

Klimawandel in Bayern

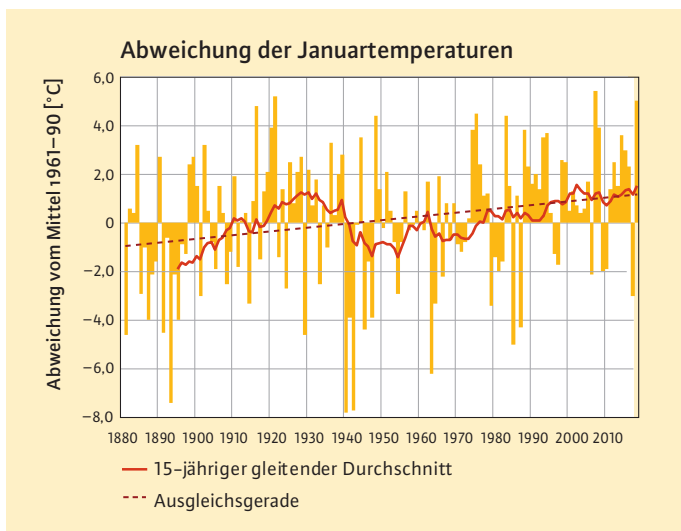
Sichtbar auch an Veränderungen im Wasserhaushalt an den Waldklimastationen

Lothar Zimmermann und Stephan Raspe

Der globale Klimawandel wirkt sich regional unterschiedlich aus. Neben Änderungen im Langzeitverhalten von meteorologischen Standardgrößen wie Lufttemperatur und Niederschlag sind für die Wasserversorgung der Wälder besonders komplexe Größen wie Transpiration und Trockenstress entscheidend, wie sie an den bayerischen Waldklimastationen abgeleitet werden.

Das Jahr 2017 hat wieder einige Klimarekorde aufgestellt (s. Beitrag Zimmermann & Raspe, S. 57 in diesem Heft). Und auch der Januar 2018 war abermals besonders warm. Er war der drittwärmste Januar in Bayern seit Beginn flächenhafter Messungen (Abbildung 2). Natürlich sind solche einzelnen Witterungsrekorde, wie auch andere Witterungsextreme, noch kein Nachweis des Klimawandels, doch ihre Häufung in den letzten drei Jahrzehnten spricht eine deutliche Sprache (Coumou & Rahmstorf 2012). Wir befinden uns schon voll im Klimawandel. Seit Ende der 1980er Jahre steigen in Bayern die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten der klimatologischen Referenzperiode (1961–90) deutlich erkennbar an (s. Beitrag Zimmermann & Raspe, S. 57 in diesem Heft). Doch was wissen wir über weitere, schon erkennbare Zeichen der Klimaänderungen in Bayern? Und was hat das alles mit dem Wasserhaushalt unserer Wälder zu tun?

2 Abweichung der mittleren Lufttemperatur für Bayern in den Jahren 1881–2018 vom Mittel der Jahre 1961–90 für den Monat Januar
(Quelle: DWD)



1 Die Waldklimastationen bestehen aus einer Bestandes- und einer Freilandmessstelle. Im Freiland werden z. B. wichtige Kenngrößen zu Wasserhaushalt, Globalstrahlung oder Verdunstung erhoben. Foto: S. Raspe, LWF



