

WaldDürreMonitor Bayern

Axel Wellpott, Stephan Raspe, Lothar Zimmermann

Die Wasserverfügbarkeit hat großen Einfluss auf die Vitalität unserer Wälder. Daher besteht ein großes Interesse an flächendeckenden tagesaktuellen Informationen zur Bodenfeuchte in unseren Waldböden. Hier stellen wir das Projekt »WaldDürreMonitor Bayern« vor, in dem ein innovativer Online-Dienst entwickelt wurde, der für jeden bayerischen Standort eine unkomplizierte Abfrage der aktuellen Bodenfeuchte ermöglicht.

Wie geht es unserem Wald? Diese Frage beschäftigt uns immer wieder, besonders intensiv während der heißen und trockenen Sommer in den letzten Jahren. Für die Frage nach der Vitalität unserer Wälder ist vor allem die Wasserversorgung entscheidend. Ist es zu trocken, sind Wälder anfälliger für Schädlinge wie den Borkenkäfer oder sie sterben bei langanhaltender Trockenheit einfach ab. Auch für Fragen der Waldbewirtschaftung wie die Bewässerung von Forstkulturen und für den Einsatz von Forstmaschinen ist die Bodenfeuchte relevant. Um diesem allgemeinen sowie praktischen Interesse gerecht zu werden, wurde der »WaldDürreMonitor Bayern« entwickelt. Dieses innovative Werkzeug dient dazu, flächendeckend auf der Ebene von einzelnen Beständen Einblicke in die aktuelle Wasserverfügbarkeit zu geben. Der Online-Dienst kann sofort abgerufen werden unter <https://link2.bayern/wdm>.

Ein bewährtes Modell als Basis

Der Bodenwassergehalt lässt sich nicht auf jedem Quadratmeter Waldboden in Bayern tagesaktuell messen. Um dennoch flächendeckende Informationen zur Bodentrockenheit zu erhalten, muss der Bodenwassergehalt mit Modellen berechnet oder simuliert werden. Das Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 (Hammel und Kennel, 2001; Federer, 2002) hat sich dafür vielfach in der forstlichen Forschung bewährt und wird mit Messungen

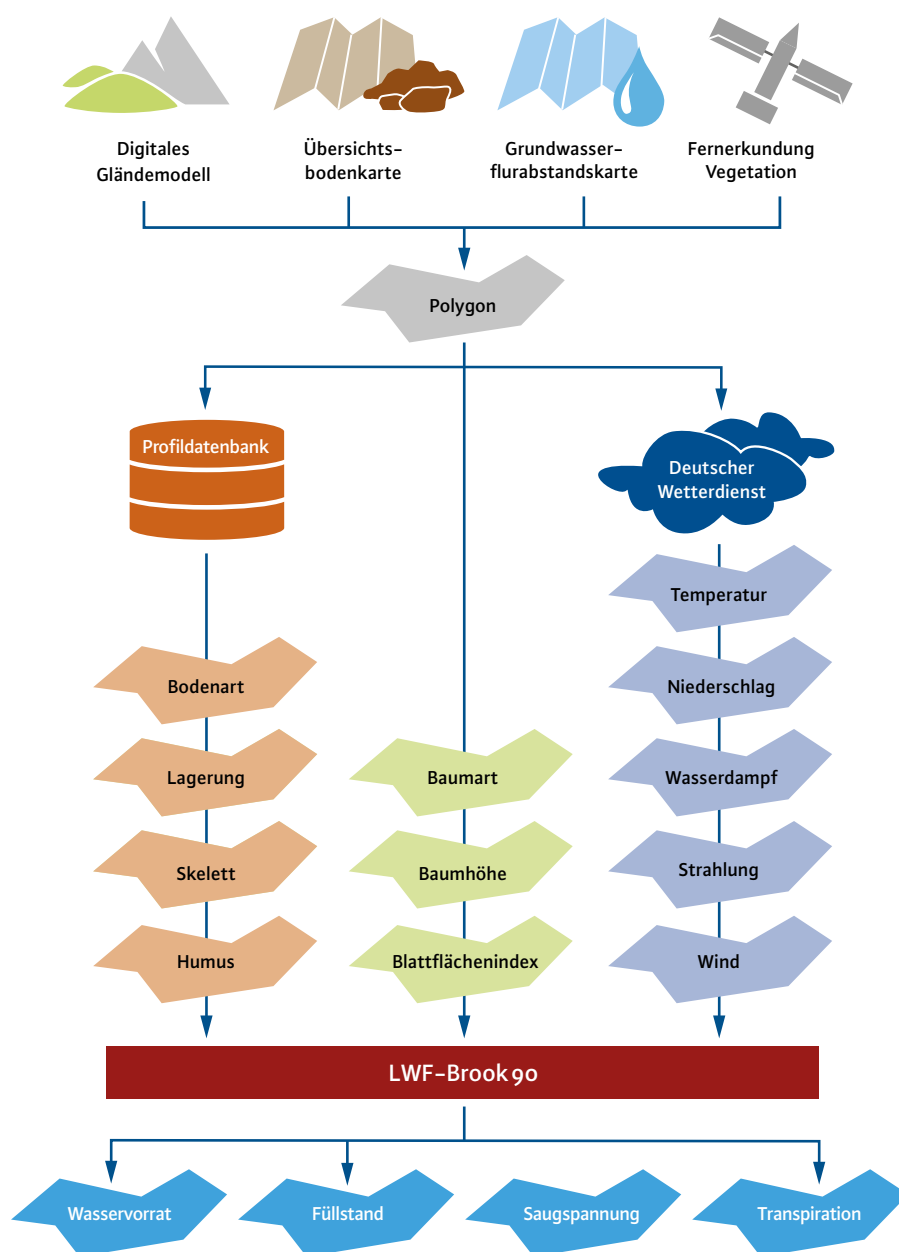
1 Die Polygone für den WaldDürreMonitor werden mit Hilfe der Übersichtsbodenkarte 1:25.000, einem digitalen Geländemodell, der Grundwasserflurabstandskarte sowie Bestandesinformationen aus der Fernerkundung abgeleitet. Pro Polygon werden bodenphysikalische Grunddaten, Baumkenngrößen und Wetterdaten als Eingangsparameter für das Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 verwendet. Daraus werden Indikatoren für den täglichen Wasservorrat im Boden, den Füllstand des Bodenwasserspeichers (% nFK), die Saugspannung im Boden sowie der Transpirationsindex berechnet.

