219	0,0000	-18,72	14,68
tq1	0,044351	0,0059	4,53	3,61	tq1	0,044527	0,0057	4,55	3,57
tq2	-0,610531	0,0001	-45,69	36,35	tq2	-0,624346	0,0001	-46,44	36,41
Jahr	-0,007376	0,0000	-0,73	0,58	Jahr	-0,007019	0,0000	-0,70	0,55
nacheingriff:factor(durchf)1	0,058596	0,0000	6,03	4,80	nacheingriff:factor(durchf)1	0,059709	0,0000	6,15	4,82

Das „Alter“ hat bei beiden Auswertevarianten einen geringfügig negativen Einfluss auf den Radialzuwachs (y). Beim Anstieg des Alters um 1 Jahr reduziert diese Variable den Zuwachs um 0,89 %. Mit einem Anteil von 0,70 % aller signifikanten Einflussgrößen ist dieser Parameter sehr gering im Vergleich zu den anderen Variablen (Tab. 7). Eine Erklärung dafür ist, dass je älter der Baum wird, desto größer wird die Holzmenge, die für die Ausbildung des Jahringes (1/100 mm) notwendig ist.

Die Variablen „nacheingriff“ und „faktor(durchf)1“ beschreiben die Reaktion des Zuwachses nach Durchforstungseingriffen. Der Radialzuwachs der Fichte kann auf Freistellungen sehr plastisch reagieren. Der Parameter „nacheingriff“ beschreibt die Zeit nach dem Durchforstungseingriff intervallskaliert. Beim Anstieg dieser Variable um 1 erhöht sich der Zuwachs um 1,33 % (lmm1.log) im Durchschnitt über den Betrachtungszeitraum. Je größer die numerische Zahl im Datensatz wird, umso weiter liegt die letzte Durchforstung zurück. In dem Zeitraum zwischen zwei Durchforstungen vermindert sich der Zuwachs durchschnittlich um 1,33 % pro Jahr. Dem gegenüber steht die Dummyvariable „faktor(durchf)1“, welche die ersten 5 Jahre nach einer Durchforstung beschreibt. Die Ergebnisse zeigen, wenn diese Variable auf 1 steht, reduziert sich der Radialzuwachs um 24,69 % (lmm1.log) (Tab. 7). Dieses überraschende Ergebnis lässt die Interpretation zu, dass der negative

Effekt durch ein gleichzeitiges Auftreten von Massenvermehrungen von Blattwespen zustande gekommen ist. Massenvermehrungen führen zu einem Verlust von Assimilationsmasse und eine damit einhergehende Wachstumsdepression. Diese Auswirkungen im Zuwachs können noch Jahre nach der Gradation einer Massenvermehrung anhalten. Schwerdtfeger (1981) betont die Auswirkungen des Raupenfraßes in Folgejahren auf den Radialzuwachs, gibt jedoch keinen konkreten Zeitraum an. Hier wurden 5 Jahre unterstellt, in denen ein Effekt auf den Radialzuwachs nach einer Massenvermehrung besteht. In Tab. 8 lässt sich erkennen, dass einige Durchforstungen in Jahren von Massenvermehrungen stattfanden.

**Tabelle 8. Massenvermehrungen von Blattwespen und Durchforstungseffekt.**

(MV... Massenvermehrung, DF... Durchforstungseffekt)

Standort		Massenvermehrungen	Schädling	Jahre der Durchforstungen			Jahre, in den die DF auf den Radialzuwachs wirkten
Lambach	LB	1997 - 2004	Pa + Pm (erst ab 2003/04)	1974	1994	1975 - 1979	
						1995 - 1999	
Gennersberg	GB	1963 - 1968	Pa	1963	1974	1987	1964 - 1968
Gennersberg	GB	1989 - 1998	Pa				1975 - 1979
Gennersberg	GB	2010 - 2013	Pm				1988 - 1992
Mondseeberg	MB	1953 - 1957	Pm	-			-
Mondseeberg	MB	1968 - 1971	Pm				-
Mondseeberg	MB	1987 - 1992	Pm				-
Bergheim	BH	1989 - 1993	Pa	2003	2015	2004 - 2008	
Bergheim	BH	2012 - 2014	Pm			2016 - 2017	
Hasenkopf	HK	1989 - 1993	Pm	1966	1980	1993	1967 - 1971
							1980 - 1984
							1994 - 1998

Pm... Fichtengebirgsblattwespe, Pa... Kleine Fichtenblattwespe

In Abb. 16 ist die zeitliche Überlappung von Blattwespen-Massenvermehrungen und Durchforstungseffekten dargestellt. Von insgesamt 10 Durchforstungen, die auf den Befallsflächen stattfanden, fielen 5 in den Zeitraum einer Blattwespengradation bzw. in den Zeitraum (max. 5 Jahre) danach.

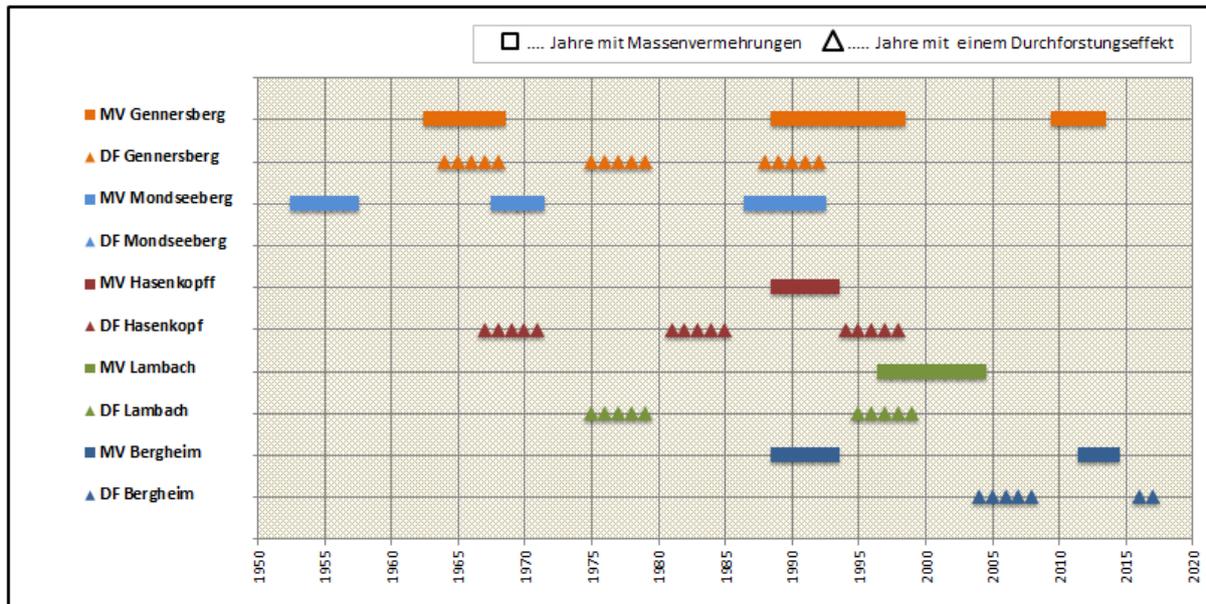


Abb. 16. Befallsstandorte mit Zeiträumen einer Massenvermehrung (MV) von Blattwespen und Zeitpunkte von Durchforstungen (DF) inklusive Jahre mit Durchforstungseffekten.

Tabelle 9. Anzahl Jahre, in denen Massenvermehrung (MV) und Durchforstung (DF) zusammenfallen, sowie DF-Effekte von 5 Jahren nach einer MV

MV.... Massenvermehrung

DF...Durchforstungseffekt

"sonstige DF": DF in keinem zeitlichen Zusammenhang mit MV

Standorte	Jahre		
	MV und DF ident	DF innerhalb 5 Jahre nach MV	sonstige DF
GB	9	5	6
HK	0	5	10
LB	3	0	7
BH	0	2	5
Summe:	12	12	28

Von insgesamt 52 Jahren, in denen Effekte von Durchforstungsmaßnahmen wirksam wurden, lagen 12 Jahre innerhalb von Gradationen sowie 12 Jahre innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 5 Jahren nach einer Massenvermehrung. Die restlichen 28 Jahre stehen in keinem zeitlichen Zusammenhang zu Massenvermehrungen (Tab. 9).

