Mortalität von Fichte und Buche – Einfluss von Klima und Mischung

Im Klimawandel werden sowohl steigende Mitteltemperaturen als auch eine Häufung von extremen Ereignissen wie z. B. Dürreperioden prognostiziert. Führen diese Veränderungen zu einem höheren Ausfallrisiko unserer Baumarten? Wie kann dieses Risiko quantifiziert werden? Kann das Risiko durch eine Verkürzung der Umtriebszeiten und Mischung gesenkt werden? Überlebenszeitanalysen, basierend auf einem europäischen Datensatz, sollen einen Beitrag zur Beantwortung dieser Fragen liefern.

Susanne Brandl, Wolfgang Falk

Ausfallrisiko und Produktivität einer Baumart an einem Standort entscheiden über ihre Anbaueignung. Unter Umständen geht höhere Produktivität mit einem höheren Ausfallrisiko einher, sodass es zwischen beiden Aspekten abzuwägen gilt. Dafür müssen sowohl der zu erwartende Ertrag als auch das Risiko standortabhängig geschätzt werden. Zahlreiche Studien untersuchen das Verhältnis von Standort und Leistung [1, 2], deutlich weniger Studien hingegen den Zusammenhang zwischen Mortalitätsrisiko und Standort [9, 10].

Warum sterben Bäume?

Die Frage, die am Anfang steht, ist einfach: Warum sterben Bäume? Die Antwort gestaltet sich nicht ganz so einfach. Die „Decline Disease"-Theorie [8] stellt ein nützliches Konzept dar, um stressbedingte Mortalität besser zu verstehen. Sie unterscheidet zwischen schwächenden, auslösenden und beitragenden Faktoren. Schwächende Faktoren beeinflussen langfristig die Vitalität von Bäumen und umfassen u. a. Klima, Bodenwasserspeicher, Nährstoffversorgung und die genetische Veranlagung. Auslösende Faktoren hingegen beeinträchtigen bereits auf kurze Sicht die physiologischen Funktionen und führen dadurch zu einer Schwächung der Abwehr und einem starken Rückgang im Zuwachs. Auslösende Faktoren können u. a. Blattfraß durch Insekten, Frost, Stürme und Trockenheit sein. Beitragende Faktoren, wie Borkenkäfer, Pilze oder Viren, sind oft das Zünglein an der Waage und entscheiden letztendlich darüber, ob und wann ein Baum tatsächlich stirbt. Der Tod eines Baumes ist i. d. R. nicht monokausal, sondern die Folge komplexer Interaktionen zwischen diesen Faktoren. Mortalität ist damit ein stochastischer, hochkomplexer und gradueller Prozess und somit nur schwer vorhersagbar [3]. Warum streben wir dies aber dennoch an?

Baumartenwahl im Klimawandel

Bei der Baumartenwahl kann auf langjährige Erfahrung und Auswertung von Versuchsflächen zurückgegriffen werden. Im Falle der Produktivität ist dieses Wissen beispielsweise in Ertragstafeln zusammengefasst. Wenn sich Standortbedingungen verändern, ist Erfahrungswissen aber nur noch eingeschränkt gültig. Im Zuge des Klimawandels werden steigende Temperaturen, ein verändertes Niederschlagsregime und eine Häufung von Extremereignissen und Störungen prognostiziert [6], die sich auf das Mortalitätsrisiko auswirken. Sta-

Schneller Überblick

- Abschätzung des Mortalitätsrisikos mit Überlebenszeitmodellen, basierend auf europaweiten Daten
- Höheres Mortalitätsrisiko mit steigenden Sommertemperaturen
- Mischung verringert das Mortalitätsrisiko
- Auf höhere Risiken im Klimawandel kann mit einer Erhöhung des Mischungsanteils und einer Verkürzung der Umtriebszeiten reagiert werden

Foto: Archivbild

Abb. 1: Kann das Ausfallrisiko unserer Baumarten durch kürzere Umtriebszeiten und Mischung gesenkt werden?

tistische Modelle, die das Mortalitätsrisiko in Abhängigkeit von klimatischen Faktoren erklären, ermöglichen es, das Mortalitätsrisiko unter zukünftigem Klima zu schätzen. Neben klimatischen Faktoren haben auch Einzelbaum- und Bestandesparameter einen starken Einfluss.

