



Achim Bräuning, Annette Debel, Emily Collier, Steffen Höhnle, Thomas Mölg, Jan-Christoph Schubert, Bernhard Thieroff und Sibille Wehrmann

## BayTreeNet

### Sprechende Bäume als Schnittstelle von Klimadynamik, Dendroökologie und Bildung für nachhaltige Entwicklung in Bayern

Der Klimawandel wirkt sich bereits heute auf die Ökosysteme in Bayern aus. Meist werden in der Klimafolgenforschung jedoch die Auswirkungen von Klimavariablen wie Temperatur und Niederschlag, nicht jedoch die Veränderungen der Zirkulationsverhältnisse berücksichtigt, die sich in Änderungen von Frequenz und Intensität sogenannter Großwetterlagen (GWL) ausprägen. Die topographischen Verhältnisse üben dabei eine stark modifizierende Rolle auf deren Auswirkungen auf die Ökosysteme aus, beispielsweise durch das regional unterschiedliche Auftreten von Stau- und Regenschattenlagen bei unterschiedlichen Windrichtungen. Solche Zusammenhänge sind noch nicht ausreichend erforscht und werden auch von der Öffentlichkeit noch wenig wahrgenommen. Das interdisziplinäre Verbundprojekt BayTreeNet untersucht an einem Netzwerk von Wald-Untersuchungsstandorten über Bayern hinweg die Auswirkung unterschiedlicher GWL auf Waldökosysteme. Durch hoch aufgelöste Klimamodellierung werden Vorkommen und Häufigkeit von GWL in Vergangenheit und Zukunft modelliert sowie die Auswirkungen auf Baumwachstum und ökologisches Verhalten wichtiger Waldbaumarten mit verschiedenen dendroökologischen Ansätzen analysiert. Das Verständnis der Auswirkungen des Klimas auf Wälder von Schüler\*innen wird mithilfe von „talking trees“, also mit dem Internet verbundenen Bäumen gefördert, deren physiologische Reaktionen von den Schüler\*innen in einfache Sprachbotschaften übersetzt und gepostet werden. Dieser Lernprozess wird forschend begleitet und mündet in der Entwicklung eines Unterrichtsmoduls zu den Auswirkungen des Klimawandels.

Schlagwörter: **Klimawandel, Waldökosysteme, Bildungsforschung, Jahrringnetzwerk, Klimamodellierung, citizen science, interdisziplinärer Ansatz**

#### Der Einfluss des Klimawandels auf Waldökosysteme

Die Sommer seit dem Jahr 2000 waren ungewöhnlich häufig von trockenen Bedingungen gekennzeichnet, oft begleitet von starken Hitzewellen (BASTOS et al. 2020). Von diesen globalen und regionalen Klimatrends ist auch der Freistaat Bayern betroffen. Die Auswirkungen der erwähnten Dürrejahre machen sich bereits in erhöhter Baumsterblichkeit in bayerischen Wäldern bemerkbar. Einerseits durch direktes Absterben von Bäumen durch die Dürreereinwirkung, andererseits durch indirekte Folgen, da durch Trockenheit gestresste bzw. geschädigte Bäume eine geringere Widerstandskraft gegenüber Forstschädlingen und Krankheiten aufweisen. Im Zuge des Klimawandels werden verstärkt Witterungsextreme mit erhöhtem Temperatur- und Dürrestress erwartet (ESTRELLA/MENZEL 2013; TÖLLE et al. 2018), mit erheblichen negativen Auswirkungen auf die mitteleuropäischen und somit auch auf die bayerischen Waldökosysteme (FALK et al. 2013; LINDNER et al. 2014; LASCH-BORN et al. 2016; SEIDL et al. 2017; FISCHER et al. 2019). Die langjährigen Durchschnittswerte des

Klimas sowie extreme Witterungsereignisse werden durch das Auftreten und Veränderungen des atmosphärischen Zirkulationsgeschehens verursacht, das Luftmassen unterschiedlicher Herkünfte nach Europa führt. Die Zirkulation wird durch die Lage und Stärke von Hoch- und Tiefdruckgebieten gesteuert, welche dann in Europa für die Dominanz bestimmter Witterungssituationen verantwortlich sind, die als Großwetterlagen (GWL) bezeichnet werden. GWL können die Ausprägung der Klimavariablen am Boden über wenige Tage bis zu mehreren Wochen hinweg beeinflussen.

Untersuchungen zum Wachstumsverhalten von einheimischen Baumarten in Abhängigkeit von Klimatelementen existieren bereits in großer Zahl. Dabei werden Zeitreihen des Baumwachstums jedoch meistens mit monatlichen Mittelwerten von Temperatur und Niederschlag korreliert, wodurch die Kausalität zu den auslösenden GWL weitgehend verloren geht (SCHULTZ et al. 2015). Auch die Auswirkungen der Topographie, welche einen stark modifizierenden Einfluss auf das Wettergeschehen am Boden ausübt, bleibt meist unberücksichtigt. Bekannte Beispiele für den Einfluss der Topographie auf die lokalen Wetterverhältnisse sind der

Alpenföhn oder überdurchschnittlich hohe Niederschläge im Windstau von Höhenzügen sowie trockene Beckenlagen im Windschatten topographischer Hochgebiete. Diese regionalen Klimaunterschiede spiegeln sich in den vorherrschenden natürlichen Vegetationstypen und Waldgesellschaften wider (FISCHER et al. 2019), und sind auch bei Szenarios für künftige Klimaänderungen zu berücksichtigen, bei denen sich die Häufigkeiten und Eigenschaften wichtiger GWL und somit die dominanten Windrichtungen verschieben können.

Dies zeigt sich bspw. in den verbreiteten Annahmen, Klimawandel sei eher ein Problem in anderen

Regionen der Welt oder das eigene Leben werde, z.B. hinsichtlich gesundheitlicher Risiken, nicht beeinflusst sein (vgl. z.B. SCHULER 2009, BERGER et al. 2019). Auch im Rahmen der Umsetzung im Bereich der schulischen Bildung bestehen noch große Herausforderungen (vgl. z.B. REINFRIED/KÜNZLE 2019). Bzgl. des Themenfelds Klimawandel und Wald gaben BRÄUNING und KAMINSKE (2007) erste Anregungen zur Umsetzung von jahrringökologischen Themen, welche Auswirkungen von Klimaereignissen auf Bäume und Wälder für Schulen anschaulich machen. Mittlerweile stehen auch Videomaterialien zur Verfügung (z.B. CHERUBINI et al. 2020), jedoch sind

