

11 Dynamische Wasserhaushaltsdarstellung für forstliche Standorte in Sachsen-Anhalt

Stefan Fleck, Bernd Ahrends, Henning Meesenburg

11.1 Einleitung

Durch den Klimawandel und andere Umweltbelastungen werden Wälder zukünftig Umweltfaktoren ausgesetzt sein, die sich in ihrer Kombination, Intensität und Dynamik grundsätzlich von denen der Vergangenheit unterscheiden können (Ahrends et al., 2009; Jansen et al., 2008). Zahlreiche Studien betonen, dass in Mitteleuropa mit der globalen Erwärmung häufigere und länger andauernde Hitzeperioden mit geringen Niederschlägen auftreten werden (Grillakis, 2019; Samaniego et al., 2018; Thiele et al., 2017; Ziche et al., 2021). Aber auch die sich bereits vollziehenden Klimaveränderungen markieren z.B. für die Jahre 2018 -2020 für große Teile Europas eine beispiellose Häufung an Trockenperioden (Buras et al. 2020; Rakovec et al. 2022). Neben direkten Auswirkungen der Trockenheit zeigt sich eine erhöhte Anfälligkeit für Schaderreger (Dobbertin et al. 2007; Patacca et al. 2023). Für die Forstplanung ergeben sich so neue und gesteigerte Herausforderungen, da sie zunehmend zeitlich dynamische Informationen und auch Projektionen der zukünftigen Umweltbedingungen berücksichtigen muss (Ahrends, Heitkamp et al. 2023).

Räumlich explizite Standortinformationen sind hierbei neben den Klimaprojektionen eine unverzichtbare Entscheidungshilfe (Thiele et al., 2017; Petzold et al., 2014). In Sachsen-Anhalt ist die kontinuierlich fortgeführte forstliche Standortkartierung die Waldbodenkartierung mit der höchsten räumlichen Auflösung. Da es sich hierbei je Standort um eine einmalige Erhebung handelt, liegen die Kartierungen der forstlichen Standorte und auch ihre Wasserhaushaltsansprache in Feuchtestufe und Feuchtezahl häufig schon Jahrzehnte zurück. Somit schmälern die schnellen und komplexen Veränderungen der Standortseigenschaften den Wert des traditionellen Wissens.

Eine Möglichkeit, die damit verbundenen Unwägbarkeiten zu verringern, sind Simulationsstudien, die sich mit den neuen Dynamiken und Mechanismen befassen (Thiele et al., 2009, 2017). Zwar lässt sich mit ihnen nicht die Abfolge der klimatischen Ereignisse von Jahr zu Jahr voraussagen, sie erlauben aber auf der Basis von Klimaszenarien eine Einschätzung von durchschnittlichem Niveau und Variabilität des Trockenstresses, dem die Bestände ausgesetzt sind - hierdurch können die Wasserhaushaltseinstufungen an das erwartete Klima angepasst werden.

Da die Wiederbewaldung mit klimaresilienten Beständen geplant werden muss, stellt sich zwangsläufig die Frage nach der zu erwartenden Wasserversorgung in der nächsten Waldgeneration. Eine praktische Forstplanung und Risikoeinschätzung erfordert dabei nicht nur die Simulation an Einzelstandorten, sondern die flächenhafte Modellierung auf Landschaftsebene. Hierfür wird das mechanistische Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 (Hammel & Kennel, 2001) mit seiner überregionalen und artspezifischen Parametrisierung eingesetzt (Fleck et al., 2023a; Weis et al., 2023). Der Vergleich der abgeleiteten Trockenstressindikatoren mit den Einstufungen der Standortkartierung ermöglicht einen Praxistest auch für die ostdeutschen Standorterkundungsverfahren.

Dabei wird neben der vergangenen Entwicklung des mittleren Trockenstressrisikos der Baumarten auch die aktuelle Trockenstressentwicklung der Fichte in den Trockensommern von 2018 – 2020 analysiert und in den Zusammenhang der längerfristigen Klimaveränderungen gestellt. Für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung werden Klimaprojektionen benötigt, die möglichst gut die Bedingungen im Harz charakterisieren. Die zur Verfügung gestellten Klimaprojektionen werden deshalb mit dem bisherigen Verlauf von Temperatur und Niederschlägen verglichen, um ihre Plausibilität für das Testgebiet einstufen zu können. In Szenariensimulationen soll insbesondere die Frage untersucht werden, ob das Trockenstressrisiko je nach Baumartenwahl unterschiedlich ist. Mögliche zukünftige Effekte der heutigen Baumartenwahl können so durch die Modellierung aufgezeigt werden.

Im Folgenden wird beschrieben, wie sich die Standortkartierung Sachsen-Anhalts in eine Bodenparametrisierung von LWF-Brook90 übersetzen lässt und welche Relief-, Grundwasser-, Klima- und Bestandesinformationen verwendet wurden. Für den Harz (Sachsen-Anhalt) wird dann die großflächige Anwendung des Modellsystems dargestellt, insbesondere im Hinblick auf die bisherige und zukünftige Trockenstressgefährdung der Baumarten.

11.2 Methoden

11.2.1 Das Projektgebiet Harz (Sachsen-Anhalt)

Die Testregion Harz (Sachsen-Anhalt) ist ein durch unterschiedliche Ausgangsgesteine, Lössüberwehungen und verschiedene Reliefpositionen bodenseitig sehr vielgestaltiger Naturraum. Neben dem Brockenmassiv und dem Ramberg-Massiv mit dem Ausgangsgestein Granit und den langgestreckten Kieselschieferzügen im Süden und Osten kommen zahlreiche weichere Gesteine wie Tonschiefer, Grünschiefer, Sandstein, Kalkstein und Phyllit, aber auch Grauwacken, Diabas, Quarzit, Porphyrit, Konglomerate, Keratophyr, und skelettfreier Löss in nennenswerten Anteilen vor (Schröder & Fiedler, 1975). Das modellierte Gebiet umfasst 827 km² Waldfläche.

Klimatisch ist der Harz (Sachsen-Anhalt) einerseits von einem starken Niederschlagsgefälle geprägt mit hohen steigungsbedingten Niederschlägen im Westen und geringen Niederschlägen im Osten. Andererseits ist dieser Gradient überprägt von einem kleinräumigen Wechsel zwischen weniger wasserbindigen Böden und schluffreicheren Standorten mit einer höheren nutzbaren Feldkapazität (Abbildung 11.1). Wie sich die Wasserhaushaltseinstufung dieser Standorte relativ zueinander darstellt, ist daher von besonderem Interesse.

Die flächenhafte Implementierung des Modellsystems benötigt insbesondere flächenhafte Informationen über das Relief (Hangneigung und Exposition), die Bodenverhältnisse (Standortskartierung mit zugehörigen Leitprofilen), den Grundwasserflurabstand und auf die Standortseinheiten regionalisierte Klimadaten.

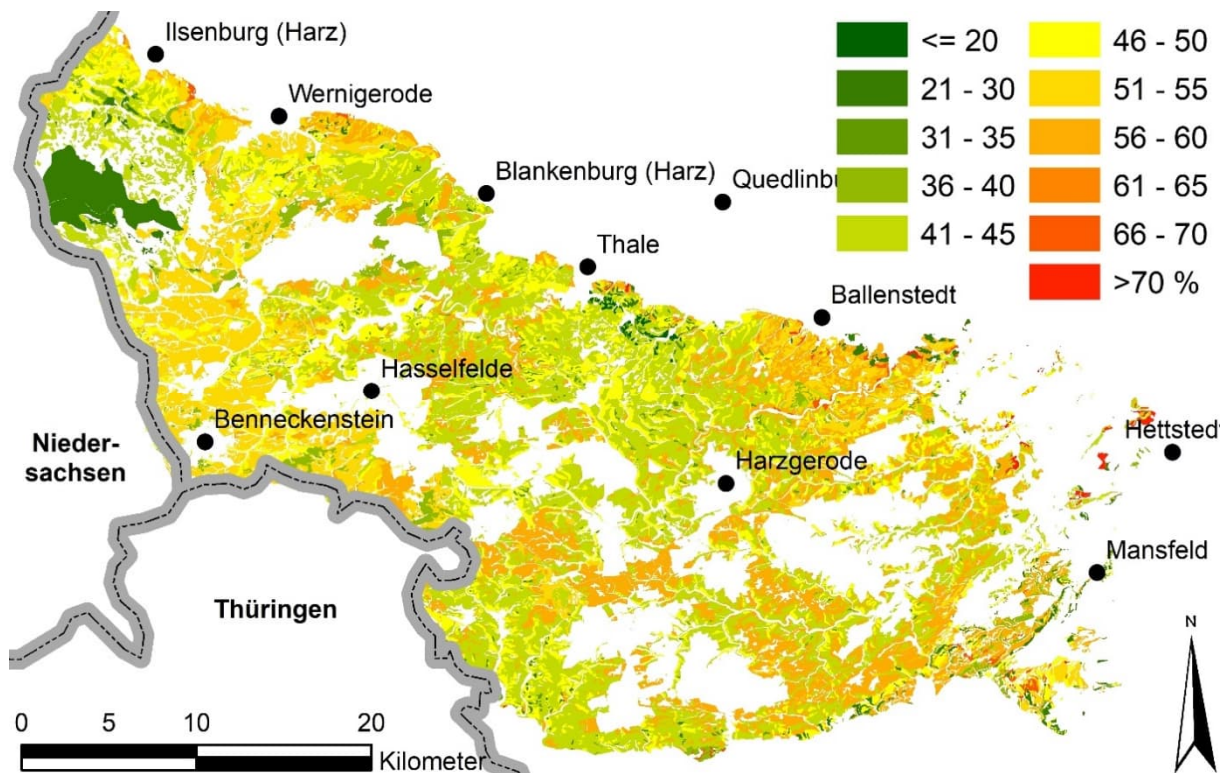


Abbildung 11.1: Schluffanteile in den Waldböden im Harz (Sachsen-Anhalt), aggregiert für die obersten 100 cm des Mineralbodens

11.2.1 Reliefinformationen

Als Höhenmodell wurde ein digitales Geländemodell mit einer Rasterweite von 25 m verwendet. Aus diesem wurden die Hangneigung und die Exposition mit ArcGIS abgeleitet. Die Zuordnung der Rasterwerte zu den Polygonen der Standortskartierung erfolgte über zonale Statistik. Die Geländehöhe und die Hangneigung der Polygone wurden als Mittelwerte berechnet. Bei der Exposition (0-360°) wurde der Median verwendet.

11.2.2 Standörtliche Grundlagen für Sachsen-Anhalt und die Testregion

Die forstliche Standortskartierung wird in Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt seit Mitte der 1960er Jahre auf Basis der Standortserkundungsanleitung (SEA) durchgeführt (SEA74: VEB

Forstprojektierung Potsdam et al., 1974), SEA95: Schulze, 1996). Ein Bestandteil der SEA ist ein Bodenformenkatalog mit zahlreichen Lokalbodenformen (allein 970 für das nordostdeutsche Tiefland – Russ et al., 2012). Auf diesem Fundament ist eine Ableitung von notwendigen Parametern für LWF-Brook90 nur bedingt möglich (Kopp & Jochheim, 2002). Dementsprechend wurden in der Vergangenheit auf Grundlage des Lokalbodenformenkataloges der SEA und unter Berücksichtigung von bestehenden Merkmalsspiegeln (mittlere Bodeninformationen für die jeweilige Lokalbodenform) und Altweiserdaten Profilverläufe mit Angaben zur Schichtmächtigkeit, Bodenart, Skelettkgehalt, Trockenrohdichte und Humusgehalt abgeleitet (Fleck et al., 2015, Kopp & Jochheim, 2002, Petzold et al., 2014). Für Sachsen-Anhalt liegt ein Katalog von Merkmalsspiegeln für flächendominante Lokalbodenformen nicht nur für das Tiefland, sondern auch für das Berg- und Hügelland vor (Kopp et al., unveröffentlicht; Schwanecke, 1993). Die von Ahrends et al. (2016) evaluierten Merkmalsspiegel wurden für die landesweite Anwendung verwendet.

Am Beispiel der Testregion Harz wurden den Kartiereinheiten der Standortkartierung unter Berücksichtigung des Grundwasserstandes und eventueller Unterlagerungen verfügbare Lokalbodenformen (Ahrends et al., 2016) zugeordnet. Für nicht kartierte Flächen oder für Kartiereinheiten, denen keine Lokalbodenform zugeordnet werden konnte, wurde auf die Leitprofile der vorläufigen Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 (VBK50, Landesamt für Geologie und Bergwesen in Halle) für Sachsen-Anhalt zurückgegriffen. Die Leitprofile der VBK50 und die Lokalbodenformen in der Evaluierung von Ahrends et al. (2016) erzielten hinsichtlich der erzielten Gütemaße vergleichbare Ergebnisse. Die kleinräumige Variabilität der Bodenbedingungen in der 949 km² großen Testregion (incl. Moorgebiete) wird durch die Einteilung in über 19.000 Standortseinheiten (Polygone) berücksichtigt. Die Standortspolygone sind durchschnittlich 4,7 ha groß. Die nutzbare Feldkapazität (nFK) bis 100 cm Profiltiefe ist exemplarisch in Abbildung 11.2 a dargestellt.