Im Vergleich mit allen Variablen steht der Effekt „nacheingriff“ mit 1,06 % an 8. Stelle, während die Variable „faktor(durchf)1“ mit 19,64 % (relativer Anteil) an 2. Stelle, noch vor der Variable Massenvermehrung steht.

Für die Beurteilung der Auswirkungen von Durchforstungen auf den Radialzuwachs ist die verbundene Variable „nacheingriff:faktor(durchf)1“ die wohl aussagekräftigere. Hier wurden beide Variablen verbunden und es zeigt sich, dass die ersten 5 Jahre nach einer Durchforstung, numerisch fortlaufend skaliert, einen höchst signifikant positiven Einfluss auf den Radialzuwachs haben. Bei der Lmm1.log Auswertung erhöht diese Variable den Zuwachs um 6,03 % im Durchschnitt über den Betrachtungszeitraum und steht damit an 6. Stelle aller Einflussgrößen. Obwohl die Variablen einzeln gesehen einen negativen Einfluss haben, zeigt die Interaktion der beiden Variablen das Gegenteil. Dieses scheinbar paradoxe Ergebnis lässt sich dadurch erklären, dass die binäre Benennung der ersten 5 Jahre nach einer Durchforstung allein keine zufriedenstellende Aussage geben kann. So wie auch die Variable „nacheingriff“, dessen numerische Skalierung auch Jahre beschreibt, in denen die letzte Durchforstung bereits 20 Jahre oder mehr zurückliegt. Dadurch beschreibt diese Variable auch Jahre, in denen kein Durchforstungseffekt mehr wirksam war. Die Verbindung dieser beiden Einflussgrößen gleicht dieses Manko aus.

Die Witterungsparameter „Temperatur“ und „Niederschlag“ in den ersten beiden Quartalen des Jahres haben einen signifikant positiven Einfluss auf den Radialzuwachs. Die Zahlenwerte sind bei Niederschlag (nq2) und Temperatur (tq2) im zweiten Quartal (April-Juni) negativ und im ersten Quartal (Jänner-März) positiv. Die Witterungsdaten sind Angaben, die im Verhältnis zum 30-jährigen Mittel von 1961-1990 stehen. Erhöht sich dieser Verhältniswert um 1, so beeinflusst der jeweilige Parameter den Radialzuwachs um den dazugehörigen Wert (Value) (Tab. 7). Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass, wenn sich Temperatur und Niederschlag im ersten Quartal im Verhältnis zum 30-jährigen Mittel um 1 erhöhen (entspricht einer Verdoppelung gegenüber dem 30-jährigen Mittel), dies den Radialzuwachs der Fichte um 14,31 % (Niederschlag) bzw. um 4,53 % (Temperatur) positiv beeinflusst. Diese Werte wurden der „lmm1.log“ Auswertung entnommen und sind eine theoretische Angabe (Tab. 7). Darüber hinaus zeigen die Werte im 2. Quartal genau die gegenteilige und bedeutend

höhere Auswirkung. So reduziert sich der Zuwachs bei einer theoretischen Verdoppelung der Temperatur bzw. des Niederschlages um 45,69 % (Temperatur) bzw. um 18,55 % (Niederschlag), sofern keine anderen Effekte den Radialzuwachs beeinflussen würden. „nq1“ ist mit einem Anteil von 11,38 % an 4. Stelle und „nq2“ mit 14,76 % an 3. Stelle im Vergleich aller fixen Effekte. „tq1“ hat mit 3,61 % den geringsten Anteil aller signifikanten Witterungsdaten und steht an Stelle 7. „tq2“ hat mit 45,69 % den mit Abstand größten Anteil aller Einflussgrößen (Tab. 7). Nimmt man die Value der lmm1x.log Auswertung, so erhöhen sich die Werte durchschnittlich um den Faktor 1,01, außer bei nq1, wo sich der Einfluss um den Faktor 1,02 reduziert. Die Vorzeichen bleiben jedoch gleich. Klar zu erkennen ist, dass es einen Intensitätswechsel zwischen dem ersten und zweiten Quartal gibt. Während im 1. Quartal der Niederschlag einen mehr als dreimal so großen Einfluss auf den Radialzuwachs hat, kehrt sich dieses Verhältnis im 2. Quartal um, sodass in den Monaten April, Mai und Juni die Temperatur gegenüber dem Niederschlag, einen mehr als zweimal so großen Einfluss hat. Darüber hinaus beeinflussen die Witterungsdaten im 2. Quartal (April-Juni) mit -64,24 % (nq2 + tq2) den Zuwachs am meisten.

Bei den fixen Effekten wie „faktor(lage)“, „befall1“ sowie die Witterungsparameter aus dem dritten und vierten Quartal konnte kein signifikanter Einfluss auf den Zuwachs nachgewiesen werden. Die Variable „Lage“ ist nominalskaliert und beschreibt die Höhenlage der Untersuchungsstandorte (es wurde in 2 Stufen „Hochlage“ und „Tiefelage“ unterschieden).

Die grafische Darstellung von Zuwachsverlauf, nq2 und tq2 sowie den Massenvermehrungen der Blattwespen gibt eine Möglichkeit zur Interpretation. Für diesen Zweck wurden die Witterungsindexdaten des 2. Quartals in Bezug zum gemittelten Radialzuwachs der einzelnen Standorte gebracht, indem man den Indexwert von Temperatur und Niederschlag mit der gemittelten Jahrringbreite multipliziert. Dabei ist nicht der Verlauf der Witterungsdaten (Steigung) von Bedeutung, sondern die Lage in Bezug auf die Jahrringbreitenkurve. Sind diese oberhalb der grünen Kurve, so liegen die Werte in diesem Jahr über dem 30-jährigen Mittel, liegen die Kurven darunter, ist der betreffende Witterungsparameter unterdurchschnittlich (Abb. 17-21).

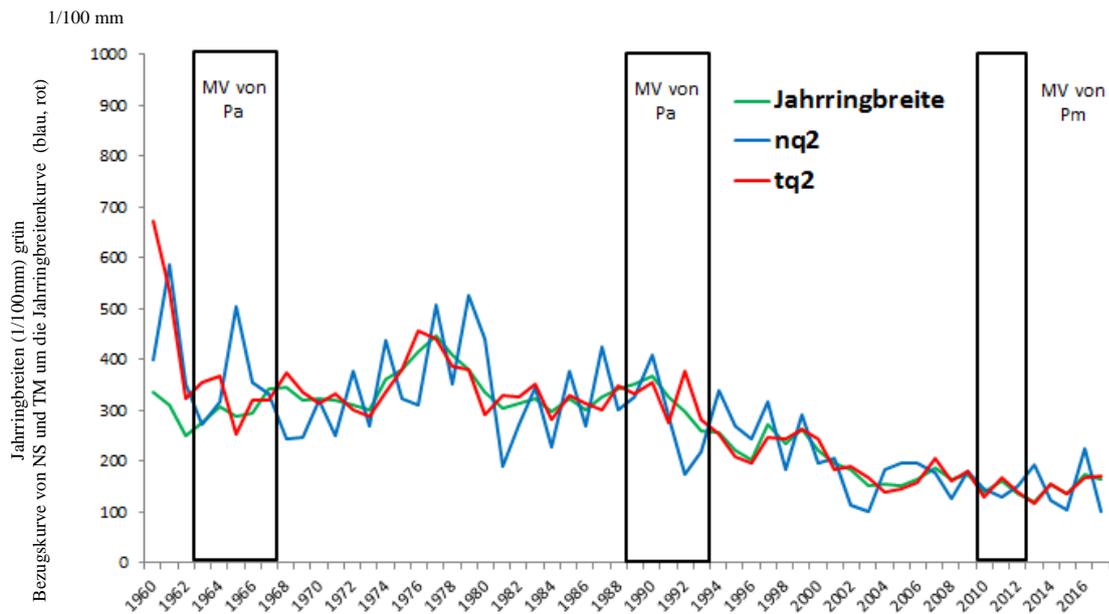


Abb. 17. Standort Gennersberg, gemittelte Jahringbreiten (1/100 mm) (grün), Indexverhältnis Nq2 (blau), Indexverhältnis Tq2 (rot), MV... Massenvermehrung; Pa... *Pristiphora abietina* (Kleine Fichtenblattwespe), Pm... *Pachynematus montanus* (Fichtengebirgsblattwespe)

