

# Eschentriebsterben in Edellaubholz-Mischbeständen: Zusammenhänge zur Bestandesstruktur und Auswirkungen auf den Durchmesserzuwachs

Ralf-Volker Nagel, Egbert Schönfelder, Axel Noltensmeier und Martin Nitsche  
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen

## 1 Einleitung und Versuchsfragen

Die Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior* L.) ist die flächenmäßig bedeutendste Edellaubbaumart in Deutschland und auch in den vier Bundesländern Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. Mit dem Eschentriebsterben (ETS) prägt ein 2002 erstmalig in Deutschland beobachtetes Pathogen zunehmend das Bild der Eschenbestände bzw. der in Mischbeständen vertretenen Eschen (METZLER et al. 2013). Mancherorts sind die Schäden bereits so ausgeprägt, dass eine planmäßige Bewirtschaftung der Esche in Frage steht. Als Erreger wurde der aus Ostasien stammende und 2007 erstmals in Deutschland nachgewiesene Schlauchpilz *Chalara fraxinea* als Nebenfruchtform von *Hymenoscyphus pseudoalbidus* identifiziert. Die Infektion erfolgt durch die Ascosporen über die Blätter der Eschen. Die Folgen sind Welkeerscheinungen, vorzeitiger Blattfall und Schädigung der Triebe, was zunächst zu Kronenverlichtungen führt. Das Eindringen des Pilzes in Kambium und Holz führt in der Folge zum Rücksterben von Ästen, zu Holzfehlern und zu einer Gesamtschwächung der Bäume, was in fortgeschrittenen Stadien den Befall mit Eschenbastkäfern sowie Hallimasch und anderen Wurzel- und Stammfäule verursachenden Pilzen nach sich zieht.

Das Sachgebiet Ertragskunde der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) verfügt über eine Reihe ertragskundlicher Versuchsflächen mit mehr oder weniger großen Mischungsanteilen an Esche. Den Kern dieser Versuchsflächen bilden Wuchsreihen (unechte Zeitreihen) in vier Regionen (GUERICKE 2005, PRETZSCH 2001). Hinzu kommen einige Ertragsversuche. Es handelt es sich um Buchen-Edellaubholz-Mischbestände, in denen neben variablen Anteilen an Buche und Esche eine Reihe weiterer Edellaubbaumarten wie Berg- und Spitzahorn sowie geringe Anteile von Vogelkirsche, Hainbuche, Spitzahorn, Elsbeere, Traubeneiche und vereinzelt Europäische Lärche vorkommen. Auch in diesen Versuchsflächen sind seit einigen Jahren Symptome des Eschentriebsterbens zu beobachten. Auffällig erschien eine unterschiedliche Ausprägung der Symptome in den verschiedenen Versuchsparzellen. Es entstand die Idee, im Rahmen jährlich wiederholter Bonituren den Schadensverlauf auf diesen Flächen zu verfolgen. Die „Versuchsanstellung“ ist damit keine originär auf das Eschentriebsterben bezogene. Neben pragmatischen Erwägungen der vorhandenen Versuchsinfrastruktur in Form abgegrenzter Parzellen, nummerierter Einzelbäume und Vorinformationen zu einzelbaum- und flächenbezogenen ertragskundlichen Kennwerten gab die Unsicherheit über die künftige Versuchssteuerung letztlich den Anstoß zu den durchgeführten Aufnahmen.

Nachdem mittlerweile für vier aufeinanderfolgende Jahre Schadansprachen vorliegen, soll folgenden Versuchsfragen nachgegangen werden:

1. Werden für den Beobachtungszeitraum regionale Unterschiede im Schadausmaß bzw. Schadensverlauf erkennbar?
2. Wie ist der zeitliche Schadensverlauf über den Beobachtungszeitraum?
3. Ist ein Einfluss von leicht zugänglichen Merkmalen der Bestandesstruktur (Baumalter, Mischungsanteil der Esche an der Bestandesgrundfläche, Stellung bzw. Rang der beobachteten Eschen im Bestandesgefüge) auf das Schadausmaß festzustellen?
4. Welchen Einfluss hat die Schädigung auf den Durchmesserzuwachs der Eschen?

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Lage und Charakterisierung der Untersuchungsgebiete und Versuchsflächen

In die Untersuchung einbezogen wurden 35 ertragskundliche Versuchsparzellen, die sich auf vier Untersuchungsregionen konzentrieren. Den Kern der Untersuchungsflächen bilden in allen vier Regionen Wuchsreihen (unechte Zeitreihen) in Buchen-Edellaubholz-Mischbeständen. In der Region Göttinger Wald kommen weitere Ertragsversuche in Beständen vergleichbarer Struktur hinzu. Die Lage der Untersuchungsregionen folgt einem Nord-Süd-Verlauf (s. Abb. 1), der für den Zuständigkeitsbereich der NW-

FVA den unterstellten Haupteinwanderungsweg des Pathogens nachzeichnet. Dabei ist die Region Lauenburg im südöstlichen Schleswig-Holstein die einzige im Tiefland gelegene, während es sich bei den anderen um Mittelgebirgsstandorte handelt.

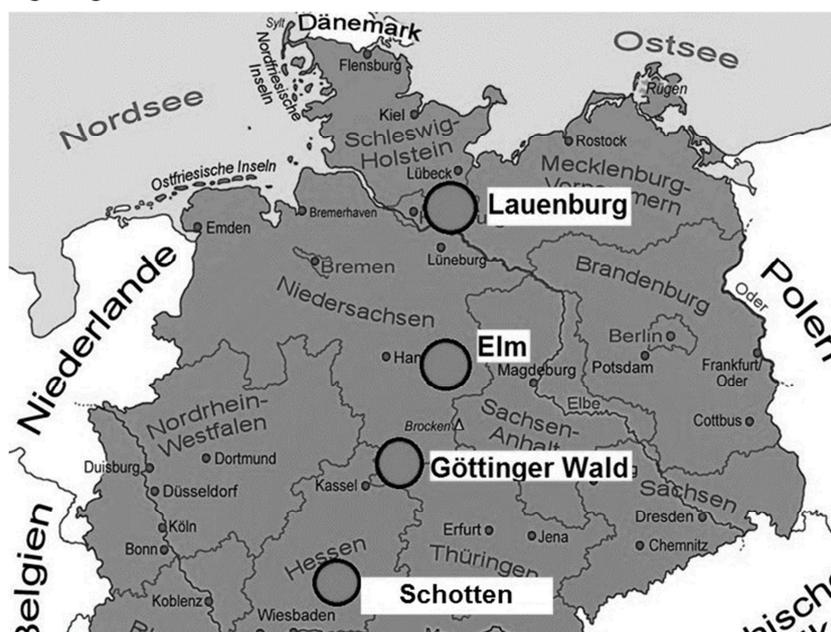


Abbildung 1: Geografische Lage der Regionen der ertragskundlichen Versuchsflächen

Einen kurzen Überblick über die klimatische und standörtliche Einordnung der Untersuchungsregionen vermittelt Tabelle 1. Die Regionen Elm und Göttinger Wald ähneln sich hinsichtlich der edaphischen Verhältnisse. In beiden Regionen bildet der Muschelkalk das Ausgangssubstrat der Bodenbildung, im Elm allerdings mit höheren Lößanteilen, was tendenziell zu einer besseren Wasserspeicherkapazität der Böden führt. Klimatisch ist der Elm die trockenste der Regionen, die im südlichen Vogelsberg gelegene Region Schotten die feuchteste. Hinsichtlich der Nährstoffausstattung sind die Böden aller Regionen als eutroph zu kennzeichnen und genügen damit den hohen Ansprüchen der Esche vollauf.