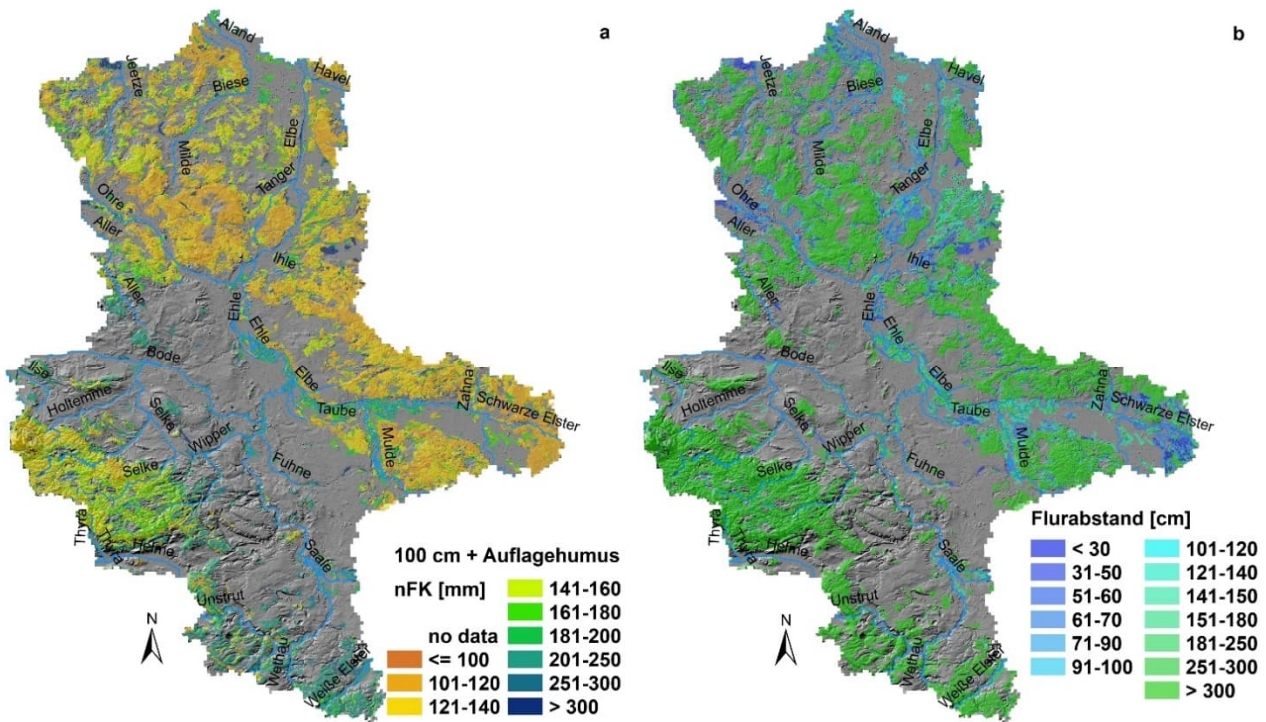


Abbildung 11.2: Nutzbare Feldkapazität aller Waldstandorte in Sachsen-Anhalt auf Basis der standortweise abgeleiteten Bodenprofile (a) und für jeden Waldstandort berechnete Grundwasserflurabstände (b), abgeleitet aus der Standortkartierung und der vorläufigen Bodenkarte für Sachsen-Anhalt (VBK 1:50.000).

11.2.3 Grundwasserflurabstände

Entscheidend für eine praxisnahe Einschätzung des Trockenstressrisikos ist die Einbeziehung von Grundwasserflurabständen. Um das Modellsystem wie in Niedersachsen (Fleck et al., 2023b) ohne Modifikationen auch für Sachsen-Anhalt anwenden zu können, wurden zunächst die Grundwasserstufen der Ostdeutschen Standortkartierung in die niedersächsischen Wasserhaushaltsziffern übersetzt (Schmidt et al., 2015). An Waldstandorten für die keine Standortkartierung und entsprechend keine Grundwasserinformationen vorliegen, wurde aus der Bodenkarte für

Sachsen-Anhalt (VBK 50 im Maßstab 1:50.000) der mittlere Grundwassertiefstand (MNGW) verwendet. Dieser beschreibt den Grundwassertiefstand im langjährigen Mittel (meist Juli bis Oktober) und somit ungefähr die Verhältnisse in der Vegetationsperiode (Fleck et al., 2015), also den Zeitraum in dem Transpirationsdefizite durch Nachlieferungen aus dem Grundwasser über den kapillaren Aufstieg ausgeglichen werden können (Abbildung 11.2 b).

11.2.4 Klimaparameter für den Zeitraum 1961-2020

Um die klimatischen Verhältnisse in den Klimanormalperioden (1961-1991; 1991-2020) und den extremen Trockenjahren (2018-2020) für die jeweiligen Flächen der Standortskartierung möglichst exakt abbilden zu können, wurden die täglichen Klimawerte der Rasterzellen (250 m x 250 m) (Wehberg & Böhner 2023) auf die Polygone übertragen (Mittelung in Abhängigkeit vom Flächenanteil). Dies erfolgte mit dem R-Package exactextractr (Baston, 2020).

11.2.5 Retrospektive Simulationen und Szenario-Modellierungen

Um den potenziellen Effekt der Baumarten bewerten zu können, wurden die Simulationen für jedes Polygon für die fünf verschiedenen Baumarten durchgeführt. Die Zeitscheiben umfassten retrospektiv und prospektiv in der Regel 30 Jahre: 1961 – 1990, 1991 – 2020, 2021 – 2050, 2051 – 2080 und 2081-2100. Zusätzlich wurden die Jahre 2018 – 2020 separat dargestellt, um die besondere Intensität der drei aufeinanderfolgenden Trockenjahre zu veranschaulichen. Es wurde bei allen Simulationen angenommen, dass sich auf jeder Standortseinheit typische, reifere Bestände von entweder Buchen, Eichen, Fichten, Kiefern oder Douglasien befinden.

Tabelle 11.1: Berechnete Ausgabegrößen für jedes Standortspolygon je Baumart und Zeitscheibe

Nr.	Ausgabegröße	gemittelt für	Einheit
1	Tagesmitteltemperatur	Jahr, Vegetationsperiode	°C
2	Tagesminimaltemperatur	Jahr, Vegetationsperiode	°C
3	Tagesmaximaltemperatur	Jahr, Vegetationsperiode	°C
4	Niederschlagssumme	Jahr, Vegetationsperiode	mm
5	Schneesumme	Jahr	mm
6	Windgeschwindigkeit	Jahr, Vegetationsperiode	m s ⁻¹
7	Globalstrahlung	Jahr, Vegetationsperiode	MJ m ⁻² d ⁻¹
8	Evapotranspirationsraten	Jahr, Vegetationsperiode	mm
9	Bodenevaporationsrate	Jahr, Vegetationsperiode	mm
10	Schneedeckenevaporationsrate	Jahr, Vegetationsperiode	mm
11	Interzeptionsraten	Jahr, Vegetationsperiode	mm
12	Sickerung	Jahr, Vegetationsperiode	mm
13	oberirdischer Abfluss	Jahr, Vegetationsperiode	mm
14	Makroporenfluss	Jahr, Vegetationsperiode	mm
15	Transpirationsrate	Vegetationsperiode	mm
16	potentielle Transpirationsrate	Vegetationsperiode	mm
17	Transpirationsdefizit	Vegetationsperiode	mm
18	Transpirationsquotient (Tratio = T/T _P)	Vegetationsperiode	mm/mm
19	Anzahl Tage mit Tratio < 0,5	Vegetationsperiode	d
20	Anzahl Tage mit Tratio < 0,8	Vegetationsperiode	d
21	längster Zeitraum mit Tratio < 0,8	Vegetationsperiode	d
22	Anzahl theoretischer Trockenjahre / 30 Jahre	30 Jahre	a
23	projizierte Wasserhaushaltsklasse	Szenario, 30 Jahre	-
24	Länge der Vegetationsperiode	Vegetationsperiode	d
25	Bodenwassergehalt (min, mittel, max)	Vegetationsperiode	%
26	Bodenwasserpotential (min, mittel, max)	Vegetationsperiode	kPa
27	pflanzenverfügbares Wasser (min, mittel, max)	Vegetationsperiode	%
28	Tage < 40% pflanzenverfügbares Wasser	Vegetationsperiode	d
29	längster Zeitraum < 40% pflanzenverfügbares Wasser	Vegetationsperiode	d
30	Tage < -120 kPa Bodenwasserpotential	Vegetationsperiode	d
31	längster Zeitraum < -120 kPa Bodenwasserpotenzial	Vegetationsperiode	d
32	Stauwassertiefe (min, mittel, max)	Vegetationsperiode	cm
33	Tage mit Stauwasser in 30 cm Tiefe	Vegetationsperiode	d
34	Tage mit Stauwasser in 60 cm Tiefe	Vegetationsperiode	d
35	längster Zeitraum mit Stauwasser in 30 cm Tiefe	Vegetationsperiode	d
36	Stauwasserklasse	30 Jahre	-

Die hydraulischen Bodeneigenschaften (Wasserretention, hydraulische Leitfähigkeit nach Mualem – van Genuchten) wurden anhand der bodenphysikalischen Angaben aus dem Merkmalsspiegel der Lokalbodenformen mit Hilfe

der Pedotransferfunktionen von Wessolek et al. (2009) abgeleitet. Die Ergebnisse umfassen für jedes einzelne Polygon eine Fülle von berechneten Ausgabegrößen, die jeweils für die berechnete Zeitscheibe gemittelt wurden, darunter Trockenheitsindizes und Stauwasserindikatoren. Einen Überblick über alle für jedes Polygon vorliegenden Ausgabegrößen liefert Tabelle 11.1. Aufgrund der in der Testregion relevanten Probleme mit der Baumart Fichte liegt der Schwerpunkt unserer Auswertungen auf den Trockenheitsindikatoren und der jeweiligen Trockenstressdisposition der Baumarten.

11.2.6 Verwendete Trockenstressindikatoren im Vergleich zur Feuchtestufe des Standortkartierung

Unter den Trockenstressindikatoren in Tabelle 11.1 ist der Transpirationsquotient am besten für die Darstellung des zukünftigen, langfristig gemittelten Trockenstressrisikos geeignet (Habel et al., 2023). Wie lässt sich der Transpirationsquotient für Zeiträume der Vergangenheit aber mit den Kategorien der Standortkartierung vergleichen? Um dies zu veranschaulichen, soll hier beispielhaft ein Vergleich von zwei Trockenstressindikatoren mit den Kategorien der Standortkartierung für die Testregion Harz (Sachsen-Anhalt) im noch wenig von Trockenjahren geprägten Zeitraum 1961-2018 durchgeführt werden. Die Beurteilung der Wassermangelsituation von Waldbeständen erfolgt dabei entweder auf Basis des Transpirationsquotienten (Nr. 11 in Tabelle 11.1) oder auf Basis der maximal aufgetretenen Dauer von extremen Trockenstress-Situationen (Nr. 28 in Tabelle 11.1), wobei letztere in diesem Fall durch Unterschreiten einer Schwelle von 40% der nutzbaren Feldkapazität im Boden des Standorts definiert werden (Bréda et al., 2006). Damit berücksichtigt dieser Indikator die Dauer der Stresseinwirkung als entscheidendes Kriterium für den Vitalitätseffekt auf die Bäume. Dagegen gibt der Transpirationsquotient gewissermaßen den Spannungszustand an, in dem sich der Baum physikalisch zwischen dem Verdunstungsanspruch der Atmosphäre (potenzielle Transpiration, T_p) und der aktuell realisierbaren Wassernachlieferung (T) befindet, also den Grad, in dem dieser Verdunstungsanspruch durch die Transpiration erfüllt werden kann. In der Modellanwendung wurde diese Größe für die Vegetationsperioden der jeweiligen Zeitscheiben gemittelt.

Für den zurückliegenden Zeitraum von 1961 – 2018, lassen sich beide Trockenstressindikatoren als Durchschnittswerte ausrechnen, um eine für den Zeitraum gültige Abschätzung des standortsbezogenen Trockenstressrisikos zu erstellen. Der Vergleich der Simulationsergebnisse im Harz (Sachsen-Anhalt) zeigt am Beispiel der Baumart Buche, dass dabei beide Indikatoren zu ähnlichen Ergebnissen in der Einschätzung der trockenstressgefährdeten Standorte kommen (Abbildung 11.3). Nur an wenigen Details sind Unterschiede erkennbar: So gibt es beispielsweise bei der Dauer von Trockenstressperioden im Süden der Testregion ein größeres zusammenhängendes Gebiet am Oberlauf von Wipper und Schmaler Wipper, in dem Stressperioden von 70-90 Tagen auftreten. Im Vergleich zu anderen Teilgebieten der Testregion ist es also stärker und vergleichsweise homogen von Trockenstress betroffen.

