

# Nadelbäume im Trockenstress

Vier Modelle zur Abschätzung der Trockenheitsresistenz im Klimawandel



**1** Unsere Bäume sind einem in der Zukunft vorhergesagten erhöhten Trockenstress ausgesetzt. Welche Nadelbaumarten kommen damit besser zurecht? Drohnenaufnahme eines Buchenbestandes mit Fichten, Lärchen und Waldkiefern.

Foto: E. Thurm, LFOA-MV

**Eric Andreas Thurm, Susanne Brandl, Hagen Fischer, Karl Heinz Mellert, Tobias Mette, Birgit Reger und Wendelin Weis**

**Artverbreitung, Wachstum, Überlebenswahrscheinlichkeit, Jahrringsensitivität – in den vergangenen Jahren wurden an der LWF zu all diesen Vitalitätseigenschaften von Baumarten verschiedene Modelle entwickelt, um der forstlichen Praxis eine Hilfestellung zur Einschätzung der Baumarteneignung im Klimawandel zu geben. In dieser Studie vereinen wir diese Modelle in einem multikriteriellen Baumartenbewertungskonzept, um die Trockenheitsresistenz wichtiger Nadelbaumarten in Mitteleuropa abzuschätzen.**

Wie kommen Fichte, Waldkiefer, Weißtanne, Europäische Lärche und Douglasie – unsere fünf wichtigsten Nadelbäume in Mitteleuropa – mit einem in der Zukunft vorhergesagten erhöhten Trockenstress zurecht? Die Frage nach der Trockenheitsresistenz dieser Baumarten wurde in einer ganzen Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten angegangen (z. B. Zang et al. 2011; Klein 2015; Dyderski et al. 2018). Diese Studien bewerten die Trockenheitsresistenz in der Regel anhand eines Parameters wie beispielsweise dem Jahrringverlauf, dem Blattwasserpotenzial oder der Verbreitungsgrenze. Eine Bewertung der Trockenheitsresistenz dieser Baumarten anhand mehrerer Vitalitätsin-

dikatoren ist bisher nur in wenigen Studien erfolgt (Dolos et al. 2015; Thurm et al. 2018). Auch in der Abteilung »Boden und Klima« an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) wurde in den vergangenen Jahren eine Reihe von Forschungsprojekten bearbeitet, die sich mit Aspekten der Baumarteneignung im Klimawandel befassen. Basierend auf diesen Forschungsprojekten wurde nun exemplarisch ein multikriterielles Baumartenbewertungskonzept vorgestellt, das die fünf Nadelbaumarten Fichte (*Picea abies*), Waldkiefer (*Pinus sylvestris*), Weißtanne (*Abies alba*), Europäische Lärche (*Larix decidua*) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) anhand

von vier klimasensitiven Kriterien hinsichtlich ihrer Trockenheitsresistenz bewertet (Thurm et al. 2019).

## Vier Modelle zur Baumartenbewertung

Die Abschätzung der Trockenheitsresistenz der fünf Nadelbaumarten basiert auf vier klimasensitiven Indikatoren zur Vitalität der Bäume:

- Vorkommen
- Wachstum
- Überlebenswahrscheinlichkeit
- Jahrringsensitivität

Diese Vitalitätsindikatoren werden mit Hilfe von (1) Artverbreitungsmodellen, (2) Wachstumsmodellen, (3) Überlebenszeitmodellen und (4) Jahrringmodellen ermittelt und in einer multikriteriellen Baumartenbewertung vereint (Abbildung 2). Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Modellergebnisse findet sich in Thurm et al. (2019). Wir konzentrieren uns hier nur auf das Hauptergebnis – der Einschätzung der Trockenheitsresistenz. Für die Modellierung verwenden die vier Modellierungsansätze die gleichen drei Klimagrößen a) Mittlere Temperatur des kältesten Quartals (Bio 11), b) Mittlere Temperatur des wärmsten Quartals (Bio

