



# Langfristige Entwicklung des forstlichen Bodenwasserhaushalts und tagesaktuelle Darstellung im Bodenfeuchtemonitor-Wald

Wolfgang Falk, Axel Wellpott, Wendelin Weis, Stephan Raspe,  
Lothar Zimmermann

*Abteilung 2 Boden und Klima, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft*

# Wasserhaushalt gestern, heute und morgen

- Hintergrund: sich änderndes Klima und zunehmende Trockenperioden
- Zunehmende Schäden bei zahlreichen Baumarten
- Rückbesinnung auf Bedeutung des Standorts (Schäden vermehrt auf flachgründigen, südexponierten oder tonigen Standorten) und Standortsinformationen
- Fragen zur aktuellen Bodenfeuchte (Pflanzung, Befahrung ...)
- forstliche Wasserhaushalt verstärkt im Fokus



# Wasserhaushalt gestern, heute und morgen

- Wo kommen wir her?

Standortkarte: Wasserhaushalt als statische Größe, z.B. in festem Zifferncode:

Tabelle 1: Standortkartierung in Bayern: dreistelliges Ziffernsystem (Arbeitskreis Standortkartierung 2016)

1. Ziffer	Bodenart und Schichtung	2. Ziffer	besondere Standortmerkmale	3. Ziffer	Wasserhaushalt
0	Sand, Kies, Geröll, Fels-/Blockmosaik, Humuskarbonatboden	0	normal	0	(sehr) trocken
1	lehmiger Sand, sandiger Lehm	1	nährstoffarm, podsoliert	1	mäßig trocken, grundwechselfeucht
2	Lehm	2	nährstoffreich	2	mäßig frisch, grund-/hangfrisch
3	Feinlehm, Schlufflehm, Schluff	3	humusreich <sup>2</sup>	3	ziemlich frisch, frühjahrsfrisch, grundfrisch
4	milder Ton, Tonlehm, Kalkverwitterungslehm <sup>1</sup>	4	Karbonat oberhalb 50 cm	4	(sehr) frisch, hangfrisch, grundfeucht
5	strenger Ton <sup>1</sup>	5	Karbonat in 50 - 100 cm Tiefe	5	hangwasserzügig, quellfrisch, wechselnd hangfeucht, (mäßig) hang (-wechsel) -feucht
6	Decksand und -lehm (Ton/Tonlehm höher 30 cm)	6	tongründig <sup>3</sup>	6	(mäßig) wechselfeucht
7	Schichtsand (Ton/Tonlehm in 30 - 60 cm Tiefe)	7	Verdichtung im Unterboden <sup>4</sup>	7	mäßig wechselfeucht, schwach wechselfeucht
8	Schichtlehm (Ton/Tonlehm in 30 - 60 cm Tiefe)	8	Hanglage	8	(stark) wechselfeucht, wechselnd feucht

# Wasserhaushalt gestern, heute und morgen

- Wo kommen wir her?  
Standortkarte: Wasserhaushalt als statische Größe, z.B. in festem Zifferncode:
- Komplexe Bewertung durch Kartierer/in anhand von Regeln, teils aber auch aufgrund von Höhenwachstum/Leistung, relative Differenzierung gut, Vergleichbarkeit zw. Gebieten nicht immer gegeben
- Im Klimawandel: dynamische Größe!

# Wasserhaushalt gestern, heute und morgen

- Wo kommen wir her?

Standortkarte: Wasserhaushalt als statische Größe, z.B. in festem Zifferncode:

- Komplexe Bewertung durch Kartierer/in anhand von Regeln, teils aber auch aufgrund von Höhenwachstum/Leistung, relative Differenzierung gut, Vergleichbarkeit zw. Gebieten nicht immer gegeben

- Im Klimawandel: dynamische Größe!

- Heute: Einheitliches Vorgehen: deterministisches Modell LWF-Brook90

- Anforderungen an den Wasserhaushalt (heute und morgen):

- Standortveränderung, Trockenstressrisiko, Wasserstau, Wachstum, waldbauliche Entscheidungen (Klimawandel)

- Aktuelle Informationen für waldbauliche Entscheidungen (Befahrung/Bodenschutz, Pflanzung, Bewässerung, Waldschutz ...)

# Standortfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel

## Eingangsdaten

### Klimadaten

(250 x 250 m, Tageswerte)



## Methode

### „Leitbestände“

(Hauptbaumarten, Mischbestände)



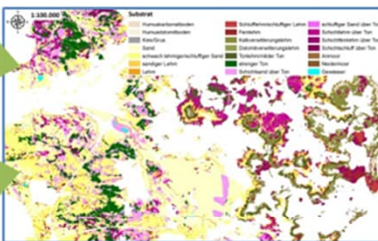
## Zielgrößen

### durchschnittliche Wasserversorgung



## Standortinformationen

(länderspezifische Systeme)



## Wasserhaushaltsmodellierung

(LWFBrook90)

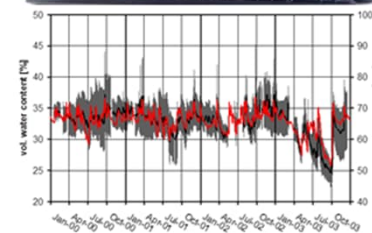


## Trockenstressrisiko



## Bodenprofilanalysen

(TRD, Skelett, Textur)



## Validierung

(Intensives Forstliches Monitoring)

## Luftmangelrisiko



# Motivation und Ziele

- deterministische, objektive und einheitliche Darstellung des Wasserhaushalts bayernweit in BaSIS\* (Grundlage ÜBK)
- Abbildung der Klimadynamik (Klimaprojektionen bis 2100)
- „physikalische“ Abbildung von Standorteffekten
- Abbildung von Baumarteneffekten (Rein- und Mischbestand)
- Abgebildet werden Trockenstressrisiko und Staunässeinfluss

\* Literatur:

Beck, J, Dietz, E., Falk, W. 2012: Digitales Standortinformationssystem für Bayern. LWF aktuell 878/2012, S. 20-23

Beck, J, Kölling, C. 2013: Das bayerische Standortinformationssystem. LWF aktuell 94/2013, S. 4-7.

# Standortfaktor Wasserhaushalt: Leitbestände

- Darstellung gut wüchsiger, geschlossener Reinbeständen (Mischbestände)
- baumartenspezifisch: Buche, Fichte, Kiefer, Eiche, (Douglasie)
- in der Modellierung konstant (Ziel ist der Standortvergleich)
- Wasserverbrauch im oberen Bereich der Validierungsflächen
- wesentliche Baumartenunterschiede:
  - Rindenoberflächenindex SAI [proj.  $\text{m}^2/\text{m}^2_{\text{Boden}}$ ]
  - Blattflächenindex LAI [proj.  $\text{m}^2/\text{m}^2_{\text{Boden}}$ ]
  - Blattleitfähigkeit  $g_{\text{leaf}}$  [m/s]
  - Wurzeltiefe WT [cm]

Baumart	SAI	LAI	$g_{\text{leaf}}$	WT
Buche	1,0	6,0	0,0060	160
Fichte	2,0	7,0	0,0035	120
Kiefer	0,8	3,5	0,0045	200
Eiche	0,9	4,5	0,0070	200
Douglasie	0,8	6,0	0,0025	160





# Parametrisierung

- [https://www.forstzentrum.de/images/stories/downloads/Ver%C3%B6ffentlichungen/Forstliche%20Forschungsberichte/WHH-KW\\_FF224\\_20230831\\_Online\\_geschuetzt.pdf](https://www.forstzentrum.de/images/stories/downloads/Ver%C3%B6ffentlichungen/Forstliche%20Forschungsberichte/WHH-KW_FF224_20230831_Online_geschuetzt.pdf)

Forstlicher Forschungsbericht 224

## Standortsfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel

*Wendelin Weis, Bernd Ahrends, Jürgen Böhner, Wolfgang Falk, Stefan Fleck, Raphael Habel, Hans-Joachim Klemmt, Henning Meesenburg, Ann-Christin Müller, Heike Puhlmann, Jan-Axel Wehberg, Axel Wellpott, Thilo Wolf (2023)*

ISBN 3-933506-55-7

Die Forstwirtschaft ist wie kaum ein anderer Wirtschaftszweig von Umweltbedingungen abhängig und daher auch besonders von den bereits eingetretenen und zu erwartenden klimatischen Veränderungen betroffen. Eine wichtige Grundlage für die Beurteilung forstlicher Standorte ist eine Einschätzung des Wasserhaushalts hinsichtlich Trockenstress und Staunässe. Dieser, lange Zeit als nahezu konstant angesehene Standortfaktor, muss geänderte Klimabedingungen und ihre Auswirkungen auf die Wasserversorgung berücksichtigen, um auch in Zukunft als hilfreiche Grundlage für eine standortgerechte Baumartenwahl dienen zu können.

Das Verbundvorhaben „Standortsfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel“ hat sich der Dynamisierung der Ansprache des Wasserhaushalts in Standortinformationssystemen unter Berücksichtigung von Klimaszenarien gewidmet. Kern des Ansatzes waren zum einen die Erstellung von räumlich (250 m x 250 m) und zeitlich (täglich) hoch aufgelösten Klimadaten für Vergangenheit und Zukunft (Szenarien). Zum anderen wurde das dynamische Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 mit Hilfe eines großen Validierungsdatensatzes der beteiligten Projektpartner parametrisiert und plausibilisiert sowie unter Einbeziehung der jeweiligen Standortinformationssysteme der beteiligten Bundesländer für die flächenhafte Modellierung angewendet.