Tabelle 1: Klimatische und standörtliche Charakterisierung der Versuchsregionen

	Lauenburg	Elm	Göttinger Wald	Schotten
mittl. Jahrestemp. [°C] <sup>1</sup>	8,3	8,8	8,0	8,4
Niederschlag [mm] <sup>1</sup>	690	620	740	870
Substrat	Lehm bzw. Geschiebemergel	Muschelkalk, deutlicher Lösseinfluss	Muschelkalk, geringerer Lösseinfluss	Basalt, Löss beeinflusst
Trophie	eutroph Carbonat im Unterboden	kalkeutroph	kalkeutroph	eutroph
Wasserhaushalt	staufrisch bis vorratsfrisch	frisch	mäßig frisch bis frisch	frisch bis betont frisch

Tabelle 2 zeigt die Gesamtzahl der in die Untersuchung einbezogenen Versuchspartellen und Einzelbäume zu Beobachtungsbeginn sowie deren Verteilung auf die vier Regionen. Drei Versuchspartellen, eine in Lauenburg und zwei im Göttinger Wald, weisen ein deutlich zweischichtiges Bestandesprofil mit beobachteten Eschen im Ober- und Unterstand auf, die somit durch deutlich abweichende Alter und eine auf ihre jeweilige Bestandesschicht bezogen unterschiedliche Konkurrenzsituation zu charakterisieren sind. Diese Bäume werden durch die Trennung von Ober- und Unterstand in der Folge als verschie-

<sup>1</sup> Werte für den Wuchsbezirk

denen „Populationen“ angehörig betrachtet, sodass insgesamt Eschen aus 38 Populationen beobachtet wurden.

Tabelle 2: Gesamtanzahl und regionale Verteilung der Beobachtungsflächen und Einzelbäume

Region	Lauenburg	Elm	Göttinger Wald	Schotten	Σ
N Felder	6 (+1)	7	16 (+2)	6	35 (38)
N Einzelb.	220	116	319	357	1012

## 2.2 Schadbonitur zum Eschentriebsterben

Eine Schadbonitur an den Eschen der Baumklassen 1 bis 3 nach dem Schlüssel des VdFV (1902) der Versuchspartellen erfolgte jährlich beginnend mit dem Jahr 2013, sodass bislang vier Aufnahmen vorliegen. Grundlage der Ansprache war der von der Abt. Waldschutz der NW-FVA (2011) entwickelte Boniturschlüssel, nach dem die Bäume primär nach ihrem Belaubungs- und Kronenzustand unter Einbeziehung weiterer Hilfsmerkmale in einer Ordinalskala von 0 bis 5 einer Schadstufe zugeordnet werden (siehe Abb. 2).

<p><b>Stufe 0</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>vitale Esche</li> <li>ohne Symptome des ETS im Kronenbereich</li> <li>volle Belaubung</li> <li>kein Käferbefall</li> </ul>		<p><b>Stufe 3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Krone von außen her stärker aufgelichtet</li> <li>mit zahlreichen Totästen und typischen ETS-Symptomen im Kronenbereich: verbrauchte junge Triebspitzen</li> <li>nur vereinzelt Einbohrversuche von Rindenbrütern (i. d. R. noch erfolglos)</li> <li>Bei hohem Befallsdruck teilweise schon beginnende Etablierung sekundärer Schaderreger (z. B. Rhizomorphen von Hallimasch oder Samtfußrübling an anlaufenden Wurzeln sichtbar)</li> </ul>	
<p><b>Stufe 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Krone mit etwas reduzierter Belaubung</li> <li>Noch keine typische Triebeschädigung erkennbar</li> <li>kein Käferbefall am Stamm</li> </ul>		<p><b>Stufe 4</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>„Zurücktrocknen“ der Krone von außen nach innen, nur noch innere Kronenbereich mit büscheliger Restbelaubung</li> <li>Krone mit vielen Totästen und typischen ETS-Symptomen</li> <li>stärkere belaubte Äste tw. schon halbseitig trocken</li> <li>beginnender Befall durch rindenbrütende Käfer (z. B. Kleiner Bunter und Großer Schwarzer Eschenbaskäfer)</li> <li>Sichtbarer Befall mit Holz abbauenden Schwächeparasiten (z.B. Hallimasch)</li> </ul>	
<p><b>Stufe 2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Krone mit schütterer Belaubung und mit beginnenden typischen ETS-Symptomen in der Kronenperipherie: verbrauchte junge Triebspitzen</li> <li>Bisher kein Befall durch rindenbrütende Käfer</li> <li>Bei hohem Befallsdruck teilweise schon beginnende Etablierung sekundärer Schaderreger (z. B. Rhizomorphen (Hyphenstränge) von Hallimasch oder Samtfußrübling an anlaufenden Wurzeln sichtbar)</li> </ul>		<p><b>Stufe 5</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Baum abgestorben oder absterbend</li> <li>Krone ohne Belaubung; im Stammbereich teilweise noch vereinzelte Nottriebe</li> <li>starker Befall mit rindenbrütenden Käfern in der Krone, aber auch am Stamm beginnend</li> <li>Holzfäule (Weiß-, Braun- oder Moderfäule) am Stammfuß und im Wurzelbereich</li> <li>teilweise mit Stammfußnekrosen</li> </ul>	

Abbildung 2: Boniturschlüssel der Stufen des Eschentriebsterbens der Abt. Waldschutz der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (2011)

Dieser Schlüssel stimmt weitgehend mit einem bundesländerübergreifend abgestimmten Schlüssel von LENZ et al. (2012) überein. Ein Unterschied besteht in der Klassifikation der Schadstufe 5. Nach dem bundesweiten Schlüssel gelten Bäume der Schadstufe 5 als abgestorben, nach dem NW-FVA- Schlüssel werden neben abgestorbener auch absterbende Bäume, die noch Nottriebe aufweisen, in Stufe 5 klassifiziert. Für diese Untersuchung wurde ein vollständiges Absterben innerhalb der Schadstufe 5 im Jahr des Auftretens festgehalten und hatte zur Folge, dass der Baum von da an aus dem Beobachtungskollektiv ausschied. Außerdem gab es in jedem Jahr einige wenige Bäume, deren Krone nicht einsehbar war und die somit nicht bonitiert werden konnten. Die Erhebung erfolgte jeweils in der ersten Augusthälfte durch geschulte, über die Jahre gleich bleibende Mitarbeiter. Für die spätere Modellbildung wurden die ETS-Schadstufen zu ETS-Schadgruppen zusammengefasst (s. Tab. 3). Damit wurde das Merkmal „Schädigung“ dichotomisiert, d. h. in eine binär codierte Variable überführt.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Schadstufen (s. Abb. 1) zu Schadgruppen; gleichzeitig Überführung der Schädigung in eine binär codierte Variable

ETS-Stufe	ETS-Gruppe	Schädigung
(0) 1- 2	0	(nicht bis) schwach geschädigt
3 - 5	1	deutlich bis stark geschädigt