der Bodenfeuchte an den bayerischen Waldklimastationen der LWF kontinuierlich geeicht. Das Modell berücksichtigt alle relevanten Wasserflüsse im Wald wie Standorteigenschaften, Vegetation und tagesaktuelle Wetterdaten.

Alle diese Informationen möglichst standortgenau in das Modell einfließen zu lassen und dann für die gesamte Waldfläche Bayerns tagesaktuell den Wasserhaushalt zu berechnen, war eine große Herausforderung. Wie wir dies gelöst haben, beschreiben wir im Folgenden.

Kleinräumige Standortinformation für Bayerns Waldfläche

Eine zentrale Komponente der Wasserhaushaltsmodellierung ist der Boden, dessen physikalische Eigenschaften – darunter Korngrößenzusammensetzung, Lagerungsdichte sowie Skelett- (also Stein-) und Humusgehalt – maßgeblich das Wasserhaltevermögen beeinflussen. Für unseren WaldDürreMonitor haben wir daher die genauesten Informationen ver-



wendet, die derzeit flächendeckend und digital für Bayern zur Verfügung stehen. Diese Daten basieren auf der Übersichts-bodenkarte (1:25.000) (LfU, 2025) und wurden dem Bayerischen Standortin-formationssystem (BaSIS) entnommen. Die mit den Flächeninformationen verknüpften Bodenprofilldaten basieren auf einer Datenbank, die Bodenaufnahmen vom Landesamt für Umwelt (LfU) (Benda et al., 2005) sowie der LWF umfasst. Hinzu kommen Informationen zu Hang-neigung, Hangausrichtung und Grund-wassereinfluss, die aus der Grundwasser-flurabstandskarte abgeleitet wurden (GLA, 2001).

Der Wasserhaushalt eines Waldes wird außerdem maßgeblich von der dominie-renden Baumart und der Bestandesstruk-tur (Schichtung, Dichte, etc.) bestimmt. Um die Baumart am Standort präzise im Modell zu berücksichtigen, haben wir Fernerkundungsdaten genutzt. Dabei kamen Flächeninformationen mit 10 m Auflösung zur Baumart (Blickensdörfer et al., 2024), Bestandeshöhe (Lang et al., 2023) und Blattflächenindex (EEA, 2021) zum Einsatz.