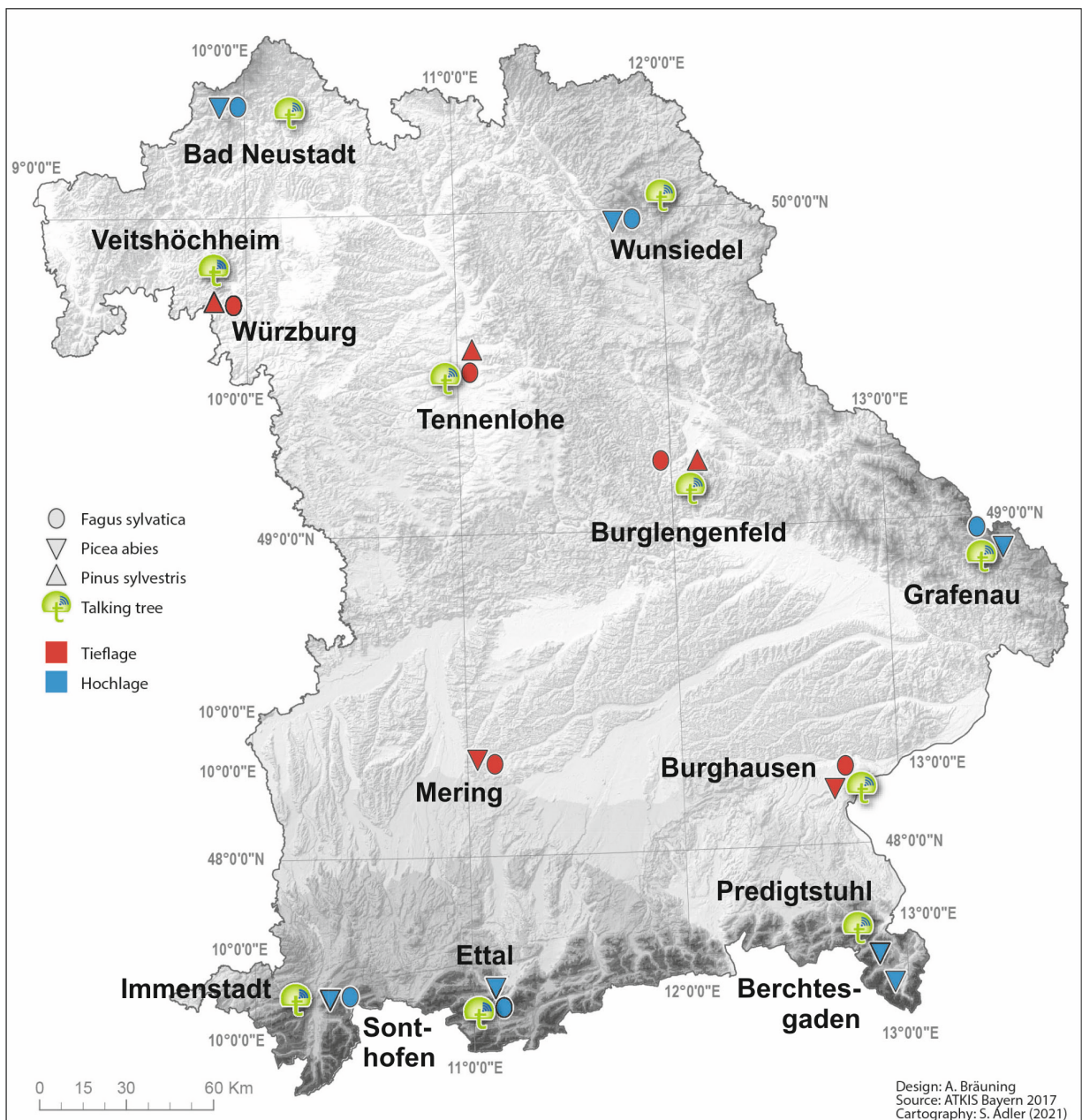


Abb. 1: Lokalitäten der Wald-Untersuchungsstandorte und der „talking trees“ über Bayern verteilt

viele dieser Angebote englischsprachig und nicht auf regionale Verhältnisse zugeschnitten. Hieraus ergibt sich ein dringender Bedarf, schulische Lernarrangements zu entwickeln, die sich nicht nur allgemein auf den Klimawandel, sondern auch regional und in Bezug auf die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf Wälder fokussieren. Hierbei ist nicht nur ein fundierter empirischer Ansatz zu verfolgen, der sich an der Wirksamkeit dieser Lernarrangements orientieren muss, sondern die veränderte (technisierte) Lebens- und Lernwelt der Schüler\*innen muss berücksichtigt werden (vgl. SCHOCK 2014, HÖHNLE 2014). Neue technische Möglichkeiten ergeben sich durch die Ausstattung baumphysiologischer Messsensoren für Stammwachstum und Saftfluss mit Sendern und die Darstellung von lokalen Wetterdaten mit gleichzeitig erhobenen Baumdaten in Echtzeit im Internet (STEPPE et al. 2016). Diese Möglichkeiten werden von BayTreeNet genutzt, um Verbindungen von bestimmten GWL und direkter Baumreaktion zu visualisieren, und somit das naturwissenschaftliche Verständnis für Zusammenhänge von Klima- und Ökosystemdynamik zu stärken. Gleichzeitig geht es darum, in einem interdisziplinären Ansatz die Wissenschaft mit „Öffentlichkeit“ im Sinne von „Citizen Science“ stärker zu verbinden. Das Konzept der Bildung für nachhaltige Entwicklung stellt einen wichtigen Rahmen für diese bildungsbezogenen Fragestellungen dar.

## Die Projektstruktur von BayTreeNet

Das Verbundprojekt BayTreeNet untersucht die Reaktionen von Waldökosystemen an Hoch- und Tieflagenstandorten auf die aktuelle Klimadynamik über den Freistaat Bayern hinweg. Ein Netzwerk von Untersuchungsstandorten wurde so gewählt, dass die Auswirkungen individueller GWL, die regionale Extremsituationen der Witterung zur Folge haben können, auf das Wachstum und die Ökophysiologie von jeweils zwei Hauptbaumarten für unterschiedliche Wuchsgebiete Bayerns erfasst werden. Um den Einfluss der topographischen Verhältnisse zu evaluieren, wurden die Standortslokationen so gewählt, dass für unterschiedliche Hauptwindrichtungen jeweils Standorte in Stau- und Regenschattenlage gelegen sind (Abbildung 1, Tabelle 1).

Die regional unterschiedlichen Wachstumsreaktionen werden an Wetterdaten der Gegenwart kalibriert, an Witterungsextremen des 20. Jahrhunderts validiert und anhand von

Tab. 1: Untersuchte Regionen und Baumarten. Die Standorte und Arten an den Wald-Untersuchungsstandorten sind normal, die an den „talking tree“-Standorten sind fett gedruckt. Hochlagenstandorte sind hell, Tieflagenstandorte sind dunkel hinterlegt. Zusammengehörige Standortspaare sind eingerahmt.

Region	Ort	Meeres höhe (m.ü.NN)	Baumart	Länge der Chronologien (Jahre)
Rhön	Bad Neustadt	821	<i>Fagus sylvatica</i>	1883–2019 (137)
		780	<i>Picea abies</i>	1969–2019 (51)
		235	<b><i>Alnus glutinosa</i></b>	
Mainfränkisch- es Becken	Würzburg	344	<i>Fagus sylvatica</i>	1906–2019 (114)
		350	<i>Pinus sylvestris</i>	1944–2019 (76)
	Veits- höchheim	210	<b><i>Quercus robur</i></b>	
Fichtel- gebirge	Wunsiedel	796	<i>Fagus sylvatica</i>	1968–2019 (52)
		794	<i>Picea abies</i>	1890–2019 (130)
		565	<b><i>Quercus petraea</i></b>	
Mittelfranken	Erlangen- Tennen- lohe	315	<i>Fagus sylvatica</i>	1935–2019 (85)
		324	<i>Pinus sylvestris</i>	1939–2019 (81)
		300	<b><i>Pinus sylvestris</i></b>	
Bayerischer Wald	Grafenau	995	<i>Fagus sylvatica</i>	1894–2019 (126)
		1002	<i>Picea abies</i>	1960–2019 (60)
		824	<b><i>Betula pendula</i></b>	
Oberpfälzer Becken	Burg- lengenfeld	420	<i>Fagus sylvatica</i>	1851–2019 (169)
		410	<i>Pinus sylvestris</i>	1939–2019 (81)
		390	<b><i>Pinus sylvestris</i></b>	
Berchtes- gadener Alpen	Berchtes- gaden	1065	<i>Fagus sylvatica</i>	1917–2019 (103)
		1450	<i>Picea abies</i>	1848–2019 (172)
	Predigt- stuhlbahn	1576	<i>Picea abies</i>	
Mühldorfer Schotterfeld	Burg- hausen	423	<i>Fagus sylvatica</i>	1943–2019 (77)
		420	<i>Picea abies</i>	1947–2019 (73)
		415	<b><i>Tilia platyphyllos</i></b>	
Ammergau- er Alpen	Ettal	964	<i>Fagus sylvatica</i>	1928–2019 (92)
		967	<i>Picea abies</i>	1932–2019 (88)
		886	<b><i>Fagus sylvatica</i></b>	
Allgäuer Alpen	Sonthofen	1195	<i>Fagus sylvatica</i>	1924–2019 (96)
		1183	<i>Picea abies</i>	1948–2019 (72)
	Alpsee- haus	730	<b><i>Aesculus hippocastanum</i></b>	
Lechfeld	Augsburg	550	<i>Fagus sylvatica</i>	1955–2019 (65)
		546	<i>Picea abies</i>	1932–2019 (88)