### 2.3. Modellierung der ETS-Schadgruppe

Zur Beantwortung der Versuchsfragen nach regionalen Unterschieden, einem Muster des zeitlichen Verlaufs des Befallsgeschehens und dem Einfluss von Parametern der Bestandesstruktur auf die Schädigung der Eschen wurde mit Hilfe des Statistik-Softwarepakets IBM SPSS Statistics Version 24 (2016) ein binäres logistisches Regressionsmodell parametrisiert. Verwendet wurde die GEE-Technik (Generalized Estimating Equations – Verallgemeinerte Schätzungsgleichungen) aus dem Paket GENLIN (Generalized Linear Models – Verallgemeinerte Lineare Modelle) der genannten Statistik-Software. GEE-Modelle stellen eine Erweiterung der verallgemeinerten linearen Modelle für korrelierte Daten z. B. aus Cluster-Stichproben oder Messwiederholungen dar. GEE-Modelle sind dazu geeignet, diesen „Störfaktor“ Abhängigkeit von Beobachtungen zu kompensieren (BALTES-GÖTZ 2016). Die verwendeten Daten zum Eschentriebsterben weisen Abhängigkeiten auf, die durch ein geeignetes Modell zu berücksichtigen sind. Innerhalb der Regionen, für die Aussagen getroffen werden sollen, wurden die beobachteten Eschen nicht zufällig ausgewählt, sondern sie sind in den Versuchspartellen geclustert. Außerdem wurde jeder einzelne Baum mehrfach beobachtet. Die Versuchsfläche wie auch der wiederholt beobachtete Einzelbaum, die für eine Korrelation der Beobachtungen stehen, werden im Modell deshalb als sogenannte Subjektvariablen berücksichtigt. Das Beobachtungsjahr, als Ausdruck in zeitlichen Abständen, in diesem Fall äquidistant (Jahresabstand) wiederholter Beobachtungen, bildet die zu berücksichtigende Innersubjektvariable.

Die ETS-Schadgruppe ist die binär codierte Zielvariable, für die eine Binomialverteilung angenommen werden soll, mit folgenden Ausprägungen:

$$Y_i = \begin{cases} 0 & \text{"schwach geschädigt"} \\ 1 & \text{"stark geschädigt"} \end{cases}$$

Als Link-Funktion wird eine Logit-Transformation in folgender Form verwendet:

$$\text{logit}(p_i) = \log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \eta = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots$$

Neben der Untersuchung des zeitlichen Befallsverlaufes und des Einflusses der Region und wird eine potenzielle Wirkung der Merkmale Baumalter, Konkurrenzsituation des Einzelbaumes und Anteil der Esche an der Bestandesgrundfläche (im Folgenden kurz „Mischungsanteil“) auf die Wahrscheinlichkeit des Eintritts einer deutlichen bis starken Schädigung durch das Eschentriebsterben untersucht. Das Verhältnis des Brusthöhendurchmessers (Bhd) zum Bestandesmitteldurchmesser ( $d_g$ ) wird als einfacher, für alle Bäume der Stichprobe verfügbarer und keiner zu starken kurzfristigen Veränderung unterliegender Konkurrenzindex bzw. als Maß des Ranges im Bestandesgefüge verwendet. Er wurde der aus der jeweils neuesten ertragskundlichen Aufnahme der Parzelle (Aufnahmestichtage zwischen 2010 und 2012) errechnet. Tabelle 4 zeigt die statistischen Kennwerte der potenziellen Prädiktoren für die untersuchte Stichprobe. Es wird deutlich, dass die Ausprägungen der Merkmale sehr große Spannen abdecken, die auch in ganz unterschiedlichen Kombinationen im Datenmaterial enthalten sind.

Tabelle 4: Mittelwert ( $\bar{x}$ ), Standardabweichung (SD) und Spannweite (Min. - Max.) von potenziell für die Schädigung relevanten Prädiktoren

Merkmal	$\bar{x}$	SD	Min. – Max.
Alter [J.]	62,8	41,3	19 - 170
BHD/ $d_g$	1,24	0,44	0,41 - 2,72
Misch'ant. Esche [%]	46,5	30,5	2,4 - 95,2

## 2.4 Modellierung der Veränderungsraten des Bhd-Zuwachses der Eschen in Abhängigkeit von der Schädigung

Der Bhd-Zuwachs der Eschen wurde ebenfalls mit Hilfe einer verallgemeinerten Schätzungsgleichung (SPSS-Prozedur GEE) modelliert. Die GEE-Technik wurde angewendet, da es sich wiederum um geclusterte Daten handelt. Die Beobachtungen sind räumlich geclustert auf der Ebene der Region (die diesmal nicht als Faktor behandelt wird), der einzelnen Versuchsparzelle und des wiederholt beobachteten Einzelbaumes (Subjektvariablen). Das Beobachtungsjahr stellt die Innersubjektvariable dar, die die zeitlich wiederholten Beobachtungen des Einzelbaumes verbindet.

Jährliche Bhd-Messungen im Zuge der Schadbonituren erfolgten an den Eschen erst ab 2014 und dann in den Folgejahren. Damit gibt es jährliche Zuwächse in 2015 (Zuwachsjahr 2014-2015) und 2016 (Zuwachsjahr 2015- 2016). Der Zuwachs 2014 ist dagegen mit 2015 und 2016 nicht ganz vergleichbar, da er keinen Wert für ein Jahr, sondern einen Durchschnittswert für eine längere, zeitlich vorgelagerte Periode angibt. In Abhängigkeit vom Zeitpunkt der letzten ertragskundlichen Aufnahme (Stichtage Frühjahr 2010 bis Frühjahr 2013) ergeben sich unter der Annahme, dass Anfang August 60% des Zuwachses geleistet sind, Periodenlängen von 1,6 bis 4,6 Jahren.

Als Zielgröße wird die intervallskalierte Variable „jährlicher Bhd-Zuwachs [mm]“ modelliert, für die eine Normalverteilung unterstellt wird (gefordert ist eine Verteilung der Exponentialklasse, zu denen die Normalverteilung gehört). Die Linkfunktion ist in diesem Fall die Identität.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Deskriptive Datenanalyse potenzieller Zusammenhänge zum Eschentriebsterben

Durch Mortalität infolge des Eschentriebsterbens und durch Entnahmen (Durchforstung, Zielstärkenutzung), die sich nicht auf absterbende oder stark geschädigte Bäume beschränkten, verkleinerte sich das Beobachtungskollektiv während der Versuchsdauer (s. Abb. 3). Dabei stellen die Entnahmen eine gewisse Störung des Versuchs dar. Die Mortalität wird in der späteren Modellbildung nicht explizit berücksichtigt. Die Summe der bis 2016 durch Eschentriebsterben abgestorbenen Bäume bedeutet bezogen auf das Ausgangskollektiv des Jahres 2013 eine Gesamtmortalität von 12,1 % für den Dreijahreszeitraum.

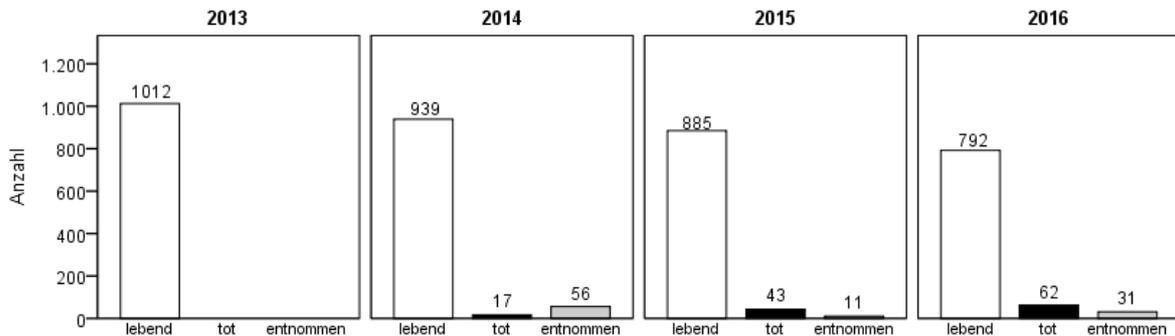


Abbildung 3: Reduktion der beobachteten Stichprobe während des Beobachtungszeitraums durch Mortalität und Entnahmen

Einen Gesamtüberblick über den zeitlichen Verlauf des beobachteten Schadgeschehens und Unterschiede des Schadverlaufes auf der Ebene der Regionen gibt Abbildung 4.