Die im Projekt entwickelten bzw. verwendeten Methoden sowie die erzielten Ergebnisse



Standortfaktor Wasserhaushalt

- Parametrisierung immer zentraler Diskussionspunkt, Absicherung mit großer Datenbasis sinnvoll (hier Level-II-Flächen)
- Wenige zentrale Parameter sind entscheidend, Unterschiede zwischen Baumarten, Wissenslücken bei alternativen Arten
- Grundwassereinfluss ist mit statischem GW-Stand abgebildet
- Darstellung des Standortwasserhaushalts bzw. Trockenstressrisikos für unterschiedliche Standortkartensysteme möglich
- Ergebnisse: WHH dynamisch und nachvollziehbar

# Ergebnisse – WHH-Klassen und Änderungen

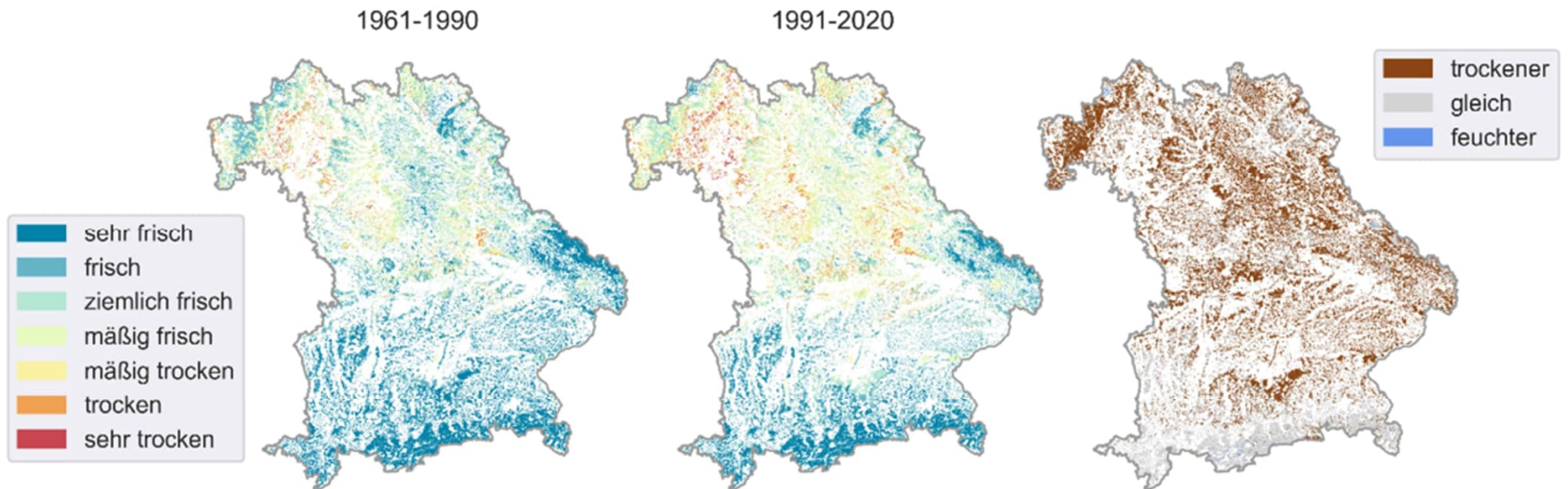
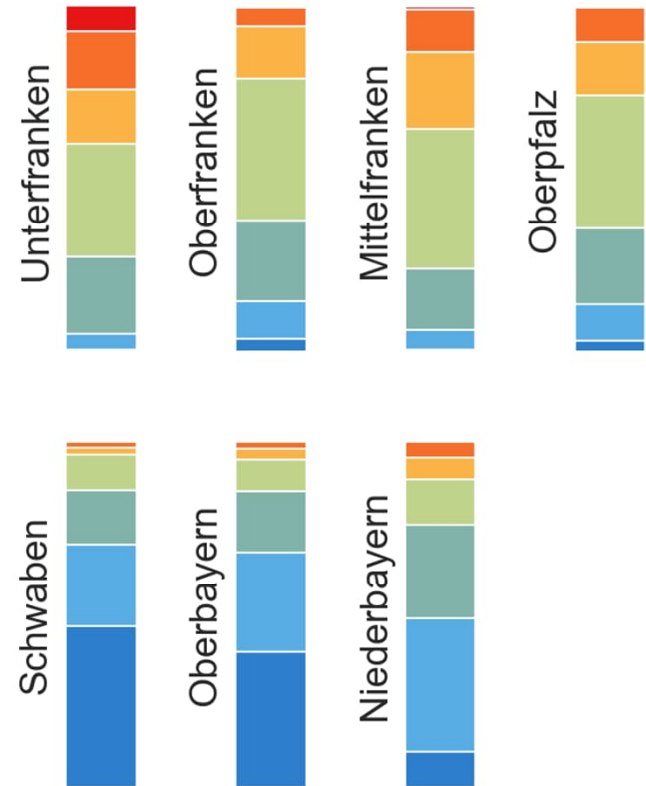
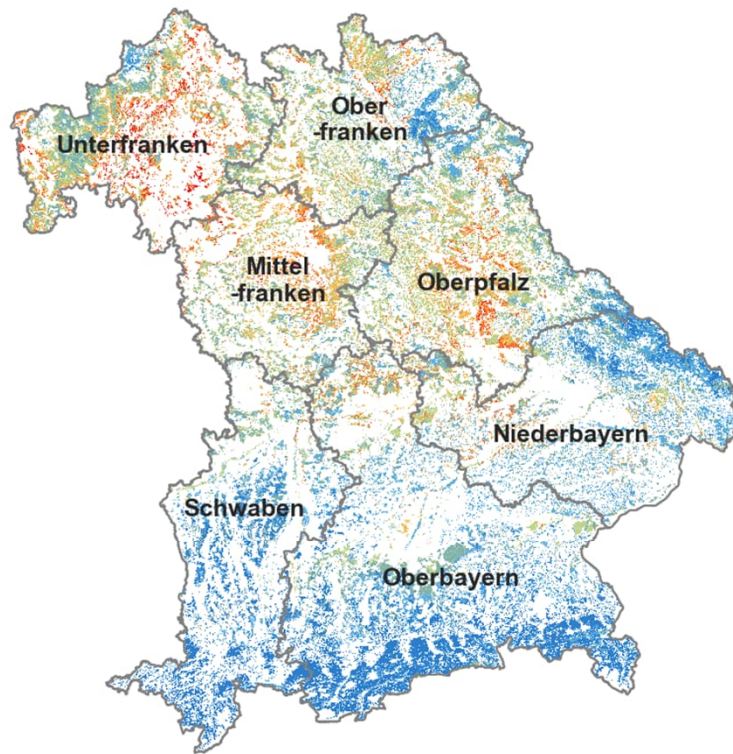


