

Standortfaktor Wasserhaushalt im Wald

Forschungsanstalten erarbeiten standortgerechte Darstellung des Wasserhaushalts im Klimawandel

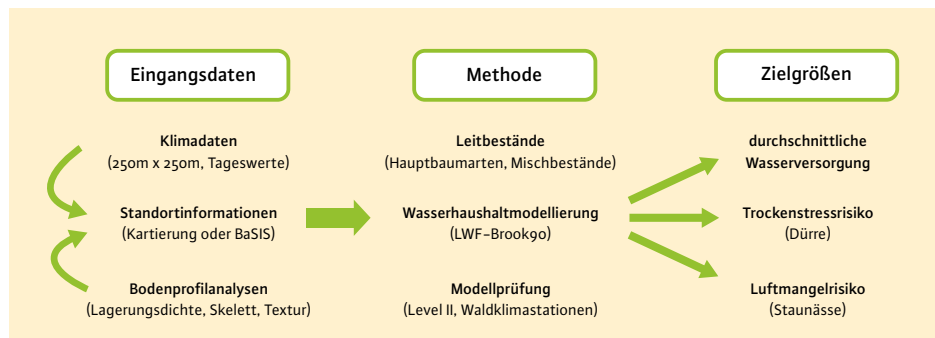
Wendelin Weis, Axel Wellpott und Wolfgang Falk

In weiten Teilen Deutschlands waren die Jahre 2018 und 2019 außergewöhnlich heiß und trocken. Die damit verbundenen Reaktionen der Waldbäume verdeutlichen die Bedeutung der Wasserversorgung für Wälder im Klimawandel. Ohne eine belastbare Einschätzung des Wasserhaushalts in Abhängigkeit von Klima und Boden ist die Beurteilung der Anbaueignung von Baumarten nicht möglich. Klimaveränderungen müssen dabei mit abgebildet werden können. Die LWF und andere forstlichen Forschungsanstalten erarbeiten deshalb eine objektive, dynamische und standortspezifische Darstellung des Wasserhaushalts im Klimawandel.

Von Anfang an erkannte die forstlichen Standorterkundung die Bedeutung des Standortfaktors Wasserhaushalt. Im dreistelligen Ziffernsystem der klassischen bayerischen Standortkartierung beschreibt die dritte Ziffer qualitativ Wassermangel und -überschuss in je fünf Stufen. Allerdings erfolgte die Umsetzung über mehrere Jahrzehnte hinweg und ist bayernweit nicht einheitlich. In jüngerer Vergangenheit wurde deshalb verstärkt an der Vereinheitlichung der Standortinformationen gearbeitet (Weis et al. 2018).

Das »Bayerische Standortinformationssystem« – einheitlicher Standard für Bayern

Als Alternative und Ergänzung erfolgte 2013 im Bayerischen Standortinformationssystem BaSIS erstmals eine bayernweit einheitliche Einschätzung des Wasserhaushalts im Wald über Wasserhaushaltsmodellierungen (Osenstetter et al. 2013). Zur Übertragung in die Fläche kamen statistische Verfahren zum Einsatz. Dargestellt wird ein Luftmangel-Index (Staubnässrisiko) und das mittlere sommerliche Wasserdefizit der Jahre 1971–2000 für die Beispielbaumart Fichte. Um neben der durchschnittlichen Wasserver-



1 Konzept zur bayernweit einheitlichen, objektiven und dynamischen Darstellung von Wasserhaushalts-Kenngrößen in Standortinformationssystemen

sorgung das Trockenheitsrisiko besser hervorzuheben und insbesondere flächgründige Standorte differenzierter darzustellen, erfolgten 2019 Experten-basiert entsprechende Korrekturen (Mette et al. 2019).