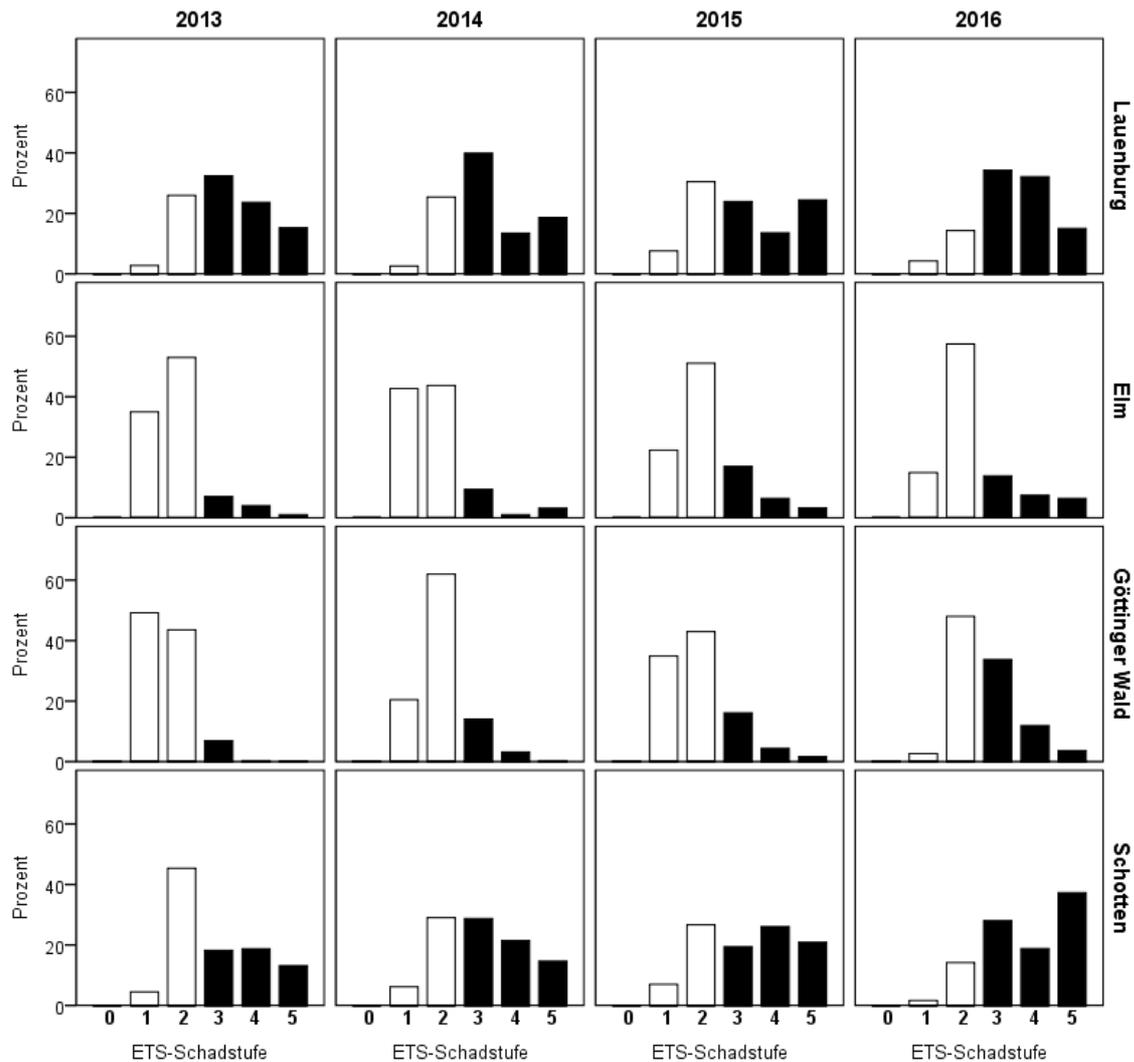


Abbildung 4: Entwicklung der Anteile der Schadstufen über den Beobachtungszeitraum nach Regionen. Schadstufe 1 und 2 (weiße Balken) bilden die Schadgruppe 0 – „schwach geschädigt“, die Schadstufen 3-5 (schwarze Balken) bilden die Schadgruppe 1 – „deutlich bis stark geschädigt“

Auffallend ist, dass bereits 2013 keine Esche als vollkommen gesund angesprochen wurde. Insgesamt zeigt sich über alle Regionen hinweg mit der Zeit ein deutlicher Trend zur zunehmend stärkeren Besetzung höherer Schadstufen. Der bisherige Höhepunkt des Anteils deutlicher bis starker Schäden (Schadstufen 3-5) wird überall im aktuellen Beobachtungsjahr 2016 erreicht. Dennoch gibt es ausgeprägte regionale Unterschiede. Die nördlichste Region Lauenburg startete bereits zu Beobachtungsbeginn auf einem sehr hohen Schadniveau. Auch in Schotten war das Schadensausmaß bereits 2013 deutlich höher als in den geografisch mittleren Regionen Elm und Göttinger Wald. Über den dreijährigen Beobachtungszeitraum verzeichnete die Region Schotten die dramatischste Verschlechterung des Gesundheitszustandes der Eschen. Für die zu Beginn noch mit vielen nur schwach geschädigten Eschen ausgestatteten Regionen Elm und Göttinger Wald wird im weiteren Verlauf ebenfalls eine Verschlechterung wirksam, ohne dass hier bisher die 2013-er Schadniveaus von Lauenburg oder Schotten erreicht werden. Fluktuationen innerhalb der Schadgruppen „schwach geschädigt“ (Schadstufen 1 und 2) und „deutlich bis stark geschädigt“ (Stufen 3-5) sind ablesbar. Bei der späteren Modellierung bleiben diese durch die Beschränkung der Zielvariablen Schadgruppe auf zwei Ausprägungen im Zusammenhang mit der gewählten Modellform unberücksichtigt.

Dass Eschen, die einer geringeren Konkurrenz unterliegen bzw. im Bestandesgefüge einen höheren Rang einnehmen, ausgedrückt durch einen größeren Quotienten zwischen dem Bhd des Baumes und dem Mitteldurchmesser des Bestandes, tendenziell geringer geschädigt zu sein scheinen, zeigt Abbildung 5. Dieser Trend besteht über alle bisherigen Beobachtungszeitpunkte.