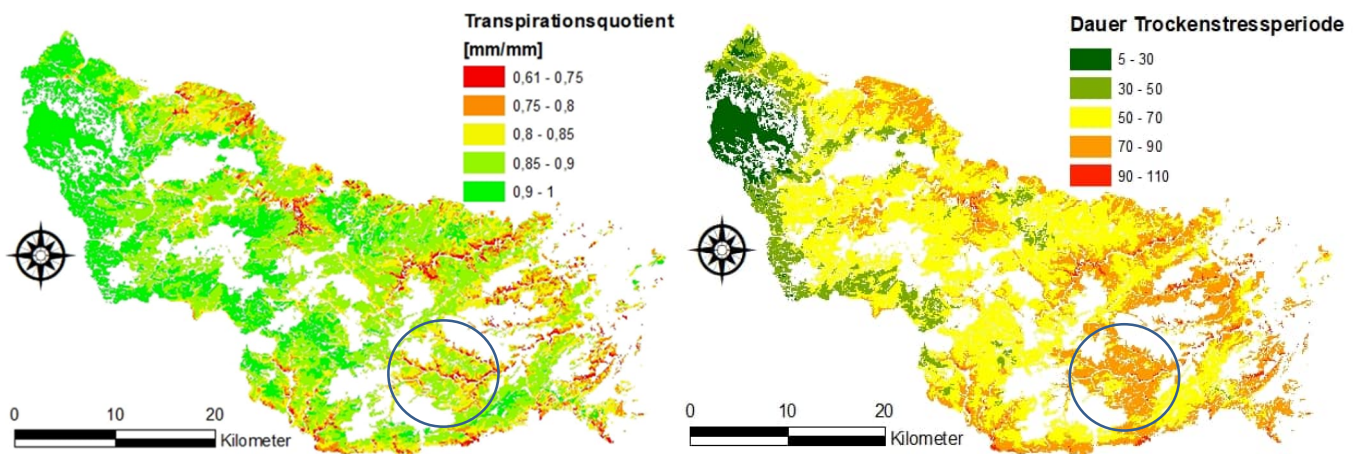


Abbildung 11.3: Mittlerer jährlicher Transpirationsquotient (links) und maximale Dauer von Trockenstressperioden mit weniger als 40 % pflanzenverfügbarem Bodenwasser (rechts) im Harz (Sachsen-Anhalt) für den Simulationszeitraum 1961-2018. Der Kreis markiert ein Beispielgebiet am Oberlauf der Wipper.

Dasselbe Gebiet ist bei Betrachtung des Transpirationsquotienten wesentlich feiner in stärker und weniger stark betroffene Bereiche untergliedert. Ein Vergleich mit den Feuchtestufen der Standortkartierung zeigt, dass diese feinere Abstufung der Standortkartierung näherkommt (Abbildung 11.4). Für die Dynamisierung der Standortkartierung im Sinne einer Anwendung für zukünftige klimatische Situationen scheint aus dieser Sicht der Transpirationsquotient die bessere Ausgangsbasis zu liefern.

Die Einstufung des Wasserhaushalts in der Standortkartierung erfolgt über die Feuchtestufe, die sich jeweils aus der Feuchte-Gruppierung und der Feuchtezahl zusammensetzt. Diese Zuordnung ist eine statische Beschreibung der aus der Lage und den Bodeneigenschaften bei den bisher üblichen Klimabedingungen zu erwartenden Wasserverfügbarkeit am Standort. Durch die Wasserhaushaltssimulationen für die Testregion sollen diese Einstufungen an das sich ändernde und das zukünftige Klima angepasst werden können.

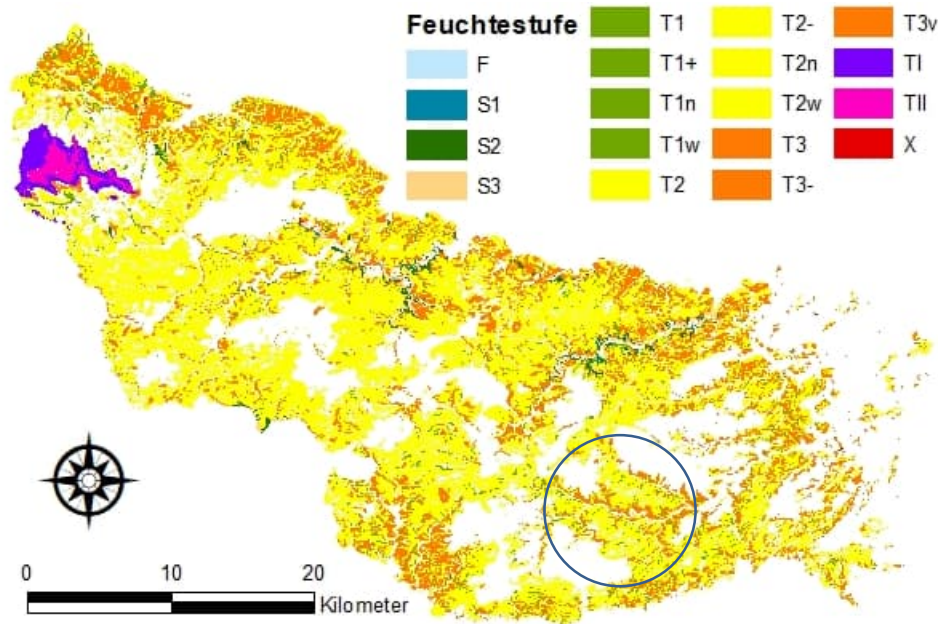


Abbildung 11.4: Feuchtestufen der Standortkartierung Sachsen-Anhalts für die Testregion Harz (Sachsen-Anhalt). Sie setzen sich aus einer Feuchtegruppierung (Buchstabe) und der jeweils zugehörigen Feuchtezahl (je höher, desto trockener) zusammen. Die Skala umfasst im Harz sehr frische, feuchte, schluchtwaldartige Standorte (F), schuttwaldartige Standorte (frisch bis trocken, S1 bis S3), frische bis trockenere Standorte (T1 bis T3 und feiner differenziert), Kammlagen-Standorte verschiedener Ausprägung (TI: geschütztere frischere, TII: ungeschütztere trockenere) und sehr trockene schuttwaldartige Standorte (X). Der größte Teil der Fläche wird dabei von den Standorten der Feuchtegruppierung T abgedeckt, so dass außerhalb der Flusstäler (hier: S1 – S3) die Farbgebung entsprechend der zu T gehörigen Feuchtezahl dominiert. Der Kreis markiert in Abbildung 11.3 und Abbildung 11.4 jeweils dasselbe Beispielgebiet am Oberlauf der Wipper.

Um den der Standortkartierung näherkommenden Indikator zu verwenden und gleichzeitig auch die Dauer von Trockenstressperioden mit einzubeziehen, wird in den folgenden Auswertungen der Transpirationsquotient als Indikator etwas abgewandelt verwendet: Es wird anstatt der Mittelung seines Werts über die Vegetationsperiode die jährliche Maximaldauer (in Tagen) von Perioden herangezogen, in denen der Transpirationsquotient durchgehend unter 0,8 gelegen hat (Fleck et al., 2022).

11.2.7 Auswahl von Klimaszenarien und -projektionen für den Harz

Die drei Klimaprojektionen MPI-CLM, ECE-RAC und CA2-CLM wurden als verschiedene mögliche Realisierungen des RCP8.5-Szenarios verwendet, in welchem eine durch den anthropogenen Treibhauseffekt bewirkte Zunahme des solaren Strahlungsantriebs in Höhe von 8,5 W/m² bis zum Ende des Jahrhunderts angenommen wird. Zusätzlich wurde je eine MPI-CLM-Projektion auf Basis der Szenarios RCP2.6 und RCP4.5 berücksichtigt, die von einer geringeren Wirkung des Treibhauseffekts ausgehen (Wehberg & Böhner, 2023). Bei allen fünf Klimaprojektionen wurde zusätzlich zu den Jahren 2021-2100 auch der zurückliegende Zeitraum 2006 bis 2020 als Hindcast berechnet.

Im Harz liegen vier dieser Klimaprojektionen bei den Temperaturen im Zeitraum 2010 bis 2020 etwa auf dem Durchschnittsniveau der Klimanormalperiode 1991 – 2020 (Abbildung 11.5 links), nur MPI-CLM RCP2.6 liegt deutlich unter diesem Niveau. Die MPI-CLM RCP2.6-Projektion zeigt daraufhin einen gewissen Anstieg in den Temperaturen bis zum Jahr 2050 und liefert danach etwa gleichbleibende Jahresdurchschnittstemperaturen, die Durchschnittstemperaturen in der Vegetationsperiode sinken nach 2050 sogar leicht ab. Dieser Verlauf der Temperaturen liegt aktuell etwa 1K unter dem Niveau der Beobachtungen.

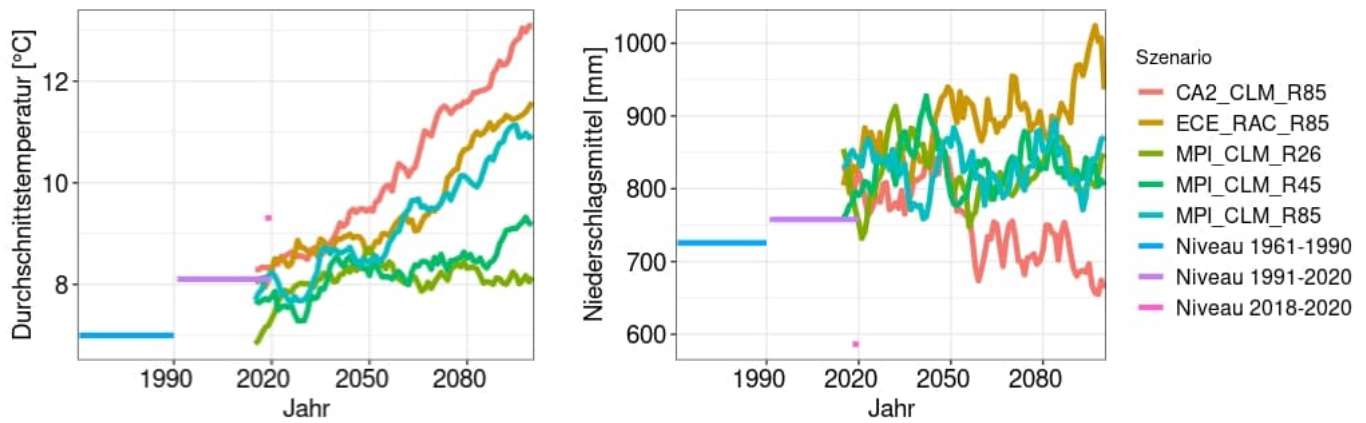


Abbildung 11.5: Jahresdurchschnittstemperatur (°C, links) und mittlerer Jahresniederschlag (mm, rechts) der 5 verschiedenen Klimaszenarien als 10-jähriger gleitender Mittelwert) im Vergleich zum Niveau der Messdaten in verschiedenen Zeitscheiben im Harz (Sachsen-Anhalt), inklusive des stark abweichenden Niveaus der Jahre 2018-2020.

Im Vergleich der Realisierungen des RCP 8.5-Szenarios ist die CA2-CLM RCP8.5-Projektion hinsichtlich der Temperaturentwicklung im Jahr 2100 etwa ein Grad wärmer als die anderen beiden RCP 8.5-Projektionen. Zugleich ist es die Projektion mit den geringsten Niederschlägen. Die ECE-RAC RCP8.5-Projektion bedeutet für den Harz dagegen relativ viel Niederschlag und die MPI-CLM 8.5-Projektion liegt hinsichtlich der Niederschlagsentwicklung etwa im Mittelfeld. Die Niederschlagsdifferenzen zwischen diesen drei Realisierungen des RCP 8.5-Szenarios werden nach 2050 wesentlich markanter (Abbildung 11.5 rechts).

Aus dem Zusammenspiel von Temperatur und Niederschlag wird in LWF-Brook90 der Schneefall als Eingangsgröße berechnet. Er hat besonders bei den Nadelbäumen eine Bedeutung für die Höhe der berechneten Interzeptionsverluste, da die Schneeinterzeption deutlich höher als die Regeninterzeption ist. Alle Projektionen bewirken eine Abnahme des Schneefalls bis zum Jahr 2100, ohne dass der Schneefall im Harz ganz ausbleibt. Nur die ECE-RAC RCP8.5-Projektion erzeugt wiederholt 10-Jahreszeiträume ohne Schneefall.

Vor dem Hintergrund einer bereits im Jahr 2022 erreichten Zunahme des solaren Strahlungsantriebs von $2,91 \text{ W/m}^2$ (Forster et al., 2023), der in den Szenarien RCP2.6 und RCP4.5 kaum oder erst Mitte der 2030er Jahren erwartet wird (Vuuren et al., 2011), werden insbesondere die Realisierungen des RCP8.5-Szenarios im Folgenden eingehender betrachtet und die weniger gut mit der aktuellen Entwicklung übereinstimmenden Projektionen auf Basis des RCP2.6 oder des RCP4.5-Szenarios werden lediglich zum Vergleich herangezogen.