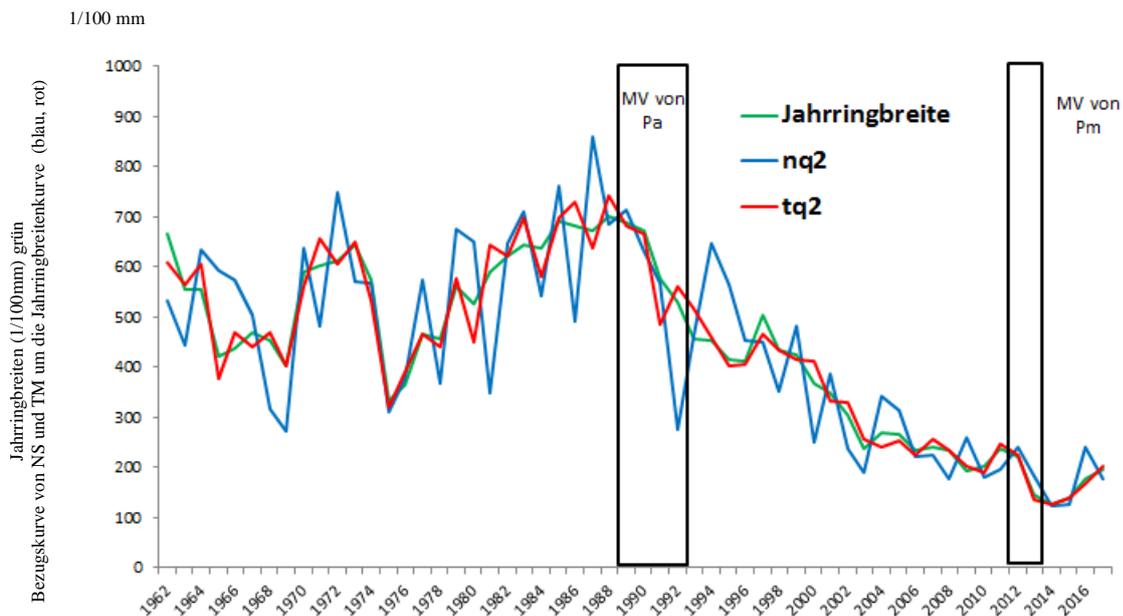


Abb. 18. Standort Bergheim, gemittelte Jahringbreiten (1/100 mm) (grün), Indexverhältnis Nq2 (blau), Indexverhältnis Tq2 (rot), MV... Massenvermehrung; Pa... *Pristiphora abietina* (Kleine Fichtenblattwespe), Pm... *Pachynematus montanus* (Fichtengebirgsblattwespe)

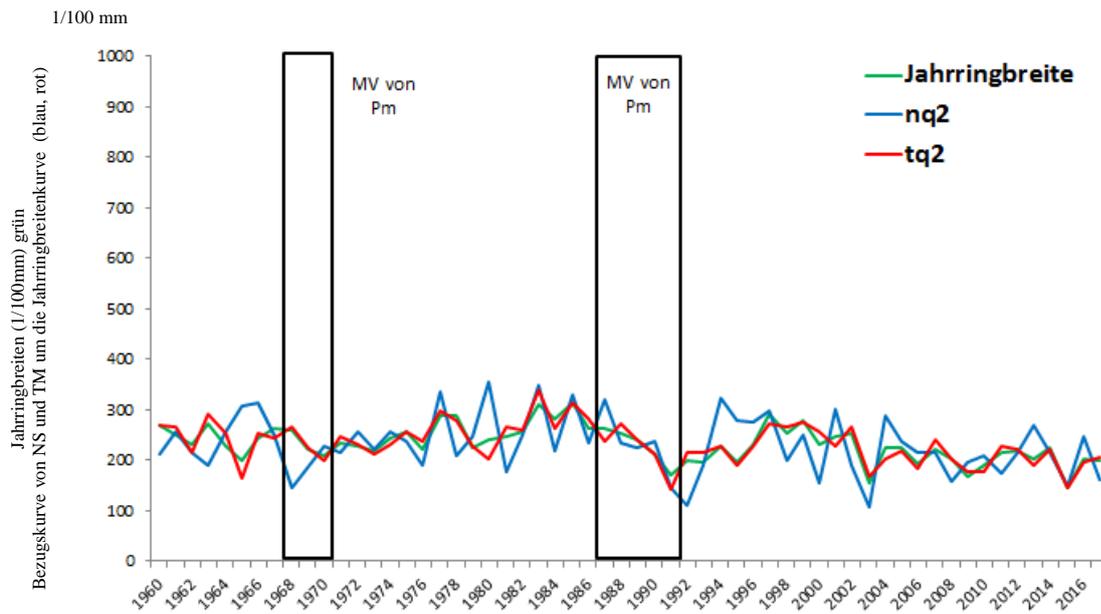


Abb. 19. Standort Mondseeberg, gemittelte Jahrringbreiten (1/100 mm) (grün), Indexverhältnis Nq2 (blau), Indexverhältnis Tq2 (rot), MV... Massenvermehrung; Pa... *Pristiphora abietina* (Kleine Fichtenblattwespe), Pm... *Pachynematus montanus* (Fichtengebirgsblattwespe)

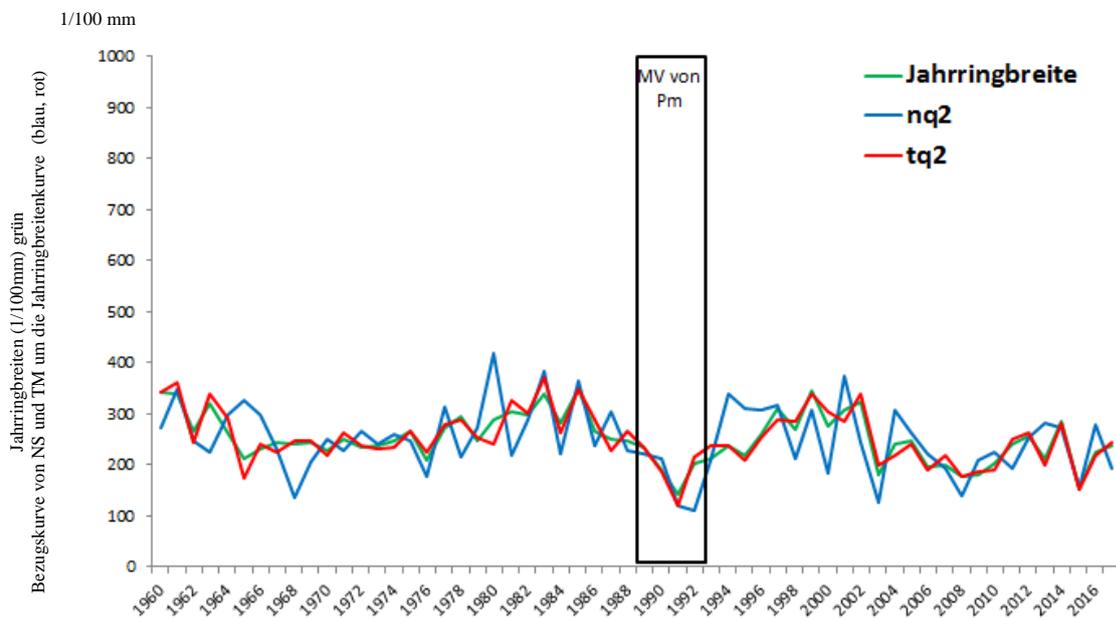
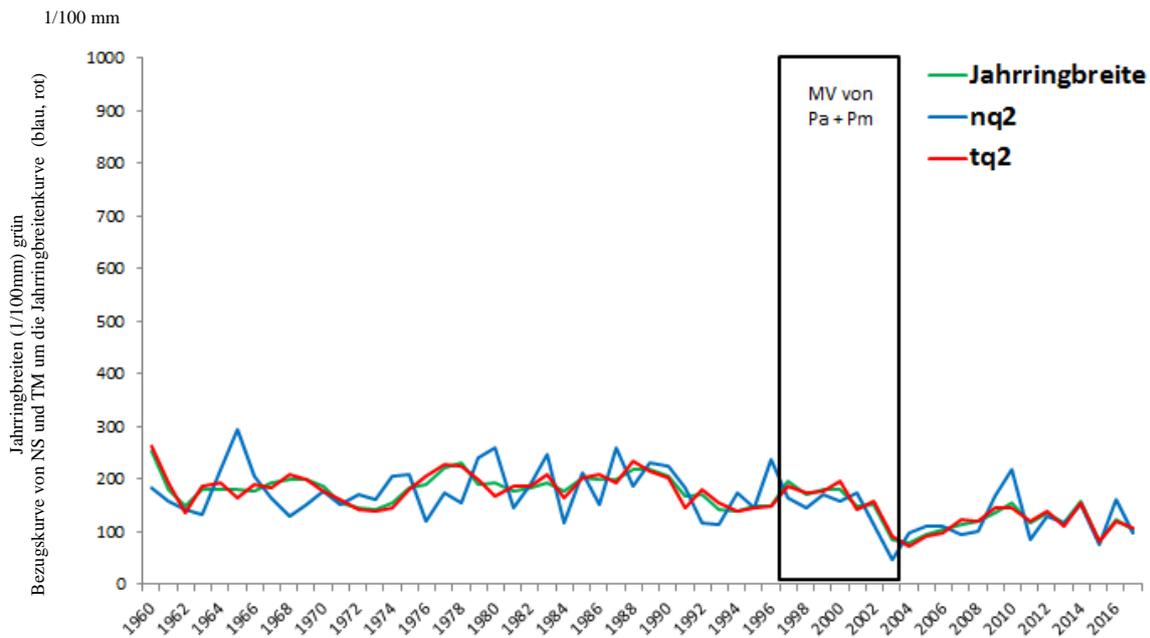