In der derzeitigen Konfiguration wird die gesamte Waldfläche Bayerns in et-was mehr als eine Million Einzelflächen unterteilt und für jedes dieser Polygone wird täglich ein eigener Modelllauf ge-rechnet (Abbildung 1). Im Gegensatz zu vergleichbaren Produkten anderer Insti-tutionen, die die Fläche in starre Raster (Pixel) unterteilen, folgen unsere Model-leinheiten dem Gelände, so dass die Kar-tendarstellungen des WaldDürreMoni-tors näher an den geografischen Realitä-ten liegen.

Das Verfahren zur Herleitung von Stand-ortseinheiten wurde im Vorläuferprojekt »Standortsfaktor Wasserhaushalt im Kli-mawandel« (Weis et al, 2023) entwickelt, mit dem Ziel eine bayernweite objekti-vierte Einschätzung des durchschnittli-chen, langjährigen Standortwasserhaus-halts zu liefern. Zudem wurden wichtige allgemeingültige Ansätze zur Parametri-sierung des Modells LWF-Brook90 und der verwendeten Baumarten entwickelt, die jetzt auch beim WaldDürreMonitor angewendet wurden.

Tägliche Wetterdaten

Neben den zuvor beschriebenen stati-schen Standortinformationen sind kon-tinuierlich erfasste meteorologische Ein-gangsgrößen erforderlich (Niederschlag, Lufttemperaturen, Wasserdampfdruck, Strahlung, Windgeschwindigkeit). Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt die Daten seiner Wettervorhersagemo-delle ICON-D2 (Gitterweite: 2 km) und ICON-EU (Gitterweite: 5 km) kostenfrei zur Verfügung. Zudem gibt es einen täg-lich aktualisierten Niederschlagsdaten-satz. Um tagesaktuell die Bodenfeuchte zu modellieren, werden die ICON-D2-Wetterdaten verwendet. Diese werden auf die oben beschriebenen Polygone übertragen, woraufhin über eine Million Wasserhaushaltsmodellierungen durch-geführt und die Ergebnisse automatisch für den Kartendienst ausgewertet wer-den. Durch die Einbindung von weiteren Wettervorhersagen wie des IFS (Inte-grated Forecasting System) des Europäi-schen Zentrums für mittelfristige Wetter-vorhersage (EZMW) kann die Boden-feuchte mit diesem Modell künftig auch für neun Tage vorhergesagt werden.

Kenngrößen für raschen Einblick in die Wasserversorgung

Um den aktuellen Bodenwasserhaushalt zu beschreiben und dabei die Bedürf-nisse unterschiedlicher Nutzergruppen an-zusprechen, wurden nachfolgende Kenn-werte für den WaldDürreMonitor ausge-wählt:

Zeitraum ausreichender Wasserversorgung: Gibt an, für wie viele Tage das Wasser im Waldboden bei einer täglichen Ver-dunstung von 3 l/m² (mittlere tägliche Verdunstung eines Waldes im Sommer) ausreicht, wenn in diesem Zeitraum kein weiterer Niederschlag fällt. Dabei wird der Bodenwassergehalt im gesamten durchwurzelten Bereich berücksichtigt.

Füllstand des Wasserspeichers: Zeigt an, zu wie viel Prozent der pflanzen-verfügbare Bodenwasserspeicher (nutz-bare Feldkapazität, siehe Infobox) aktu-ell gefüllt ist. Diese Kenngröße wird für zwei unterschiedliche Bodentiefen (40 und 100 cm) angegeben. Der Wert für den Oberboden (bis 40 cm) ist besonders wichtig zur Beurteilung der Wasserver-sorgung von anwachsenden Jungbäumen (Naturverjüngung, Pflanzung, Saat).

Saugspannung des Bodens: Beschreibt, wie stark das Wasser im Boden gebunden ist (Haltekraft). Je trockener der Boden, umso stärker wird das Wasser von ihm festgehalten. Puhlmann et al., (2010) geben eine Saugspannung von 1.300 hPa (pF 3.1) als Grenze für den Trockenstress-bereich von Bäumen an. Trocknet der Bo-den weiter aus, wird das Wasser noch stär-ker fixiert und die Pflanze welkt irrever-sibel. Die Saugspannung ist ein Maß für die Wasserversorgung der Vegetation und wird für dieselben Tiefen angegeben wie der Füllstand (40 und 100 cm). Abbildung 2 zeigt die Einteilung der Saugspannung im WaldDürreMonitor und deren Einwer-tung nach Schroeder (1992).