Europaweite Daten

Um das Mortalitätsrisiko für ein wärmeres Klima vorhersagen zu können, müssen die Modelle an Daten lernen, die bereits heute diese Klimabedingungen aufweisen [7]. Dafür wurden die Daten der bundesweiten Waldzustandserhebung (WZE) um die europäischen Level I- und Level II-Daten erweitert. Bei der WZE werden i. d. R. in einem 8 x 8 km-Raster jährlich Kronenzustand und weitere Vitalitätsindikatoren von je 24 Bäumen erhoben. Europaweit stehen entsprechende Daten in einem 16 x 16 km-Raster zur Verfügung (Level I). Level II-Daten stammen von Intensiv-Beobachtungsflächen. Essenzielle Anforderungen an die Daten sind Wiederholungsaufnahmen an denselben Bäumen sowie eine Angabe der Ausfallursache, wenn ein Baum in der Folgeinventur nicht mehr vorhanden ist, um zwischen stressbedingter Mortalität und regulärer Nutzung zu unterscheiden. Daneben sind Alter und soziale Stellung des Baumes von Bedeutung.

Die Überlebenszeitanalyse

Eine geeignete statistische Methode ist die Überlebenszeitanalyse. Ursprünglich für die medizinische Forschung entwickelt, kann diese Methode auf verschiedenste Fragestellungen übertragen werden, bei denen die Zeit bis zu einem bestimmten Ereignis von Interesse ist. In unserem Fall ist die Zeitvariable das Alter des Baumes und das Ereignis der Tod des Baumes, der im Beobachtungszeitraum eintreten kann oder nicht. Basierend auf den Verhältnissen zwischen überlebenden Bäumen und der Gesamtzahl an Bäumen, die in einem bestimmten Alter beobachtet werden, kann für jedes Alter eine Überlebenswahrscheinlichkeit geschätzt werden.

Accelerated Failure Time-Modelle ermöglichen es, eine Annahme für die Verteilung der Überlebenszeiten zu treffen (hier: Weibullverteilung) und den Einfluss von Kovariablen auf die Überlebenswahrscheinlichkeit zu schätzen. Potenzielle