Lufttemperaturen nehmen zu

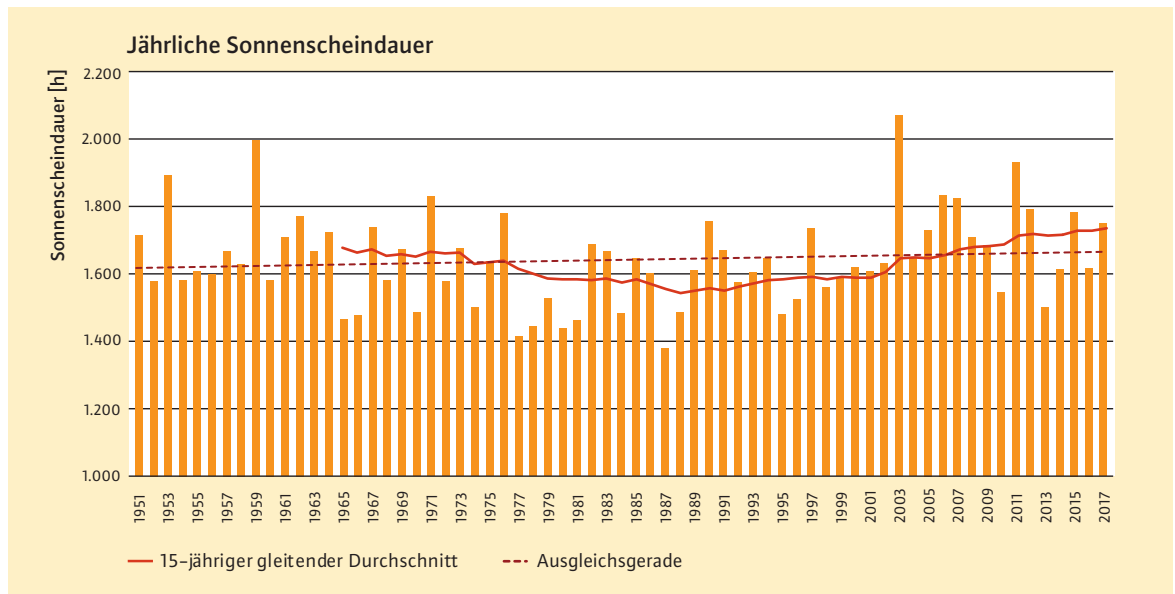
Dass die Klimaerwärmung nicht nur ein globales Phänomen ist, sondern uns ganz konkret auch in Bayern betrifft, zeigen deutlich die ansteigenden Trends der Lufttemperatur in den langen Zeitreihen von Klimastationen in ganz Süddeutschland (KLIWA 2016). Aktuell liegt die absolute Temperaturerhöhung aus den Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) flächenrepräsentativ für Bayern für den Zeitraum von 1881 bis 2017 bei +1,5 Grad (s. Beitrag Zimmermann & Raspe, S. 57 in diesem Heft). Schon in kürzeren Zeitreihen (1931–2015) zeigte sich dieser Erwärmungstrend (KLIWA 2016), so auch in den retrospektiv verlängerten Zeitreihen der Waldklimastationen (s. Beitrag Dietrich et al., S. 6 in diesem Heft).

Die Erwärmung ist in Bayern im hydrologischen Winterhalbjahr (November–April) stärker ausgeprägt (1,6° in 136 Jahren) als im Sommerhalbjahr (1,4° in 137 Jahren). In den letzten 15 Jahren zeigt sich allerdings, dass die Zunahme der Erwärmung im Vergleich zur klimatologischen Referenzperiode 1961–90 im Sommerhalbjahr vergleichbar hoch wie im Winterhalbjahr ist.

Wenn es wärmer wird, kann nach der Magnus-Formel – einer Näherungsgleichung zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks in der Luft – auch mehr Wasserdampf in der Atmosphäre aufgenommen werden. Kühlt die Luft dann wieder ab, kondensiert das Wasser und wird als Niederschlag abgerechnet. Man kann sich also die Wirkung der Klimaerwärmung allgemein als Beschleunigung des Wasserkreislaufs vorstellen.

Veränderungen des Niederschlags

Welche Erkenntnisse haben wir zur Entwicklung der Niederschläge in Bayern? Kommt es zu einer saisonalen Umverteilung zwischen Sommer und Winter? Ein Problem bei den Niederschlägen ist, dass ihre räumliche und zeitliche Variabilität deutlich höher ist als die der Lufttemperatur. Daher sollten längere Zeitreihen (>50 Jahre) betrachtet werden, um Änderungen detektieren zu können. Generell sind die Aussagen zur Entwicklung des Niederschlags nicht so sicher und eindeutig wie beim Erwärmungstrend.