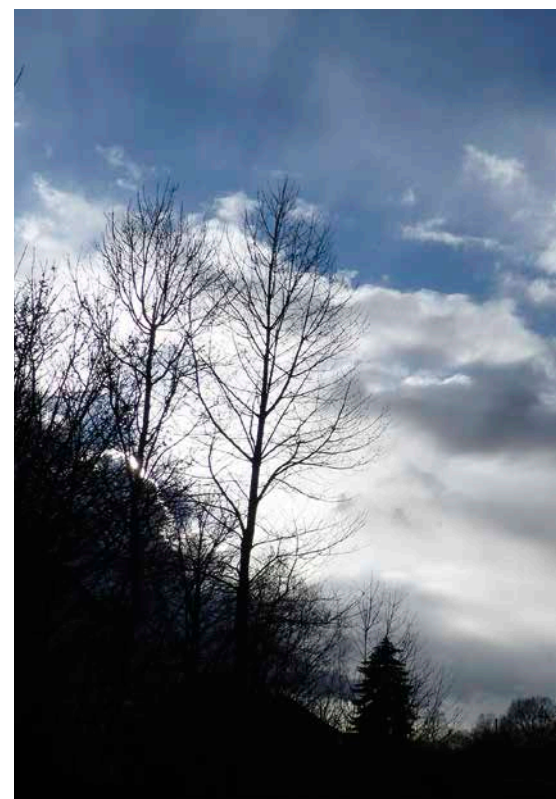
Projekt »Wasserhaushalt im Klimawandel«: wirklichkeitsnah, räumlich hochaufgelöst und dynamisch

Ebenfalls 2019 startete ein vom Waldklimafonds finanziertes Verbund-Projekt der forstlichen Versuchsanstalten in Freising, Göttingen und Freiburg, um methodische Schwächen des Ansatzes in BaSIS aus 2013 zu überwinden und das Vorgehen auch in der klassischen Standorterkundung zu etablieren. Ermöglicht wird dies durch nun zur Verfügung stehende zeitlich und räumlich hochaufgelöste Klimadaten und Klimaprognosen sowie die höheren Rechenleistungen im EDV-Bereich. Der Wasserhaushalt aller Standorteinheiten kann so direkt und ohne Umweg über statistische Verfahren mit Hilfe eines Wasserhaushaltsmodells berechnet werden. Durch optimale Umsetzung und Berücksichtigung von Klima, Lage und Boden im Modell soll eine Korrektur über Expertenwissen überflüssig werden.

2 Aus Gewitterwolken fällt nur zeitlich und räumlich eng begrenzt Niederschlag. Sie sind ein Beispiel, wie wichtig hochaufgelöste Klimadaten für die Güte einer standortspezifischen Wasserhaushaltsmodellierung sind. Foto: W. Weis, LWF

Das Konzept

Wasserhaushaltsmodelle wie LWF-Brook90 (Hammel & Kennel 2001) bauen vornehmlich auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten auf. So können Bodeneigenschaften (Lagerungsdichte, Korngrößenverteilung, Humusgehalt der Bodenhorizonte) mit Lageeigenschaften (Hangneigung, Exposition) und meteorologischen Messungen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlung, Windgeschwindigkeit, Niederschlag in täglicher Auflösung) zu explizit standortspezifischen Ergebnissen verknüpft werden.



3 Klassifizierung von Ergebnissen standortbezogener Wasserhaushaltsmodellierungen und Verschiebung der Häufigkeitsverteilung bei Klimaveränderung

* Transpirationseinschränkung 25% oder mehr

**Bundeswaldinventur

Wasserhaushaltsstufe	Anzahl von Trockenjahren* in 30 Jahren	Aufretenshäufigkeit an bay-erischen Punkten der BWI**	
		1971-2000	1981-2010
sehr frisch	0	37,0 %	32,6 %
frisch	1	13,6 %	16,6 %
ziemlich frisch	2 - 3	12,7 %	14,9 %
mäßig frisch	4 - 6	14,9 %	15,1 %
mäßig trocken	7-12	11,9 %	10,5 %
trocken	13-18	7,9 %	8,0 %
sehr trocken	19-30	2,0 %	2,3 %