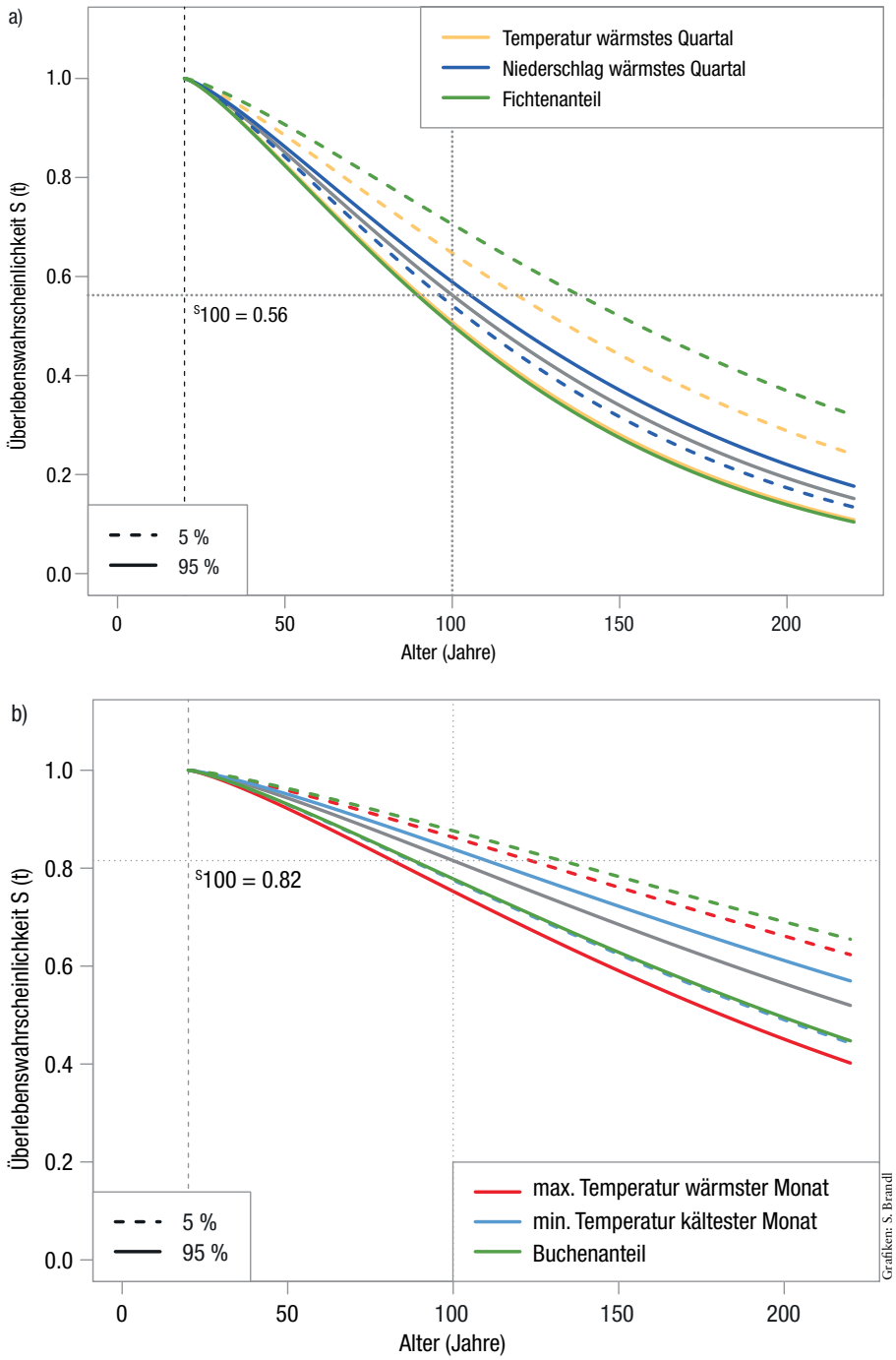


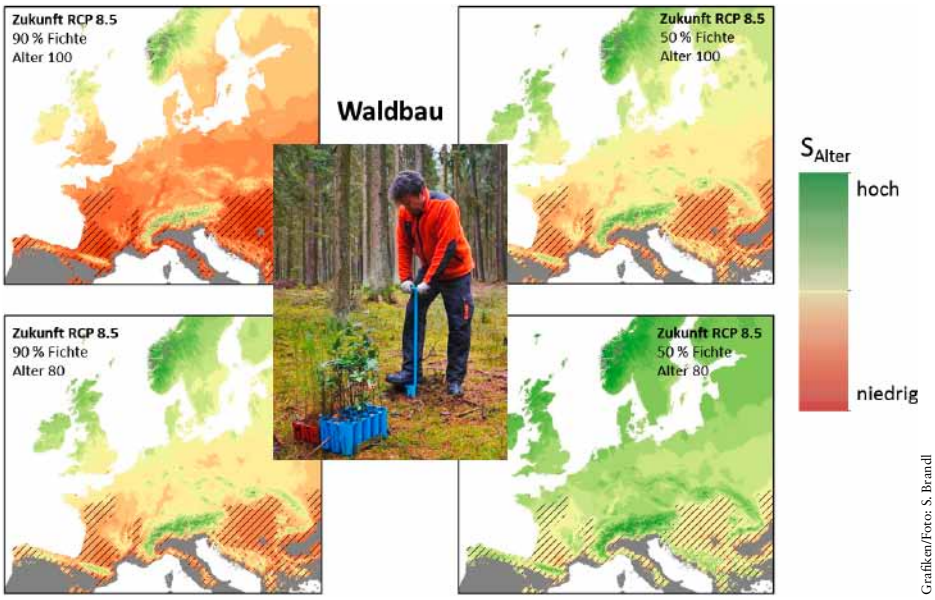
Abb. 2: Überlebenswahrscheinlichkeiten für die Fichte (a, oben) und Buche (b, unten). Für die dargestellten Kurven wurde die entsprechende Kovariable auf das 5 %- bis bzw. 95 %-Quantil ihres Wertebereichs gesetzt, die restlichen Kovariablen auf den Mittelwert. Das 5 %-Quantil (gestrichelte Linie) entspricht folglich einem sehr niedrigen Wert der Variablen, das 95 %-Quantil (durchgezogene Linie) einem sehr hohen Wert. Eingezeichnet ist weiterhin die Überlebenswahrscheinlichkeit im Alter 100 (S100), wenn alle Kovariablen auf ihren Mittelwert gesetzt sind (graue durchgezogene Kurve).