3 Linearer Trend und gleitendes 15-jähriges Mittel der jährlichen Sonnenscheindauer in Bayern für die Jahre 1951–2017 Quelle: DWD

Insgesamt zeichnet sich jedoch ein zunehmender Trend der Jahresniederschläge in Bayern ab. Aus der Zeitreihe von 1881 bis 2017 der Rasterdaten des DWD ergibt sich ein zunehmender Trend von 10,3% bei der Jahressumme des Gebietsniederschlags in Bayern, wobei wegen der höheren Variabilität nicht die Signifikanzhöhe wie bei der Lufttemperatur erreicht wird. Auch für ganz Deutschland nimmt der Jahresniederschlag vergleichbar zu (Kaspar et al. 2017). Wichtig ist dabei, dass die Niederschläge vor allem im Winter zunehmen, während sie im Sommer praktisch unverändert bleiben. In Bayern nehmen die Winterniederschläge in der Periode von 1881 bis 2017 um 25% (bezogen auf das Mittel 1961–90) zu. Im Sommer ist dagegen nur eine Zunahme um 0,3% festzustellen. Vergleichbare Befunde existieren auch für andere Bezugszeiträume im Jahr wie beispielsweise für das hydrologische Winterhalbjahr, für das sich eine Zunahme der Niederschläge von 22% im Zeitraum von 1881 bis 2017 ergibt. Im hydrologische Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) sind die Niederschläge lediglich um 1,5% mehr geworden sind. Untersuchungen für größere Flusseinzugsgebiete in Süddeutschland mit aggregierten Gebietsmitteln für eine kürzere Zeitreihe (1931–2015) zeigen ein vergleichbares saisonales Muster: Zunahmen im Winterhalbjahr sowie kaum eine Änderung im Sommerhalbjahr (KLIWA 2016). Viele der retrospektiv verlängerten Zeitreihen

der Waldklimastationen bestätigen dieses Verhalten. Im Sommerhalbjahr kann es aber selbst bei wenig Änderung in der Niederschlagssumme durch einen veränderten Energiehaushalt zu einer Erhöhung der Verdunstung und somit zu einem steigenden Wasserbedarf der Pflanzen kommen.