Abbildung 9.2: Wasserhaushaltsklassen für das Bundesland Bayern für zwei Klimanormalperioden (1961-1990 und 1991-2020) und die Karte der Änderungen (rechts) zwischen den beiden Perioden. Auf 61 % der Waldfläche hat sich die Wasserversorgung zwischen den beiden Zeiträumen verschlechtert.

# Ergebnisse – WHH-Klassen RegBez 1991-2020



# Ergebnisse – WHH-Klassen Projektionen Nbg. Land

- Bei Niederschlagssummen  $< \sim 700$  mm/yr wird der Bodenspeicher und die Exposition immer wichtiger (Wasserhaushaltskarte wird dann zu Boden- u. Reliefkarte)
- Dramatische Veränderungen im Klimawandel

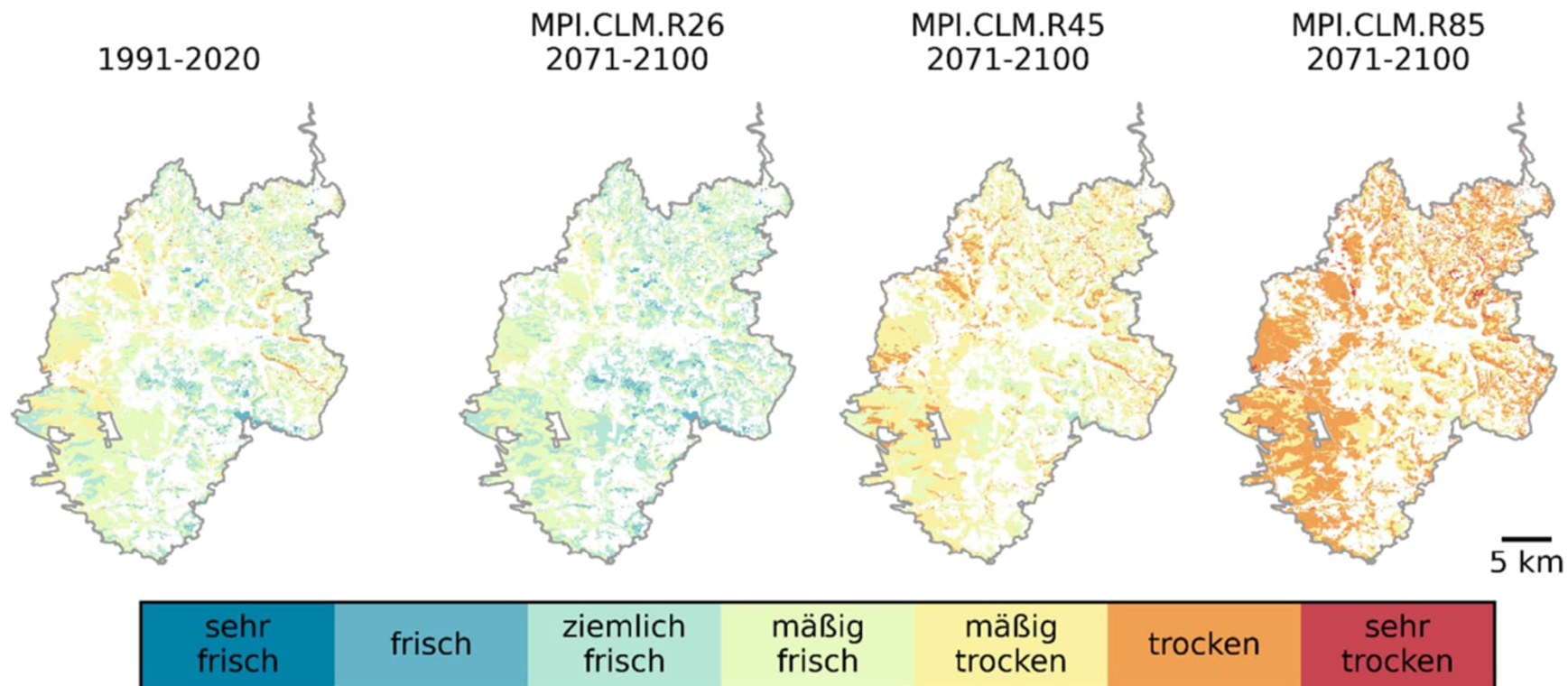


Abbildung 9.3: Wasserhaushaltsklassen im Landkreis Nürnberger Land für den Zeitraum 1991-2020 (links) und für den Zeitraum 2071-2100. Die drei rechten Abbildungen unterscheiden sich in der Ausprägung