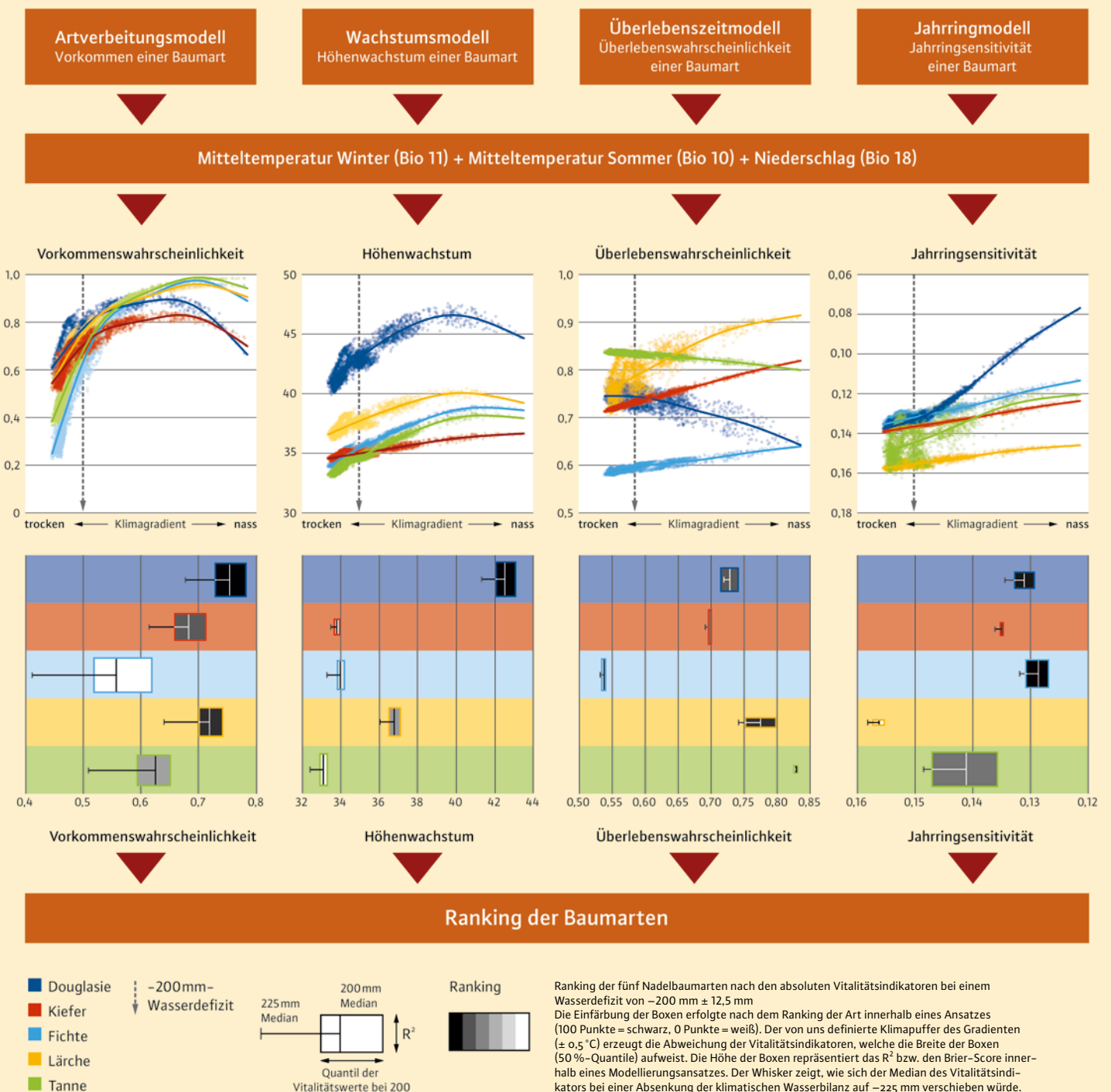
10) und c) Niederschlag des wärmsten Quartals (Bio 18). Die Eingangsgrößen wurden aus den Klimadaten von WorldClim 2.0 (Fick & Hijmans 2017) mit einer Auflösung von ungefähr 1 km x 1 km abgeleitet. Die Klimadaten beziehen sich auf ein langjähriges Mittel im Zeitraum 1970 bis 2000.