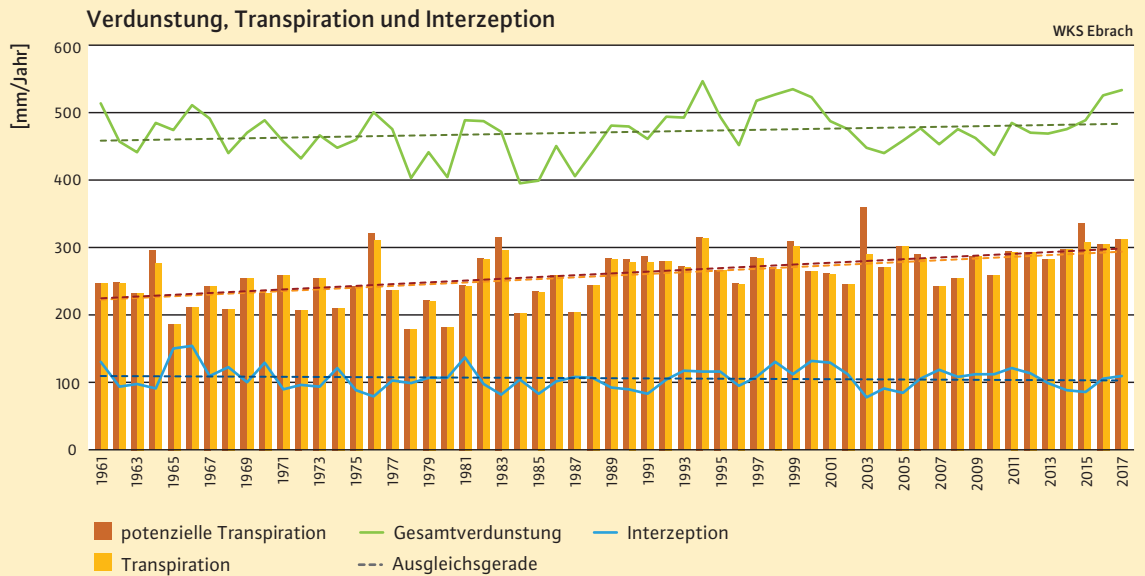
Solare Strahlung und Verdunstung

Neben dem Niederschlag ist die Verdunstung die zweite wichtige Größe im Wasserhaushalt. Sie macht in der Wasserbilanz Deutschlands etwa 62% des Niederschlags aus (Klämt 2008). Die Verdunstung verknüpft den Wasser- und Energiehaushalt der Erdoberfläche miteinander, da beim Übergang vom flüssigen zum gasförmigen Aggregatzustand Energie als Verdampfungswärme verbraucht wird und so zur Kühlung beispielsweise auch der Blatt- oder Nadeloberflächen beiträgt. Wenn der Wasserdampf dann wieder zu Regentropfen oder zu Eiskristallen kondensiert bzw. sublimiert, wird diese Energie wieder frei. Dieser unsichtbare Wärmetransport wird als *latenter Wärmetrom* bezeichnet und ist gleichbedeutend mit dem Massenstrom der Verdunstung. Der latente Wärmetrom und mit ihm auch die Verdunstung werden wesentlich dadurch bestimmt, wie viel solare Strahlung auf der Austauschoberfläche umgesetzt wird, sei es nun ein Acker, ein kurzgeschnittener Rasen oder das Kronendach eines Waldes.

Die solare Einstrahlung wird meist über ihren kurzwelligen Anteil – die Globalstrahlung – beschrieben. Bevor es moderne Strahlungsmesser gab, die die Globalstrahlung unter einer Glashalbkugel direkt messen, wurde aufgezeichnet, wie lange direkte Sonneneinstrahlung an einem Standort herrschte. Diese Messzeitreihen der Sonnenscheindauer reichen deutlich weiter in die Vergangenheit zurück, so dass man an ihnen auch mit Trendanalysen testen kann, ob eine Veränderung vorliegt. Die Sonnenscheindauer kann direkt in die Globalstrahlung umgerechnet werden.

Ob nun die Sonneneinstrahlung in Bayern zu- oder abgenommen hat, ist zur Zeit nicht mit Sicherheit zu beantworten. Zum einen zeigen Untersuchungen des DWD zum Langzeitverhalten der Globalstrahlung bzw. der Sonnenscheindauer für Süddeutschland im Projekt KLIWA an Stationszeitreihen zwischen 1951 und 2000 signifikant negative Trends der jährlichen Sonnenscheindauer (Klämt 2008). Andererseits ergeben eigene Auswertungen aktuell für Bayern flächendeckend vorliegender Werte des DWD für die Sonnenscheindauer eine geringe relative Zunahme von +3% im Zeitraum 1951 bis 2017, die allerdings nicht signifikant ist (Abbildung 3). Gerade solche Befunde zeigen, wie wichtig es im ablaufenden Klimawandel ist, möglichst aktuelle Datengrundlagen für die Trendanalyse zur Verfügung zu haben, um Veränderungen registrieren zu können, die sich aus dem Rauschen der klimatischen Variabilität herausheben.

4 Gesamtverdunstung, aktuelle sowie potenzielle Transpiration und Interzeptionsverdunstung eines 183-jährigen Buchenbestandes an der WKS Ebrach



5 Relativer Trend (Trendbetrag/Mittelwert der Zeitreihe) und Signifikanzmaße der Waldklimastationen Ebrach, Freising, Riedenburg und Würzburg

Verdunstungskomponente	Statistisches Maß	Ebrach	Freising	Würzburg	Riedenburg
Gesamtverdunstung	Relativer Trend [%]	5	-3	-8	5
	Signifikanz	n.s.	n.s.	**	n.s.
Transpiration	Relativer Trend [%]	13	5	4	3
	Signifikanz	****	***	***	*
potenzielle Transpiration	Relativer Trend [%]	13	6	4	4
	Signifikanz	****	***	n.s.	n.s.
Interzeption	Relativer Trend [%]	-1	-6	-9	-2
	Signifikanz	n.s.	*	****	n.s.
Bodenevaporation	Relativer Trend [%]	-17	-11	-17	1
	Signifikanz	****	***	****	n.s.