Abb. 20. Standort Hasenkopf, gemittelte Jahrringbreiten (1/100 mm) (grün), Indexverhältnis Nq2 (blau), Indexverhältnis Tq2 (rot), MV... Massenvermehrung; Pa... *Pristiphora abietina* (Kleine Fichtenblattwespe), Pm... *Pachynematus montanus* (Fichtengebirgsblattwespe)



**Abb. 21. Standort Lambach, gemittelte Jahringbreiten (1/100 mm) (grün), Indexverhältnis Nq2 (blau), Indexverhältnis Tq2 (rot), MV... Massenvermehrung; Pa... *Pristiphora abietina* (Kleine Fichtenblattwespe), Pm... *Pachynematus montanus* (Fichtengebirgsblattwespe)**

Die auf den ersten Blick negativen Trends bei allen Standorten lassen sich durch die über die Jahre hinweg geringer werdenden Jahringbreiten begründen. Auf allen Standorten wiesen die Witterungswerte einen leicht positiven Trend auf, außer am Standort Gennersberg. Dieser steht im Gegensatz zur Entwicklung der durchschnittlichen Werte des Jahresniederschlags (Abb. 9). Des Weiteren ist an allen 5 Standorten der ähnliche Verlauf der Kurven von Jahringbreite und Temperatur auffällig. Dies kommt dadurch zustande, dass die Temperatur im Vergleich zum Niederschlag einer wesentlich geringeren Schwankung unterliegt. Die Niederschlagswerte schwanken im 2. Quartal wesentlich stärker als die Temperaturwerte (Abb. 17-21).

Bezüglich Massenvermehrungen von Fichtenblattwespen lässt sich kein eindeutiges Muster erkennen. Es kann jedoch beobachtet werden, dass während der Gradationen der Radialzuwachs sowie auch der Niederschlag im Verhältnis zur Vergleichsperiode (1960-1990) geringer sind. Dies konnte bis auf die erste Massenvermehrung der Kleinen Fichtenblattwespe am Standort Gennersberg bei allen anderen Massenvermehrungen beobachtet werden. Auch die Temperaturwerte lagen (mit Ausnahme des

Standorts Gennersberg) während einer Massenvermehrung deutlich unter dem 30-jährigen Durchschnitt. Ausgesagt werden kann, dass bis auf den Standort Gennersberg der Niederschlag im 2. Quartal während einer Gradation unterdurchschnittliche Werte erreichte (Abb. 17-21).

### 3.5 Hypothesentest

$H_{01}$ : Variablen, die den Insektenfraß quantifizieren, haben keinen signifikanten Einfluss auf den Radialzuwachs.

$H_{02}$ : Klimatische Faktoren haben keinen signifikanten Einfluss auf den Radialzuwachs.

Beide Auswertevarianten zeigen, dass die Variablen „massenv“ und „faktor(interact)“ mit einem P-Wert von 0,00 einen höchst signifikanten Einfluss auf den Radialzuwachs haben. Die Witterungsvariablen der ersten beiden Quartale haben einen P-Wert von  $<0,01$ . Dies bedeutet, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % der Zusammenhang der Stichprobe auch für die Grundgesamtheit gilt. Die Witterungsvariablen im dritten wie auch vierten Quartal haben dagegen keinen signifikanten Einfluss auf den Radialzuwachs. Damit kann  $H_{01}$  mit einer Sicherheit von 95 % verworfen werden.  $H_{02}$  kann insofern abgelehnt werden, da die Witterungseinflüsse auf den Radialzuwachs ab Juli (3. Quartal) eine untergeordnete Rolle spielt. Ab diesem Zeitpunkt werden vorwiegend Spätholzgefäße gebildet, die einen geringen Anteil an der Jahrringbreite haben.

## 4 Diskussion

Der Radialzuwachs von Fichten wird einerseits durch Umwelteinflüsse wie auch genetische Faktoren beeinflusst. Von diesen Umweltfaktoren sind die Lichtverhältnisse (Strahlung) und die Temperatur sowie der Niederschlag von entscheidender Bedeutung. Regionale aber auch jahreszeitliche Unterschiede spielen dabei eine wesentliche Rolle. So ist zum Beispiel im Frühling zu Beginn des Wachstums die Temperatur der limitierende Faktor. Im Sommer haben die Wasserversorgung und somit die Niederschlagsmengen den größeren Einfluss. In Hochlagen hat über das ganze Jahr hinweg die Temperatur den stärksten Einfluss auf das Pflanzenwachstum (Bräker & Rigling, 2004; Blatter, 2015). Die Intensität dieser limitierenden Faktoren muss jedoch nicht über die Bestandesentwicklung hinweg konstant bleiben. So kann nach einer Auflichtung die höhere Einstrahlung dazu führen, dass die Temperatur über die Sommermonate eine wichtigere Rolle spielt als ohne Durchforstung. Erhöhte Einstrahlung führt zu einem Temperaturanstieg an der Rinde, die vor dem Eingriff unter Umständen noch beschattet wurde. Dadurch können Hitzeschäden entstehen (Bräker & Rigling, 2004). Auch die Wasseraufnahmefähigkeit der oberen Bodenhorizonte kann eine bedeutende Rolle spielen. Diese ist bekanntlich bei einer mächtigen Rohhumusaufgabe durch einen „Dachziegeleffekt“ im geeigneten Gelände geringer als bei anderen Humusformen. Diese Humusform und somit auch die Wasseraufnahmemöglichkeit können sich über die Bestandeshistorie hinweg verändern. So kann es aufgrund von Durchforstungsmaßnahmen und dem damit einhergehenden Strahlungs- und Temperaturanstieg am Oberboden zu einer Änderung des Humustyps kommen. Es wurde zwar nur in drei Untersuchungsbeständen (Gennersberg befallen und nicht befallen sowie Mondseeberg befallen) Rohhumus festgestellt, jedoch hatte nur der nicht befallene Referenzbestand am Gennersberg eine Hangneigung (15%), bei der ein Dachziegeleffekt wirksam werden könnte. Ungeachtet dessen sind die Humustypen und deren mögliche Änderungen in der Bestandesgeschichte bei diesen Standorten nicht bekannt.