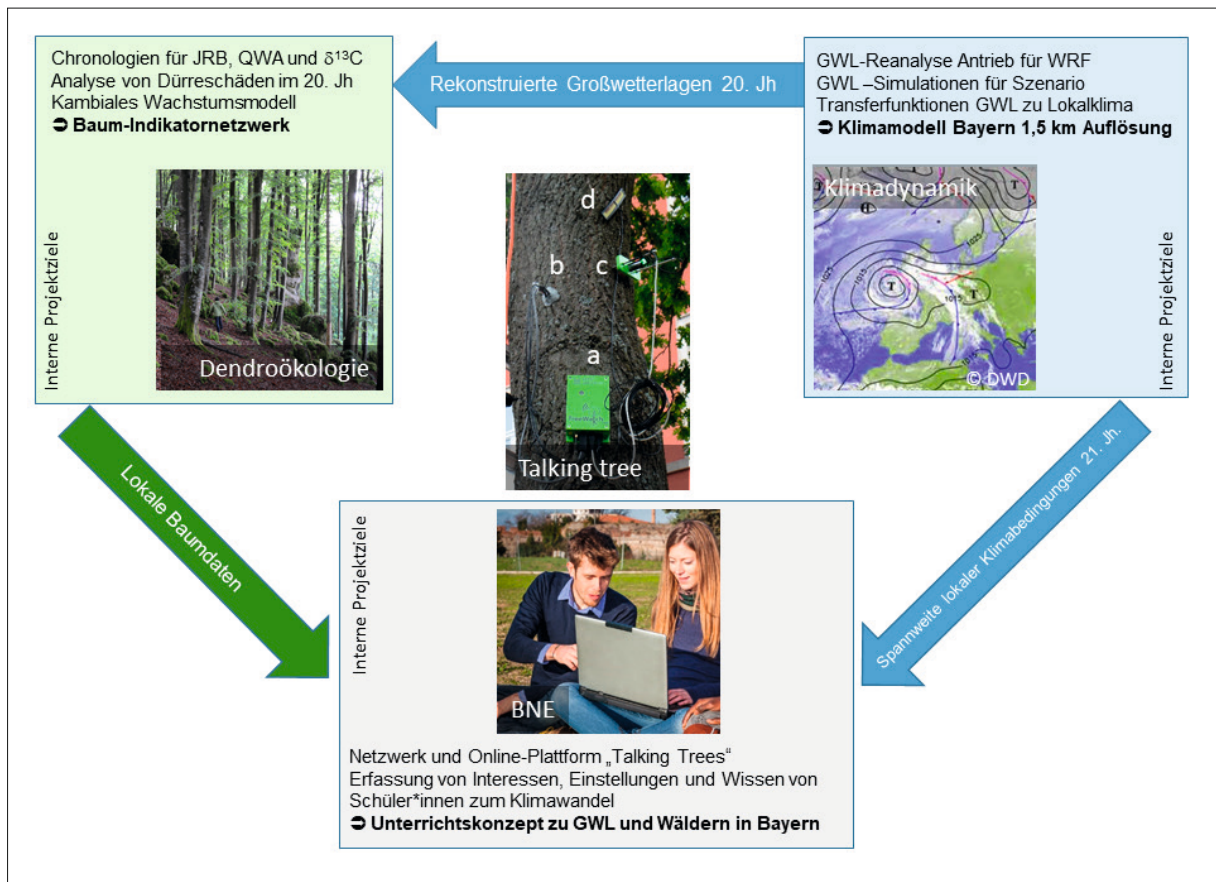


Abb. 2: Struktur des Verbundprojekts BayTreeNet. Ziele der Teilprojekte sind in den jeweiligen Boxen aufgeführt, projektspezifische Hauptziele sind fett gedruckt. Die Elemente des „Talking trees“ bestehen aus Datenlogger mit Sendemodul (a), Saftfluss-Messer (b), Dendrometer (c) und Antenne für den Empfang des Mobilfunksignals (d).

Klimamodellszenarios für das Ende des 21. Jahrhunderts projiziert. Somit entsteht ein Monitoring-Netzwerk, das es erlaubt, die Reaktion von Wäldern auf Änderungen der Frequenz und Eigenschaft bestimmter GWL zu quantifizieren und potenzielle Gefahren für die Vitalität betroffener Waldgebiete festzustellen.

Im Zentrum des Verbundprojekts, eine Schnittstelle zwischen den Teilprojekten „Dendroökologie“, „Klimadynamik“ und „Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)“ bildend, stehen die „sprechenden Bäume“. In jedem Untersuchungsgebiet wird ein Baum an einer für die interessierte Öffentlichkeit gut zugänglichen Stelle mit Messensoren für den Saftfluss und Änderungen des Stammdurchmessers sowie mit einer internetfähigen Übertragungseinheit ausgestattet (Abbildung 2), so dass die Baumreaktionen auf die lokalen Witterungsbedingungen in Echtzeit über das Internet abrufbar sind (<https://baytreenet.de>). Aufgrund logistischer Notwendigkeiten (Stromanschluss, geschützter Standort) konnte hierbei nicht auf die Auswahl bestimmter Baumarten geachtet werden. Im Gegenteil, die Verwendung unterschiedlicher

Baumarten bietet sogar einen Ansatz zum Vergleich von artspezifischen Wachstumsreaktionen auf identische Witterungsereignisse. Ein Netzwerk von Partnerschulen betreut diese „talking trees“ und übersetzt die Baumreaktionen auf die atmosphärischen Zirkulationsbedingungen in menschliche Sprachbotschaften (Abbildung 6 unten). Die Etablierung des Netzwerkes sowie die Entwicklung eines auf die „talking trees“ bezogenen Unterrichtskonzepts werden forschend begleitet. Mithilfe dieser technisch innovativen und motivierenden Instrumente wird Schüler\*innen und Öffentlichkeit die räumliche Wirksamkeit konkreter Klimaereignisse auf bayerische Waldökosysteme verdeutlicht.

Um die Gesamtziele des Verbundprojekts zu realisieren, musste sich jedes Teilprojekt zunächst interne Ziele definieren, die schließlich wieder zu integrieren sind. Die Gesamtstruktur des Verbundprojekts ist in Abbildung 2 veranschaulicht. Im Folgenden werden erste Ergebnisse aus den beteiligten Teilprojekten vorgestellt, und ein Ausblick auf die weiteren teilprojektinternen Arbeiten sowie Ansätze einer Synthese vorgestellt.

## Klimadynamik in Bayern in Gegenwart und Zukunft

Um die erwähnten GWL auszuweisen, was für Deutschland täglich vom Deutschen Wetterdienst (DWD) vorgenommen wird ([www.dwd.de](http://www.dwd.de)), dienen vor allem der beobachtete Luftdruck auf Bodenniveau sowie die großräumigen Strömungen über Europa in der mittleren Troposphäre. Für letztere blickt man etwa auf die Windfelder in einem Luftdruckniveau von 500 hPa, was circa 5 km Höhe entspricht. Auch wenn die GWL-Statistik für viele Jahrzehnte vorliegt und Europa eines der dichtesten meteorologischen Messnetze weltweit hat, ergeben sich für die Zielstellung unseres Projektes zwei Notwendigkeiten und daher zwei essenzielle Arbeitsschritte. Zum einen befinden sich etablierte Wetterstationen selten in der Nähe von Wäldern, das heißt die unmittelbaren, lokalen Wetterbedingungen an den Baumstandorten sind unbekannt. Zweitens reichen für den Blick in die Zukunft Messungen der

Vergangenheit nicht mehr aus, hierzu wird die Hilfe von globalen Klimamodellen benötigt.

Die lokalen klimatischen Bedingungen an den Baumstandorten (Arbeitsschritt 1) konnten inzwischen mit einer räumlich hochauflösenden regionalen Simulation bestimmt werden. Durch ein enges Rechengitter, mit dem sich alle 1,5 km über Bayern hinweg der Zustand der Atmosphäre (vom Boden bis in die hohen Schichten) berechnen lässt, konnten COLLIER und MÖLG (2020) einen neuen Klimadatensatz für Bayern und die Zeitspanne 1987–2018 erstellen. Die aufwändige Rechnung erfolgte parallel auf 320 Prozessoren auf dem Supercomputer „Meggie“ des Regionalen Rechenzentrums Erlangen und lieferte 55 TB Klimadaten für Bayern. Abbildung 3 gibt ein Beispiel der neuen Möglichkeiten und nimmt den Hitzesommer 2003 in den Fokus. Als Vergleich dient das Jahr 2004, das in der Spanne 1987–2018 den statistisch mittleren Bedingungen nahekam. Das Jahr 2003 zeigt am höchsten und am tiefsten gelegenen Standort in unserem Messnetz nicht nur um  $\sim 4^\circ\text{C}$  höhere Tagesmaxima, sondern vor allem häufige Extremtage im

