

Mortalität der Buche in Nordwestdeutschland in Abhängigkeit von Witterung, Klima und Alter

Matthias Schmidt¹, Levent Burggraef¹, Thorsten Zeppenfeld¹

Zusammenfassung

Die extremen Trocken- und Hitzeperioden der letzten Jahre haben im Zusammenspiel mit Winterstürmen zu massiven Waldschäden geführt und im Klimawandel wird sich diese Problematik weiter verschärfen. Für den Erhalt stabiler, multifunktionaler Wälder ist es somit von überragender Bedeutung, baumartenspezifische Mortalitätsraten klima- und witterungssensitiv abzuschätzen. Daher wurden an der NW-FVA erste Regressionsmodelle entwickelt, die Effekte wichtiger Faktoren auf die Mortalitätsrate von Buche, Eiche, Fichte und Kiefer quantifizieren. Die Modelle sind eine wichtige Grundlage für Baumartenempfehlungen, da mit ihrer Hilfe Klimafolgen für den Wald eingeschätzt und darauf aufbauend abgemildert werden können. Daher sollen die Modelle perspektivisch im Entscheidungsunterstützungssystem der NW-FVA integriert werden. Ein weiterer potentieller Anwendungsbereich sind mittel- bis langfristige Waldentwicklungs- und Holzaufkommensprognosen, die ohne die Berücksichtigung von klimabedingten Störungen bzw. Ausfallraten zunehmend unrealistisch werden würden. Im folgenden Beitrag wird exemplarisch das Modell für die Buche beschrieben.

Keywords: Rotbuche; Mortalitätsrate; klimasensitiv; Extremwetterereignisse; Waldzustandserhebung

Abstract

The extreme dry and hot weather periods of recent years, in combination with winter storms, have led to massive forest degradations, and climate change will further exacerbate this trend. To maintain resistant and resilient multifunctional forests, it is therefore of paramount importance to estimate tree species-specific mortality rates sensitively to climate and weather conditions. Therefore, first regression models were developed at the NW-FVA that quantify the effects of important factors on the mortality rate of beech, oak, spruce and pine. The models are an important basis for tree species recommendations, as they can be used to assess climate impacts on forests and hence to develop mitigation measures. The models will therefore be integrated into the NW-FVA's decision support system. Another potential area of application are medium to long-term forest development and wood supply projections, which would become increasingly unrealistic without taking climate-related disturbances or failure rates into account. The following article exemplary describes the model for European beech.

Keywords: European beech; Mortality rate; climate sensitive; extreme weather events; Forest Health Survey

1 Einleitung

Die extremen Trocken- und Hitzeperioden der letzten Jahre haben im Zusammenspiel mit Winterstürmen zu massiven Waldschäden geführt und im Klimawandel wird sich diese Problematik weiter verschärfen (Patacca et al. 2022, Gregow et al. 2017, Seidl & Rammer 2017, Seidl et al. 2014, Seidl et al. 2011, Schuck & Schelhaas 2013, Schelhaas et al. 2003). Für den Erhalt stabiler, multifunktionaler Wälder ist es somit von überragender Bedeutung, baumartenspezifische Mor-

talitätsraten klima- und witterungssensitiv abzuschätzen. Daher wurden an der NW-FVA erste Regressionsmodelle entwickelt, die Effekte wichtiger Faktoren auf die Mortalitätsrate von Buche, Eiche, Fichte und Kiefer quantifizieren. Die Modelle sind eine wichtige Grundlage für Baumartenempfehlungen, da mit ihrer Hilfe Klimafolgen für den Wald eingeschätzt und darauf aufbauend abgemildert werden können. Daher sollen die Modelle perspektivisch im Entscheidungsunterstützungssystem der NW-FVA integriert werden. Ein weiterer potentieller Anwendungsbereich sind mittel- bis langfristige Waldentwicklungs- und Holzaufkommensprognosen, die ohne die Berücksichtigung klimabedingter Störungen bzw. Ausfallraten zunehmend unrealistisch werden würden. Im folgenden Beitrag wird exemplarisch das Mortalitätsmodell für die Buche beschrieben.

¹ Abteilung Waldwachstum
NW-FVA
Göttingen, Deutschland
matthias.schmidt@nw-fva.de

2 Material und Methoden

Als Datengrundlage in Überlebenszeitanalysen und für Mortalitätsmodelle wird häufig die Waldzustandserhebung (WZE) verwendet, da das (überwiegend) jährliche Inventurintervall der WZE eine relativ hohe Genauigkeit bei der Ansprache von Absterbe- und Ausscheidegründen ermöglicht. Aufgrund des Inventurdesigns der Sechs-Baum-Stichprobe sind die resultierenden Schätzungen in Überlebenszeitanalysen und Mortalitätsmodellen als risikobedingte Flächenverluste über dem Alter bzw. jährliche Flächenverlustrate zu interpretieren (Staupendahl & Zucchini 2011).

Die Datengrundlage des hier vorgestellten Ansatzes umfasst die WZE der Trägerländer der NW-FVA (Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein) und Brandenburgs, sodass relativ große klimatische Gradienten abgedeckt werden. Bisher konnten Prototypen für Buche, Eiche, Fichte und Kiefer entwickelt werden. Hier wird exemplarisch das vorläufige Modell für die Buche vorgestellt. Der WZE-Datensatz enthält 233.889 Beobachtungen von lebenden Buchen und 818 Beobachtungen von Buchen, die aufgrund von abiotischen oder biotischen Schadursachen abgestorben sind. Betrachtet wird der Zeitraum 1986 - 2022, wobei nicht für alle Bundesländer der gesamte Zeitraum abgedeckt ist. Die in den Waldzustandsberichten der NW-FVA vorgenommene Unterscheidung in *Absterben* (Baum ist aufgrund von Schadfaktoren abgestorben aber noch stehend vorhanden) und *Ausfall* (Baum ist aufgrund von Schadfaktoren abgestorben und bereits entnommen) spielt in der vorliegenden Untersuchung keine Rolle für die Definition der Mortalität. Allerdings dürfte die Ansprache der Schadfaktoren bzw. einer regulären Nutzung bei bereits entnommenen Bäume eine höhere Missklassifikationsrate aufweisen. Beobachtungen von Sturmschäden wurden bei der Modellierung nicht als Mortalität berücksichtigt, da ausschließlich die Effekte der Witterungsparameter Temperatur und Niederschlag bzw. Aridität auf die Mortalität analysiert werden sollten. Auch zeigten Analysen, dass sich die in der WZE erfassten Sturmschäden nur wenig differenziert anhand von Kovariablen einschätzen lassen. Sturmschäden wurden daher in der Analyse wie reguläre Nutzungen, d.h. als rechtszensiert betrachtet. Rechtszensierung beschreibt in der