Das prinzipielle Vorgehen zur objektiven, dynamischen und standortspezifischen Darstellung des Wasserhaushalts im Klimawandel (Abbildung 1) beinhaltet zunächst die Zuordnung nötiger Eingangsdaten zu den Standorteinheiten. Um den unterschiedlichen Wasserverbrauch wichtiger Baumarten (Fichte, Kiefer, Buche, Eiche) und Mischbestandstypen zu berücksichtigen, werden bayernweit repräsentative Leitbestände definiert. Die Modellparametrisierung wird an Flächen des intensiven forstlichen Umweltmonitorings kontrolliert und bei Bedarf verbessert. Anschließend erfolgt die Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen für die forstlichen Standorteinheiten – zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit zwischen den Standorten mit einheitlichen Leitbeständen. Im letzten Schritt findet eine Klassifizierung der Resultate statt. Die Informationen zu durchschnittlicher Wasserversorgung, Trockenstressrisiko und Luftmangelrisiko bei Staunässe werden so für den Forstpraktiker einfach, aber fundiert darstellbar. Karten und Abbildungen in geografischen Informationssystemen (GIS) sollen den Standort gemäß

seiner Beschreibung korrekt und baumartenspezifisch wiedergeben sowie die Darstellung unterschiedlicher Klimaperioden und Prognosezeiträume erlauben.

Treibende Kraft: hochaufgelöste Klimadaten

Jahres- und Monatswerte von Temperatur und Niederschlag können erste Anhaltspunkte über die Wasserversorgung im Wald geben. Um Trockenstress aber verlässlich zu quantifizieren, sind Angaben zur Intensität und Dauer heißer niederschlagsfreier Perioden nötig. Dies ist umso entscheidender, da gut etablierte Bäume durch intensive und oft sehr tief reichende Durchwurzelung des Bodens kürzere Trockenperioden bei geeigneten Standortverhältnissen ohne große Einschränkungen überstehen. Unter Umständen genügen auch in niederschlagsarmen Jahren wenige sommerliche Gewitter, um bei gut wasserspeichernden Böden Trockenstress zu verhindern. Hinzu kommt, dass im Wald, neben der Transpiration von Bäumen und Bodenvegetation, ein beachtlicher Teil der jährlichen Verdunstung durch das Verdampfen des im Kronenraum aufgefangenen Wassers, der sogenannten Interzeptionsverdunstung, erfolgt. Fällt kein Niederschlag, findet auch keine Interzeptionsverdunstung statt. Erst die Nutzung zeitlich hochaufgelöster Klimadaten zur Wasserhaushaltsberechnung erlaubt eine adäquate Beschreibung solcher Prozesse.

Zeitreihen meteorologischer Größen werden seit Langem vom Deutschen Wetterdienst (DWD) an vielen Stationen in Deutschland erhoben und mit bis zu stündlicher Auflösung zur Verfügung gestellt. Für Wasserhaushaltsmodellierungen ist für die meisten Fragestellungen eine tägliche Auflösung ausreichend. Unter Leitung der Professur für »Physische Geographie« der Universität Hamburg erfolgte in den letzten Jahren die Regionalisierung der Messdaten des DWDs über

geografisch gewichtete Regressionen im 250-m-Raster (Dietrich et al. 2019). Diese Daten berücksichtigen sowohl großräumige Klimaunterschiede als auch reliefbedingte Überprägungen, sind optimal für die Wasserhaushaltsmodellierung mit LWF-Brook90 geeignet und stehen für den Zeitraum 1961 bis 2018 auch für Bayern zur Verfügung. Demnächst werden zusätzlich eine Reihe von Klimaprojektionen bis zum Jahr 2100 in der gleichen räumlichen und zeitlichen Auflösung bereitgestellt, die eine Abbildung des Einflusses möglicher Klimaentwicklungen auf den Wasserhaushalt erlauben.