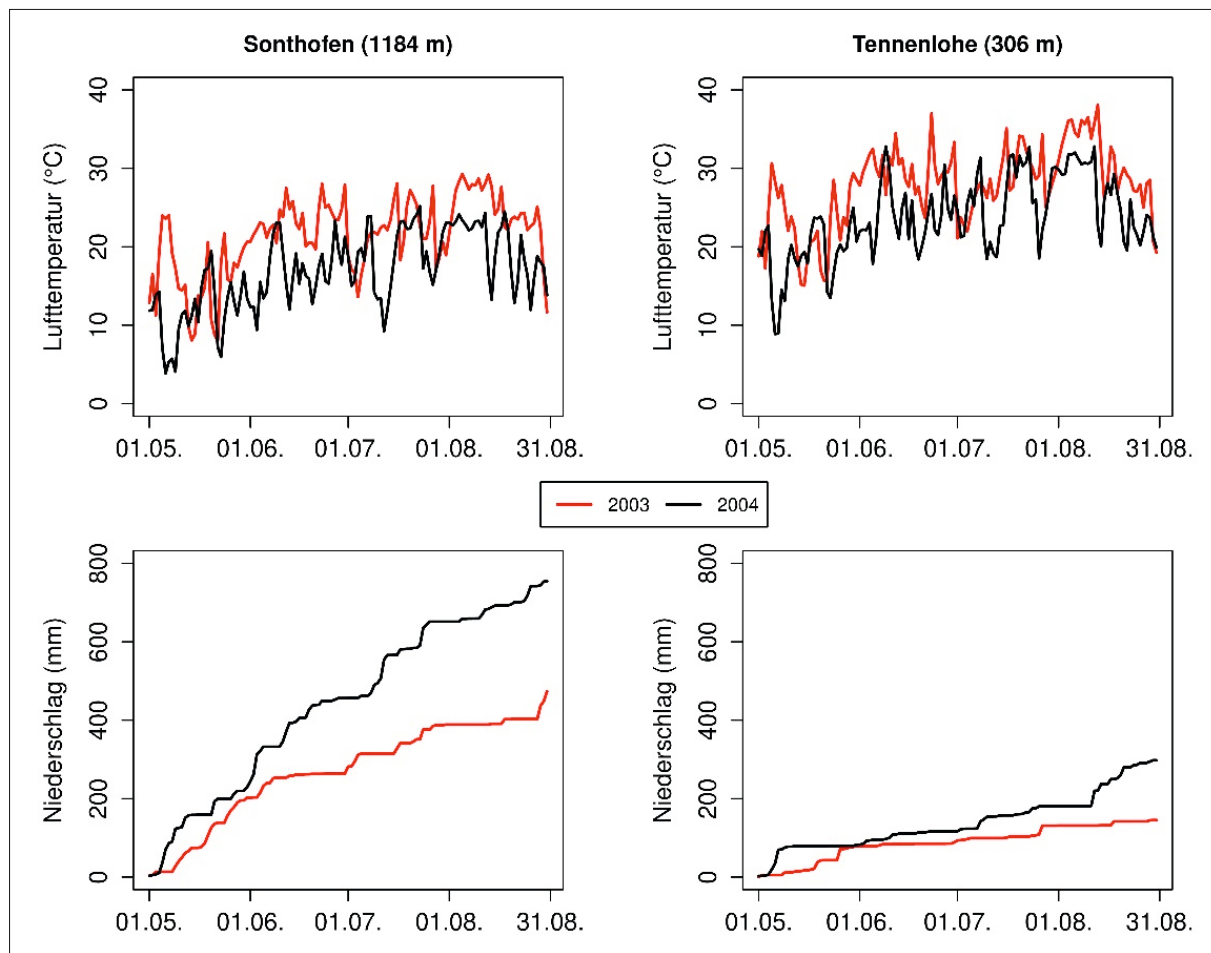


Abb. 3: Tägliche Temperaturmaximum (oben) und akkumulierter Tagesniederschlag (unten) zwischen 1. Mai und 31. August für zwei Baumstandorte in den Jahren 2003 und 2004. Werte aus dem Datensatz von COLLIER & MÖLG (2020).

Bereich 34–38°C und 25–30°C in Tennenlohe bzw. Sonthofen, die das nachfolgende Jahr nicht kannte. Beim Niederschlag tritt hervor, dass die Reduktion der Menge im Hitzejahr am hochgelegenen Standort absolut größer ist. Sie fällt allerdings in der tiefen Lage mit der Halbierung relativ deutlich stärker aus, was für physiologische Vorgänge des Baumwachstums zu berücksichtigen ist. Das Beispiel verdeutlicht, dass der neue Datensatz wertvolle Aufschlüsse zum lokalen Einfluss extremer Jahreszeiten bringen kann, die auf Anomalien in den GWL beruhen. Der Sommer 2003, aber auch jener im Jahr 2018, produzierten ihre Hitze und Trockenheit vor allem durch eine außergewöhnliche Persistenz von GWL. Dabei fiel auf, dass sich für diese Jahreszeit typische Hochdruckzentren (über den Azoren und über dem Norwegischen Meer) räumlich verlagerten und sehr stabile antizyklonale Bedingungen über West- und Mitteleuropa schafften, woraufhin Strömungen aus südlichen Richtungen die Dominanz erlangten (z.B. FINK et al. 2004; HOY et al. 2020).

Wie werden sich nun (Arbeitsschritt 2) die GWL über Europa und mögliche Extreme wie oben in Zukunft ändern? Globale Klimamodelle von großen Forschungszentren liefern dafür die Rahmenbedingungen, indem sie mit den möglichen anthropogenen Treibhausgasen und Landnutzungsänderungen der Zukunft gerechnet werden. Typischerweise werden aber in der Klimatologie und auch in der Klimafolgenforschung für solche Projektionen die Resultate möglichst vieler globaler Klimamodelle einbezogen, was meist zu einer beachtlichen Unsicherheit führt. In diesem Aspekt erwarten wir uns im Projekt einen Fortschritt, in dem wir auf die kürzlich publizierte Studie von PICKLER und MÖLG (2021) zurückgreifen. Diese präsentiert einen Ansatz, wie man aus den vielen zur Verfügung stehenden globalen Klimamodellrechnungen jene filtern kann, die für eine bestimmte Region die höchste Zuverlässigkeit (evaluiert anhand des rezenten Klimas) zeigen. Diese Modellselektion und die Erkenntnisse aus dem neuen, hochauflösenden Datensatz für Bayern versprechen eine erhöhte Qualität für die Projektionen des Klimas an den Baumstandorten bis ins Jahr 2100. Bereits publizierte Studien zu den GWL Europas für das weitere 21. Jahrhundert weisen auf eine Zunahme extremer Jahreszeiten und antizyklonaler Wetterlagen im Sommer hin (z.B. ESTRELLA/MENZEL 2013; DE LUCA et al. 2019). Ob sich diese Muster bestätigen, wenn man sich ausschließlich auf die Klimamodelle mit höchster regionaler Zuverlässigkeit stützt (siehe oben), und vor allem wie sich die Muster an den zehn Baumstandorten äußern, wird das Teilprojekt Klimadynamik in den kommenden zwei Jahren im zweiten großen Arbeitsschritt erforschen.

## Dendroökologische Befunde zum Einfluss von Trockenjahren auf bayerische Waldökosysteme

Um Reaktionen der Bäume auf Veränderungen unterschiedlicher Klimavariablen zu erfassen, wird ein Multiparameteransatz verfolgt, d.h. es werden mehrere Holzparameter gemessen, die teilweise sehr spezifische Reaktionen auf Variationen der Temperatur, des Niederschlags, oder der Luftfeuchte dokumentieren. Hierzu wurden die weit verbreiteten und ökologisch wie ökonomisch wichtigen Baumarten Rotbuche (*Fagus sylvatica*), Fichte (*Picea abies*) und Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) ausgewählt. An allen Standorten wurden jeweils 15 Bäume pro Baumart untersucht. Ausgehend von den jahrgenau datierbaren Jahresringen wurden Jahrringbreiten-Chronologien erstellt, die zunächst vom biologischen Alterstrend der Bäume bereinigt wurden und zu dimensionslosen Index-Chronologien pro Baumart und Standort gemittelt wurden (COOK/KAIRIUKSTIS 1990). Hierzu wurde eine spline-Funktion mit 25 Jahren Filterbreite verwendet, dadurch werden langfristige Trends eliminiert, dekadische und hochfrequente Variationen, wie sie für die Analyse klimatischer Extremereignisse benötigt werden, jedoch erhalten. Anhand dieser Chronologien lassen sich Klima-Wachstumsbeziehungen ermitteln, aber auch klimatische Extremjahre identifizieren und die Dauer der Erholungsreaktion bis zum Wiedererreichen des vorherigen Wachstumsniveaus bestimmen (LLORET et al. 2011). Ausgehend von den jahrgenau datierten Jahrringserien lassen sich weitere Holzparameter analysieren, so die Variationen stabiler Sauerstoff- und Kohlenstoffisotope in der Zellulose des Holzes (MCCARROL/LOADER 2004), welche Aussagen über ökophysiologische Reaktionen auf den Wasserhaushalt der Bäume liefern. Ferner werden quantitative Veränderungen zellulärer holzanatomischer Variablen analysiert, wie Änderungen der Durchmesser der wasserleitenden Gefäße oder der Zellwanddicke, aus denen sich Anpassungen im hydraulischen Wasserleitungsvermögen von Bäumen ableiten lassen (SCHOLZ et al. 2013, SCHULDT et al. 2015, CARRER et al. 2016). Viele der erwähnten Parameter sind empfindlich für verschiedene Phasen der Wachstumsperiode und ergeben so in ihrer Gesamtschau ein wesentlich differenzierteres Muster von Baumreaktionen auf Witterungsereignisse, als die über die gesamte Vegetationsperiode integrierende Jahrringbreite.