Transpirationsindex: Gibt das Verhältnis von aktueller zu einer theoretisch möglichen potenziellen Tran-spiration an. Die potenzielle Transpirati-on ist durch den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre bestimmt. Bei optimaler Wasserversorgung ist die Transpiration nicht eingeschränkt und der Transpirati-onsindex liegt bei »1«. Bei Austrocknen des Bodens sinkt der Wert ab. Die Bäume schränken dann die Transpiration durch Schließen der Spaltöffnungen in den Blatt-organen ein und somit nimmt die tatsäch-liche Transpiration der Bäume ab und der Index wird zunehmend kleiner als »1«.

Die abrufbaren Kenngrößen erlauben ei-nen schnellen Überblick über den Was-servorrat, aber auch eine weiterreichende Beurteilung der aktuellen Trockenstress-situation im Wald. Mit dem WaldDürre-Monitor steht nun ein starkes Werkzeug zur Verfügung, das einen flächendecken-den Einblick in die aktuelle Wasserver-fügbarkeit auf Bestandsebene ermöglicht.

pF-Bereich	hPa-Bereich	Einwertung
< 1.0	< 10	nass
1.0–1.5	10–32	sehr feucht
1.5–2.0	32–100	feucht
2.0–2.5	100–315	sehr frisch
2.5–3.0	315–1000	frisch
3.0–3.5	1000–3162	trocken
3.5–4.0	3162–10000	sehr trocken
4.0–4.5	10000–31623	dürr
> 4.5	> 31623	sehr dürr

2 Einteilung der Kenngröße »Saugspannung des Bodens« und Einwertung (in Anlehnung an Schroeder, 1992)

Kurz erklärt

Begriffe der Bodenphysik

Feldkapazität (FK): Die maximale Wassermenge, die ein Boden gegen die Schwerkraft speichern kann, nachdem überschüssiges Wasser versickert ist.

Totwasser: Wasser, das so stark an Bodenpartikeln gebunden ist, dass es für Pflanzen nicht verfügbar ist.

Permanenter Welkepunkt: Sobald nur noch Totwasser im Boden verbleibt, ist der permanente Welkepunkt erreicht. Ab diesem Punkt können Pflanzen kein weiteres Wasser aufnehmen und beginnen dauerhaft zu welken.

Nutzbare Feldkapazität (nFK): Der Bereich zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt. Nur dieser Wasseranteil steht Pflanzen zur Verfügung.

Saugspannung: Beschreibt die Kräfte, durch die Wasser mittels Kapillarkräften und Adhäsion an Bodenpartikeln gebunden wird. Synonym verwendet man auch den Begriff Matrixpotenzial. Der sogenannte pF-Wert wird als logarithmisches Maß für die Saugspannung herangezogen: Bei der Feldkapazität liegt er bei 1,8 und am Welkepunkt bei 4,2.

Kontinuierliche Optimierung

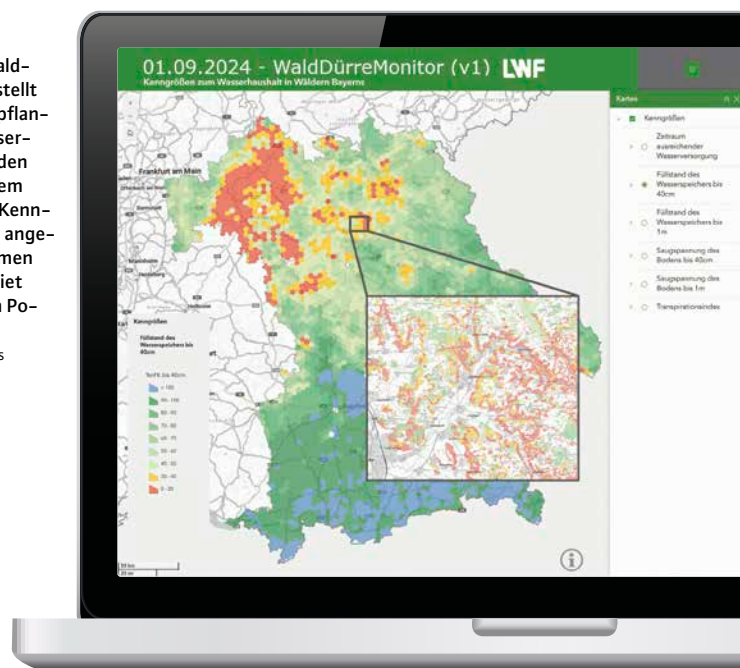
Auch wenn der WaldDürreMonitor Bayern jetzt schon in seiner ersten Ausbaustufe eine wesentlich höhere räumliche Auflösung und zeitliche Aktualität aufweist als andere Produkte auf dem Markt, wird er kontinuierlich weiterentwickelt: In einem ersten Schritt ist geplant, die Vorhersage der Bodenfeuchteindikatoren für die nächsten fünf Tage einzubauen. Parallel werden wir retrospektiv den Wasserhaushalt in den bayerischen Wäldern berechnen. Damit werden für Forschung und Forstpraxis Bodenfeuchtedaten der letzten Jahre bzw. Jahrzehnte zur Verfügung stehen.