Da die MPI_CLM RCP 8.5-Projektion hinsichtlich des Niederschlags zwischen den beiden anderen Realisierungen des RCP 8.5-Szenarios liegt, werden besonders die beiden extremeren Projektionen CA2_CLM RCP 8.5 als ein trockeneres und wärmeres und ECE_RAC RCP 8.5 als ein feuchteres und vergleichsweise kühleres Szenario kontrastierend in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt.

11.3 Ergebnisse

11.3.1 Trockenstressexposition der Baumarten in der Vergangenheit

Zu den sichtbaren Zeichen für Temperaturanstieg und Trockenstressexposition in der jüngsten Vergangenheit zählt das flächenhafte Absterben von Fichtenbeständen im Harz seit 2019. Es steht im Zusammenhang mit dem sich bei Wärme stärker vermehrenden Borkenkäfer, aber auch mit der Prädisposition der Fichten durch die trockenen Sommer 2018-2020, die sie besonders anfällig für Schädlingsbefall gemacht hat (Fleck et al. 2022). Wie angespannt war die Wasserhaushaltssituation für Fichten also tatsächlich und wie hat sie sich langfristig in der Vergangenheit entwickelt? Wie außergewöhnlich waren die Jahre 2018 bis 2020 in Bezug auf den Wasserhaushalt im Harz? Im Folgenden werden alle Durchschnittswerte der Standorte flächengewichtet angegeben.

In der Klimanormalperiode 1961 – 1990 hielten bei Fichtenbestockung Trockenstressphasen, die durch einen deutlich unter dem Maximalwert 1 liegenden Transpirationsquotienten gekennzeichnet sind (hier definiert durch einen Transpirationsquotienten unter 0,8) im flächengewichteten Durchschnitt aller Standorte und Jahre 3,4 Tage an. Dabei ist der Normalzustand dieser Jahre im Harz durch den Niederschlagsgradienten von Westen nach Osten geprägt: Wenn es extreme Trockenstressphasen bei Fichtenbestockung gab, so waren sie im niederschlagsreicheren

Brockengebiet in der Regel maximal einen Tag lang und auch im gesamten Ostteil des Harzes waren sie ganz überwiegend kürzer als 5 Tage (Abbildung 11.6 links). Nur ganz vereinzelt (Südhanglagen, Steilabstürze) gab es für Fichten auch Trockenstressphasen, die selbst im Durchschnitt von 30 Jahren länger als zehn Tage lang anhielten. Insgesamt handelt es sich um weniger als 1% der Standorte im Harz. Der Normalzustand vor den Klimaveränderungen bildet damit auch eine exemplarische Referenz dafür, was mit dem Schwellenwert des Transpirationsquotienten von 0,8 (Schmidt-Walter et al., 2019) gemeint ist: Es ist eine für die Klimanormalperiode 1961-1990 extreme Trockenstresssituation bei Fichten, die im Durchschnitt dieser 30 Jahre fast nirgends im Harz länger als zehn Tage angehalten hat.

Im Durchschnitt der darauffolgenden 30 Jahre (1991-2020) hat sich der Flächenanteil der Standorte mit regelmäßig besonders langen Trockenstressperioden (>10,0 Tage bei Fichtenbestockung) deutlich vergrößert und es gibt im gesamten Ostteil des Harzes typischerweise Trockenstressdauern zwischen 5 und 10 Tagen (ausgenommen Brockengebiet). Im Durchschnitt dieser 30 Jahre dauerten Trockenstressphasen 5,7 Tage.

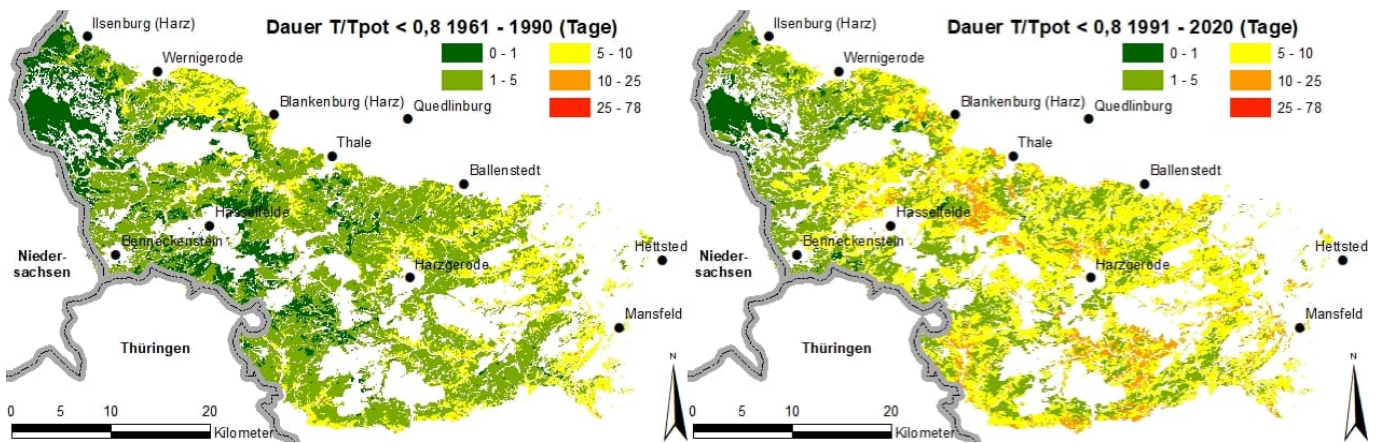


Abbildung 11.6: Mittlere Dauer der Trockenstressphasen für die Waldstandorte im Harz (Sachsen-Anhalt) bei Bestockung mit **Fichte** für die Klimanormalperiode 1961 – 1990 (links) bzw. 1991-2020 (rechts).

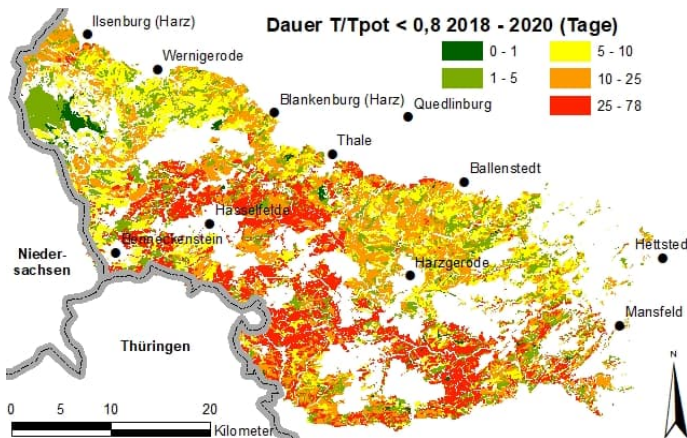


Abbildung 11.7: Mittlere Dauer der Trockenstressphasen bei Bestockung mit **Fichte** für die Jahre 2018 - 2020.

Die Bedeutung dieser Veränderung zwischen den Klimanormalperioden wird bei einer Betrachtung von Extremwerten verdeutlicht. Ein 30-jähriger Durchschnitt von 5 Tagen Trockenstress bedeutet, dass in einzelnen Jahren auch mal ein Vielfaches dieser Trockenstressdauer auftritt, wenn es in mehreren anderen Jahren gar keine extremen Trockenstressphasen gibt. Tatsächlich zählten die drei Jahre 2018-2020 innerhalb der Klimanormalperiode zu solchen extremen Jahren (Abbildung 11.7): In diesen drei Jahren nahmen Standorte mit Trockenstressphasen von 25 bis maximal 78 Tagen im Harz (Sachsen-Anhalt) etwa ein Drittel der Fläche ein und die mittlere Trockenstressdauer der drei Jahre lag bei 16,7 Tagen.

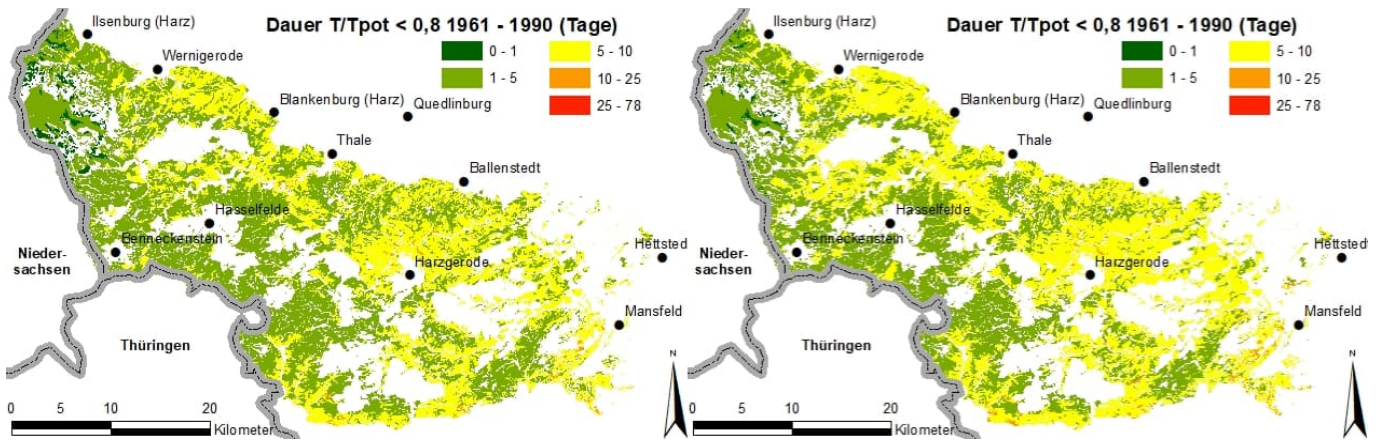


Abbildung 11.8: Mittlere Dauer der Trockenstressphasen für **Buche** (links) bzw. **Eiche** (rechts) in der Klimanormalperiode 1961-1990.

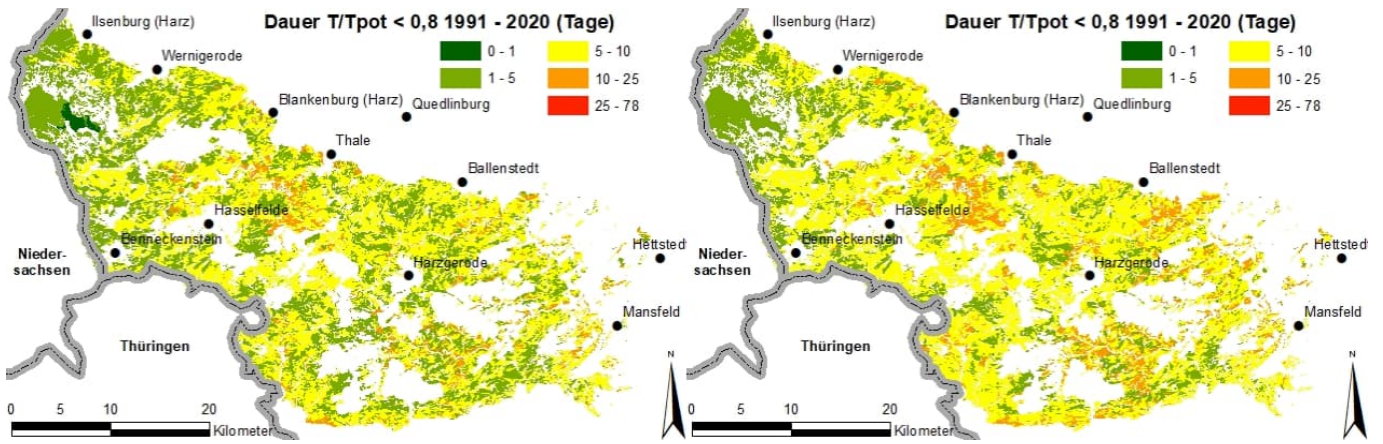


Abbildung 11.9: Mittlere Dauer der Trockenstressphasen für **Buche** (links) bzw. **Eiche** (rechts) in der Klimanormalperiode 1991-2020.

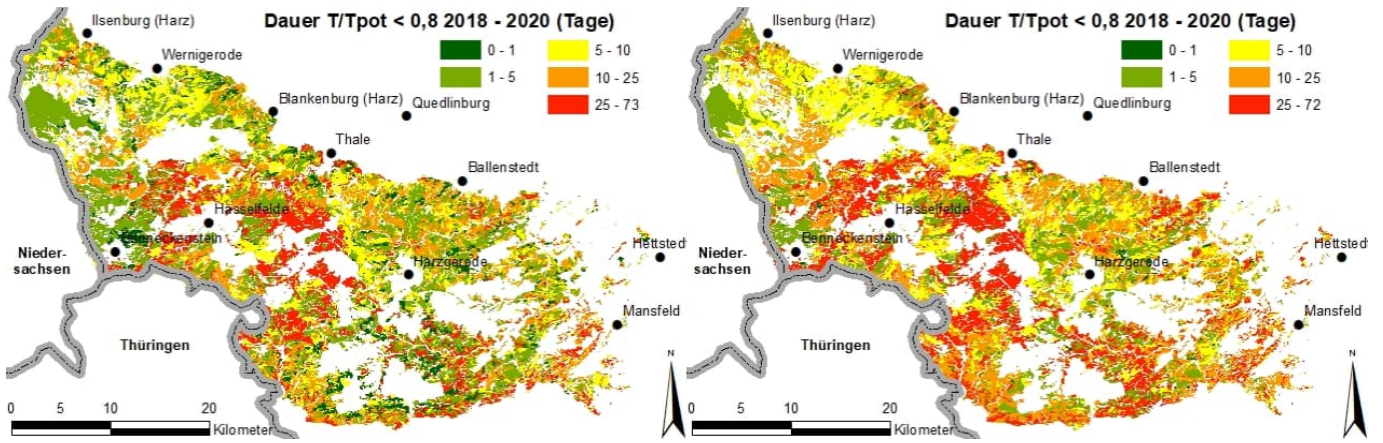


Abbildung 11.10: Mittlere Dauer von Trockenstressphasen für **Buche** (links) und **Eiche** (rechts) in den Jahren 2018-2020.