Überlebenszeitanalyse das Ausscheiden von Individuen aufgrund von Ursachen, die nicht als Mortalität oder allgemeiner als "Event" definiert wurden (Kneib 2006). Im vorliegenden Fall wurden statt einer direkten Modellierung von Überlebenszeiten jährliche Mortalitätsraten geschätzt, aus denen sich Überlebenszeiten aber berechnen lassen. Durch diese Vorgehensweise kann die vergleichsweise einfache Methodik der Logistischen Regression mit binär verteilter Antwortvariable angewendet werden. Allerdings müssen sich Mortalitätsraten auf einen festen Zeitraum beziehen, damit sie interpretierbar sind. In der Datenbasis der WZE treten aber teilweise mehrjährige Intervalle auf, die von der üblichen 1-jährigen Aufnahme Frequenz abweichen. In diesen Fällen lassen sich die Mortalitäts- bzw. Ausscheidezeitpunkte nicht exakt einem Kalenderjahr zuordnen. In der vorliegenden Untersuchung wurde daher angenommen, dass die Mortalitäts- und Ausscheidezeitpunkte gleichverteilt innerhalb von mehrjährigen Inventurintervallen auftreten und die Zeitpunkte wurden über eine gleichverteilte Zufallszahl exakten Kalenderjahren zugewiesen. Zukünftig sollen aber statistische Ansätze verwendet werden, in denen unterschiedlich lange Inventurintervalle direkt berücksichtigt werden können (e.g. Yang & Huang 2013). Das generelle Problem, dass die Effekte von jahresspezifischen Faktoren wie Witterungsparametern bei mehrjährigen Inventurintervallen weniger gut analysiert werden können, lässt sich allerdings nicht lösen. Zur Datenanalyse wurden Verallgemeinerte Additive Modelle GAM unter Anwendung des Statistik-Paketes *mgcv* (Wood 2017) innerhalb der Statistiksoftware *R* (R Core Team 2023) verwendet. Die Parametrisierung als GAM ermöglicht es zu überprüfen, inwieweit Modelleffekte nicht-lineare Muster aufweisen. Die Modellselektion erfolgte auf Grundlage des bayesianischen Informationskriteriums *BIC* (Burnham & Anderson 2004). Zusätzlich wurde bei ähnlicher statistischer Modellgüte das Modell bevorzugt, dessen Effekte als sachlogisch plausibler beurteilt wurden. Abschließend wurde das final ausgewählte Modell unter Vorgabe von Monotoniebedingungen als GAM mit Nebenbedingungen *GAM_con(straint)* mit Hilfe des *R*-Statistik-Paketes *gamlss* (Rigby & Stasinopoulos 2005) reparametrisiert, um sachlogisch plausible Effekte über die gesamten Datenbereiche der verwendeten Kovariablen zu gewährleisten.

Für realistische Projektionen wurde die Annahme steigender Mortalitätsraten mit steigenden Temperatursummen und zunehmender Trockenheit (sinkendem Niederschlag bzw. sinkendem Ariditätsindex) aus sachlogischen Gründen als notwendig erachtet. Als potentielle Einflussfaktoren wurden sowohl jährliche Temperatur- und Niederschlagssummen (Witterungsparameter), die über dynamisch berechnete Vegetationsperioden bilanziert wurden (Nuske 2017), als auch die zugehörigen 30-jährigen Mittelwerte (Klimaparameter) der Klimanormalperiode 1991 - 2020 geprüft. Als ein weiterer Parameter wurde ein einfacher Ariditätsindex als Quotient der Niederschlags- und Temperatursummen in jährlicher Auflösung berechnet sowie über den 30-jährigen Zeitraum gemittelt. Alle Witterungsparameter wurden für das Bezugsjahr der jeweiligen WZE und die 4 vorhergehenden Jahre berechnet, um verzögerte Effekte auf die Mortalität erfassen zu können. Für die Temperatursummenwerte erfolgte eine Strahlungskorrektur in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung und Hangneigung. Zu diesem Zweck wurde der Algorithmus des Hydrologischen Modellsystems WaSiM-ETH (Schuller & Jasper 2007) zur physikalischen Korrektur von Tageswerten regressionsanalytisch für Vegetationsperiodenwerte adaptiert. Aufgrund der geringen Variabilität zwischen den Baumarten wurde für alle Baumarten die Vegetationsperiode der Fichte zur Bilanzierung verwendet. Auch würde die Verwendung von baumartenspezifischen Vegetationsperiodenwerten zu einer enormen Vergrößerung des für Projektionen notwendigen Datenumfanges führen. Alle jahresspezifischen Witterungsparameter gehen nicht mit ihren absoluten Werten sondern als Abweichungen gegenüber den 30-jährigen Mittelwerten der Temperatursumme $Tempsum_Veg_{1991-2020}$, der Niederschlagssumme $Precsum_Veg_{1991-2020}$ bzw. des Ariditätsindex $Ari_Veg_{1991-2020}$ in die Modelle ein. Diese Vorgehensweise ist notwendig, um den starken gemeinsamen Höhengradienten der Witterungsparameter untereinander aber auch zu den Klimaparametern zu beseitigen. Durch die Reduktion der starken Kollinearität soll die Schätzung sachlogisch plausibler Effektverläufe erleichtert werden.