**Artverbreitungsmodelle**

Artverbreitungsmodelle berechnen die Vorkommenswahrscheinlichkeit einer Art unter definierten Standortbedingungen. Eingangsgröße ist die Information, ob eine Art an einem bestimmten Ort vorkommt (Präsenz) oder nicht vorkommt (Absenz). Für die fünf Nadelbaumarten wurde die Vorkommensinformation (Präsenz-/ Absenzdaten) aus nationalen

Inventuren und Forsteinrichtungen in Europa (Mauri et al. 2017) ermittelt und mit den am Standort vorherrschenden drei Klimagrößen verknüpft. Als statistisches Modell wurden generalisierte additive Modelle (GAMs) verwendet. Die Artverbreitungsmodelle sind die Grundlage des Anbaurisikos, wie es beispielsweise im Bayerischen Standortinformationssystem BaSIS derzeit verwendet wird (Taeger & Kölling 2016).

**2 Konzept zur multikriteriellen Bewertung der Trockenheitsresistenz der fünf Nadelbaumarten**



Baumart	Rangsumme	Rang
Douglasie	356	1
Waldkiefer	203	2
Europäische Lärche	202	2
Weißtanne	190	3
Fichte	109	4

**3 Rangsummen der Vitalitätsindikatoren und Ränge der fünf Nadelbaumarten hinsichtlich ihrer Trockenheitsresistenz**

## Wachstumsmodelle

Wachstumsmodelle verwenden die Oberhöhenbonität (englisch: SI = Site Index), um die Beziehung zwischen Wachstum und Umweltgrößen zu berechnen (Brandl et al. 2018). Die Eingangsdaten für die fünf Nadelbaumarten stammen aus deutschen, französischen und polnischen Waldinventurdaten (ca. 60.000 Inventurpunkte). Für die Wachstumsmodellierung wurden ebenfalls generalisierte additive Modelle (GAMs) verwendet.

## Überlebenszeitmodelle

Die Überlebenswahrscheinlichkeit der Baumarten lässt sich mit Hilfe von Überlebenszeitmodellen beurteilen. Dazu sind sich wiederholende Baumaufnahmen mit Informationen zum Baumalter (Altersklasse), der sozialen Position eines Baumes und die Ausscheideursache notwendig. Die Überlebenszeitmodelle für die fünf Nadelbaumarten basieren auf europaweiten Level I-Daten und Level II-Daten von 2010 bis 2017 (ICP Forest 2018). Ergänzend wurden noch Aufnahmen seit 1994 aus der deutschen Waldzustandserhebung (bereitgestellt vom Thünen-Institut) verwendet. Überlebenszeitmodelle für die fünf Nadelbaumarten beruhen auf sogenannten »Accelerated Failure Time«-Modellen (AFT-Modelle), die zusätzlich das Baumalter bis zum Absterben des Baumes als Zeitvariable verwenden. Die Klimavariablen (Bio10, Bio11, Bio18) wirken verringernd oder erhöhend auf die Überlebenswahrscheinlichkeit (siehe auch Brandl et al. 2020).

## Jahrringmodelle

Mit den Jahrringmodellen wird die Jahrringsensitivität über die Jahrringschwankung von Bohrkerndaten beschrieben. Sie verwenden den Gini-Koeffizienten als Maß für die Heterogenität des Jahrringzuwachses. Eine hohe Heterogenität des Jahrringzuwachses verweist auf wiederholte Einbrüche im Zuwachs und ist ein Zeichen für erhöhten Stress der Bäume.

Der Gini-Koeffizient wird aus europäischen Bohrkerndaten der Internationalen Jahrringdatenbank (ITRDB) abgeleitet, die von 1950 bis 2000 einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren abdecken. Für die Douglasie wurden zusätzlich Douglasien-Bohrkerndaten der ITRDB aus dem Bereich der nordamerikanischen Küstenprovenienzen (nach Little Jr 1971) und 16 deutsche Standorte aus einer Studie von Thurm und Pretzsch (2016) verwendet.