der Klimaveränderungen und stellen die drei RCPs 2.6, 4.5 und 8.5 dar. Das globale Klimamodell (MPI) und dessen Ansatz zur Regionalisierung (CLM) sind für die drei Szenarien identisch.

# Bodenfeuchtemonitor Wald

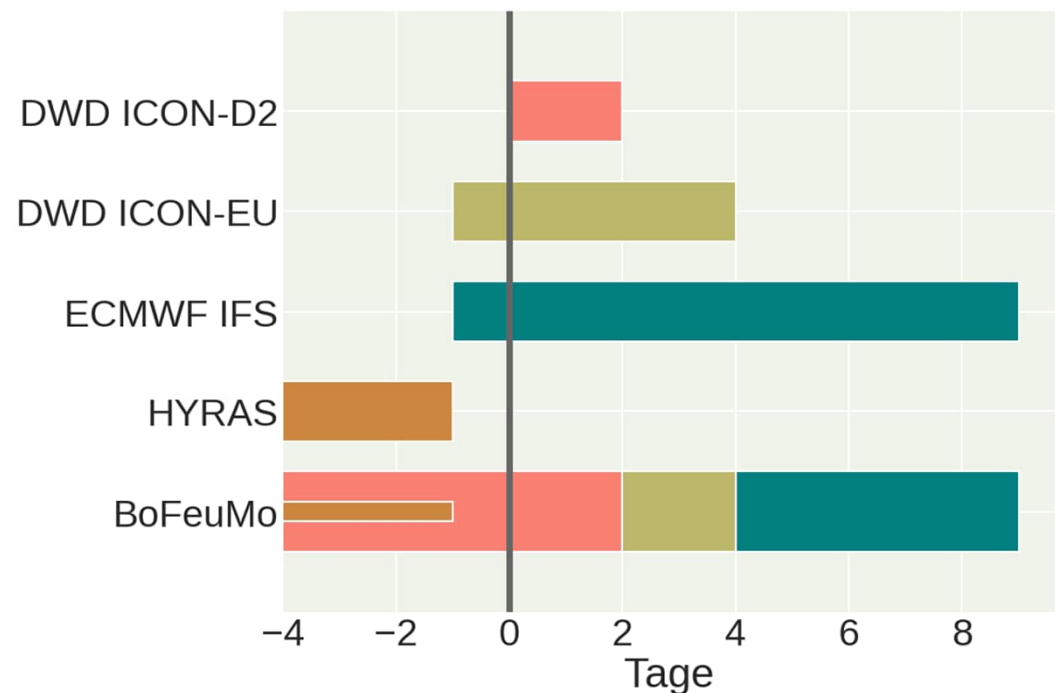
- Neben Standortwasserhaushalt auch aktuelle Dynamik wichtig, um kurzfristig Aussagen zur Trockenheit flächig zu tätigen, mittelfristig, um waldbauliche Maßnahmen zu planen
- Unterschiedliche Ansätze von UFZ bis DWD
- Ansatz in Bayern beruht auf Standortfaktor WHH und BaSIS (ÜBK)
  - Speziell für und „nur für“ Wälder
  - Besonderer Blick auf die Alpen
  - Fremdangebote können nur begrenzt zu weiteren Analyse genutzt werden
  - Angelehnt an das Bayerische Standortinformationssystem (BaSIS)
  - Stete Verbesserungen (z.B. Standortkarten)
  - Aktueller Bestand, aktuelle Witterung