Signifikanz: Trendtest nach Mann-Kendall: ****: p > 99,9 %; ***: p > 99 %; **: p > 95 %; *: p > 90 %; n.s.: p < 90 %

Aus den negativen Trends der solaren Strahlung wurde für die Zeitreihe 1931–1997 für Süddeutschland noch ein Rückgang der potenziellen Verdunstung berechnet (Klämt 2008). Unter potenzieller Verdunstung versteht man die maximal mögliche Verdunstung, die sich nur aus dem Verdunstungsanspruch der Atmosphäre errechnet, ohne zu berücksichtigen, wieviel Wasser bei welcher Rauigkeit der Oberfläche und dadurch bei Wind mit welcher Turbulenz in die Atmosphäre aufgenommen werden kann. Dieser etwas überraschende Befund wurde mit längeren Zeitreihen (1891–2006) von einigen wenigen Stationen jedoch widerlegt, hier fanden sich langfristig signifikante Zunahmen der potenziellen Verdunstung (Klämt 2008).

Verdunstung in Wäldern

Aufgrund dieser sehr unterschiedlichen Befunde interessierte uns, welche Änderungen der Verdunstung und ihrer Komponenten wir an den Waldklimastationen sehen können. Hat die Klimaän-

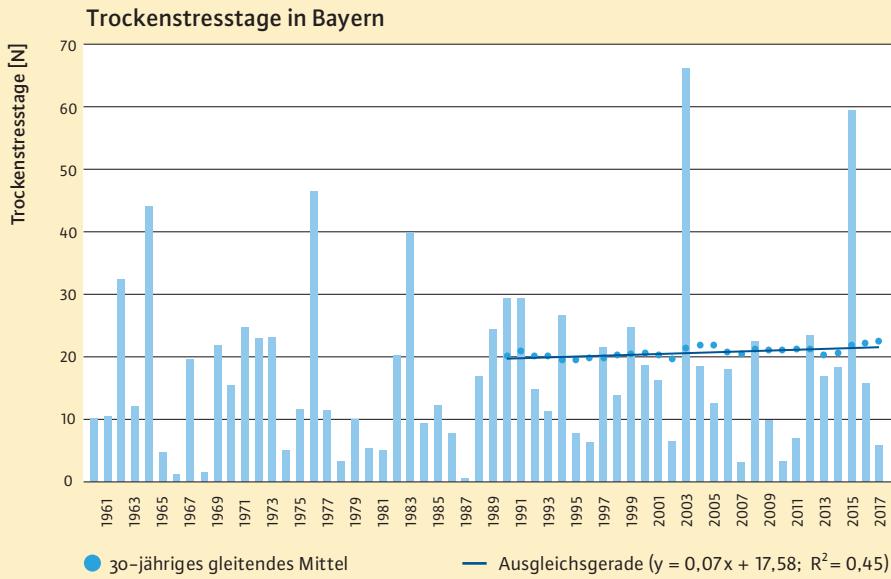
derung auch schon erkennbare Auswirkungen auf die Wasserversorgung der Wälder in Bayern? Um diese Frage zu beantworten, haben wir den Wasserhaushalt für die Waldklimastationen mit dem Modell LWF-BROOK90 (Hammel & Kennel 2004) modelliert. Da Klimawirkungen nur in langen Zeitreihen zu verstehen sind, haben wir dazu die meteorologischen Messreihen der Waldklimastationen durch Regressionen mit Zeitreihen von nahegelegenen Stationen des Deutschen Wetterdienstes bis in die 1960er Jahre hinein verlängert und so die Verdunstung und damit auch die Wasserversorgung der Bäume berechnet.