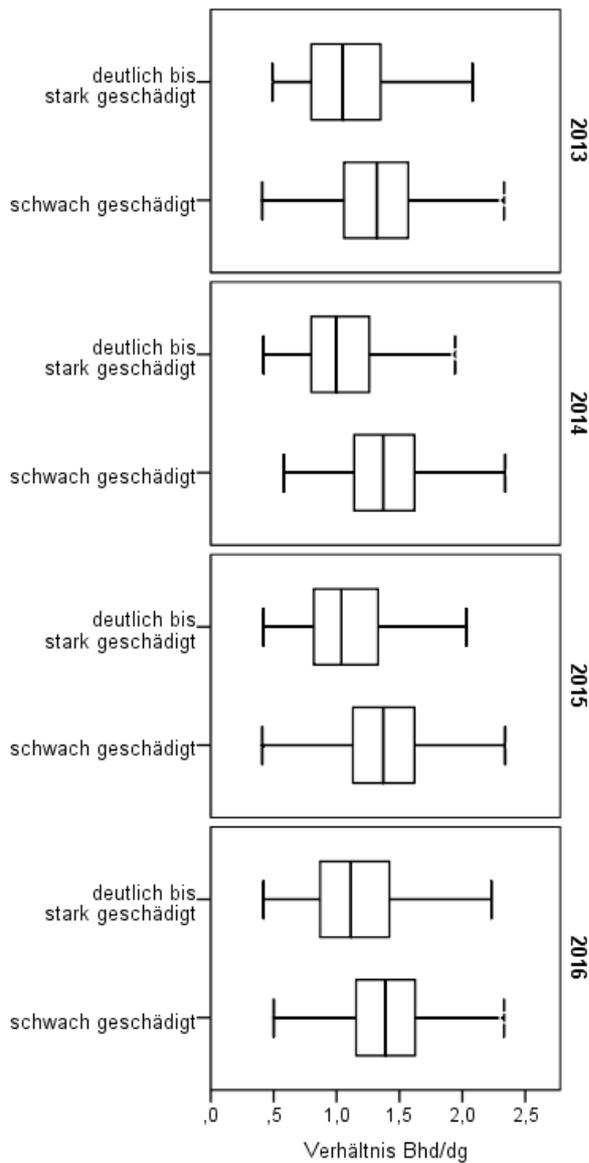


Abbildung 5: Boxplots des Konkurrenzmaßes  $Bhd/d_g$  für die ETS-Schadgruppen „0“ und „1“ über den Beobachtungszeitraum (ohne Ausreißer und extreme Werte)

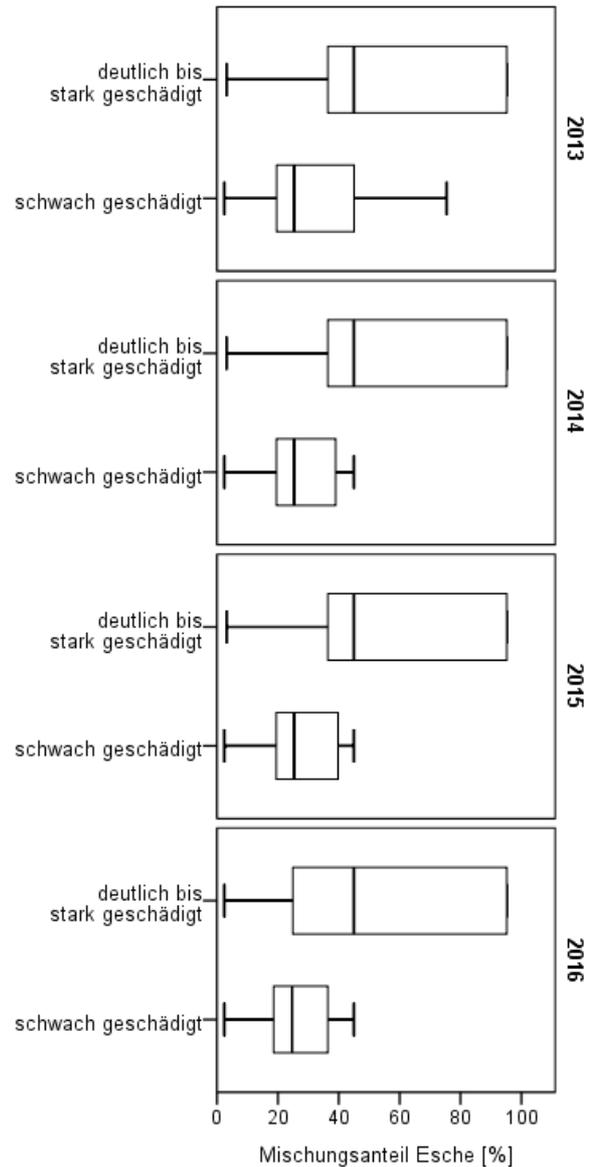


Abbildung 6: Boxplots des Mischungsanteils der Esche an der Bestandesgrundfläche [%] für die ETS-Schadgruppen „0“ und „1“ über den Beobachtungszeitraum (ohne Ausreißer und extreme Werte)

Dagegen sind Eschen in Beständen mit hohen Mischungsanteilen der Baumart scheinbar stärker von Schäden durch das Triebsterben betroffen, als Exemplare aus Beständen mit wenig Esche (s. Abb. 6). Auch diese Tendenz zeigt sich in allen Jahren.

Ein gerichteter Einfluss des Baumalters auf das Schädgeschehen (ohne Darstellung) war nach einer deskriptiven Analyse der Daten nicht zu vermuten.

### 3.2 Modellierung der ETS-Schadgruppe mittels GEE

Die Wahrscheinlichkeit einer Ausprägung des Merkmals ETS-Schadgruppe („ets\_gru“) als 1 „deutliche bis starke Schädigung“ ausgehend von der Referenz 0 „geringe Schädigung“ in Abhängigkeit von verschiedenen Prädiktoren wurde mit Hilfe der GEE-Technik modelliert.

Als signifikant erwiesen sich neben dem eingeschlossenen konstanten Term die Faktoren Region („region“) und Beobachtungsjahr („jahr“) und die intervallskalierten Kovariablen Mischungsanteil der Esche („misch\_g“) und Konkurrenzmaß  $Bhd/d_g$  („bhd\_dg“). Ins Modell aufgenommen wurden die Haupteffekte der Prädiktoren. Die versuchsweise in eine Modellversion aufgenommene Kovariable Baumalter erwies sich als nicht signifikant und verschlechterte die Anpassungsgüte des Modells (deutliche Vergröße-

zung der Kriterien der Anpassungsgüte QIC – Quasi-Likelihood bzw. QICC - angepasste Quasi-Likelihood auf der Basis des QIC). Im Folgenden werden die Spezifikationen des akzeptierten Modells aus SPSS wiedergegeben:

```
* Verallgemeinerte Schätzungsgleichungen.
GENLIN ets_gru (REFERENCE=FIRST) BY region jahr (ORDER=DESCENDING) WITH
misch_g bhd_dg
  /MODEL region misch_g bhd_dg jahr INTERCEPT=YES
  DISTRIBUTION=BINOMIAL LINK=LOGIT
  /CRITERIA METHOD=FISHER(1) SCALE=1 MAXITERATIONS=100 MAXSTEPHALVING=5 PCON-
VERGE=1E-006 (ABSOLUTE)
  SINGULAR=1E-012 ANALYSISTYPE=3 (WALD) CILEVEL=95 LIKELIHOOD=FULL
  /REPEATED SUBJECT=flae_id*baum_id WITHINSUBJECT=jahr SORT=YES COR-
RTYPE=INDEPENDENT ADJUSTCORR=YES
  COVB=ROBUST MAXITERATIONS=100 PCONVERGE=1e-006 (ABSOLUTE) UPDATECORR=1
  /MISSING CLASSMISSING=EXCLUDE
  /PRINT CPS DESCRIPTIVES MODELINFO FIT SUMMARY SOLUTION (EXPONENTIATED) COVB.
```

Die Tabellen 5a und 5b geben die Modellinformationen zur verallgemeinerten Schätzungsgleichung wieder.