# Was steckt dahinter? Meteorologische Zeitreihen

Eingangsdaten (tägl. Auflösung)

- Lufttemperatur
- Strahlung
- Wind
- Luftfeuchte
- Niederschlag

Name	Quelle	Vorhersage	Aufl.
ICON-D2	DWD	+2 Tage	2.2 km
ICON-EU	DWD	+5 Tage	5 km
IFS	ECMWF	+10 Tage	29 km
HYRAS	DWD	-	1 km

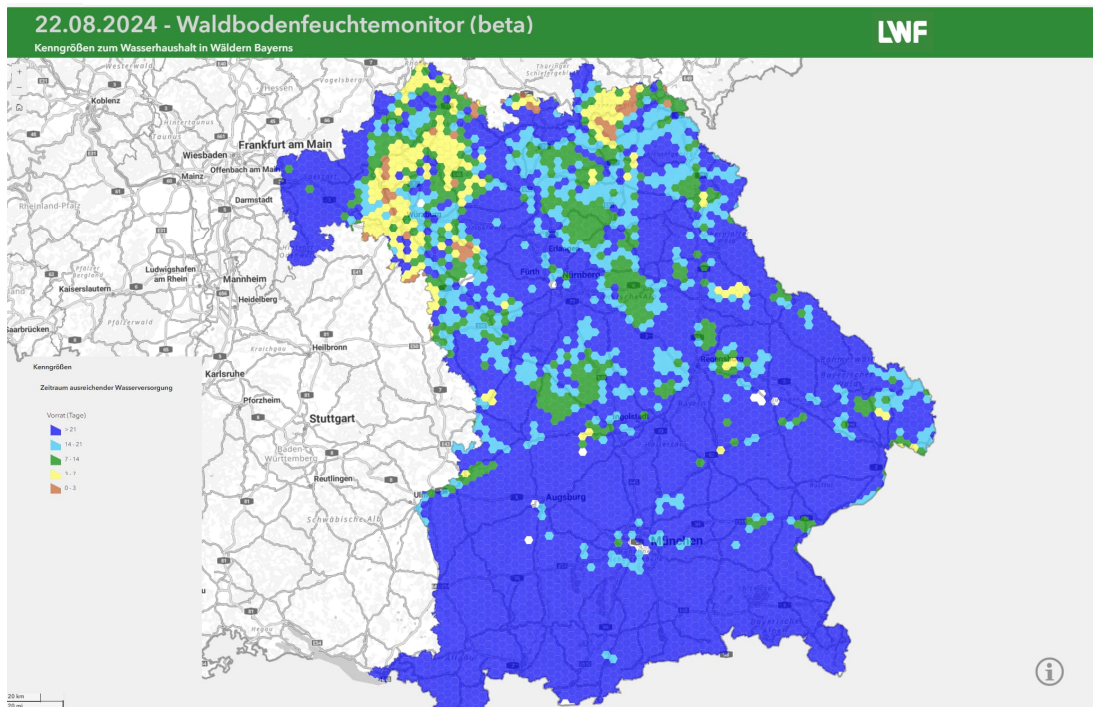


# Was steckt dahinter? Meteorologische Zeitreihen

- Wasserhaushaltsmodellierungen: LWF-Brook90, Bodenprofilzuordnung (BaSIS) und Baumarten-Parametrisierung wie bei Standortfaktor Wasserhaushalt
- Zuweisung zu 9+2 Arten/Klassen
  - Baumartenkarten (Thünen)
  - Baumhöhen – 10 m Auflösung (Tolan et al., 2024, ETH)
  - LAI aus Satellitendaten
- Meteorologische Zeitreihen und aktuelle Daten des DWD + ECMWF
- Modelleinheit aus Boden, Relief, Grundwasser, Baumart/Gruppe, Bestandeshöhe und Werte für maximalem LAI -> 908.512 Polygone
- paralleles Rechnen (viele Kerne) der Modelleinheiten ermöglicht täglich ca. 1 Millionen Läufe