Als erstes schauen wir uns die Transpiration über die Blätter der Bäume an. Dabei unterscheidet man zwischen der aktuellen Transpiration und der potenziellen Transpiration. Während die aktuelle Transpiration die Wassermenge bezeichnet, die die Bäume tatsächlich verdunsten, gibt die potenzielle Transpiration an, wieviel die Bäume hätte verdunsten müssen, um den atmosphärischen Ver-

dunstungsanspruch zu erfüllen. Beispielfhaft werden hier zwei Buchen- sowie zwei Eichenstandorte in Nord- und Südbayern vorgestellt. Potenzielle wie auch die tatsächliche Transpiration zeigen einen deutlich zunehmenden Trend in der Zeitreihe 1961–2017 (Beispiel Buche, WKS Ebrach; Abbildung 4). Dies ist nicht nur in Ebrach, sondern an allen der vier untersuchten Laubwald-Waldklimastationen der Fall. Bei der tatsächlichen Transpiration ist dieser positive Trend auch in allen vier untersuchten Waldklimastationen signifikant (Abbildung 5). In Jahren mit Trockensommern wie 2003 und 2015, aber auch 1976 und 1983, wird Trockenstress im Sommer durch die gegenüber der aktuellen Transpiration höheren potenziellen Transpiration deutlich. Die Differenz zwischen potenzieller und tatsächlicher Transpiration ist auch ein Maß für den Trockenstress und wird beispielweise im digitalen forstlichen Standortinformationssystem BaSIS zur Charakterisierung des Wasserhaushalts verwendet.

Die passive Interzeptionsverdunstung, also die Evaporation von den benetzten Blatt- und Stammoberflächen, wie auch die Bodenevaporation nehmen tendenziell dagegen überall ab (Abbildung 5). Bei der Interzeption, die auch stark von der Art der Niederschläge bestimmt wird, könnte dies durch eine Verschiebung hin zu intensiveren Niederschlagsereignissen mit prozentual niedriger Interzeption verursacht sein.

Die Gesamtverdunstung weist je nach Verhältnis der Trends ihrer Teilkomponenten (Transpiration, Interzeption und



6 Anzahl der Trockenstresstage im Mittel aller Waldklimastationen von 1960 bis 2017 (Balken) sowie das gleitende 30-jährige Mittel (Punkte) und dessen linearer Trend (Linie) von 1990 bis 2017

Bodenevaporation) sowohl zunehmende wie auch abnehmende Trends auf (Abbildung 5). Insgesamt zeigt aber die überall zunehmende Transpiration bei mehr oder weniger gleichbleibender Niederschlagsmenge während der Vegetationszeit (siehe oben) ein zunehmendes Trockenstressrisiko an allen untersuchten Laubwaldstandorten an.

Mehr Trockenstresstage als früher

Dies zeigt sich auch an einer Zunahme der Trockenstresstage an den Waldklimastationen. Tage, an denen der pflanzenverfügbare Wasservorrat im Boden weniger als 40% der nutzbaren Feldkapazität beträgt, werden als Trockenstresstage bezeichnet. Da in der Klimatologie eine Periode von mindestens 30 Jahren zur Charakterisierung des Klimas herangezogen wird, haben wir zusätzlich das gleiten-

de dreißigjährige Mittel der Anzahl der Trockenstresstage für den Zeitraum von 1961 bis heute für jede Waldklimastation berechnet. Die mittlere Anzahl der Tage mit einer eingeschränkten Wasserversorgung der Wälder hat im Zeitraum von 1961 bis 2017 erkennbar zugenommen (Abbildung 6). Die durchschnittliche Anzahl der Trockenstresstage stieg seit 1990 bis heute um 1,9 Tage an. Nordbayern ist davon stärker betroffen als Südbayern (Abbildung 7). An den Waldklimastationen nördlich der Donau lag der Anstieg bei 2,7, südlich davon bei 1,1 Tagen. Die relativ geringe Anzahl der mittleren Trockenstresstage über alle Waldklimastationen hinweg darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass an trockeneren Standorten und in Extremjahren wesentlich häufiger Trockenstress vorkommt. So müssen beispielsweise die Kiefern an der