Kovariablen umfassten die Jahresmitteltemperatur bzw. die Sommertemperatur, die Wintertemperatur, den Jahres- oder Sommerniederschlag sowie den Mischungsanteil der jeweiligen Baumart. Da für einen Großteil der Daten keine Angaben zu Durchmesser oder Baumposition vorlagen, wurde der Baumartenanteil als Stammzahlanteil der jeweiligen Art berechnet. Für die Modellanpassung gingen nur Beobachtungen an Bäumen älter als 20 Jahre ein. Die Variablen-Selektion basierte auf der Vorhersagegüte [4], jede Variable konnte entweder als linearer Effekt oder als Spline ausgewählt werden. Da die Klimavariablen auf 30-jährigen Mitteln

Kovariable	Koeffizient	Beschleunigungs-Faktor	Standard-Fehler	p-Wert
Fichte				
Temperatur wärmstes Quartal	0.066	1.068	0.008	0.000
Niederschlag wärmstes Quartal	-0.001	0.999	0.000	0.002
Fichtenanteil	0.719	2.052	0.055	0.000
ln(α)	0.259		0.020	0.000
ln(β)	6.229		0.159	0.000
Buche				
max. Temp. wärmster Monat	0.089	1.093	0.016	0.000
min. Temp. kältester Monat	-0.039	0.962	0.012	0.001
Buchenanteil	0.577	1.780	0.105	0.000
ln(α)	0.241		0.051	
ln(β)	8.197		0.402	

Tab. 1: Detaillierte Modellergebnisse für Fichte und Buche. Der Beschleunigungsfaktor entspricht exp(Koeffizient). Ein Faktor > 1 verkürzt die Überlebenszeit und wirkt sich damit negativ auf die Überlebenswahrscheinlichkeit aus, während ein Faktor < 1 die Überlebenswahrscheinlichkeit erhöht. α ist der Formparameter der Weibullverteilung, β der Skalenparameter.

(Worldclim 1960 bis 1990 [5]) basieren, beschränken wir uns in dieser Studie auf schwächende Faktoren, um Unterschiede im Überleben zu erklären und vernachlässigen auslösende und beitragende Faktoren. Allerdings darf eine Korrelation zwischen schwächenden und auslösenden bzw. beitragenden Faktoren angenommen werden: So ist beispielsweise die Korrelation zwischen klimatischen Mittelwerten und der Anzahl Dürreperioden in dem Zeitraum 1960 bis 1990 hoch: In Regionen mit im Mittel höheren Sommertemperaturen (schwächender Faktor) kommen oft mehr Trockenperioden (auslösender Faktor) vor. Dies erhöht wiederum die Wahrscheinlichkeit eines Borkenkäferbefalls (beitragender Faktor).



Grafiken/Foto: S. Brandl

Abb. 3: Waldbauliche Entscheidungen ermöglichen es, Einfluss auf das Ausfallrisiko in der Zukunft zu nehmen. Dargestellt ist jeweils die Einzelbaum-Überlebenswahrscheinlichkeit (S) der Fichte zur jeweiligen Umtriebszeit für verschiedene Fichtenanteile für ein ausgewähltes Klimaszenario (MPI-ESM RCP 8.5) für die Periode 2061 bis 2080 (Worldclim [5]). Sowohl eine Erhöhung des Mischungsanteils (rechts oben) als auch eine Verkürzung der Umtriebszeit (links unten) reduzieren das Risiko merklich im Vergleich zu einem Bestand mit einem Fichtenanteil von 90 %, der im Alter 100 genutzt wird (links oben). Die Wahrscheinlichkeit, die Umtriebszeit zu erreichen, sinkt im Klimawandel und steigt sowohl bei Erhöhung des Mischungsanteils als auch bei Verkürzung der Umtriebszeit (rechts unten). Die Extrapolationsbereiche der Modelle sind grau eingefärbt (bereits heutiges Klima nicht in den Lerndaten enthalten) bzw. schraffiert (zukünftiges Klima nicht mehr in den Lerndaten enthalten).

Welche Faktoren beeinflussen das Überleben von Fichte und Buche?