Während die zeitaufwändigen isotopten- und holzanatomischen Analysen noch im Gange sind, können die bereits vorliegenden Jahrringbreiten-Chronologien für erste klimaökologische Analysen herangezogen werden. Ein Beispiel für eine Kombination



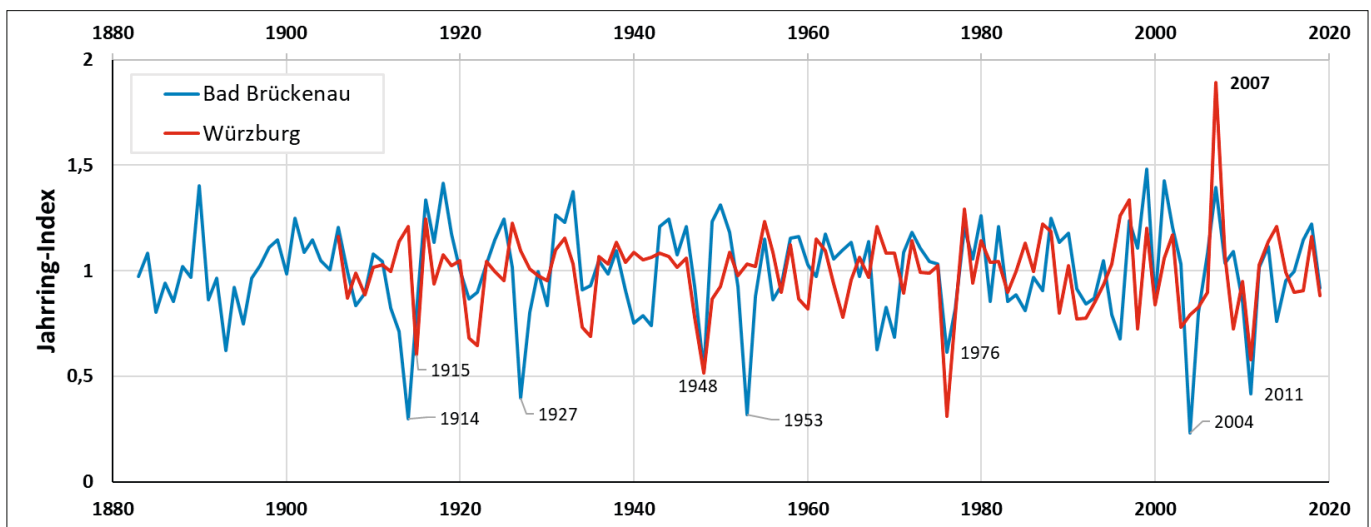


Abb. 4: Dimensionslose Indexkurven von Jahrringchronologien der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) an einem Hochlagenstandort (Bad Brückenau, blau) und einem nahe gelegenen Tieflagenstandort (Würzburg, rot). Lokale Weiserjahre mit extrem geringem oder breitem Zuwachs sind gekennzeichnet.

von Hoch- und Tieflagenstandort kann anhand der Rotbuchen-Chronologien der Standorte Bad Brückenau und Würzburg illustriert werden (Abbildung 4, Tabelle 1). In bekannten Trockenjahren der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, wie 1976 und 2011 zeigen die Rotbuchen beider Standorte synchrone Jahrringeinbrüche, während in anderen Jahren (z.B. 1953) nur Einzelstandorte betroffen sind. Typisch für die Rotbuche ist ein Einbruch der Jahrringbreite im Folgejahr nach einer Dürre, wie z.B. 1948 und 2004 (MEINARDUS et al. 2012, WALENTOWSKI et al. 2014). Interessant ist, dass die Zahl der Extremjahre am Hochlagenstandort keineswegs geringer ist als in der Tieflage, was auf die Anpassungsfähigkeit der Buche an die lokalen Klimaverhältnisse hindeutet (ZANG et al. 2014). Unter wärmer werdenden Klimabedingungen kann die Rotbuche im trocken-warmen Mainfränkischen Becken künftig jedoch an die Grenze ihrer Dürretoleranz kommen, was sich auf ihr künftiges Verbreitungsmuster auswirken wird (WALENTOWSKI et al. 2014; FISCHER et al. 2019).

Die intra-annuelle Zuwachsdynamik sowie kurzfristige Reaktionen des Stammumfangs auf Trockenereignisse, während denen die Wassergehalte im Stammholz abnehmen und die Gewebe zum Schwinden veranlasst werden, können mit elektronischen Dendrometern aufgezeichnet und klimatologisch sowie ökologisch analysiert werden (ZWEIFEL 2016; RAFFELSBAUER et al. 2019). Abbildung 5 illustriert das unterschiedliche Reaktionsmuster von Rotbuchen und Waldkiefern am mittelfränkischen Standort Erlangen-Tennenlohe während des Trockenjahres 2020. Nach kräftigen Niederschlägen am 11. Mai (17,5 mm), 13. Juni (35,1 mm), 30. August (41,7 mm), sowie vom 23.–26. September (insgesamt 40,1 mm,

Daten von der Wetterstation des ca. 5 km entfernten Flughafens Nürnberg) stiegen die Durchmesser der Bäume deutlich an, was auf Wasseraufnahme und Auffüllen der Wasserreserven in den Stammgeweben zurückzuführen ist. Zwischen diesen Zeiträumen, die weitgehend ohne Niederschläge waren, überwog die Transpiration der Bäume die Wasseraufnahme, was vor allem bei den Buchen mehrfach zu deutlichen Phasen des Stammschwindens führte, während die Kiefern weniger stark reagierten. Über die gesamte Wachstumsperiode hinweg zeigten die Kiefern den höheren Zuwachs, was die hohe Sensitivität für

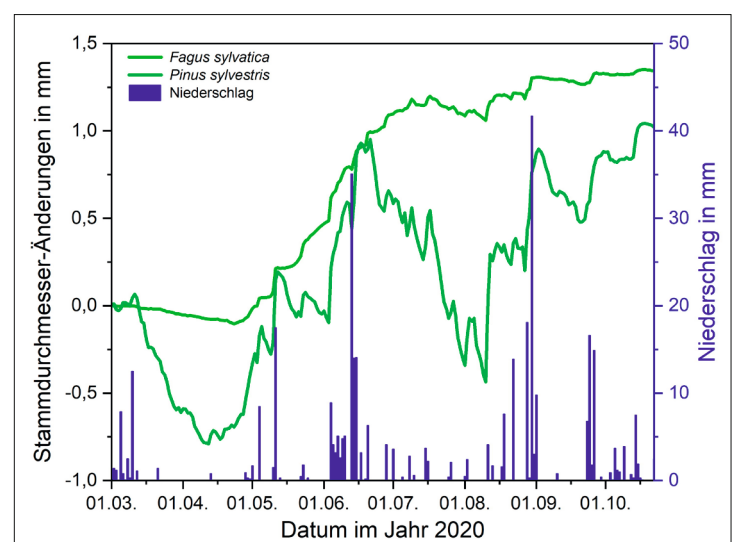


Abb. 5: Reaktionen von Stammdurchmesserschwankungen der Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) und der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) auf Niederschlagsereignisse im Trockenjahr 2020 am Standort Tennenlohe (Mittelfranken). Die Kurven stellen Mittelwerte von jeweils fünf Individuen pro Art dar.