Waldklimastation Altdorf im Nürnberger Reichswald im Mittel an über 80 Tagen im Jahr mit einer eingeschränkten Wasserversorgung leben. Hier nahm in dem 27-jährigen Untersuchungszeitraum die Anzahl der Trockenstresstage auch besonders stark um fast neun Tage zu. Dagegen kommt in den Alpen oder Mittelgebirgen normalerweise kein oder nur sehr selten Trockenstress vor. In Jahren mit extrem wenig Niederschlag während der Vegetationszeit und hohen Temperaturen nimmt die Anzahl an Trockenstresstagen allgemein zu. Besonders deutlich wird das an den Extremjahren 2003 mit im Mittel mehr als 66 Tagen, 2015 mit rund 60 Tagen und 1976 mit knapp 47 Tagen. Das bedeutet, dass in Extremjahren im Mittel aller Waldklimastationen die Bäume für eineinhalb bis über zwei Monate unter Trockenstress stehen können. Zur möglichen Zunahme von Extremereignissen lesen Sie auch den Artikel von Klemmt et al., S. 16 in diesem Heft.

Zusammenfassung

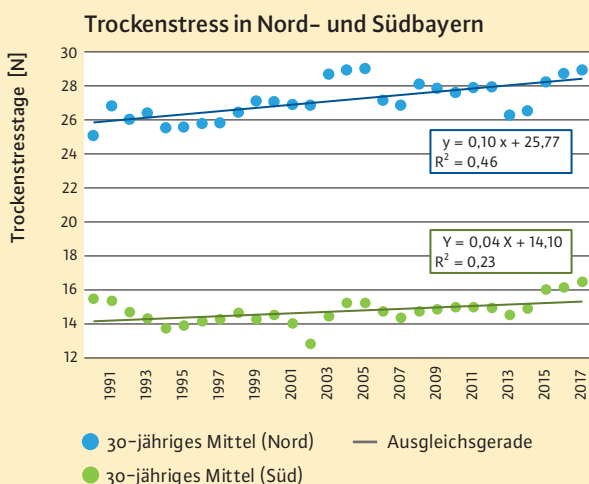
Seit Anfang der 1990er Jahre betreibt der Freistaat Bayern die Waldklimastationen. Durch die Verlängerung der gemessenen Klimazeitreihen in die Vergangenheit sind Änderungen im Langzeitverhalten wie der ansteigende Trend der Lufttemperatur und auch saisonale Änderungen beim Niederschlag (Zunahme im Winterhalbjahr) auf die Waldstandorte übertragbar. Die meteorologischen Zeitreihen werden unter Berücksichtigung von Bestand und Boden durch die Anwendung eines vorher überprüften Wasserhaushaltsmodells in Zeitreihen des Wasserhaushalts umgerechnet. Damit kann die Zunahme der Transpiration mit der Klimaerwärmung und damit auch des Trockenstress für die Bäume quantifiziert werden. Vor allem die Wälder in Nordbayern leiden zunehmend mehr unter Trockenstress als Wälder in Südbayern.

Literatur

Coumou, D.; Rahmstorf, S. (2012): A decade of weather extremes. Nature Climate change, doi:10.1038/nclimate1452
 Hammel, K.; Kennel, M. (2004): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Forstl. Forschungsberichte München185, 135 S.
 Kaspar, F.; Mächel, H.; Jacob, D.; Kottmeier, C. (2017): Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland. In: Brasseur, J., Jacob, Schuck-Zöllner (Hrsg.), Klimawandel in Deutschland. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, S. 17–26
 Klämt, A. (2008): Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Bericht 12; aufgerufen am 14.02.2018: http://www.kliwa.de/_download/KLIWAHeft12.pdf
 KLIWA (2016): Klimawandel in Süddeutschland. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring-Bericht 2016; aufgerufen am 14.02.2018: http://www.kliwa.de/_download/KLIWA_Monitoringbericht_2016.pdf

Autoren

Dr. Lothar Zimmermann und Dr. Stephan Raspe sind Mitarbeiter in der Abteilung »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.
Kontakt: Lothar.Zimmermann@lwf.bayern.de



7 30-jähriges gleitendes Mittel der Anzahl der Trockenstresstage im Mittel aller Waldklimastationen nördlich und südlich der Donau von 1990 bis 2017