3 Ergebnisse

3.1 Mortalitätsmodell

Als signifikante und relevante Einflussgrößen wurden:

- der langjährige Mittelwert der Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte in der Klimareferenzperiode 1991-2020 $Tempsum_Veg_{1991-2020}$
- die Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte im Vorjahr der jeweiligen WZE als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991-2020 $Abw_Tempsum_Veg_{t-1}$
- die Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte 2 Jahre vor der jeweiligen WZE als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991-2020 $Abw_Tempsum_Veg_{t-2}$
- die Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte 3 Jahre vor der jeweiligen WZE als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991-2020 $Abw_Tempsum_Veg_{t-3}$
- die Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte 4 Jahre vor der jeweiligen WZE als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991-2020 $Abw_Tempsum_Veg_{t-4}$
- der langjährige Mittelwert des Ariditätsindizes in der Vegetationszeit der Fichte der Klimareferenzperiode 1991-2020 $Ari_Veg_{1991-2020}$.
- der Ariditätsindex in der Vegetationszeit der Fichte 4 Jahre vor der jeweiligen WZE als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991-2020 $Abw_Ari_Veg_{t-4}$
- das Baumalter zum Zeitpunkt der WZE

aufgrund von statistischen und sachlogischen Gesichtspunkten in der Modellselktion ausgewählt. Das abschließend ausgewählte GAM lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned}
 g(\pi_{itk}) &= \alpha_0 \\
 &+ f_1(Tempsum_Veg_{1991} - 2002_k) \\
 &+ f_2(Abw_Tempsum_Veg_{t-1,k}) \\
 &+ f_3(Abw_Tempsum_Veg_{t-2,k}) \\
 &+ f_4(Abw_Tempsum_Veg_{t-3,k}) \\
 &+ f_5(Abw_Tempsum_Veg_{t-4,k}) \\
 &+ f_6(Ari_Veg_{1991} - 2002_k) \\
 &+ f_7(Abw_Ari_Veg_{t-4,k}) + f_8(Alter_{itk})
 \end{aligned} \tag{1}$$

wobei: $\pi_{itk} = E(Y_{itk})$ mit $Y_{itk} \sim \text{binomial}(1, \pi_{itk})$ und $E(Y_{itk})$ dem Erwartungswert der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Mortalität an Baum i im Jahr t auf WZE-Inventurplot k

$g()$ der logistischen Verknüpfungsfunktion

α_0 : Interzept

$f_1 \dots f_8$: Eindimensionale penalisierte Regressionsplines mit Thin-Plate-Basis

$$\text{Ari_Veg} = \text{Precsum_Veg} / \text{Tempsum_Veg}$$

Die Modelleffekte der beiden Modellvarianten GAM und GAM_con werden zum Vergleich jeweils in einer Graphik abgebildet (Abbildung 1 / 2). Alle Modelleffekte des GAM weisen deutliche und signifikant nicht-lineare Muster auf. Auch bleiben die Effektmuster durch die Monotonievorgabe im GAM_con weitgehend erhalten, die Effektstärke nimmt aber vor allem im warmen und trockenen Bereich mehr oder weniger stark ab. Die auftretenden Abweichungen

von monoton verlaufenden Verläufen in der Variante GAM werden als Störeffekte von nicht beobachteten Einflussgrößen interpretiert, sodass eine Vorgabe von Monotoniebedingungen gerechtfertigt erscheint. Die Modellvariante GAM weist eine erklärte Varianz von 8.11% und eine Area under Curve (AUC) von 0.79 auf, die in der Variante GAM_con auf 0.68 absinkt.

Alle trendbereinigten Temperatursummen weisen in der Variante GAM tendenziell steigende Effekte auf, die allerdings mit zunehmender zeitlicher Distanz zum Bezugsjahr der jeweiligen WZE weniger ausgeprägt sind (Abbildung 1 A-D). In der Projektion wirken sich positive Abweichungen der Temperatursumme aus dem Vor- und Vorvorjahr somit stärker mortalitätserhöhend aus als aus den Jahren $t-3$ und $t-4$. Die Vorgabe von Monotoniebedingungen in der Variante GAM_Con verstärkt diesen Trend. In der Variante GAM_Con tritt ein mortalitätserhöhender Effekt einheitlich für alle trendbereinigten Temperatursummen erst ab Werten von 200° C auf.