Tabelle 5a (oben) und 5b (unten): Modellinformationen zur verallgemeinerten Schätzungsgleichung (GEE – „General Estimating Equitation“) für die Modellierung der ETS-Schadgruppe und Tests der Modelleffekte

**Modellinformationen**

Abhängige Variable	ETS-Schadgruppe <sup>a</sup>	
Wahrscheinlichkeitsverteilung	Binomial	
Verknüpfungsfunktion	Logit	
Subjekteffekt	1	flae_id
	2	baum_id
Innersubjekteffekt	1	Jahr
Struktur der Arbeitskorrelationsmatrix	Unabhängig	

a. Die Prozedur modelliert „deutlich bis stark geschädigt“ als Antwort und behandelt „leicht geschädigt“ als Referenzkategorie.

**Tests der Modelleffekte**

Quelle	Wald-Chi- Quadrat	Typ III	
		df	Sig.
(Konstanter Term)	13,068	1	,000
Region	138,928	3	,000
Mischungsanteil Esche [%]	33,434	1	,000
Verhältnis Bhd/d <sub>g</sub>	109,953	1	,000
Jahr	276,861	3	,000

Abhängige Variable: ETS-Schadgruppe  
 Modell: (Konstanter Term), Region, Mischungsanteil Esche [%],  
 Verhältnis Bhd/d<sub>g</sub>, Jahr

In Tabelle 6 sind die Parameterschätzer des akzeptierten Modells zur Schätzung der Wahrscheinlichkeit einer „deutlichen bis starken Schädigung“ der Eschen (ETS-Schadgruppe 1) gegenüber der Referenz „geringe Schädigung“ (Schadgruppe 0) mit ihren statistischen Kenngrößen angegeben. Der Einfluss der signifikanten Prädiktoren lässt sich über den Wert von Exp(B) als Grenzwert-Verhältniszahl direkt interpretieren. Exp(B) ist somit ein Multiplikator im Sinne der Veränderung der Wahrscheinlichkeit („Odds“)

bei Erhöhung des Prädiktors um eine Einheit unter der Voraussetzung, dass alle anderen Bedingungen konstant bleiben. Es gilt:

$$Odds_{nach} = Exp(B) * Odds_{vor}$$

Tabelle 6: Parameterschätzer für die Modelleffekte des Modells zur Schätzung der ETS-Schadgruppe. *Exp(B) als Grenzwert-Verhältniszahl: Um diesen Faktor verändert sich die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt der zu schätzenden Größe bei Erhöhung des Prädiktors um eine Einheit, wenn alle anderen Bedingungen gleich bleiben*

Parameter	Regressionskoeffizient B	Standard Fehler	95% Wald-Konfidenzintervall		Hypothesentest			Exp(B)	95% Wald-Konfidenzintervall für Exp(B)	
			Unterer Wert	Oberer Wert	Wald-Chi-Quadrat	df	Sig.		Unterer Wert	Oberer Wert
(Konstanter Term)	1,603	,2942	1,027	2,180	29,701	1	,000	4,969	2,792	8,845
[Region=4]	-1,085	,2359	-1,547	-,623	21,159	1	,000	,338	,213	,537
[Region=3]	-1,867	,1728	-2,206	-1,528	116,778	1	,000	,155	,110	,217
[Region=2]	-2,320	,2474	-2,805	-1,835	87,916	1	,000	,098	,061	,160
[Region=1]	0 <sup>a</sup>	.	.	.	.	.	.	1	.	.
Mischungsanteil Esche [%]	,021	,0036	,014	,028	33,434	1	,000	1,021	1,014	1,028
Verhältnis Bhd/dg	-1,738	,1658	-2,063	-1,413	109,953	1	,000	,176	,127	,243
[Jahr=2016]	1,804	,1096	1,589	2,018	270,789	1	,000	6,072	4,898	7,527
[Jahr=2015]	,625	,0910	,446	,803	47,127	1	,000	1,868	1,563	2,232
[Jahr=2014]	,523	,0888	,348	,697	34,617	1	,000	1,686	1,417	2,007
[Jahr=2013]	0 <sup>a</sup>	.	.	.	.	.	.	1	.	.
(Skala)	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Abhängige Variable: ETS-Schadgruppe  
 Modell: (Konstanter Term), Region, Mischungsanteil Esche [%], Verhältnis Bhd/dg, Jahr  
 a. Auf 0 gesetzt, da dieser Parameter redundant ist.

Beispiele:

1. Eine Esche hat „vorher“ die Wahrscheinlichkeit einer „deutlichen bis starken Schädigung“ von 1,0. Dann hat sie, wenn ihr Bhd/d<sub>g</sub>-Verhältnis 2 statt 1 betrüge und alle anderen Bedingungen konstant blieben, nur noch eine Wahrscheinlichkeit von 0,176 „deutlich bis stark geschädigt“ zu sein.
2. Eine Esche, die in der Region 1 (Lauenburg) eine Wahrscheinlichkeit „deutlichen bis starken Schadens“ von 1,0 aufweist, hätte in der Region 3 (Göttinger Wald) unter sonst gleichen Bedingungen nur eine Wahrscheinlichkeit „deutlicher bis starker Schadausprägung“ von 0,155.

Deutlich treten die schon bei der deskriptiven Datenanalyse erkennbaren regionalen Unterschiede des Schadausmaßes hervor, aber auch der besonders für das Jahr 2016 sehr ausgeprägte Trend zu einem Fortschreiten des Schadausmaßes wird im Modell abgebildet. Außerdem bestätigt das Modell die signifikant höhere Widerstandsfähigkeit von Eschen, die innerhalb des Bestandesgefüges einen hohen Rang einnehmen, und von Exemplaren in einer Umgebung mit geringeren Mischungsanteilen an Esche.

3.3 Modellierung von Veränderungsraten des Bhd-Zuwachses bei unterschiedlich stark geschädigten Eschen mittels GEE

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass ein zutreffendes Konkurrenzmaß in der Lage ist, gewisse Anteile der Streuung des Bhd-Zuwachses zu erklären. Abbildung 7, in der zu drei aufeinanderfolgenden Beobachtungszeitpunkten die Bhd-Zuwächse des Eschen-Kollektivs über dem Verhältnis Bhd/d<sub>g</sub> dargestellt sind, bestätigt für das verwendete Konkurrenzmaß in Ansätzen die formulierte Vermutung.

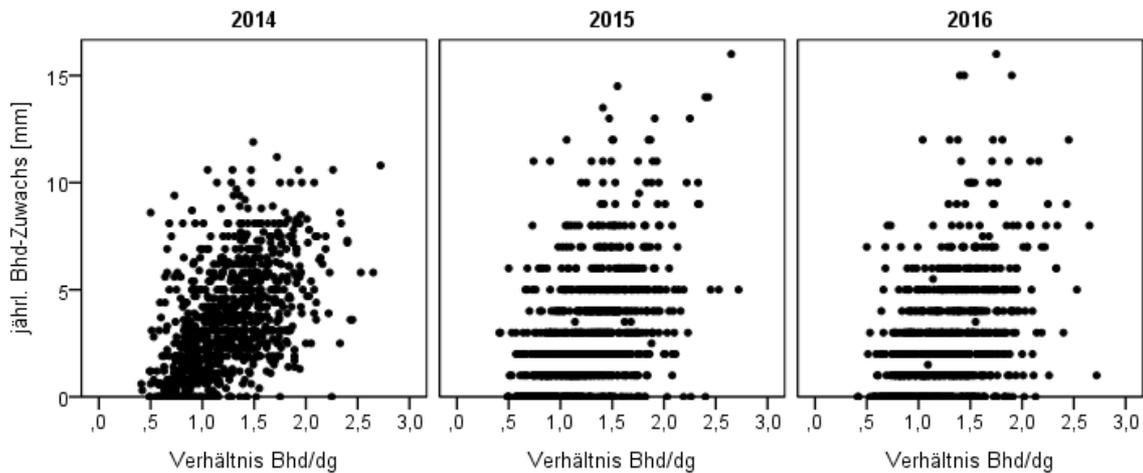


Abbildung 7: Bhd-Zuwächse der Eschen über dem Konkurrenzmaß  $Bhd/d_g$  für 2014 (zwischen den Versuchsflächen variierende Beobachtungsperiodenlängen bis 08/2014; überwiegend Durchschnittszuwachs aus mehreren Vorjahren), 2015 (Beobachtungsperiode 08/2014 – 08/2015) und 2016 (Beobachtungsperiode 08/2015 – 08/2016)