Der Boden als »Mediator«

Durch die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens können auch längere niederschlagsfreie Perioden ausgeglichen werden. Oft dient dabei als einfaches Maß die nutzbare Feldkapazität des Bodens, also diejenige Wassermenge, die weder schnell versickert noch in den Feinporen des Bodens so festgebunden ist, dass eine Wasseraufnahme durch Wurzeln unmöglich wird. Deterministische Wasserhaushaltsmodellierungen berücksichtigen aber zusätzlich, dass der Bodenwasserspeicher jährlich mehrfach und auch nur teilweise gefüllt und geleert werden oder nach trockenen Wintern bereits zu Vegetationsbeginn Defizite aufweisen kann. Außerdem wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers hin zu den Feinwurzeln mit abgebildet. Die Wasserleitfähigkeit im Boden ist stark vom Bodenwassergehalt abhängig und verringert sich während der Bodenaustrocknung um mehrere Größenordnungen. Damit nimmt sie entscheidend Einfluss auf die Transpirationseinschränkung. Die Beurteilung der Wasserverfügbarkeit am Standort kann so gegenüber einfachen Abschätzungen deutlich verbessert werden.

Wichtige Voraussetzung ist dabei die Verfügbarkeit der benötigten Bodeninformationen. Die Nutzung gemessener Eigenschaften von spezifisch den Standorteinheiten zugeordnete Bodenprofilen wurde in BaSIS bereits umgesetzt. Prinzipiell anwendbar und in Testregionen erprobt ist das Verfahren auch auf die Einheiten der klassischen Standortkartierung. Je besser zugeordnete Bodenprofile die Standorteigenschaften widerspiegeln, desto verlässlicher sind auch die aus Wasserhaushaltsmodellierungen abgeleiteten Aussagen zum Wasserhaushalt. Aktuell





4 **Bodeneigenschaften, die Speicherung und Verfügbarkeit von Bodenwasser positiv beeinflussen, helfen Bäumen, längere niederschlagsfreie Perioden unbeschadet zu überstehen.** Foto: Wendelin Weis, LWF

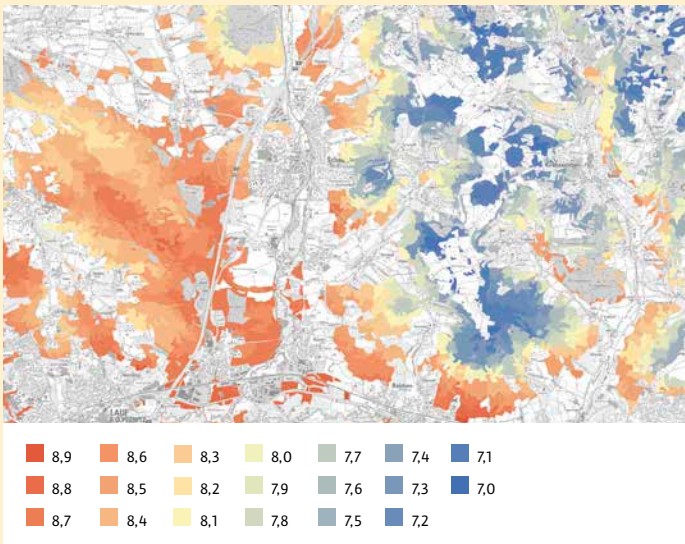
stehen dazu bayernweit etwas mehr als 2.000 Bodenprofile zur Verfügung, so dass die meisten Standorteinheiten charakterisiert werden können. In Einzelfällen ist eine Verbesserung der Datenbasis durch gezielte Bodenbeprobung jedoch sinnvoll.

Vorsicht vor einfachen Zusammenhängen

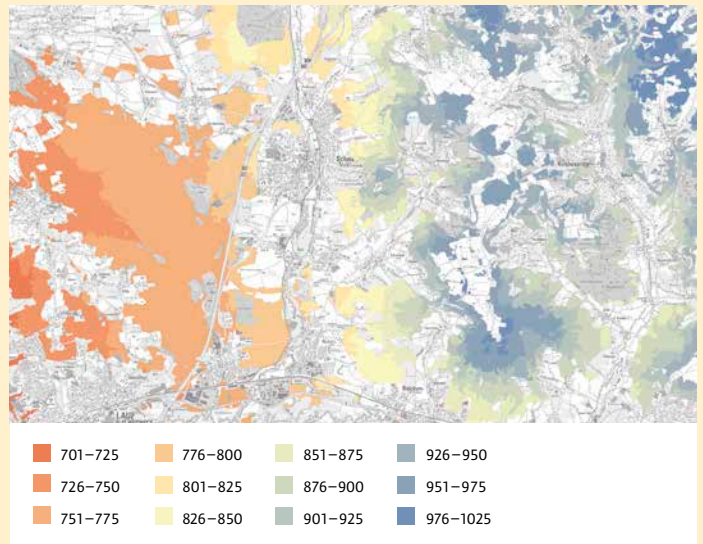
Ziel der Ergebnisinterpretation von Wasserhaushaltsmodellierungen ist es, die standörtlichen Besonderheiten des Wasserhaushalts zu charakterisieren. Dazu