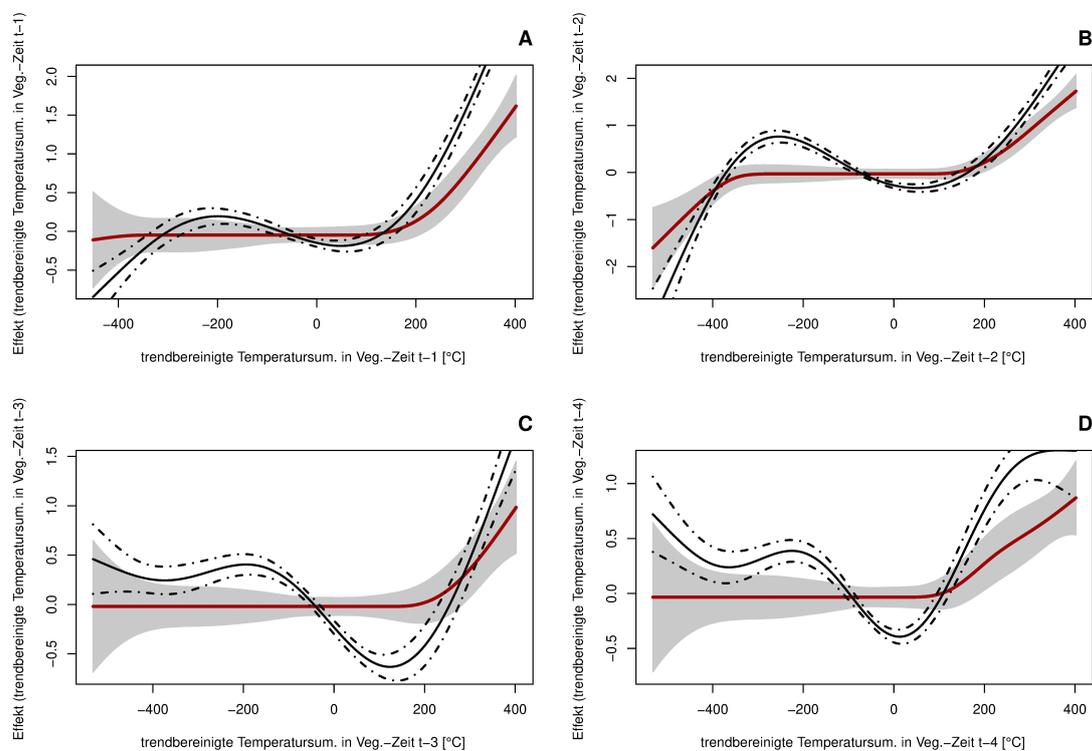


Abbildung 1: Modelleffekte mit (GAM_Con: rote Linie / grauer Konfidenzbereich) und ohne Monotoniebedingungen (GAM: schwarze durchgezogene Linie / Konfidenzbereich innerhalb der schwarzen punkt-gestrichelten Linien) der trendbereinigten Temperatursummen in der Vegetationszeit in den Jahren $t-1$ (A), $t-2$ (B), $t-3$ (C) und $t-4$ (D) vor dem Bezugsjahr t der WZE auf die jährliche Mortalitätswahrscheinlichkeit der Buche.

In der Variante *GAM_Con* tritt erst ab einer *Tempsum_Veg_1991-2020* von ca. 2500°C ein mortalitätserhöhender Effekt auf (Abbildung 2 A). Der Effekt des *Ari_Veg_1991-2020* ist in der Variante *GAM_Con* schwach monoton fallend und sehr viel schwächer als der Effekt des trendbereinigten Ariditätsindex *Abw_Ari_Veg_t-4* (Abbildung 2 B / C). Der Effekt des *Abw_Ari_Veg_t-4* zeigt in beiden Modellvarianten erst unterhalb eines Wertes von ca. -0.075 überhaupt eine mortalitätserhöhende Wirkung, die in der Variante *GAM_Con* etwas schwächer ausgeprägt ist. Unterhalb dieses Wertes und damit mit zunehmender Trockenheit nimmt der Effekt und damit die Mortalität bei sonst konstanten Bedingungen aber deutlich zu. Die Effekte der trendbereinigten Temperatursumme aus dem Bezugsjahr der WZE und weiterer trendbereinigter Ariditätsindizes aus dem Jahr *t* der WZE und den Jahren *t-1* bis *t-3* waren nur schwach ausgeprägt oder nicht plausibel und wurden daher in der Modellselektion ausgeschlossen. Die alternative Verwendung von Kovariablen auf Basis der *Precsum_Veg* anstelle des *Ari_Veg* resultierte in einer deutlich ge-

ringeren Modellgüte und weniger deutlichen Effektverläufen. Der Alterseffekt (Abbildung 2 D) ist relativ schwach ausgeprägt und zeigt in beiden Modellvarianten ein Minimum im Bereich von 125 Jahren. Ausgehend von diesem Alter steigt der Effekt und damit die Mortalitätsrate in beiden Modellvarianten hin zu jüngeren und älteren Bäumen hin an.

3.2 Sensitivitätsanalyse

Für eine Sensitivitätsanalyse werden im Folgenden Mortalitätsraten für die Buche für Waldstandorte mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen auf einem Transekt durch die Trägerländer der NW-FVA projiziert (Abbildung 3). Dabei wird an jedem Waldstandort eine Buchenbestockung unterstellt und die jeweiligen klimatischen und Witterungsbedingungen für Projektionen im Zeitraum 1981 - 2050 und 2031 - 2100 berücksichtigt. Die Buchen sind zum Beginn der Betrachtungszeiträume jeweils 81 Jahre und zum Ende 150 Jahre alt. Die Abschätzung erfolgt jedes Jahr wieder auf einer vollständigen Buchenbestockung ohne die Berücksichtigung vorhergehender Mortalität. Die Projektionen werden