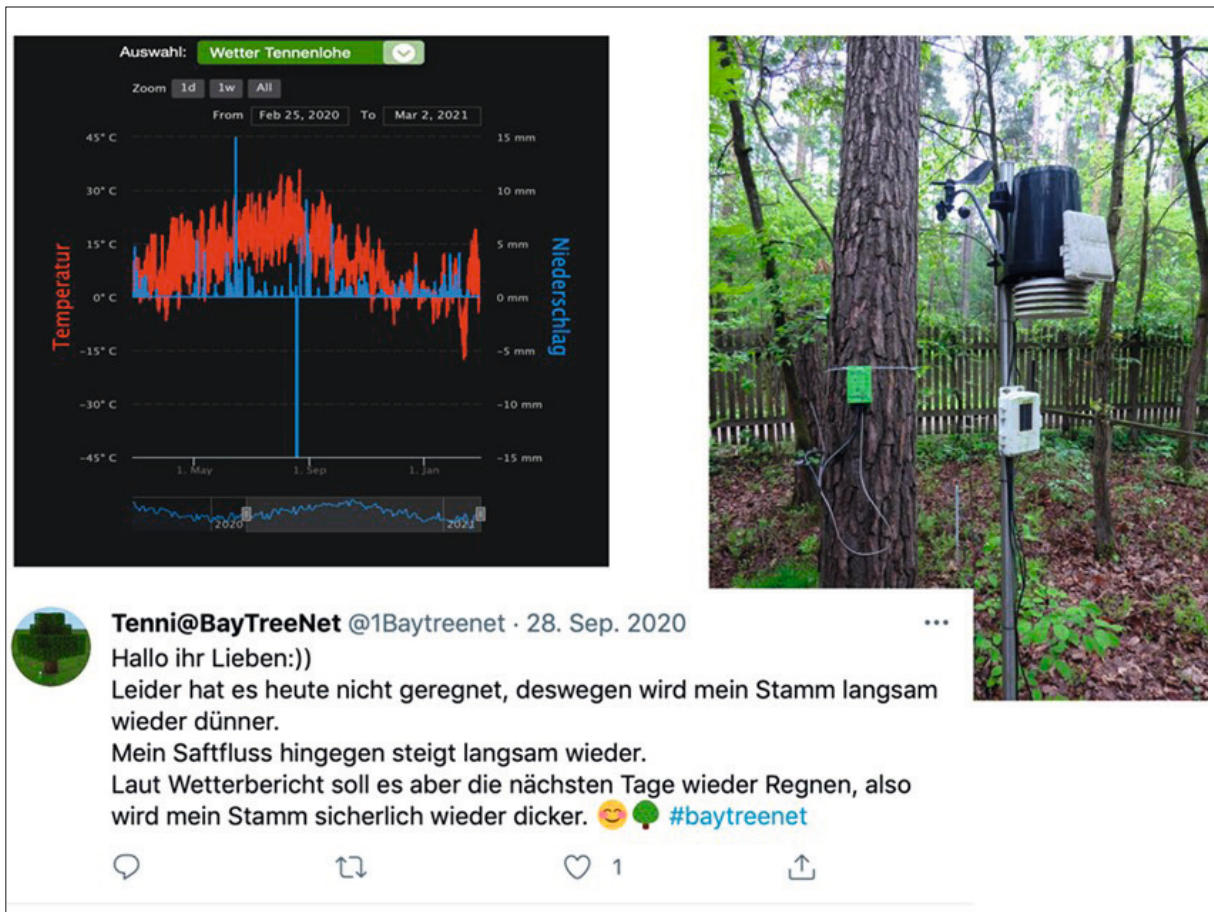


Abb. 6: Standortsspezifische Wetterdaten auf der Website zum Projekt (<https://baytreenet.de>), Beispiel einer Twitter-Nachricht eines Talking Tree, mit Messinstrumenten „verkabelter“ Talking Tree in Erlangen-Tennenlohe.

Trockenheit an diesem niederschlagsarmen Standort unterstreicht. In Zukunft sollen die Zuwachsmessungen mit holzanatomischen Kambialanalysen gekoppelt werden (OLADI et al. 2011), um ein Wachstumsmodell zu erstellen, das auch in der Lage sein wird, das Vorkommen von Dürreperioden unterschiedlicher Länge zu unterschiedlichen Jahreszeiten auf das Baumwachstum artspezifisch zu modellieren (z.B. HE et al. 2018).

### Bildungsforschung unter dem Leitbild der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)

Das Teilprojekt „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ setzt die Arbeit der o.g. Teilprojekte im Bildungsbereich in wert. Dabei wird ein kombinierter Forschungs- und Entwicklungsansatz verfolgt. Basierend auf der Arbeit zu Zusammenhängen von GWL und Waldökosystemen in Bayern wird unter anderem ein Unterrichtskonzept für Schüler\*innen in Bayern entwickelt und forschend begleitet. Im

Unterrichtskonzept stehen die regional unterschiedlichen Auswirkungen von (durch den Klimawandel verändert auftretenden) GWL auf Waldökosysteme besonders in Bayern im Zentrum, da der Klimawandel bislang von Schüler\*innen weitgehend als „Fernthema“ angesehen wird (vgl. SCHULER 2009, HÖHNLE 2014). Es kommen dabei aktuelle Messdaten aus den anderen Teilprojekten zum Einsatz und werden unter Berücksichtigung der digital geprägten Lebenswelt der Schüler\*innen in den unterrichtlichen Kontext integriert. Dies erfolgt über eine Website zum Projekt, in die die Messdaten (Wetterdaten, baumspezifische Messdaten wie Saftfluss etc.) integriert sind, welche wiederum die Grundlage für diesbezügliche von den Schüler\*innen verfasste Twitter-Nachrichten sind (vgl. Abbildung 6). An dieser Anknüpfung an die veränderte Lebenswelt der Schüler\*innen respektive mehrwertorientierte Einbindung dieser mangelt es im Unterricht bislang häufig (vgl. EICKELMANN et al. 2019).

In der begleitenden Forschung werden die Wirkungen des Unterrichtskonzepts untersucht, unter anderem hinsichtlich Veränderungen im Wissensbereich und in der Motivation bzw. dem Interesse



Skala	Itemwortlaut	1	2	3	4	5
Handlung	(1) Welche Möglichkeiten ich persönlich habe, um den Klimawandel zu begrenzen, ...	.965				
	(2) Wie ich persönlich zum Voranschreiten des Klimawandels beitrage, ...	.865				
	(3) Welche Möglichkeiten ich im Alltag habe, mich an die Veränderungen durch den Klimawandel anzupassen, ...	.818				
	(4) Inwieweit meine alltäglichen Handlungen den Klimawandel mitverursachen, ...	.809				
	(5) Wie der Lebensstil in unserer Gesellschaft den Klimawandel verstärkt, ...	.673				
	(6) Was in Deutschland getan werden kann, um den CO <sub>2</sub> -Ausstoß zu reduzieren, ...	.648				
	(7) Welche Maßnahmen in Deutschland ergriffen werden können, um mit dem Klimawandel umzugehen, ...	.579				
räumliche Nähe	(8) Wie mein Heimatort vom Klimawandel betroffen sein wird, ...		1.084 <sup>a</sup>			
	(9) Inwieweit Deutschland von den Folgen des Klimawandels betroffen ist, ...		.773			
	(10) Durch welche Maßnahmen in meinem Heimatdorf zum Klimaschutz beigetragen werden kann, ... <sup>b</sup>		.733			
	(11) Durch welche Prozesse in meiner Heimatregion der Klimawandel verstärkt wurde, ...		.637			
	(12) Wie sich mein Wohnort durch Veränderungen vor dem Klimawandel schützen kann, ...	.308	.572			
	(13) Inwieweit der Klimawandel auch dort, wo ich wohne, hervorgerufen wird, ...	.352	.565			
globale Ursachen	(14) Was global gesehen am stärksten zum Klimawandel beiträgt, ...			.854		
	(15) Welche Länder weltweit besonders für den Klimawandel verantwortlich sind, ...			.722		
	(16) Welche Bereiche (z. B. Verkehr, Landwirtschaft, Industrie, ...) in Deutschland den größten Beitrag zum Klimawandel leisten			.550		
Messung / Methodik	(17) Wie die Kosten für Schutzmaßnahmen vor dem Klimawandel errechnet werden, ...				.834	
	(18) Wie nachgewiesen werden kann, dass Treibhausgase die Ursachen für den Klimawandel sind, ...				.640	
	(19) Mit welchen Methoden der CO <sub>2</sub> -Ausstoß gemessen wird, ...				.560	
	(20) Wie die Folgen des Klimawandels gemessen werden können, ...				.558	
globale Folgen	(21) Welche Folgen der Klimawandel für weit entfernte Länder mit sich bringt, ...					.745
	(22) Welche Folgen der Klimawandel für unsere Gesellschaft hat, ...					.671
	(23) Wo auf der Erde die Folgen des Klimawandels besonders stark spürbar sind, ...					.597
	rotierte Eigenwerte <sup>c</sup>	8.53	6.42	5.33	4.22	5.29
	aufgeklärte Varianz (in %) <sup>c, d</sup>	41.27	7.38	5.10	4.18	3.31
	Split-Half-Reliabilität	.923	.827	.804	.766	.820
	Cronbachs- $\alpha$	.925	.888	.824	.748	.821
	M (SD) Skala	4.71 (1.15)	4.30 (1.13)	4.61 (1.16)	3.69 (1.06)	4.47 (1.13)