müssen die Berechnungen zusammengefasst und sinnvoll für die Verwendung in der Forstpraxis klassifiziert werden. Ein Ergebnis der Wasserhaushaltsmodellierungen ist beispielsweise die tägliche Transpirationseinschränkung, die von 0 (uneingeschränkte Wasserversorgung) bis 100 Prozent (keine Wasseraufnahme möglich) reichen kann. Zur forstlichen Planung sind dagegen Informationen zur Häufigkeit und Intensität von Trockenereignissen über einen langen Zeitraum sinnvoll. In Abbildung 3 und in den Grafiken von Abbildung 5 wurde beispielsweise eine Klassifizierung gewählt, die für eine 30-jährige Klimaperiode die Anzahl von Jahren mit einer jährlichen

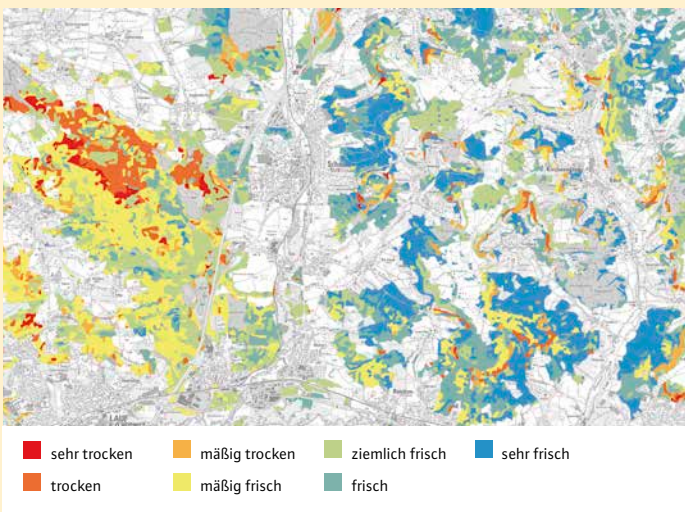
Jahresmitteltemperatur 1971–2000 [°C]



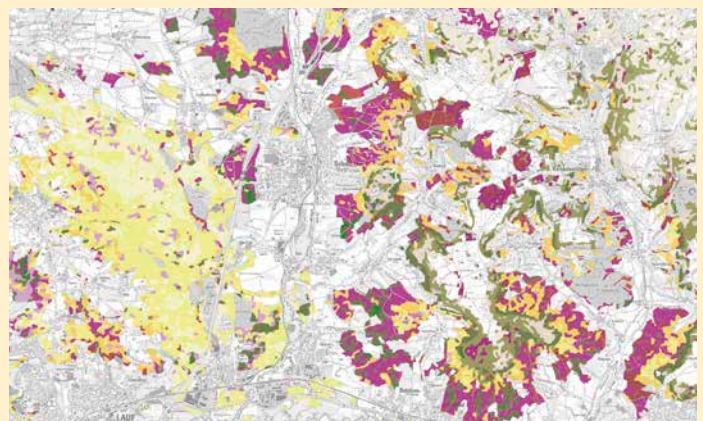
Jahresniederschlag 1971–2000 [mm]



Trockenstress Fichte 1971–2000



Substratgliederung der Standortkartierung



- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| Humuskarbonatboden | Tonlehm/milder Ton |
| Humusdolomitboden | strenger Ton |
| Sand | Schichtsand über Ton |
| schwach lehmig./schluffig. Sand | schluffiger Sand über Ton |
| sandiger Lehm | lehmiger Sand über Ton |
| Lehm | Schichtlehm über Ton |
| Schlufflehm/schluffiger Lehm | Schichtfeinlehm über Ton |
| Feinlehm | Schichtschluff über Ton |
| Kalkverwitterungslehm | Anmoor |
| Dolomitverwitterungslehm | Gewässer |