Vergleicht man die Situation der Fichte in beiden Klimanormalperioden mit der Situation der anderen vier parametrisierten Baumarten, so erkennt man, dass die besonders guten Standorte mit durchschnittlichen Trockenstressphasendauern unter einem Tag bei den beiden Laubbaumarten Buche und Eiche schon 1961 – 1990 seltener waren als bei der Fichte, wo ein so geringes Stressniveau insbesondere im Brockengebiet verbreitet vorlag (Abbildung 11.6 und Abbildung 11.8). Bei Buchenbestockung veränderte sich die durchschnittliche Trockenstressdauer von durchschnittlich 4,7 Tagen in der Zeitscheibe 1961-1990 (Abbildung 11.8 links) auf einen Wert von 5,9 Tagen 1991 – 2020 (Abbildung 11.9 links). Auch bei der Eiche hat sich die typische Dauer von Trockenstressphasen zwischen beiden Klimanormalperioden erhöht, von 5,1 Tagen auf 6,7 Tage. Die Eichen waren zum Ende der Klimanormalperiode 1991-2020 im Durchschnitt etwas höheren Trockenstressphasendauern aus der Vergangenheit ausgesetzt als die Buchen. In den Dürre Jahren 2018 – 2020 erfuhren Laubbaumbestände im Harz durchschnittlich etwas kürzere Trockenstressperioden als Fichtenbestände am gleichen Standort (Buche 13,0 Tage, Eiche 16,6 Tage). Dabei war die

Trockenstressdauer bei Eichenbeständen durchschnittlich länger als bei Buche, während sie auf den trockensten Standorten etwa genauso lang war wie bei Buche (Buche 73,0 Tage, Eiche 71,4 Tage) und geringer als bei Fichtenbestockung (77,3 Tage).

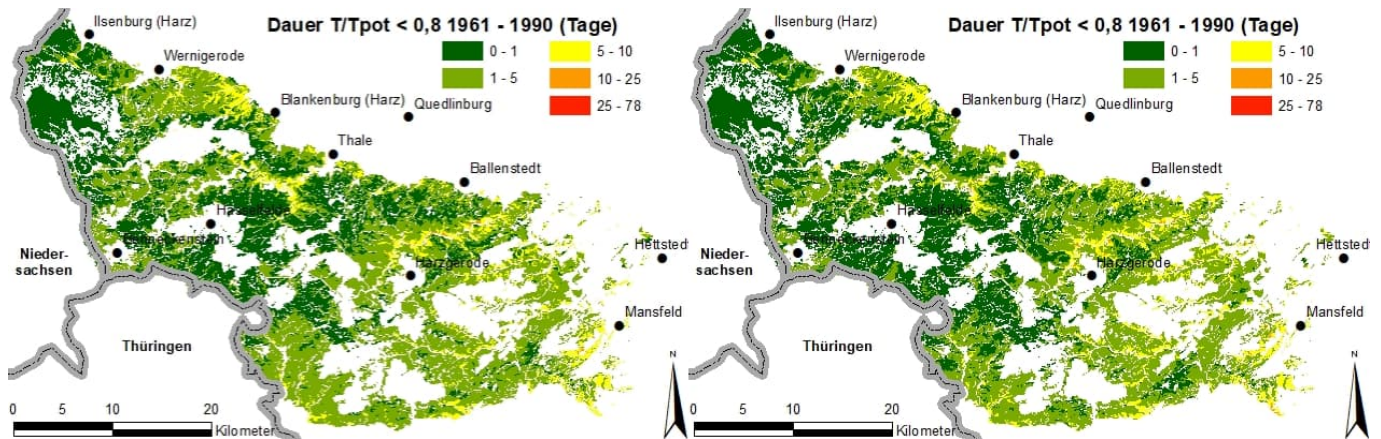


Abbildung 11.11: Mittlere Dauer von Trockenstressphasen für Kiefer (links) bzw. Douglasie (rechts) in der Klimanormalperiode 1961-1990 .

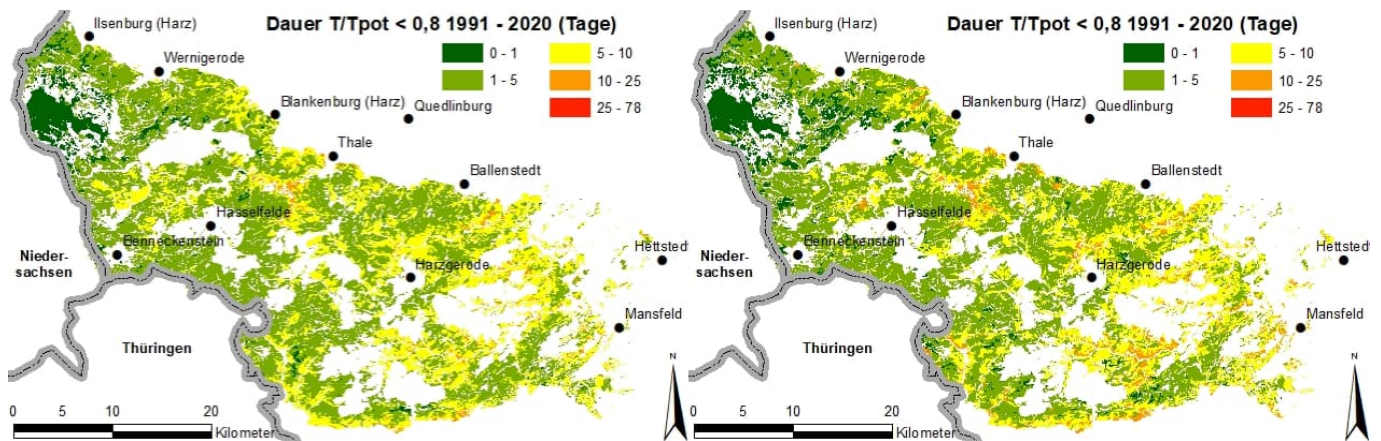


Abbildung 11.12: Mittlere Dauer von Trockenstressphasen für Kiefer (links) bzw. Douglasie (rechts) in der Klimanormalperiode 1991-2020.

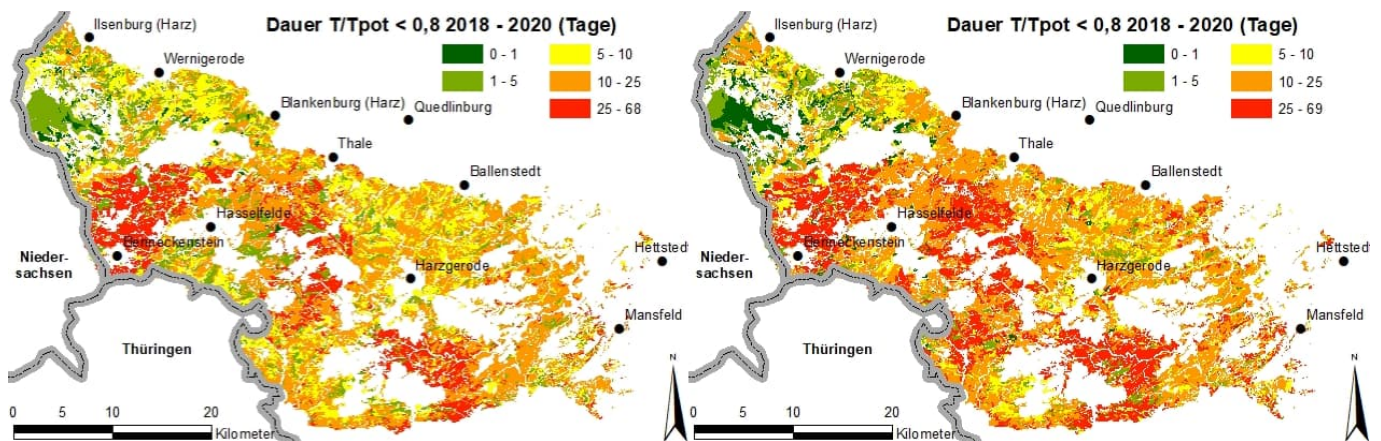


Abbildung 11.13: Mittlere Dauer von Trockenstressphasen für Kiefer (links) bzw. Douglasie (rechts) in den Jahren 2018-2020.

Die beiden anderen Nadelbaumarten Kiefer und Douglasie sind von extremen Trockenstressphasen schon 1961 - 1990 weniger betroffen als die Fichte (Abbildung 11.11) und blieben auch im Zeitraum 1991 – 2020 unter der für Fichten berechneten Trockenstressexposition (Abbildung 11.12). Dennoch hat sich die Dauer von Trockenstressphasen auch bei Kiefer und Douglasie zwischen dem Zeitraum 1961 – 1990 und dem Zeitraum 1991– 2020 annähernd verdoppelt (Kiefer: 1,9 Tage auf 4,1 Tage, Douglasie: 2,0 Tage auf 4,3 Tage). Überwiegend im Brockengebiet und an einigen wenigen Einzelstandorten ist die Trockenstressexposition der Kiefern in beiden Zeitscheiben mit 0 – 1 Tagen konstant kurz geblieben. Bei der Douglasie (im Vergleich zur Kiefer) gibt es außerhalb des Brockengebiets

einige zusätzliche Standorte, bei denen sich die kurze Trockenstressexposition von bis zu einem Tag zwischen beiden Klimanormalperioden noch kaum verändert hat. Der allergrößte Teil solcher 1961 – 1990 noch sehr günstige Standorte fällt in der folgenden Klimanormalperiode (1991 – 2020) aber auch bei Douglasienbestockung in die Kategorie Trockenstressdauer von 1 – 5 Tagen.

In den Dürre Jahren 2018-2020 waren Kiefernbestände von allen Nadelbaumbeständen der kürzesten mittleren Trockenstressdauer ausgesetzt (14,4 Tage, Abbildung 11.13), während Douglasienbestände mit 17,9 Tagen im Durchschnitt längere Trockenstressphasen überstehen mussten als Fichten (16,7 Tage, Abbildung 11.11 und Abbildung 11.7). Trotz der hohen mittleren Trockenstressdauer wurden an den trockensten Standorten aber von Kiefer (67,3 Tage) und Douglasie (69,0 Tage) geringere Trockenstressdauern erreicht als bei Fichtenbestockung (77,3 Tage).

11.3.2 Zukünftige Trockenstressexposition auf Basis der Klimaszenarien (Fichte)

In der MPI_CLM RCP 2.6-Projektion wird das Maximum des anthropogen bedingten zusätzlichen Strahlungsantriebs schon im Jahr 2040 erwartet, danach wird von einer allmählichen Abschwächung des Treibhauseffekts ausgegangen. Dementsprechend gehen in diesem Szenario auch die projizierten Trockenstressbelastungen z.B. bei der Fichte schon in der Zeitscheibe 2021 bis 2050 zurück, wenn man sie mit der aktuellen Situation aus der Klimanormalperiode 1991-2020 vergleicht: Die als Trockenstressindikator verwendete jährliche Maximaldauer von Trockenstressphasen mit einem Transpirationsquotienten unter 0,8 dauerte demnach im Mittel der Jahre 2021 bis 2050 schon fast nirgends länger als 10 Tage. Noch besser wäre die Lage aufgrund dieses Szenarios im Zeitraum 2051 – 2080.

Die mittlere Trockenstressexposition der Fichte ist unter den Annahmen der MPI-CLM RCP 8.5-Projektion in beiden zukünftigen 30-Jahreszeiträumen nicht heftiger als in der Klimanormalperiode 1991-2020, es zeigt sich im Vergleich zur realen Situation der Klimanormalperiode 1991-2020 (Abbildung 11.6) sogar oft eine reduzierte Dauer von Trockenstressphasen. Für die Periode 2021 – 2050 resultiert bei diesem Szenario eine mittlere Trockenstressdauer von 2,2 Tagen und für die Periode 2051 – 2080 werden 3,1 Tage berechnet.

Die ECE-RAC RCP 8.5 -Projektion geht im Harz von einem bis 2050 noch moderaten, allmählichen Temperaturanstieg im Vergleich zum Durchschnitt der Klimanormalperiode 1991-2020 aus, der sich erst nach 2050 verstärkt, während die Niederschläge in den Jahren 2021-2050 um ca. 15% über der Klimanormalperiode 1991-2020 liegen.