Abb. 7: Mustermatrix der Promax-rotierten Maximum-Likelihood-Analyse sowie Reliabilitätskennzahlen und Mittelwerte der identifizierten Skalen (THIEROFF et. al 2021). Anmerkungen: Items im Originalwortlaut bei sechsstufiger likertartiger Skala mit Ausprägungen „...interessiert mich gar nicht“ (1) bis „...interessiert mich sehr“ (6); Ladungen < .30 werden nicht dargestellt; <sup>a</sup> Ladungen > 1 sind bei obliquen Rotationsmethoden möglich, da es sich um Regressionskoeffizienten, nicht um Korrelationen handelt (JÖRESKOG 1999); <sup>b</sup> Bei dieser Variable liegt eine Nebenladung auf einen weiteren, nicht interpretierbaren Faktor ( $\lambda = .474$ ) vor; <sup>c</sup>Die Berechnung erfolgte unter Ausschluss der (in dieser Tabelle nicht angeführten) aus den Skalen jeweils eliminierten Variablen; <sup>d</sup>vor Rotation (BÜHNER 2011).

der Schüler\*innen. Hierbei wird auf wesentliche Konstrukte der pädagogischen Psychologie (u.a. Interessenskonstrukt, Einstellungskonstrukt) fokussiert, zu denen themenspezifische Skalenmodelle entwickelt, empirisch validiert und anschließend zur grundlegenden Erhebung der Konstrukte bei bayerischen Schüler\*innen und bei der Evaluation des Unterrichtskonzepts eingesetzt werden (vgl. THIEROFF et al. 2021).

Für das Interessenskonstrukt liegt inzwischen ein Schüler\*innenfragebogen vor, der auf einem themenspezifisch entwickelten Skalenmodell basiert und der gegenwärtig bei Erhebungen an zahlreichen Schulen in Bayern zum Einsatz kommt (vgl. Abb. Skalenmodell). U.a. war es bei der Entwicklung eine Herausforderung, ein möglichst komprimiertes und damit in der Unterrichtspraxis einsetzbares Messinstrument zu erhalten, was, auch unter Inkaufnahme eines gewissen Informationsverlustes, eine themenbezogene Auswahl bzw. Priorisierung von aus der Literatur gewonnenen Kontexten (vgl. HEMMER et al. 2005) erforderlich machte.

Skala 1 (Handlung; Items 01 bis 07) umfasst den klimawandelbezogenen Handlungskontext sowohl auf individueller als auch gesellschaftlicher Ebene. Die Items 08 bis 13 bilden die Skala räumliche Nähe, die einen (sozial-)räumlich begrenzten unterrichtlichen Kontext des Klimawandels repräsentiert, bezogen auf die inhaltlichen Bereiche des Klimawandels allerdings durchaus ausdifferenziert ist. In Abgrenzung dazu kommen die eher globalen Ursachen des Klimawandels in Skala 3 (Items 14 bis 16) zum Ausdruck. Skala 4 (Items 17 bis 20; Messung/Methodik) stellt den forschungsmethodischen Kontext des Klimawandels dar, ohne dabei die eigene, handelnd-aktive Anwendung naturwissenschaftlicher Arbeitsweisen durch die Schüler\*innen zu fordern. Skala 5 (Items 21–23) adressiert als Gegenstück zur Ursachen-Skala die globalen Folgen des Klimawandels.

## Synthese

Jedes der drei Teilprojekte im BayTreeNet-Verbund verfolgt eigene, individuelle Ziele (Abbildung 2), die im spezifischen Fachkontext bereits erhebliches Innovationspotenzial aufweisen und neue Ergebnisse zum Klimawandel und seinen Auswirkungen auf Wald-Ökosysteme in Bayern liefern. Ein fundamental neuer Aspekt ist jedoch die Einbindung der Schüler\*innen über eine längere Projektlaufzeit, so dass die beteiligten Schüler\*innen direkt am laufenden Prozess des Erkenntnisgewinns im naturwissenschaftlichen Teil des Projektes teilhaben können.

Die durch den Einsatz der entwickelten Messinstrumente und Wetterdaten gewonnenen Ergebnisse sollen zum einen grundlegende bildungsbezogene Erkenntnisse im Kontext des Klimawandels liefern. Auch der interdisziplinäre Charakter der Klimafolgenforschung kann hieran erfahrbar gemacht werden. Zum anderen fließen die Erkenntnisse wiederum in eine Überarbeitung des parallel dazu entwickelten Unterrichtskonzeptes ein, sodass ein empirisch fundiertes und in der schulischen Praxis erprobtes Unterrichtskonzept unter dem Leitbild einer Bildung für Nachhaltige Entwicklung herausgearbeitet werden kann. So soll ein Wissenstransfer in die Zivilgesellschaft über die in diesem Kontext besonders relevante Institution Schule ermöglicht werden. Schule im Besonderen und Bildung im Allgemeinen werden im Rahmen der Lösung von Problemen im Nachhaltigkeitskontext als Schlüssel angesehen, da man über die Institution Schule nicht zuletzt eine große Gruppe von Entscheidungsträger\*innen der Zukunft erreichen kann (vgl. *Die Bundesregierung* 2018, S. 20ff). Die jüngere Generation wird von den regionalen Folgen des Klimawandels in besonderem Maße betroffen sein, dennoch sind bei diesen künftigen Entscheidungsträgern bislang große Defizite insbesondere im Wissens- (Folgen des Klimawandels) und Einstellungsbereich (wenig eigene Bezüge zum Klimawandel) festzustellen (vgl. z.B. SCHULER 2009, SELLMANN 2011). BayTreeNet liefert für beide Aspekte ein einleuchtendes Beispiel und hat daher Potenzial, die Wahrnehmung und das Verständnis regionaler Klimafolgen zu vertiefen.

## Danksagungen

Das Projekt BayTreeNet wird im Rahmen des Forschungsverbunds Bayklif (<https://www.bayklif.de/>) vom Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert.

## Literatur

- BASTOS, A. et al. 2020: Direct and seasonal legacy effects of the 2018 heat wave and drought on European ecosystem productivity. In: *Science Advances* 6/24/, eaba2724. DOI: 10.1126/sciadv.aba2724.
- BERGER, A. et al. 2019: Wahrnehmung des Klimawandels durch die Bevölkerung und Konsequenzen für die Risikokommunikation. In: *Bundesgesundheitsblatt* 2019, 62: 612–619. <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02930-0>.
- BRÄUNING, A.; KAMINSKE, V. 2006: Dendrochronologie in der Schule – sinnvoll und möglich. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 59/8: 487–492.
- BRÄUNING, A.; KAMINSKE, V. 2007: Die Arbeit an Jahresringen. Dendrochronologie in der Schule. In: *Praxis Geographie* 7-8: 48–51