5 Klima, Boden und das aus Wasserhaushaltsmodellierungen abgeleitete Trockenstressrisiko bei Fichte für Wälder nordöstlich von Lauf an der Pegnitz

Transpirationseinschränkung für Fichte von mindestens 25 Prozent zählt. Am Beispiel ausgewählter Punkte in ganz Bayern wird auch der Einfluss bereits ablaufender Klimaveränderungen deutlich. Bereits die Verschiebung der Klimaperiode um zehn Jahre (1971–2000 zu 1981–2010) führt zu einer leichten Abnahme sehr frischer und einer Zunahme trockener und sehr trockener Standorte (Abbildung 3). Die Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Zielgrößen sind dabei nicht linear. Für Fichte ergibt sich ein deutliches Trockenstressrisiko erst ab Sommertemperaturen (Mittelwert Juni–August) von mehr als 16 °C, Sommerniederschlägen (Summe Juni–August) von weniger als 300 mm und/oder einer nutzbaren Feldkapazität bis 1 m Tiefe von weniger als 150 mm. Südexponierte Hanglagen erhöhen das Trockenstressrisiko.

Noch komplizierter gestaltet sich die Ableitung des Luftmangelrisikos durch Staunässe aus Ergebnissen der Wasserhaushaltsmodellierung. Hier ist die Definition von Schwellenwerten nötig, die Bodenwassergehalt und Luftmangel sinnvoll verknüpfen. Anschließend muss die Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit Luftmangel als Intensitätsmaß ermittelt und über die Auswertung mehrere Jahrzehnte in eine charakteristische Standorteigenschaft übersetzt werden. Eine Umsetzung in Bayern steht hier noch aus.

Die Umsetzung: räumlich hoch aufgelöst und anpassungsfähig

Abbildung 5 zeigt ein Anwendungsbeispiel für Wälder nordöstlich von Lauf an der Pegnitz. Standortkundlich findet hier ein Übergang von Sandsteinkeuper (westlich) über Feuerletten und Flugsande bis in die Substrate des Oberpfälzer Juras (östlich) statt. Temperatur und Niederschlag zeigen einen deutlichen West-Ost-Gradienten mit wärmeren und trockeneren Verhältnissen im Westen. Der modellierte Trockenstress für Fichte spiegelt diesen Klimagradienten gut wider. Gleichzeitig werden auch Bodenunterschiede detailliert aufgeschlüsselt. Reine Sande werden als trocken, schwach lehmige Sande als mäßig trocken bis mäßig frisch eingeordnet. Schichtböden auf Ton zeigen eine deutlich bessere Wasserversorgung. Die Tonböden der Feuerletten werden auf Grund ihres geringen durchwurzelbaren Porenanteils ebenfalls eher als trocken beschrieben. Im stark relief-

Standortfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel

Das Projekt WHH-KW soll die Wasserhaushaltsansprache in Standortkunde und Standortkartierung über deterministische Wasserhaushaltsmodellierung wirklichkeitsnah, räumlich hochaufgelöst und dynamisch in Bezug auf den Klimawandel abbilden. Die Ableitung und flächige Darstellung von Stressindikatoren des Wasser- und Lufthaushalts dienen zur Bewertung der aktuellen und zukünftigen Anbaueignung wichtiger Baumarten und sind Grundlage für eine risikoarme Forstwirtschaft.

Die Umsetzung erfolgt für die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche, Eiche – im Reinbestand sowie in forstlich relevanten Mischungen – und wird an die landesspezifischen Standortinformationssysteme der Projektpartner angepasst. Von der Universität Hamburg werden Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte räumlich explizit in täglicher Auflösung als Antriebsgrößen der Wasserhaushaltsmodellierung regionalisiert.