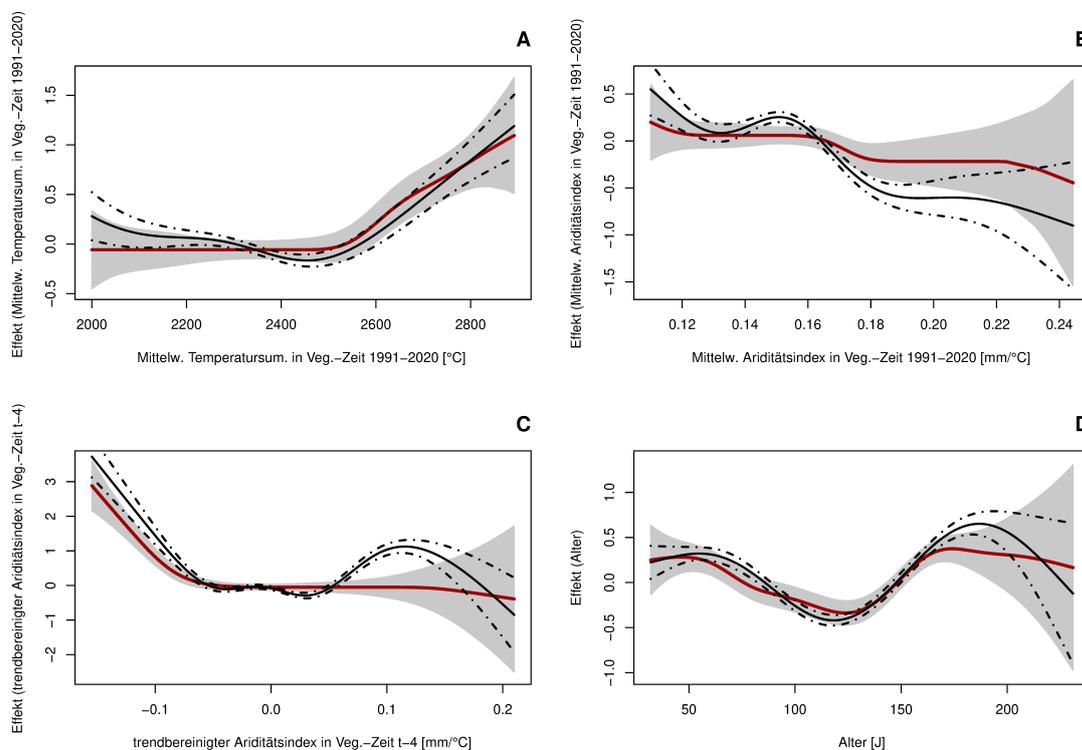


Abbildung 2: Modelleffekte mit (*GAM_Con*: rote Linie / grauer Konfidenzbereich) und ohne Monotoniebedingungen (*GAM*: schwarze durchgezogene Linie / Konfidenzbereich innerhalb der schwarzen punkt-gestrichelten Linien) der Klimaparameter *Tempsum_Veg_1991-2020* (A) und *Ari_Veg_1991-2020* (B), des Ariditätsindex in der Vegetationszeit im Jahr *t-4* vor dem Bezugsjahr *t* der WZE (C) und des Einzelbaumalters zum Zeitpunkte der WZE (D) auf die jährliche Mortalitätswahrscheinlichkeit der Buche.

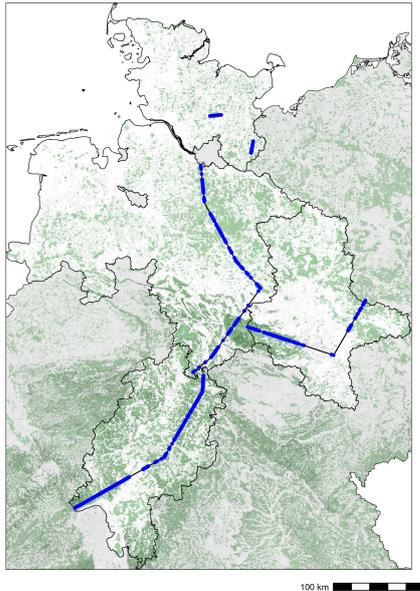


Abbildung 3: Transekt durch Nordwestdeutschland, der für die Sensitivitätsanalyse des Modells zur Projektion der Buchenmortalität verwendet wurde. Für alle im Wald liegenden Punkte wurde eine Buchenbestockung unterstellt und die jeweiligen klimatischen und Witterungsbedingungen für die Projektionen verwendet.

ohne Extrapolation durchgeführt, d.h. zukünftige Witterungswerte, die außerhalb der Parametrisierungsdaten liegen, haben eine Wirkung wie die Maximalwerte, die im Zeitraum 1986 - 2022 innerhalb der WZE beobachtet wurden. Es handelt sich somit um sehr konservative Projektionen.

Es wird deutlich, dass sich die durch die Variante GAM projizierten Mortalitätsraten bereits Mitte des 21-ten Jahrhunderts für weite Bereiche des Transektes extrem erhöhen, wenn ein pessimistischer Klimalauf aus dem ReKliEs-DE Kernensemble des globalen Emissionsszenarios RCP8.5 unterstellt wird (Abbildung 4 B). Aber selbst ein bzgl. der Witterungsgrößen mittlerer Klimalauf führt zu einem bisher nie beobachteten Schadniveau (Abbildung 4 A). Lediglich der günstigste Klimalauf des Kernensembles führt bis Mitte des 21-ten Jahrhunderts zu so gut wie keinen Veränderungen der Mortalitätsraten (Abbildung 4 C). Die projizierten Mortalitätsraten auf Basis der Variante GAM_Con sind deutlich geringer (Abbildung 4 D, F). Hier spiegelt sich die deutlich geringere Sensitivität der Modelleffekte in dieser Variante wider (Abbildung 1 / 2) und nur der pessimistische Klimalauf zeigt bereits deutlich erhöhte Mortalitätsraten (Abbildung 4 E).

Für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts werden durch die Variante GAM für weite Bereiche des Transektes extrem erhöhte Mortalitätsraten projiziert (Abbildung 5 A-C). Die Unterschiede zwischen den Klimäläufen sind zwar noch deutlich erkennbar, aber selbst der sehr günstige Klimalauf (Abbildung 5 C) resultiert gegenüber der aktuellen Situation in einer Vervielfachung der Mortalitätsraten. Im sehr pessimistischen Klimalauf gibt es ab es ab 2055 entlang des Transektes keinerlei Standorte mehr, auf denen die Buche nicht innerhalb weniger Jahre ausfällt (Abbildung 5 B). Im Klimalauf mit mittleren Bedingungen tritt dieses Muster zeitlich versetzt ab etwa 2080 auf (Abbildung 5 A). Die projizierten Mortalitätsraten auf Basis der Variante GAM_Con sind deutlich geringer (Abbildung 5 D-F). Aber selbst der sehr günstige Klimalauf (Abbildung 5 F) weist immer noch sehr viele höhere Mortalitätsraten auf, als sie im Zeitraum 1986 - 2022 beobachtet wurden.