Besonders für 2014 (noch Durchschnitt mehrerer Jahre, s. Kap. 2.4) werden mit steigendem  $Bhd/d_g$ -Verhältnis tendenziell größere Durchmesserzuwächse verzeichnet. Bei Betrachtung der Jahreszuwächse zu 2015 und 2015 scheint sich der Zusammenhang weiter abzuschwächen. Die bereits für 2014 zu beobachtende starke Streuung nimmt weiter zu und es treten neben noch zu beobachtenden beachtlich hohen Zuwächsen auch immer mehr Nullwerte des Bhd-Zuwachses über ein großes Spektrum von  $Bhd/d_g$ -Werten in Erscheinung. Das legt die Hypothese nahe, dass durch das Eschentriebsterben verursachte Schäden der Assimilationsorgane, ordinal bewertet über die Schadstufen, sich Zuwachs mindert auswirken. Die Darstellung der beobachteten Bhd-Zuwächse zu den Beobachtungsjahren als Boxplots über den Schadstufen scheint diese Hypothese zu stützen (Abb. 8).

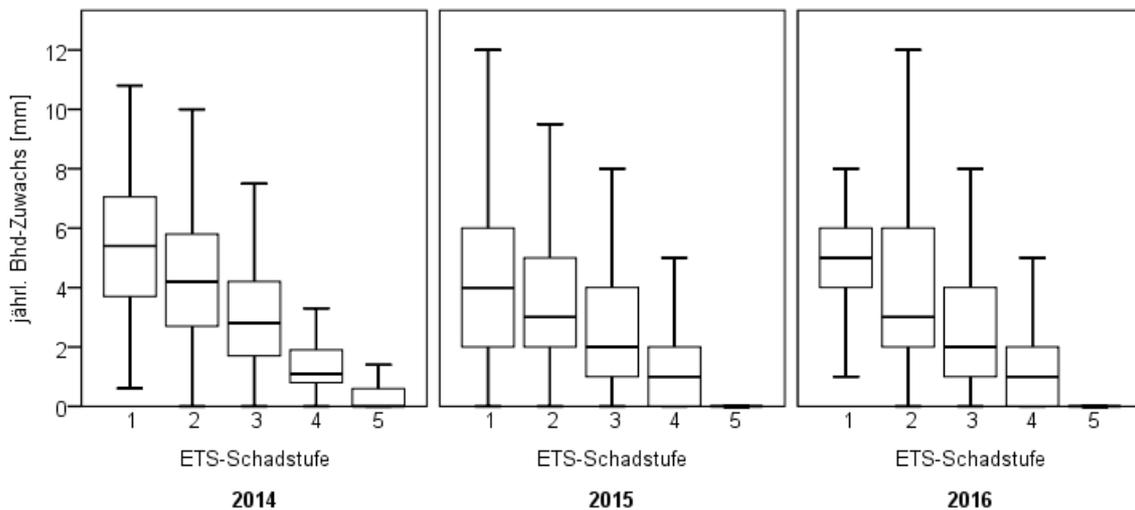


Abbildung 8: Boxplots der Bhd-Zuwächse der Eschen über der ETS-Schadstufe für 2014 (Durchschnittszuwachs aus mehreren Vorjahren bis 08/2014;), 2015 (Beobachtungsperiode 08/2014 – 08/2015) und 2016 (Beobachtungsperiode 08/2015 – 08/2016)

Ausgehend von diesen Überlegungen wurde ebenfalls mit Hilfe der GEE-Technik des Softwarepaketes SPSS 24 ein Modell für die Veränderungsrate des Bhd-Zuwachses an unterschiedlich stark geschädigten Eschen, ausgedrückt durch die Schadstufen 1 bis 5, an die Daten des beobachteten Baumkollektivs angepasst (s. Kap. 2.4).

Als signifikant erwiesen sich neben dem eingeschlossenen konstanten Term die Faktoren Beobachtungsjahr („jahr“), ETS-Schadstufe („ets\_stu“) und die intervallskalierte Kovariable  $Bhd/d_g$  („bhd\_dg“). Ins Modell aufgenommen wurden die Haupteffekte der Prädiktoren. Die versuchsweise in eine Modellversion aufgenommene Wechselwirkung von  $Bhd/d_g$  innerhalb der ETS-Schadstufe („ets\_stu (bhd\_dg)“) erwies sich als signifikant und führte gemessen am OIC-Kriterium auch zu einer Verbesserung der An-

passungsgüte. Gleichzeitig waren jedoch die Effekte einzelner Stufen des Faktors Schadstufe nicht mehr signifikant und das Modell somit deutlich komplizierter zu interpretieren. Im Folgenden wird die zuerst beschriebene Grundform des Modells im folgenden SPSS-Output und mit den Modellinformationen in Tabelle 7a und 7b dargestellt:

```
* Verallgemeinerte Schätzungsgleichungen.
GENLIN incr BY ets_stu jahr (ORDER=DESCENDING) WITH bhd_dg
  /MODEL bhd_dg jahr ets_stu INTERCEPT=YES
  DISTRIBUTION=NORMAL LINK=IDENTITY
  /CRITERIA SCALE=MLE PCONVERGE=1E-006 (ABSOLUTE) SINGULAR=1E-012 ANALY-
  SISTYPE=3 (WALD) CILEVEL=95
  LIKELIHOOD=FULL
  /REPEATED SUBJECT=region*flae_id*baum_id WITHINSUBJECT=jahr SORT=YES COR-
  RTYPE=INDEPENDENT
  ADJUSTCORR=YES COVB=ROBUST
  /MISSING CLASSMISSING=EXCLUDE
  /PRINT CPS DESCRIPTIVES MODELINFO FIT SUMMARY SOLUTION (EXPONENTIATED) COVB.
```

Tabelle 7a (oben) und 7b (unten): Modellinformationen zur verallgemeinerten Schätzungsgleichung (GEE – „General Estimating Equitation“) für die Modellierung des Bhd-Zuwachses der Eschen und Tests der Modelleffekte

**Modellinformationen**

Abhängige Variable		jährl. Bhd-Zuwachs [mm]
Wahrscheinlichkeitsverteilung		Normal
Verknüpfungsfunktion		Identität
Subjekteffekt	1	Region
	2	flae_id
	3	baum_id
Innersubjekteffekt	1	Jahr
Struktur der Arbeitskorrelationsmatrix		Unabhängig

**Tests der Modelleffekte**

Quelle	Wald-Chi- Quadrat	Typ III	
		df	Sig.
(Konstanter Term)	5,662	1	,017
Verhältnis Bhd/dg	70,631	1	,000
Jahr	49,927	2	,000
ETS-Schadstufe	481,193	4	,000

Abhängige Variable: jährl. Bhd-Zuwachs [mm]

Modell: (Konstanter Term), Verhältnis Bhd/d<sub>g</sub>, Jahr, ETS-Schadstufe

Die Parameterschätzer in Tabelle 8 sind ähnlich zu interpretieren wie im Modell zur Schätzung der ETS-Schadgruppe. Exp(B) gibt hier eine Veränderungsrate des Bhd-Zuwachses an, wenn sich der Prädiktor um eine Einheit ändert. Deutlich abgebildet wird der starke Einfluss der Schadstufe auf den Radialzuwachs. Ein Baum leistet bereits bei Absinken von Schadstufe 1 nach Schadstufe 2 bei Konstanz der anderen Bedingungen (Bhd/d<sub>g</sub>, Beobachtungsjahr) demnach nur noch knapp den halben Bhd-Zuwachs, bei weiterer Verschlechterung der Schadstufe sind die Zuwachseinbrüche dramatisch.