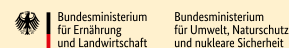
Förderkennzeichen: 22WK41410(1–4)

Laufzeit: 01.01.2019 – 31.12.2021

Projektpartner:

- Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Koordination)
- Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
- Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
- Universität Hamburg, Abteilung Physische Geographie

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



geprägten Jura sind niederschlagsreiche Kuppenlagen besser wasserversorgt. Vor allem für Humuskarbonatböden und Kalkverwitterungslehme mit oft eingeschränkter Wasserspeicherfähigkeit finden sich die trockeneren Standorte auf südexponierten Hängen. Der Vergleich verschiedener Klimaperioden ergibt eine ähnliche Verschiebung wie für die bayerischen Punkte der BWI in Abbildung 3.

Zusammenfassung

Um die forstliche Eignung von Standorten und Baumarten bei veränderten Klimabedingungen einschätzen zu können, ist eine objektive, dynamische, baumarten- und standortbezogene Beurteilung der Risiken von Trockenstress und Luftmangel nötig. Ermöglicht wird dies durch deterministische Wasserhaushaltsmodellierungen basierend auf räumlich und zeitlich hochaufgelösten Klimadaten und unter Nutzung der Informationen aus Boden- und Standortkartierung, digitalen Höhenmodellen und Bodenprofilanalysen. Aktuell umgesetzt wird dies in einem über Bundesmittel finanzierten Gemeinschaftsprojekt der forstlichen Forschungsanstalten in Freising, Göttingen und Freiburg (siehe Kasten). Bis Ende 2021 soll diese optimale Möglichkeit, die aktuelle und zukünftige Wasserverfügbarkeit und deren Einfluss auf die Bewirtschaftung von Wäldern darzustellen, im Bayerischen Standortinformationssystem BaSIS landesweit umgesetzt werden. Für die klassische forstliche Standortkartierung im Privat-, Kommunal- und Staatswald erfolgt aktuell eine Umsetzung für die Projektregion Nürnberger Land in Zusammenarbeit mit der Forstbetriebsgemeinschaft Nürnberger Land w. V., dem Verein für forstliche Standorterkundung e.V. und den Bayerischen Staatsforsten, die in Zukunft sukzessive ausgeweitet werden soll (interessierte Waldbesitzer und forstliche Vereinigungen können sich gerne bei den Autoren melden).

Für weitere Baumarten und Klimaprognosen ist das Verfahren noch nicht umgesetzt, dies soll aber zusammen mit der Ausweisung von Staunässestandorten über Wasserhaushaltsmodellierungen bis Ende 2021 im Rahmen des Waldklimafonds-Projekts »Standortfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel« (siehe Kasten) erfolgen.

Literatur

- Dietrich, H.; Wolf, T.; Kawohl, T.; Wehberg, J.; Kändler, G.; Mette, T.; Röder, A.; Böhrner, J. (2019):** Temporal and spatial high-resolution climate data from 1961 to 2100 for the German National Forest Inventory (NFI): Annals of Forest Science 76:6
- Hammel, K.; Kennel, M. (2001):** Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Forstliche Forschungsberichte München 185
- Mette, T.; Kolb, J.; Schuster, O.; Falk, W.; Klemmt, H.-J. (2019):** BaSIS – Wasserhaushalt wird bodensensitiver. LWF aktuell 120, S. 50–52
- Osenstetter, S.; Falk, W.; Reger, B.; Beck, J. (2013):** Wasser, Luft und Nährstoffe – alles, was ein Baum zum Leben braucht. LWF aktuell 94, S. 12–17
- Weis, W.; Weichinger, P.; Müller, K.; Schuster, O.; Klemmt, H.-J.; Göttlein, A. (2018):** Standorterkundung in Bayern: Aus der Klassik in die Moderne. AFZ-Der Wald 22, S. 34–37

Autoren

Dr. Wendelin Weis, Dr. Axel Wellpott und Wolfgang Falk bearbeiten und koordinieren in der Abteilung »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) das vom Waldklimafonds (FKZ 22WK41410) finanzierte Verbund-Projekt »Wasserhaushalt im Klimawandel – Entwicklung eines Wasserhaushaltsmodellsystems für Trockenheits- und Luftmangel-Indikatoren in der forstlichen Standortkunde«.

Kontakt: Wendelin.Weis@lwf.bayern.de