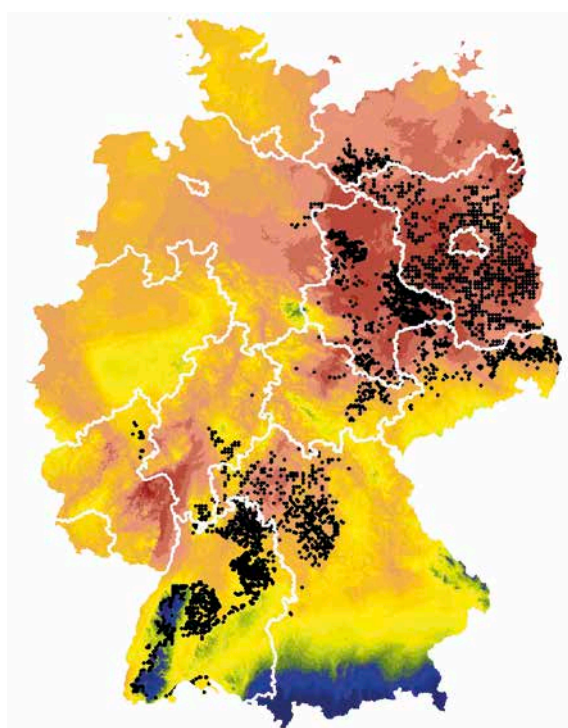
## Trockenheitsresistenz – Nadelbaumarten im Vergleich

Für einen Vergleich der Nadelbaumarten hinsichtlich ihrer Trockenheitsresistenz betrachten wir die Modellergebnisse am trockenen Rand des Klimagradienten, dem von uns gewählten »Trockenstressgradienten«. Dazu lassen sich die Mitteltemperatur im Sommer (Bio 10) und der Niederschlag im Sommer (Bio 18) als Klimatische Wasserbilanz (KWB) darstellen. Sie berechnet sich als Differenz von Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration (Verdunstung) in der Vegetationsperiode Mai bis September. Die Einschätzung der Trockenheitsresistenz der Baumarten erfolgt bei einem Wasserdefizit von  $-200 \text{ mm} \pm 12,5 \text{ mm}$  (Abbildung 2).

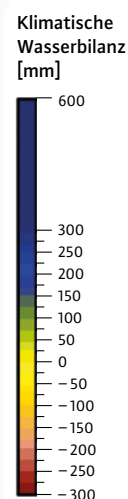
Allgemein zeigt sich, dass alle betrachteten Vitalitätseigenschaften bei zunehmender Trockenheit abnehmen (Abbildung 2). Bei näherem Vergleich der Baumarten schneidet die Douglasie insgesamt bei

trockeneren Bedingungen deutlich besser ab als die anderen Baumarten, insbesondere beim Wachstum. Lediglich bei der Überlebenswahrscheinlichkeit erreicht sie mittlere Werte. Die Fichte hingegen weist bei fast allen Vitalitätseigenschaften sehr niedrige Werte auf, insbesondere für die Überlebenswahrscheinlichkeit. Lediglich bei der Jahrringsensitivität erreicht sie den besten Wert. Die Europäische Lärche und die Waldkiefer zeigen nach der Douglasie eine vergleichsweise hohe Vorkommens- und Überlebenswahrscheinlichkeit; auch das Wachstum stellt sich erstaunlich hoch dar. Lediglich die Jahrringsensitivität der Lärche bewegt sich auf dem schwächsten Level. Die Weißtanne bewegt sich am Trockenrand zumeist ähnlich oder etwas besser als die Fichte. Lediglich bei der Überlebenswahrscheinlichkeit zeigt sie wie die Douglasie einen Anstieg der Vitalität mit höherem Wasserdefizit – eine Unplausibilität, die eventuell an den wenigen Vorkommen der Tanne an ihrem Trockenrand liegt.