4 Diskussion

Die deutlichen Effekte von Witterungsparametern im Mortalitätsmodell der Buche heben sich von den Erkenntnissen in ähnlichen, aktuellen Forschungsansätzen ab (z. B. Kulha et al. 2023, Brandl et al. 2020, Neumann et al. 2017). Neben der größeren Wirkungsamplitude der Modelleffekte sind auch die relativ deutlichen Kippunkte, ab denen deutlich erhöhte Mortalitätsraten projiziert werden, in der statistischen Modellierung aktuell ein Alleinstellungsmerkmal. Die genannten Forschungsansätze, basieren auf Daten, die Gesamteuropa (Brandl et al. 2020, Neumann et al. 2017) bzw. Frankreich, Deutschland und Finnland (Kulha et al. 2023) abdecken, so dass ihre geringere Sensitivität nicht in einer geringeren Standortsamplitude begründet sein kann. Allerdings weisen die Datengrundlagen weitere Unterschiede auf, die als potentielle Ursachen für abweichende Modellverhalten in Frage kommen. Die Unterschiede betreffen sowohl die Zielvariable (Mortalitätsdefinition) als auch die Einflussgrößen. So enthält der Datensatz von Brandl et al. (2020) Sturmschäden. Im Datensatz von Kulha et al. (2023) werden Schäden aufgrund von größeren Störungen ausgeschlossen. Die Selektion erfolgt hier allerdings anhand eines gutachterlichen Grenzwertes des Schadprozentes und ohne eine Differenzierung nach biotischen und abiotischen Schadursachen. Während

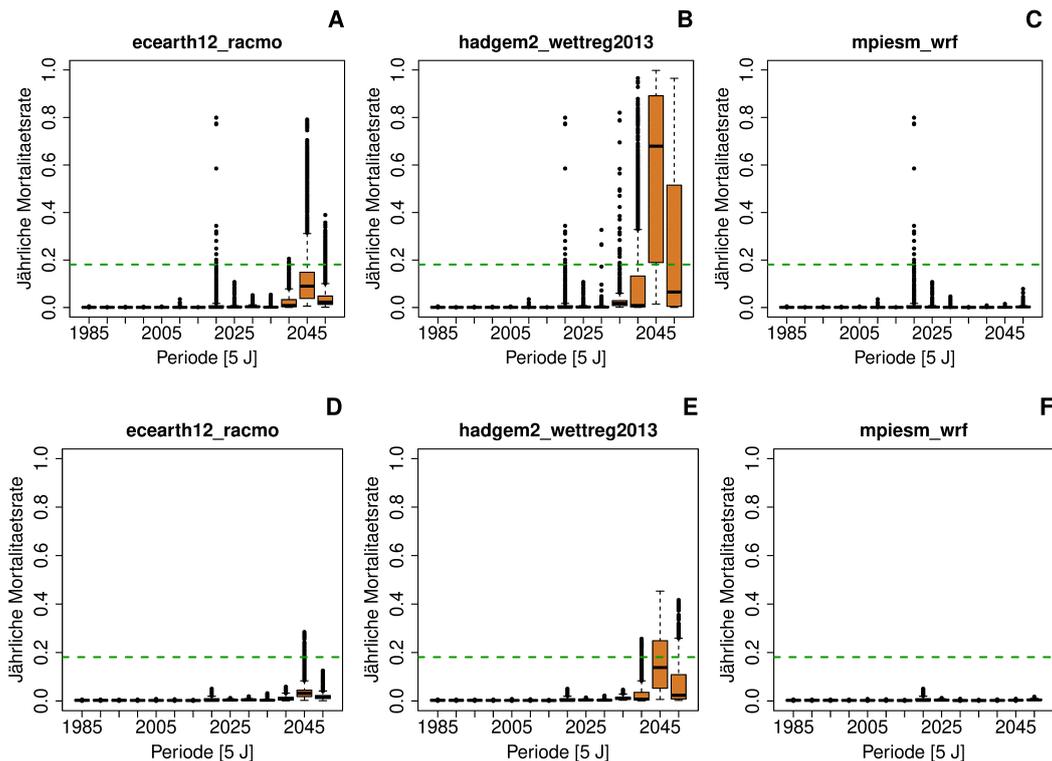


Abbildung 4: Projizierte jährliche Mortalitätsraten auf Basis der Modellvariante GAM (A/B/C) und GAM_Con (D/E/F) stratifiziert nach 5-Jahresperioden (Klassenobergrenzen) im Zeitraum 1981 - 2050 für Buche auf einem Transekt in Nordwestdeutschland (Abbildung 3) für drei Klimäläufe des ReKliEs-DE Kernensembles. Die Buchen sind zum Beginn des Betrachtungszeitraumes 81 Jahre und zum Ende 150 Jahre alt. Zu Vergleichszwecken ist die beobachtete Mortalitätsrate der Fichte im Zeitraum 2016-2020 dargestellt (grün-gestrichelte Linie).

aber Sturmschäden mutmaßlich kaum mit Witterungsparametern wie vegetationszeitbezogenen Temperatursummen und Ariditätsweisern korreliert sind, kann für Kalamitäten aufgrund von biotischen Schadfaktoren ein enger Zusammenhang angenommen werden. Zielsetzung von Kuhla et al. (2023) ist es allerdings, abweichend zum hier vorgestellten Ansatz, eine witterungsbedingte Hintergrundmortalität ohne größere Störungseinflüsse zu beschreiben. Brandl et al. (2020) standen nur Daten ab 1994 bis einschließlich 2017 und damit ohne die Extremjahre ab 2018 zur Verfügung und es wurden keine Witterungs- sondern Klimaparameter der Periode 1970 - 2000 in einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km bzgl. ihrer Wirkung untersucht. Das Modell für die Buche (Brandl et al. 2020) enthält mit dem langjährigen Mittel der Maximaltemperatur des wärmsten Monats bzw. der Minimaltemperatur des kältesten Monats nur zwei Einflussgrößen. Kulha et al. (2023) differenzieren in ihrem Ansatz nicht nach Baumarten, was im Hinblick auf die unterschiedlichen Standortsansprüche der Baumarten die Modellergebnisse beeinflussen dürfte. Als Einflussgrößen werden, wie im