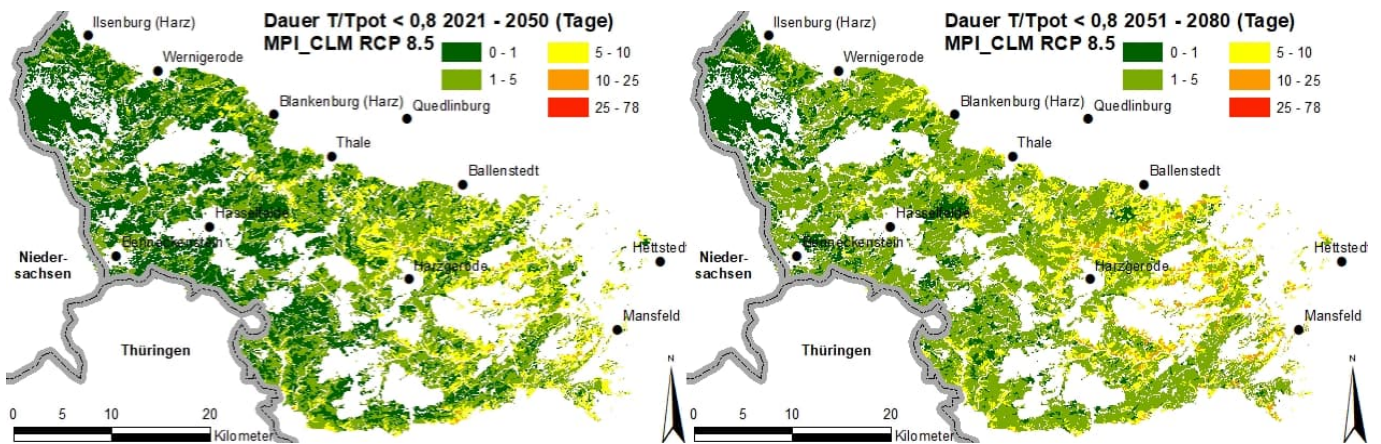


Abbildung 11.14: Projizierte Dauer von Trockenstressphasen für die Baumart **Fichte** auf Basis des MPI-CLM RCP 8.5-Szenarios für die Zeitscheiben 2021-2050 (links) und 2051-2080 (rechts).

Die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt sind in der Zeitscheibe 2021-2050 noch sehr begrenzt, der Effekt sich leicht erhöhender Temperaturen wird hier durch den Effekt angestiegener Niederschläge ausgeglichen, so dass die mittlere Dauer von Trockenstressphasen mit 4,9 Tagen in etwa auf dem Niveau der Klimanormalperiode 1991-2020 liegt (Abbildung 11.15 und Abbildung 11.6). Erst in der Periode 2051-2080 wird auf Basis des Szenarios mit deutlicheren Auswirkungen des Klimawandels zu rechnen sein, in dem Sinne, dass dann die Trockenstressphasen bei der Baumart Fichte im Ostharz überwiegend länger als 10 Tage andauern. Zugleich bleibt das Brockengebiet in diesem Szenario auch 2015-2080 noch von klimawandelbedingten Trockenstressrisiken weitgehend verschont, so dass im Mittel eine Trockenstressdauer von 7,1 Tagen resultiert.

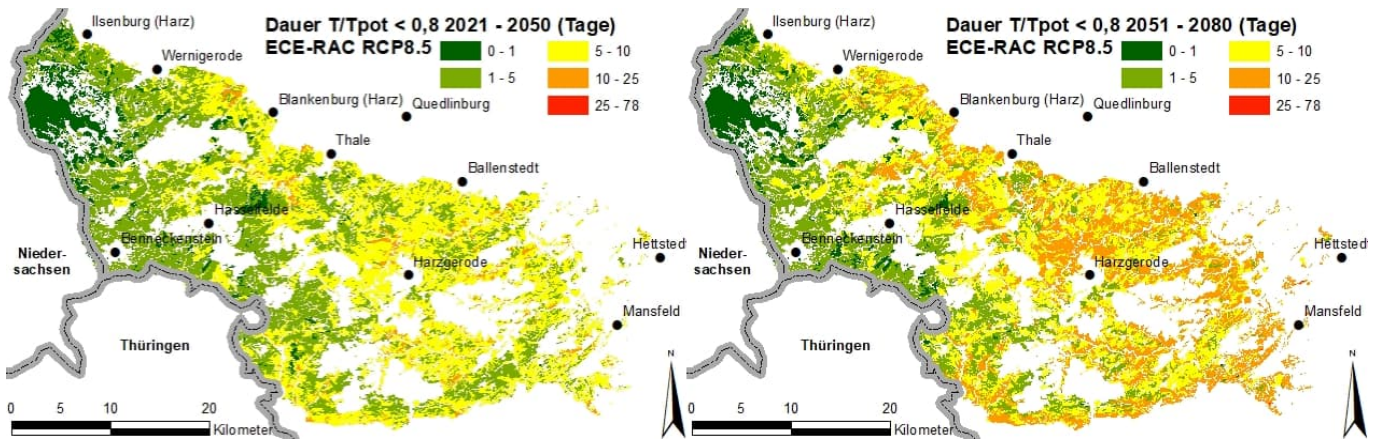


Abbildung 11.15: Projizierte Dauer von Trockenstressphasen für die Baumart **Fichte** auf Basis des ECE-RAC RCP 8.5-Szenarios für die Zeitscheiben 2021-2050 (links) und 2051-2080 (rechts).

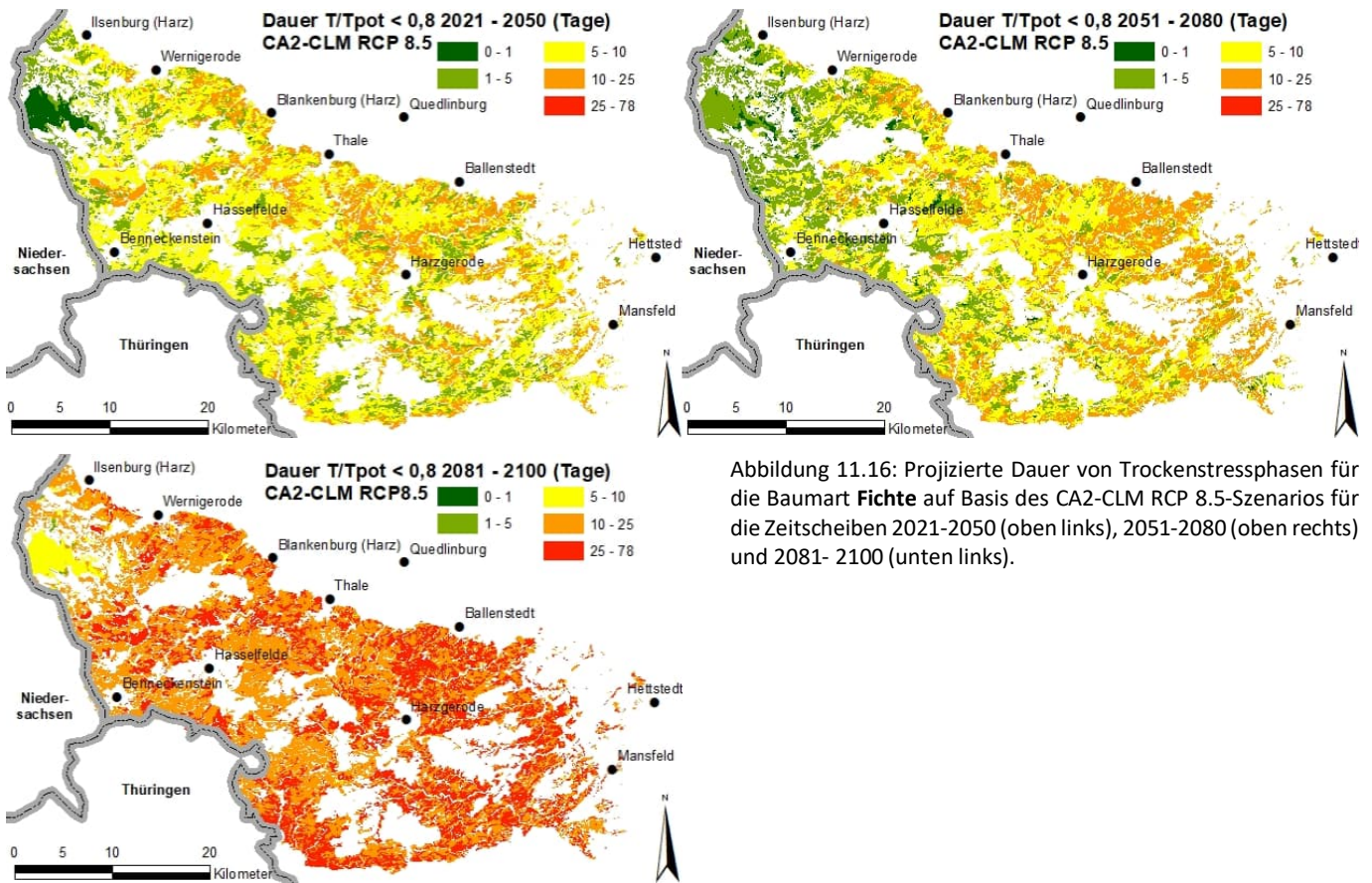


Abbildung 11.16: Projizierte Dauer von Trockenstressphasen für die Baumart **Fichte** auf Basis des CA2-CLM RCP 8.5-Szenarios für die Zeitscheiben 2021-2050 (oben links), 2051-2080 (oben rechts) und 2081- 2100 (unten links).

Im Vergleich zur Klimanormalperiode 1991-2020 ist die CA2-CLM RCP8.5-Projektion unter allen betrachteten Projektionen die Einzige, die schon in der Zeitscheibe 2021-2050 einen deutlichen Temperaturanstieg annimmt bei gleichzeitig während den Vegetationsperioden abnehmenden Niederschlägen (Abbildung 11.5). Diese Situation ist aus der realen Entwicklung der extremen Jahre 2018-2020 bekannt. Nach 2050 verschärft sich die Abnahme der Niederschläge im Szenario weiter und es kommt zu einem noch stärkeren Temperaturanstieg. Bei diesem Szenario ist in der Zeitscheibe 2021-2050 mit einer Zunahme der Standorte zu rechnen, auf denen Fichtenbestände im 30-Jahresdurchschnitt länger als 10-tägigen extremen Trockenstressphasen ausgesetzt sind (im Mittel: 7,5 Tage). Diese Entwicklung würde sich dann in der Zeitscheibe 2051-2080 noch leicht verstärken (7,6 Tage). Hiervon wäre dann nicht nur der Ostharz sondern auch das Brockengebiet betroffen (Abbildung 11.16). Im Zeitraum 2081-2100 wird dann mit einer drastischen Zunahme der Dauer extremer Trockenstressphasen im Ostharz gerechnet – etwa 40% der Standorte erführen dort länger als 25 Tage anhaltende extreme Trockenstressphasen, im Mittel würden sie 22,2 Tage andauern. An den am stärksten betroffenen Standorten würden für diese Zeitscheibe gemittelte Extremtrockenstressdauern von 40 Tagen erreicht.

11.3.3 Zukünftige Trockenstressexposition anderer Baumarten im CA2-CLM RCP 8.5-Szenario

Das CA2-CLM RCP 8.5-Szenario führt von allen Szenarien im Harz zu den längsten Trockenstressexpositionen bei der Fichte. Auch für die anderen Baumarten führt dieses Szenario zu den längsten Trockenstressphasen. Über alle Standorte im Harz (Sachsen-Anhalt) und über die Jahre 2051 - 2080 gemittelt dauern die Trockenstressphasen bei Buche etwa 7,7 Tage und bei Eiche 8,2 Tage und damit noch etwas länger als bei der Fichte (7,6 Tage). Dabei sind bei beiden Laubbaumarten die Standorte in der Mitte und am nördlichen Rand des Ostharzes problematischer als der Ostrand des Gebirges, wo besonders bei Fichtenbestockung sehr lange Trockenstressphasen zu erwarten sind. Bei Kiefer (6,8 Tage) und Douglasie (7,3 Tage) ist die räumlich und für die Zeitscheibe gemittelte Trockenstressdauer dagegen kürzer als bei Fichtenbestockung. Bei beiden Baumarten gibt es auch 2051-2080 in diesem Szenario noch Standorte im Brockengebiet, bei denen die längsten Extremtrockenstressphasen im 30-jährigen Durchschnitt weniger als einen Tag lang anhalten.

11.4 Diskussion

Die Wahl des hier verwendeten Trockenstressindikators beruht auf Ähnlichkeiten zwischen der standörtlichen Differenziertheit des Transpirationsquotienten für die Jahre 1961-2018 und den relativen Abstufungen der Standortskartierung, in denen die jüngsten Trockensommer noch keine Bedeutung für die Wasserhaushaltseinstufung durch die Standortskartierung oder das Modellsystem hatten (Abbildung 11.3 und Abbildung 11.4). Eine Einschätzung der Dauer von Trockenstressperioden allein auf Basis der relativen Bodenwasserverfügbarkeit war mit den Abstufungen der Standortskartierung schlechter vergleichbar, obwohl ein so definierter Trockenstressindikator bekanntermaßen relevant für Schäden und das Absterben von Bäumen ist (Bréda et al., 2006).

Durch die Wahl des Transpirationskoeffizienten berücksichtigt der Trockenstressindikator nicht nur die Bodenwasserverfügbarkeit, sondern auch den Feuchtegradienten zwischen Boden und Luft, der bei hoher Luftfeuchtigkeit gegebenenfalls das Entstehen von Schäden trotz bestehenden Wassermangels im Boden verhindern kann. Als wichtiger weiterer Faktor für das Entstehen von Schäden wurde das Andauern von Trockenstress-Situationen identifiziert (McDowell et al., 2008). Diese zeitliche Dimension geht in den gewählten Indikator dadurch ein, dass nur die besonders relevanten Trockenstressphasen mit einem Transpirationsquotienten unter 0,8 betrachtet werden und ihre Maximaldauer innerhalb eines Jahres als Kriterium verwendet wird.

Die so berechneten Trockenstressdauern auf der Basis von beobachteten Klimadaten für vergangene Zeiträume im Harz (Sachsen-Anhalt) belegen, dass es eine Zunahme der Stressexposition bei allen Baumarten schon zwischen den Zeitscheiben 1961-1990 und 1991-2020 gegeben hat. Selbst wenn man von der aktuellen Klimanormalperiode nur die Jahre 1991 – 2018 betrachtet, um den Sondereffekt der Trockenjahre 2018, 2019 und 2020 auszuschließen, haben sich die Trockenstressdauern bei allen Baumarten im Zeitraum von 30 Jahren deutlich erhöht. Die Verlängerung der durchschnittlichen Trockenstressdauern fand bei Kiefern und Douglasien auf einem niedrigeren Niveau als bei der Fichte statt, während die Laubbaumarten Buche und Eiche von vorneherein einem höheren Niveau der Trockenstressexposition ausgesetzt waren. So erreichten Kiefer und Douglasie in der aktuellen Klimanormalperiode 1991 - 2020 nur eine etwas höhere Trockenstressexposition (4,1 – 4,3 Tage), als die Fichte im Zeitraum 1961 – 1990 (3,4 Tage). Bei der Fichte im Harz stieg die Trockenstressexposition danach auf einen 68% höheren 30-Jahres-Durchschnittswert (5,7 Tage). Dieses Niveau der Trockenstressexposition erreichte auch die Buche (5,9 Tage), sie war – wie die Eiche – allerdings auch schon im Zeitraum 1961 – 1990 an ein höheres Trockenstressniveau adaptiert (4,7 Tage bzw. 5,1 Tage). Auch bei der Eiche, die von allen Baumarten die höchste Trockenstressexposition erreicht hat (6,7 Tage), ist der Anstieg mit +31% in 30 Jahren beachtlich, aber nicht so drastisch wie bei der Fichte im Harz. Möglicherweise kann die mehrjährige Adaption von Wurzelsystem und Wassertransportsystem an das lokale Klima (Bréda et al. 2006) bei allmählicher Erhöhung des Trockenstressniveaus die Vulnerabilität der Baumarten wirkungsvoller verringern als bei abrupten Veränderungen.

Die Grundlage der hier berichteten Unterschiede zwischen den Baumarten liegen in den im Modell verwendeten Baumarteneigenschaften, insbesondere der Gesamtblattfläche (Blattflächenindex), der maximalen Blattleitfähigkeit und der Durchwurzelungstiefe, aber auch anderen Eigenschaften, die aus Messdaten artspezifisch abgeleitet wurden (Weis et al. 2023). Zum Nachteil der Fichte hat sich dabei insbesondere ihr hoher Blattflächenindex bei einer geringen Durchwurzelungstiefe erwiesen. Der hohe Blattflächenindex führt zu hohen unproduktiven Interzeptionsverlusten in Form von Regen- und Schneeverdunstung (Ahrends et al., 2013). Zusätzlich verursacht die hohe Blattfläche einen erhöhten Wasserbedarf für die Transpiration (vgl. Fleck et al., 2022).

Die Trockenstressdauer der Trockenjahre 2018 – 2020 war im Vergleich zu den 30-Jahres-Durchschnittswerten der Vergangenheit bei allen Baumarten außerordentlich hoch. Die Ursache dafür waren ungewöhnlich geringe Niederschläge während der Vegetationsperioden der drei Jahre, die im Mittel der drei Vegetationsperioden nur 220 mm betragen. (Abbildung 11.5). Nicht in allen Projektionen wird eine ebenso kritische Situation auch für die Zukunft angenommen: Während in der CA2-CLM RCP8.5-Projektion ein ähnlicher 3-Jahreszeitraum mit unter 220 mm Vegetationsperioden-Niederschlag schon in der ersten modellierten Zeitscheibe von 2021 – 2050 enthalten ist und weitere solcher Zeiträume in den darauffolgenden Zeitscheiben folgen, enthält keine der anderen Projektionen einen vergleichbar kritischen 3-Jahreszeitraum. Nur in der MPI-CLM RCP8.5-Projektion gibt es in der Zeitscheibe 2051-2080 einen 2-jährigen Zeitraum mit durchschnittlich weniger als 220 mm Niederschlag in den Vegetationsperioden, ansonsten gibt es aber in jeder der Projektionen Einzeljahre, die dieses Kriterium erfüllen und damit den Trockenjahren 2018-2020 ähnlich sind.

Für die zukünftige Entwicklung geht insbesondere die CA2-CLM RCP8.5-Projektion davon aus, dass es bei weiter ansteigenden Temperaturen auch gleichzeitig zurückgehende Niederschläge im Harz geben könnte. Für die Trockenstressexposition der Baumarten im Harz wäre dies die kritischste Entwicklung, sie würde zu einer bei allen Baumarten kontinuierlich zunehmenden Dauer von Trockenstressphasen führen, die bei den Nadelbaumarten bis zur Zeitscheibe 2051 – 2080 im Mittel zu mehr als doppelt so langen Trockenstressphasen führt wie in der Klimanormalperiode 1961-1990. Bei den Laubbaumarten, die schon 1961-1990 an längere Extremtrockenstressphasen adaptiert sein konnten, würden diese sich um über 60% im Vergleich zu 1961-1990 verlängern (Tabelle 11.2).

Tabelle 11.2: Mittlere jährliche Maximaldauer von Trockenstressphasen als Mittelwert aller Standorte im Harz (Sachsen-Anhalt) für die jeweiligen Zeitscheiben.

	Eiche	Buche	Fichte	Kiefer	Douglasie
1961 - 1990	5,1	4,7	3,4	1,9	2,0
1991 - 2020	6,7	5,9	5,7	4,1	4,3
2018 - 2020	15,0	12,0	16,7	14,4	17,9
2018 – 2020 Standortmaximum	73,0	71,4	77,3	67,3	69,0
2021 – 2050 CA2-CLM RCP8.5	8,0	7,3	7,5	6,9	6,6
2021 – 2050 ECE-RAC RCP8.5	6,1	5,7	4,9	3,0	2,2
2021 – 2050 MPI-CLM RCP8.5	3,5	2,9	2,4	1,8	1,4
2021 - 2050 MPI-CLM RCP4.5	5,8	5,0	3,7	2,3	2,1
2021 – 2050 MPI-CLM RCP2.6	3,4	3,2	2,4	1,5	1,7
2051 – 2080 CA2-CLM RCP8.5	8,2	7,7	7,6	6,8	7,3
2051 – 2080 ECE-RAC RCP8.5	7,1	6,7	7,1	4,1	4,7
2051 – 2080 MPI-CLM RCP8.5	4,2	3,7	3,1	2,0	2,2
2051 – 2080 MPI-CLM RCP4.5	4,7	4,0	3,2	2,5	2,2
2051 – 2080 MPI-CLM RCP2.6	4,2	3,6	2,9	2,0	1,8
2081 – 2100 CA2-CLM RCP8.5	17,1	16,3	22,6	24,1	25,6
2081 – 2100 ECE-RAC RCP8.5	6,6	5,8	6,8	5,2	6,2
2081 – 2100 MPI-CLM RCP8.5	7,5	6,7	7,3	6,0	6,2
2081 – 2100 MPI-CLM RCP4.5	4,9	4,4	3,2	2,8	2,7
2081 – 2100 MPI-CLM RCP2.6	4,2	3,7	3,3	2,3	2,3

In der Vergangenheit hat es die im CA2-CLM RCP8.5-Szenario angenommene Entwicklung (zunehmende Temperatur und abnehmende Niederschläge) im 30-Jahresvergleich der beiden Klimanormalperioden im Harz aber nicht gegeben, stattdessen nahmen sowohl die Temperatur als auch die Niederschläge zu (Abbildung 11.5). Ein Szenario, das diese aus der Vergangenheit bekannte Tendenz enthält, ist das ECE-RAC RCP8.5-Szenario. Es führt aber trotz der höheren Niederschläge zu nur wenig abgemilderten Entwicklungen bei der Trockenstressexposition, so dass z.B. bei der Fichte immer noch mehr als eine Verdopplung der Trockenstressdauern erwartet würde (Tabelle 11.2). Nur bei den Annahmen der MPI-CLM RCP8.5-Projektion, dass die Temperatur in der Vegetationsperiode nicht ganz so schnell ansteigt wie bei den anderen beiden Szenarien und der Niederschlag aber auch nicht ganz so stark zunimmt, wäre bis zur Zeitscheibe 2051-2080 mit einem abgemilderten Verlauf der zukünftigen Trockenstressexposition zu rechnen (Abbildung 11.14). Erst zum Ende des Jahrhunderts würden in diesem Szenario Trockenstressdauern erreicht, die etwa einer Verdopplung der Trockenstressdauern gegenüber 1961-1990 bedeuten und damit auch deutlich über denen der aktuellen Klimanormalperiode 1991 – 2020 liegen würden.

Im Unterschied zu diesen 3 Projektionen auf Basis des RCP 8.5-Szenarios führen die MPI-CLM-Projektionen des RCP4.5 und des RCP2.6-Szenarios zu einer wesentlich weniger kritischen und positiven Entwicklung: Das RCP2.6-

Szenario verursacht zu keiner Zeit und bei keiner Baumart höhere Trockenstressdauern als die 1991-2020 beobachteten Werte und fast immer auch zu kürzeren Trockenstressdauern als in den Jahren 1961-1990. Mit etwas längeren Trockenstressdauern gilt dasselbe ganz genauso auch für die MPI-CLM RCP4.5-Projektion.

Für die Interpretation dieser Zahlen ist bei allen 30-Jahresmittelwerten zu beachten, dass sie auf der Basis eines räumlichen Mittelwerts über alle Standorte im Harz einen zeitlichen Mittelwert bestimmen. Sie beruhen damit auch auf extremeren Jahren, die bei der Mittelwertbildung von weniger extremen Jahren ausgeglichen wurden und enthalten sowohl Standorte, die hinsichtlich Wasserbindung und Lageparametern trockenstressgefährdet sind als auch solche, die weniger trockenstressgefährdet sind. So liegt die Trockenstressexposition der drei besonders trockenen Jahre 2018 – 2020 bei allen Baumarten um mehr als 100% über dem 30-Jahres-Mittelwert für die Klimanormalperiode 1991 – 2020, die diese drei Jahre einschließt (Tabelle 11.2). Dass die drei Jahre im Mittel je nach Baumart 12 bis 18 Tage lange Maximaldauern von Trockenstressphasen aufwiesen, bedeutet im Falle ihrer jeweils trockensten Standorte, dass dort extremer Trockenstress zwischen 67 Tagen und 78 Tagen angehalten hat.

In der Zeitscheibe 2051-2080 werden an den extremsten Standorten im Harz 30-Jahresmittelwerte der Trockenstressdauer erreicht, die je nach Szenario ein Vielfaches des räumlichen Mittelwerts für die Testregion betragen: Bei den MPI-CLM-Szenarien liegen diese für Fichte zwischen 12,8 Tagen (MPI-CLM RCP4.5) und 18,1 Tagen (MPI-CLM RCP8.5), im ECE-RAC RCP8.5-Szenario bei 28,4 Tagen und im CA2-CLM RCP8.5-Szenario bei 24,2 Tagen.

Für die Forstplanung im Harz (Sachsen-Anhalt) lassen sich hieraus mehrere Schlussfolgerungen ableiten:

1. Bei Einhaltung des 2°C-Ziels (RCP2.6-Szenario) ist bei allen Baumarten mit einer Verringerung der Trockenstressexposition im Vergleich zur Klimanormalperiode 1991-2020 zu rechnen, bei vielen Baumarten wird dann etwa die von der Klimanormalperiode 1961-1990 bekannte Trockenstressdauer erwartet.
2. Bei leichter Überschreitung des 2°-Ziels (RCP4.5-Szenario) ist immer noch eine Verbesserung der Situation im Vergleich zur Klimanormalperiode 1991-2020 möglich. Auch hier lägen die Trockenstressdauern zumeist auf dem Niveau von 1961 – 1990, lediglich bei Kiefer und Douglasie würde dieses Niveau leicht überschritten.
3. Bei deutlicher Verfehlung des 2°-Ziels (RCP8.5-Szenario) ist die Entwicklung je nach Projektion unterschiedlich zu beurteilen. Bei der damit verbundenen Temperaturerhöhung von über 4°C kommt es sehr darauf an, wieviel Niederschlag und in welcher zeitlichen Verteilung fallen wird. Die 3 Projektionen des RCP 8.5-Szenarios spannen hier einen weiten Möglichkeitsraum auf, der bis zum Jahr 2100 mindestens eine deutliche Verschlechterung im Vergleich zu 1991-2020 bedeutet, die insbesondere die Nadelbäume betrifft (ECE-RAC RCP8.5). Wenn diese im Mittel mildeste Variante Realität würde, wären allerdings die trockensten Standorte in höherem Maße von der Verschlechterung betroffen als in den beiden anderen Projektionen. Die andere Grenze des Möglichkeitsraums bedeutet, dass Trockenjahre mit so geringen bzw. noch weitaus geringeren Niederschlägen als 2018-2020 bis zum Jahr 2100 zum Normalfall würden (CA2-CLAM RCP8.5). Die Folge wären Trockenstressdauern, die sich im Vergleich zu 1991-2020 auf das drei- bis sechsfache verlängern würden.
4. In allen Projektionen des RCP8.5-Szenarios wird für die Nadelbäume eine stärkere Verschlechterung der Wachstumsbedingungen erwartet als für die Laubbäume. Im Vergleich der Nadelbaumarten ist die Fichte in den niederschlagsreicheren Projektionen (MPI-CLM RCP8.5 und ECE-RAC RCP 8.5) die Baumart, die bis 2100 den höchsten Trockenstressdauern ausgesetzt wäre. Im Falle einer Realisierung des CA2-CLM RCP8.5-Szenarios lägen dagegen die Trockenstressdauern bei allen Nadelbaumarten weit über denen der aus den Jahren 2018 – 2020 bekannten Extrembedingungen. Die Fichte im Harz hätte allenfalls im Brockengebiet und bis zur Zeitscheibe 2051 - 2080 noch relativ günstige Wachstumsbedingungen, die allerdings mit höheren Trockenstressdauern verbunden wären als bei Kiefer oder Douglasie.

Insbesondere der Vergleich der Baumarten wird stark durch die Besonderheiten einzelner Jahre beeinflusst, da schon einzelne extreme Jahre ausschlaggebend für die baumartspezifischen Schäden sein können – es ist daher besonders wichtig, auch die Wirkung von Jahren mit extremen Bedingungen in der Planung zu berücksichtigen (Ahrends, Weis et al., 2023).

11.5 Literatur

- Ahrends, B., Heitkamp, F., Buresch, M., Evers, J., Hentschel, S., Bialozyt, R. & Meesenburg, H. (2023) Neue Herausforderungen an das Waldmanagement: Möglichkeiten und Grenzen des "Digital Soil Mapping" bei der Bereitstellung flächenhafter Datensätze für die Forstplanung am Beispiel von Hessen Allg. Forst- u. J.-Ztg., 192, 193-218.
- Ahrends, B., Hafner, S., Evers, J., Steinicke, C., & Meesenburg, H. (2016). Regionalisierung bodenphysikalischer Parameter für Waldstandorte in Sachsen-Anhalt – Unsicherheitsbetrachtung an Standorten verschiedener Umweltmessnetze. In Gefährdungen der Ökosystemdienstleistungen von Wäldern. Fachtagung vom 9. Bis 10. Oktober 2014 in Göttingen (Bd. 14). Universitätsverlag Göttingen.
- Ahrends, B., Meesenburg, H., Wagner, M., Scheler, B., & Fleck, S. (2013). Interzeption in Wäldern—Einfluss der Bestandesstruktur. Ausgleichs- und Reaktorfunktionen von Waldböden im Stoff- und Wasserkreislauf : FVA-Kolloquium in Freiburg am 4. - 5. Oktober 2012, 96, 37–55.
- Ahrends, B., Panfyorov, O., Czajkowski, T., Döring, C., Jansen, M., & Bolte, A. (2009). Bundesweiter standortsbezogener Modellierungsansatz zur Abschätzung von Trockenstress ausgewählter Baumarten unter den Klimaszenarien A1B und B1 im DSS Wald und Klima. Ber. Freiburger Forstliche Forschung, 82, 161–179.
- Ahrends, B., Weis, W., Habel, R., Meesenburg, H., & Wellpott, A. (2023). Folgen aufeinanderfolgender Trockenjahre für die Wasserverfügbarkeit in Wäldern. Forstliche Forschungsberichte München, 224, 179-190.
- Baston, D. (2020). Exactextract: Fast Extraction from Raster Datasets using Polygons. R package version 0.4.0. <https://CRAN.R-project.org/package=exactextractr>
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63(6), 625–644. <https://doi.org/10.1051/forest:2006042>
- Buras, A., Rammig, A., & Zang, C. S. (2020). Quantifying impacts of the 2018 drought on European ecosystems in comparison to 2003. *Biogeosciences*, 17(6), 1655–1672. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1655-2020>
- Dobbertin, M., Wermelinger, B., Bigler, C., Bürgi, M., Carron, M., Forster, B., Gimmi, U., & Rigling, A. (2007). Linking increasing drought stress to Scots pine mortality and bark beetle infestations. *TheScientificWorldJournal*, 7 Suppl 1, 231–239. <https://doi.org/10.1100/tsw.2007.58>
- Fleck, S., Ahrends, B., Weis, W., Falk, W., Habel, R., Wellpott, A., & Meesenburg, H. (2023a). Evaluierung artspezifischer Unterschiede in LWF-Brook90 mit Xylemflussmessungen. *Forstliche Forschungsberichte München*, 224, 53-68.
- Fleck, S., Ahrends, B., & Meesenburg, H. (2023b). Trockenstressgefährdung der Baumarten im Harz und Tiefland Niedersachsens. *Forstliche Forschungsberichte München*, 224, 122-138.
- Fleck, S., Ahrends, B., & Meesenburg, H. (2022). Trockenstressrisiko im Harz—AFZ DerWald 15-2022. *dlv Digitalmagazin App*. https://www.digitalmagazin.de/marken/afz-derwald/hauptheft/2022-15/waldokologie/021_trockenstressrisiko-im-harz
- Fleck, S., Albert, M., Plasil, P., Nagel, R., Suttmöller, J., Ahrends, B., Schmidt, M., Evers, J., Hansen, J., Overbeck, M., Schmidt, W., Spellmann, H., & Meesenburg, H. (2015). Pilotstudie zu den lokalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft in ausgewählten Regionen Sachsen-Anhalts. <https://doi.org/10.17875/gup2015-892>
- Forster, P. M., Smith, C. J., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Hauser, M., Ribes, A., Rosen, D., Gillett, N., Palmer, M. D., Rogelj, J., von Schuckmann, K., Seneviratne, S. I., Trewin, B., Zhang, X., Allen, M., Andrew, R., Birt, A., Borger, A., ... Zhai, P. (2023). Indicators of Global Climate Change 2022: Annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, 15(6), 2295–2327. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>
- Grillakis, M. G. (2019). Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. *Science of The Total Environment*, 660, 1245–1255. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.001>
- Habel, R., Ahrends, B., Falk, W., Weis, W., Puhlmann, H., Wellpott, A., Streizer, A.-S., & Nowack, R. (2023). Indikatorenvergleich für Trockenstress im Wald. *Forstliche Forschungsberichte München*, 224, 79-93.
- Hammel, K., & Kennel, M. (2001). Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90, 185, 117 S.
- Jansen, M., Döring, C., Ahrends, B., Bolte, A., Czajkowski, T., Panfyorov, O., Albert, M., Spellmann, H., Nagel, J., Lemme, H., Habermann, M., Staupendahl, K., Möhring, B., Böcher, M., Storch, S., Krott, M., Nuske, R., Thiele, J., Nieschulze, J., & Beese, U. (2008). Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen textendash Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems „Wald und Klimawandel“ (DSS-WuK). *Forstarchiv*, 79, 131–142.
- Kopp, D., & Jochheim, H. (2002). Forstliche Boden- und Standortsformen des nordostdeutschen Tieflands als Datenbasis für die Landschaftsmodellierung. *Kessel*. <https://www.forstbuch.de/produkt/forstliche-boden-und-standortsformen-des-nordostdeutschen-tieflands-als-datenbasis-fu%cc%88r-die-landschaftsmodellierung-kopp-d-jpcheim-h>
- Kopp, D., Schanecke, W., & Schmidt, W. (unveröffentlicht, in Bearbeitung). Merkmalsspiegel zur Kennzeichnung der wichtigsten forstlichen Lokalbodenformen Sachsen-Anhalts.
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yezpe, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4), 719–739. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
- Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M. E., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., Hauf, Y., Jasinevičius, G., Labonne, S., Linkevičius, E., Mahnken, M., Milanovic, S., Nabuurs, G.-J., Nagel, T. A., Nikinmaa, L., Panyatov, M., Bercak, R., Seidl, R., Ostrogović Sever, M. Z., ... Schelhaas, M.-J. (2023). Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*, 29(5), 1359–1376. <https://doi.org/10.1111/gcb.16531>

- Petzold, R., Benning, R., Gemballa, R., Karas, F., & Andreae, H. (2014, 20.9). Aus alt mach neu. Altweiserdaten für die Ableitung und Regionalisierung bodenphysikalischer Eigenschaften in Sachsen. *Wälder der Zukunft: Lebensraum, Ressourcenschutz und Rohstoffgewinnung*. Forstwissenschaftliche Tagung, Dresden.
- Rakovec, O., Samaniego, L., Hari, V., Markonis, Y., Moravec, V., Thober, S., Hanel, M., & Kumar, R. (2022). The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe. *Earth's Future*, 10(3), e2021EF002394. <https://doi.org/10.1029/2021EF002394>
- Russ, A., Riek, W., & Wessolek, G. (2012). Regionalisierung bodenphysikalischer Kennwerte auf Grundlage forstlicher Standortskarten. *Freiburger Forstliche Forschung Berichte*, 113–127.
- Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., Zink, M., Sheffield, J., Wood, E. F., & Marx, A. (2018). Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*, 8(5), Article 5. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5>
- Schmidt, W., Stüber, V., Ullrich, T., Paar, U., Evers, J., Dammann, K., Hövelmann, T., & Schmidt, M. (2015). *Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer (Bd. 12)*. Universitätsverlag Göttingen. <https://www.univerlag.uni-goettingen.de/handle/3/isbn-978-3-86395-188-7>
- Schmidt-Walter, P., Ahrends, B., Mette, T., Puhlmann, H., & Meesenburg, H. (2019). NFIWADS: The water budget, soil moisture, and drought stress indicator database for the German National Forest Inventory (NFI). *Annals of Forest Science*, 76(2), Article 2. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0822-2>
- Schröder, H., & Fiedler, H.-J. (1975). Nährstoffgehalt und Trophiegliederung waldbodenbildender Grundgesteine des Harzes. *Hercynia*, 12, 40–57.
- Schulze, G. (1996). *Anleitung für die forstliche Standortserkundung im nordostdeutschen Tiefland (Standortserkundungsanleitung) SEA 95, Bd. A-D*. Mecklenburg-Vorpommern Ministerium für Landwirtschaft und Naturschutz.
- Schwanecke, W. (1993). *Merkmalstabellen für Haupt- und Lokalbodenformen der forstlichen Standortserkundung im Bundesland Sachsen-Anhalt. Teil: Mittelgebirge und Hügelland (Bodenformen-Katalog)*. Forstplanungsamt Sachsen-Anhalt.
- Thiele, J., Nuske, R., Ahrends, B., & Saborowski, J. (2009). Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems für die Waldbewirtschaftung unter sich ändernden Klimabedingungen. In *Klimaschutz und Anpassung and die Klimafolgen* (S. 303–310). Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH.
- Thiele, J., Nuske, R. S., Ahrends, B., Panferov, O., Albert, M., Staupendahl, K., Junghans, U., Jansen, M., & Saborowski, J. (2017). Climate change impact assessment—A simulation experiment with Norway spruce for a forest district in Central Europe. *Ecological Modelling*, 346, 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.11.013>
- VEB Forstprojektierung Potsdam, Kopp, D., & Schwanecke, W. (1974). *Anweisung für die forstliche Standortserkundung in der DDR (Standortserkundungs-Anweisung)*. VEB Forstprojektierung Potsdam.
- Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S., & Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Wehberg, J.-A., & Böhner, J. (2023). *Hochaufgelöste Klimaprojektionen für Deutschland*. *Forstliche Forschungsberichte München*, 224, 69–78.
- Weis, W., Ahrends, B., Fleck, S., Raphael, H., & Axel, W. (2023). *Modellparameter zur Abbildung des Standortwasserhaushalts mit LWF-Brook90*. *Forstliche Forschungsberichte München*, 224, 22–52.
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., & Renger, M. (2009). *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis (Bd. 40)*. TUB Selbstverlag.
- Ziche, D., Riek, W., Russ, A., Hentschel, R., & Martin, J. (2021). Water Budgets of Managed Forests in Northeast Germany under Climate Change—Results from a Model Study on Forest Monitoring Sites. *Applied Sciences*, 11(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/app11052403>