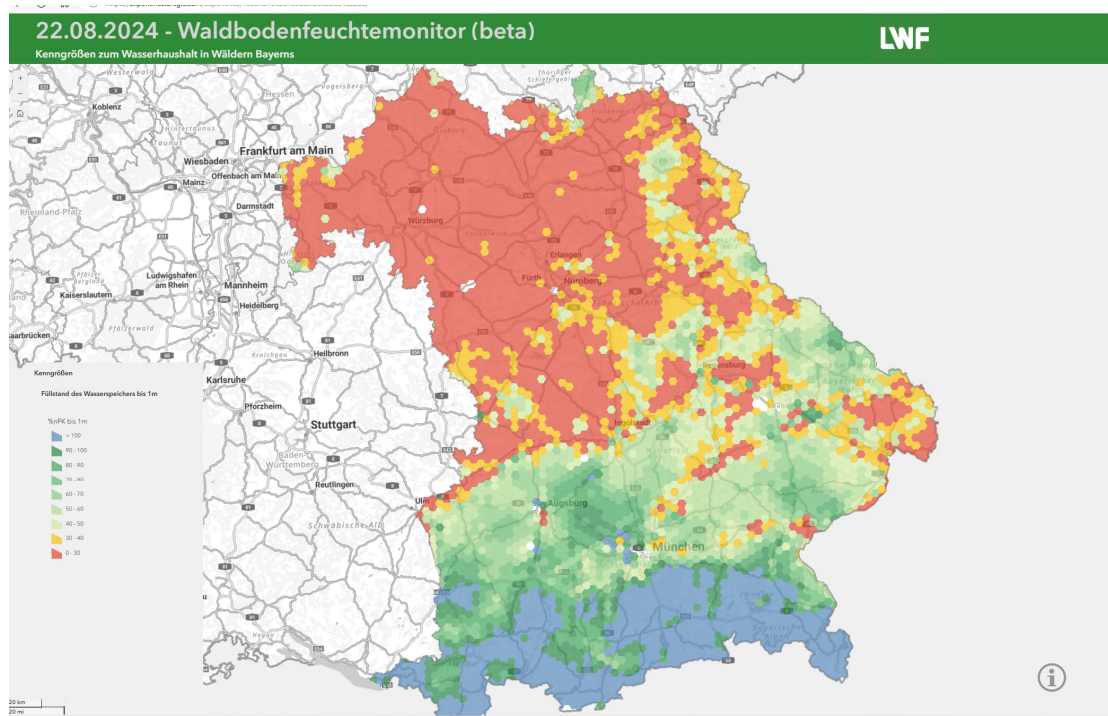


# Karte für interessierte Öffentlichkeit



- Zeitraum, den die Waldbäume auf den einzelnen Standorten im Sommer noch ohne zusätzlichen Niederschlag stressfrei überstehen können
- Angenommene Verdunstung: 3 mm/Tag (sommerlicher Durchschnittswert)