Zugleich arbeiten wir daran, die Bodenfeuchte über den gesamten Tiefenverlauf der Bodenprofile darstellen zu können. Auf dem Weg dahin muss jedoch zunächst eine Lösung gefunden werden, um die dabei anfallenden großen Datenmengen effizient speichern zu können.

3 Mit speziellen Sensoren wird der volumetrische Wassergehalt und die Saugspannung in verschiedenen Tiefen, hier an der Waldklimastation Freising, bestimmt. Foto: Rager, LWF

4 Einblick in den WaldDürreMonitor: Dargestellt ist der Füllstand des pflanzenverfügbaren Wasserspeichers im Oberboden (bis 40 cm). Bei kleinem Maßstab werden die Kenngrößen als Hexagone angezeigt. Nach dem Zoomen auf ein kleineres Gebiet werden die einzelnen Polygone sichtbar.

Illustration (Laptop): Tobias Heinemann, PantherMedia



In einem parallellaufenden Projekt wird daran gearbeitet, die Informationen der Forstlichen Standortskarten bayernweit aufzubereiten und diese zu digitalisieren. Sobald diese digitalisierten Daten bayernweit vorliegen, können noch wesentlich passgenauere Polygone erstellt werden. Damit kann die Wirklichkeit noch deutlich detailschärfer wiedergegeben werden als dies mit unserem WaldDürreMonitor bereits heute möglich ist. Die Ergebnisse aus den Wasserhaushaltsmodellierungen könnten zudem als Grundlage für andere Fragestellungen herangezogen werden. Aktuell wird daran gearbeitet, die Modellergebnisse für die Entwicklung eines Indexes zur Bewässerung von Forstkulturen einzusetzen. Außerdem werden auch Möglichkeiten zur Bereitstellung von praxisnahen Hinweisen zur aktuellen Befahrbarkeit von Waldböden geprüft.



Zusammenfassung

Die Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) bietet mit dem WaldDürreMonitor Bayern ein auf den Waldbesitzer zugeschnittenes Online-Tool an, das die Wasserversorgung der bayerischen Wälder tagesaktuell visualisiert. Die Karten, die aus über einer Million einzelner Polygone erstellt werden, zeichnen sich durch eine deutlich höhere räumliche Auflösung als vergleichbare Produkte anderer Institutionen aus. Außerdem fließen standörtliche Informationen über den Baumbestand mit in die Modellierungen ein. Die Bodenfeuchtekarten werden künftig einen bedeutenden Beitrag zur Diskussion über die Wasserversorgung der Wälder leisten.

Da sowohl die Einteilung der Einheiten als auch die gesamte Prozesskette in eigener Verantwortung der LWF liegen, besteht die Möglichkeit, das System kontinuierlich zu validieren und zu optimieren. In den kommenden Jahren werden zahlreiche neue Datenquellen verfügbar sein, die für die Weiterentwicklung der Modellierung genutzt werden können.

Projekt

Das Projekt »Bodenfeuchtemonitor Wald (KliFW17)« wird vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus (StMELF) finanziert (Laufzeit: 01.07.2022–31.12.2025).

Autoren

Dr. Axel Wellpott, Dr. Stephan Raspe und Dr. Lothar Zimmermann sind Mitarbeiter in der Abteilung »Boden und Klima« an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.

Kontakt: stephan.raspe@lwf.bayern.de

Link

<https://link2.bayern/wdm>