Für die Bewertung innerhalb eines Modellierungsansatzes erhält die Art mit dem höchsten Vitalitätswert 100 Punkte, die Art mit dem niedrigsten Vitalitätswert 0 Punkte. Die übrigen Arten werden entsprechend ihres Vitalitätswertes dazwischen eingeordnet. Für die Gesamtbewertung werden die einzelnen Punkte baumartenweise aufsummiert, wodurch sich folgende Reihung der Trockenheits-



**4 Die in Abbildung 2 dargestellten Kurven bilden einen existierenden Klimagradienten in Deutschland ab. Dieser läuft entlang der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode und besitzt eine vergleichbare Wintertemperatur um die  $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ .**



resistenz ergibt (Abbildung 3): Douglasie (1) > Waldkiefer, Europäische Lärche (2) > Weißtanne (3) > Fichte (4). Die Douglasie erreicht mit 356 von maximal 400 Punkten mit Abstand die höchste Rangsumme, gefolgt von Waldkiefer (203 Punkte) und Europäischer Lärche (202 Punkte). Die Weißtanne schneidet mit 190 Punkten ab und die Fichte weist im Vergleich die geringste Trockenheitsresistenz mit lediglich 109 Punkten auf.

### Fazit

Was ist nun die Quintessenz aus unserem Ranking? Weißtanne eher nicht und möglichst viel Douglasie? Primäres Anliegen dieser Studie war es, die Stärken und Schwächen der einzelnen Modellierungsverfahren an einem ausgewählten Set an Baumarten zu identifizieren. Die *Artverbreitungsmodelle* sind zur Vorhersage in ihrer Methodik recht robust und überzeugen uns durch sehr hohe Modellgüten für alle Baumarten. Sie beschränken sich allerdings in ihrer Aussage darauf, ob die Art vorkommt oder eher nicht. Besonders überzeugt haben uns für die Nadelbaumarten die *Wachstumsmodelle*. Sie erreichten eine vertretbare Modellgenauigkeit und tragen die forstlich höchst relevante Information der Wachstumserwartung. Die *Mortalitätsmodelle* und die *Jahrringmodelle* haben großes Potenzial, sind aber derzeit vor allem für gut mit Daten unterlegten Baumarten aussagekräftig (besonders Fichte und Waldkiefer). Längere Messzeitreihen der Waldzustandserhebung oder mehr Bohr-



5 Durch ihre hohe Wuchskraft des Stammholzvolumens werden Nadelbaumarten auch zukünftig einen wesentlichen Anteil des Holzabsatzes in Deutschland ausmachen. Es ist daher wichtig, ihr Trockenstresspotenzial zu kennen. Douglasie an der Waldklimastation Freising.

Foto: E. Thurm, LFOA-MV

kerndaten werden uns in Zukunft dabei helfen, auch diese Methoden besser einsetzen zu können.

Doch auch wenn sich nicht alle Details mit letzter Sicherheit beantworten lassen, bilden die unterschiedlichen Vitalitätsmaße in der Zusammenschau eine sehr starke Evidenz für die Trockenheitsresistenz der fünf betrachteten Nadelbaumarten. Nicht verwunderlich zeigt die Fichte bei allen Modellen zusammengenommen die höchsten Vitalitätseinbußen am trockeneren Rand. Von den betrachteten Arten kommt die Douglasie gefolgt von Europäischer Lärche und Waldkiefer noch am besten mit höherer Trockenheit klar. Wie weit diese Resistenz im Klimawandel ausreicht, hängt letztlich stark von der Intensität des Klimawandels ab.

### Zusammenfassung

Wie unsere fünf wichtigsten Nadelbaumarten – Fichte, Waldkiefer, Weißtanne, Europäische Lärche und Douglasie – künftig mit Trockenstress zurecht kommen, wurde mit vier verschiedenen Modellansätzen untersucht. Basierend auf diesen Modellen wurde ein multikriterielles Konzept zur Baumartenbewertung entwickelt, das die fünf Nadelbaumarten anhand von den klimasensitiven Indikatoren a) Vorkommen, b) Wachstum, c) Überlebenswahrscheinlichkeit und d) Jahrringsensitivität hinsichtlich ihrer Trockenheitsresistenz bewertet. Die erstmalige Zusammenstellung einer solchen Vielzahl von Vitalitätsindikatoren bestätigt Literaturangaben, dass die Trockenheitsresistenz der betrachteten Nadelbaumarten in folgender Reihenfolge abnimmt: Douglasie, Waldkiefer und Europäische Lärche, Weißtanne und zum Schluss Fichte. Inwieweit diese Resistenz die zukünftige regionale Anbaufähigkeit der Arten in Bayern prägt, bestimmt in erster Linie die Intensität des Klimawandels.