Aktuelle Untersuchungen, die den Einfluss von Blattwespenbefall auf den Radialzuwachs von Fichten beschreiben, gibt es im Vergleich zu Studien, die den Höhenzuwachsverlust erklären keine. Nägeli

(1936) hat die Auswirkungen von Larvenfraß der Kleinen Fichtenblattwespe auf den Kreisflächenzuwachs der betroffenen Fichten untersucht. Es wurden dabei die Jahrringbreiten von Fichten auf einer Befallsfläche von *P. abietina* gemessen. Er fasste die Zuwächse in 5 Jahresperioden zusammen und stellte die Kreisflächenzuwächse ins Verhältnis zur letzten Periode vor dem Befall durch die Kleine Fichtenblattwespe. In der ersten Periode, in der der Befall stattfand, wurde der Zuwachs in 1,3 m Höhe um 3 % reduziert. In den Folgejahren erhöhten sich die Einbußen auf 55 % (2. Periode) und 77 % (3. Periode). Diese Untersuchung bezog sich auf 2 Einzelbäume in einem Fichten-Föhren Mischwald. Der Befall erreichte in der ersten Periode den Höhepunkt und flaute bis zur letzten hin ab. Davon Gesetzmäßigkeiten abzuleiten wäre nicht zielführend, vor allem da diese Untersuchung von keinem Effekt (wie z.B. Alterseffekt und Witterungseinfluss) bereinigt wurde. Dennoch bietet sich hier ein günstiger Vergleich, denn der Betrachtungszeitraum der Untersuchung ist mit 19 Jahren relativ kurz. Darüber hinaus wurde der Radialzuwachs auch nicht durch plötzliche Freistellungen (Durchforstungen) beeinflusst.

Im Vergleich zu den hier angeführten Ergebnissen ist die Abweichung doch erheblich. Der Befall von Blattwespen reduzierte den Radialzuwachs über 58 Jahre und in allen Befallsbeständen um durchschnittlich 10,46 % (Variable: „faktor(interact)1“) in Jahren mit einer Massenvermehrung. Dieser Parameter hat einen Anteil am Gesamteinfluss von 8,2 % aller Faktoren. Bei Nägeli (1936) lag die durchschnittliche Zuwachsreduktion bei 45 % über einen 15 Jahre andauernden Befall durch die Kleine Fichtenblattwespe. Hierbei ist zu betonen, dass die am längsten andauernde Massenvermehrung in der vorliegenden Arbeit am Standort Gennersberg 10 Jahre betrug.

Blatter führte 2015 eine Analyse durch, die zum Ziel hatte, Nadellängen sowie Jahrringbreiten der Lärche (im Hochgebirge) in Bezug auf das Wachstum beeinflussende Faktoren zu untersuchen (Blatter, 2015). Dabei wurden die Nadellängen aus Aufzeichnungen früherer Untersuchungen herangezogen, während die Jahrringbreiten aus aktuell gewonnenen Bohrkernen ermittelt wurden. Dazu wurden die Jahrringbreiten standardisiert und im ersten Schritt vom Alterstrend bereinigt. Dies wurde mittels dem dplR Pakets und der Methode Spline umgesetzt. So erhält man einen RWI (Ring Width Index). Als Angabe für die Nadellängen bildete Blatter drei Parameter, die maximale

Nadellänge, den Zeitpunkt des Erreichens der 50% - Nadellänge und eine Wachstumskonstante. Diese wurden über die Seehöhe aufgetragen und mittels einer linearen Regression geglättet. Anschließend konnten Korrelationen zwischen den Parametern und den gemittelten Monatstemperaturwerten sowie weiteren Wachstumsfaktoren berechnet werden. Darüber hinaus konnte man auch Aussagen über die Massenvermehrungen des Lärchenwicklers machen. Die „Lärchenwicklerjahre“ wurden grafisch ab Veränderung der maximalen Nadellänge über die Zeit dargestellt. Die Ergebnisse zeigten einen signifikant positiven Zusammenhang zwischen Jahrringbreite und Temperatur in den Monaten April, Mai und Juni, sowie einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt des Erreichens der 50%-Nadellänge und der Jahrringbreite, d.h. je früher die Nadellänge erreicht wird, desto breiter fallen die Jahrringe aus. Dies wird durch eine früher beginnende und somit länger andauernde Wachstumsperiode begründet.

Im Vergleich dazu wurden in dieser Untersuchung die gewonnenen Jahrringe nicht gemittelt. Die Verwendung von Mittelwerten reduziert die Freiheitsgrade der Auswertung und verbessert die Varianz. Damit können einfache lineare Regressionen mit anschließenden Korrelationen berechnet werden. Dabei bekommt man jedoch keine Angabe über die Intensität ihrer Einwirkung sowie auch keine Angabe über zufällige Fehler. Darum geht einer linearen Regression meist eine Stratifizierung sowie Standardisierung des Materials zuvor. Des Weiteren bezieht sich die Untersuchung von Blatter (2015) auf Hochlagenstandorte der Lärche. In Hochlagen ist die Temperatur im Frühjahr der wachstumslimitierende Faktor, wohingegen sich diese Untersuchung auf Tief- bzw. Mittelgebirgslagen bezieht. Jedoch konnte auch hier die Temperatur im 2. Quartal als der entschiedenste Witterungsparameter bestätigt werden. Dass die Nadellänge (Assimilationsmasse) einen signifikanten Einfluss auf den Radialzuwachs hat, bestätigt die Annahme, welche dieser Arbeit zugrunde liegen. Der nicht feststellbare Einfluss der Witterungswerte im 3. und 4. Quartal (Juli-September, Oktober-Dezember) kann durch das Baumwachstum über das Jahr erklärt werden. Das Dickenwachstum von Fichten beginnt ab einer durchschnittlichen Monatstemperatur von  $+5^{\circ}\text{C}$  (Temperaturschwellenwert). Diese wurde auf allen Standorten durchschnittlich zwischen Mitte und Ende April über den gesamten Betrachtungszeitraum erreicht. Ende August, Anfang September wird

das Dickenwachstum zum größten Teil beendet. Zu Beginn des Wachstums werden große Frühholzgefäße gebildet. In der Mitte der Wachstumsperiode geht es über in die Bildung von Spätholz. In den Monaten April und Mai wird der Durchmesserzuwachs vorwiegend von der Temperatur bestimmt. Der Niederschlag hat in diesem Zeitraum eine untergeordnete Rolle, da davon ausgegangen werden kann, dass über die Wintermonate genügend Wasserspeicher im Boden aufgebaut wurde. Im Monat Juni hält sich der Einfluss von Niederschlag und Temperatur die Waage. Sie sind in dieser Zeit von gleichrangiger Bedeutung (Wenk et al., 1990). Die Frühholzgefäße machen den größten Anteil an der Jahringbreite aus, sie werden meist im zweiten Quartal gebildet. Dadurch lässt sich der nicht vorhandene Einfluss der Witterungsparameter im dritten und vierten Quartal begründen.

In der Literatur findet man unterschiedliche Gründe für Massenvermehrungen von Fichtenblattwespen. Alle Autoren weisen darauf hin, dass neben biotischen Faktoren witterungsbedingte Einflüsse während einer für die Entwicklung entscheidenden Phase einen bedeutenden Einfluss auf die Gradation haben. Diese Phasen sind in der jahreszeitlichen Entwicklung die Eiablage sowie die Larvenentwicklung. Die Geschwindigkeit der Entwicklung ist vorwiegend von der Temperatur abhängig und findet im Allgemeinen in den Monaten Mai und Juni statt. Jedoch kann das Schwärmen und die Eiablage auch schon Ende April stattfinden (Nägeli, 1936; Schedl, 1953; Schwerdtfeger, 1981; Schwenke, 1982). Diese Monate bilden das 2. Quartal der Witterungsdaten ( $nq_2 + tq_2$ ,  $lmm1.log$ ) und haben mit 64,24 % Anteil am Gesamteinfluss aller fixen Effekte die größte Wirkung auf den Radialzuwachs.