Die Überlebenswahrscheinlichkeit der Fichte sinkt mit steigenden Sommertemperaturen (mittlere Temperatur des wärmsten Quartals; Abb. 2a). Hoher Sommerniederschlag (Niederschlagssumme des wärmsten Quartals) verringert das Mortalitätsrisiko geringfügig. Mischung hat einen starken, positiven Effekt auf das Überleben. Für die Buche ist der Effekt der Sommertemperatur (Maximumtemperatur des wärmsten Monats) ähnlich, d. h. steigende Temperaturen erhöhen das Mortalitätsrisiko (Abb. 2b). Daneben wurde für die Buche im Zuge einer statistischen Variablenselektion die Minimumtemperatur des kältesten Monats als erklärende Variable ausgewählt. Niedrige Wintertemperaturen wirken sich negativ auf das Überleben aus. Auch bei der Buche ist die Überlebenswahrscheinlichkeit im Mischbestand höher. In Tab. 1 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Die modellierten Effekte erscheinen ökologisch plausibel: Einerseits reduzieren heiße und trockene Sommer die Vitalität der Fichte und wirken als schwächende Faktoren. Das macht die Bäume anfälliger für auslösende und beitragende Faktoren wie z. B. Borkenkäferbefall bei der Fichte. Andererseits besteht eine Korrelation zwischen der Sommertemperatur im 30-jährigen Mittel und der Häufigkeit und Intensität von Dürreereignissen. Deshalb könnten die modellierten Effekte der Sommertemperatur auch teilweise den auslösenden Faktor Dürre widerspiegeln. Zu erwarten wäre, dass niedrige Sommerniederschläge und damit Wassermangel das Mortalitätsrisiko erhöhen. Der Sommerniederschlag hat aber nur im Fichtenmodell einen (schwachen) Effekt. In Europa weisen Regionen mit hohen Sommertemperaturen meist geringe Sommerniederschläge auf, wohingegen die Kombination von hohen Sommertemperaturen und hohen Niederschlägen selten ist. Dies führt dazu, dass Modelle schwer zwischen Temperatur- und Niederschlagseffekten trennen können. Daher könnte der Temperatureffekt bereits teilweise den vermuteten Effekt des Niederschlags enthalten. Der Effekt der Temperatur im Buchenmodell ist schwe-

rer zu interpretieren. Beide Extrema des Standortspektrums weisen eine erhöhte Mortalität auf. Eine mögliche Deutung des Effekts der Wintertemperatur wäre, dass starke Fröste zu Schäden (Risse, Absterben von Gewebe) führen. Letztlich halten sich bei der Buche aber die beiden ausgewählten Temperaturvariablen in etwa die Waage, sodass der Gesamteffekt steigender Temperaturen im Klimawandel davon abhängt, wie stark jeweils Winter- und Sommertemperatur ansteigen. Die höhere Überlebenswahrscheinlichkeit im Mischbestand ist durch reduzierte Konkurrenz aufgrund von Komplementarität bei der Ressourcennutzung und durch größere Stabilität gegenüber Kalamitäten erklärbar [11, 12].

Die Überlebenswahrscheinlichkeiten für die Fichte sind deutlich niedriger als für die Buche. So liegt die Überlebenswahrscheinlichkeit im Alter 100 für die Fichte im Mittel bei 56 % (Abb. 2a), während sie bei der Buche noch bei 82 % (Abb. 2b) liegt. Diese Werte erscheinen auf den ersten Blick sehr niedrig, decken sich aber mit anderen Studien [13]. Zu berücksichtigen ist, dass es sich um Einzelbaum-Überlebenswahrscheinlichkeiten handelt, die nicht eins zu eins auf den Bestand übertragbar sind. In vielen Fällen kann der Ausfall eines einzelnen Baumes kompensiert werden, weil die benachbarten Bäume schneller wachsen und die entstandene Lücke schließen [13].

Nutzen und Grenzen der Studie

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die geschätzten Koeffizienten teilweise hohe Standardfehler aufweisen, d. h. die Unsicherheit bzgl. des tatsächlichen Effekts ist groß. Dies ist zum einen auf die bereits erwähnte Komplexität der Baummortalität zurückzuführen. Zudem sind es oft stochastische, schwer vorhersagbare Ereignisse, wie z. B. Sturm oder Käferbefall, die letztendlich zum Absterben führen. Daneben wird die Genauigkeit der Modelle auch durch die Datengrundlage limitiert. Wichtige Prädiktoren wie Baumdimension und hochaufgelöste bzw. gemessene Bodendaten liegen europaweit nicht einheitlich vor. Das Alter ist oft nur eine grobe Schätzung und auch die Ausfallursache ist nicht immer eindeutig bestimmbar. Die Studie von Maringer und Albrecht (S. 14) beschäftigt sich eingehend mit der Validierung der Modellergebnisse.