### Autoren

Dr. Eric Thurm bearbeitete als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) das Projekt »Nischenmodelle« (B76) und ist inzwischen Leiter des Sachgebietes »Waldbau und Waldwachstum«, BT Forstplanung, Versuchswesen, Informationssysteme bei der Landesforst Mecklenburg-Vorpommern.

Susanne Brandl und Dr. Hagen Fischer sind ehemalige Projektmitarbeiter in der Abteilung »Boden und Klima« der LWF und haben die Projekte »Überlebenszeit-Wald-Klimawandel – SURVIVAL-KW« (C25) bzw. »Modellierung der zukünftigen potentiellen natürlichen Vegetation (z-pnV) in Bayern« (F5) bearbeitet.

Dr. Karl Heinz Mellert, Dr. Tobias Mette, Dr. Birgit Reger und Dr. Wendelin Weis arbeiten in der Abteilung »Boden und Klima« der LWF in den Bereichen Artverbreitungsmodellierung, Analog-Klimata und Wasserhaushalt.

**Kontakt:** Eric.Thurm@lfoa-mv.de, Karl.Mellert@lwf.bayern.de, Tobias.Mette@lwf.bayern.de, Birgit.Reger@lwf.bayern.de, Wendelin.Weis@lwf.bayern.de

### Literatur

- Brandl, S., 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), S. 739
- 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, S. 117652
- Dolos, K.; Bauer, A.; Albrecht, S. (2015): Site suitability for tree species. Is there a positive relation between a tree species' occurrence and its growth? *European Journal of Forest Research* 134 (4), S. 609–621
- Dyderski, M. K.; Paź, S.; Frelich, L. E.; Jagodziński, A. M. (2018): How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology* 24 (3), S. 1150–1163
- Fick, S. E.; Hijmans, R. J. (2017): WorldClim 2. New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12), S. 4302–4315
- ICP FORESTS (2018): ICP Forests online database. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. Online verfügbar unter [www.icp-forest.net](http://www.icp-forest.net), zuletzt geprüft am 06.08.2018
- Klein, T. (2015): Drought-induced tree mortality: from discrete observations to comprehensive research. *Tree Physiology* 35 (3), S. 225–228
- Little Jr, E. L. (1971): Atlas of United States trees. Volume 1. Conifers and important hardwoods. Miscellaneous publication 1146. US Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC, S. 9
- Mauri, A.; Strona, G.; San-Miguel-Ayanz, J. (2017): EU-Forest, a high-resolution tree occurrence dataset for Europe. *Scientific data* 4, S. 160123
- Taege, S.; Kölling, C. (2016): Standortinformationssystem BaSIS. AFZ-DerWald 71 (4), S. 10–13
- Thurm, E. A.; Brandl, S.; Fischer, H.; Mellert, K. H.; Mette, T.; Reger, B.; Weis, W. (2019): Trockenheits- und Hitzeresistenz der wichtigsten mitteleuropäischen Nadelbaumarten. In: Klädtke, J.; Kohnle, U. (Hg.): Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde. Jahrestagung 03.–05. 06. 2019, Zwiesel/Bayern, S. 73–85
- Thurm, E. A.; Pretzsch, H. (2016): Improved productivity and modified tree morphology of mixed versus pure stands of European beech (*Fagus sylvatica*) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) with increasing precipitation and age. *Annals of Forest Science* 73 (4), S. 1047–1061
- Thurm, E. A.; Hernandez, L.; Baltensweiler, A.; Ayan, S.; Raszto-vits, E.; Bielak, K.; Zlatanov, T. M.; Hladnik, D.; Balic, B.; Freuden-schuss, A.; Büchsenmeister, R.; Falk, W. (2018): Alternative tree species under climate warming in managed European forests. *Forest Ecology and Management* 430, S. 485–497
- Zang, C.; Rothe, A.; Weis, W.; Pretzsch, H. (2011): Zur Baumarten-eignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182 (5/6), S. 98–112