Durchforstungsmaßnahmen haben einen entscheidenden Einfluss auf den Radialzuwachs von Bäumen. So war es für die Ergebnisfindung von Bedeutung in der Bestandesgeschichte die Zeitpunkte der Durchforstungseingriffe festzustellen. Als Informationsquellen über Durchforstungsmaßnahmen auf den Untersuchungsstandorten wurden Aufzeichnungen von den Revierbetreuern, Mitteilungen der Forstschutzreferenten sowie „stumme Zeugen“ (auf den Flächen verbliebene Stöcke) herangezogen. Parameter, die Durchforstungseingriffe beschreiben, wiesen einzeln gesehen einen durchwegs signifikant negativen Einfluss auf den Radialzuwachs auf. Dem gegenüber steht die Interaktion dieser

beiden, welche eine positive Beeinflussung im Modell hat. Dies könnte einerseits durch die zeitliche Überlappung von Massenvermehrungen und Durchforstungseingriffen erklärt werden. Andererseits können andere Effekte dafür verantwortlich sein. Bräker & Rigling (2004) beschreiben, dass die plötzliche Freistellung von Bäumen auch kurzfristige Anpassungsschwierigkeiten auslösen kann. Durch das zusätzliche Lichtangebot wird die Baumkrone vergrößert, dafür werden mehr Nährstoffe und eine höhere Wasserversorgung benötigt. Des Weiteren ist der Einzelbaum nach einer Freistellung geänderten Windverhältnissen ausgesetzt, der Baum muss Energie zur besseren statischen Absicherung im Wurzelraum einsetzen. Als weitere Möglichkeit den negativen Einfluss auf Freistellungen zu erklären, führen Bräker & Rigling (2004) die Erhöhung von Strahlung und Temperatur an der besonnten Stammseite an. Dadurch können Rindenschäden und somit Trockenstress entstehen. Die Verbindung der Durchforstungsvariablen in der vorliegenden Arbeit zeigen eine mit 6,03 % (lmm1.log) leicht positive Beeinflussung des Radialzuwachses.

Es gilt auch zu hinterfragen wie lange die Auswirkungen einer Massenvermehrung von Blattwespen auf den Zuwachs wirken. Schwerdtfeger (1981) erörtert die in Folgejahren nach Blattwespenfraß beobachteten Zuwachsminderungen. Diese Ernährungsstörung ist bei wintergrünen Nadelhölzern im allgemeinen höher als bei sommergrünen Baumarten. Er betont, dass die Höhe des Schadausmaßes nur selten gewürdigt wird. Laut Reisenberger (persönliche Mitteilung) bleiben durch Raupenfraß entstandene Deformationen der Krone sowie Triebe noch viele Jahre nach einer Massenvermehrung sichtbar. Neben der Fähigkeit des Baumes Nadeln neu zu bilden spielen auch die Knospen- und Triebachsenanzahl eine wesentliche Rolle bei der Erholung von den Nadelverlusten. Es kann geschlossen werden, dass in Jahren während und auch einige Jahre nach einer Massenvermehrung noch Auswirkungen auf den Radialzuwachs der Bäume bestehen.

Ein weiterer Punkt ist die klare Abgrenzung von Gradationen. Am Standort Gennersberg kam es in den Jahren nach 1968 (dem Jahr der ersten bestätigten Massenvermehrung von *P. abietina*) zu regelmäßigen Fraßtätigkeiten der Raupen von *P. abietina* (Reisinger, Revierförster, pers. Mitteilung). Die Intensität des Befalls während dieser Latenzphase war gering, bis die Fraßtätigkeit schließlich Ende der 1970er Jahre zum Erliegen kam. Diese unregelmäßigen Nadelverluste sind nur schwer

quantifizierbar. Sie können jedoch auch einen Einfluss auf den Zuwachs haben. Zusätzlich wurde im Befallsbestand Gennersberg 1974 eine Durchforstung durchgeführt, wodurch sich wiederum zwei Effekte überlagern.

Die Varianzen auf der Ebene der Zufallseffekte sind ernüchternd. Bei beiden Auswertevarianten gab es sowohl innerhalb der Gebiete als auch innerhalb der Jahre eine starke Streuung. Dies lässt sich durch die hohe Anzahl an Freiheitsgraden sowie durch nicht quantifizierbare Einflussgrößen auf den Radialzuwachs begründen. Bei dendrochronologischen Untersuchungen werden durch die Bildung von Mittelwerten die Freiheitsgrade reduziert (Kindermann & Neumann, 2011). Jahrringverläufe von Einzelbäumen weisen eine hohe Fluktuation auf. Durch die Mittelung der 20 gleichaltrigen Bäume einer Stichprobe hätte man die Freiheitsgrade bei allen Parametern (außer „Jahr“) von 10 199 auf 1 079 reduziert. Dadurch würde sich die Varianz erheblich verringern. Andererseits wirken auf den Radialzuwachs Störgrößen, die retrospektiv nicht feststellbar sind. Diese Parameter können die Bestandesdichte, Individualkonkurrenz, genetische Faktoren, Strahlungsverhältnisse sowie auch die Wechselwirkung von Klimafaktoren und Boden (nWSK) sein. Hätte man z.B. Größen wie den Bestockungsgrad über die Bestandesentwicklungsphasen hinweg als Konkurrenzangabe miteinfließen lassen können, wäre dies noch immer keine Angabe über die Individualkonkurrenz eines Einzelbaumes. Diese entsteht durch die unmittelbare Nachbarschaft, sodass Angaben über die Bestandesdichte mittels Bestockungsgrad hier kein zufriedenstellendes Ergebnis bringen würden. Aufgrund der Streuung innerhalb der hierarchisch strukturierten Gruppen sowie auch aufgrund der unbekanntem Effekte war es sinnvoll, ein gemischtes lineares Modell mit dem allgemeinen Formelaufbau zu wählen:

$$y = X\beta + Zu + e .$$

**Abb. 22. Allgemeine Formel von gemischten linearen Modellen (Knapp, 2017).**

$y$ ... beobachtbarer Zufallsvektor  
 $X$ ... bekannte Modellmatrix der festen Effekte  
 $\beta$ ... unbekannter Vektor der festen Effekte  
 $Z$ ... bekannte zufällige Effekte  
 $u$ ... nicht beobachtbarer Zufallsvektor der zufälligen Effekte  
 $e$ ... nicht beobachtbarer Zufallsvektor der Fehler

Man erkennt, dass die in diesem Fall retrospektiv nicht quantifizierbaren Einflussfaktoren bei dieser Auswertungsform  $u$  darstellen. Durch die Mittelung der Jahrringe pro Untersuchungsbestand und einer Stratifizierung des Materials hätte man auch ein Modell wählen können, dem eine einfache lineare Regression zu Grunde liegt. Dabei muss man jedoch hervorheben, dass bei diesen Modellrechnungen die hierarchische Struktur der Modellmatrix sowie die zufälligen Fehler nicht berücksichtigt werden können. Dadurch würde sich wiederum die Varianz um den erwarteten Mittelwert von 0 erhöhen. Laut Bräker & Rigling (2004) bedarf es darüber hinaus bei der Verwendung von einfachen linearen Regressionen einer Stratifizierung des Untersuchungsmaterials. Bei kleinen Stichprobenumfängen sollten beim Vergleich von Beständen einheitliche Altersklassen sowie auch gleiche Behandlungshistorien vorliegen. Dadurch kann man unterschiedliche Effekte (z.B. Alterseffekt) trennen und somit die Variabilität des Untersuchungsmaterials reduzieren.

Des Weiteren sind die Tests der Varianzaufklärung zu beleuchten. Dazu wurde die Gesamtvarianz mit „pseudo- $R^2$ “ berechnet sowie ein Varianzvergleich innerhalb der Gruppen durchgeführt. Dem Varianzvergleich liegt eine einfaktorielle univariate Varianzanalyse (one-way ANOVA) zugrunde. Diese ANOVA berücksichtigt ebenfalls keine unbeobachteten Fehler sowie auch keine nicht beobachtbaren Effekte. Diese Prüfung erwies sich als Abhängigkeitstest der Parameter. Es zeigte sich, dass die Unabhängigkeitsannahme verletzt ist. Die Prüfung mit dem pseudo- $R^2$  gibt die Gesamtvarianz wieder. Die Ergebnisse eines linearen gemischten Modells geben hingegen die wesentlich aussagekräftigeren Varianzen der Gruppen an.