hier vorgestellten Ansatz, Witterungsparameter auch in Form von Abweichungen gegenüber langjährigen Mittelwerten verwendet. Klimaparameter werden jedoch nicht simultan geprüft. Ein weiterer Unterschied resultiert aus der Verwendung von Nationalen Waldinventuren als Datenbasis. Das Aufnahmeintervall liegt in den 3 berücksichtigten Ländern zwischen 5 und 10 Jahren, was die Identifikation der Effekte von Witterungsparametern erschweren dürfte. Brandl et al. 2020 und Neuner et al. 2017 verwenden WZE-Daten und Daten des Europäischen ICP Level I Netzes, so dass in der Regel ein 1-jähriges Aufnahmeintervall vorliegt. Neumann et al. (2017) entwickeln Modelle getrennt für 5 europäische Ökoregionen. Die Modelle enthalten neben dem Alter, Witterungsparameter in jährlicher Auflösung als Abweichungen zu langjährigen Mittelwerten. Somit weist der Ansatz bzgl. der Datenstruktur die größte Übereinstimmung mit dem hier vorgestellten Modell auf. Allerdings testen Neumann et al. (2017) keine langjährigen Klimaparameter und wie bei Kulha et al. (2023) werden die Analysen ohne eine Differenzierung nach Baumarten durchgeführt. Die Modelle in

den 5 europäischen Ökoregionen weisen insgesamt deutlich höhere Sensitivitäten als die Ansätze von Kulha et al. (2023) bzw. Brandl et al. (2020) auf. Die Sensitivität des hier vorgestellten Buchenmodells wird aber nicht erreicht. Zu dem treten bspw. im Modell für die Ökoregion Zentrales Westeuropa Wirkungsmuster auf die teilweise nicht sachlogisch erscheinen. So werden umso höhere Mortalitätsraten projiziert, je höhere Winter- und Frühjahrsniederschläge im Vorjahr auftreten sind. Im Gegensatz zum hier vorgestellten Ansatz werden in den zitierten Vergleichsstudien keine ausgeprägten Kippunkte in den Modelleffekten modelliert. Allerdings werden in den verwendeten Modellansätzen ausschließlich lineare Modelleffekte beschrieben und es ist nicht ersichtlich, inwieweit eine Überprüfung nicht-linearer Zusammenhänge stattgefunden hat. Demgegenüber können Modelleffekte in GAM umfassend auf Nicht-Linearität geprüft werden (Wood 2017).

5 Ausblick

Die Projektionen von Mortalitätsraten bzw. aus ihnen abgeleiteter Überlebenszeiten sollen mittelfristig als ein weiteres Kriterium der Baumarten- bzw. WEZ-Wahl verwendet werden (WEZ: Waldentwicklungsziel, waldbauliche Definition von Mischbeständen anhand von Mischungsanteilen, Produktionszielen etc.). Die derzeitigen Modellprototypen projizieren mit Ausnahme der Modellvariante *GAM_Con* in Kombination mit dem günstigsten Klimalauf (Abbildung 5 F) Mortalitätsraten, die einen Verlust der Buche auf einem Großteil der Waldfläche bis spätestens Ende des Jahrhunderts bedeuten würden. Allerdings sind die Unsicherheiten der Projektionen aktuell noch sehr hoch. Die Unsicherheit betrifft vor allem das Ausmaß der Mortalitätsraten und weniger das generelle Muster. So führt beispielsweise die Vorgabe von Monotoniebedingungen im *GAM_Con* zu der bereits beschriebenen Abschwächung der Modelleffekte, die in starken Unterschieden zwischen den Projektionen auf Basis von *GAM* bzw. *GAM_Con* resultieren (Abbildung 4 / 5). Daher sollen in den nächsten Jahren