Tabelle 8: Parameterschätzer für die Modelleffekte des Modells zur Schätzung des Bhd-Zuwachses der Eschen.  $Exp(B)$  als Grenzwert-Verhältniszahl: Um diesen Faktor verändert sich der Bhd-Zuwachs bei Erhöhung des Prädiktors um eine Einheit, wenn alle anderen Bedingungen gleich bleiben

Parameter	Regressionskoeffizient B	Standard Fehler	95% Wald-Konfidenzintervall		Hypothesentest			Exp(B)	95% Wald-Konfidenzintervall für Exp(B)	
			Unterer Wert	Oberer Wert	Wald-Chi-Quadrat	df	Sig.		Unterer Wert	Oberer Wert
			(Konstanter Term)	2,839	,3333	2,186	3,493		72,574	1
Verhältnis Bhd/dg	1,745	,2076	1,338	2,152	70,631	1	,000	5,726	3,812	8,603
[Jahr=2016]	-,514	,0959	-,702	-,326	28,710	1	,000	,598	,496	,722
[Jahr=2015]	-,596	,0959	-,784	-,409	38,682	1	,000	,551	,456	,665
[Jahr=2014]	0 <sup>a</sup>	.	.	.	.	.	.	1	.	.
[ETS-Schadstufe=5]	-3,611	,2074	-4,018	-3,205	303,186	1	,000	,027	,018	,041
[ETS-Schadstufe=4]	-3,081	,1969	-3,467	-2,695	244,759	1	,000	,046	,031	,068
[ETS-Schadstufe=3]	-1,998	,1937	-2,378	-1,618	106,365	1	,000	,136	,093	,198
[ETS-Schadstufe=2]	-,734	,1799	-1,087	-,382	16,654	1	,000	,480	,337	,683
[ETS-Schadstufe=1]	0 <sup>a</sup>	.	.	.	.	.	.	1	.	.
(Skala)	4,969	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Abhängige Variable: jährl. Bhd-Zuwachs [cm]  
 Modell: (Konstanter Term), Verhältnis Bhd/dg, Jahr, ETS-Schadstufe  
 a. Auf 0 gesetzt, da dieser Parameter redundant ist.

## 4 Diskussion

Der Beitrag unternimmt erstmals den Versuch, den Einfluss von Parametern einfach zugänglicher waldwachstumskundlicher Größen auf die Ausprägung der neuartigen Pilzerkrankung Eschentriebsterben zu untersuchen. Auf der Grundlage der erhobenen Daten konnten Einflüsse des Mischungsanteils der Baumart Esche innerhalb des Bestandes und des Ranges der Esche im Bestandesgefüge, ausgedrückt über ein einfaches und in der zeitlichen Dynamik eher „träges“ Konkurrenzmaß  $Bhd/d_g$ , als statistisch signifikant herausgearbeitet werden. Ebenfalls signifikant waren Unterschiede im Schadniveau zwischen verschiedenen Regionen. Dabei überrascht zunächst, dass in der vorliegenden Untersuchung die geografische Nord-Süd-Abfolge nicht eindeutig mit einem abnehmenden Schadniveau Richtung Süden, also entlang des vermuteten Haupteinwanderungsweges des Erregers, einhergeht. Vielmehr bleiben die Schäden in den in der Mitte gelegenen, standörtlich vergleichbaren Regionen Elm und Göttinger Wald bisher geringer, wenn auch dort mit zunehmender Tendenz. Für eine weitergehende kausale Interpretation bleibt der Faktor „Region“ in der vorliegenden Auswertung jedoch zu komplex. Eindeutig herausgearbeitet wurde der Trend einer deutlichen Zunahme der Schäden mit der Zeit. Besonders von 2015 zum vorerst letzten Beobachtungsjahr 2016 tritt eine deutliche Verschärfung der Schadenssituation ein. Ob diese mit auf besonders ungünstige Witterungsbedingungen zurückzuführen ist oder irreversibel bleibt, müsste eine Fortsetzung der Aufnahmen in den Folgejahren klären. Auf der Ebene des Einzelbaumes gibt es neben den bisher am häufigsten zu verzeichnenden allmählichen Verschlechterungen, oft mit zwischenzeitlichem Verharren in einer Schadstufe auch immer wieder Erholungen von Bäumen um eine Schadstufe. Diese Beobachtung kann natürlich mit durch den gutachtlichen Charakter der Bonituren begründet sein. Nichtsdestotrotz gibt es bisher in fast allen Beobachtungsflächen Einzelbäume, die bisher erstaunlich vital bleiben.

Wie zu vermuten, zeigt sich der Einfluss der sichtbaren Schädigung der Eschen, ausgedrückt über die Schadstufe der Bonitur, auf die Durchmesserzuwachsleistung der Bäume als erheblich. Das drückt sich in signifikant verringerten Zuwachsraten mit zunehmender Schädigung aus.

Als statistische Methode zur Lösung beider Versuchsfragestellungen kamen GEE-Modelle zum Einsatz. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie Abhängigkeiten geclusterter Beobachtungen ausgleichen können und robuste Parameterschätzungen und Standardfehler liefern. Eine Schwäche besteht darin, dass die Korrelationen der Beobachtungen durch diese Methode jedoch nicht kausal aufgeklärt und für Erklärungsbeiträge herangezogen werden, wie das in gemischten Modellen möglich ist (BALTES-GÖTZ 2016).

## Literatur

- Abt. Waldschutz der NW-FVA (2011): Eschentriebsterben. Waldschutzinfo der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. 5 S.
- BALTES-GÖTZ, B. (2016): Generalisierte lineare Modelle und GEE-Modell in SPSS Statistics. Uni Trier, Zentrum für Informations-, Medien- und Kommunikationstechnologie. 47 S.
- GUERICKE, M. (2005): Waldwachstumskundlicher Vergleich zweier Wuchsreihen in Buchen-Edellaubbaumischbeständen. Ein Beitrag zur Diskussion des Wuchsreihenansatzes. Tagungsbericht der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten, S. 60-72.
- IBM (2016): SPSS Statistics Version 24
- LENZ, H.; STRÄBER, L.; BAUMANN, M.; BAIER, U. (2012): Boniturschlüssel zur Einstufung der Vitalität von Alteschen. AFZ–DerWald 3, 18–19
- METZLER, B.; BAUMANN, M. ; BAIER, U.; HEYDECK, P.; BRESSEM, U.; LENZ, H. (2013): Handlungsempfehlungen beim Eschentriebsterben. AFZ–DerWald 5, 17–20
- PRETZSCH, H., 2001: Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Blackwell-Wissenschafts-Vlg. Berlin, 380 S.
- VDFV – Verein deutscher forstlicher Versuchsanstalten (1902): Anleitung zur Ausführung von Durchforstungs- und Lichtungs-Versuchen. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 34, 668-674