Über die Ursachen von Massenvermehrungen können noch keine konkreten Aussagen gemacht werden. Man kann jedoch vermuten, dass klimatische Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf Blattwespen-Gradationen haben, besonders während wichtiger Entwicklungsphasen (Schwenke, 1982). Schedl (1953) gibt Hitze während der Larvenentwicklung als besonders negativen Einflussfaktor an. Hohe Temperaturen führen zu einer frühzeitigen Verhärtung der Nadeln, was den Fraß hemmen kann. Darüber hinaus weist Schedl (1936) auch auf die negative Wirkung von

Niederschlag während der Eiablage bzw. Starkregen während des Larvenfraßes hin. Anhand der grafischen Darstellung von Niederschlägen in Jahren mit Massenvermehrungen ist ersichtlich, dass der Niederschlag im 2. Quartal jeweils weit unter dem 30-jährigen Mittel lag, ähnliche Verschiebungen gab es auch bei den Temperaturwerten. Auch außerhalb von Massenvermehrungsphasen kommen negative Spitzenwerte von Temperatur und Niederschlag vor, so zum Beispiel am Standort Mondseeberg im Jahr 2003 oder 1984 am Standort Lambach. Geringe Niederschläge während der Eiablage sowie auch gemäßigte Temperaturen (keine Extremwerte) während des Larvenfraßes sind förderlich für die Entwicklung der Tiere. Dem gegenüber steht jedoch die Beobachtung, dass bei Ausbruch von Massenvermehrungen die Witterungswerte annähernd im Durchschnitt liegen. Das Schwärmverhalten und der Schwärmzeitpunkt der adulten Wespen sowie der Schlupfzeitpunkt der Larven werden durch niedrige Temperaturen im Frühjahr negativ beeinflusst.

## 5 Schlussfolgerung/Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sich gemischte lineare Modelle bestens für die Analyse von dendrochronologischen Datensätzen eignen. Das Baumwachstum wird von unterschiedlichen Parametern beeinflusst, die teilweise gar nicht oder nur bedingt quantifiziert werden können. Alle bestimmbaren Einflussgrößen auf die Jahringbreite wurden in dieser Arbeit miteinbezogen. So konnte festgestellt werden, dass man mittels dieser Methode die Variablen klar trennen kann und auch deren Intensität bestimmbar ist. Der durch Blattwespenfraß verursachte Verlust an Assimilationsmasse hat sichtbare Auswirkungen auf die Jahringbreiten. Die Witterungsfaktoren Temperatur und Niederschlag in den Monaten April, Mai und Juni haben den mit Abstand größten Einfluss auf den Radialzuwachs. Generell kann gesagt werden, dass Witterungsverhältnisse eines Jahres vor allem im 2. Quartal die Jahringbreiten am stärksten beeinflussen.

Für weitere Untersuchungen in diesem Bereich bietet sich die Analyse des Chlorophyllgehalts an. Der Chlorophyllgehalt kann dazu als Vitalitätsparameter verwendet werden. Man kann eine Modellberechnung mit diesem neu gewonnen und quantifizierbaren Parametern durchführen. Um die Intensität der Auswirkungen von Blattwespenfraß bestimmen zu können, könnten hier die Erhebung der Daten mittels Infrarotsensoren, die den Chlorophyllgehalt quantifizieren, durchgeführt werden. Darüber hinaus kann sich der Chlorophyllgehalt auch über das Jahr hinweg durch witterungsbedingte Faktoren ändern. Die daraus gewonnenen Datensätze können dann mit Witterungsfaktoren sowie Jahringbreiten in Bezug gesetzt werden. So verdichten sich die voneinander abhängigen Datensätze und es können noch genauere Aussagen über das Baumwachstum getroffen werden.

## 6 Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten wurden vor allem in den sogenannten sekundären Nadelwäldern des nördlichen Alpenvorlands unregelmäßige, aber häufig wiederkehrende Massenvermehrungen von Fichtenblattwespen, speziell der Kleinen Fichtenblattwespe, *Pristiphora abietina* (Hym., Tenthredinidae), und der Fichtengebirgsblattwespe, *Pachynematus montanus* (Hym., Tenthredinidae) beobachtet. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mögliche Auswirkungen des Nadelfraßes der Blattwespen-Larven auf den Radialzuwachs der betroffenen Fichten (*Picea abies*) festzustellen. Dazu wurden quantifizierbare Einflussgrößen sowie auch nicht quantifizierbare Störgrößen auf den Radialzuwachs in einem Gemischten Linearen Modell (linear mixed-effects model) mit dem Statistikprogramm R berechnet.

Zu den wichtigsten Einflussgrößen auf den Radialzuwachs von Bäumen zählen Temperatur und Niederschlag sowie die Konkurrenz der Einzelbäume zu einander über die Bestandeshistorie hinweg. In einem ersten Schritt wurden fünf Untersuchungsstandorte (3 Tieflagenstandorte in 350-400 m Seehöhe, 2 Hochlagenstandorte in 850-900 m Seehöhe) mit dokumentierten Jahren von Blattwespen-Massenvermehrungen in Oberösterreich und Salzburg ausgewählt und an jedem Standort Bestände mit jeweils 20 ehemals befallenen Fichten und Referenzbestände mit je 20 nicht befallenen Bäumen ausgewiesen. Von diesen insgesamt 200 Bäumen wurden je zwei Bohrkerne in etwa 1,50 m Stammhöhe im Winter 2017/18 entnommen und die Jahreszuwächse anhand der Jahrringbreiten bestimmt. Je nach Standort lag das Alter der Fichten zwischen 50 und 110 Jahren. Jahre mit bekannten Massenvermehrungen von Fichtenblattwespen sowie Durchforstungsmaßnahmen wurden mit Dummyvariablen in das Modell miteinbezogen. Da Durchforstungen über einen begrenzten Zeitraum auf den Zuwachs der Bäume wirken, wurden zwei Dummyvariablen eingesetzt. Die erste kennzeichnet die ersten fünf Jahre nach einer Durchforstung, während die zweite Dummyvariable ordinalskaliert die Jahre zwischen zwei Durchforstungen aufsummiert. Die Werte für die durchschnittlichen monatlichen Niederschlagssummen und Monatsmittelwerte der Lufttemperaturen wurden von den den Untersuchungsstandorten nächstgelegenen Wetterstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und

Geodynamik (ZAMG) in Salzburg bezogen. Diese Monatsmittelwerte wurden in Relation zum 30-jährigen Mittel von 1961-1990 gesetzt. Die daraus entstandenen Indexwerte wurden zu 3-monatigen Quartalswerten (Jänner-März, April-Juni, Juli-September, Oktober-Dezember) für Niederschlag und Temperatur für jedes einzelne Jahr des gesamten Untersuchungszeitraums (1960-2017) zusammengefasst. Das Alter der Untersuchungsbestände sowie die Höhenlage der Standorte (Tieflage, Hochlage) wurden ebenfalls als Variablen in das Modell einbezogen.

Der Datensatz war in hierarchischen Gruppen strukturiert, somit wurde zur Berechnung ein gemischtes lineares Modell gewählt, mit dem man fixe und zufällige Effekte in der Datenstruktur berücksichtigen kann. Diese lag vor, da die Intergruppenvarianz einen signifikanten Anteil an der Gesamtvarianz ausmachte. Fixe Effekte im Modell waren je 4 Quartalswerte pro Jahr für Temperatur und Niederschlag, Angaben zu Durchforstung, Massenvermehrung von Blattwespen, Alter der Bestände und Höhenlage der Standorte. Als zufällige Effekte wurde das „Gebiet“ als erster Gruppe auf Level 2 und die darin enthaltene Subgruppe „Jahr“ auf Level 1 definiert.

Die Auswertungen mit dem gemischten linearen Modell machen deutlich, dass die Witterung (Niederschlag und Temperatur) in den ersten beiden Quartalen (Jänner-März und April-Juni) eines Jahres mit über 83 % den größten Einfluss auf die Jahrringbreite der Bäume hatte. Dabei waren die Temperatur und der Niederschlag im 2. Quartal mit über 45 % bzw. mehr als 18 % die größten Einflussfaktoren. Wenn sich die Temperatur im 2. Quartal im Verhältnis zum 30-jährigen Mittel (1961-1990) verdoppelte, reduzierte dies den Radialzuwachs um durchschnittlich 45 %. Jahre mit Massenvermehrungen der Fichtenblattwespen hatten ebenfalls einen hoch signifikanten negativen Einfluss auf den Radialzuwachs der Fichten; die Jahrringbreite verringerte sich in Jahren mit Massenvermehrungen während des Untersuchungszeitraums (1960-2017) um 8 %. Auch Durchforstungsmaßnahmen hatten mit etwa plus 6 % eine hoch signifikante Auswirkung auf den Radialzuwachs. Dieser Effekt trat aber nur in den ersten fünf Jahren nach einer Durchforstung auf. Das Alter der Bestände hatte mit minus 0,8 % einen nur gering negativen Einfluss auf die Jahrringbreite. Die Witterungsdaten des 3. und 4. Quartals sowie die Höhenlage der Standorte hatten dagegen keinen signifikanten Einfluss auf den Radialzuwachs der Fichten.