# Karten für Forstpraktiker und Experten



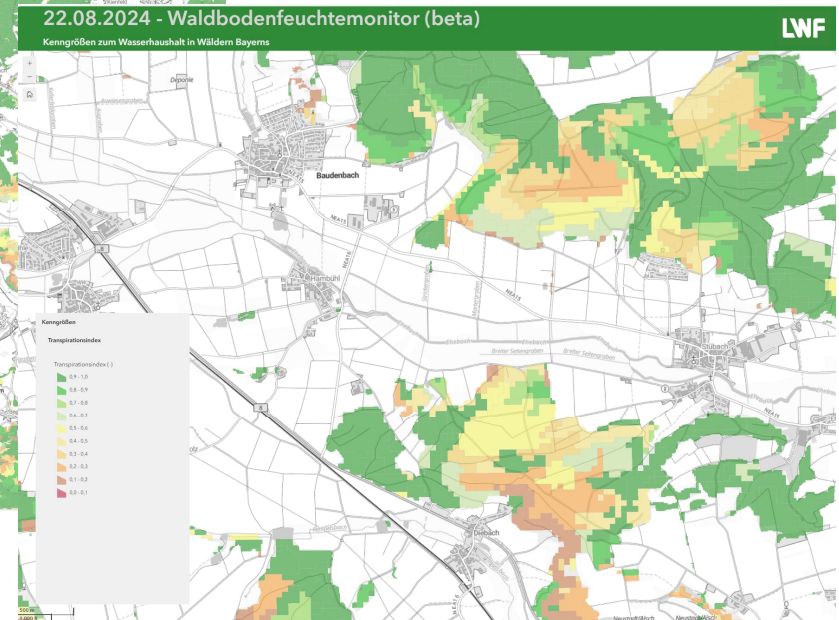
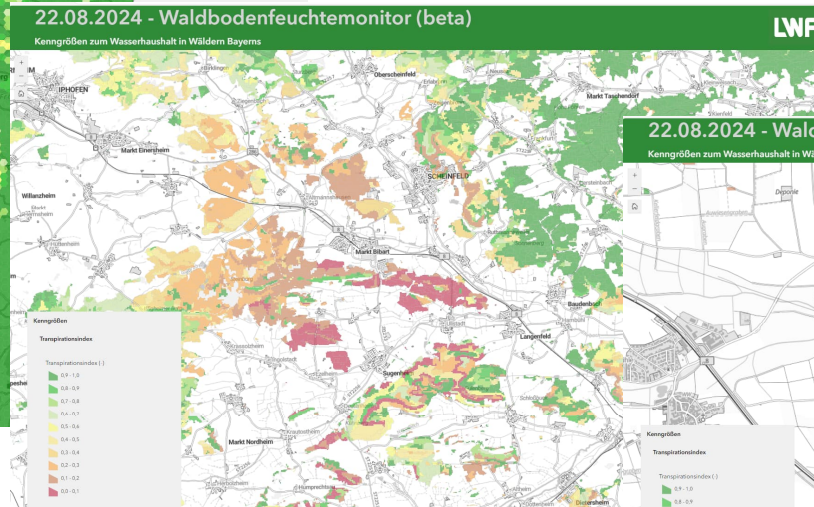
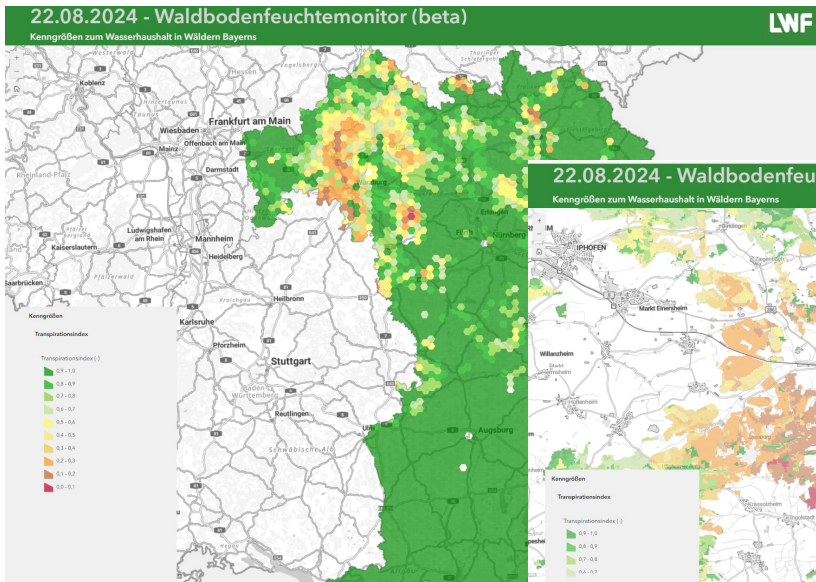
- Füllstand der Bodenwasserspeicher:
  - 0 bis 40 cm Bodentiefe
  - 0 bis 100 cm Bodentiefe
- BaSIS nFK der jeweiligen Standorte
  - ab 40 % eingeschränkte, ab 30 % mangelhafte Wasserversorgung
- Saugspannung, pF-Wert (Matrixpotential)
  - 0 bis 40 cm Bodentiefe
  - 0 bis 100 cm Bodentiefe

# Zoom: vom Hexagon zum Polygon

Übersicht



Detail



Waldbodenfeuchtemonitor	
Matrixpotential bis 1m (pF)	3,1
Matrixpotential bis 40 cm (pF)	3,0
%nFK bis 1m	70
%nFK bis 40cm	77
Transpirationsindex (-)	1,00
Vorrat (Tage)	21

- Dynamische Bewertung des Standortwasserhaushalts, Veränderungen über die Zeit und im Klimawandel sind möglich
- Boden und Relief gewinnen bei niedrigen Niederschlägen an Bedeutung
- Aufwändige Parametrisierung an Monitoringflächen, Forschungsbericht
- Automatisierte und tagesaktuelle Bodenfeuchtemodellierungen
- Flächendeckend für gesamte Waldfläche in Bayern
- Hohe räumliche Auflösung (Polygone anstatt Raster)
  - Ermöglicht Analyse von Waldschadensereignissen
  - Informationen für waldbauliches Handeln (Forstpraxis)
- Online-Tool für forstliche Praxis (ArcGIS online) läuft als Testversion