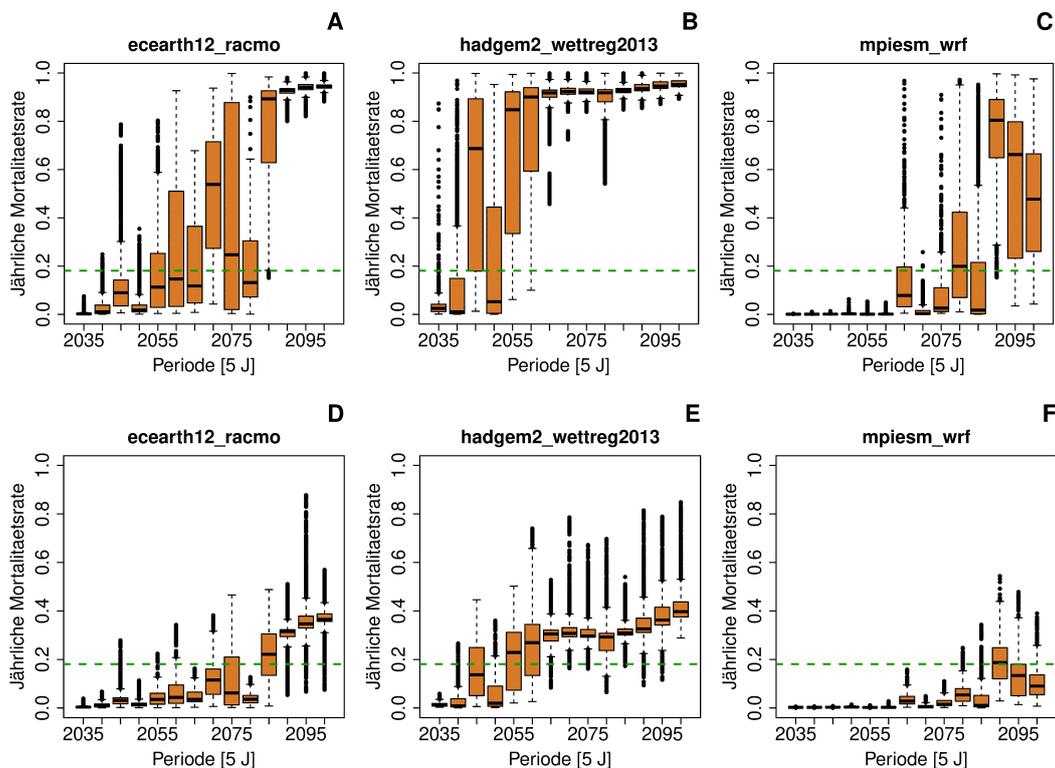


Abbildung 5: Projizierte jährliche Mortalitätsraten auf Basis der Modellvariante *GAM* (A/B/C) und *GAM_Con* (D/E/F) stratifiziert nach 5-Jahresperioden (Klassenobergrenzen) im Zeitraum 2031 - 2100 für Buche auf einem Transekt in Nordwestdeutschland (Abbildung 3) für 3 Klimaläufe des ReKliEs-DE Kernensembles. Die Buchen sind zum Beginn des Betrachtungszeitraumes 81 Jahre und zum Ende 150 Jahre alt. Zu Vergleichszwecken ist die beobachtete Mortalitätsrate der Fichte im Zeitraum 2016-2020 dargestellt (grün-gestrichelte Linie).

dauerhaft Reparametrisierungen auf der Grundlage zukünftiger Waldzustandserhebungen erfolgen, in denen sich das Schädgeschehen aller Voraussicht nach verstetigen und für alle Baumarten auf allerdings sehr unterschiedlichem Niveau intensivieren wird. Eine Verwendung der Projektionen für eine relative Differenzierung der Standorte bzgl. der Baumarteneignung erscheint aktuell aber schon möglich. Allerdings sollte vorweg noch differenziert analysiert werden, wie sich die unterschiedlichen Standorte bzgl. der Mortalitätsraten unterscheiden. Auch werden in den derzeitigen Modellen keinerlei Effekte von Bodenparametern bspw. zur Erfassung des Geländewasserhaushaltes beschrieben, da derzeit keine einheitliche Datengrundlage für die Trägeländer der NW-FVA zur Verfügung steht. Eine Erweiterung diesbezüglich ist in einem bereits angelaufenen Forschungsprojekt im Rahmen des Waldklimafonds (FKZ: 2220WK41F4) für 2024/25 geplant.

6 Literatur

- Brandl, S.; Paul, C.; Knoke, T.; Falk, W. (2020): The influence of climate and management on survival probability for Germany's most important tree species. *Forest Ecology and Management* 458, DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117652
- Burnham, K.P.; Anderson, D.R. (2004): Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociol Method Res*, 33 (2). DOI: 10.1177/0049124104268644
- Gregow, H.; Laaksonen, A.; Alper, ME. (2017): Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951-2010. *Scientific Reports* 7: 46397. DOI: 10.1038/srep46397
- Kulha, N.; Honkaniemi, J.; Barrere, J.; Brandl, S.; Cordonnier, T.; Korhonen, K.T.; Kunstler, G.; Paul, C.; Reineking, B.; Peltoniemi, M. (2023): Competition-induced tree mortality across Europe is driven by shade tolerance, proportion of conspecifics and drought. *Journal of Ecology* 111. DOI: 10.1111/1365-2745.14184
- Neumann, M.; Mues, V.; Moreno, A.; Hasenauer, H.; Seidl, R. (2017): Climate variability drives recent tree mortality in Europe. *Global Change Biology* 23. DOI: 10.1111/gcb.13724
- Nuske, R. (2017): vegperiod: Determine Thermal Vegetation Periods [Software]. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.1466541
- Patacca, M.; Lindner, M.; Lucas-Borja, M. E.; Cordonnier, T.; Fidej, G.; Gardiner, B.; Hauf, Y.; Jasinevicius, G.; Labonne, S.; Linkevičius, E.; Nieberg, M.; Milanovic, S.; Nabuurs, G.-J.; Nagel, T.; Nikinmaa, L.; Panayotov, M.; Bercak, R.; Seidl, R.; Ostrogović Sever M.; Schelhaas, M.-J. (2023): Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*. 29. DOI: 10.1111/gcb.16531.
- R Core Team (2023): R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>
- Rigby, R.A.; Stasinopoulos, D.M. (2005): Generalized additive models for location, scale and shape, (with discussion), *Appl. Statist.* 54, part 3. DOI: 10.1111/j.1467-9876.2005.00510.x
- Schelhaas, M.-J.; Nabuurs, G.-J.; Schuck, A. (2003): Natural disturbances in the European forests in the 19th and the 20th centuries. *Global Change Biology* 9. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x
- Schuck, A.; Schelhaas, M.-J. (2013): Storm damage in Europe – An overview. In *What Science Can Tell Us. Living with Storm Damage to Forests*. Gardiner, B.; Schuck, A.; Schelhaas, M.J.; Orazio, C.; Blennow, K.; Nicoll, B. (Hrsg.) European Forest Institute: Barcelona, Spain.
- Schulla, J.; Jasper, K. (2007): Model description wasim-eth. Institute for Atmospheric and Climate Science, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.
- Seidl, R.; Rammer, W. (2017): Climate change amplifies the interactions between wind and bark beetle disturbances in forest landscapes. *Landscape Ecology* 32. DOI: 10.1007/s10980-016-0396-4
- Seidl, R.; Schelhaas, M.J.; Rammer, W.; Verkerk, P.J. (2014): Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change* 4. DOI: 10.1038/nclimate2318.
- Seidl, R.; Schelhaas, M.-J.; Lexer, M.J. (2011): Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Global Change Biology* 17, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x
- Wood, S. N. (2017): Generalized additive models: an introduction with R. CRC press.
- Yang, Y.; Huang, S. (2013): A Generalized Mixed Logistic Model for Predicting Individual Tree Survival Probability with Unequal Measurement Intervals. *Forest Science* 59 (2). DOI: 10.5849/forsci.10-092