## 7 Literaturverzeichnis

**Altenkirch, W. Majunke, C., & Ohnesorge, B.** (2002). Waldschutz auf ökologischer Grundlage. Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH & Co S. 357-371.

**Bellos, P. Hochbichler, E. Jasser, C. Reisenberger, J. & Wampl, J.** (2003). Arbeitsunterlagen Forschungsprojekt Stiftswald Lambach. Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur, Wien.

**Berger, R.** (1990). Massenaufreten der Kleinen Fichtenblattwespe *Pristiphora abietina* (Christ) im Hausruck im Zusammenhang mit forstschädlichen Luftverunreinigungen. Dissertation an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz, S. 113-120.

**Blatter, A.** (2015). Räumliche und zeitliche Unterschiede von Nadellängen und Jahrringbreiten im Engadin. Masterarbeit an der Universität Zürich, Geographisches Institut, Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät, 84 S.

**Bräker, O., & Rigling, A.** (2004). Waldnutzung und Jahrringe. Schweiz : Schweiz. Z. Forstwesen 155(2004) 6. S. 169-177.

**Egginger, M.** (2013). Untersuchungen zur Massenvermehrung der Fichtenblattwespenpopulation im nördlichen Flachgau. Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz. 76 S.

**Fries, J.** (1974). Growth Models for Tree and Stand simulation. Sweden: International union of Forstry Research Organizations. S. 18-64.

**Fritts, H. C.** (1976). Tree rings and climate. London: Acad. Press. S. 26-39.

**Gadow, K.** (2003). Waldstruktur und Wachstum. Göttingen: Institut für Waldinventur und Waldwachstum, Göttinger Universitätsverlag. S. 6-32.

**Günther, F.** (2015). Gemischte lineare Modelle. Abgerufen am 25. 07 2018 von Linear Mixed Effekt Model: [http://www.lingexp.uni-tuebingen.de/z2/LMEM/LMEM\\_pres.pdf](http://www.lingexp.uni-tuebingen.de/z2/LMEM/LMEM_pres.pdf)

**Heller, B.** (1993). Untersuchungen zur Populationsdynamik der Gebirgsfichtenblattwespe. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz, 143 S.

**Kindermann, G., & Neumann, M.** (2011). Zuwachsreduktion auf Witterungsextreme. BFW-Praxisinformation Nr. 24, S. 25-28.

**Klemmt, H.-J., Leibold, E., Dauber, E., Radike, W.-D., & Pretzsch, H.** (2009). Auswirkungen des Bafalls der kleinen Fichtenblattwespe auf das Wachstum der Fichte. AFZ Der Wald. 23. S. 1247-1249.

**Knapp, G.** (11. 05 2017). Abgerufen am 10. 02 2019 von [https://www.statistik.tu-dortmund.de/fileadmin/user\\_upload/Lehrstuehle/Ingenieur/Knapp/Gemischte\\_Modelle/GemischteModelle.pdf](https://www.statistik.tu-dortmund.de/fileadmin/user_upload/Lehrstuehle/Ingenieur/Knapp/Gemischte_Modelle/GemischteModelle.pdf) S. 5.

**Meyer, B.** (2015). Einführung in die Mehrebenenanalyse in gemischten Modellen mit R, TU Chemnitz. Chemnitz: Fakultät für Human- und Sozialwissenschaften, Organisation- und Wirtschaftspsychologie. 48 S.

**Nägeli, W.** (1936). Die Kleine Fichtenblattwespe (*Lygaeonematus pini* Retz. = *Nematus abietinus* Christ). Eidgenössische Technische Hochschule in Zürich 19. S. 351-381.

**Ohnesorge, B.** (1991). Tiere als Pflanzenschädlinge, Ökologische Grundlagen des Schädlingsbefalls an Kulturpflanzen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York S. 90-105.

**Polli, M.** (1990). Die Kleine Fichtenblattwespe *Pristiphora abietina* (Christ.) im Gebiet des Hausruck (OÖ). Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz, 150 S.

**R Core Team** (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.

**Schafellner, C., & Schopf, A.** (2014). Massenaufreten der Fichtengebirgsblattwespe in Tieflagen als Folge des Klimawandels? Wien: BFW, Forstschutz Aktuell 60/61. S. 12-19.

**Schatteiner, G.** (1996). Standortkundliche Aspekte zur Epidemiologie der Kleinen Fichtenblattwespe *Pristiphora abietina* (Christ) (Hym. Tenthredinidae). Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz, 116 S.

**Schedl, K.** (1953). Die Kleine Fichtenblattwespe (*Lygeonematus pini* Retz). Kärnten: Verlag Forstliche Bundesversuchsanstalt MariaBrunn, 135 S.

**Schmidt, J.** (1990). Überlegungen zur Erfassung und Beschreibung von Wachstumsgängen am Beispiel der Durchmesserzuwachsentwicklung der letzten Jahrzehnte von Fichtenaltbeständen in Bayern unter besonderer Berücksichtigung witterungsbedingter Zuwachsreaktionen. München: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München. S. 6-16.

**Schopf, A.** (2013). Forstschutzbehandlungskonzept gegen die Gebirgsfichtenblattwespe. Universität für Bodenkultur, Bezirkshauptmannschaft Salzburg-Umgebung, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz, 64 S.

**Schröder, J.** (2004). Zur Modellierung von Wachstum und Konkurrenz in Kiefer/Buchen - Waldumbaubeständen Nordwestsachsens. Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH & CO. S. 52-96.

**Schwenke, W.** (1982). Die Forstschädlinge Europas. Band 4, Hautflügler und Zweiflügler München: Paul Parey, Hamburg und Berlin. S. 150-196.

**Schwerdtfeger, F.** (1981). Die Waldkrankheiten, Ein Lehrbuch der Forstpathologie und des Forstschutzes. Göttingen: Paul Parey Hamburg und Berlin S. 234-294.

**Sterba, H., & Eckmüllner, O.** (1988). Endbericht zum Projekt "Zuwachsreaktion von Bäumen auf Umweltbelastungen". Wien, Universität für Bodenkultur, Institut für Forstliche Ertragslehre. 48 S.

**Tataw, J. T.** (2006). Untersuchungen zum Auftreten der Fichtenblattwespe (Oberösterreich) in den Jahren 2003 und 2004: Einfluss von kleinräumigen Bestandesparametern auf die Abundanz verschiedener Fichtenblattwespen-Arten. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz. 71 S.

**Wenk, G., Antanaitis, V., & Smelko, S.** (1990). Waldkrankheiten. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin GmbH. S. 61-63.

**Wiener, L.** (1983). Die Rolle der Kleinen Roten Waldameise *Formica polycenta* im Massenwechsel der Kleinen Fichtenblattwespe *Pristiphora abietina*. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz, 75 S.

## 8 Anhang

### R-Codes

```
library(tidyr)
library(dplyr)
library(lmfor)
library(lme4)
library(Matrix)
library(MuMIn)

tab$interact <- ifelse(tab$befall==1&tab$massenv==1,1,0)

lmm1.log <- lme(log(y) ~ massenv
               + befall
               + alter
               + nacheingriff * factor(durchf)
               + factor(lage)
               + nq1 + nq2 + nq3 + nq4
               + tq1 + tq2 + tq3 + tq4
               + Jahr
               , random= ~1 | gebiet/Jahr
               , data = tab)

lmm1.logX <- lme(log(y) ~ factor(interact)
                + alter
                + nacheingriff * factor(durchf)
                + factor(lage)
                + nq1 + nq2 + nq3 + nq4
                + tq1 + tq2 + tq3 + tq4
                + Jahr
                ,
                random= ~1 | gebiet/Jahr
                , data = tab)

hist(ranef(lmm1.log)$jahr[,1])

hist(resid(lmm1.log))

plot(ranef(lmm1.log))

r.squaredGLMM(lmm1.log)

iccmodellee <- aov(y ~ gebiet, data = tab)
summary( iccmodellee)

ICC1(iccmodellee)          ICC2(iccmodellee)
```