Bei all diesen Einschränkungen darf das Potenzial der Untersuchung aber nicht aus dem Blick geraten. Erstmals wurden großräumige Trends der Mortalität, aufgelöst für einzelne Baumarten auf europaweiter Datengrundlage, herausgearbeitet. Hier ist auch die Wichtigkeit der europaweiten Harmonisierung und Verfügbarkeit der Daten der Waldzustandserhebung (Level I) herauszustellen. Die Modelle ermöglichen eine erste Abschätzung von Veränderungen des Ausfallrisikos im Klimawandel (Abb. 3). Dadurch, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit über dem Alter beschrieben wird und die Mischung als erklärende Variable in den Modellen enthalten ist, können für verschiedene Klimaszenarien geeignete Umtriebszeiten und Mischungsverhältnisse abgeschätzt werden, welche das Verhältnis zwischen Ertrag zu Risiko verbessern. Dies zeigt den Handlungsspielraum des Waldbesitzers auf.

Susanne Brandl, Susanne.Brandl@lwf.bayern.de, und **Wolfgang Falk** sind wissenschaftliche Mitarbeiter an der Bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft in der Abteilung Boden und Klima.

Literaturhinweise:

[1] ALBERT, M.; SCHMIDT, M. (2010): Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). Forest Ecology and Management, 259(4), 739-749. **[2]** BRANDL, S.; METTE, T.; FALK, W.; VALLET, P.; RÖTZER, T; PRETZSCH, H. (2018): Static site indices from different national forest inventories Harmonization and prediction from site conditions. Annals of Forest Science, 75(2). **[3]** FRANKLIN, J. F.; SHUGART, H. H.; HARMON, M. E. (1987): Tree Death as an Ecological Process. BioScience, 37(8), 550-556. **[4]** GERDS, T. A.; SCHUMACHER, M. (2006): Consistent Estimation of the Expected Brier Score in General Survival Models with Right-Censored Event Times. Biom. J., 48(6), 1029-1040. **[5]** HIJMANS, R. J.; CAMERON, S. E.; PARRA, J. L.; JONES, P. G.; JARVIS, A. (2005): Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Int. J. Climatol., 25(15), 1965-1978. **[6]** IPCC (2013): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F., STOCKER; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. **[7]** KÖLLING, C.; METTE, T.; KNOKE, T. (2016): Waldertrag und Anbaurisiko in einer unsicheren Klimazukunft. SZF, 167(1), 29-38. **[8]** MANION, P. D. (1981): Tree Disease Concepts. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. **[9]** NEUMANN, M.; MUES, V.; MORENO, A.; HASENAUER, H.; SEIDL, R. (2017): Climate variability drives recent tree mortality in Europe. Global change biology, 23(11), 4788-4797. **[10]** NEUNER, S.; ALBRECHT, A.; CULLMANN, D.; ENGELS, F.; GRIESS, V. C.; HAHN, W. A.; HANEWINKEL, M.; HÄRTL, F.; KÖLLING, C.; STAUPENDAHL, K.; KNOKE, T. (2015): Survival of Norway spruce remains higher in mixed stands under a dryer and warmer climate. Global change biology, 21(2), 935-946. **[11]** PRETZSCH, H.; DEL RÍO, M.; AMMER, C.; AVDAGIC, A.; BARBEITO, I.; BIELAK, K. et al. (2015): Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe. Eur J Forest Res, 134(5), 927-947. **[12]** SCHÄFER, C.; THURM, E. A.; RÖTZER, T.; KALLENBACH, C.; PRETZSCH, H. (2018): Daily stem water deficit of Norway spruce and European beech in intra- and interspecific neighborhood under heavy drought. Scand J Forest Res, 33(6), 1-34. **[13]** SCHONEBERG, S. (2017): Ein klimasensitives, autoregressives Modell zur Beschreibung der Einzelbaum-Mortalität. Dissertation, Göttingen.