- BÜHNER, M. 2011: Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion. München: Pearson Studium.
- CARRER, M. et al. 2016: The imprint of extreme climate events in century-long time series of wood anatomical traits in high-elevation conifers. In: *Frontiers in Plant Science* 7: 683.
- CHERUBINI, P. et al. 2020: Dendrochronologia's tutoring recipes: How to take samples for small basic dendroecological studies. In: *Dendrochronologia* 64, 125774. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125774>.
- COOK, E.R.; KAIRIUKSTIS, L.A. (Hg.) 1990: *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- COLLIER E.; MÖLG, T. 2020: BAYWRF: a high-resolution, present-day climatological atmospheric dataset for Bavaria. In: *Earth System Science Data* 12: 3097–3112.
- DE LUCA, P. et al. 2019: Past and projected weather pattern persistence with associated multi-hazards in the British Isles. In: *Atmosphere* 10/10: 577.
- Die Bundesregierung. 2018: Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie.
- EICKELMANN, B. et al. (Hg.) 2019: ICILS 2018 #Deutschland. Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern im zweiten internationalen Vergleich und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking. Münster: Waxmann.
- ESTRELLA, N.; MENZEL, A. 2013: Recent and future climate extremes arising from changes to the bivariate distribution of temperature and precipitation in Bavaria, Germany. In: *International Journal of Climatology* 33/7: 1687–1695.
- FALK, W. et al. 2013: Bäume für die Zukunft: Baumartenwahl auf wissenschaftlicher Grundlage. In: *LWF aktuell* 94: 8–11.
- FINK, A. H. et al. 2004: The 2003 European summer heatwaves and drought—synoptic diagnosis and impacts. In: *Weather* 59/8: 209–216.
- FISCHER, H. et al. 2019: High resolution predictive modelling of potential natural vegetation under recent site conditions and future climate scenarios: Case study Bavaria. In: *Tuexenia* 39: 9–40.
- HE, M. et al. 2019: Simulated and predicted responses of tree stem radial growth to climate change—a case study in semi-arid north central China. In: *Dendrochronologia* 58, 125632.
- HEMMER, I. et al. 2005: Interesse von Schülerinnen und Schülern an geowissenschaftlichen Themen. Ergebnisse einer Interessenstudie im Rahmen des Projekts „Forschungsdialo System Erde“ unter besonderer Berücksichtigung des Geographieunterrichts. In: *Geographie und ihre Didaktik* 33/2: 57–72.
- HÖHNLE, S. 2014: Online-gestützte Projekte im Kontext Globalen Lernens im Geographieunterricht. Empirische Rekonstruktion internationaler Schülerperspektiven. Münster: Monsenstein und Vannerdat.
- HOY, A. et al. 2020: An endless summer: 2018 heat episodes in Europe in the context of secular temperature variability and change. In: *International Journal of Climatology* 40/15, 6315–6336.
- JÖRESKOG, K.G. 1999: How large can a Standardized coefficient be? Online: <http://www.statmodel.com/download/Joreskog.pdf>, (6. Juli 2020).
- LASCH-BORN, P. et al. 2016: Fire, late frost, nun moth and drought risks in Germany's forests under climate change. In: *Meteorologische Zeitschrift* 27/2: 135–148.
- LINDNER, M. et al. 2014: Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? In: *Journal of Environmental Management* 146: 69–83.
- LORET, F. et al. 2011: Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. In: *Oikos* 120: 1909–1920.
- MCCARROLL, D.; LOADER, N. J. 2004: Stable isotopes in tree rings. In: *Quaternary Science Reviews* 23/7–8: 771–801.
- MEINARDUS, C. et al. 2012: Reactions and recovery times of *Fagus sylvatica* after drought events derived from ring width and maximum latewood density. In: *TRACE – Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology* 10: 93–98.
- OLADI, R. et al. 2011: Seasonal dynamics of wood formation in Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) along an altitudinal gradient in the Hyrcanian forest, Iran. In: *Trees* 25: 425–433.
- PICKLER C.; MÖLG, T. 2021: GCM model selection technique for downscaling: Exemplary application to East Africa. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, in Druck.
- RAFFELSBAUER, V. et al. 2019: Tree circumference changes and species-specific growth recovery after extreme dry events in a montane rainforest in southern Ecuador. In: *Frontiers in Plant Science* 10. doi: 10.3389/fpls.2019.00342
- REINFRIED S.; KÜNZLE, R. 2019: Deutungsmuster des Klimawandels in Aussagen von Lehrpersonen und Konsequenzen für die Klima-Kommunikation im Unterricht. In: *Zeitschrift für Geographiedidaktik – ZGD*, 47/2: 45–59. doi: 10.18452/10.18452/20858
- SCHOCK, A.-C. 2014: Befragung von Schüler/innen der Sekundarstufe I zu Naturerfahrung und Geomedien im Kontext von Bildung für Nachhaltige Entwicklung. In: *Hildesheimer Geographische Studien* 3, Hildesheim: Selbstverlag des Instituts für Geographie, Universität Hildesheim.
- SCHOLZ, A. et al. 2013: How to quantify conduits in wood? In: *Frontiers in Plant Science* 4:56.
- SCHULER, S. 2009: Schülervorstellungen zu Bedrohung und Verwundbarkeit durch den globalen Klimawandel. In: *Geographie und ihre Didaktik* 37/1: 1–28.
- SCHULDT, B. et al. 2015: How adaptable is the hydraulic system of European beech in the face of climate change-related precipitation reduction? In: *New Phytologist* 210: 443–458.
- SCHULTZ, J.A. et al. 2015: Sensitivity of proxies on non-linear interactions in the climate system. In: *Scientific Reports* 5: 18560.
- SEIDL, R. et al. 2017: Forest disturbances under climate change. In: *Nature Climate Change* 7: 395–402.
- SELLMANN, D. 2011: *Umweltbildung zum Thema Klimawandel im botanischen Garten: Wissen, Einstellungen und Konzepte von Jugendlichen*. Bayreuth.
- STEPPE, K. et al. 2016: TreeWatch.net: a water and carbon monitoring and modeling network to assess instant tree hydraulics and carbon status. In: *Frontiers in Plant Science* 7: 993.
- THIEROFF, B. et al. 2021: Entwicklung und empirische Validierung eines kontextorientierten Skalenmodells zur Erfassung des Interesses von Schüler\*innen am Klimawandel. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, <https://doi.org/10.1007/s40573-021-00125-2>.
- TÖLLE, M.H. et al. 2018: Scale dependency of regional climate modeling of current and future climate extremes in Germany. In: *Theoretical and Applied Climatology* 134: 829–848.
- WALENTOWSKI, H. et al. 2017: Assessing future suitability of tree species under climate change by multiple methods: A case study in Southern Germany. In: *Annals of Forest Research*, DOI: 10.15287/afr.2016.789.
- ZANG, C. et al. 2014: Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: climatic drivers and levels of variability. In: *Global Change Biology* 20: 3767–3779.
- ZWEIFEL, R. 2016: Radial stem variations – a source of tree physiological information not fully exploited yet. In: *Plant, Cell and Environment* 39: 231–232.



**Abstract: BayTreeNet – Talking trees as interface between climate dynamics, dendroecology, and education for sustainable development in Bavaria**

Climate change is already affecting ecosystems in Bavaria. Climate impact research, however, mainly focuses on changes of climate variables like temperature and precipitation. In contrast, changes in the circulation patterns that are evident in changes in the frequency and intensity of weather types (GWL) are hardly considered. Topography may strongly modify the effects of climate on ecosystems, for example by regionally varying occurrence of flow blocking and rain shadow during the prevalence of different wind directions. Such relationships are still hardly studied and are hardly in the awareness of the broader public. The interdisciplinary bundle project BayTreeNet analyzes the effects of different GWL on forest ecosystems through a dendroecological site network over the state of Bavaria. Occurrence and intensity of GWL in the past and future are modelled using a high-resolution climate modelling approach. The response of tree growth and ecophysiological behavior of major forest tree species is studied using multiple dendroecological techniques. With the help of “talking trees” that send their growth and physiological reactions to the current weather conditions to the internet in real time, high-school students translate the tree responses into verbal messages. Thereby, the understanding of the students how climate affects ecosystem activity is improved. This learning process is analyzed to develop a teaching tool for high schools on effects of climate change.

**Key words:** climate change, forest ecosystems, education research, tree-ring network, climate modelling, citizen science, interdisciplinary approach

**Autor\*innen:** Prof. Dr. Achim Bräuning, achim.braeuning@fau.de; Annette Debel, annette.mueller@fau.de; Dr. Emily Collier, emily.collier@uibk.ac.at; Dr. Steffen Höhnle, steffen.hoehnle@fau.de; Prof. Dr. Thomas Mölg, thomas.moelg@fau.de; Prof. Dr. Jan-Christoph Schubert, jan.christoph.schubert@fau.de; Bernhard Thieroff, bernhard.thieroff@fau.de; Sibille Wehrmann, sibille.wehrmann@fau.de; Institut für Geographie der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg.