

1 Hintergrund

In den Jahren seit 2018 haben Extremwetterlagen in mehreren aufeinanderfolgenden Jahren, in den Wäldern Deutschlands und weiten Teilen Europas zu flächendeckenden Vitalitätsverlusten und erhöhter Mortalität geführt (Patacca et al. 2023). Sturmschäden zählen europaweit zu einer der größten Schadursachen im Bereich der Witterungs- und Klimaextreme. Seit 2005 ist der Anteil der wirtschaftlichen Schäden durch Winterstürme in der EU gestiegen. In der Forstwirtschaft verursachen Stürme Schadholzmengen von jährlich mehreren Mio. Kubikmetern. Globale Klimamodelle projizieren eine Zunahme in Schwere und Häufigkeit von Sturmereignissen von September-April für den Zeitraum 2020-2190 in Mittel- und Westeuropa (Feser et al. 2016).

1.1 Waldschäden

Auswertungen der Holzeinschlagsstatistik zeigen, dass der Anteil der nicht planmäßigen Nutzungen am Gesamteinschlag in den deutschen Wirtschaftswäldern seit 1998 signifikant gestiegen ist. Im Durchschnitt der Jahre 1991 bis 2024 lag der Schadholzanteil bei rund 29% des Gesamteinschlages, der Durchschnitt der Jahre 2018 bis 2021 betrug mit rund 60 % gut das Doppelte. Der 2020 erreichte Höchstwert von 60 Mio. m³ Schadholz entspricht etwa 75 % des Gesamteinschlages in diesem Jahr. Im Jahr 2024 ging der Schadholzanteil zum vierten Mal in Folge zurück und lag mit 45 % des Gesamteinschlages erstmals wieder unter dem Wert von 2018.

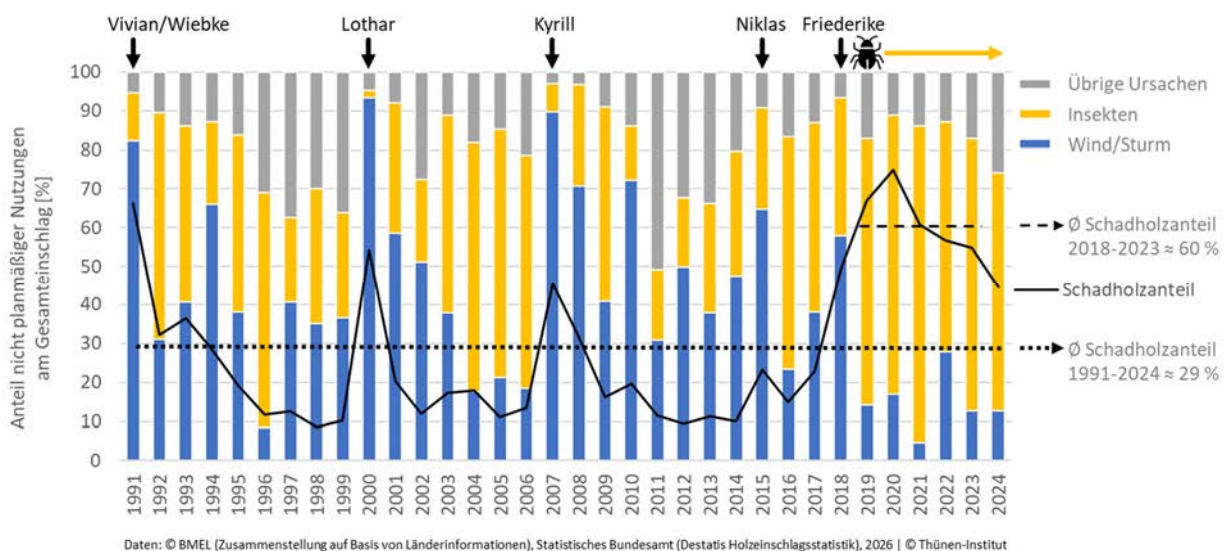


Abbildung 1: Schadholzaufkommen in der Bundesrepublik Deutschland seit der Wiedervereinigung

Die Zahlen zu den Ursachen der Schad bedingten außerplanmäßigen Nutzungen zeigen: Bis 2019 standen hohe Schadholzanteile primär im Zusammenhang mit starken Winterstürmen; in den Jahren seit 2019 überwiegen Insektenschäden deutlich. Das Gesamtschadholzaufkommen seit 2018 beläuft sich auf rund 300 Mio. m³.

Wärmere und trockenere Bedingungen begünstigen Störungen durch Feuer und Insekten. Aktuelle Studien zum Reaktionsverhalten von Waldökosystemen und dem Anpassungsvermögen bestimmter Baumarten legen nahe, dass Wasser- und Hitzestress während der extremen Dürreperioden der Jahre 2018 und 2019 die überdurchschnittlich starke Vermehrung phytophager Insekten begünstigte und als auslösender Faktor zum flächendeckenden Absterben von Bäumen geführt hat (Gazol et al. 2022, Rukh et al. 2023). Außergewöhnliche Hitze und Trockenheit in den Jahren von 2018 bis 2020 führte zu massivem Wasserstress in den Wäldern Deutschlands der zu einer deutlichen Verschärfung der Waldbrandgefahrenlage geführt hat. Auswertungen der Waldbrandstatistik der letzten zwei Jahrzehnte für Deutschland zeigen, dass außer-gewöhnliche Trockenheit in Verbindung mit einem erhöhten Entzündungsrisiko in Überganszonen zwischen Stadt und Wald die prädisponierenden Faktoren sind, während der Zustand und die Struktur der Wälder zusammen mit hohen Temperaturen und starken Winden die Hauptfaktoren sind, die das Ausmaß und die Schwere der durch Waldbrände verursachten (potenziellen) Schäden bestimmen.

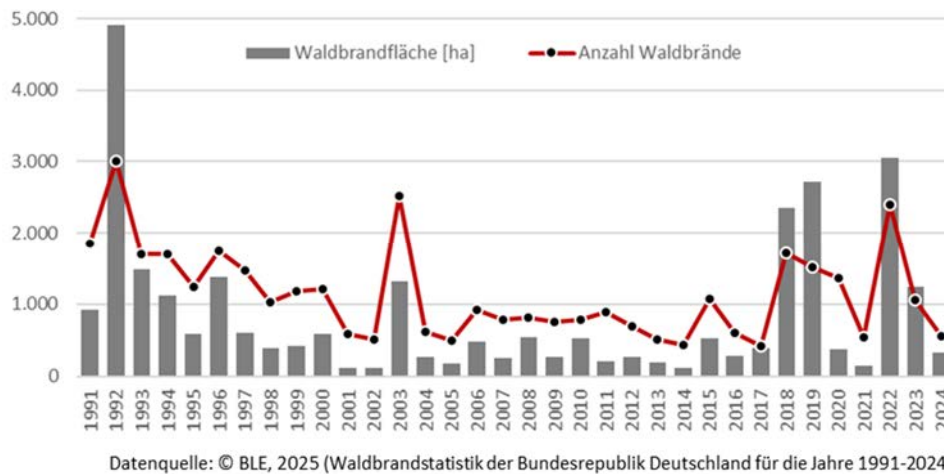


Abbildung 2: Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland seit der Wiedervereinigung

Von 1991 bis 2022 wurden in Deutschland mehr als 38.000 Waldbrände mit Schäden auf einer Gesamtfläche von über 28.000 Hektar gemeldet. In den Jahren 2018/2019 verbrannten mehr als 5.000 ha Wald; wobei deutlich mehr Waldbrände registriert wurden, die sich auf größeren Flächen ausbreiteten. Mit mehr als 3000 ha Waldbrandfläche wurden im Jahr 2022 die größten Waldbrandschäden binnen eines Jahres seit 1992 gemeldet. Die Anzahl der Brände lag 2022 mit knapp 2400 auf ähnlich hohem Niveau wie 2003; allerdings war die mittlere Fläche je Brand etwa doppelt so groß wie 2003. Nach vorläufigen Zahlen für das Jahr 2025 waren bis August rund 5.400 Hektar Wald verbrannt.

1.2 Sturmschadensrisiko Modellierung

In Deutschland verursachten Winterstürme immer wieder immense Schäden (z.B. „Friederike“ 2018). Die durch Windwurf oder Stammbruch verursachten Schäden haben nicht nur direkte Auswirkungen auf den Waldbestand, sondern auch weitreichende ökonomische, ökologische und soziale Folgen. Im Zusammenhang mit Windwürfen steigt das Risiko für Folgeschäden etwa durch Borkenkäferkalamitäten, zusätzliche Windschäden in umliegenden Beständen oder andere Faktoren wie Feuer, Sonne, Schnee und Eis. Die Vorhersage von Sturmereignissen selbst ist nur bedingt möglich. Zur Verringerung des Schadenspotenzials von Sturmschäden müssen daher schon vor einem Sturmereignis Maßnahmen ergriffen werden, durch die ein Bestand oder auch ein einzelner Baum resilienter wird. Um eine gezielte Anpassung durchführen zu können, müssen zuerst die Bestände identifiziert werden, die im Moment eine hohe Gefährdung aufweisen. Hierfür wurden in der Forschung bereits mehrfach modellbasierte Ansätze genutzt, die sich in dieser Hinsicht als nützliches Werkzeug erwiesen haben. Die Modellierung bietet die Möglichkeit, verschiedene Klimaszenarien (Ancelin et al. 2004), Waldtypen (Peltola et al. 2010) und Bewirtschaftungseinflüsse (Pukkala et al. 2016) zu simulieren und Einblicke in die Prozesse der Windeinwirkung auf Bäume zu geben (Gardiner 2021). Eine häufige Verwendung finden sowohl statistische Modelle, als auch hybrid-mechanistische Modelle.

Statistische Modelle (Schmidt et al. 2010, Suvanto et al. 2016) haben oft den Vorteil eines einfacheren Gesamtkonzepts, bei dem ein vergangenes Sturmereignis als Grundlage für die Parametrisierung des Modells verwendet wird. Wie von Schindler et al. (2009) beschrieben, umfasst dieser konzeptionelle Ansatz die Kartierung von Sturmschäden und Umweltfaktoren, die mit Sturmschäden in Zusammenhang stehen könnten, die Bewertung des Einflusses der ausgewählten Parameter und die Klassifizierung der Schadenswahrscheinlichkeit bei bestimmten Windgeschwindigkeiten. Während dieser allgemeine Ansatz potenziell weniger Eingabeparameter erfordert, führt er dazu, dass die Modelle in ihren Schadenseinschätzungen sturm- und ortsspezifisch sind und sich möglicherweise nicht ohne Weiteres auf andere Orte oder für andere Sturmereignisse übertragen lassen (Schmidt et al. 2010).

Hybrid-mechanistische Modelle (Hale et al. 2015, Peltola et al. 1999) basieren auf physikalischen Zusammenhängen zwischen Baumwiderstand und Windbelastung, wodurch eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Prozesse möglich ist. Solche Modelle arbeiten meist in zwei Schritten: Zunächst wird die kritische Windgeschwindigkeit (CWS) für die Entwurzelung oder den Stammbruch für einzelne Bäume oder ganze

Bestände berechnet, im zweiten Schritt mit der lokalen Windklimatologie abgeglichen wird, um die Wahrscheinlichkeit von Schäden bei bestimmten Windgeschwindigkeiten zu bestimmen. Da hybrid-mechanistische Modelle eine große Anzahl von Eingangsparametern verwenden, sind für die Modellerstellung Anfangsmessungen verschiedener Kombinationen dieser Parameter erforderlich. Während bestimmte Prozesse innerhalb des Modells auf physikalischen Zusammenhängen beruhen, stützen sich andere auf empirische Zusammenhänge, was auch die Herausforderungen rein statistischer Modelle miteinschließt (Gardiner et al. 2008).

Im Zuge des Projekts wird der Einsatz von Sturmschadensrisikomodellen für Deutschland stichprobenartig getestet. Für die Risikoabschätzung wird das Modell ForestGALES (FG) eingesetzt, welches in Großbritannien entwickelt wurde und die meisten kommerziellen Nadelholzarten in Europa abdeckt. Das Modell verwendet die DAMS-Klassifizierung (Detailed Aspect Method Scoring) des Windklimas. Diese Klassifizierung wird nur in Großbritannien verwendet, aber andere Studien (z. B. Kamimura et al. 2008) haben die CWS-Berechnungen abgewandelt und Windgeschwindigkeitsdaten aus anderen Quellen verwendet. Auch für deutsche Wälder wurde das Modell bereits getestet (Gardiner et al. 2024, Stadelmann et al. 2025).

In FG gibt es zwei Methoden zur Berechnung der CWS: Die tmc-Methode für einzelne Bäume in einem Bestand und die Rauigkeitsmethode für einen ganzen Bestand. Hier wird für eine erste Einschätzung die Rauigkeitsmethode genutzt um für die Bestände der harmonisierten Bestandesinventur (HBI; Hilbrig et al. 2014) die CWS und die Schadwahrscheinlichkeit (vgl. Chen et al. 2018, Gleichung 6) zu berechnen. Als Referenzwindgeschwindigkeit werden die Windgeschwindigkeiten verwendet, die während des Wintersturms „Friederike“ im Jahr 2018 aufgetreten sind (Jung und Schindler 2019). Dieser Sturm verursachte in großen Teilen Deutschlands verheerende Schäden und eignet sich daher als Referenz für ein „worst-case“-Szenario. Betrachtet werden die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche und Buche. Für die Fichte wird ein angepasster, modellinterner Parameterdatensatz für die artenspezifischen Parameter in ForestGALES verwendet (Stadelmann et al. 2025 für Details zur Anpassung), bei den anderen Baumarten wird mit den Standard-Datensätzen der artenspezifischen Parameter gerechnet.

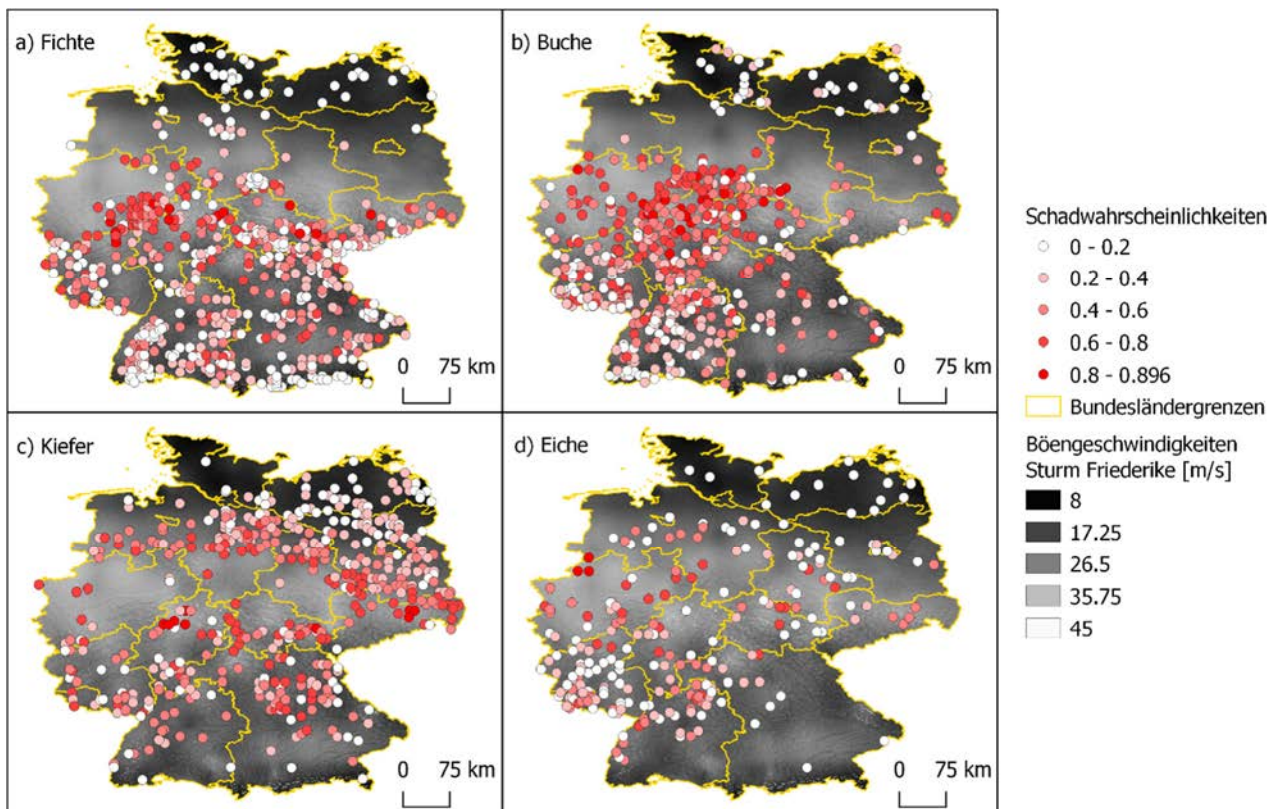


Abbildung 3: Berechnete Schadwahrscheinlichkeiten dargestellt für die Bestände der Hauptbaumarten (a) Fichte; b) Buche; c) Kiefer und d) Eiche) aus der HBI (eingefärbte Punktsignaturen; Hilbrig et al. 2014). Die Hintergrundkarte zeigt die Böengeschwindigkeiten während des Sturms Friederike (Jung und Schindler 2019).

Die Bewertung des Sturmschadensrisiko für die Bestände der Hauptbaumarten, basierend auf der HBI (Hilbrig et al. 2014) zeigt, dass Bestände unterschiedlicher Baumarten auch ein unterschiedliches Risiko aufweisen. Für alle Baumarten (Abb. 1 a-d)) wird das Muster der Verteilung der Böengeschwindigkeit auch in den Schadwahrscheinlichkeiten abgebildet: Im Bereich der Bundesländer Nordrhein-Westfalen, dem südlichen Niedersachsen und dem nördlichen Hessen, sind während des Sturmes Friederike tendenziell höhere Böengeschwindigkeiten erfasst worden. In diesem Bereich, steigen auch die Schadwahrscheinlichkeiten bis in den Bereich von > 80% an. Entsprechend sind die Schadwahrscheinlichkeiten bei niedrigeren Böengeschwindigkeiten (z.B. in Mecklenburg-Vorpommern) ebenfalls niedriger.

Jedoch ist das Sturmschadensrisiko nicht nur durch die auftretenden Windgeschwindigkeiten bedingt. Auch in Regionen, in denen die Böengeschwindigkeiten tendenziell niedriger waren, wurde für einzelne Bestände ein hohes bis sehr hohes Schadrisko errechnet. Ebenso gibt es Bestände, die in Regionen mit hohen Böengeschwindigkeiten ein deutlich niedrigeres Schadensrisiko (0-20%) aufweisen.

1.3 Satelliten gestützte Waldschadenserfassung

Fernerkundungstechniken werden in großem Umfang für die Waldüberwachung eingesetzt. Aufgrund der Komplexität der Ursache-Wirkungs-Beziehungen in Waldökosystemen und der Vielzahl der beteiligten Faktoren ist die Stressreaktion von Wäldern und Bäumen ein Forschungsgegenstand mit wachsender Bedeutung für die Klimaanpassung (Ammer et al., 2018). Wälder sind offene Ökosysteme, die auf vielfältige Weise und in verschiedenen Dimensionen mit der umgebenden Landschaft interagieren. Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist ein vertieftes Verständnis dieser Zusammenhänge von entscheidender Bedeutung für die Umgestaltung und Anpassung der Wälder (Bolte et al., 2009).

Ein stetig wachsendes, öffentlich frei zugängliches Archiv an Erdbeobachtungsdaten, das mehrere Jahrzehnte und große Bereiche der Erdoberfläche in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösungen abdeckt, stellt hierfür eine umfangreiche, kostenlose Datenquelle dar. Zeitreihenanalysen multi-spektraler Vegetationsindices gehören zu den prominentesten Fernerkundungsmethoden zur Informations-gewinnung im Bereich des Satelliten-gestützten Waldschadensmonitoring. Die Gewinnung belastbarer Informationen über den Zustand und die Entwicklung der Wälder aus Satellitendaten erfordert valide Methoden und integrative Verarbeitungsroutinen, um die Lücke zwischen Fernerkundungsbasierten Informationen und terrestrisch erhobenen, forstlichen Waldzustandsparametern zu schließen, und räumlich-zeitliche Zusammenhänge analysieren und interpretieren zu können.

Zur Erfassung von abiotischen und biotischen Störungen auf der Grundlage von Schadereignissen in verschiedenen Waldgebieten Deutschlands wurde ein nicht parametrischer Algorithmus getestet um neben abrupten Schäden infolge von Waldbrand und Sturmereignissen auch graduelle Kronenveränderungen durch Insektenfraß und Dürre-indizierte Vitalitätsverluste zu erfassen. Dazu wurden MODIS 16-Tage Komposite der letzten 20 Jahre vom ersten verfügbaren vollständigen Jahreszyklus 2001 bis 2020 berücksichtigt. Die insgesamt 460 MODIS-EVI-Datensätze (23 Datensätze je Jahreszyklus) dienten als Eingangsdaten für die Rekonstruktion der langfristigen EVI-Phänologie, auf deren Basis die Jahre, in denen Störungereignisse an den einzelnen Untersuchungsstandorten dokumentiert worden sind, auf Anomalien untersucht wurden. Der verwendete nicht-parametrische Ansatz zur Phänologie-Rekonstruktion und Anomalie-Detektion wurde von Chávez et al. (2019) entwickelt und ist im R-Paket `npphen` (Chávez et al. 2022) implementiert und kann Pixel-Sequenzen verschiedener multi-spektraler Sensoren und Auflösungen (MODIS, Sentinel-2) unterschiedlicher Vegetationsbedeckung verarbeiten. Der Pixel-für-Pixel-Ansatz ist robust gegenüber fehlenden Daten, z. B. Datenlücken an einer bestimmten Pixelposition innerhalb der analysierten Sequenz. Die Vorteile des zweidimensionalen KDE-Algorithmus (bivariater Gauß-Kernel) bestehen darin, dass er (a) jede beliebige funktionale Form erfassen kann, (b) die gleiche Anzahl von Punkten pro Zyklus nicht zwingend erforderlich ist und (c) das Ausmaß der Anomalie auf einer probabilistischen Basis nivelliert werden kann. Ergebnisse der Untersuchungen zeigen eine gute räumliche und zeitliche Kohärenz mit den Referenzdaten der zugrundeliegenden Waldbrand-, Windwurf- und Insektenbefalls-Flächen. Eine z.T. deutliche Steigerungen in der Performance konnte insbesondere hinsichtlich der Differenzierung zwischen abrupten und graduellen Schadenssignaturen und der Erfassung unterschiedlicher Schadschwere erreicht werden. Limitierungen entstehen durch die vergleichsweise geringe Auflösung der MODIS-Daten, die zur „Nicht-Erfassung“ von Windwurfflächen deren

Flächenausdehnung weniger als 50% der Pixel (250x250 m) überlagert. Ferner entstehen Datenlücken durch Wolkenbedeckung, die vor allem in den Wintermonaten zu Unschärfen in der Zeitreihenanalyse führt. Generell ist auch mit diesem Verfahren keine direkte Ableitung zu den Schadensursachen möglich. Über die Einbindung zusätzlicher Kontextdaten (Baumarten, Dürreindikatoren oder bekannte Einzugsgebiete von Forstschädlingen) können Schadenssignaturen typisiert und regelbasierten oder anhand von saisonalen biophysikalischen Zusammenhängen potenziellen Ursachenkategorien zugeordnet werden.

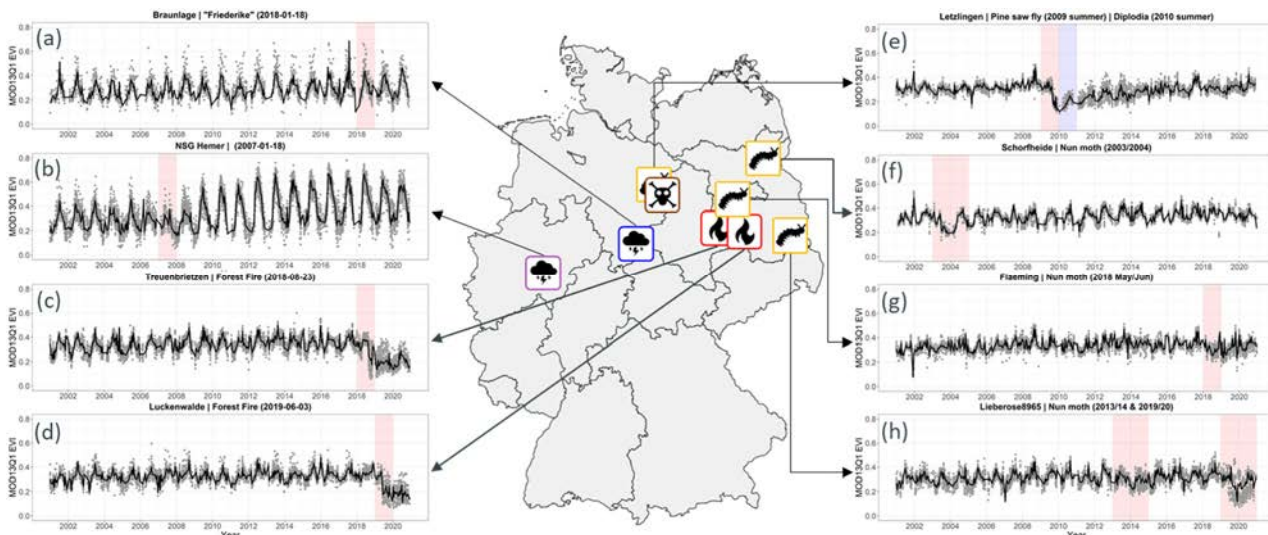


Abbildung 4: Zeitreihen aus MODIS EVI 16-Tages-Kompositen der Jahre 2001-2023 für einzelne Pixelwerte (graue Punkte) und den zugehörigen Mittelwert (schwarze Linie) von unterschiedlichen Schadflächen nach Sturm bzw. Waldbrand (a-d) sowie nach Insekten- bzw. Pilzbefall in mehreren aufeinanderfolgenden Jahren (e-h).

Die Zeitreihen (Abbildung XX, links, von oben nach unten) zeigen abrupte Störungsmuster nach dem Orkantief Friederike im Januar 2018 bzw. 2007 nach Kyrill und Waldbränden im Süden Brandenburgs bei Treuenbrietzen 2018 und Luckenwalde 2019. Die Zeitreihen (Abbildung XX, rechts, von oben nach unten) zeigen graduelle Störungsmuster in jeweils zwei aufeinanderfolgenden Jahren nach Blattfraß durch Kiefernbuschhornblattwespen in Letzlingen 2009 und Diplodiabefall im darauffolgenden Jahr, Nonnenfraß 2003/2004 in der Schorfheide und 2018/2019 im Fläming sowie Nonnenbefall bei Lieberose in den Jahren 2013/2014 und 2019/2020.

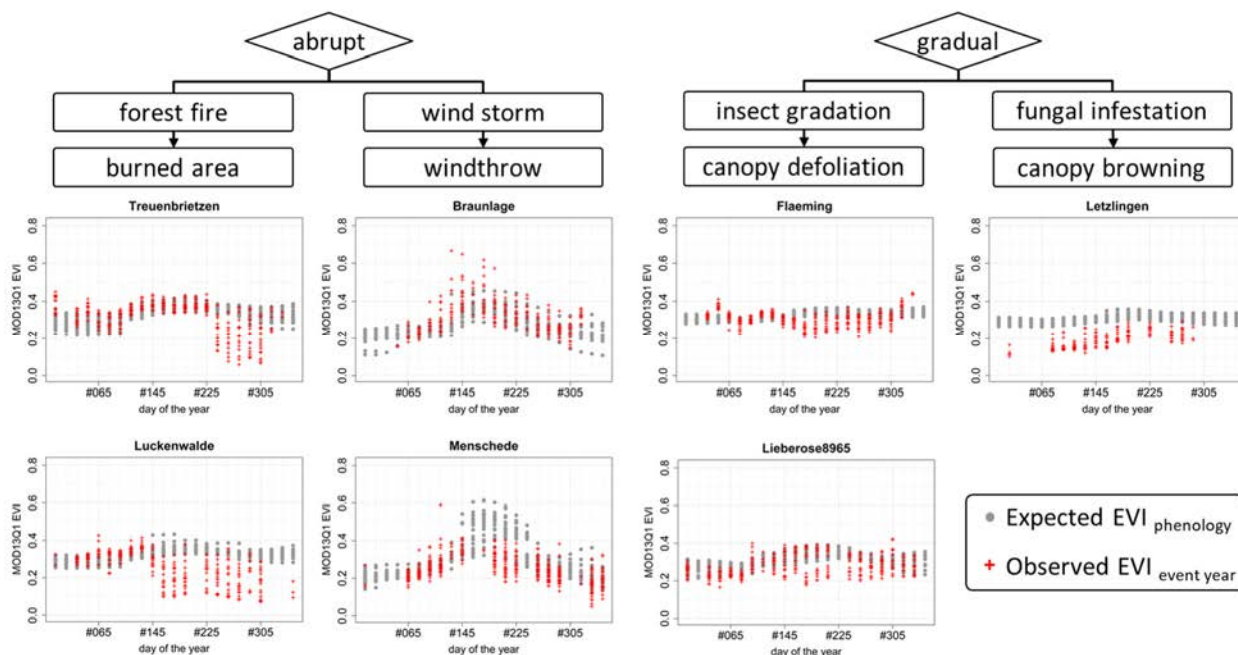


Abbildung 5: Darstellung der Jahresverläufe von MODIS EVI-Schadsignaturen aus je 23 Monatswerten für das Beobachtungsjahr 2018 (rote Kreuze) und der Langzeitphänologie aller Werte (2001-2023 graue Punkte).

Untersuchungen abiotischer und biotischer Störungen die zwischen 2000 und 2021 in verschiedenen Waldgebieten Deutschlands terrestrisch dokumentiert wurden zeigen, dass sich aus MODIS Zeitreihen Störungssignaturen mit ereignisspezifischen Mustern extrahieren lassen (Gnilke & Sanders 2022).

Allerdings wird die Vulnerabilität von Waldbeständen gegenüber Störungen vom Zusammenspiel einer Vielzahl von Umwelteinflüssen und deren Ausprägungen bestimmt, bei dem die Einflussgrößen in einem multidimensionalen Beziehungsgefüge stehen und sich gegenseitig in ihrer Ausprägung und Wirkung beeinflussen (Sanders et al., 2019).

1.4 Interaktion Zuwachsbeeinflussender Faktoren

Klimaveränderungen im Zuge des Klimawandels und deren Auswirkungen auf Waldökosysteme und die Forstwirtschaft werden derzeit verstärkt thematisiert und mögliche Strategien zur Milderung der Folgen diskutiert. Das Wachstum von Bäumen wird von dem Zusammenspiel einer Vielzahl von Umwelteinflüssen und deren Ausprägungen bestimmt und hängt u.a. vom Baumalter, dem Standort, der sozialen Stellung und der Durchforstungsart ab (Burschel & Huss 1997, Assmann, 1961, Wiedemann et al. 1951).

Neben den Klimabedingungen beeinflussen u.a. CO₂-Gehalt der Atmosphäre, Nährstoffdeposition und Nährstoffverfügbarkeit im Boden sowie Schadstoffdepositionen und Bewirtschaftungsmaßnahmen die Wuchseleistungen von Einzelbäumen und Beständen (Chmielewski, 2007). Dabei stehen die Einflussgrößen in einem multidimensionalen Beziehungsgefüge. D. h., sie beeinflussen sich gegenseitig in ihrer Ausprägung und Wirkung. Stickstoff-Einträge können in Abhängigkeit von der Höhe der Einträge sowohl eine zuwachsfördernde als auch eine zuwachshemmende Wirkung haben (Hoffmann, Heinsdorff, & Krauss, 1990):

Höhere Temperaturen während der Vegetationszeit führen zu erhöhtem Stoffumsatz und haben im Zusammenspiel mit Stickstoffeinträgen eine erhöhte Netto-Primärproduktion zur Folge, die umso stärker vom Niederschlagsangebot begrenzt wird (Beck, Löffler, & Kätzel, 2007). Wellhausen, (2015) untersuchte die Zuwachsrelation und Witterungssensitivität u.a. der Baumart Kiefer in Rein- und Mischbeständen in bedeutenden Verbreitungsgebieten von Kiefer und Fichte in Bayern und Niedersachsen. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte ein Rückgang des Durchmesserzuwachses für die Kiefer auf Grund einer „mittleren klimatischen Wasserbilanz von -257 mm um durchschnittlich rd. 13,8 % festgestellt werden. Folglich würde sich eine günstigere als die dem Modell unterstellte Witterung positiv auf das Wachstum auswirken. Analog dazu würden sich auf Grund günstiger klimatischer Bedingungen und unter dem Düngeeffekt mäßig eingetragenen Stickstoffs längerfristig gerichtete Standortveränderungen einstellen. Die resultierenden Veränderungen im Wachstumsverhalten der Kiefern würden sich in Form eines verstärkten und beschleunigten Zuwachses äußern (Beck, Löffler, & Kätzel, 2007).

2 Klimaanpassung in der Forstwirtschaft

In der Debatte um den Klimawandel und damit einhergehende Umweltveränderungen wird im Bereich der Forstwirtschaft die Klimaplastizität von Wäldern zunehmend thematisiert. Die Stabilität und Vielfalt von Beständen spielen eine immer größere Rolle. Stabilität wird dabei als Ausdruck der Widerstandsfähigkeit eines Ökosystems gegenüber Außeneinflüssen und der Art und Weise, wie es auf sich verändernde Klima- und Umweltbedingungen oder auf Störungen reagiert, verstanden. Störungen bezeichnen Einflüsse, welche die durch Gleichgewichtserhaltende, regulatorische Kräfte und Entwicklungstendenzen bestimmten Abläufe in einem Ökosystem verändern (Altenkirch et al. 2002). Die Entwicklung von vielfältig strukturierten, risikoarmen Laubmischwaldbeständen mit klimaangepassten Baumarten und Herkünften wird in den Waldbaurichtlinien der Länder behandelt. Da die Forstwirtschaft in Deutschland föderal organisiert ist, haben die zuständigen Forstbehörden in jedem Bundesland ein eigenes Konzept zur Klimaanpassung erarbeitet und Vorgaben zu deren Umsetzung sind in entsprechenden Erlassen formuliert. Zudem sollen Handreichungen und Leitfäden mit Empfehlungen und Vorschlägen zu konkreten Maßnahmen die forstbetriebliche Entscheidungsfindung und die waldbauliche Planung unterstützen. Die in dem Kontext frei und öffentlich zugänglichen Informationsquellen weisen zum Teil deutliche Unterschiede auf, die Nutzerfreundlichkeit und Interoperabilität webbasierter Fachanwendungen und die Verfügbarkeit von (Geo-)Daten variiert zum Teil stark.

2.1 Klimarisikokarten

In einigen Bundesländern werden die Auswirkungen von Veränderungen in den Temperatur- und Niederschlagsverteilungen auf die künftig zu erwartenden Wuchsbedingungen und Standortpotenziale auf der Grundlage von Klima-Szenarien und multi-kriterialen Klimawirkungs-Matrizen neu bewertet und daraus regionalisierte Klima- bzw. Anbauriskokarten abgeleitet. So werden in den Bayerischen Landesforsten für jeden Regierungsbezirk Baumarten spezifische Klimaanalogs-Regionen genutzt um die zukünftigen Klimabedingungen und die daraus resultierenden Verschiebungen der Verbreitungsgebiete von Baumarten zu veranschaulichen.

Andere Bundesländer nehmen Anpassungen, etwa durch die Erweiterung der entsprechenden Klassifizierungsschemata vor. Ein Beispiel hierfür ist Brandenburg, für das die drei bestehenden Klimafeuchtestufen durch ein Schema mit fünf Klimafeuchtestufen ergänzt wurde, um den prognostizierten Veränderungen hin zu mehr Trockenheit Rechnung getragen. Eine Übersicht der in den einzelnen Bundesländern verwendeten Klima-Szenarien und die zugrunde gelegten Referenzzeiträume ist in Abbildung XX dargestellt.

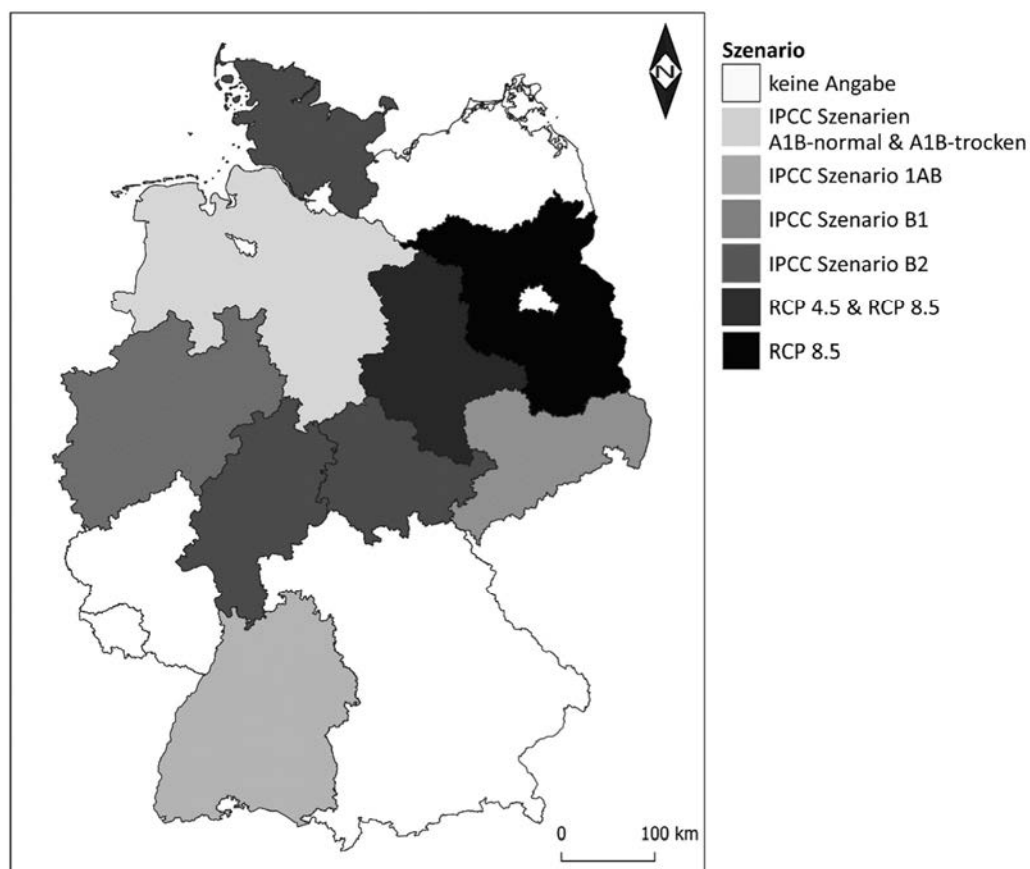


Abbildung 7: Klima-Szenarien und die zugrunde gelegten Referenzzeiträume in den einzelnen Bundesländern

2.2 Standorterkundungsverfahren

Die Verfahren zur Erfassung und Kartierung in der Forstlichen Standortkunde sind elementarer Bestandteil für die Bewertung der Baumarteneignung sowie für die Zuordnung zu den entsprechenden Waldentwicklungstypen. Auf Grund der regionalen Unterschiede in der Qualität und Verteilung relevanter Merkmale und in Bezug auf die bereits angeführten föderalen Strukturen forstlicher Zuständigkeiten in den Bundesländern gibt es keinen allgemein gültigen einheitlichen Ansatz für einen bundesweiten Schlüssel zur Erfassung und Bewertung standort- und bodenkundlicher Parameter im Forstbereich. Im Zuge der Recherche fanden sich Studien zur Harmonisierung für eine „Übersetzung“ der bundesland-spezifischen Kennwerte (Nährstoffversorgung, Wasserhaushalt, Feuchtestufen ect.) und der entsprechenden Zuordnung der Stufen bzw. Klassen in ein harmonisiertes ordinales Skalenschema. Eine Übersicht der recherchierten Verfahren zur forstlichen Standorterkundung und -Kartierung in den Bundesländern ist in Abbildung XX dargestellt.

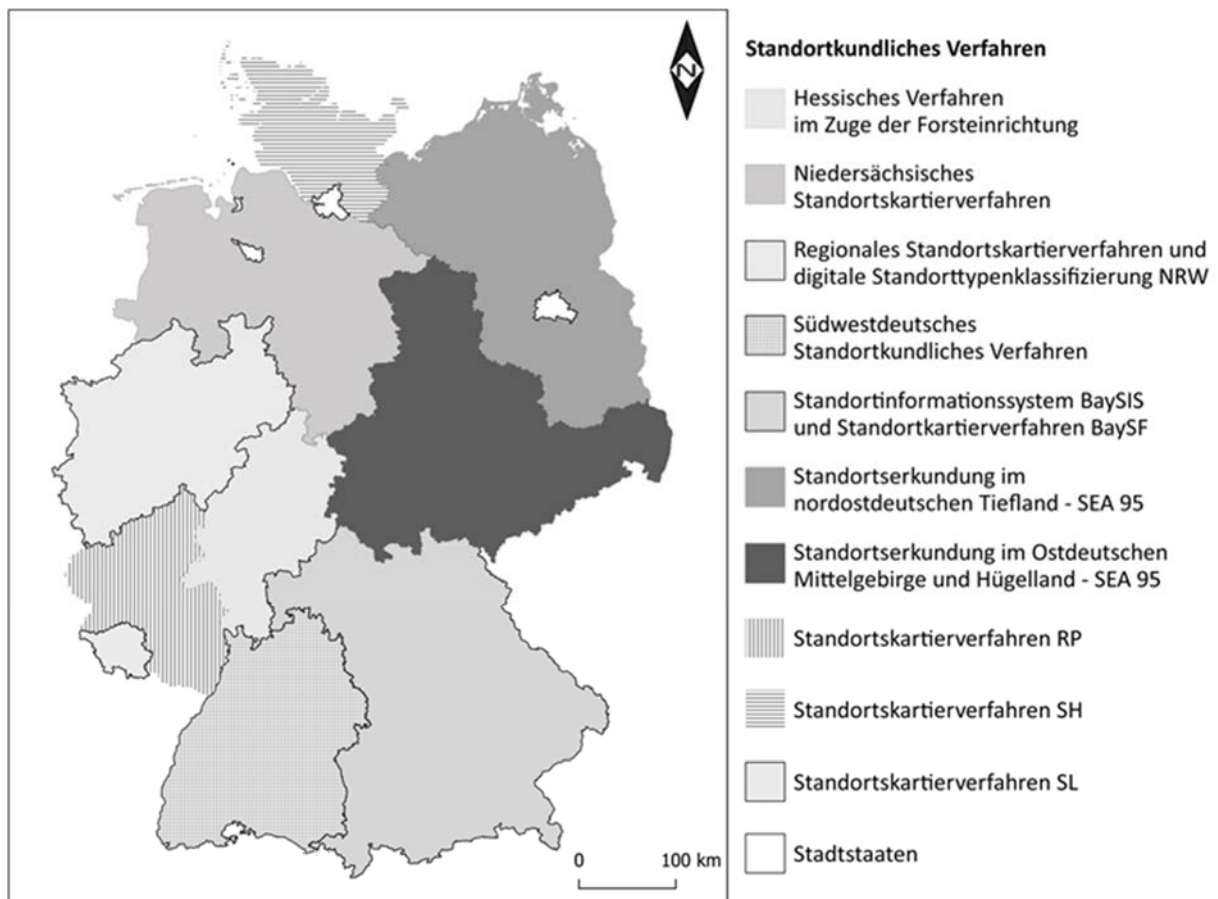


Abbildung 8: Unterschiedliche Verfahren zur forstlichen Standorterkundung in den einzelnen Bundesländern

2.3 Baumarteneignung und Waldentwicklungsziele

Die Herleitung der Baumarteneignung orientiert sich an unterschiedlichen Kriterien, z.T. liegt neben den Baumphysiologischen Standortansprüchen der Fokus auf betrieblich-operationellen Zielstellungen. In einigen Landesbehörden wird dabei auch die „Förderwürdigkeit“ bestimmter Baumarten zur Waldverjüngung und Wiederbewaldungsprojekten in den Baumartenempfehlungen und den zugehörigen waldbaulichen Planungshilfen berücksichtigt. In einigen Bundesländern wird dabei nach „heimischen“ und „nicht heimischen“ Baumarten unterschieden. Andere Bundesländer erweitern im Rahmen des Waldumbaus die Baumartenempfehlungen auf „alternative“, Baumarten aus Verbreitungsgebieten mit klimatischen und standörtlichen Wuchsbedingungen, die nach den regionalen Klimaprojektionen künftig zu erwarten sind ähneln.

Die Bestockungszieltypen (BZT) und die daran geknüpften Bewirtschaftungsanweisungen der Landesforsten wurden in den meisten Bundesländern durch Waldentwicklungstypen (WET) bzw. Waldentwicklungsziele (WEZ) ersetzt und sollen künftig dynamisch angepasst werden um den jeweils aktuellsten Ergebnissen aus Klimasimulationen Rechnung zu tragen. Hierbei gibt es sowohl hinsichtlich der Standortkartierung zur Bewertung der Nährstoffversorgung, als auch bezüglich der Kriterien zur Bewertung der Baumarteneignung, keine bundeseinheitliche Vorgehensweise. Auch das Spektrum der einbezogenen Baumarten variiert stark, in manchen Fällen werden zwischen 5 Hauptbaumarten behandelt, in anderen Fällen wurden Empfehlungen für bis zu 50 Baumarten erarbeitet. Die Daten und Manuals der überarbeiteten Bestockungsempfehlungen werden der Öffentlichkeit derzeit in unterschiedlichem Maße und in verschiedenen Formaten zugänglich gemacht.

In der Bewertung der Baumarteneignung und in den entsprechenden Anbaurisikoarten einiger Bundesländer werden die Eintrittswahrscheinlichkeit und Häufung baumartenspezifischer Störungsereignisse (Borkenkäfer, Sturm, Waldbrand etc.) berücksichtigt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Abschätzung von komplexen mehrfach-Risiken in diesem Rahmen nicht ohne weiteres möglich ist. Das liegt unter anderem an der bisher sehr heterogenen Datenerfassung, die auch auf die großen Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Störungsereignisse und den damit assoziierten Baumarten über das Bundesgebiet zurückgeführt werden können.

3 Multikriterien Risiko Assessment

Wald ist, heute mehr denn je, eine der bedeutendsten Naturressourcen. Vor dem Hintergrund des stetig steigenden Energie- und Rohstoffbedarfes, einer nachhaltigen Bewirtschaftung risikoarmer Bestände und dem Ziel, möglichst alle Waldfunktionen zu erhalten bzw. wieder herzustellen, stehen die Bewirtschafter nicht selten vor Zielkonflikten. Der Einsatz eines geografischen Informationssystems (GIS) ermöglicht eine mehrdimensionale Betrachtung für die Bearbeitung komplexer forstlicher Fragestellungen und kann wertvolle Informationen zu einer fundierten Entscheidungsfindung liefern. Im Bereich des Risikomanagements müssen bei der Entscheidungsfindung häufig komplexe räumliche Beziehungen berücksichtigt werden, die von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden. Die Multikriterien-Overlay-Analyse (MCOA) ist eine Technik, die dieser Komplexität Rechnung trägt, indem sie es Entscheidungsträgern ermöglicht, mehrere Ebenen geografischer Informationen gleichzeitig zu bewerten und zusammenzuführen. Mit dieser Methode können disparate Daten in umsetzbare Erkenntnisse umgewandelt werden und so die Wirksamkeit der aus der Risikoanalyse abgeleiteten Maßnahmen transparent und reproduzierbar evaluiert werden. Das Konzept einer MCOA basiert im Wesentlichen auf der Überlagerung mehrerer räumlicher Datensätze, um eine zusammengesetzte Karte zu erstellen, die Bereiche hervorhebt, die zuvor definierten Kriterien entsprechen.

Es ergeben sich folgende Arbeitsschritte:

1. Kriterien Auswahl – Risiko Attribution und Wirkungsgefüge
2. Operationalisierung – Übersetzung von Kriterien in Indikatoren im Sinne von messbaren Kennwerten
3. Datenintegration – Datenaufbereitung, Vereinheitlichung der Datenformate, und geografischen Bezüge
4. Datenverschneidung - Risikoklassifizierung mittels Bewertungs-Matrizen und Aggregation
5. Ergebnisabfrage und -dokumentation

3.1 Störungsspezifische Risikofaktoren

Fragestellungen:

Welche Waldbestände bieten das größte waldbauliche Potenzial für Resilienz fördernde Maßnahmen?

Wo bestimmen anthropogene Einflüsse und Standortgegebenheiten die Vulnerabilität?

3.1.1 Sturmrisiko

Hänge und Täler, sind besonders sturmgefährdet, wobei von West nach Ost verlaufende Täler bei Stürmen aus Westrichtung vergleichsweise höhere Schadensgrade aufweisen. Wassergesättigte (staunasse) und saure Böden mit eingeschränkter Durchwurzelungstiefe und geringem Kapillaraufstieg verringern die Verankerung der Bäume im Boden und erhöhen das Risiko von Entwurzlungen bzw. Windwürfen (Schmidt, 2010).

Das Sturmrisiko ist, neben lokalen Standortgegebenheiten, abhängig von Artenspezifischen Einzelbaummerkmalen. Nadelbäume scheinen u.a. auf Grund ihrer physiologischen und morphologischen Eigenschaften im Allgemeinen anfälliger gegenüber den mechanischen Einwirkungen von Stürmen zu sein als Laubbäume. Die eher flachwurzeln, langschaftige Fichte mit ihrem hohen Kronenansatz, der schmalen Kronenform und einem ungünstigen Durchmesser-Höhen-Verhältnis hat ein erhöhtes Sturmschadensrisiko. Waldkiefer und Weißtanne haben ein mittleres Sturmrisiko. Tieferwurzeln Baumarten mit niedrigem Kronenansatz, einem abholzigen Stamm und großräumigen Kronenform, wie Stiel- und Traubeneiche oder Rotbuche sind vergleichsweise widerstandsfähig gegen Windeinwirkung.

Die Baumhöhe ist ein wichtiger Einzelfaktor für die Bestandesstabilität, wobei die Anfälligkeit gegenüber mechanischen Einwirkungen (Sturm) mit zunehmender Höhe steigt. Analog dazu steigt die Sturmanfälligkeit mit zunehmendem Bestandesalter, wobei die Wahrscheinlichkeit von Sturmschäden in der Jungwald-phase am geringsten und im Altbestand am höchsten ist. In mehrschichtigen und stufig strukturierten, geschlossenen Mischbeständen ist das Sturmschadensrisiko deutlich geringer als in gleichförmig strukturierten, einschichtigen Reinbeständen (Wegman, 2010).

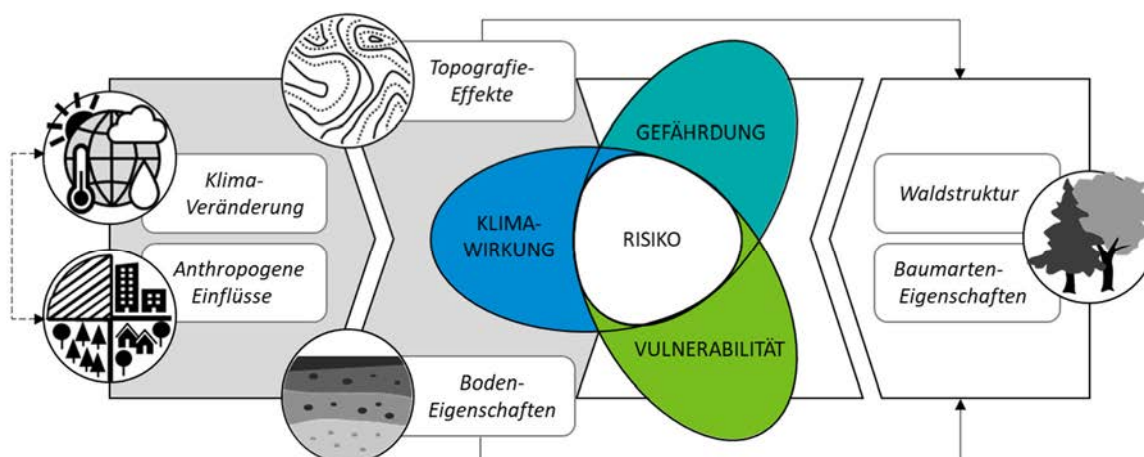
3.1.2 Waldbrand- und Trockenstress-Risiko

Aufgrund der stärkeren Sonneneinstrahlung ist die Bodenfeuchte an Südhängen geringer und die Trocknungsrate in der Streuauflage und der Krautschicht ist höher als an Nordhängen (Countryman, C.M., 1972). Sandige Böden trocknen aufgrund ihrer geringeren Wasserspeicherkapazitäten potenziell schneller und stärker aus und weisen tendenziell geringere pH-Werte auf als lehmhaltige Böden. Waldböden mit höheren organischen Kohlenstoffgehalten fördern die Wasserspeicherkapazität und verbessern die Nährstoffversorgung (Körschens, 2004). Untersuchungen zu Waldbrandschäden zeigen, dass die Baumartenzusammensetzung in einem Bestand das wichtigste Strukturmerkmal ist, welches Einfluss auf die Brandentwicklung innerhalb eines Bestandes hat. Nadelholzbestände sind deutlich überproportional zu ihrem Anteil an der Waldfläche von Waldbränden betroffen, gleichzeitig nimmt die Schwere der Brandschäden mit zunehmenden Laubholzanteilen ab (Gnilke et al 2022). Eine Studie von Patacca et al. (2026) legt nahe, dass künftige Brände die Wälder der gemäßigten Zonen überproportional stark betreffen, da dort bei einem gleichen relativen Anstieg der verbrannten Fläche ein höheres Schadensausmaß auftritt als in den anderen Biomen. Laubgehölze mit höherer Schattenwirkung (Buche, Rot-Eiche) produzieren weniger leichtentflammbare Streu und entwickeln weniger brandfördernde Bestandesstrukturen (Unterwuchs) als lichtbedürftige Nadelgehölze wie die Waldkiefer (Larjavaara et al 2023; Sanders et al., 2023). Die Bestandeshöhe korreliert mit Bestandesalter und dem Biomasseaufkommen (Gupta & Sharma, 2022) und mit zunehmender Bestandeshöhe steigt die Menge an potenziell brennbarer Biomasse. Durch die höhere Schattenwirkung der Laubbäume bleibt der Waldboden länger feucht und die bodennahe Temperatur im Sommer niedriger (Thater et al., 2024). Dichte Bestände mit geschlossenem Kronendach reduzieren Trocken- und Hitzestress. Das hydraulische Versagen und Absterben tritt bei Laubbaumarten erst bei fast vollständigem Verlust der hydraulischen Leitfähigkeit auf. Bei Nadelbäumen ist dies deutlich früher bei etwa halbiertes Leitfähigkeit der Fall (Spathelf et al. 2025).

3.2 Kriterien Auswahl

Die Auswahl der Kriterien erfolgte in Anlehnung an das Konzept des Risiko-Assessments des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2012) nach welchen sich das Risiko aus drei Komponenten zusammensetzt:

- der Klimawirkung (oder dem Auftreten von Störungsereignissen),
- der Gefährdung (engl. Exposition) im Sinne des Vorhandenseins von Umweltleistungen und -ressourcen, oder sozioökonomischen Gütern an Orten, die von negativen Auswirkungen betroffen sein könnten und
- der Vulnerabilität, im Sinne einer Neigung oder Veranlagung, von negativen Auswirkungen durch Klimaveränderungen und Störungsereignisse betroffen zu sein.



Grafik in Anlehnung an das Risiko-Assessment Konzept des IPCC-SREX Reports (2012) | Begriffe nach (IPCC, 2012: Glossary of terms)

Abbildung 9: Konzept in Anlehnung an den Risiko-Assessment-Rahmen aus dem IPCC-SREX Report 2012

3.2.1 Klimaveränderungen

Für Temperatur- und Niederschlagsbezogene Indikatoren zu den Klimawirkungen wurden Karten für die klimatische Wasserbilanz, die Niederschlagssumme, die Anzahl der Hitzetage und die Anzahl der Trockenperioden erstellt. Die Temperatur- und Niederschlagsvariablen basieren auf Klimadaten aus dem Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), die als Klimawirkungsindikatoren verwendet werden, um langfristige Veränderungen zwischen einem Referenz- und einem zukünftigen Klimaszenario darzustellen.

Die Eingangsdaten der schwellenwertbasierten Temperatur- und Niederschlagsindizes wurden basieren auf der Methode des Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) bias-korrigiert und auf ein einheitliches Längen-Breitengrad Gitter harmonisiert. Die 30-jährigen Multi-Modell Zeitschnitte wurden aus fünf globalen Klimamodellen (ACCESS-CM2, CanESM5, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3, MPI-ESM1-2-HR) für drei Shared Socioeconomic Pathways-Experimente (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5) berechnet. Einzelheiten zu den CMIP6-SSP-Experimenten und GCMs finden sich im Appendix).

Für jedes Modell und jedes Experiment wurden folgende Berechnungen durchgeführt:

Zunächst werden die Variablen über die 30-Jahres-Zeitschnitte für den historischen Referenzzeitraum (1971 bis 2000) bzw. den zukünftigen Zeitraum (2071 bis 2100) gemittelt und für die Verrechnung der Klimadaten für einige der CMIP Modelle in unterschiedlicher räumlicher Auflösung von dem harmonisierten regulären 12,5 km Grid auf das Geografische Gitter für Deutschland in der Lambertprojektion ETRS89-LAEA (EPSG:3035) projiziert und herunterskaliert auf 1 km Zellgröße.

In einem zweiten Schritt wurden die Veränderungen für jeden der Indikatoren als Differenz zwischen den 30-Jahresdurchschnitt der Multi-Modell-Aggregate für den historischen Referenzzeitraum (1971 bis 2000) und den für den zukünftigen Zeitraum (2071 bis 2100) berechnet.

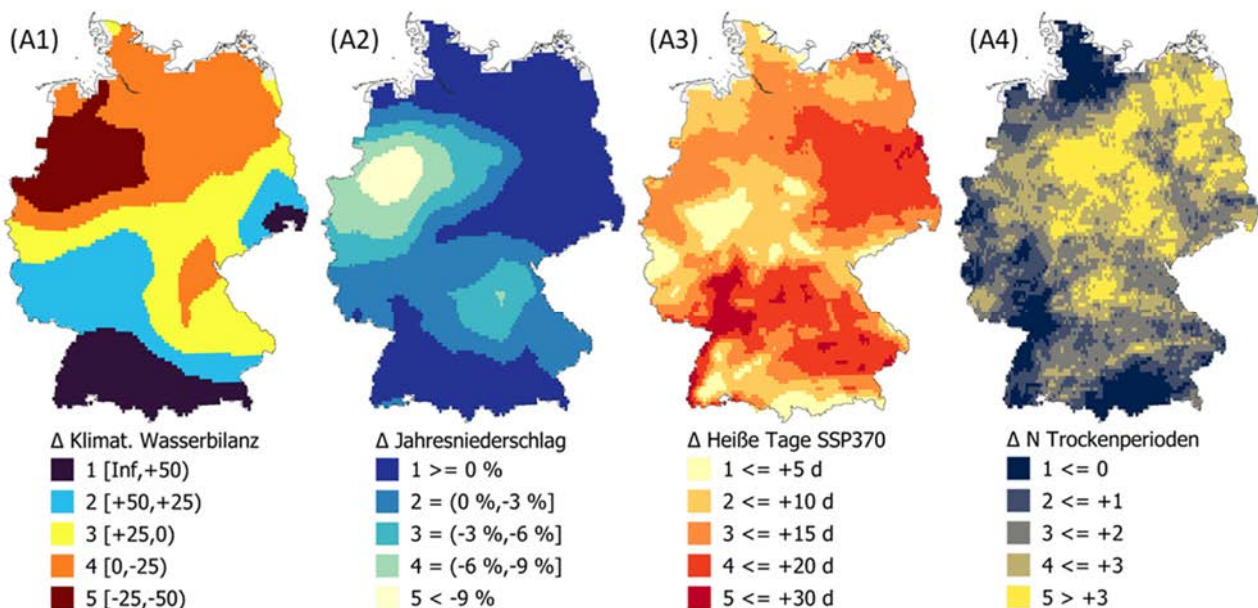


Abbildung 10: Ergebnisse aus den Multi-Modell Berechnungen der Klimaveränderungen (2071-2100 versus 1971-2000) für die klimatische Wasserbilanz von Mai bis August (A1), die mittleren jährlichen Niederschlagssummen (A2), die Anzahl heißer Tage mit Tagestemperaturen $> 30^{\circ}\text{C}$ (A3) und die Anzahl der Trockenperioden mit Niederschlagsmengen < 1 mm an mindestens 5 aufeinanderfolgenden Tagen (A4)

3.2.2 Anthropogene Einflüsse

In der Gruppe der Kriterien zu Anthropogenen Einflüssen waren in der Literaturrecherche mehrdeutige Aussagen bei der Bewertung einiger Risiko-Parameter aufgefallen. Ein Beispiel hierfür ist die Fragmentierung von Waldflächen, die die anthropogene Durchdringung von Landschaften aus geometrischer Sicht charakterisiert. In Bezug auf das Risiko von Sturmschäden führt eine höhere Fragmentierung zu kleineren Waldflächen mit mehr Waldkanten, wodurch Edge-Effekte verstärkt werden und die Stabilität gegenüber Wind verringert ist. Demnach steigt mit zunehmender Fragmentierung das Sturmschadensrisiko.

In Bezug auf das Waldbrandrisiko ist der Grad der Fragmentierung als Risiko-Indikator mehrdeutig: Im Kontext der Waldbrandausbreitung hat ein höherer Fragmentierungsgrad eine Brandhemmende Wirkung indem Straßen und Waldwege (Fragmentierungsgeometrien) die flächige Verfügbarkeit von brennbarer Biomasse unterbrechen und als Brandschneise fungieren, verringert sich das Risiko, dass sich die Flammen ausbreiten. Betrachtet man das Vorhandensein von Verkehrsinfrastruktur im Kontext der Waldbrandentstehung steigt mit zunehmender anthropogener Durchdringung die Zündwahrscheinlichkeit und damit das Risiko für die Entstehung von Waldbränden. Im Kontext der Waldbrandbekämpfung wiederum steigt mit zunehmendem Erschließungsgrad die Wahrscheinlichkeit, dass ein Waldbrand schneller erkannt, gemeldet und bekämpft wird. Ergo steigt mit zunehmender Fragmentierung das Risiko für die Entstehung eines Brandes (Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadereignisses), zugleich sinkt das Risiko von Waldbrandschäden (Schadauswirkung).

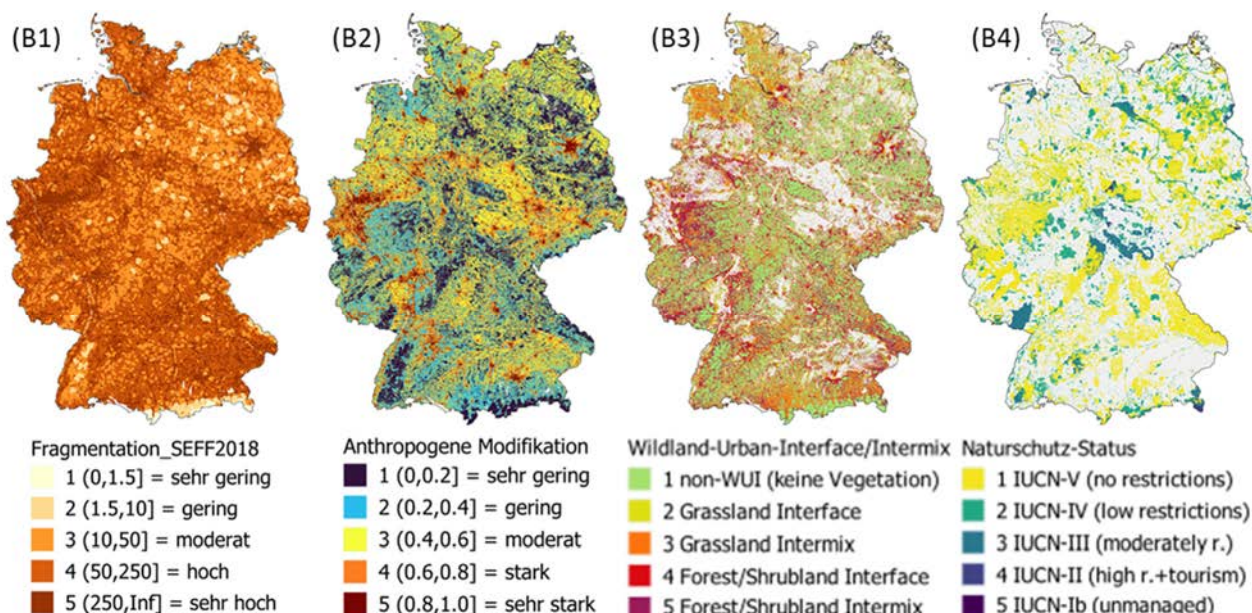


Abbildung 11: Eingangsdaten zur Risikobewertung anthropogener Einflüsse durch Landschaftsfragmentierung (B1), Landschaftsmodifikation (B2), der Siedlungsnähe (B3) und Naturschutzbedingte Restriktionen (B4)

3.2.3 Topografische Effekte

Die Topografie wirkt sich, insbesondere in bergigen Regionen, auf die hydrologischen und klimatischen Standorteigenschaften aus und hat Einfluss auf die Verteilung und Beschaffenheit der Vegetation. Die Geländehöhe korreliert eng mit dem Biomasseaufkommen sowie mit der Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Die Geländausrichtung und -neigung hat Einfluss auf die Verteilung und Verfügbarkeit von Bodennährstoffen. Die lokalen Feuchteverhältnisse eines Standortes variieren reliefbedingt in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße und Neigung (Abflussmenge und Geschwindigkeit).

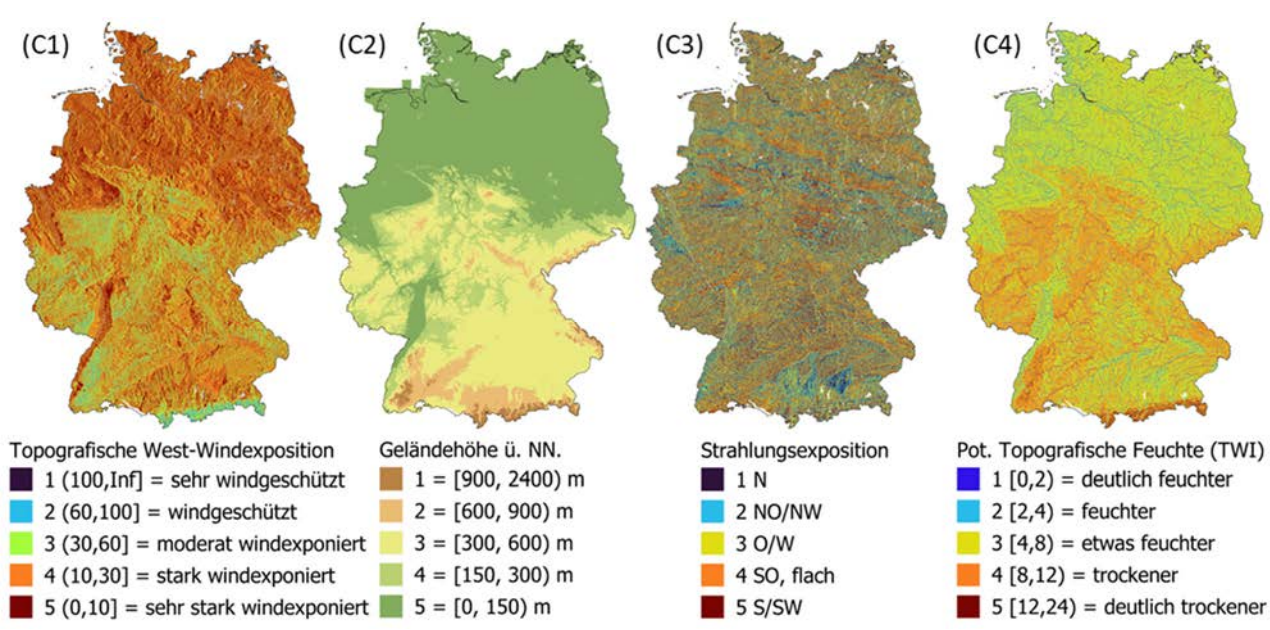


Abbildung 12: Eingangsdaten zur Risikobewertung Topografischer Effekte durch Windexposition (C1), Höhenlage (C2), Strahlungsexposition (C3) und Reliefbedingte Feuchteverhältnisse (C4)

3.2.4 Bodeneigenschaften

Bodenphysikalische und bodenchemische Eigenschaften beeinflussen den Wasser- und Nährstoffhaushalt eines Standortes und spielen im Kontext von Maßnahmen zur Klimaanpassung eine wichtige Rolle. Grundwasser verhindert die durch Schwerkraft verursachte Entwässerung und befeuchtet den Wurzelraum durch Kapillaraufstieg, sodass Bäume während Trockenperioden eine höhere Verdunstung aufrechterhalten können.

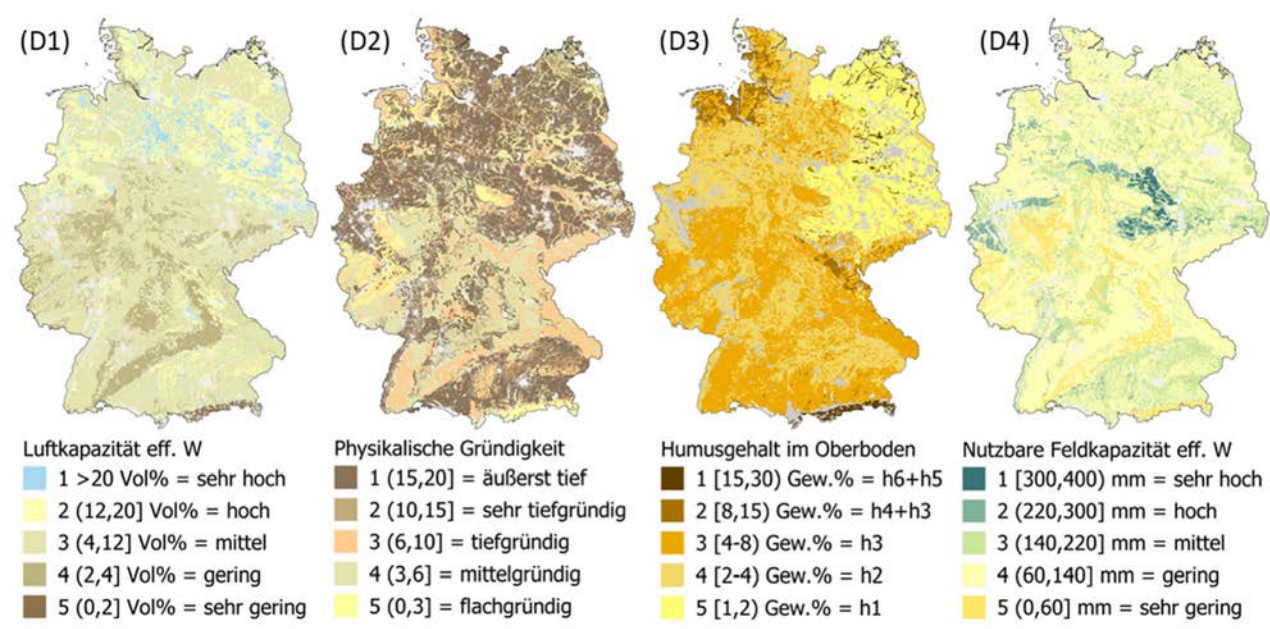


Abbildung 13: Eingangsdaten zur Risikobewertung nach Bodeneigenschaften wie der Luftkapazität in effektiven Wurzelraum (D1), der physikalischen Gründigkeit (D2), der Humusgehalte in Oberböden (D3) und der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (D4)

3.2.5 Waldstruktur- und Zusammensetzung

Laubwälder sind im Allgemeinen im Vergleich zu Nadelwäldern stabiler. Dies erklärt sich u.a. dadurch, dass Laubwälder, da sie jährlich ihre gesamte Blattmasse verlieren und austauschen, regenerationsfähiger und damit weniger anfällig gegenüber Entlaubung durch z.B. Insektenfraß sind. Ein weiterer Vorteil des Blattverlustes am Ende einer Vegetationsperiode ist, dass Laubbäume auf witterungsbedingte Einflüsse (Trockenheit) innerhalb kürzerer Zeit regenerieren können als Nadelbäume, bei denen die Nadeln im Schnitt ein Alter von 4-7 Jahren erreichen können. Struktureiche Mischlaubwälder sind demnach die stabilste Form der Bestockung, da, um bei dem Beispiel der Insektenkalamität zu bleiben, hier nach Thienemann vielseitigere Lebensbedingungen in dem betreffenden Biotop herrschen, welche zu entsprechend hoher Artenvielfalt der zugehörigen Biozönose bei gleichzeitig geringer Population der einzelnen beteiligten Arten führt (Altenkirch et al. 2002).

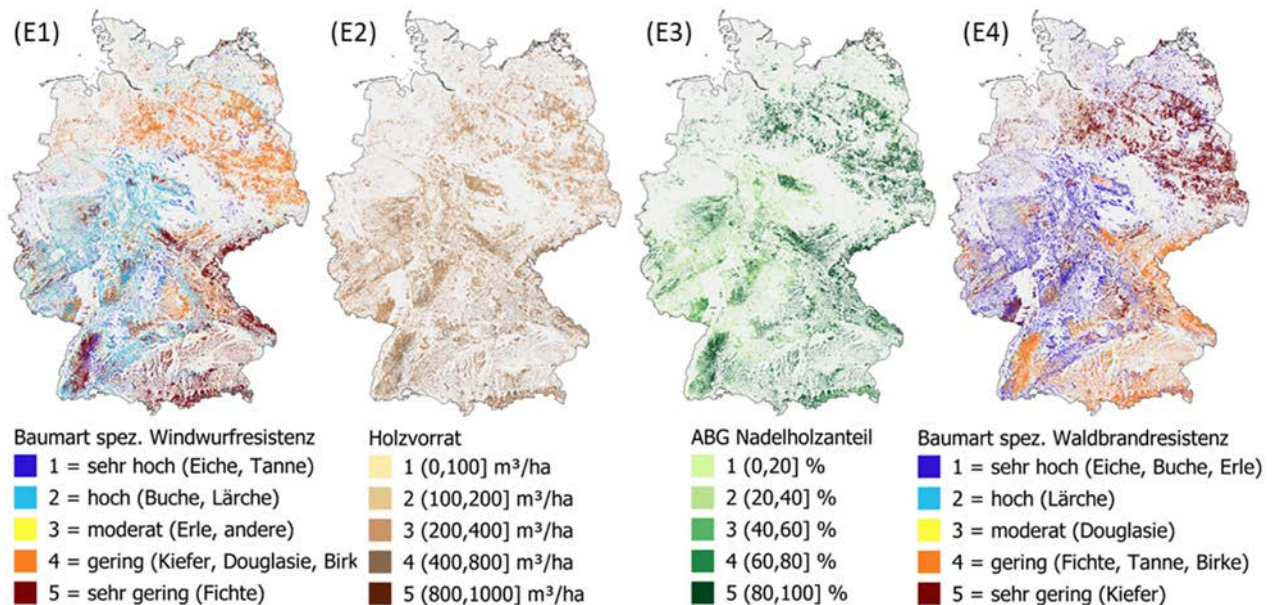


Abbildung 14: Eingangsdaten zur Risikobewertung Kriterien zur Waldstruktur- und Zusammensetzung nach der Baumartspezifischen Windwurfresistenz (E1), dem Holzvorrat (E2), den Nadelholzanteil in der Oberirdischen Biomasse (E3) und der Baumartspezifischen Waldbrandresistenz (E4)

Die Bewertung der Windwurf- und Schneebruchresistenz erfolgte in Anlehnung an das Konzept der ökologischen Potenz mitteleuropäischer Waldbaumarten (modifiziert nach Otto 1996) und richtet sich nach der artspezifischen Sturm-Anfälligkeit hinsichtlich der Verankerung (Durchwurzelung) im Boden, der Kronenform, dem winterlichen Belaubungs-Zustand. Analog dazu erfolgte die Einstufung des Waldbrand-Gefährdungsgrades nach den artspezifischen Entzündungstemperaturen und Kalorienentwicklung, die bei Brandversuchen in lebenden und toten Pflanzenteilen ermittelt wurden.

Die Baumartenspezifischen Risikobewertungen zur Windwurf bzw. Waldbrandresistenz wurden den jeweiligen vorherrschenden Baumarten der DLR Baumarten-Karte „Tree Species Germany“ für das Jahr 2022 mit einer räumlichen Auflösung von 10 Metern verschnitten. Die Karte zeigt die Verbreitung von zehn Baumartengruppen, die aus multitemporalen optischen Sentinel-2 Daten, Radardaten von Sentinel-1 und einem digitalen Höhenmodell abgeleitet wurden. Die Eingabedaten enthalten explizit phänologische Informationen, um die für die Artenunterscheidung relevanten saisonalen Vegetationsdynamiken zu erfassen.

4 Ergebnisse

Störungsinteraktionen und die daraus resultierenden multi-kausalen Wirkungszusammenhänge können bei der Risiko-Bewertung bestimmter Einflussfaktoren zu Ambiguitäten führen. Um zu vermeiden, dass reziproke Zusammenhänge zwischen einigen Indikatoren sich in der Risikobewertung gegenseitig „aufheben“ werden die einzelnen Indikatoren störungs-differenziert betrachtet (Zuordnung siehe Abbildung 15).

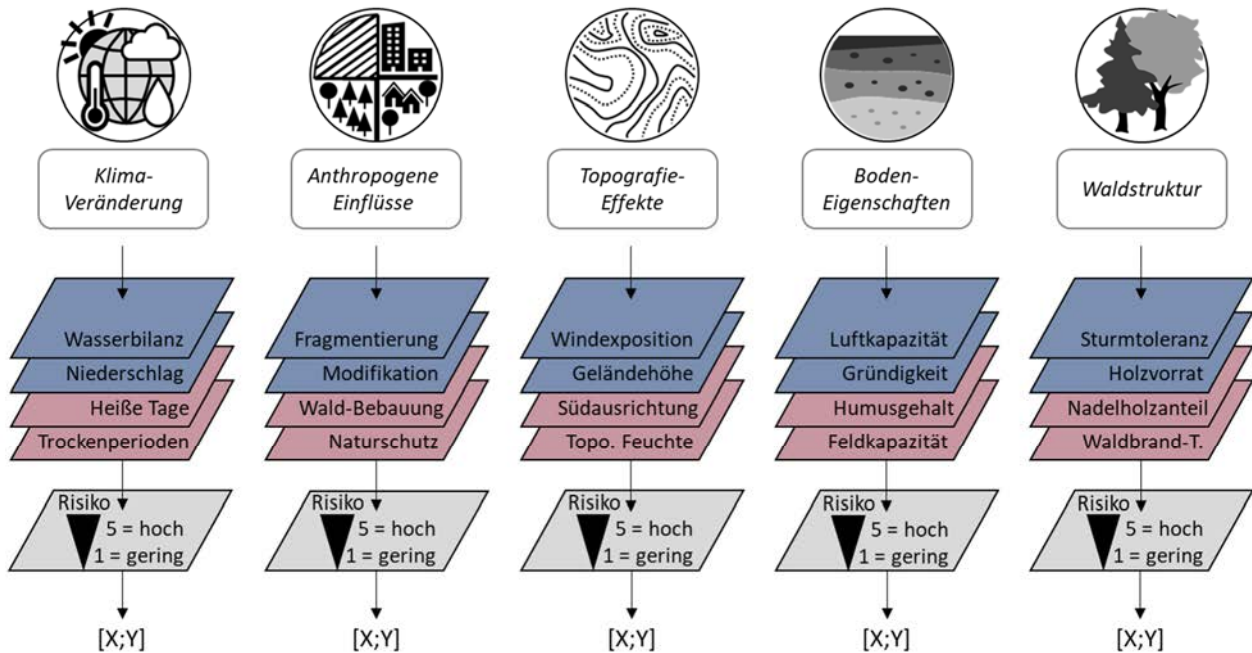


Abbildung 15: Übersicht zu den ausgewählten Risiko-Kriterien, differenziert nach Sturm- und Insekten assoziierten Indikatoren (blau) und Waldbrand-Dürre assoziierten Indikatoren (rosa).

4.1 Störungsdifferenzierte Risikobewertung

Ein Beispiel für den beschriebenen Ambiguitätseffekt ist die Geländeausrichtung: Im Kontext der 5-stufigen Waldbrandrisikobewertung ist die Strahlungsexposition in Nordausrichtung am geringsten [1], nimmt über Nord-ost, Nord-west > Ost, West > Süd-ost zu und ist Süd bzw. Süd-west Ausrichtung am höchsten [5]. Im Kontext der Sturmrisikobewertung ist die topografische Windexposition auf der 5-stufigen Bewertungsskala in der für Winterstürme über Deutschland vorherrschenden West-Windrichtung am höchsten [5] und nimmt von Nord-west bzw. Süd-west > Nord- bzw. Süd > Nord-ost bzw. Süd-ost ab und in Ost-Richtung mit [1] am geringsten.

Ein weiteres Beispiel findet sich im Bereich der Bodeneigenschaften: die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) und die Luftkapazität im effektiven Wurzelraum (LKWe) können als funktionell reziproke Bodenparameter betrachtet werden, da sie sich in ihrer Ausprägung bei vielen Bodenarten entgegengesetzt verhalten. Die nFKWe dient der statischen Charakterisierung des Bodenwasserhaushaltes eines Standortes, während die LKWe den Porenraum beschreibt, der bei Feldkapazität mit Luft gefüllt ist. Böden mit einer hohen nFKWe (z. B. toniger Schluff), hat meist niedrige LKWe Werte; umgekehrt weisen besser durchlüftete Böden (z. B. Grobsand) eine geringe Wasserspeicherkapazität auf. Die nFKWe fließt als Maß für das Speichervermögen des für Pflanzen verfügbaren Wassers (Mittelporen) in die Bewertung des Trockenstress-assozierten Waldbrandrisikos ein. Die LKWe fließt als Maß für die Versorgung der Wurzeln mit Sauerstoff (Wurzelatmung = Grobporen) in die Bewertung des Sturmrisikos ein. Tabelle 1 zeigt das Bewertungsschema für alle Indikatoren.

Tabelle 1: gibt einen Überblick über die Klassengrenzen für die Risikobewertung der Einzelindikatoren.

Indikator	1 sehr gering	2 gering	3 moderat	4 hoch	5 sehr hoch
Δ Wasserbilanz Mai-Aug (mm)	> 50	[+50,+25)	[+25,0)	[0,-25)	[-25,-50)
$\Delta \Sigma$ Jahresniederschlag (%)	≥ 0	(0,-3]	'(-3,-6]	(-6,-9]	< -9
Δ N heiße Tage (Tmax > 35°C)	(0,+5]	(0,+5]	(0,+5]	(0,+5]	(0,+5]
Δ N Trockenperioden (5d < 1mm)	≤ 0	(0,+1]	(+1,+2]	(+2,+3]	> +3
Fragmentierung (mesh/1K km ²)	(0,1.5]	(1.5,10]	(10,50]	'(50,250]	'(250,Inf]
Anthropogene Modifikation	(0,1.5]	'(0,1.5]	'(0,1.5]	'(0,1.5]	'(0,1.5]
Naturschutzstatus	IUCN-V	IUCN-IV	IUCN-III	IUCN-II	IUCN-I
Schnittstelle Wald - Stadt (WUI)	keine	Gras Interface	Gras Intermix	Wald Interface	Wald Intermix
Topografische Feuchte (TWI)	[0,2)	[2,4)	[4,8)	[8,12)	[12,24)
Strahlungsexposition	N	NO, NW	O, W	flach, SO	S, SW
Geländehöhe (m ü.NN.)	(900,2400]	(600,900]	(300,600]	(150,300]	(0,150]
West-Windexposition (TOPEX)	(100,Inf]	(60,100]	(30,60]	(10,30]	(0,10]
Luftkapazität im eff. W (Vol%)	< 20	(12,20]	(4,12]	(2,4]	(0,2]
Physikalische Gründigkeit (dm)	(15,20]	(10,15]	(6,10]	(3,6]	(0,3]
Humusgehalt Oberboden (Gew%)	'[15,30]	[8,15]	[4,8]	'[2,4]	[1,2]
Nutz. Feldkapazität (nFKW mm)	[300,400)	[220,300)	[140,220)	[60,140)	[0,60)
Windwurfresistenz (Otto 1996)	5	4	3	2	1
Holzvorrat (m ³ /ha)	(0,100]	(100,200]	(200,400]	(400,800]	(800,1000]
Nadelholzanteil AGB (%)	(0,20]	(20,40]	(40,60]	(60,80]	(80,100]
Waldbrandtoleranz (Otto 1996)	5	4	3	2	1

Die Lokalisierung von vulnerablen Beständen innerhalb eines festgelegten Untersuchungsgebietes nach einem definierten Kriterienkatalog ist eine Möglichkeit, Informationen aus Bestandesaufnahmen oder Inventurdaten aufzubereiten und als Entscheidungsgrundlage für die Dringlichkeit waldbaulichen Handelns zu nutzen.

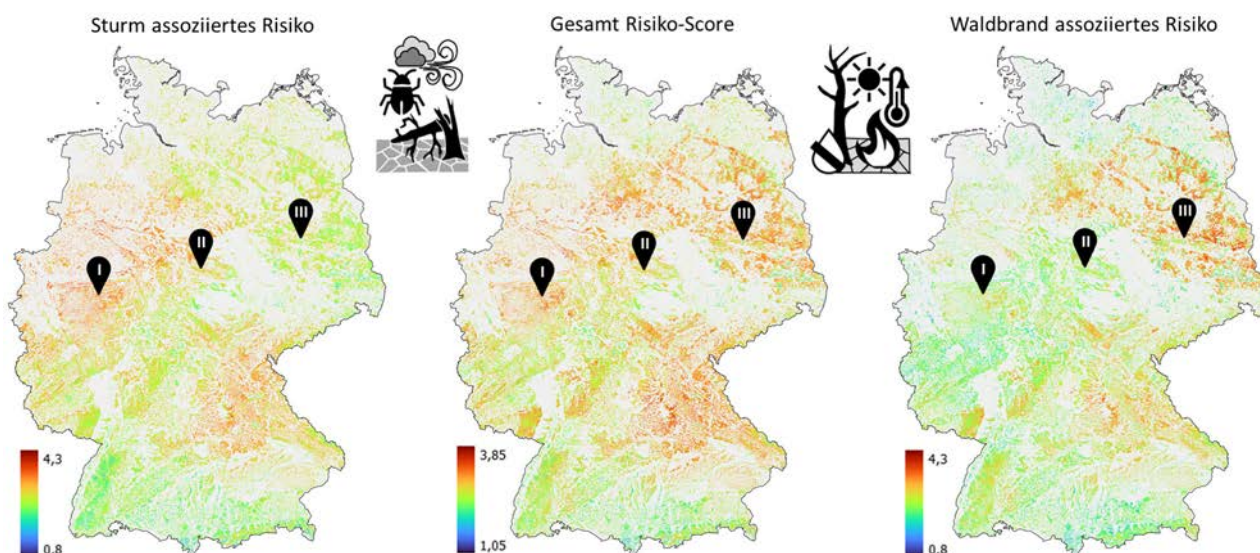


Abbildung 16: Risikokartierung für Deutschland; Gesamtbewertung aller Indikatoren (mittlere) und differenziert nach Sturm-assoziierten Indikatoren (links) bzw. Waldbrand-assoziierten Indikatoren (rechts); die schwarzen Markierungen zeigen die Testgebiete im Arnsberger Stadtwald (I), im Nationalpark Harz (II) und bei Beelitz (III), für die nach Kriterien differenzierte und störungs-spezifische Darstellung in den nachfolgenden Grafiken.

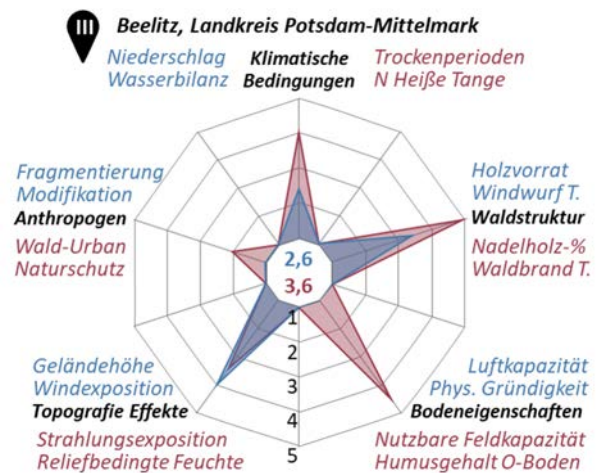
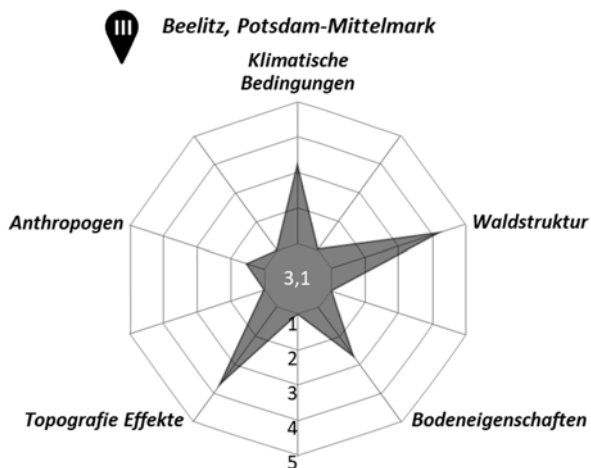
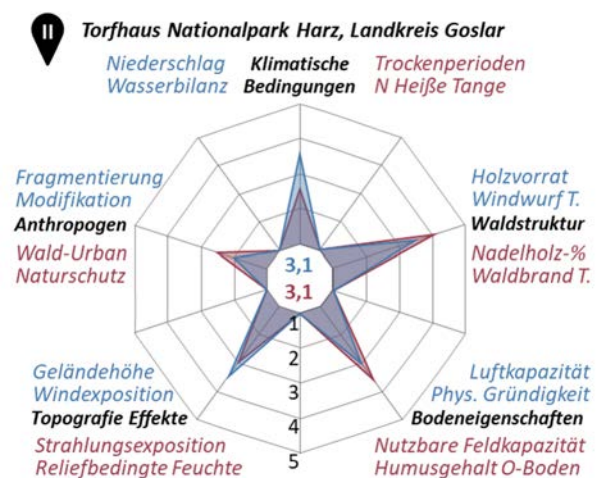
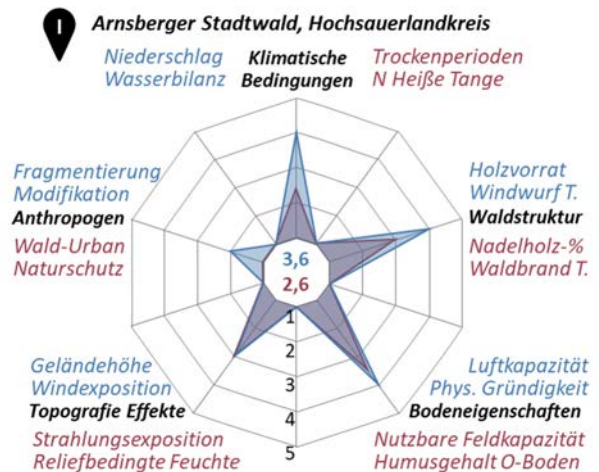
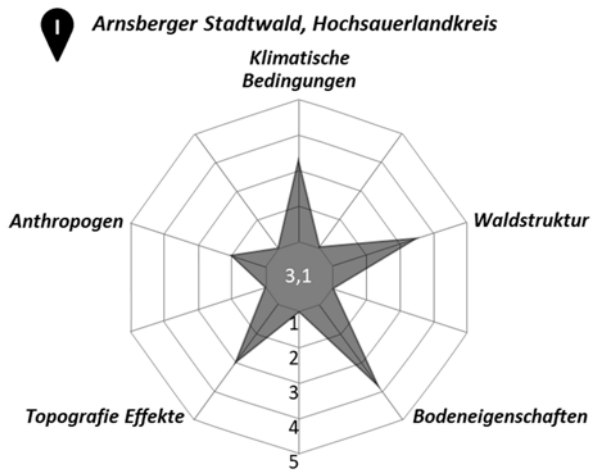
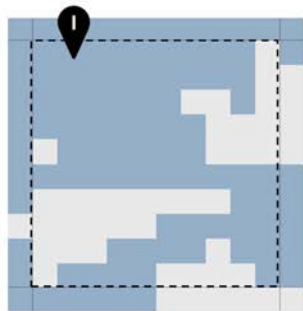


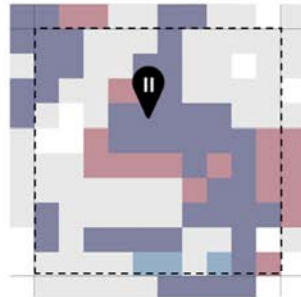
Abbildung 17: Darstellung der Risiko-Bewertung für drei Test-Gebiete (I, II und III) mit dem gleichen Risikoscore von 3,1; differenziert nach den Kriterien (linke Spalte) und Störung spezifischen Indikatoren (rechte Spalte – Sturm-assoziierte bzw. Waldbrand-assoziierte Indikatoren, dargestellt in blau bzw. rosa)

4.2 Bivariate Risikokartierung

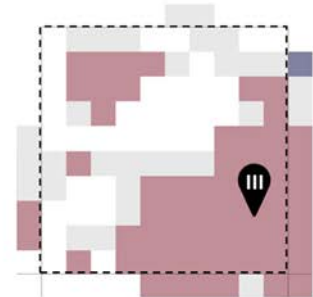
Ausgehend davon, dass Bestände mit bestimmten Eigenschaften eine Prädisposition gegenüber spezifischen Schadereignissen haben, können in dem erstellten GIS Schad spezifische Abfragen erstellt werden um Bestände gezielt nach deren Multi-Kriterien Risiko zu Priorisieren. Dazu wurde eine räumliche Aggregation der Störungsspezifischen 100x100 m Risikokarten auf das Geografische Gitter für Deutschland in der Lambertprojektion ETRS89-LAEA (EPSG:3035) mit 1x1 km Zellengröße durchgeführt und durch bivariate Farbcodierung eine einfach zu interpretierende Karten-Darstellung von mehrfach-Risiken erstellt.



Arnsberger Stadtwald 1x1 km
100 ha Holzboden (grau), davon:
66 % Sturm (blau)
→ Bivariate = B1

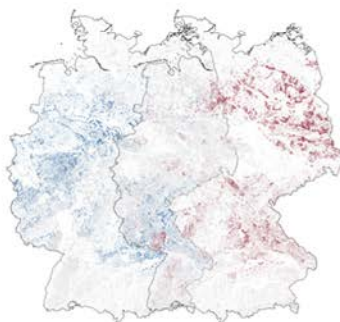


Nationalpark Harz 1x1 km
95 ha Holzboden (grau), davon:
41 % Sturm (blau)
51 % Waldbrand (rot)
38 % beide (violett)
→ Bivariate = B2



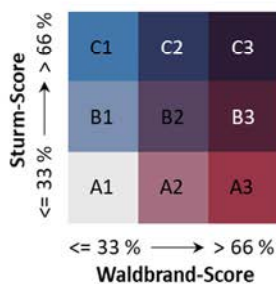
Beelitz 1x1 km
67 ha Holzboden (grau), davon:
51 % Waldbrand (rot)
→ Bivariate = A3

Univariate Risiko-Kartierung



Sturm-Score >3 Waldbrand-Score >3
A = (0,33] % 1 = (0,33] %
B = (33,66] % 2 = (33,66] %
C = (66,100] % 3 = (66,100] %

Bivariate Farbcodierung



Bivariate Risiko-Kartierung für Deutschland

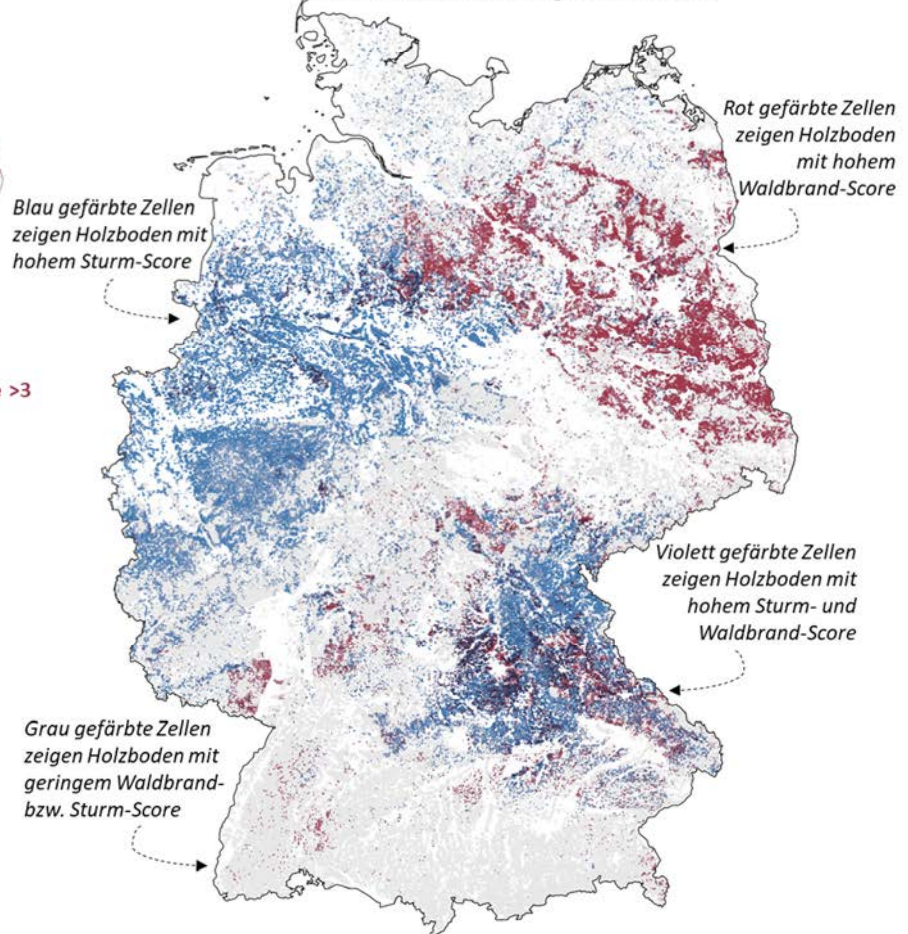


Abbildung 18: Ergebnis der räumlichen Aggregation Beispielhaft für die 1x1 km Zellen der Untersuchungsgebiete im Arnsberger Stadtwald, dem Nationalpark Harz und bei Beelitz liegen und für die Bivariate Karte Sturm- und/oder Waldbrand-assoziierter Risiken basierend auf der Multikriterien Entscheidungshilfe für Deutschland.

5 Potenziale und Limitierungen

Die vorgestellte Methode für ein Multikriterien-Risiko-Assessment eignet sich für Zielkontexte bei denen die Einflussgrößen (Kriterien) in einem komplexen Wirkungsgefüge stehen. Die bivariate Risikokarten ermöglichen eine einfache Darstellung und Interpretation von störungsspezifischen Mehrfach-Risiken. Die Dokumentation der Eingangsdaten gewährleistet die vollständige Reproduzierbarkeit der MCOA. Durch das Whitebox-Konzept kann das Verfahren flexibel in bestehende forstbetriebliche Planungssysteme integriert werden und Indikatoren mit eigenen Daten erweitert werden.

Multi-Kriterien Risiko-Kartierung erlaubt die Priorisierung von Risikostandorten differenziert nach verschiedenen Einfluss-Bereichen (Kriterien) und ermöglicht eine störungs-differenzierte Risiko-Kartierung nach Sturm und/oder Waldbrand/Trockenstress assoziierten Risiko-Indikatoren. Damit können Informationen gesammelt und dargestellt werden um abzuschätzen welche Waldbestände das größte waldbauliche Potenzial für Resilienz fördernde Maßnahmen haben und wo anthropogene Einflüsse und Standortgegebenheiten die Vulnerabilität bestimmen. Gleichzeitig ermöglicht die Betrachtung einzelner Risiko-Aspekte ein tieferes Verständnis zu potenziellen Konsequenzen (Kosten-Nutzen) und fördert die Evaluation von Ungewissheiten bezüglich zukünftiger Entwicklungs-Szenarien und der Validität der Daten.

Das vorgestellte Verfahren zielt dabei ausdrücklich nicht darauf ab konkrete Handlungsanweisungen zu geben, sondern stellt vielmehr ein Werkzeug dar, das die Nutzenden dabei unterstützen kann die multi-kausalen Zusammenhänge mehrerer Einflussgrößen besser zu verstehen und mögliche Konsequenzen verschiedener Szenarien bzw. Handlungsoptionen zu visualisieren und gegeneinander abwägen und in Entscheidungen zur Planung und Evaluation von Maßnahmen im forstlichen Risikomanagement einzubeziehen.

6 Fazit und Ausblick

Die beschriebene Multikriterien-Overlay Analyse kann Plattform unabhängig mit Desktop-GIS Anwendungen wie QGIS oder ArcGIS durchgeführt werden oder Verarbeitungsumgebungen wie R oder Python implementiert werden. Die Geoinformationssoftware QGIS bietet eine Open Source basierte Softwarelösung, die durch die Einbindungsmöglichkeit zahlreicher Plug-Ins die wesentlichen Funktionen eines vollwertigen GIS und steht diesbezüglich Programmen wie ArcGIS in kaum einer Sache nach. Die Software steht unter der GNU General Public-Lizenz sowohl zur nicht-kommerziellen als auch zur kommerziellen Nutzung zur Verfügung. Sie bietet damit gegenüber dem bereits erwähnten ArcGIS u.a. den Vorteil der Kostenneutralität, da sowohl das Programm als auch der, durch eine aktive Entwickler- & Nutzercommunity gewährleistete, Support kostenfrei zur Verfügung stehen. Für den Einsatz in der Forstwirtschaft dürfte QGIS besonders großes Potential haben, da ein GIS für die Bearbeitung komplexer forstlicher Fragestellungen und die Verwaltung von Daten mit räumlichem Bezug beinahe uneingeschränkt geeignet ist.

7 Verweise auf zugehörige Dokumente und Veröffentlichungen

- Appendix 1: Metadaten Dokumentation - Multikriterien Risiko-Assessment (26-seitige PDF)
- Appendix 2: Metadaten Dokumentation - Indikatoren Klimaveränderungen (10-seitige PDF)
- Webinar: „Abschlusswebinar und Überblick über die Ergebnisse des WaldSpektrum-Projekts“ verfügbar auf der Projektwebseite unter <https://waldspektrum.de/erklavideos> oder bei Youtube abrufbar unter <https://youtu.be/Cp2ZeWbVkaw?si=RG3clflBahwtxD2w>
- Videoshort: „Wald und Klimawandel – Risiken und Auswirkungen“ Verfügbar auf der Projektwebseite oder bei Youtube abrufbar unter https://youtu.be/LW-fTvX4gog?si=pkLCVl_h4ihMrPQk

8 Referenzen

- Altenkirch, W., Majunke, C., & Bogenschutz, F. (2002). *Waldschutz auf ökologischer Grundlage*. Eugen Ulmer.
- Ammer, C, Fichtner, A, Fischer, A, Gossner, MM, Meyer, P, Seidl, R, ... & Wagner, S (2018). Key ecological research questions for Central European forests. *Basic and Applied Ecology*, 32, 3-25.
<https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.07.006>
- Ancelin, P., Courbaud, B., and Fourcaud, T. (2004): Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands, *Forest Ecology and Management*, 203, 101–121,
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.067>
- Assmann, E. (2013). *The principles of forest yield study: studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands*. Elsevier.
- Beck, W., Löffler, S., & Kätzel, R. (2007). Zum Einfluss von Stickstoffeinträgen auf Wachstum und Vitalität der Kiefer. *Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland–Ökologie und Bewirtschaftung*. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 32, 182-198.
- Bolte, A, Ammer, C, Löf, M, Madsen, P, Nabuurs, GJ, Schall, P, ... & Rock, J (2009). Adaptive forest management in central Europe: climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24(6), 473-482. <https://doi.org/10.1080/02827580903418224>
- Burschel, P., & Huss, J. (1987). *Grundriss des Waldbaus. Ein Leitfaden fuer Studium und Praxis*. Pareys Studentexte (Germany, (49.).
- Chávez, R. O., Rocco, R., Gutiérrez, Á. G., Dörner, M., & Estay, S. A. (2019). A self-calibrated non-parametric time series analysis approach for assessing insect defoliation of broad-leaved deciduous *Nothofagus pumilio* forests. *Remote Sensing*, 11(2), 204. <https://doi.org/10.3390/rs11020204>
- Chávez, R. O., Estay, S. A., Lastra, J. A., Riquelme, C. G., Olea, M., Aguayo, J., & Decuyper, M. (2022). npphen: an R-package for detecting and mapping extreme vegetation anomalies based on remotely sensed phenological variability. *Remote Sensing*, 15(1), 73. <https://doi.org/10.3390/rs15010073>
- Chen, Y.-Y., Gardiner, B., Pasztor, F., Blennow, K., Ryder, J., Valade, A., Naudts, K., Otto, J., McGrath, M. J., Planque, C., and Luysaert, S. (2018): Simulating damage for wind storms in the land surface model ORCHIDEE-CAN (revision 4262), *Geosci. Model Dev.*, 11, 771–791, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-771-2018>
- Chmielewski, F. M. (2007). Folgen des klimawandels für land-und forstwirtschaft. <https://edoc.hu-berlin.de/server/api/core/bitstreams/15a4c379-ca4b-4b31-a474-30201933f86b/content>
- Countryman, C. M. (1972). The fire environment concept. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.
- Estay, S. A., Chávez, R. O., Rocco, R., & Gutiérrez, A. G. (2019). Quantifying massive outbreaks of the defoliator moth *Ormiscodes amphimone* in deciduous *Nothofagus*-dominated southern forests using remote sensing time series analysis. *Journal of Applied Entomology*, 143(7), 787-796. <https://doi.org/10.1111/jen.12643>
- Feser, F., Barcikowska, M., Krueger, O., Schenk, F., Weisse, R., and Xia, L. (2015): Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe—A review, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 141, 350–382,
<https://doi.org/10.1002/qj.2364>
- Gardiner, B., Byrne, K., Hale, S., Kamimura, K., Mitchell, S. J., Peltola, H., and Ruel, J.-C. (2008): A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests, *Forestry*, 81, 447–463,
<https://doi.org/10.1093/forestry/cpn022>
- Gardiner, B.: Wind damage to forests and trees (2021): a review with an emphasis on planted and managed forests, *Journal of Forest Research*, 26, 248–266, <https://doi.org/10.1080/13416979.2021.1940665>
- Gardiner, B., Lorenz, R., Hanewinkel, M., Schmitz, B., Bott, F., Szymczak, S., Frick, A., and Ulbrich, U. (2024): Predicting the risk of tree fall onto railway lines, *Forest Ecology and Management*, 553, 121614,
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121614>

- Gazol, A., Camarero, J. J., Sánchez-Salguero, R., Zavala, M. A., Serra-Maluquer, X., Gutiérrez, E., ... & Ruiz-Benito, P. (2022). Tree growth response to drought partially explains regional-scale growth and mortality patterns in Iberian forests. *Ecological Applications*, 32(5), e2589. <https://doi.org/10.5061/dryad.sj3tx965x>
- Gnilke, A., & Sanders, T.G.M. (2022). Distinguishing abrupt and gradual forest disturbances with MODIS-based phenological anomaly series. *Frontiers in Plant Science*, 13, 863116. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.863116>
- Gupta, R., & Sharma, L. K. (2022). Mixed tropical forests canopy height mapping from spaceborne LiDAR GEDI and multisensor imagery using machine learning models. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100817.
- Hale, S. E., Gardiner, B., Peace, A., Nicoll, B., Taylor, P., and Pizzirani, S. (2015): Comparison and validation of three versions of a forest wind risk model, *Environmental Modelling & Software*, 68, 27–41, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.01.016>
- Hilbrig, L., Wellbrock, N., and Bielefeldt, J. (2014): Harmonisierte Bestandesinventur: Zweite Bundesweite Bodenzustandserhebung, BZE II, Thünen Working Paper, 26.
- Hofmann, G., Heinsdorf, D., & Krauß, H. H. (1990). Wirkung atmosphärischer Stickstoffeinträge auf Produktivität und Stabilität von Kiefern-Forstökosystemen. *Beiträge für die Forstwirtschaft*, 24(2), 59-73.
- IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- IPCC, 2012: Glossary of terms. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 555-564.
- Jung, C. and Schindler, D. (2019): Historical Winter Storm Atlas for Germany (GeWiSA), *Atmosphere*, 10, 1–17, <https://doi.org/10.3390/atmos10070387>
- Kamimura, K., Gardiner, B., Kato, A., Hiroshima, T., and Shiraishi, N. (2008): Developing a decision support approach to reduce wind damage risk - a case study on sugi (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D.Don) forests in Japan, *Forestry*, 81, 429–445, <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn029>
- Körschens, M. (2004). Soil organic matter and environmental protection. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 50(1), 3-9.
- Larjavaara, M., Brotons, L., Corticeiro, S., Espelta, J.M., Gazzard, R., Leverkus, A., Lovric, N., Maia, P., Sanders, T.G.M., Svoboda, M., Thomaes, A., Vandekerckhove, K. (2023) Deadwood and fire risk in Europe : Knowledge synthesis for policy. JRC134562. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 15 p, DOI:10.2760/553875 https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn066920.pdf
- Murray, V., & Ebi, K. L. (2012). IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX). *J Epidemiol Community Health*, 66(9), 759-760.
- Otto, H.-J. (1994): Waldökologie. Seite 73, Tab. 4 und Seite 72–76; Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M. E., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., ... & 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>
- Patacca, M., Grünig, M., Schelhaas, M. J., Alberdi, I., Filipek, S., Fridman, J., ... & Nabuurs, G. J. (2026). Climate-driven increases in wildfire projected to affect European forest types differently. *Environmental Research Letters*, 21(3), 034027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae4115>
- Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H., and Ikonen, V.-P. (1999): A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch, *Can. J. For. Res.*, 29, 647–661, <https://doi.org/10.1139/x99-029>

- Pukkala, T., Laiho, O., and Lähde, E. (2016): Continuous cover management reduces wind damage, *Forest Ecology and Management*, 372, 120–127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.014>
- Rukh, S., Sanders, T. G., Krüger, I., Schad, T., & Bolte, A. (2023). Distinct responses of European beech (*Fagus sylvatica* L.) to drought intensity and length—a review of the impacts of the 2003 and 2018–2019 drought events in Central Europe. *Forests*, 14(2), 248. <https://doi.org/10.3390/f14020248>
- Sanders, TGM, Spathelf, P., & Bolte, A. (2019). The response of forest trees to abiotic stress. In *Achieving sustainable management of boreal and temperate forests* (pp. 99-128). Burleigh Dodds Science Publishing. DOI:10.19103/AS.2019.0057.05 <https://doi.org/10.19103/AS.2019.0057.05>
- Sanders, TGM, Labenski, P., Ewald, M., & Gnille, A. (2023). Risikomanagement im Wald-Stellschrauben & Potentiale zur Reduktion der Waldbrandvulnerabilität. Wissenstransfer in die Praxis: „Waldbrand-Katastrophe, Störung oder Chance?“. Tagungsband zum 18. Eberswalder Waldkolloquium 16. Februar 2023 Eberswalde.
- Schindler, D., Grebhan, K., Albrecht, A., and Schönborn, J. (2009): Modelling the wind damage probability in forests in Southwestern Germany for the 1999 winter storm 'Lothar', *International journal of biometeorology*, 53, 543–554, <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0242-3>
- Schmidt, M., Hanewinkel, M., Kändler, G., Kublin, E., and Kohnle, U. (2010): An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage — experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany, *Can. J. For. Res.*, 40, 1636–1652, <https://doi.org/10.1139/X10-099>
- Spathelf, P., Natkhin, M., Thom, D., Puhlmann, H., Bolte, A., Sass-Klaassen, U., ... & Sanders, T. G. (2025). Fakten zum Thema. *AFZ, der Wald*, 80(1), 36-40. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn069375.pdf
- Stadelmann, C., Grottian, L., Natkhin, M., and Sanders, T. G. M. (2025): Improving the predictive capacity of the windthrow risk model ForestGALES with long-term monitoring data – A statistical calibration approach, *Forest Ecology and Management*, 576, 122389, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122389>
- Suvanto, S., Henttonen, H. M., Nöjd, P., and Mäkinen, H. (2016): Forest susceptibility to storm damage is affected by similar factors regardless of storm type: Comparison of thunder storms and autumn extra-tropical cyclones in Finland, *Forest Ecology and Management*, 381, 17-28, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.005>
- Thater, N., Natkhin, M., Holzhausen, M., & Spathelf, P. (2024). Die temperatenausgleichende Wirkung von Waldbeständen am Beispiel der Intensivmonitoringfläche Britz. Project brief/Thünen Institute. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn067708.pdf
- Wegmann, E. (2010): Verminderung der Sturmgefährdung unserer Wälder - eine Art Checkliste. *Zürcher Wald* 1, 30-32. https://www.waldwissen.net/assets/waldwirtschaft/schaden/sturm_schnee_eis/wsl_checkliste_sturm/download/wsl_checkliste_sturm_originalartikel.pdf.pdf
- Wellhausen, K. (2015). Produktivität und Klimasensitivität von Kiefer (*Picea abies* (L.) Karst) im Rein- und Mischbestand-Untersuchungen entlang eines ökologischen Gradienten. In DVFFA, Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten.
- Wiedemann, E. (1951). Ertragskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft: das Hauptergebnis der 70 jährigen Arbeiten der (ehem.) Preußischen Forstlichen Versuchsanstalt.
- Wolf, M., Schönthaler, K., & Ölmez, C. Übersicht über Indikatoren in der bodenbezogenen Berichterstattung Deutschlands und der EU.

9 Anhang

9.1 Annex – Übersicht Grundlagen für Klima- u. Anbaurisiken nach Bundesländern

Bundesland	Klimakarten Grundlagen und Parameter	Link Onlinetool
DE.BW	<p># Standortbewertung für Großlandschaften BWs auf Basis regionaler Einheiten der forstlichen Standortkartierung (wobei Wassermangel = relative Füllung des Bodenwasserspeichers bezogen auf die nutzbare Feldkapazität)</p> <p># Baumarteneignung in Abhängigkeit der Waldentstehung und Sukzession hinsichtlich Konkurrenz, Pfleglichkeit, Stabilität, Leistung</p>	https://www.fva-bw.de/daten-tools/geodaten/klimakarten
DE.BY	<p># Klimakarte aus Jahrestemperatur/-Niederschlag: Kombination von Temperaturklassen mit Niederschlagsklassen ergeben Kombinationsmöglichkeiten in Form einer Matrix, anschließende Zuordnung von Anbaurisiko der Baumarten</p> <p># Wasserhaushaltskarte nach Boden in Kategorien je nach Wasserspeicherkapazität → Berechnung des Wasserhaushaltsindex aus Klima, Geländemerkmale und Boden + Vereinigung von Klimakarten und Wasserhaushaltskarten zu Baumartenkarte= Klimarisikokarte</p>	
DE.BR	<p># Ökologische Wasserbilanz = Niederschlag – potenzielle Verdunstung im Sommerhalbjahr --> Wasserdefizit aus aktueller und potenzieller Evapotranspiration</p> <ul style="list-style-type: none"> • Minimale Tagesmitteltemperatur (Nichtvegetationszeit) „Spätfrostsumme“ (=Summe Tmin aller Tage mit Tmin <0°C (April - Mai) • Feuchtestufen und Stammstandortsgruppe mit Abfrage zur Baumarteneignung 	https://forst.brandenburg.de/lfb/de/service/geoportal/#
DE.HE	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbare Feldkapazität (nFK), Klimatische Wasserbilanz (KWB) und Standortwasserbilanz (SWB) – in der forstl. Vegetationszeit (heute/künftig) <p>--> Matrix Trophie Standort Höhenrahmen</p> <p>--> Zuordnung über Baumarteneigenschaft, wobei Trockenstressrisiko für HBA in Bezug zur höhenabhängige Niederschlags- und Temperaturverteilung</p>	https://forstliche-foerderung.de/application/nds-gesamt
DE.NI	<p># Boden (flächendeckende Datengrundlage aus Bodenkarten)</p> <p># Klima (Temperatur, Niederschlag, Verdunstung, Wärmehaushalt aus digitalem Klimaatlas NRW)</p> <p># Relief (Sonnen- und Schattenhängen, Hangwasserzug) und Höhenstufe</p> <p># Wasserverfügbarkeit und Nährstoffversorgung</p> <p># Wärmehaushalt in der Vegetationszeit (GDD ≥ 10 °C Tagesmitteltemperatur)</p>	https://www.waldinfo.nrw.de/waldinfo2/?lang=de
DE.NW	<p># Vorkommen und Bonität der Hauptbaumarten entlang Klimagradient</p> <p># Niederschlag in der Vegetationszeit und der Jahresmitteltemperatur (Klimamatrix heute / künftig)</p> <p>--> Übertragung der Klimamatrix auf die Waldfläche und Zusammenführung der Hauptbaumarten und der Klimamatrix an den jeweiligen Standorten</p>	
DE.RP	<p># Klimafeuchtestufen</p> <p># Jahresniederschlag, Jahresmitteltemperatur und saisonale Verteilung (Niederschlag und Temperatur (Mai bis Sept.))</p> <p># Vegetationszeitlänge (Tage > 10 °C) und Trockenheitsindizes</p> <p># Klimatische Wasserbilanz (KWB)</p> <p># Lage, Boden und Hydrologie des Standortes und Höhenstufen</p>	https://www.sbs.sachsen.de/thematische-uebersichtskarten-18503.html
DE.HE, DE.ST, DE.SH,	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbare Feldkapazität (nFK) <p># Klimatische Wasserbilanz (KWB) und abgeleitete Standortwasserbilanz (SWB)</p> <p>--> Eignungs-Matrix nach Nährkraftstufe Standort Höhenstufe</p>	https://www.nw-fva.de/BaEm/
DE.TH	<p># Klimahüllenkonzept, ähnlich wie RLP nach Vorkommen und Bonität der Hauptbaumarten entlang eines Klimagradienten aus Niederschlag in der Vegetationszeit und der Jahresmitteltemperatur (Klimamatrix) für heutige und zukünftige Klimabedingungen</p> <p>→ Zusammenführung der Hauptbaumarten und der Klimamatrix nach Standort</p>	

9.2 Annex – Übersicht Datenverfügbarkeit Klimarisikokarten nach Bundesländern

Bundesland	Datensatz und Baumarten	Szenarien (Zeiträume)	Verfügbarkeit
DE.BW	Klimarisikokarten für Buche, Traubeneiche, Weißtanne, Fichte	PCC Szenarien RCP4,5 & RCP8,5 2021-2050 2071-2100	Vulnerabilitätskarten (Trockenstress, Borkenkäfer-Risiko, Sturmwurfgefährdung) https://www.fva-bw.de/fileadmin/user_upload/Daten_und_Tools/Geodaten/Klimakarten/leitfaden_baumarteneignung_vulnerabilitaetskarten_2019.pdf
DE.BY	Anbauriskokarten für 21 Baumarten	IPCC Szenario B1 1971-2000 2071-2100	Vektordatensatz https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/boden-klima/dateien/a94_b%C3%A4ume_f%C3%BCr_die_zukunft-baumartenwahl_auf_wissenschaftlicher_grundlage_bf_gesch.pdf
DE.BR	Karten mit Anbauempfehlungen zu 16 Baumarten	IPCC Szenario 1AB 2071-2100	Kätzel R., Fleck S., Albert M. (2017): https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/publikationen/pdf/katzel_2017_die_walder_des2.pdf Riek et al. (2020). Zur Abschätzung des standörtlichen Anbaurisikos von Baumarten im Klimawandel im nordost-deutschen Tiefland.
DE.HE	Klimarisikokarten für Buche, Traubeneiche, Douglasie, Fichte, Kiefer	IPCC Szenario RCP8,5 1981-2010 2041-2070	Vektorkarten https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/publikationen/pdf/Abschlussbericht_Projekt_IKSP-Hessen_L-12_2023-10-31.pdf
DE.NI	Klimarisikokarten für Buche, Traubeneiche, Douglasie, Fichte, Kiefer	IPCC Szenario RCP 8,5 1981-2010 2041-2070	Klimadaten – Erläuterungen u. Übersicht verfügbarer Fachdaten https://nibis.lbeg.de/DOI/dateien/Geofakten_39_Text_4_2022.pdf https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/publikationen/pdf/spellmann_2020_entscheidungshilfen_zur5.pdf
DE.NW	Forstliche Standortkarte zu 19 Baumarten (u.a. Traubeneiche, Buche, Kiefer)	IPCC Szenarien RCP4,5 & RCP8,5 2017-2100	Geodaten RCP4.5 / RCP8.5 https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geologie/boden/BK/ISF_SK50RCP45/ISFSK50RCP45_EPSG25832_Geodatabase.zip http://www.gis-rest.nrw.de/atomFeed/rest/atom/b634b3bb-3ab3-4b27-9d2d-c6d1e41988fe/2b1455f2-44a3-4282-ac5d-ad2362b2aa69.html
DE.RP	Klimaeignungskarten zu Traubeneiche, Buche, Douglasie, Fichte, Kiefer	IPCC Szenarien A1B normal & trocken 1971-2000 2021-2050 2071-2100	Klimawandelfolgen – Infoportal zu Trockenstress, Schadorganismen, Windwurf, Hagelschäden, Waldbrandgefahr, Früh/Spätfrost https://www.klimawandel.rlp.de/klimawandel/folgen/wald
DE.SN	Forstliche Klimastufen nicht spezifiziert nach Baumarten	IPCC Szenario B1 1971-2000 2091-2100	https://www.wald.sachsen.de/forstliche-klimagliederung-5803.html
DE.ST	Klimarisikokarten für Buche, Traubeneiche, Douglasie, Fichte, Kiefer	PCC Szenario RCP8,5 1981-2010 2041-2070	https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/publikationen/pdf/hamkens_2020_entscheidungshilfen_zur.pdf
DE.SH	Klimarisikokarten für Buche, Traubeneiche, Douglasie, Fichte, Kiefer	PCC Szenario RCP8,5 1981-2010 2041-2070	https://umweltportal.schleswig-holstein.de/freitextsuche?q=Wald&rstart=40&currentSelectorPage=1&f=
DE.TH	Klimarisiko-Diagramme zu 13 Baumarten	IPCC Szenario B2 1971-2000 2021-2050	https://www.researchgate.net/publication/242530917_Waldbauliche_Konsequenzen_fur_Thuringen

9.3 Annex – Übersicht zur angepassten Baumartenwahl nach Bundesländern

Bundesland	Publikation (Organisation Stand)	Klimamodelle	Link
DE.BW	Alternative Baumarten im Klimawandel 2.0 (FVA-BW W, 2021)	Ursprungsverbreitung BA mit Toleranz von Jahresdurchschnitts-Temperatur von 11,5°C	https://www.fva-bw.de/fileadmin/publikationen/sonstiges/2021_fva_artensteckbriefe.pdf
DE.BY	Praxishilfe Klima-Boden Baumartenwahl Band II (LWF W, 2020)	Klimahüllen, Gegenwart + zwei Szenarien (RCP 4.5 & RCP 8.5)	https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/wissenstransfer/bilder/praxishilfe_ii_klima_boden_baumartenwahl_bf.pdf
DE.BR	Empfehlungen zur Mischung von Baum- und Straucharten im Wald (LFB K, 2022)		https://forst.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/baumart_misch.pdf
DE.HE	Alternative Baumarten für Hessen (NW-FVA PB* 2021)		https://zenodo.org/records/7197792
DE.MV	Maßnahmenkonzept zur Anpassung der Wälder MV an den Klimawandel (LU-MV PB, 2010)		https://www.regierung-mv.de/serviceassistent/download?id=21922
DE.NI	Klimaangepasste Baumartenwahl in den niedersächsischen Landesforsten (NLF/NW-FVA PH, 2019)		https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfv/publikationen/pdf/bockmann_2019_klimaangepasste.pdf
DE.NW	Wiederbewaldungskonzept NRW – Empfehlungen für eine nachhaltige Walderneuerung auf Kalamitätsflächen (MLV-NRW PH, 2020)	Referenz: RCP 4.5 & RCP 8.5, Bezug auf forstliche Vegetationszeit und klimatische Wasserbilanz	https://www.mlv.nrw.de/wp-content/uploads/2023/05/wiederbewaldungskonzept_nrw.pdf
DE.RP	Grundsatzanweisung Waldverjüngung im Klimawandel (Artensteckbriefe)		https://www.wald.rlp.de/fileadmin/website/downloads/5bewahren/Grundsatzanweisung_Waldverjuengung_im_Klimawandel.pdf
DE.SL	Richtlinie Bewirtschaftung Staatswald (LF-RLP PH, 2021)		https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/saarforst/dl-waldbaurichtliniestaatswald.pdf?__blob=publicationFile&v=2
DE.SN	Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels (KeWuf-SN PH, 2020)		https://www.sbs.sachsen.de/download/Waldpost2020_Baumartenwahl_bf.pdf
DE.ST	Entscheidungshilfe zur klimaangepassten Baumartenwahl (LZW-ST WA*, 2020)	Klimadaten (DWD) & RCP Klimaszenarien (IPCC 2014)	https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfv/publikationen/pdf/hamkens_2020_entscheidungshilfen_zur.pdf
DE.SH	Waldzustandsbericht 2020 Kaptitel: Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl (NW-FVA WA*, 2020)	Klimadaten DWD (1981-2010), Klimaprojektion (2041-2070) RCP8.5 ECHAM6 STARS II, Median	https://transparenz.schleswig-holstein.de/dataset/51f01635-3861-4928-9721-ee6f95013467/resource/d45c5e73-9045-4954-a952-721fc5b795ff/download/waldzustandsbericht2020.pdf
DE.TH	Standortgerechte Baumarten- & Bestandeszieltypenwahl sowie Baumartenempfehlung als Tabellenwerk (FFK-TH PH, 2015)	Klimabereich definiert aus Kombination von Vegetationszeitlänge und klimatischer Wasserbilanz _{veg}	https://www.waldbesitzerportal.de/fileadmin/user_upload/Download/Waldumbau/Baumartenempfehlung-Erlaeuterung.pdf https://www.waldbesitzerportal.de/fileadmin/user_upload/Download/Waldumbau/Baumartenempfehlung-Tabellenwerk.pdf

9.4 Annex – Übersicht Waldentwicklungstypen nach Bundesländern

Bundesland	Publikation (Organisation Stand)	Leitfaden-Konzept	Standörtliche Grundlagen	Link
DE.BW	Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen (Forst-BW PH, 2014)	<ul style="list-style-type: none"> • Standort nach Verbreitungsschwerpunkt • ökologische Situation • Entwicklung der Ausgangsbestände • Waldbauliche Maßnahmen 	<p>Großlandschaften BW als Basis für 11 regionale Einheiten der forstlichen Standortkartierung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abhängig von Waldentstehung und Sukzession 	https://www.forstbw.de/fileadmin/user_upload/ForstBW_Richtlinie_Landesweiter_Waldentwicklungstypen.pdf
DE.BR	Baumartenmischungstabellen (LFB K, 2022)	<ul style="list-style-type: none"> • Standortbezogene Kriterien (Konkurrenzfähigkeit, Pfleglichkeit, Stabilität & Leistungsfähigkeit) • Naturnähe • Klimawandeltoleranz 	fünf Klimafeuchte-stufen mit wuchsbezirksscharfer Abgrenzung (nach Daten von DWD, NW-FVA und LFB): feucht, mäßig feucht, mäßig trocken, trocken und sehr trocken	https://forst.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/baumart_misch.pdf
DE.HE	Waldentwicklungsziele für den hessischen Kommunal- und Privatwald (NW-FVA PB* 2023)	<ul style="list-style-type: none"> • Sukzessionsstadium/ Naturnähe & Funktion Produktionsziele: Zielstärke & Sortimente • Baumartenanteile und Mischungsformen • Standortsspektrum • Klimawandel 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserhaushalt (Nutzbare Feldkapazität (nFK), Klimatische Wasserbilanz und Standortwasserbilanz) • Trophiestufe • Standort • Höhenrahmen 	https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/publikationen/pdf/dobbeler_2023_waldentwicklungsziele_wez_fur_den.pdf
DE.NI	Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten (NW-FVA WA*, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • Klimawandel • Standort- und Wuchsbedingungen • Laub- und Nadelbaumarten / Baumartenanteile • Planungsfenster • Sukzess. Stellung/Naturnähe • Holzerzeugung, Schutz und Erholung 	<ul style="list-style-type: none"> • Standortwasserbilanz in der Vegetationszeit (Ableitung nFK & KWB und Nährstoffstufe (heute und künftig) • Trockenstressrisiko der Hauptbaumarten in Bezug zur höhenabhängigen Niederschlags- & Temperaturverteilung 	https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/commun/unterstuetzen/pdf/software/WEZ-Katalog_KuPW_HE_NW-FVA_2020.pdf
DE.NW	Waldbaukonzept mit Empfehlungen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung (MLV-NRW PH, 2024)	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlagen und Zielsetzung • Standortfaktoren • Baumartenzusammensetzung & Entwicklung • Aufbau standortgerechter Mischbestände • Waldfunktionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserverfügbarkeit: sickerwasser-, stauwassergeprägt, grundwassergeprägt • Nährstoffversorgung in 5 Stufen von sehr nährstoffarm bis sehr nährstoffreich • Vegetationszeit (GDD \geq 10 °C Tagesmitteltemp.) • Höhenstufe 	https://www.mlv.nrw.de/wp-content/uploads/2024/01/waldbaukonzept_nrw.pdf
DE.ST	Entscheidungshilfen Zur klimaangepassten Baumartenwahl (LZW-ST WA*, 2020)	<ul style="list-style-type: none"> • Sukzess. Stellung/Naturnähe • Schutz und Erholung • Produktionsziele: Zielstärke/Sortiment • Baumartenanteile und Mischungsform • Standortsspektrum • Klimawandel 	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Nährkraftstufe • Standort • Höhenstufe 	https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/publikationen/pdf/hamkens_2020_entscheidungshilfen_zur.pdf



Metadaten Dokumentation Multikriterien Risiko-Assessment

# Kriterium A: Klimaveränderungen	2
Indikator A1: Änderung der mittleren jährlichen Klimatischen Wasserbilanz	3
Indikator A2: %-Änderung der Summe der durchschn. Jahresniederschläge	4
Indikator A3: Änderung der Anzahl Heißer Tage (Tmax. >35°C) im Jahresmittel	5
Indikator A4: Änderung der Anzahl der Trockenperioden (d precip <2 mm) im Jahresmittel	6
# Kriterium B: Anthropogene Einflüsse	7
Indikator B1: Landschaftsfragmentierung (Effective Mesh Density)	8
Indikator B2: Ökosystem-Modifikationen (Landnutzung + Hemerobie)	9
Indikator B3: Schnittstelle (Wald-)Vegetation und Siedlung (Wildland-Urban-Intersection)	10
Indikator B4: Naturschutzstatus (protection related fire exposure)	11
# Kriterium C: Topografie-Effekte	12
Indikator C1: Topografische West-Windexposition (TOPEX)	13
Indikator C2: Strahlungsexposition (DGM - Südausrichtung)	14
Indikator C3: Höhenlage (DGM - Elevation)	15
Indikator C4: Topografischer Feuchteindex (TWI)	16
# Kriterium D: Bodeneigenschaften	17
Indikator D1: Luftkapazität im effektiven Wurzelraum	18
Indikator D2: Physiologische Gründigkeit	19
Indikator D3: Gehalte organischer Substanz in Oberböden	20
Indikator D4 : Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum	21
# Kriterium E: Waldstruktur	22
Indikator E1: Baumartenspezifische Windwurf-/Schneebruchresistenz	23
Indikator E2: Holzvorrat	24
Indikator E3: Nadelholzprozent oberirdischer Biomasse	25
Indikator E4: Baumartenspezifische Waldbrandresistenz	26

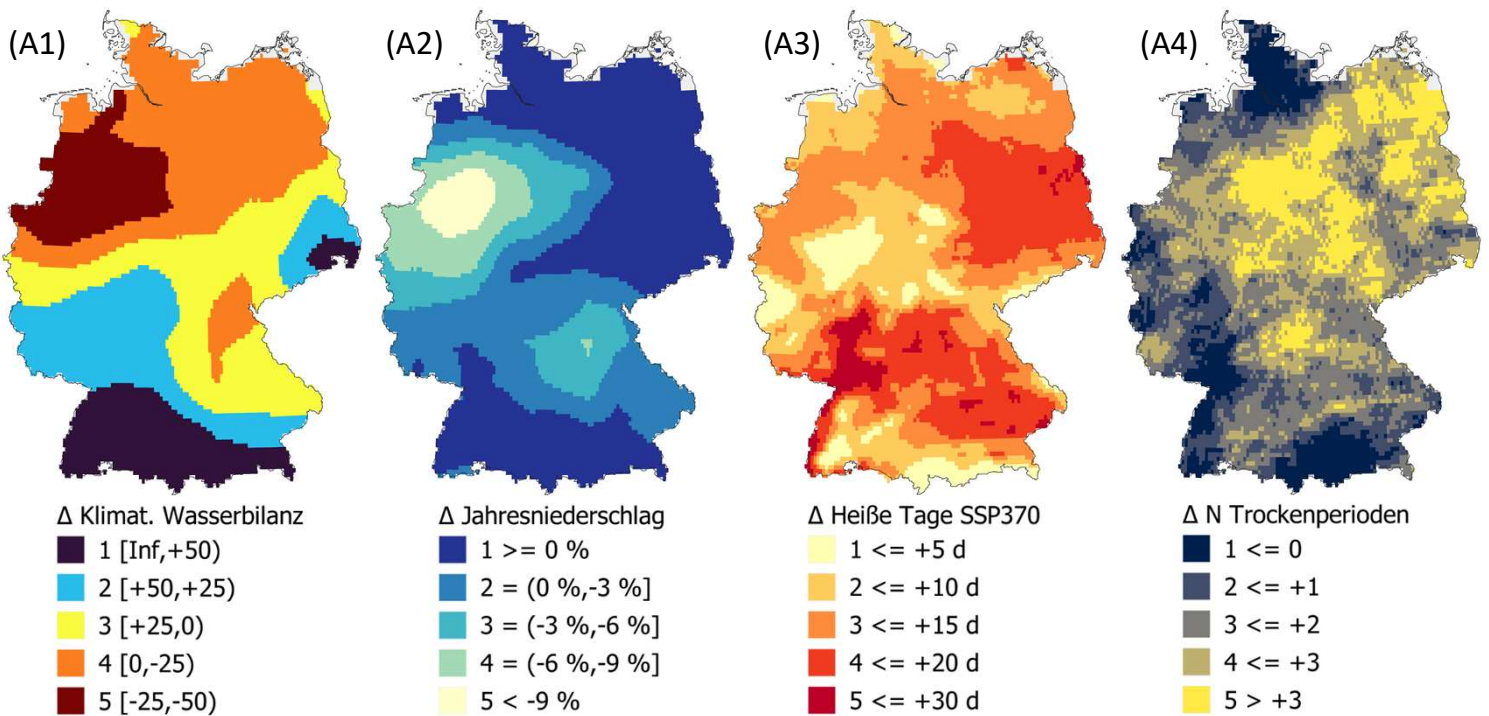
Kriterium A: Klimaveränderungen

Indikator A1: Änderung der mittleren jährlichen Klimatischen Wasserbilanz

Indikator A2: %-Änderung der Summe der durchschn. Jahresniederschläge

Indikator A3: Änderung der Anzahl Heiße Tage ($T_{max.} > 35^{\circ}\text{C}$) im Jahresmittel

Indikator A4: Änderung der Anzahl der Trockenperioden ($d \text{ precip} < 2 \text{ mm}$) im Jahresmittel



Indikator A1: Änderung der Klimatischen Wasserbilanz in den Sommermonaten (Mai-Aug)

Kontext und Relevanz: Die klimatische Wasserbilanz (KWB) ist definiert als die Differenz zwischen der Niederschlagsmenge und der potenziellen Evapotranspirationsmenge und dient der hydroklimatischen Charakterisierung eines bestimmten Standort während eines bestimmten Zeitraums. Je nachdem, ob in dem betrachteten Zeitraum die Niederschlagsmenge oder die potenzielle Evapotranspirationsmenge überwiegt, nimmt die klimatische Wasserbilanz positive oder negative Werte an und zeigt somit klimabedingte Überschüsse oder Defizite im Wasserhaushalt und dessen regionale Verteilung an.

Literatur:

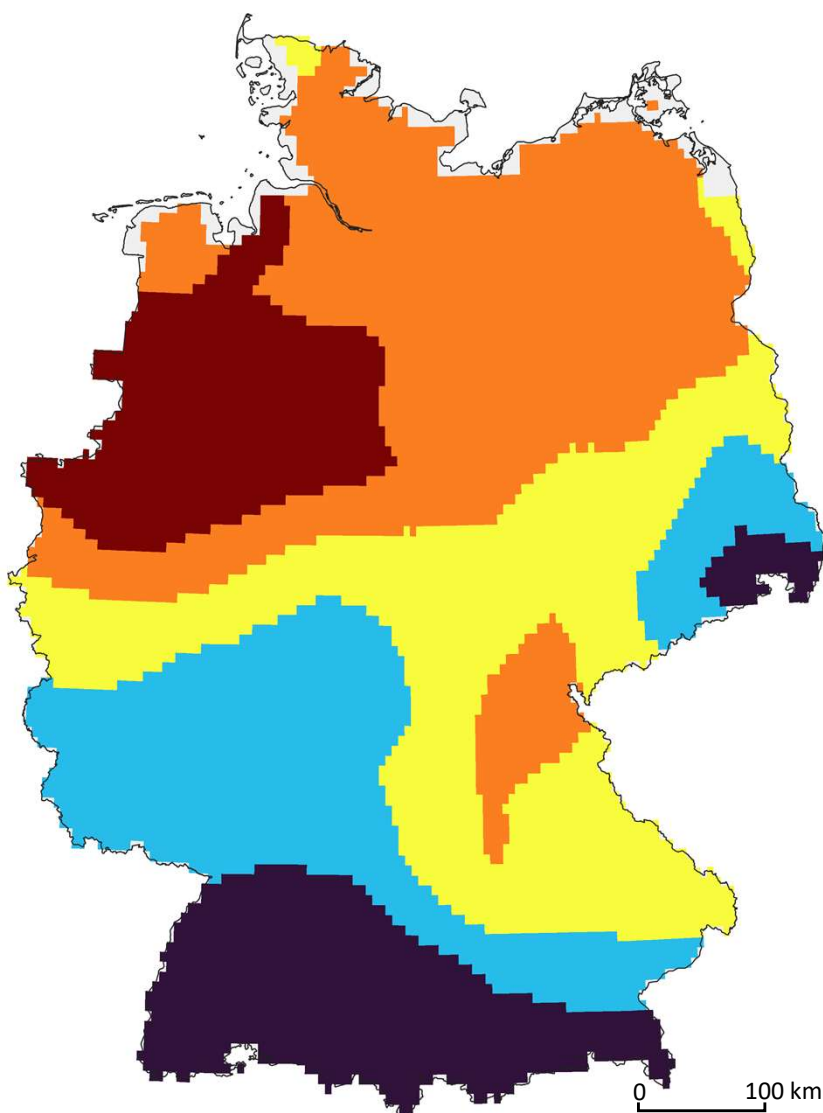
- (1) Mean Annual Climatic Water Balance - spatial (table1) and methodological (table2) variability: <https://geoportal.bafg.de/dokumente/had/214ClimaticWaterBalance.pdf>
- (2) Grise, K. M., & Davis, S. M. (2020). Hadley cell expansion in CMIP6 models. Atmospheric Chemistry and Physics, 20(9), 5249-5268. <https://doi.org/10.5194/acp-20-5249-2020>

Datengrundlage: Die Berechnung der klimatischen Wasserbilanz für die Monate Mai bis August erfolgt mit Hilfe der folgenden Bilanzgleichung für jede Gitterzelle: $KWB_{\text{Mai-Aug}} = N_{\text{Mai-Aug}} - PET_{\text{Mai-Aug}}$

$N_{\text{Mai-Aug}}$ = Niederschlag im Sommerhalbjahr in mm; und $PET_{\text{Mai-Aug}}$ = potentielle Evapotranspiration von Mai bis August (nach der Priestley-Taylor Methode aus Temperatur, Radiation und relativer Humidität berechnet). Die Veränderung wird aus der Differenz der projizierten Klimatischen Wasserbilanz für den Referenzzeitraum (1971-2000) und der Zukunft (2071-2100) berechnet.

Download: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/sis-biodiversity-cmip5-regional?tab=download>
 Metadaten: <https://geoportal.bafg.de/dokumente/had/214ClimaticWaterBalance.pdf>

Zitierung: CDS CMIP6 subsets DOI: [10.24381/cds.c866074c](https://doi.org/10.24381/cds.c866074c)

**Δ Klimat. Wasserbilanz**

- 1 [$-\infty, +50$)
- 2 [$+50, +25$)
- 3 [$+25, 0$)
- 4 [$0, -25$)
- 5 [$-25, -50$)

Datenherkunft: C3S – CDS CMIP6
 Abdeckung: ERA-5 Europe
 Raumbezug: EPSG:4326
 Referenz: 1971 – 2000
 Projektion: 2071 – 2100
 Datentyp: NetCDF (FLT4S)
 Einheit: Δ +/- mm
 Auflösung: 0.1° regular grid

Anmerkung: Studien zeigen, dass der klimatische Wasserhaushalt eine hohe zeitliche Variabilität aufweist, die ebenso wie die regionale Variabilität größtenteils auf die starken Schwankungen der Niederschlagsmenge zurückzuführen ist (1).

Die KWB-Resultate können je nach den für die Ausgangsdaten verwendeten Berechnungsmethoden und Korrekturverfahren erheblich voneinander abweichen, sodass Angaben aus unterschiedlichen Quellen oft nicht direkt vergleichbar sind (3).

Indikator A2: %-Änderung der Summe der durchschn. Jahresniederschläge

Kontext und Relevanz: Ausbleibende Niederschläge führen zu Trockenstressreaktionen, die die Photosynthese vollständig zum Erliegen bringen können. Der Indikator „Annual Precipitation“ entspricht der offiziellen BIOCLIM-Variablen BIO12 und beschreibt den Jahresmittelwert der täglichen mittleren Niederschlagsmenge und dient als Kennwert für die Wasserversorgung. Die Niederschlagssumme ist definiert als die kumulierte Menge an flüssigem und gefrorenem Wasseräquivalent des täglichen Niederschlags, aggregiert über jeweils 12 Monate und gemittelt über einen Zeitraum von 30 Jahren. Für den zukünftigen Zeitraum (2071-2100) wird der Indikator als prozentuale Veränderung im Vergleich zum Referenzzeitraum (1971–2000) angegeben (3).

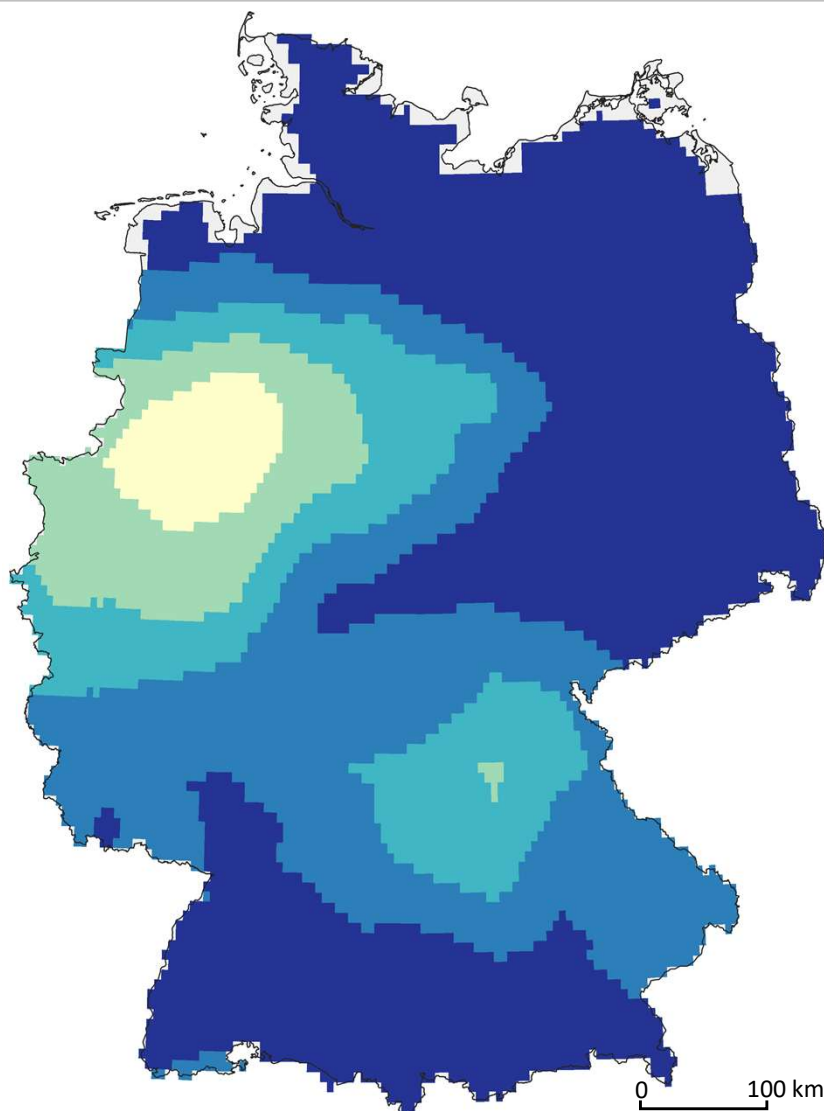
Literatur:

- (3) O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geoscientific Model Development, 9(9), 3461-3482. <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/gmd-9-3461-2016.pdf>
- (4) Regionaler Klimaatlas Deutschland- Helmholtzgemeinschaft <https://www.regionaler-klimaatlas.de/klimaatlas/2071-2100/jahr/laengste-trockenperiode/deutschland/mittlereanderung.html>

Datengrundlage: Die Berechnung der 30-Jahres Multi-Modell Zeitschnitte erfolgte auf der Grundlage von CMIP6 Daten aus fünf globalen Klimamodellen (ACCESS-CM2, CanESM5, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3 und MPI-ESM1-2-HR) für drei Shared Socioeconomic Pathways (SSP)-Experimente (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5). Die Eingangsdaten wurden unter Verwendung der Methode des Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP) auf ein regelmäßigen Längen- und Breitengradgitters harmonisiert und bias-korrigiert.

Download: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=download>
Metadaten: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CMIP6%3A+Global+climate+projections>

Zitierung: CDS CMIP6 subsets DOI: [10.24381/cds.c866074c](https://doi.org/10.24381/cds.c866074c)



Δ Jahresniederschlag

- 1 >= 0 %
- 2 = (0 %, -3 %]
- 3 = (-3 %, -6 %]
- 4 = (-6 %, -9 %]
- 5 < -9 %

Datenherkunft: C3S – CDS CMIP6
Abdeckung: ERA-5 Europe
Raumbezug: EPSG:4326
Referenz: 1971 – 2000
Projektion: 2071 – 2100
Datentyp: NetCDF (FLT4S)
Einheit: Δ +/- %
Auflösung: 0.1° regular grid

Nach dem aktuellen Stand der Forschung ist die Änderung des Niederschlags bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Jahresmittel im Vergleich zu heute (1961-1990) unklar. Einige Modelle zeigen eine Zu-, andere eine Abnahme. Die Spannweite dieser Änderung kann zwischen -12% und +22% liegen. Innerhalb dieser Spannweite sind alle Änderungen aus heutiger Sicht plausibel (4).

Indikator A3: Änderung der Anzahl Heißer Tage (Tmax. >35°C) im Jahresmittel

Kontext und Relevanz: Die photosynthetische CO₂-Aufnahme variiert mit der Temperatur. Unter 10°C und über 34°C ist die CO₂-Assimilation oft instabil. Temperaturen, die über dem Schwellenwert liegen, reduzieren in Abhängigkeit von der Baumart das Wachstum in unterschiedlichem Maße. Die Anzahl heißer Tage bezieht sich auf die jahrliebe Anzahl von Tagen mit einer täglichen maximalen Temperatur in Bodennähe (2 Meter) ber 35 °C, gemittelt über einen Zeitraum von 30 Jahren. Für den zukünftigen Zeitraum (2071–2100) wird der Indikator als absolute Veränderung der Anzahl der +/- Tage im Vergleich zum Referenzzeitraum (1971–2000) angegeben (5).

Literatur:

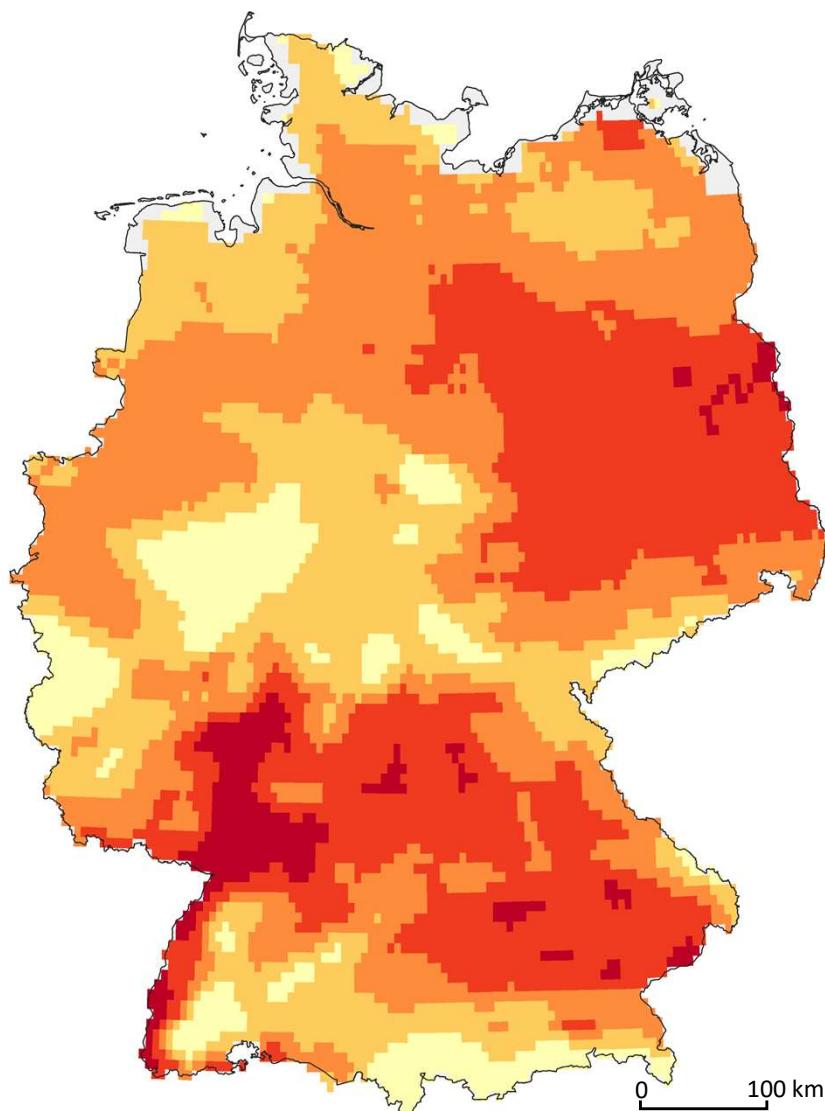
- (5) Crespi A., Terzi S., Cocuccioni S., Zebisch M., Berckmans J., Füssel H-M (2020) "Climate-related hazard indices for Europe". European Topic Centre on Climate Change impacts, Vulnerability and Adaptation (ETC/CCA) Technical Paper 2020/1. DOI: 10.25424/cmcc/climate_related_hazard_indices_europe_2020 <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/publications/climate-related-hazard-indices-for-europe-etc-cca-technical-paper-1-2020/etc-cca-technical-paper-1-2020-final.pdf/@download/file>
- (6) Regionaler Klimaatlas Deutschland- Helmholtzgemeinschaft <https://www.regionaler-klimaatlas.de/klimaatlas/2071-2100/jahr/laengste-trockenperiode/deutschland/mittlereanderung.html>

Datengrundlage: Die Berechnung der 30-Jahres Multi-Modell Zeitschnitte erfolgte auf der Grundlage von CMIP6 Daten aus fünf globalen Klimamodellen (ACCESS-CM2, CanESM5, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3 und MPI-ESM1-2-HR) für drei Shared Socioeconomic Pathways (SSP)-Experimente (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5). Die Eingangsdaten wurden unter Verwendung der Methode des Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) auf ein regelmäßigen Längen- und Breitengradgitters harmonisiert und bias-korrigiert.

Download: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=download>

Metadaten: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CMIP6%3A+Global+climate+projections>

Zitierung: CDS CMIP6 subsets DOI: [10.24381/cds.c866074c](https://doi.org/10.24381/cds.c866074c)

**Δ Heiße Tage SSP370**

- 1 ≤ +5 d
- 2 ≤ +10 d
- 3 ≤ +15 d
- 4 ≤ +20 d
- 5 ≤ +30 d

Datenherkunft: C3S – CDS CMIP6
 Abdeckung: ERA-5 Europe
 Raumbezug: EPSG:4326
 Referenz: 1971 – 2000
 Projektion: 2071 – 2100
 Datentyp: NetCDF (FLT4S)
 Zellwerte: Δ +/- Tage
 Auflösung: 0.1° regular grid

Bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) erwarten wir im Jahr im Vergleich zu heute (1961-1990) eine Zunahme der heißen Tage. Die Spannweite dieser Änderung kann zwischen +1 Tag und +48 Tage liegen. Innerhalb dieser Spannweite sind alle Änderungen aus heutiger Sicht plausibel (6).

Indikator A4: Änderung der Anzahl der Trockenperioden (Tage mit <1 mm Niederschlag) im Jahresmittel

Kontext und Relevanz: Die Anzahl der Trockenperioden ist definiert als die Anzahl der Perioden pro Jahr mit mehr als fünf aufeinanderfolgenden trockenen Tagen mit weniger als 1 mm Tagesniederschlag, gemittelt über einen Zeitraum von 30 Jahren. Für den zukünftigen Zeitraum (2071–2100) wird der Indikator als relative Veränderung angegeben, wobei die Werte von +1, +2, +3 und +4 sich auf den historischen Referenzzeitraum (1971–2000) beziehen und in der Karte farblich abgestuft Gebiete mit 5, 10, 15 bzw. 20 zusätzlichen aufeinanderfolgende Trocken-Tage (CDD) ausweisen (7).

Literatur:

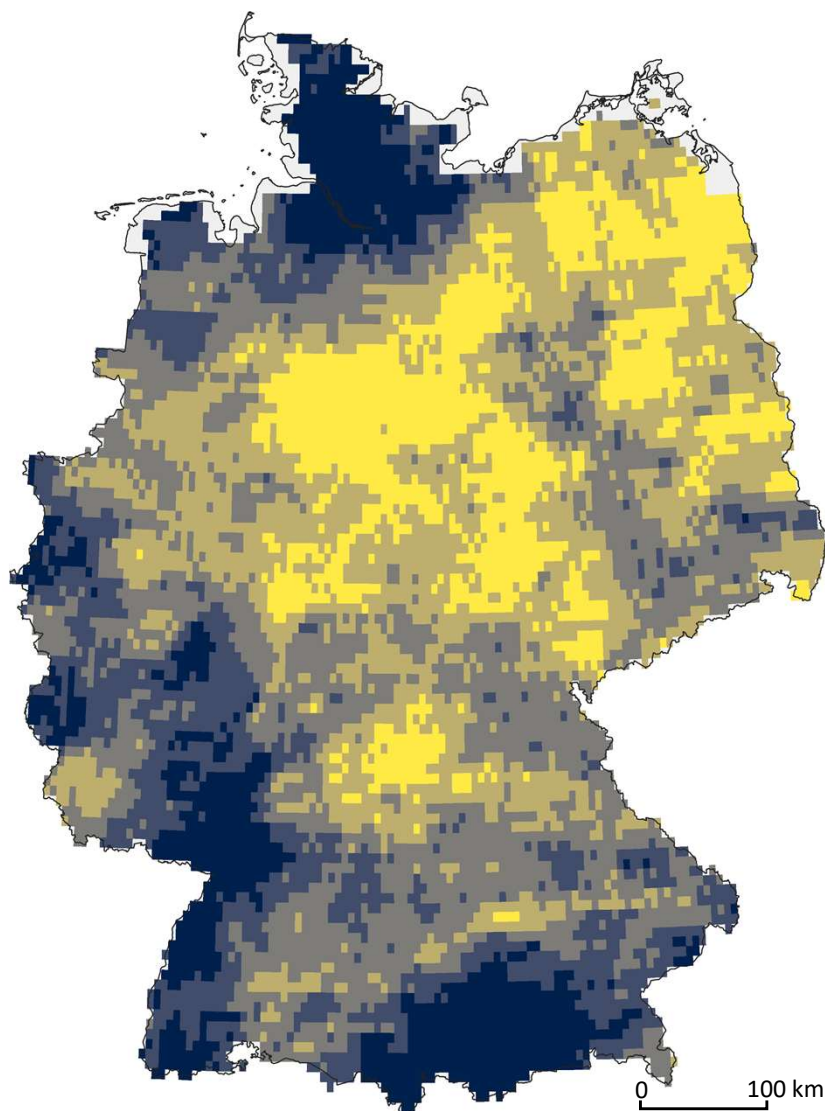
- (7) Crespi A., Terzi S., Cocuccioni S., Zebisch M., Berckmans J., Füssel H-M (2020) "Climate-related hazard indices for Europe". European Topic Centre on Climate Change impacts, Vulnerability and Adaptation (ETC/CCA) Technical Paper 2020/1. DOI: 10.25424/cmcc/climate_related_hazard_indices_europe_2020 https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/publications/climate-related-hazard-indices-for-europe-etc-cca-technical-paper-1-2020/etc-cca_technical_paper_1_2020_final.pdf/@download/file
- (8) Regionaler Klimaatlas Deutschland- Helmholtzgemeinschaft <https://www.regionaler-klimaatlas.de/klimaatlas/2071-2100/jahr/durchschnittliche-temperatur/deutschland/mittlereanderung.html>

Datengrundlage: Die Eingangsdaten der schwellenwertbasierten Niederschlagsindizes wurden unter Verwendung eines regelmäßigen Längen- und Breitengradgitters basierend auf der Methode des Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) harmonisiert und bias-korrigiert. Die Berechnung der 30-Jahres Multi-Modell Zeitschnitte erfolgte auf der Grundlage von CMIP6 Daten aus fünf globalen Klimamodellen (ACCESS-CM2, CanESM5, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3 und MPI-ESM1-2-HR) für drei Shared Socioeconomic Pathways (SSP)-Experimente (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5).

Download: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=download>

Metadaten: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CMIP6%3A+Global+climate+projections>

Zitierung: CDS CMIP6 subsets DOI: [10.24381/cds.c866074c](https://doi.org/10.24381/cds.c866074c)

**Δ N Trockenperioden**

- 1 <= 0
- 2 <= +1
- 3 <= +2
- 4 <= +3
- 5 > +3

Datenherkunft: C3S – CDS CMIP6
 Abdeckung: ERA-5 Europe
 Raumbezug: EPSG:4326
 Referenz: 1971 – 2000
 Projektion: 2071 – 2100
 Datentyp: NetCDF (FLT4S)
 Einheit: +/- CDD
 Auflösung: 0.1° regular grid

Nach dem aktuellen Stand der Forschung ist die Änderung der Dauer der längsten Trockenperiode bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Jahresmittel im Vergleich zu heute (1961-1990) unklar.

Einige Modelle zeigen eine Zu-, andere eine Abnahme.

Die Spannweite dieser Änderung kann zwischen -3 Tage und +28 Tage liegen. Innerhalb dieser Spannweite sind alle Änderungen aus heutiger Sicht plausibel (8).

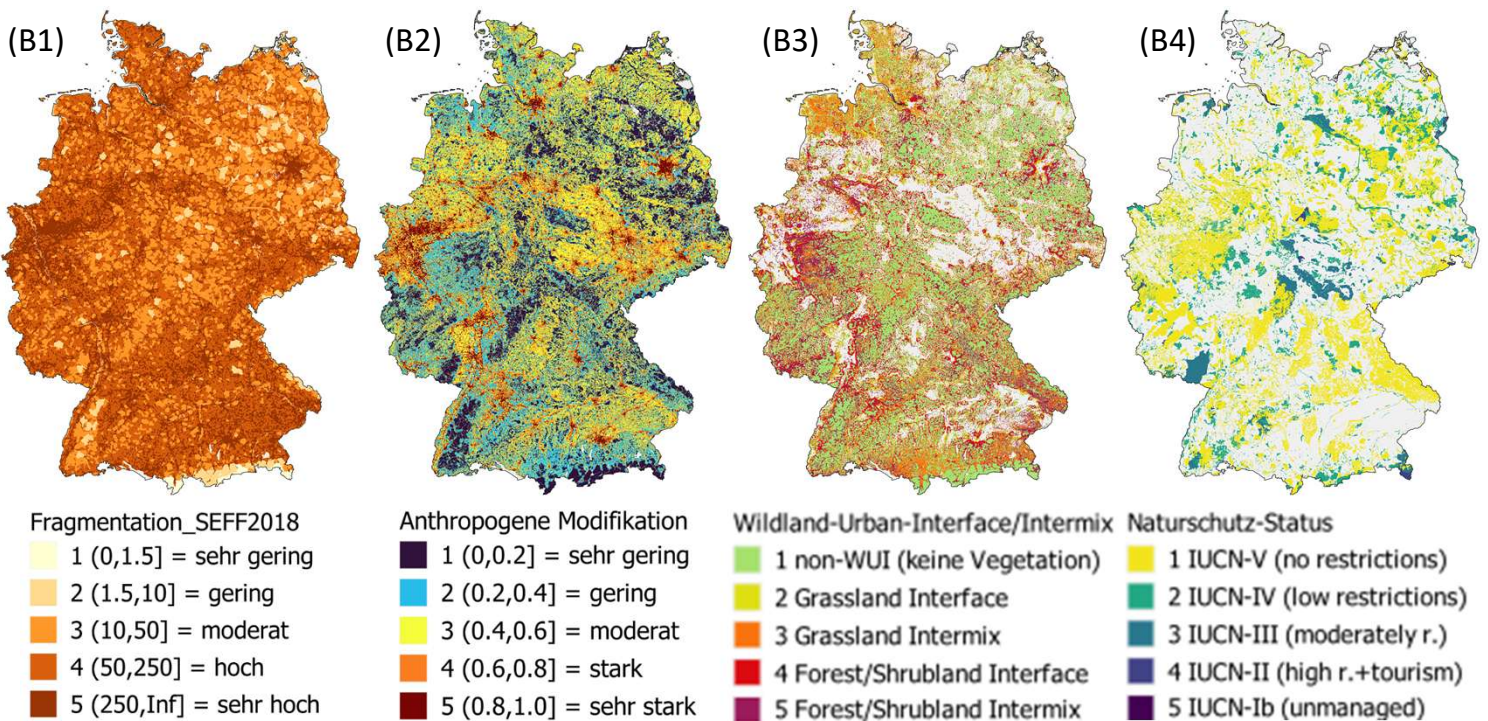
Kriterium B: Anthropogener Einfluss

Indikator B1: Landschaftsfragmentierung (Effective Mesh Density)

Indikator B2: Ökosystem-Modifikationen (Landnutzung + Hemerobie)

Indikator B3: Schnittstelle (Wald-)Vegetation und Siedlung (Wildland-Urban-Intersection)

Indikator B4: Naturschutzstatus (protection related fire exposure)



Kontext und Relevanz: Die Fragmentierung verändert die Eigenschaften von Wäldern und die Funktionsweise von Ökosystemen grundlegend und gefährdet damit die Artenvielfalt, die Kohlenstoffspeicherung und die Bodengesundheit (9). Die Ausbreitung von bebauten Flächen und Verkehrsinfrastrukturen verändert die Integrität ökologischer Netzwerke und schafft isolierte Inseln mit suboptimalen Lebensräumen, die nicht die gleiche Vielfalt und Widerstandsfähigkeit wie intakte Waldgebiete bieten und verstärkt Edge-Effekte, was zu mehr Sonneneinstrahlung, höheren Temperaturen, stärkeren Winden und geringerer Luftfeuchtigkeit führt.

Literatur:

- (9) Sun, M., Li, W., Zhu, L., Guo, Z., Zhao, Z., Meng, N., ... & Zhang, X. (2025). Degradation in edge forests caused by forest fragmentation. Carbon Research, 4(1), 38. <https://link.springer.com/article/10.1007/s44246-025-00206-8>
- (10) Jaeger, J. A.G.(2000): Landscape division, splitting index, and effective mesh size: New measures of landscape fragmentation. Landscape ecology 15(2),pp 115-130 <http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1008129329289>

Datengrundlage: Die effektive Maschendichte (seff) charakterisiert die anthropogene Durchdringung von Landschaften aus geometrischer Sicht (10) und ist ein Maß dafür, inwieweit die Landschaft durch eine Fragmentierungsgeometrie (FG) unterbrochen wird. FGs sind definiert als das Vorhandensein von bebauten Oberflächen und Verkehrsinfrastruktur. Je mehr FGs die Landschaft fragmentieren, desto höher die Anzahl der Meshes pro 1000 km².

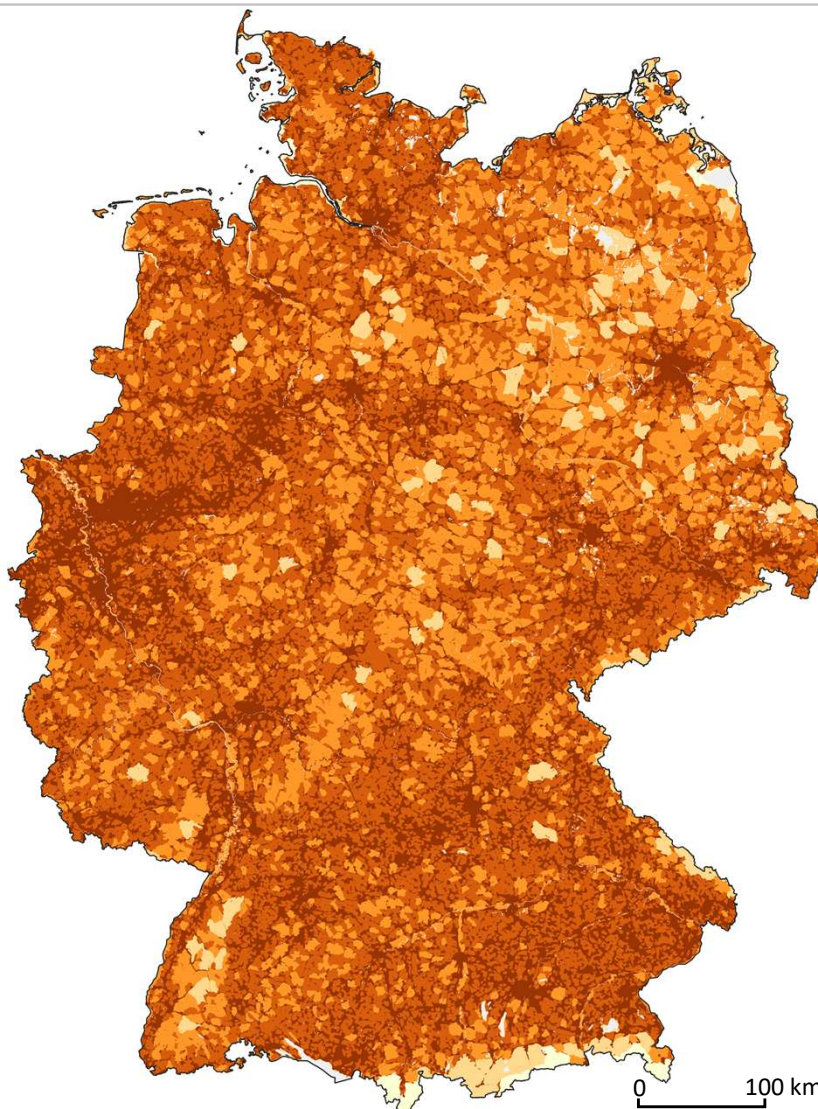
Download: <https://sdi.eea.europa.eu/data/67110f21-39cb-48be-878e-d08b64a72256>

Metadaten: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/landscape-fragmentation-pressure-in-europe>

Methodik: <http://www.eea.europa.eu/publications/landscape-fragmentation-in-europe>

Zitierung: Landscape fragmentation Effective Mesh Density 2018: major and medium anthropogenic fragmenting elements (FGA2-S), Dec. 2021.

<https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/datahub/api/records/67110f21-39cb-48be-878e-d08b64a72256>



- Fragmentation_SEFF2018
- 1 (0,1.5] = sehr gering
 - 2 (1.5,10] = gering
 - 3 (10,50] = moderat
 - 4 (50,250] = hoch
 - 5 (250,Inf] = sehr hoch

Datenherkunft: fga2 SEFF
Abdeckung: Europe
Raumbezug: EPSG:3035
Referenz: 2018
Aktualisierung: --
Datentyp: GeoTiff (FLT4S)
Zellwerte: (0-255)
Auflösung: 100 m x 100 m

Fragmentierungsgeometrien sind vom Menschen geschaffene Landschaftselemente, die die Landschaft in nicht miteinander verbundene Teilflächen aufteilen. Es werden ausschließlich anthropogene Elemente einbezogen, da sich der Indikator auf die Fragmentierung der Landschaft in städtischen Gebieten und durch Verkehrsinfrastruktur (Straßen + Schienen) bezieht.

Kontext und Relevanz: Die zunehmende Konkurrenz um die knappe Ressource „Fläche“ führte in den letzten Jahrzehnten in weiten Teilen Europas zu einer intensivierten Landnutzung. Die IUCN - CMP Version 3.3. definiert „direct threats“ als unmittelbare menschliche Aktivitäten oder Prozesse, die sich auf den Status des bewerteten Taxons ausgewirkt haben, auswirken oder auswirken könnten und sind gleichbedeutend mit Stressquellen und unmittelbaren Belastungen“.

Literatur:

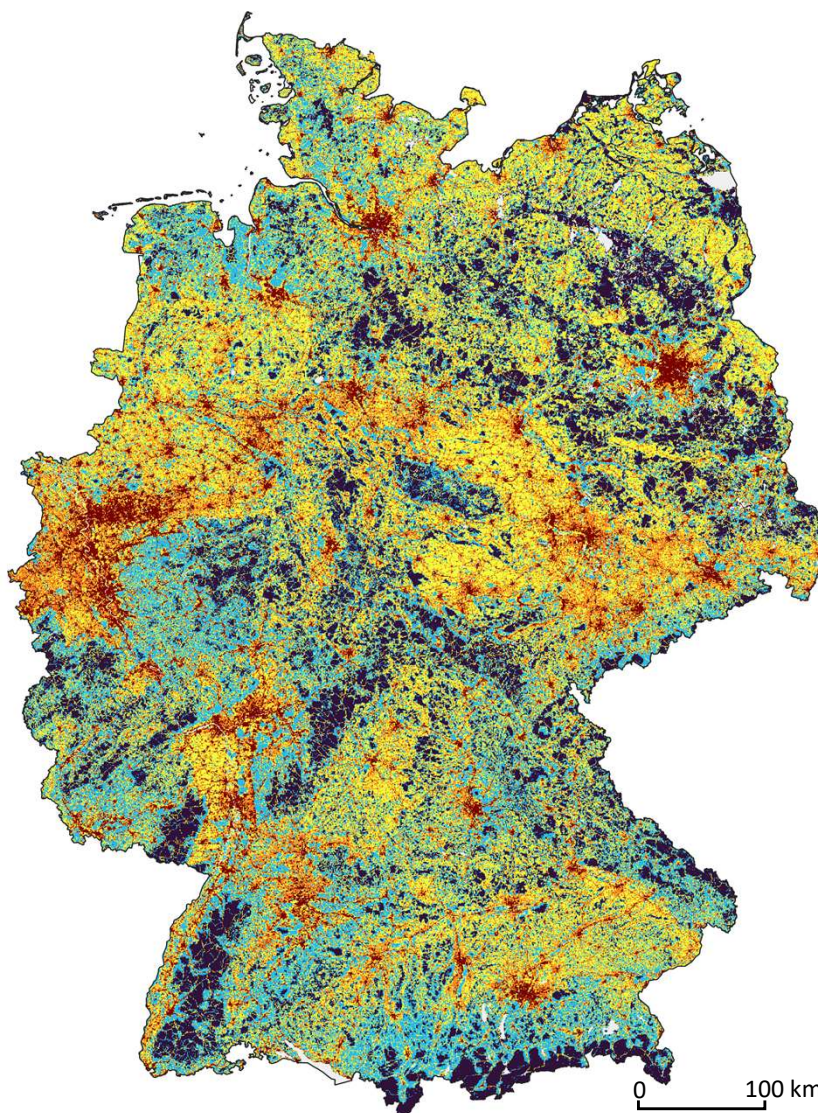
- (11) Theobald, D. M., Oakleaf, J. R., Moncrieff, G., Voigt, M., Kiesecker, J., & Kennedy, C. M. (2025). Global extent and change in human modification of terrestrial ecosystems from 1990 to 2022. *Scientific Data*, 12(1), 606. <https://www.nature.com/articles/s41597-025-04892-2.pdf>
- (12) International Union for Conservation of Nature's - CMP Unified Classification scheme of Direct Threats: https://nc.iucnredlist.org/redlist/content/attachment_files/Dec_2022_Guidance_Threats_Classification_Scheme.pdf

Datengrundlage: Der Indikator „degree of human modification“ (HM) kartiert die räumliche Ausdehnung und Intensität der anthropogen umgewandelten, veränderten und beeinflussten Flächen gemäß der Gefährdungstaxonomie der IUCN in 8 Kategorien (Bebauung, Landwirtschaft und Energieerzeugung, Verkehr, Nutzung biologischer Ressourcen, menschliche Zugänglichkeit, natürliche Systeme und Umweltverschmutzung). Der Grad der anthropogenen Modifikation wird als fraktionierte Abdeckung innerhalb jedes Pixels mit den zugehörigen Schätzungen der Intensität zu einem kumulativen Maß kombiniert. Die HM-Werte werden als Gradient der anthropogenen Modifikation terrestrischer Ökosysteme, von unverändert oder „wild“ (0,0) bis stark verändert oder entwickelt (1,0) interpretiert.

Download: [HMv20240801_2020c_AA.tif](#)

Metadaten: <https://zenodo.org/records/14449495>

Zitierung: Theobald, D. (2024). Global human modification datasets of terrestrial ecosystems from 1990 to 2020 [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14449495>



- Anthropogene Modifikation**
- 1 (0,0.2] = sehr gering
 - 2 (0.2,0.4] = gering
 - 3 (0.4,0.6] = moderat
 - 4 (0.6,0.8] = stark
 - 5 (0.8,1.0] = sehr stark

Datenherkunft: GHM
 Abdeckung: global
 Raumbezug: EPSG:4326
 Referenz: 1990 - 2020
 Aktualisierung: jährlich/5-Jahre
 Datentyp: GeoTiff (FLT4S)
 Zellwerte: (0.0 – 1.0)
 Auflösung: 300 m x 300 m

Anmerkung: Die Hauptursachen für Flächen- und Vitalitätsverluste der Wälder in Deutschland sind nicht primär die Umwidmung von Wald zu anderen Nutzungsarten sondern der Schadverlust durch Klimafolgen wie Dürre, Hitze und Schädlingsbefall. Steigende Temperaturen stellen eine große Herausforderung dar, da sie zu vermehrten Waldschäden durch Insekten und Krankheitserreger sowie zu extremen Wetterereignissen wie Dürren und Stürmen führen.

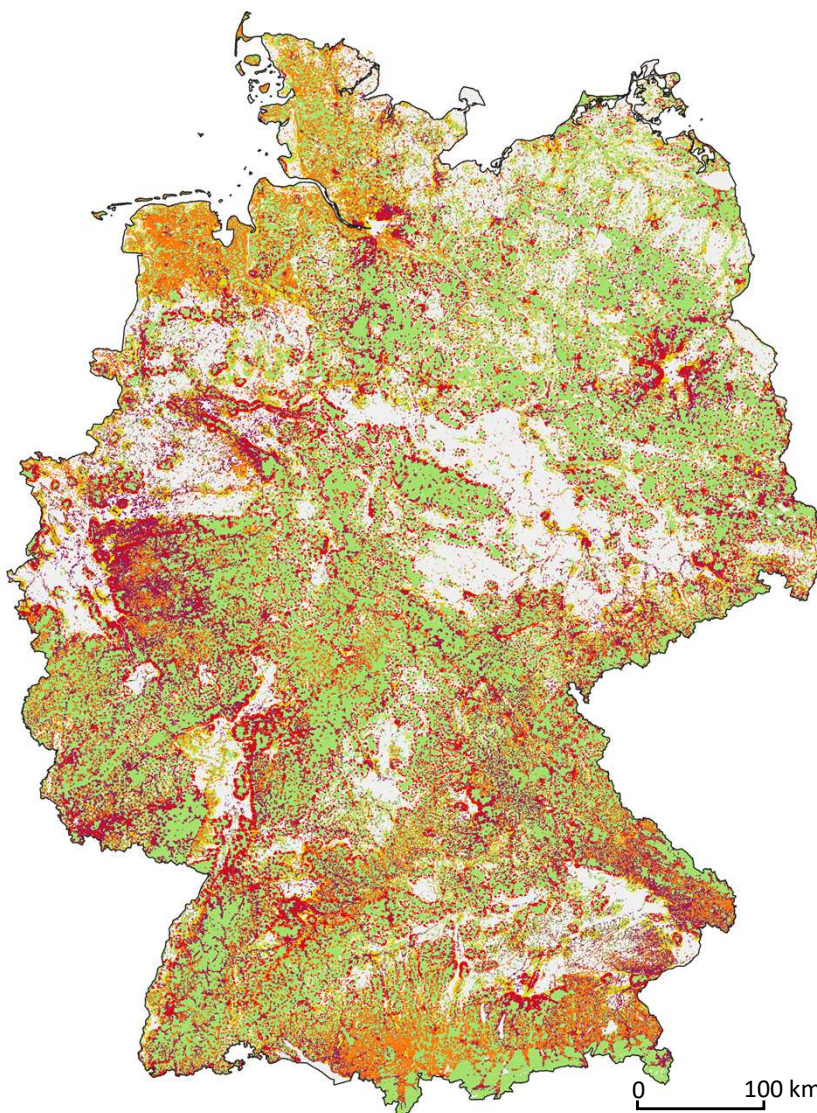
Kontext und Relevanz: Die Übergangszone zwischen Waldvegetation und bebauter Fläche (Wildland-Urban-Intersection WUI) ist der Bereich, in dem Siedlungen in oder in der Nähe von Gebieten mit brandgefährdeter Wildlandvegetation liegen (13). Die WUI kann als Landschaft definiert werden, in der anthropogene städtische Landnutzung und brennbare Biomasse aufeinandertreffen. Hier überlappen und konzentrieren sich Nutzungskonflikte und Wechselwirkungen und das Risiko bzw. die Wahrscheinlichkeit einer Exposition gegenüber Waldbränden ist am größten (14).

Literatur:

- (13) Schug, F., Bar-Massada, A., Carlson, A. R., Cox, H., Hawbaker, T. J., Helmers, D., ... & Radeloff, V. C. (2023). The global wildland–urban interface. *Nature*, 621(7977), 94-99. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06320-0>
- (14) Modugno, S., Balzter, H., Cole, B., & Borrelli, P. (2016). Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland–Urban Interface areas in Europe. *Journal of environmental management*, 172, 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.013>

Datengrundlage: Die WUI-Klassifizierung von SILVIS Lab basiert auf einer standardisierten Methode mit der aus verschiedenen Fernerkundungsprodukten zu bebauten Flächen und der Vegetationsbedeckung 8 diskrete WUI-Klassen abgeleitet werden. Dabei wird zwischen Intermix WUI: (Bereiche, in denen Gebäude und Wildlandvegetation miteinander vermischt sind) und Interface WUI (Bereiche, in dem Gebäude an große Wildlandvegetationsflächen angrenzen) unterschieden.

Download: <https://geoserver.silvis.forest.wisc.edu/geodata/globalwui/>
Metadaten: <https://zenodo.org/records/7941460>
Zitierung: Schug F, Bar-Massada A, Carlson A R, Cox H, Hawbaker T J, Helmers D, Hostert P, Kaim D, Kasraee N K, Martinuzzi S, Mockrin M H, Pfoch K A, & Radeloff V C (2023). [Map of the global wildland-urban interface (1.1)]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7941460>



- Wildland-Urban-Interface/Intermix
- 1 non-WUI (keine Vegetation)
 - 2 Grassland Interface
 - 3 Grassland Intermix
 - 4 Forest/Shrubland Interface
 - 5 Forest/Shrubland Intermix

Datenherkunft: WUI
Abdeckung: global – Equi7Grid
Raumbezug: EPSG:27704 (EU)
Referenz: ca.2020
Aktualisierung: --
Datentyp: GeoTiff (INT2S)
Zellwerte: 8 Kategorien
Auflösung: 10 m x 10 m

Anmerkung:

Intermix WUI hat mehr als 6,17 Gebäude pro km² und eine Wildlandvegetationsfläche von mindestens 50 %).

Interface WUI sind Gebiete mit mehr als 6,17 Gebäuden pro km², aber weniger als 50 % Wildlandvegetation, die in der Nähe (weniger als 2400 m) einer großen Wildlandvegetationsfläche mit mindestens 5 km² Größe und einer Bedeckung von mehr als 75 % liegen.

Kontext und Relevanz: Die Brandfläche war in Schutzgebieten am größten, und die Brandintensität war in Schutzgebieten in gemäßigten und mediterranen Biomen höher. Die Bevölkerung war einem höheren Brandrisiko ausgesetzt, wenn sie am Rande von geschützten Wäldern lebte (15). Die erhöhte Brandaktivität in Schutzgebieten ist auf die Kombination aus Brennstofflast, Zugänglichkeit und abiotischen Faktoren zurückzuführen (16).

Literatur:

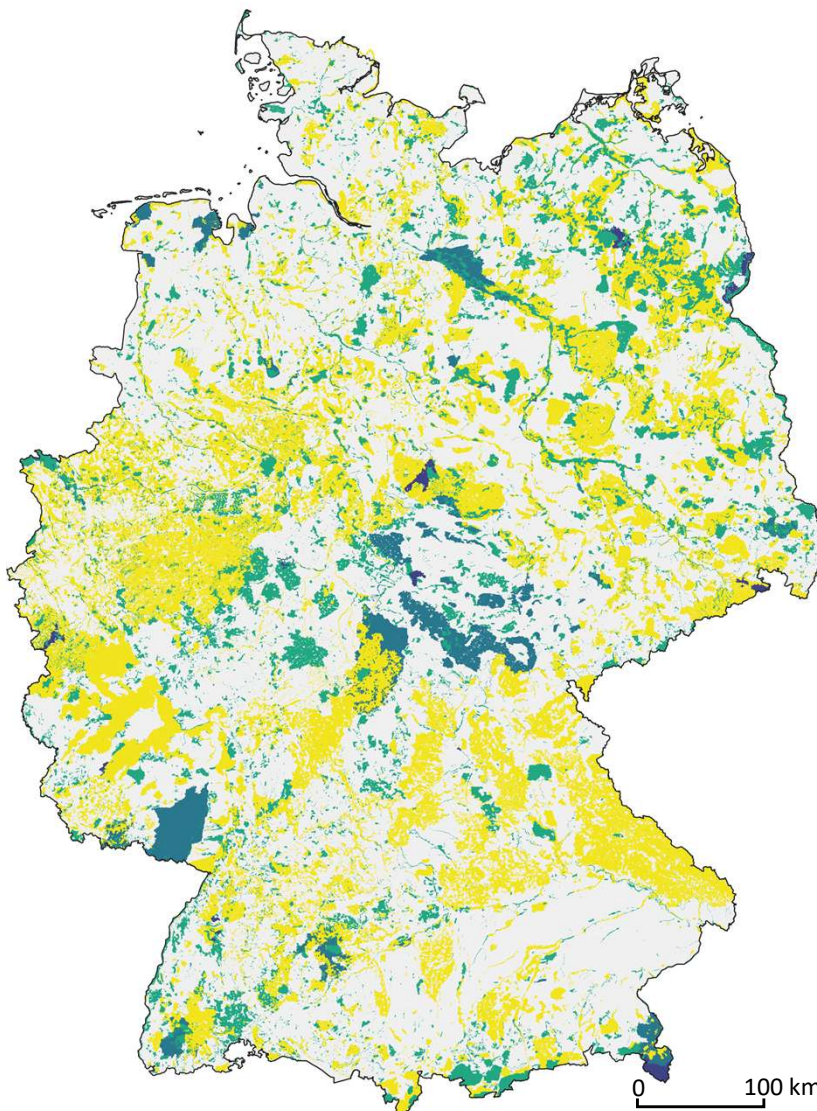
- (15) de Dios, V R, Schütze, S J, Camprubí, A C, Balaguer-Romano, R, Boer, M M, & Fernandes, P M (2025). Protected areas as hotspots of wildfire activity in fire-prone Temperate and Mediterranean biomes. *Journal of Environmental Management*, 385, 125669. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479725016457>
- (16) de Dios, V. R., Schütze, S., Camprubí, A. C., Balaguer-Romano, R., Boer, M., & Fernandes, P. (2024). Higher wildfire incidence, severity and population exposure in protected areas within fire-prone Temperate and Mediterranean biomes. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5030414/v1>

Datengrundlage: Die Weltdatenbank für Schutzgebiete (WDPA 1981–2019 v1, Februar 2023) liefert Vektordaten zur Abdeckung von Schutzgebieten und zur IUCN-Managementkategorie (wobei menschliche Eingriffe von I bis VI zunehmen).

Download: https://d1gam3xoknrgr2.cloudfront.net/current/WDPA_WDOECM_Oct2025_Public_DEU_shp.zip

Metadaten: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/a95b6d2d-2d41-4c27-9d1d-d15bbf29d27e?activeAccordion=>

Zitierung: UNEP-WCMC and IUCN (2025), Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA) and World Database on Other Effective Area-based Conservation Measures (WDOECM) [Online], October 2025, Cambridge, UK: UNEP-WCMC and IUCN. Available at: www.protectedplanet.net



Naturschutz-Status

- 1 IUCN-V (no/very low restrictions)
- 2 IUCN-IV (low restrictions)
- 3 IUCN-III (moderately restricted)
- 4 IUCN-II (very high r. +tourism)
- 5 IUCN-Ib (no management)

Datenherkunft: WDPA v1 Feb2023
Abdeckung: global, nat.,region
Raumbezug: EPSG:4326
Referenz: 1981-2019
Aktualisierung: jährlich
Datentyp: Shapefile/GDB
Zellwerte: IUCN Kategorien
Auflösung: --

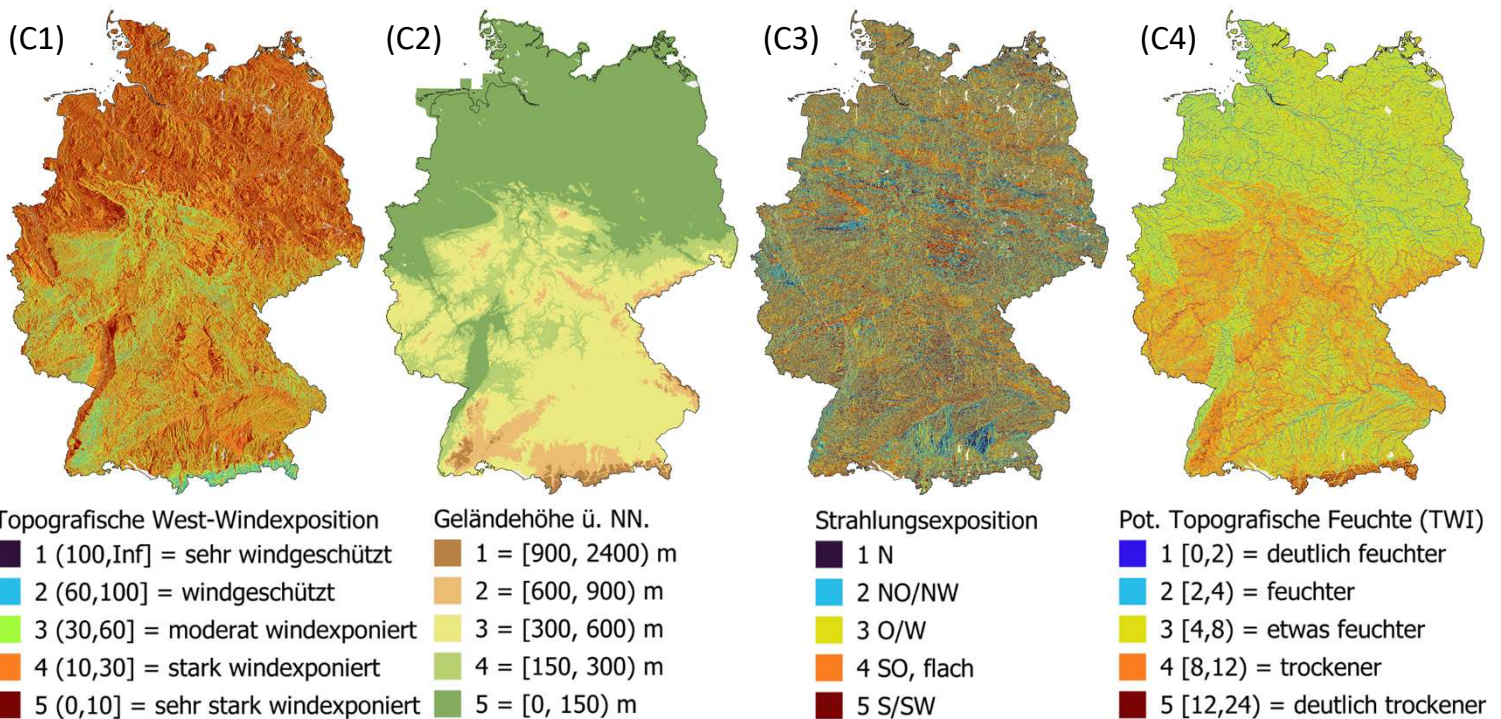
Kriterium C: Topografie-Effekte

Indikator C1: Topografische West-Windexposition (TOPEX)

Indikator C2: Strahlungsexposition (DGM - Südausrichtung)

Indikator C3: Höhenlage (DGM - Elevation)

Indikator C4: Topografischer Feuchteindex (TWI)



Kontext und Relevanz: Die Windverhältnisse (Richtung und Geschwindigkeit) haben Einfluss auf die Sauerstoffverfügbarkeit und wirken sich auf die Größe der betroffenen Fläche, die Länge der Feuerfront und die Intensität des aus (17). Auf windexponierten Flächen können sich durch Funkenflug unberechenbare Branddynamiken entwickeln unter denen Vegetationsbrände schnell unkontrollierbar werden (Mega-Waldbrände). Der Topographic Exposure Index (TOPEX) ist ein Kennwert für Windexposition, und wird aus der Summe der vertikalen Winkel zum Horizont in allen Himmelsrichtungen berechnet. Niedrige Werte zeigen einen exponierten Standort und hohe Werte einen geschützten Standort an (Klassifikation nach 18).

Literatur:

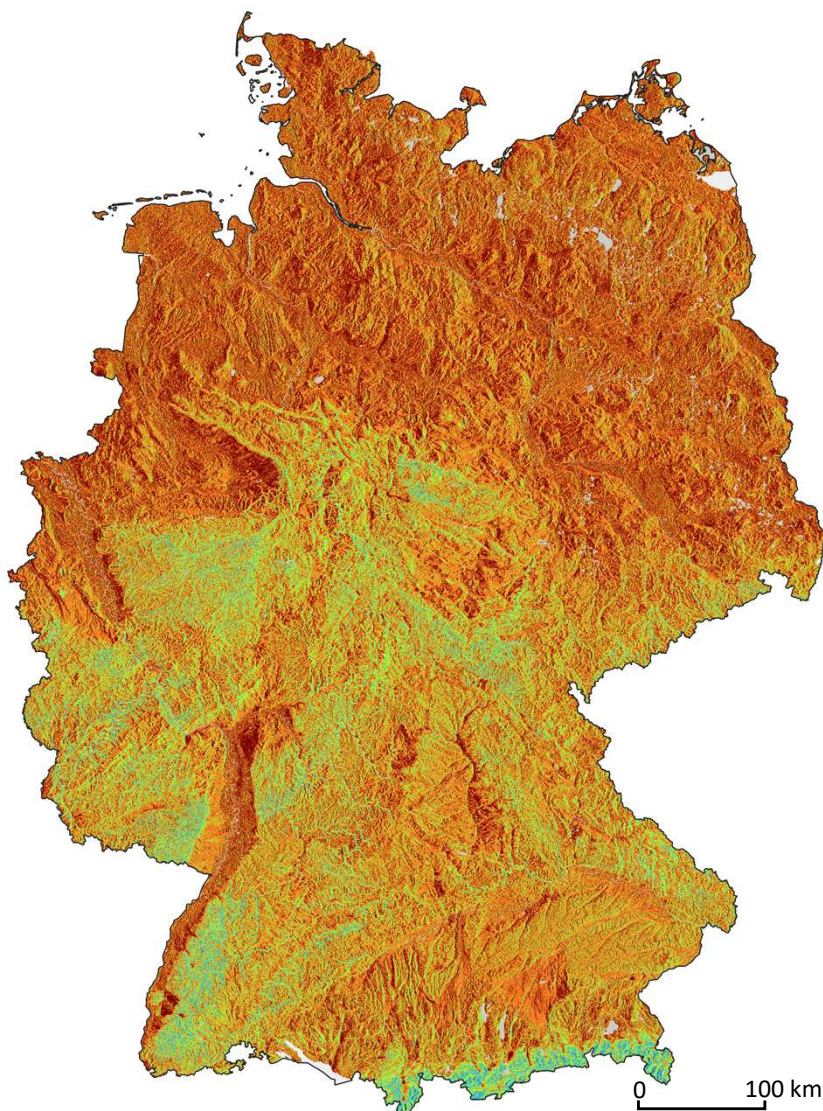
- (17) Omi, P. N. (2005): Forest fires. A reference handbook. Santa Barbara, Calif: ABC-CLIO (Contemporary world issues). Online verfügbar: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10183957>
 (18) Chapman, L. (2000). Assessing topographic exposure. Meteorological Applications, 7(4), 335-340. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1017/S135048270001729>

Datengrundlage: Die Topografische Windexpositions-Karte ist auf 100m aggregiert und wurde aus dem Digitalen Geländemodell Gitterweite 5 m (DGM5) berechnet. Das DGM5 beschreibt die Geländeformen der Erdoberfläche durch eine in einem regelmäßigen Gitter angeordnete, in Lage und Höhe georeferenzierte Punktmenge. Als räumliche Gliederung des Datenbestandes werden Adv-Kacheln 2km x 2km genutzt, die das Territorium der Bundesrepublik Deutschland abdecken.

Metadaten: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitale-gelandemodelle/digitales-gelandemodell-gitterweite-5-m-dgm5.html>

Dokumentation: https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/dgm5.pdf

Zitierung: Geobasisdaten: © GeoBasis-DE / BKG (2025) [DGM5]



Topografische West-Windexposition

- 1 (100,Inf] = sehr windgeschützt
- 2 (60,100] = windgeschützt
- 3 (30,60] = moderat windexponiert
- 4 (10,30] = stark windexponiert
- 5 (0,10] = sehr stark windexponiert

Datenherkunft:	BKG DGM5
Abdeckung:	National DE
Raumbezug:	EPSG:25832
Zeitbezug:	2017
Aktualisierung:	zuletzt 2021
Datentyp:	GeoTiff
Zellwerte:	--
Auflösung:	5 m (100 x100 m)

Kontext und Relevanz: Die Biomasseakkumulation wird durch Faktoren wie Baumdichte, Grundfläche und Standortbedingungen wie Temperatur und Wasserverfügbarkeit beeinflusst, die alle mit der Höhenlage korrelieren (19). Wälder in niedrigeren Höhenlagen weisen in der Regel eine höhere Gesamtbiomasse und schnellere Biomasseakkumulationsraten auf als Wälder in höheren Höhenlagen (20).

Literatur:

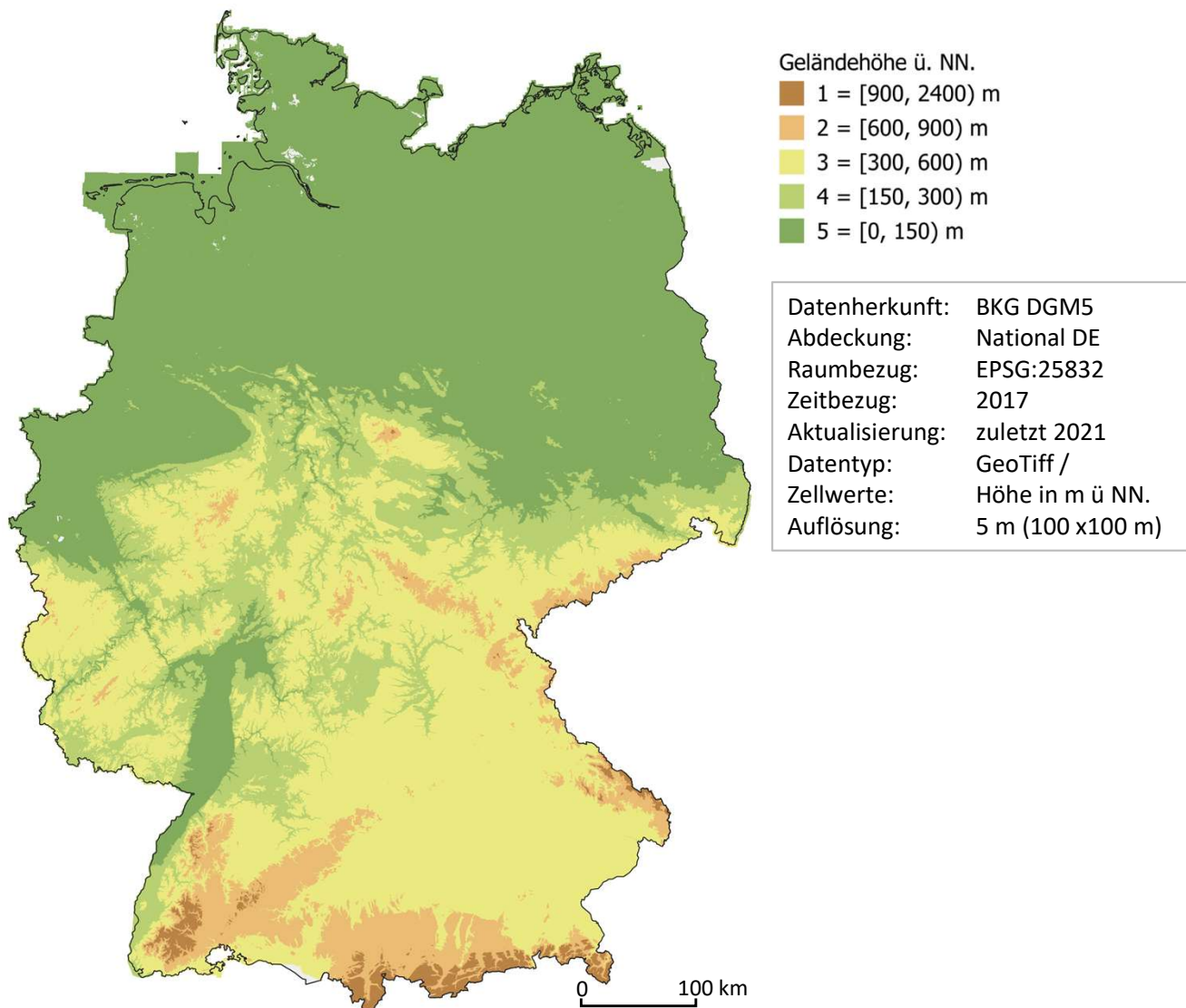
- (19) Ullah, F., Gilani, H., Sanaei, A., Hussain, K., & Ali, A. (2021). Stand structure determines aboveground biomass across temperate forest types and species mixture along a local-scale elevational gradient. *Forest Ecology and Management*, 486, 118984. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118984>
- (20) Idoate-Lacasia, J, Stillhard, J, Portier, J, Brang, P, Zimmermann, S, Bigler, C, & Hobi, M L (2024). Long-term biomass dynamics of temperate forests in Europe after cessation of management. *Forest Ecology and Management*, 554, 121697. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121697>

Datengrundlage: Die Geländehöhe wurde aus dem Digitalen Geländemodell Gitterweite 5 m (DGM5) berechnet und auf 100 x 100 m Zellengröße aggregiert. Das DGM5 beschreibt die Geländeformen der Erdoberfläche durch eine in einem regelmäßigen Gitter angeordnete, in Lage und Höhe georeferenzierte Punktmenge. Als räumliche Gliederung des Datenbestandes werden Adv-Kacheln 2km x 2km genutzt, die das Territorium der Bundesrepublik Deutschland abdecken.

Metadaten: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitale-gelandemodelle/digitales-gelandemodell-gitterweite-5-m-dgm5.html>

Dokumentation: https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/dgm5.pdf

Zitierung: Geobasisdaten: © GeoBasis-DE / BKG (2025) [DGM5]



Kontext und Relevanz: Die Topografie wirkt sich auf die hydrologischen und klimatischen Eigenschaften eines Standortes aus und hat Einfluss auf die Verteilung und Beschaffenheit der Vegetation. Aufgrund der stärkeren Sonneneinstrahlung ist die Bodenfeuchte an Südhängen geringer und die Trocknungsrate in der Streuauflage und der Krautschicht ist höher als an Nordhängen (21). Die Hangausrichtung beeinflusst das Brandverhalten durch Schwankungen in der Menge und Verteilung sowie den Feuchtigkeitsgehalt brennbarer Biomasse. Der Feuchtigkeitsgehalt in der Streuauflage und die Wasserspeicherkapazität des Bodens ist in südlicher Richtung am geringsten (22).

Literatur:

- (21) Countryman, C. M. (1972). The fire environment concept. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.
- (22) Sharma, C. M., Baduni, N. P., Gairola, S., Ghildiyal, S. K., & Suyal, S. (2010). Effects of slope aspects on forest compositions, community structures and soil properties in natural temperate forests of Garhwal Himalaya. Journal of Forestry Research, 21(3), 331-337. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-010-0079-y>

Datengrundlage: Die Expositions-Karte ist auf 100m aggregiert und wurde aus dem Digitalen Geländemodell Gitterweite 5 m (DGM5) berechnet. Das DGM5 beschreibt die Geländeformen der Erdoberfläche durch eine in einem regelmäßigen Gitter angeordnete, in Lage und Höhe georeferenzierte Punktmenge. Als räumliche Gliederung des Datenbestandes werden AdV-Kacheln 2km x 2km genutzt, die das Territorium der Bundesrepublik Deutschland abdecken. Eingeschränkt verfügbar - Bereitstellung für Bundesbehörden und Nutzungsberechtigte nach V GeoBund

Metadaten: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitale-gelandemodelle/digitales-gelandemodell-gitterweite-5-m-dgm5.html>

Dokumentation: https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/dgm5.pdf

Zitierung: Geobasisdaten: © GeoBasis-DE / BKG (2025) [DGM5]



Strahlungsexposition

- 1 N
- 2 NO/NW
- 3 O/W
- 4 SO, flach
- 5 S/SW

Datenherkunft:	BKG DGM5
Abdeckung:	National DE
Raumbezug:	EPSG:25832
Zeitbezug:	2017
Aktualisierung:	zuletzt 2021
Datentyp:	GeoTiff /
Zellwerte:	8 Klassen
Auflösung:	5 m (100 x100 m)

8 class aspect [degrees] exposition re-classification:

- 1 N [0,22.5] & (337.5,360]
- 2 NO (22.5, 67.5]
- 3 O (67.5, 112.5]
- 4 SO (112.5, 157.5]
- 5 S (157.5, 202.5]
- 4 SW (202.5, 247.5]
- 3 W (247.5, 292.5]
- 2 NW (292.5, 337.5]
- 0 mR/ne
- 1 flach

Kontext und Relevanz: Der topografische Index ist eine hydrologische Größe, die die Neigung des Bodens an Landschaftspunkten beschreibt, aufgrund seiner topografischen Lage mit Wasser gesättigt zu werden. Der Topografische Feuchteindex stellt ein dimensionsloses Maß für die potenziellen, reliefbedingten Feuchteverhältnisse des Bodens dar und quantifiziert die potenzielle Wasserabflussmenge in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße (potentieller Abfluss) und der Neigung (steuert die Fließgeschwindigkeit und damit die Verweildauer des abfließenden Wassers) (23). Andere Faktoren wie Klimaparameter, die ebenfalls die Bodenfeuchte beeinflussen werden durch den TWI nicht berücksichtigt.

Literatur:

(23) https://geo.brandenburg.de/karten/htdocs/GMK_Erlaeuterung.pdf

(24) BÖHNER, J. & KÖTHE, R. (2003): Bodenregionalisierung und Prozeßmodellierung: Instrumente für den Bodenschutz. – Peterm. Geogr. Mitt., 147, 2003/3: 72-82; Gotha.

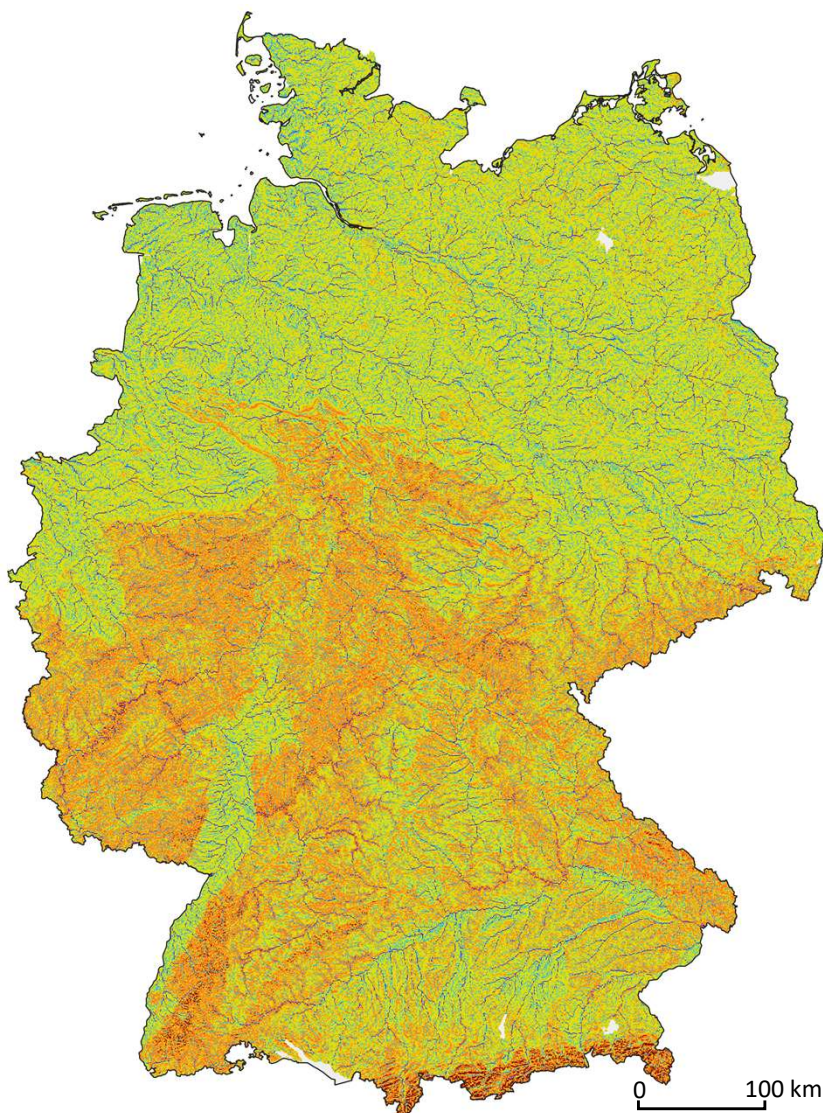
Datengrundlage: Die globale hochauflösende Topografie-Feuchte Karte wird auf der Grundlage des GA2 standard algorithm und mit Basisdaten aus der HydroSHEDS suite of GIS layers. Das GIS-Produkt *ga2_Global_15s_netcdf.zip* ist für die Verwendung in großräumigen hydrologischen Modellen vorgesehen. Die topografische Indexvariable ist direkt mit dem topografischen Index vergleichbar, der von USGS HYDRO1k mit einer Auflösung von 30 Sekunden verfügbar ist.

Download: <https://catalogue.ceh.ac.uk/documents/6b0c4358-2bf3-4924-aa8f-793d468b92be#access>

Metadaten: <https://doi.org/10.5285/6b0c4358-2bf3-4924-aa8f-793d468b92be>

Dokumentation: <https://data-package.ceh.ac.uk/sd/6b0c4358-2bf3-4924-aa8f-793d468b92be.zip>

Zitierung: Marthews, T.R.; Dadson, S.J.; Lehner, B.; Abele, S.; Gedney, N. (2015). High-resolution global topographic index values. NERC Environmental Information Data Centre.



Pot. Topografische Feuchte (TWI)

- 1 [0,2) = deutlich feuchter
- 2 [2,4) = feuchter
- 3 [4,8) = etwas feuchter
- 4 [8,12) = trockener
- 5 [12,24) = deutlich trockener

Datenherkunft:	GA2 program
Abdeckung:	Global
Raumbezug:	EPSG:4326
Zeitbezug:	2014
Aktualisierung:	--
Datentyp:	NetCDF
Zellwerte:	--
Auflösung:	15 arc-sec

Hinweis: Der Globale Standardwert führt u.U. dazu, dass im Bergland der Feuchte-Index recht stark differenziert, dafür sind aber sehr flach geneigte Gebiete (NO-deutsches Tiefland) relativ differenziert bleiben. Und hohe Indizes nur auf die schmalen Abflusslinien in den Talböden konzentriert bleiben. Ggf. sollte ein auf Deutschland abgestimmter Datensatz oder auf Gewichtungsfaktoren zur Regionalisierung genutzt werden (24).

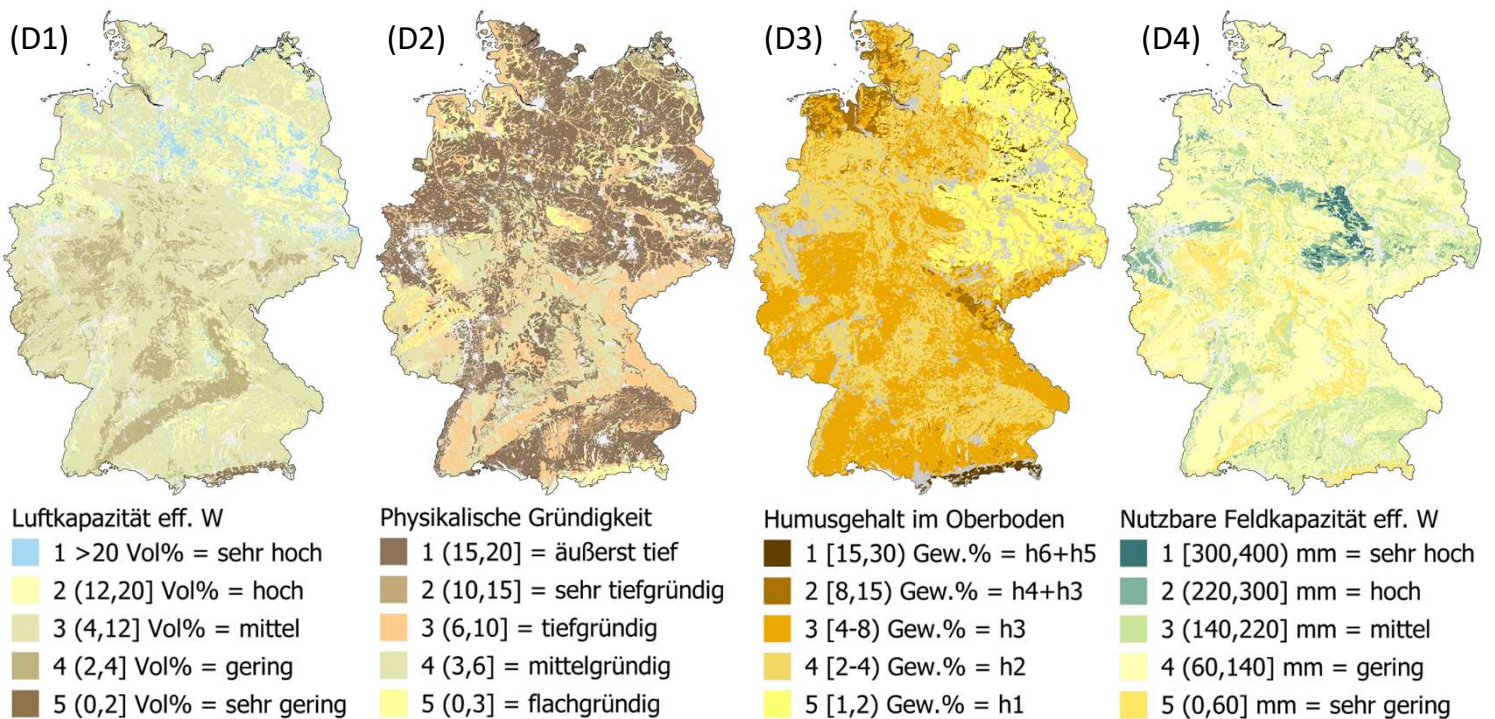
Kriterium D: Bodeneigenschaften

Indikator D1: Luftkapazität im effektiven Wurzelraum

Indikator D2: Physiologische Gründigkeit

Indikator D3: Gehalte organischer Substanz in Oberböden

Indikator D4 : Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum



Kontext und Relevanz: Die Luftkapazität beschreibt den Porenraum (Grobporen), der bei Feldkapazität mit Luft gefüllt ist. Die Luftkapazität im effektiven Wurzelraum fließt als Maß für die Versorgung der Wurzeln mit Sauerstoff (Wurzelatmung = Grobporen) in die Bewertung des Sturmrisikos ein. Die Größe des Luftspeichers im Boden hängt von der Bodenart, der Lagerungsdichte und dem Humusgehalt ab. Der effektive Wurzelraum wird anhand von Landnutzungs- und Bodendaten bestimmt (25).

Literatur:

(25) Metadaten Kennwerte der Wasserbindung im Boden (HAD)

https://geoportal.bafg.de/dokumente/had/42_43_44WasserbindungImBoden_Kennwerte.pdf

Datengrundlage: Die Karte der Luftkapazität im effektiven Wurzelraum basiert auf der Auswertung der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BUEK1000N) und zeigt die klassifizierte Luftkapazität. Die Methode ist in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4) und in der Methodendokumentation Bodenkunde der Ad-hoc-AG Boden veröffentlicht. Als Landnutzungsinformation und zur nutzungsabhängigen Differenzierung der Profildaten werden Daten des CORINE Land Cover Projektes (2006) herangezogen

Datenbezug: https://download.bgr.de/bgr/boden/LKWE1000/geotiff/LKWe1000_250.zip

Metadaten:

https://geoportal.bafg.de/dokumente/had/42_43_44WasserbindungImBoden_Kennwerte.pdf

[https://www.methodenwiki-](https://www.methodenwiki-bodenkunde.de/MethodenWiki/AGBoden:Verkn%C3%BCpfungsregel_1.11)

[bodenkunde.de/MethodenWiki/AGBoden:Verkn%C3%BCpfungsregel_1.11](https://www.methodenwiki-bodenkunde.de/MethodenWiki/AGBoden:Verkn%C3%BCpfungsregel_1.11)

Zitierung: Datenquelle: LKWe1000_250 V2.0, © BGR, Hannover, 2015.

**Luftkapazität eff. W**

- 1 >20 Vol% = sehr hoch
- 2 (12,20] Vol% = hoch
- 3 (4,12] Vol% = mittel
- 4 (2,4] Vol% = gering
- 5 (0,2] Vol% = sehr gering

Datenherkunft: BGR - HAD
 Abdeckung: National DE
 Raumbezug: EPSG:3034
 Zeitbezug: 2014 (erstellt)
 Datentyp: GeoTiff (FLT4S)
 Zellwerte: Klassen nach HAD
 Maßstab: 1:1.000.000

Die Luftkapazität im effektiven Wurzelraum (LKWE) kann als funktionell reziproker Bodenparameter zur nutzbaren Feldkapazität (nFKWe) betrachtet werden, da diese sich in ihrer Ausprägung bei vielen Bodenarten entgegengesetzt verhalten. Böden mit einer hohen nFKWe (z.B. toniger Schluff), hat meist niedrige LK; umgekehrt weisen besser durchlüftete Böden (z.B. Grobsand) eine geringere Wasserspeicherkapazität auf.

Kontext und Relevanz: Die Karte der physiologischen Gründigkeit der Böden in Deutschland gibt einen Überblick über die Mächtigkeit des durchwurzelbaren Raumes unterhalb der Erdoberfläche. Die physiologische Gründigkeit beschreibt die Durchwurzelbarkeit des Bodens, der durch festes Gestein, verfestigte Bänke und Horizonte sowie von anstehendem Grundwasser begrenzt wird (26). Die Rasterzellen bilden die physiologische Gründigkeit [in dm] der Böden in Deutschland ab. Damit gemeint ist die Mächtigkeit des tatsächlich von Pflanzen durchwurzelbaren Raumes unterhalb der Erdoberfläche (27).

Literatur:

- (26) Wellbrock, N., Makowski, V., Bielefeldt, J., Dühnelt, P. E., Grüneberg, E., Bienert, O., ... & Süß, R. (2022). Arbeitsanleitung für die dritte Bodenzustandserhebung im Wald (BZE III): Manual on the third soil inventory in forests (No. 195). Thünen Working Paper. DOI:[10.3220/WP1655205829000](https://doi.org/10.3220/WP1655205829000)
https://www.thuenen.de/media/institute/wo/Waldmonitoring/bze/thuenen_working_paper_195_juli_2022.pdf
- (27) siehe auch (WHH-KW): Weis W, Wellpott A, & Falk W Standortfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel; Teilvorhaben 1 (WHH-KW). Abgerufen am 15.04.2026 unter: <https://www.fnr.de/fileadmin/projektdatenbank/22WK414101.pdf>

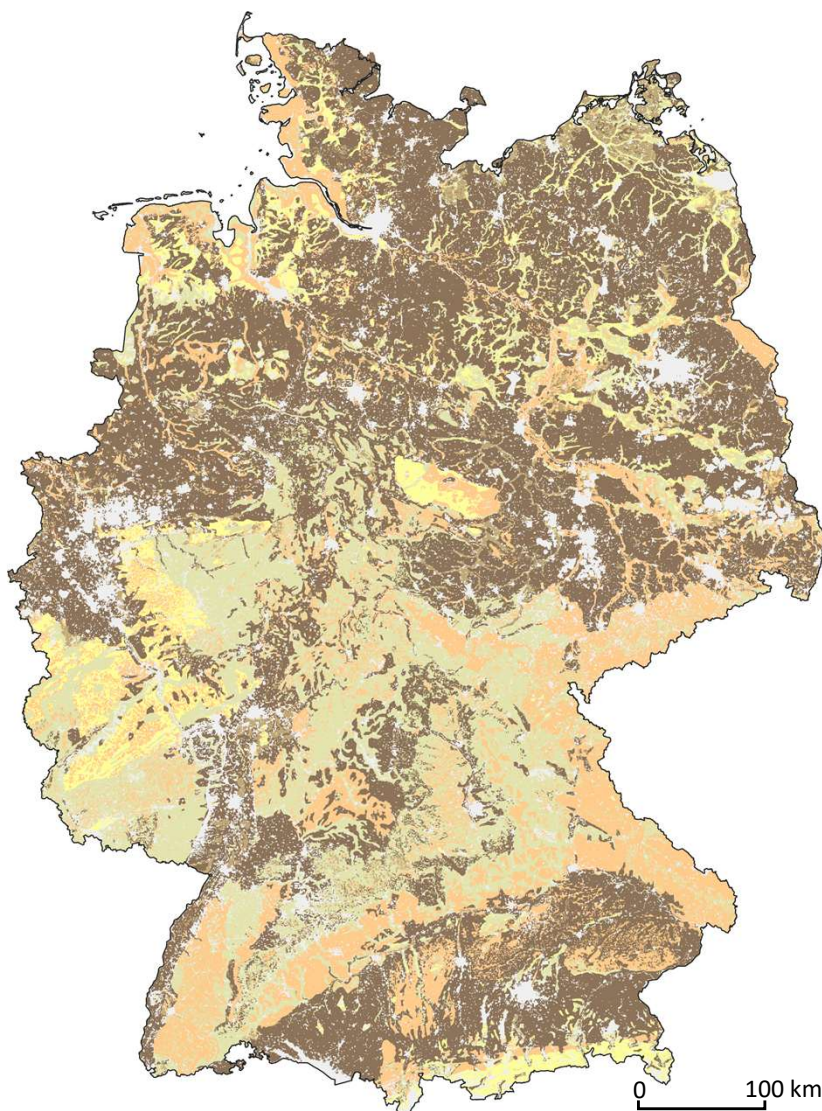
Datengrundlage: Die Karte basiert auf der Auswertung der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BUEK1000N) und zeigt den metrischen Wert der Gründigkeit in klassifizierter Form an. Die Methode ist aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) abgeleitet und im MethodenWIKI des FISBO BGR dokumentiert. Zur nutzungsabhängigen Differenzierung der Profildaten werden die Landnutzungsdaten aus CORINE Land Cover 2006 genutzt.

Datenbezug: https://download.bgr.de/bgr/Boden/PHYSGRU1000/geotiff/PhysGru1000_250.zip

Metadaten:

<https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/index.html?lang=de#/datasets/portal/faee466f-27c1-44c9-bcb8-3c2bec8b1116>

Zitierung: Datenquelle: PhysGru1000_250 V1.0, © BGR, Hannover, 2015.



Physikalische Gründigkeit

- 1 (15,20] = äußerst tief
- 2 (10,15] = sehr tiefgründig
- 3 (6,10] = tiefgründig
- 4 (3,6] = mittelgründig
- 5 (0,3] = flachgründig

Datenherkunft: BGR - FISBO
Abdeckung: National DE
Raumbezug: EPSG:3034
Zeitbezug: 2014 (erstellt)
Datentyp: GeoTiff (FLT4S)
Zellwerte: Klassen nach KA5
Auflösung: 250 m x 250 m

Kontext und Relevanz: Bodenchemische Eigenschaften beeinflussen den Wasser- und Nährstoffhaushalt eines Standortes. Hohe Gehalte organischen Kohlenstoffs in Waldböden fördern die Wasserspeicherkapazität und verbessern die Nährstoffversorgung. Sie erleichtern es den Bäumen damit auch, heiße und Niederschlagsarme Perioden besser zu überstehen (28,29).

Literatur:

(28) Indikatoren für die Deutsche Anpassungsstrategie - Handlungsfeld Wald und Forstwirtschaft: Indikator-Factsheet: Humusvorrat in Waldböden: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5612/dokumente/fw-r-3_indikator_humusvorrat.pdf

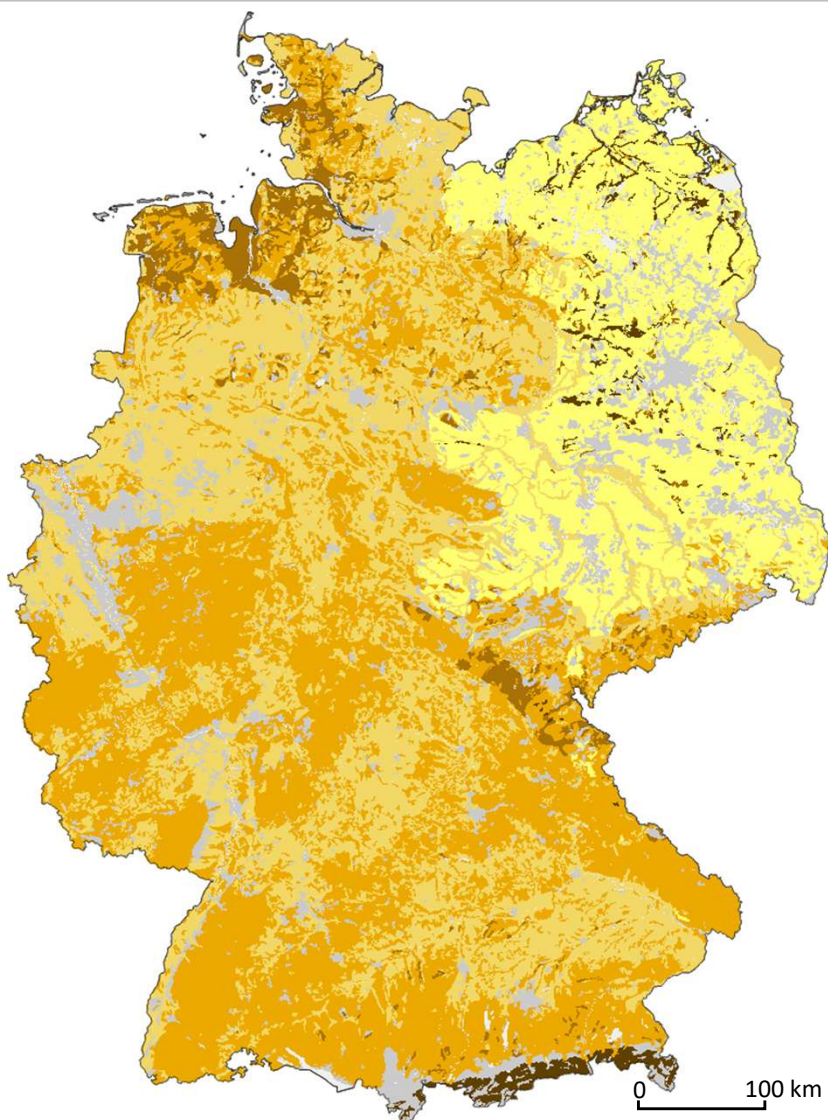
(29) Referenz zur Klassifizierung der Humusklassen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5), S.8: https://download.bgr.de/bgr/Boden/HUMUS1000OB/Bericht/humus1000_ob_Bericht.pdf

Datengrundlage: Die Karte der Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands 1:1.000.000 visualisiert die Ergebnisse der deutschlandweiten Zusammenstellung von typischen Gehalten an organischer Substanz der Oberböden differenziert nach 15 Bodenausgangsgesteinsgruppen, der Landnutzung und vier Klimaregionen. Die Auswertung basiert auf mehr als 9000 Bodenprofilen, zu denen qualitätsgesicherte Daten zur organischen Substanz aus einem zwanzigjährigen Zeitraum vorlagen. Die in der Karte dargestellten Klassen entsprechen der Klasseneinteilung in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5), wobei die Klassen h2–h5 der KA5 jeweils in der Klassenmitte geteilt wurden. Damit gibt die Karte insbesondere in den Klassen geringer Gehalte ein differenzierteres Bild wieder.

Datenbezug: https://download.bgr.de/bgr/Boden/HUMUS1000OB/shp/humus1000_ob_v20.zip

Metadaten: https://download.bgr.de/bgr/Boden/HUMUS1000OB/Bericht/humus1000_ob_Bericht.pdf
<https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/index.html?lang=de#/datasets/portal/02F23B5B-5FB8-48BA-ADDA-7ECA7481C4DE>

Zitierung: Datenquelle: HUMUS1000OB V2.0, © (BGR), Hannover, 2007.



- Humusgehalt im Oberboden
- 1 [15,30) Gew.% = h6+h5
 - 2 [8,15) Gew.% = h4+h3
 - 3 [4-8) Gew.% = h3
 - 4 [2-4) Gew.% = h2
 - 5 [1,2) Gew.% = h1

Datenherkunft: BGR - FISBO
Abdeckung: National DE
Raumbezug: EPSG:3034
Zeitbezug: 2010 (erstellt)
Datentyp: Shapefile
Zellwerte: Klassen nach KA5
Auflösung: 1:1.000.000

Kontext und Relevanz: Der Wasserspeicherkapazität des Bodens kommt im Zusammenhang mit möglichen Folgen des Klimawandels und entsprechenden Anpassungsmaßnahmen eine besondere Bedeutung zu (30). Der moderierende Effekt des Kronendachs bei Trocken- und Hitzestress nimmt nicht nur mit der Belaubungsdichte, sondern auch mit der Bodenfeuchte ab (31). Die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) beziffert das pflanzenverfügbare Wasserspeichungsvermögen von Böden und dient zur statischen Charakterisierung des Wasserhaushalts eines Standorts (32).

Literatur:

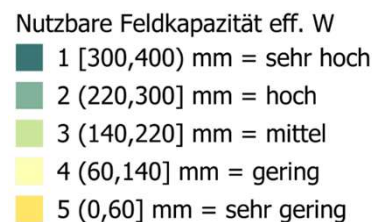
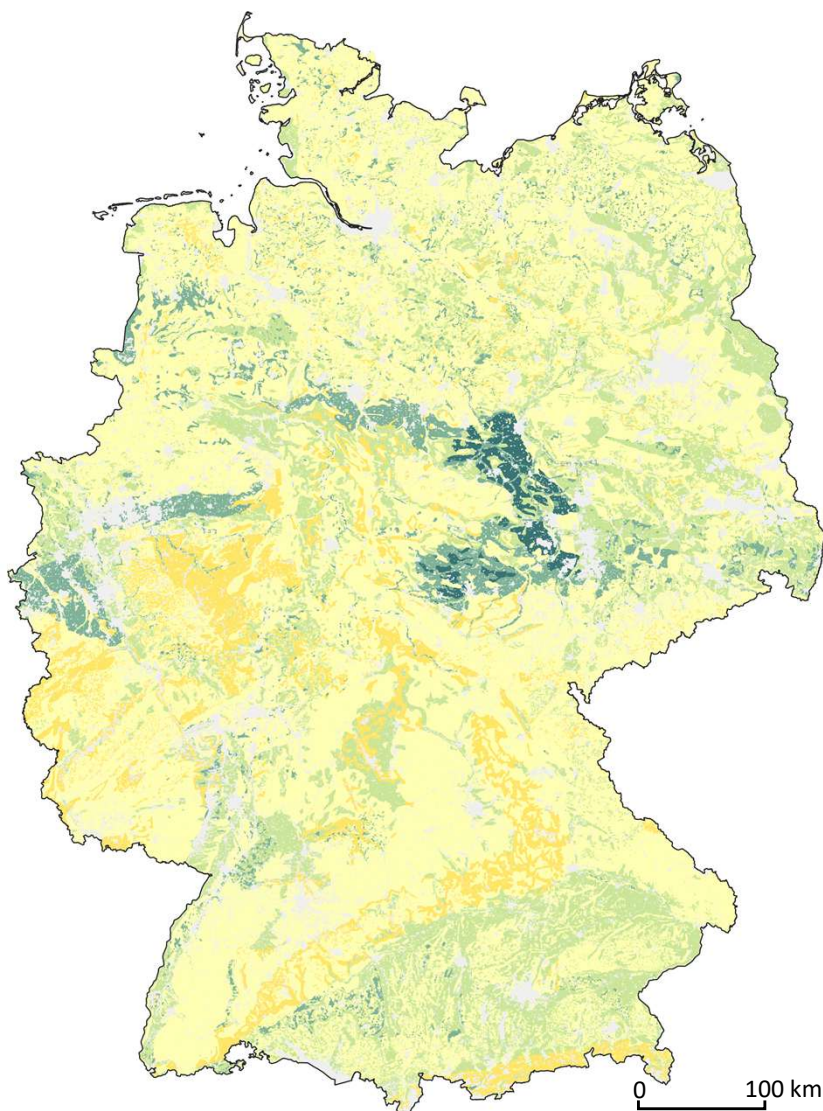
- (30) Bundesregierung, D. (2008). Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am, 17, 1-78.
- (31) Von Arx, G., Graf Pannatier, E., Thimonier, A., & Rebetez, M. (2013). Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate. Journal of ecology, 101(5), 1201-1213. <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1365-2745.12121>
- (32) https://blumwald.thuenen.de/fileadmin/blumwald/BZE/Thuenen_workingpaper_97_Dokumentation_und_Harmonisierung_der_Methoden.pdf
- (33) Metadaten Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (nFKWe) (HAD) <https://www.geoportal.de/Metadaten/38206e4b-e618-4c70-bea8-8f35b57fedc4>

Datengrundlage: Die Karte der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Deutschland gibt einen Überblick über das Vermögen der Böden pflanzenverfügbares Wasser zu speichern. Die Größe des Wasserspeichers des Bodens hängt von der Bodenart, der Lagerungsdichte und dem Humusgehalt ab. Der effektive Wurzelraum wird anhand Bodendaten aus BÜK1000N V2.31 (BGR) und Landnutzungsdaten aus Corine Land Cover 2006 (UBA/DLR) bestimmt. Methodendokumentation: Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA4).

Datenbezug: https://download.bgr.de/bgr/Boden/NFKWE1000/geotiff/NFKWe1000_250.zip

Metadaten: <https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/index.html?lang=de#/datasets/portal/8e3f001c-9c6e-4eeb-8d0d-988456a20486>

Zitierung: Datenquelle: NFKWe1000_250 V1.0, © (BGR), Hannover, 2015.



Datenherkunft: BGR - FISBO
Abdeckung: National DE
Raumbezug: EPSG:3034
Zeitbezug: 2010 (erstellt)
Datentyp: GeoTiff (INT1U)
Zellwerte: Klassen nach KA5
Auflösung: 250 m x 250 m

Nutzbare Feldkapazität nFKWe ist auf die Tiefe des effektiven Wurzelraums bezogen und für die Kennwerte wurde die Klasseneinteilung individuell je Nutzungsart vorgenommen, da die Tiefe des effektiven Wurzelraumes nach boden-hydrologischen Ansprüchen der Pflanzen definiert und für land- und forstwirtschaftlich genutzte Standorte nach separaten Algorithmen beurteilt bzw. an Forststandorten im Mittel 20 % höher eingestuft wird (33).

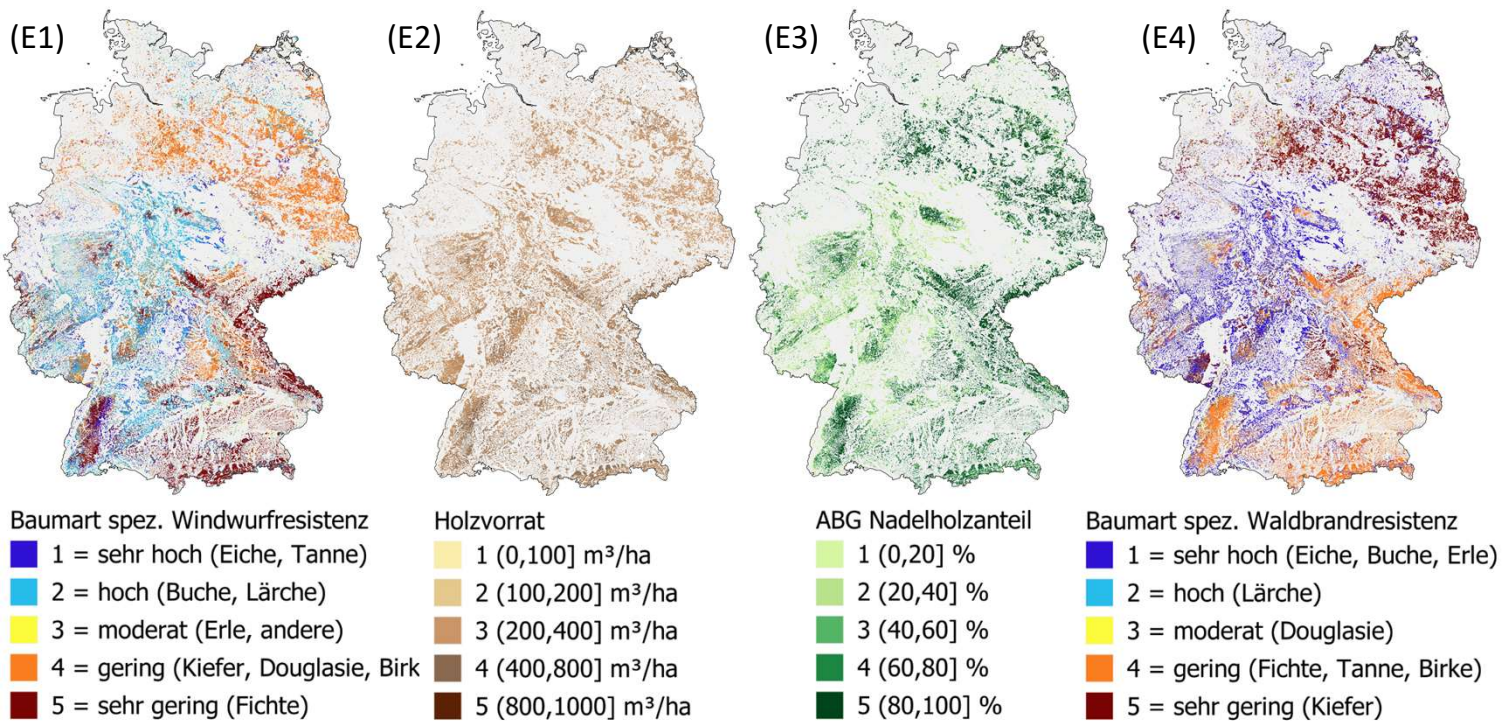
Kriterium E: Waldstruktur

Indikator E1: Baumartenspezifische Windwurf-/Schneebruchresistenz

Indikator E2: Holzvorrat

Indikator E3: Nadelholzprozent oberirdischer Biomasse

Indikator E4: Baumartenspezifische Waldbrandresistenz



Kontext und Relevanz: Das Sturmrisiko ist, neben lokalen Standortgegebenheiten, abhängig von Artenspezifischen Einzelbaummerkmalen. Nadelbäume sind auf Grund ihrer physiologischen Eigenschaften im Allgemeinen anfälliger gegenüber den mechanischen Einwirkungen von Stürmen als Laubbäume. Die Windwurf-/ Schneebruchresistenz unterscheidet sich nach der artgebundenen Anfälligkeit hinsichtlich der Verankerung (Durchwurzelung) im Boden, der Kronenform und dem winterlichen Belaubungszustand (34).

Literatur:

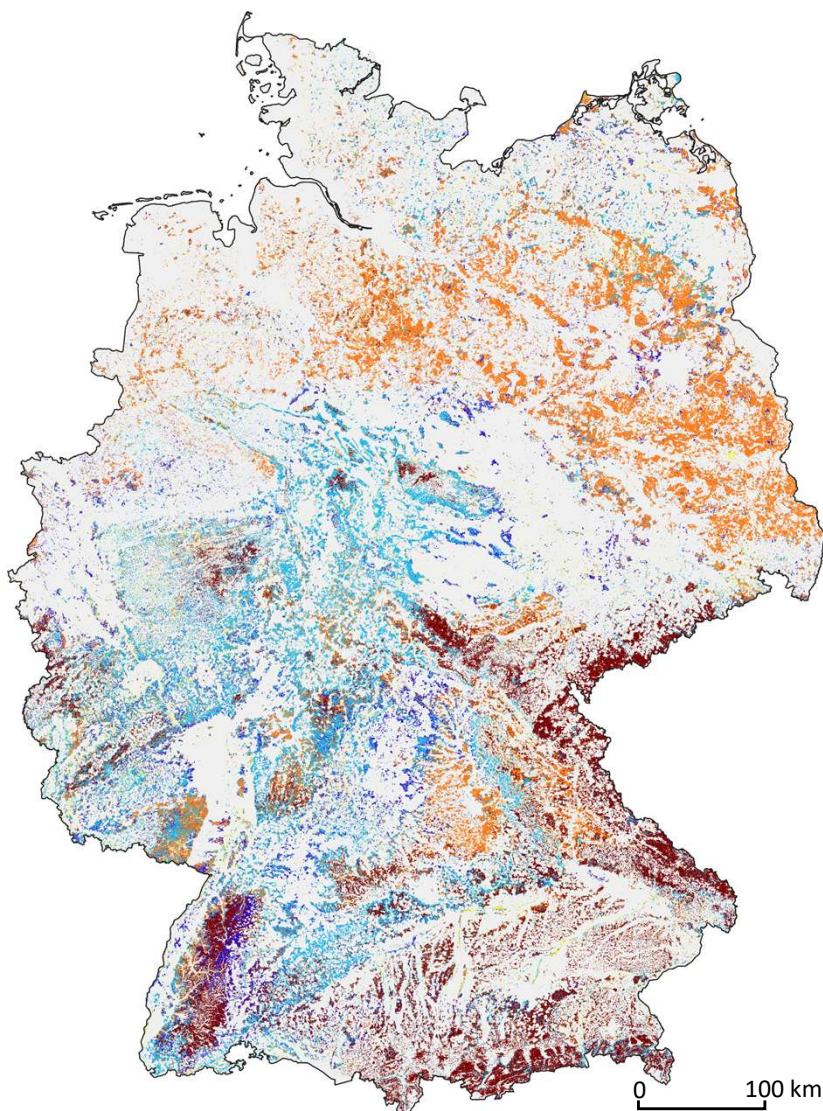
- (34) Hanewinkel, M., Albrecht, A., & Schmidt, M. (2013). Influence of stand characteristics and landscape structure on wind damage. What Science Can Tell Us. Living with Storm Damage to Forests; Gardiner, B., Schuck, A., Schelhaas, M.-J., Orazio, C., Blennow, K., Nicoll, B., Eds, 39-45. https://www.nw-fva.de/fileadmin/nw-fva/publikationen/pdf/hanewinkel_2013_influence_of_stand.pdf
- (35) Otto, H.-J. (1994): Waldökologie. Seite 73, Tab. 4 und Seite 72–76; Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart Ökologische Potenz mitteleuropäischer Baumarten https://www.afsv.de/download/arbeitsgruppe/Oeko_Potenz_Baumarten.doc

Datengrundlage: Die Baumartenkartierung de DLR wurden nach der Bewertung der Baumartenspezifischen Windwurf/Schneebruch-Resistenz (35) reklassifiziert. Das DLR-Produkt „Tree Species Map Germany“ zeigt die Verbreitung von zehn Baumartengruppen, die aus multitemporalen optischen Sentinel-2-Daten, Radardaten von Sentinel-1 und einem digitalen Höhenmodell abgeleitet und mittels XGBoost machine learning unter Berücksichtigung art-spezifischer phänologischer Informationen klassifiziert wurden.

Datenbezug: https://download.geoservice.dlr.de/TREE_SPECIES_DE/files/treespecies_de_2022.tif

Referenz: Wegler M, Kacic P, Thonfeld F, Holzwarth S, Jaggy N, Gessner U, & Kuenzer C. (2025). Tree species from space: a new product for Germany based on Sentinel-1 and -2 time series. International Journal of Remote Sensing, 1-34. DOI: 10.1080/01431161.2025.2530236 <https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2530236>

Zitierung: © DLR/EOC [Tree Species - Sentinel-1/2 - Germany, 2022](#) | Enthält modifizierte Copernicus Sentinel-1/2 daten [2021-2023]



Baumart spez. Windwurfresistenz

- 1 = sehr hoch (Eiche, Tanne)
- 2 = hoch (Buche, Lärche)
- 3 = moderat (Erle, andere)
- 4 = gering (Kiefer, Douglasie, Birke)
- 5 = sehr gering (Fichte)

Datenherkunft: TUM-EFDA
Abdeckung: Pan-Europäisch
Raumbezug: EPSG:3035
Zeitbezug: 1985-2023
Aktualisierung: regelmäßig
Datentyp: GeoTiff (INT1U)
Zellwerte: 1-5 nach Otto 1994
Auflösung: 10 m x 10 m

Kontext und Relevanz: Bestandesvolumen und -Zuwachs sind baumartenspezifische Kennwerte für die Produktivität eines Bestandes, die je nach Standort- und Wuchsbedingungen sowie Bewirtschaftungsform und Durchforstungsintensität deutlich variieren können. Mit steigenden Holzvorräten (und zunehmendem Alter der Waldbestände) steigt auch die Eintrittswahrscheinlichkeit für Sturmschäden (36).

Literatur:

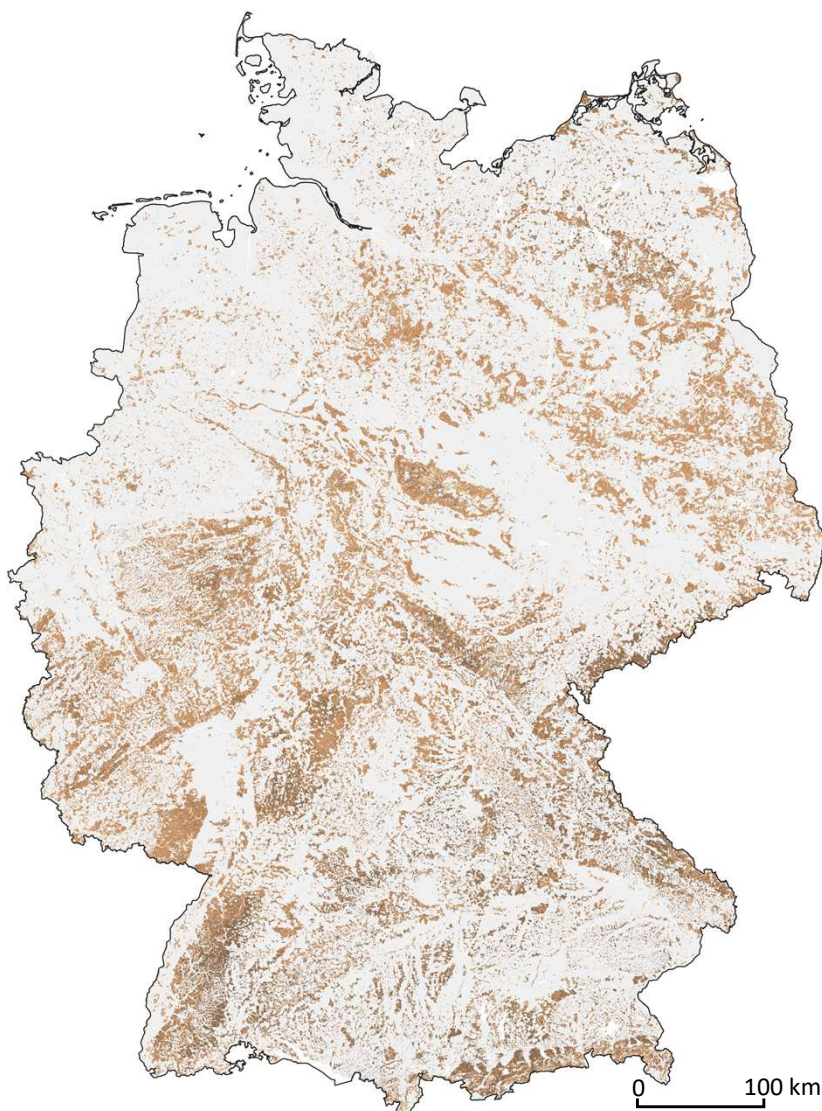
(36) Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik (2021). Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel-Gutachten. https://www.bundestag.de/resource/blob/897504/03-04_07_2022_oeFG_Gutachten_WBW_Wald.pdf

Datengrundlage: Die paneuropäische Karten zum Holzvorrat an der oberirdischen Biomasse (AGB) und mit einer Pixelgröße von $10 \times 10 \text{ m}^2$ für das Referenzjahr 2020 wurde auf der Grundlage eines Sentinel-2-Mosaiks, den Copernicus Waldstatus-Produkten-Ebenen; die Ableitung basiert auf dem k-Nearest-Neighbor-Ansatz (kNN, $k=7$); die Validierung erfolgte mit einer harmonisierten Datenbank artspezifischer V- und AGB-Werte aus 14 nationalen Waldinventuren (etwa 151.000 Stichprobenflächen) in ganz Europa.

Datenbezug: <https://zenodo.org/records/13143235>

Referenz: Miettinen, J., Adame, P., Adolt, R., Alberdi, I., Antropov, O., Arnarsson, Ó., Astrup, R., Berger, A., Bogason, J., Chirici, G., Corona, P., D'Amico, G., Fejfar, J., Fischer, C., Gohon, F., Gschwantner, T., Hertzler, J., Koma, Z., Korhonen, K. T., ... Breidenbach, J. (2024). High-Resolution Pan-European Forest Structure Maps: An Integration of Earth Observation and National Forest Inventory Data [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13143235>

Zitierung: Miettinen, J., et al., (2024). High-Resolution Pan-European Forest Structure Maps: An Integration of Earth Observation and National Forest Inventory Data [2020_vol.zip]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13143235>

**Holzvorrat**

- 1 (0,100] m³/ha
- 2 (100,200] m³/ha
- 3 (200,400] m³/ha
- 4 (400,800] m³/ha
- 5 (800,1000] m³/ha

Datenherkunft: VTT FI
 Abdeckung: Pan-Europäisch
 Raumbezug: EPSG:3035
 Zeitbezug: 2017-2020
 Datentyp: GeoTiff (INT2U)
 Zellwerte: Klassen nach NFI
 Auflösung: 10 m x 10 m

Anmerkung: Die Karten dienen in erster Linie als Zusatzinformation für modellgestützte Schätzungen, bei denen modellbedingte Verzerrungen gemildert und feldbasierte Schätzungen verbessert werden können. Daher wurden keine zusätzlichen Kalibrierungsverfahren angewendet. Insbesondere hohe V- und AGB-Werte tendenziell unterschätzt werden. Die Aggregation über große Regionen führt zu verzerrten Schätzungen, die mit Vorsicht interpretiert werden müssen.

Kontext und Relevanz: Nadelholzbestände sind deutlich überproportional zu ihrem Anteil an der Waldfläche von Bränden betroffen; Mit zunehmenden Laubholzanteilen nimmt die Schwere der Waldbrandschäden ab. Reinbestände sind tendenziell anfälliger als Mischwälder (37); Mischbestände sind geeignet, die Resistenz, Resilienz und Anpassungsfähigkeit von Waldbeständen zu erhöhen (38).

Literatur:

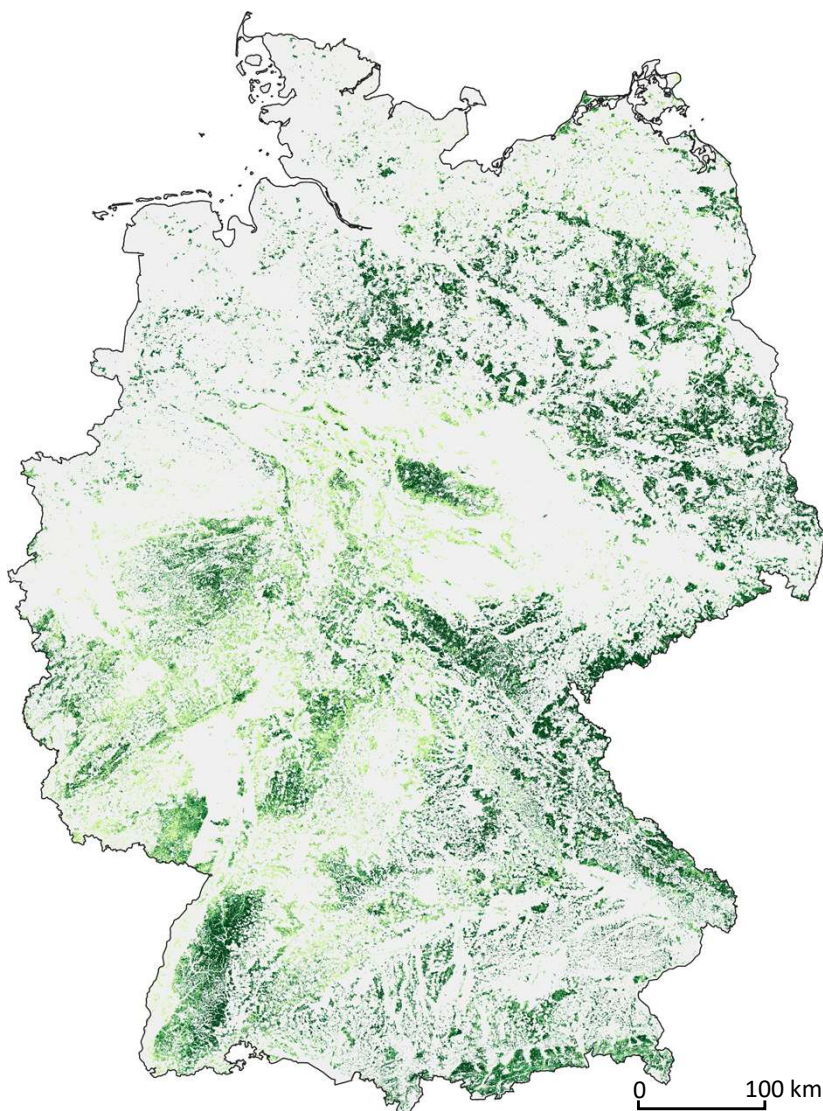
- (37) Gnilke, A., Liesegang J. & T. G. M. Sanders (2022): Waldbrandprävention durch waldbauliche Maßnahmen – Eine Analyse von Waldbrandschäden in Kiefernwäldern. Eberswalde: Thünen-Institut für Waldökosysteme, Project Brief Thünen Inst 2022/24, DOI:10.3220/PB1658237571000
https://www.thuenen.de/media/publikationen/project_brief/Project_brief_2022_24.pdf
- (38) Bauhus, J., Forrester, D. I., Gardiner, B., Jactel, H., Vallejo, R., & Pretzsch, H. (2017). Ecological stability of mixed-species forests. In Mixed-species forests: Ecology and management (pp. 337-382). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg

Datengrundlage: Die paneuropäische Karten zum Laub-Nadel-Anteil an der oberirdischen Biomasse (AGB) und mit einer Pixelgröße von $10 \times 10 \text{ m}^2$ für das Referenzjahr 2020 wurde auf der Grundlage eines Sentinel-2-Mosaiks, den Copernicus Waldstatus-Produkten-Ebenen; die Ableitung basiert auf dem k-Nearest-Neighbor-Ansatz (kNN, $k=7$); die Validierung erfolgte mit einer harmonisierten Datenbank artspezifischer V- und AGB-Werte aus 14 nationalen Waldinventuren (etwa 151.000 Stichprobenflächen) in ganz Europa. Die quadratischen Mittelwertfehler (RMSEs) für die AGB reichten von 53 % im nordischen Verarbeitungsgebiet bis zu 73 % im südöstlichen Gebiet.

Datenbezug: <https://doi.org/10.21950/YABYCN>

Referenz: <https://essd.copernicus.org/articles/15/1287/2023/>

Zitierung: Miettinen, J., et al., (2024). High-Resolution Pan-European Forest Structure Maps: An Integration of Earth Observation and National Forest Inventory Data [2020_P_agb_conifers.zip]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13143235>

**AGB Nadelholzanteil**

- 1 (0,20] %
- 2 (20,40] %
- 3 (40,60] %
- 4 (60,80] %
- 5 (80,100] %

Datenherkunft: VTT FI
 Abdeckung: Pan-Europäisch
 Raumbezug: EPSG:3035
 Zeitbezug: 2020
 Datentyp: GeoTiff (INT2U)
 Zellwerte: Klassen nach FAO
 Auflösung: $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$

Anmerkung: Die Karten dienen in erster Linie als Zusatzinformation für modellgestützte Schätzungen, bei denen modellbedingte Verzerrungen gemildert und feldbasierte Schätzungen verbessert werden können. Daher wurden keine zusätzlichen Kalibrierungsverfahren angewendet.

Hinweis: Insbesondere hohe AGB-Werte werden tendenziell unterschätzt. Die Aggregation über große Regionen führt zu verzerrten Schätzungen, die mit Vorsicht interpretiert werden müssen.

Kontext und Relevanz: Die Entzündungstemperaturen und Kalorienentwicklung bei Brand in lebenden und toten Pflanzenteilen sind bei den Baumarten unterschiedlich und bestimmen ihren Gefährdungsgrad (39). Laborversuche zu Entzündungszeit und Wärmefreisetzung verschiedener Streutypen zeigen, dass Kiefernstreu sehr schnell mit hoher Wärmefreisetzung verbrennt. Laubstreu setzt ähnlich viel Wärme frei, jedoch über einen längeren Zeitraum; Kurze Nadelstreu verbrennt dagegen langsam mit geringerer Wärmefreisetzungsrates (40).

Literatur:

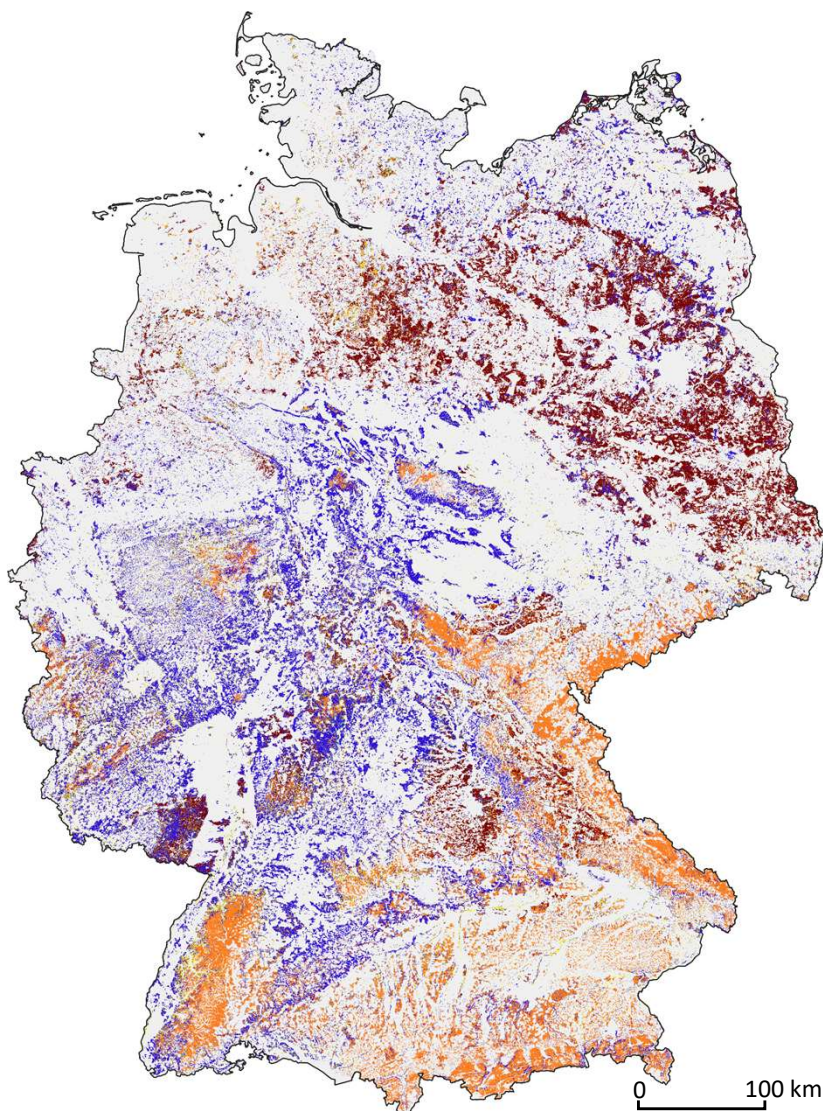
- (39) Otto, H.-J. (1994): Waldökologie. Seite 73, Tab. 4 und Seite 72–76; Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart Ökologische Potenz mitteleuropäischer Baumarten https://www.afsv.de/download/arbeitsgruppe/Oeko_Potenz_Baumarten.doc
- (40) Ewald, M., Labenski, P., Westphal, E., Metzsch-Zilligen, E., Großhauser, M., & Fassnacht, F. E. (2025). Leaf litter combustion properties of central European tree species. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 98(1), 29-39.

Datengrundlage: Die Baumartenkartierung der DLR wurden nach der Bewertung der Baumartenspezifischen Waldbrandresistenz (39) reklassifiziert. Das DLR-Produkt „Tree Species Map Germany“ zeigt die Verbreitung von zehn Baumartengruppen, die aus multitemporalen optischen Sentinel-2-Daten, Radardaten von Sentinel-1 und einem digitalen Höhenmodell abgeleitet und mittels XGBoost machine learning unter Berücksichtigung art-spezifischer phänologischer Informationen klassifiziert wurden.

Datenbezug: https://download.geoservice.dlr.de/TREE_SPECIES_DE/files/treespecies_de_2022.tif

Referenz: Wegler M, Kacic P, Thonfeld F, Holzwarth S, Jaggy N, Gessner U, & Kuenzer C. (2025). Tree species from space: a new product for Germany based on Sentinel-1 and -2 time series. *International Journal of Remote Sensing*, 1-34. DOI: 10.1080/01431161.2025.2530236 <https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2530236>

Zitierung: © DLR/EOC [Tree Species - Sentinel-1/2 - Germany, 2022](#) | Enthält modifizierte Copernicus Sentinel-1/2 daten [2021-2023]



Baumart spez. Waldbrandresistenz

- 1 = sehr hoch (Eiche, Buche, Erle)
- 2 = hoch (Lärche)
- 3 = moderat (Douglasie)
- 4 = gering (Fichte, Tanne, Birke)
- 5 = sehr gering (Kiefer)

Datenherkunft: FU-Bln. SITS-BERT
 Abdeckung: National DE
 Raumbezug: EPSG:3035
 Zeitbezug: 2021-2023
 Datentyp: GeoTiff (INT1U)
 Zellwerte: 1-5 nach Otto 1994
 Auflösung: 10 m x 10 m

Das Produkt „Tree Species Germany“ erreicht einen Gesamt-F1-Score von 0,89. Für die dominanten Arten Kiefer, Fichte, Buche und Eiche liegen die klassenbezogenen F1-Scores zwischen 0,76 und 0,98, während die F1-Scores für andere weit verbreitete Arten wie Birke, Erle, Lärche, Douglasie und Tanne zwischen 0,88 und 0,96 liegen.

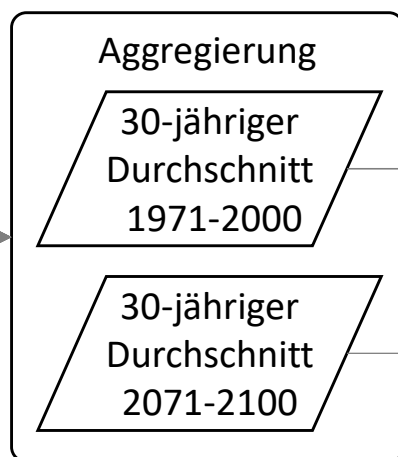
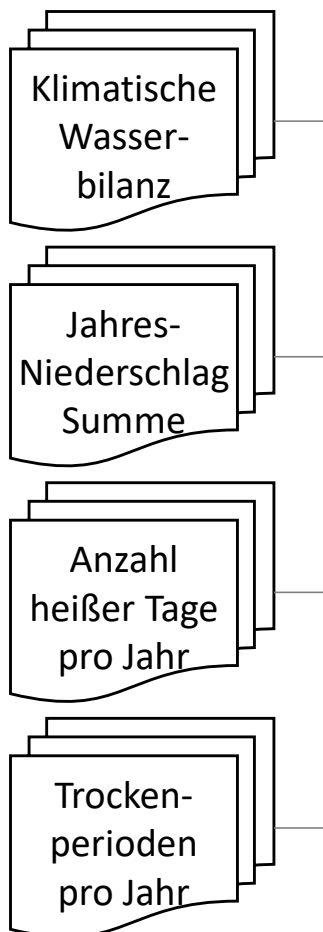


Metadaten Dokumentation Indikatoren Klimaveränderungen

Workflow Multi-Model 30-Jahres Mittel der Klimaindikatoren	2
Karten Multi-Model 30-Jahres Mittel der Klimaindikatoren	3
Karten Multi-Model Differenz 30-Jahres Mittel Klimaindikatoren	4
Karten Single-Model 30-Jahres Mittel der Klimatischen Wasserbilanz	5
Karten Single-Model 30-Jahres Mittel der Jahresniederschlag Summe	6
Karten Single-Model 30-Jahres Mittel der Anzahl Heißer Tage	7
Karten Single-Model 30-Jahres Mittel der Anzahl Trockenperioden	8
Tabellenübersicht CMIP6 Global Climate Models (GCMs)	9
Tabellenübersicht CMIP6 Shared Socioeconomic Pathway (SSP) Experiments	10

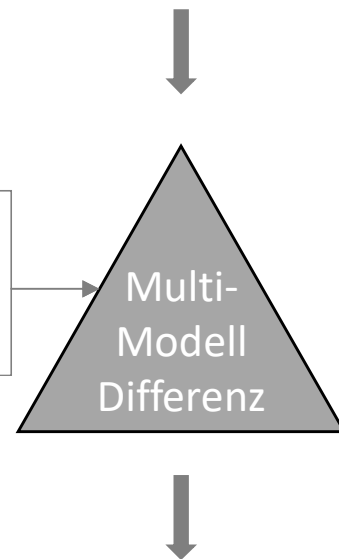
Indikatoren

Klimaveränderungen



Klimamodelle (GCMs)

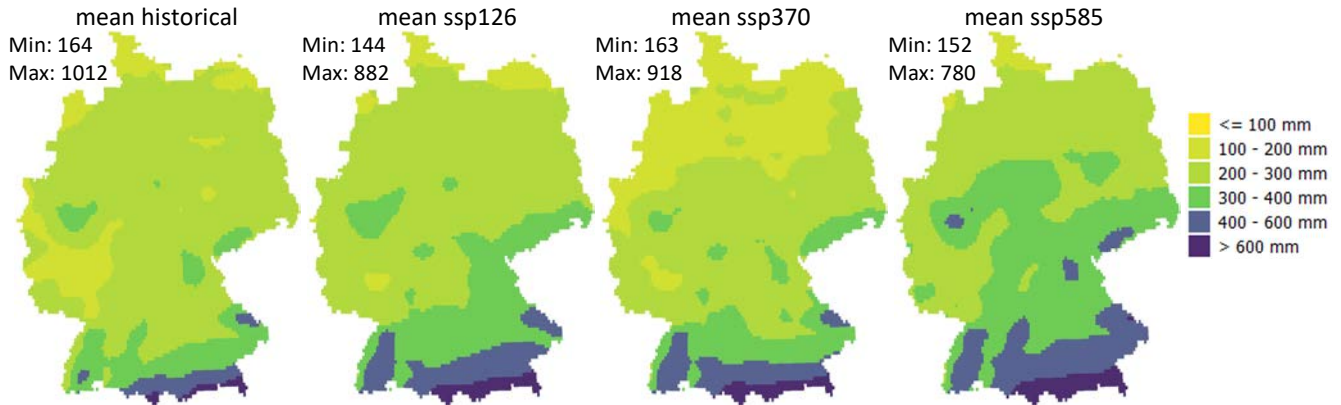
- ACCESS-CM2
- CanEMS5
- CNRM-ESM2-1
- EC-EARTH3
- MPI-ESM1-2-HR



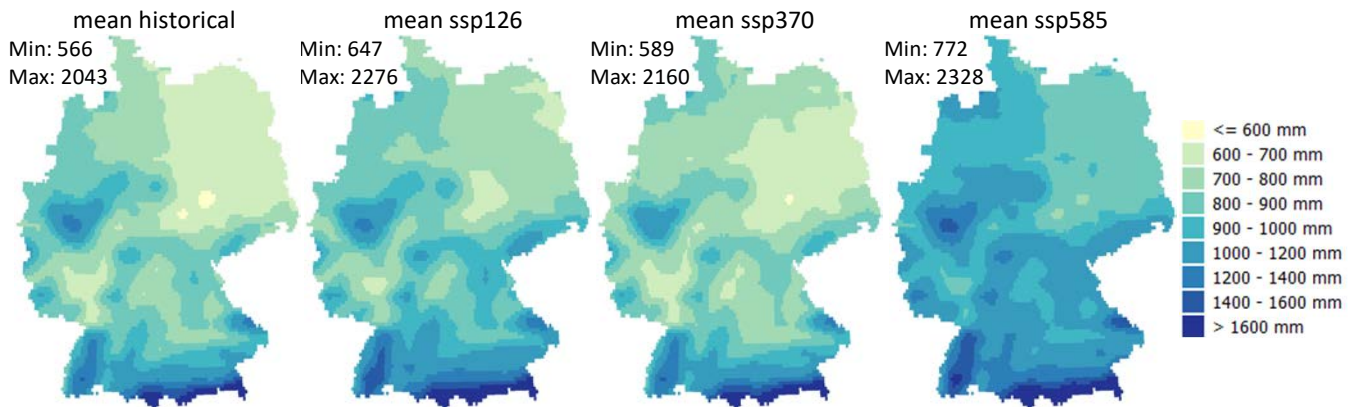
Shared Socioeconomic Pathway Experiments

- SSP126
- SSP370
- SSP585

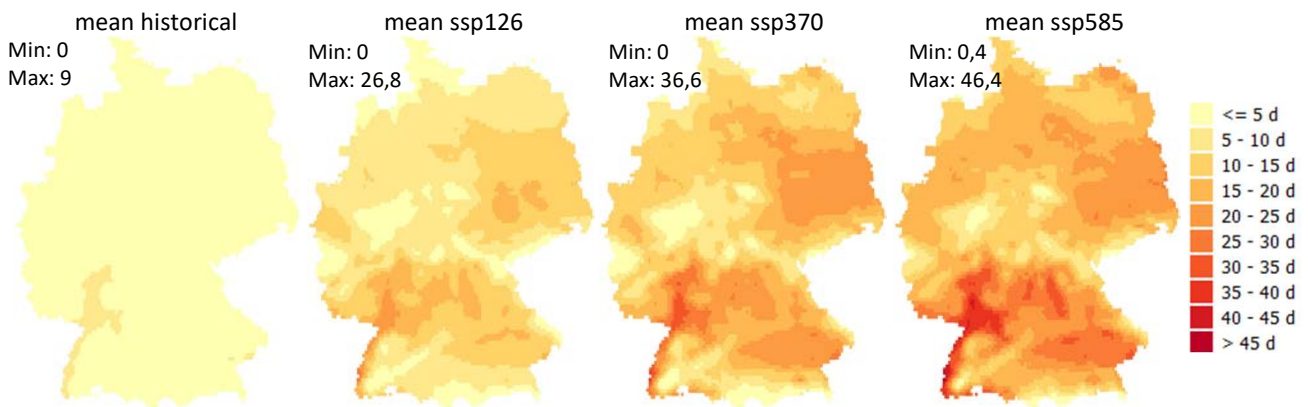
Multi-Model klimatische Wasserbilanz



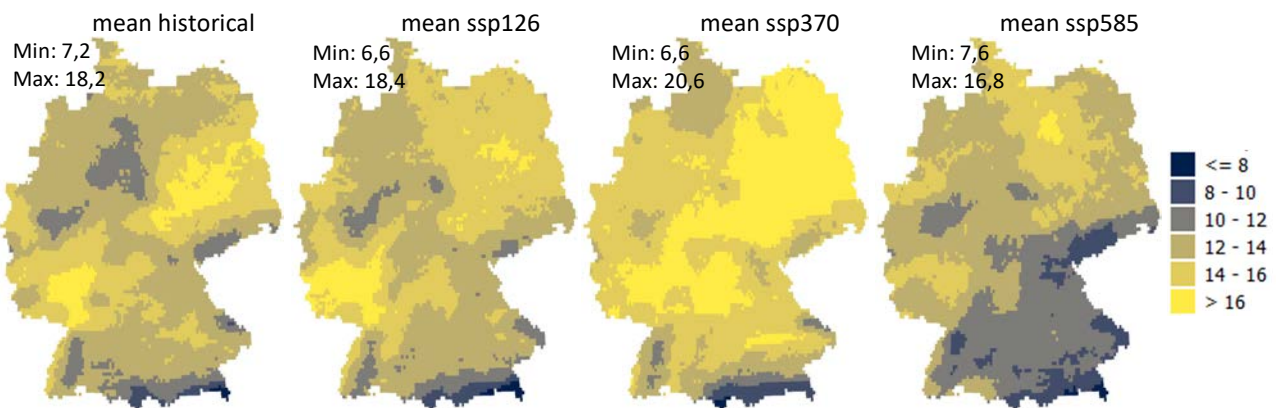
Multi-Model Summe Jahresniederschlag



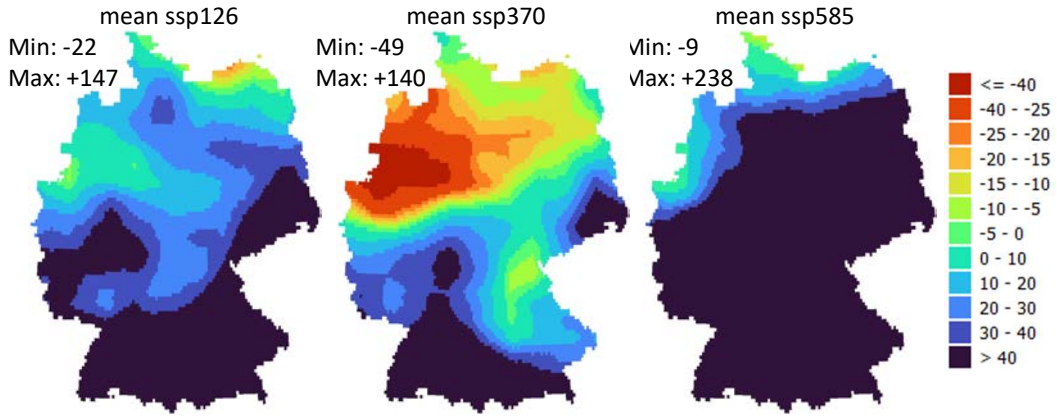
Multi-Model Anzahl Heißer Tage



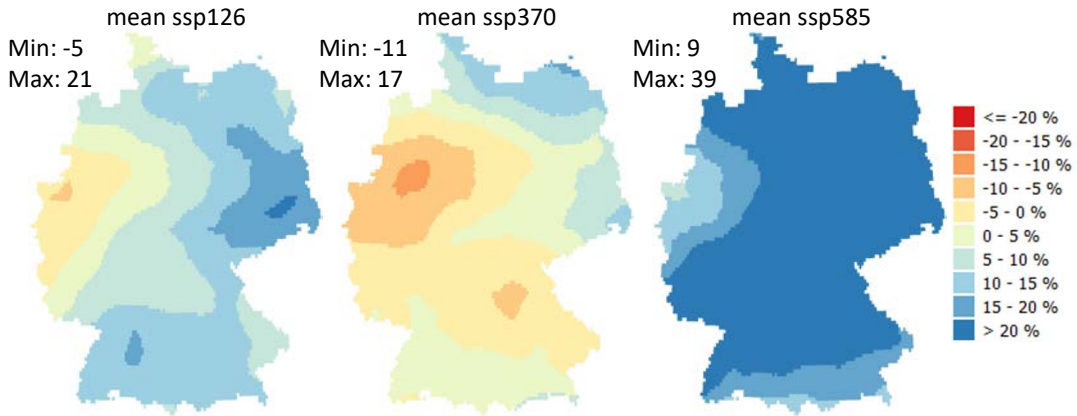
Multi-Model Anzahl Trockenperioden



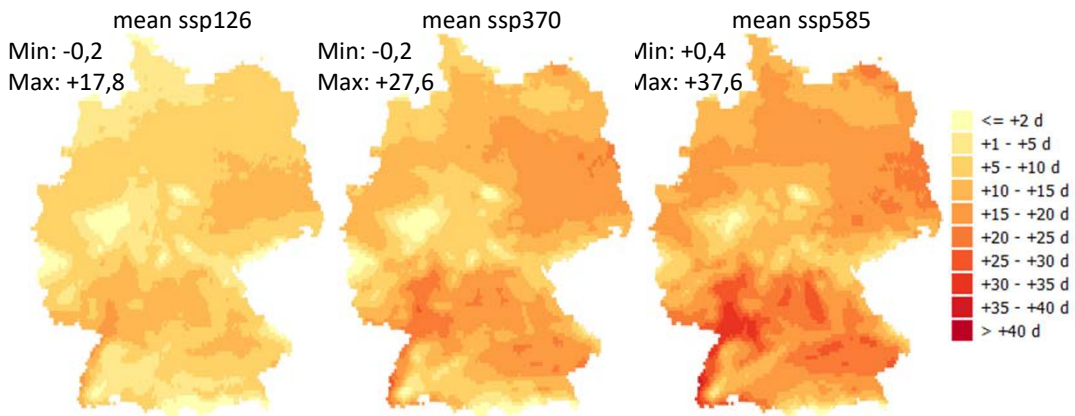
Multi-Model Differenz Klimatische Wasserbilanz



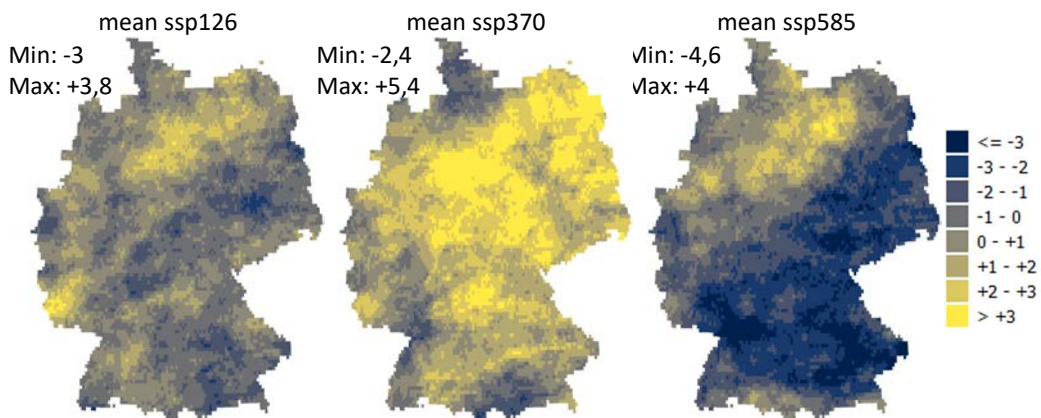
Multi-Model Differenz Summe Jahresniederschlag



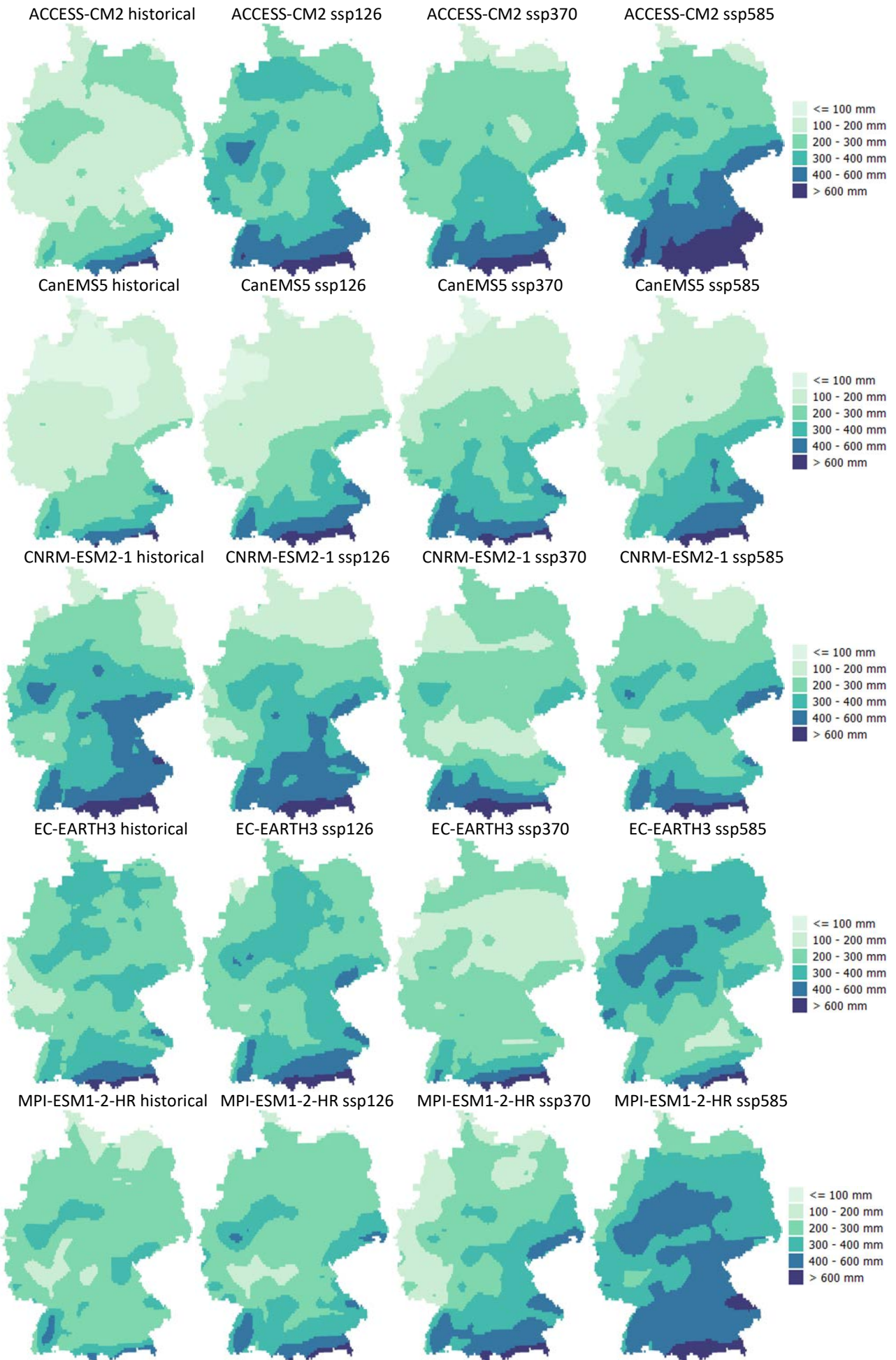
Multi-Model Differenz Anzahl Heißer Tage



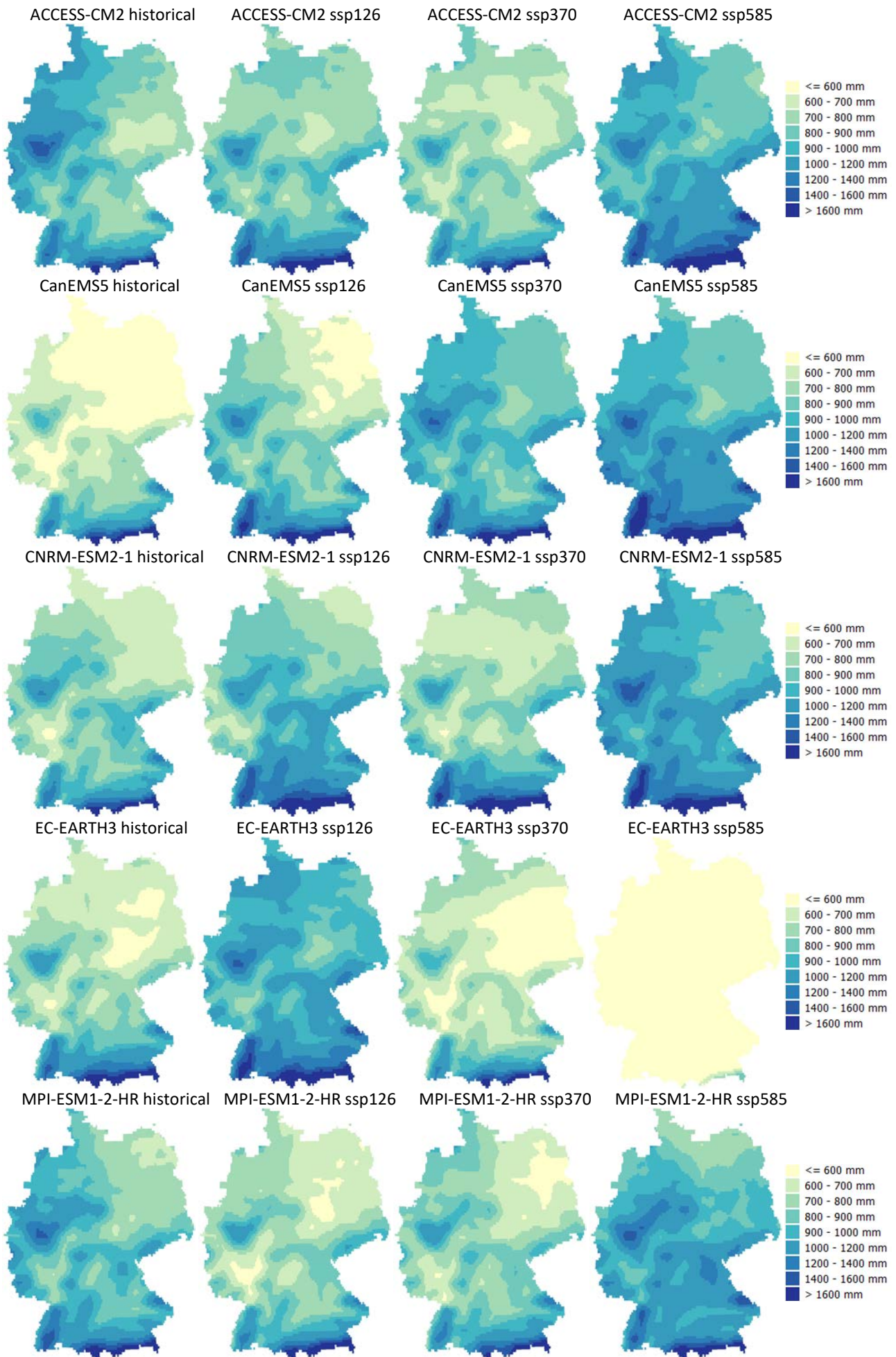
Multi-Model Differenz Anzahl der Trockenperioden



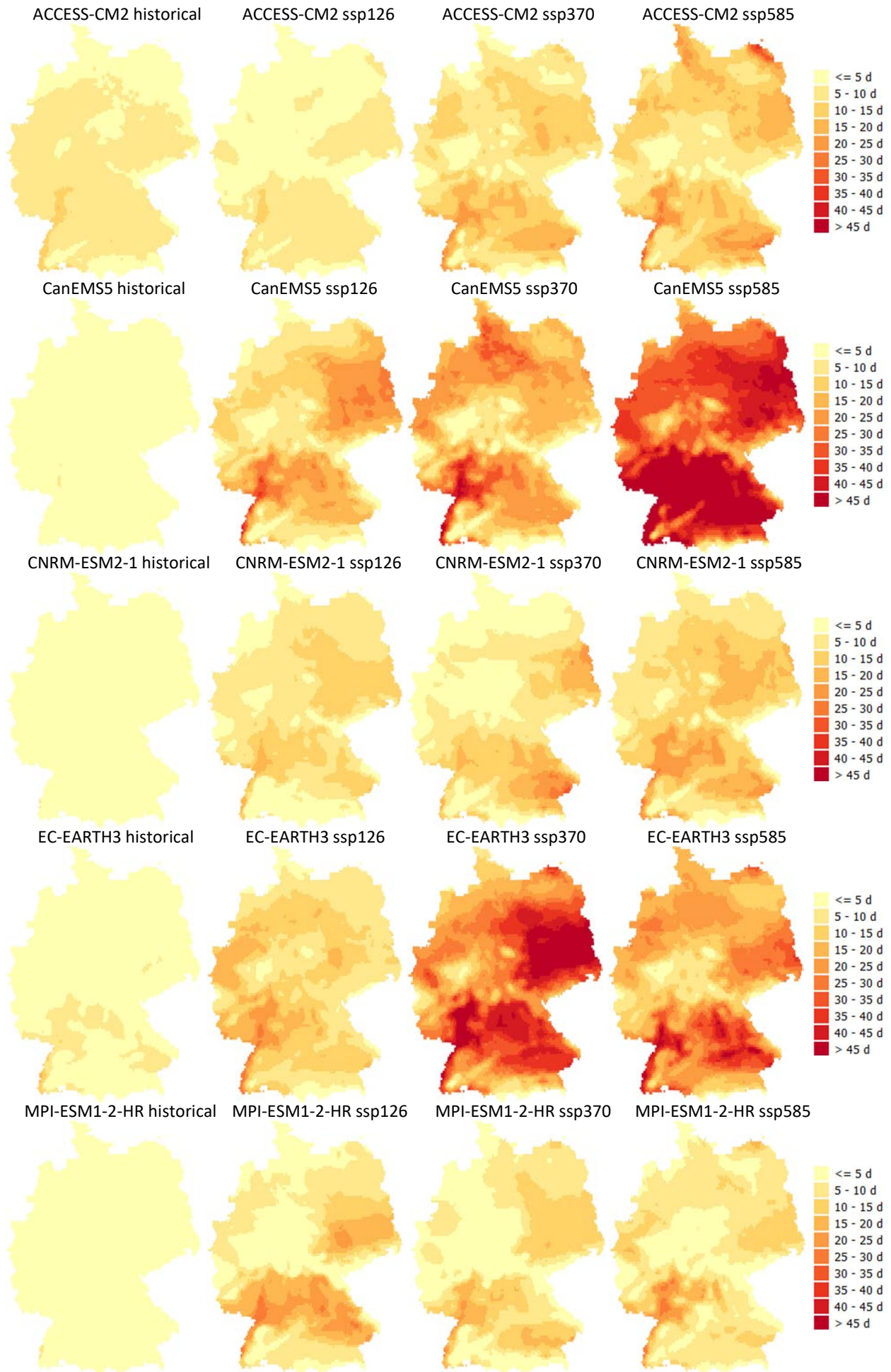
Single-Model Klimatische Wasserbilanz



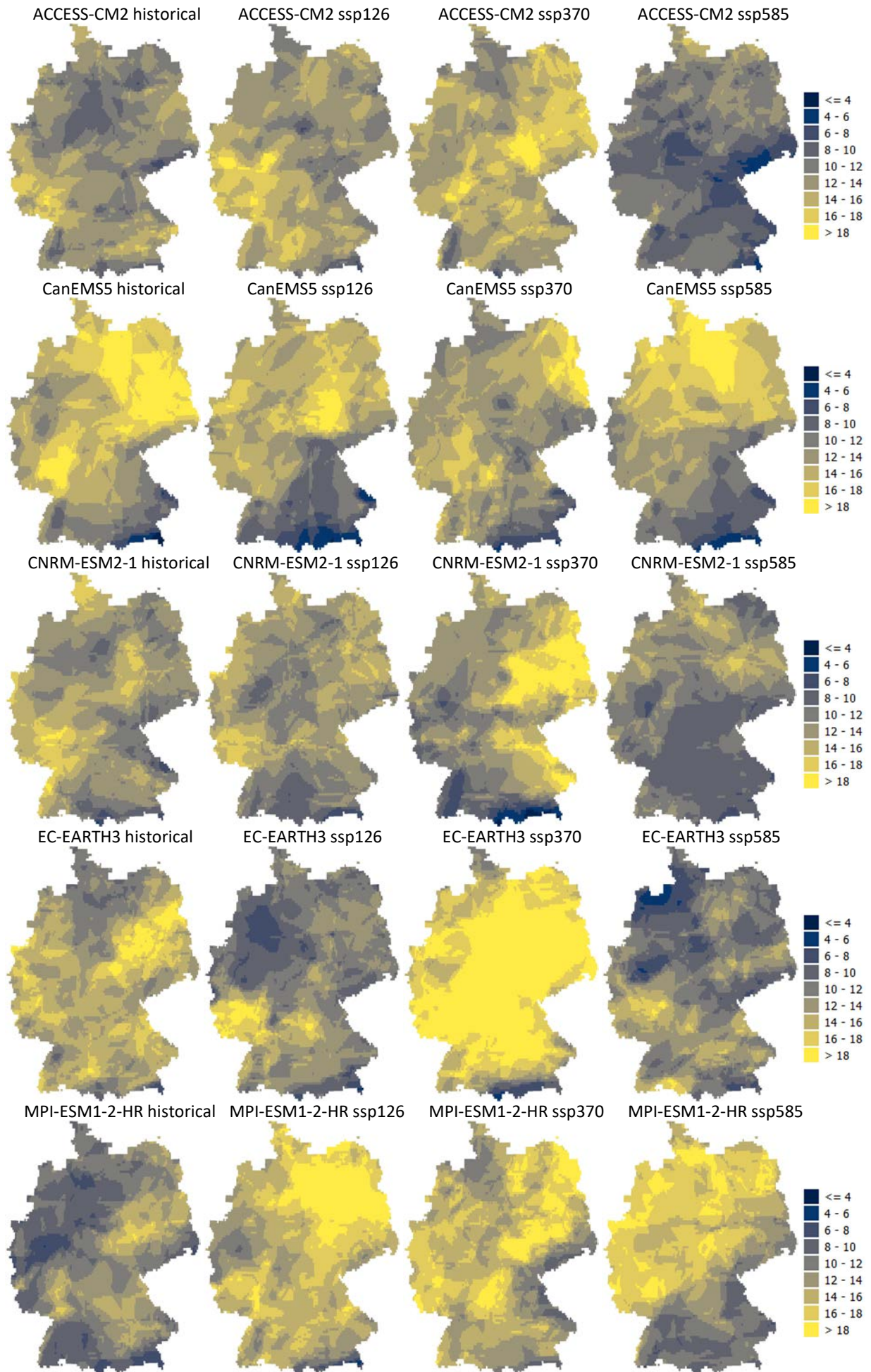
Single-Model Summe Jahresniederschlag



Single-Model Anzahl HeiBer Tage



Single-Model Anzal Trockenperioden



CMIP6 Global Climate Models (GCMs)

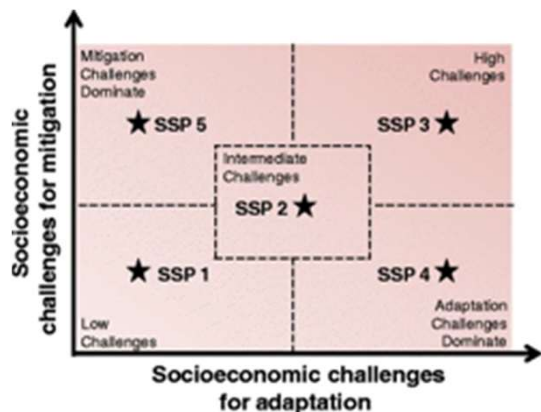
Model	Details
ACCESS-CM2	The model includes the components: aerosol: UKCA-GLOMAP-mode, atmos: MetUM-HadGEM3-GA7.1 (N96; 192 x 144 longitude/latitude; 85 levels; top-level 85 km), land: CABLE2.5, ocean: ACCESS-OM2 (GFDL-MOM5, tripolar primarily 1deg; 360 x 300 longitude/latitude; 50 levels; top grid cell 0-10 m), sealce: CICE5.1.2 (grid as ocean). The model was run in native nominal resolutions: aerosol: 250 km, atmosphere: 250 km, land: 250 km, ocean: 100 km, sealce: 100 km.
CanESM5	The model includes the components: aerosol: interactive, atmos: CanAM5 (T63L49 native atmosphere, T63 Linear Gaussian Grid; 128 x 64 longitude/latitude; 49 levels; top-level 1 hPa), atmosChem: specified oxidants for aerosols, land: CLASS3.6/CTEM1.2, landIce: specified ice sheets, ocean: NEMO3.4.1 (ORCA1 tripolar grid, 1 deg with refinement to 1/3 deg within 20 degrees of the equator; 361 x 290 longitude/latitude; 45 vertical levels; top grid cell 0-6.19 m), ocnBgchem: Canadian Model of Ocean Carbon (CMOC); NPZD ecosystem with OMIP prescribed carbonate chemistry, sealce: LIM2. The model was run in native nominal resolutions: aerosol: 500 km, atmosphere: 500 km, atmospheric chemistry: 500 km, land: 500 km, landIce: 500 km, ocean: 100 km, ocean biogeochemistry: 100 km, sealce: 100 km.
CNRM-ESM2-1	The model includes the components: aerosol: TACTIC_v2, atmos: Arpege 6.3 (T127; Gaussian Reduced with 24572 grid points in total distributed over 128 latitude circles (with 256 grid points per latitude circle between 30degN and 30degS reducing to 20 grid points per latitude circle at 88.9degN and 88.9degS); 91 levels; top-level 78.4 km), atmosChem: REPROBUS-C_v2, land: Surfex 8.0c, ocean: Nemo 3.6 (eORCA1, tripolar primarily 1deg; 362 x 294 longitude/latitude; 75 levels; top grid cell 0-1 m), ocnBgchem: Pisces 2.s, sealce: Gelato 6.1. The model was run in native nominal resolutions: aerosol: 250 km, atmos: 250 km, atmosChem: 250 km, land: 250 km, ocean: 100 km, ocnBgchem: 100 km, sealce: 100 km.
EC-Earth3	The model includes the components: atmos: IFS cy36r4 (TL255, linearly reduced Gaussian grid equivalent to 512 x 256 longitude/latitude; 91 levels; top-level 0.01 hPa), land: HTESSEL (land surface scheme built-in IFS), ocean: NEMO3.6 (ORCA1 tripolar primarily 1 deg with meridional refinement down to 1/3 degree in the tropics; 362 x 292 longitude/latitude; 75 levels; top grid cell 0-1 m), sealce: LIM3. The model was run in native nominal resolutions: atmos: 100 km, land: 100 km, ocean: 100 km, sealce: 100 km.
MPI-ESM1-2-HR	The model includes the components: aerosol: none, prescribed MACv2-SP, atmos: ECHAM6.3 (spectral T127; 384 x 192 longitude/latitude; 95 levels; top level 0.01 hPa), land: JSBACH3.20, landIce: none/prescribed, ocean: MPIOM1.63 (tripolar TP04, approximately 0.4deg; 802 x 404 longitude/latitude; 40 levels; top grid cell 0-12 m), ocnBgchem: HAMOCC6, sealce: unnamed (thermodynamic (Semtner zero-layer) dynamic (Hibler 79) sea ice model). The model was run in native nominal resolutions: aerosol: 100 km, atmosphere: 100 km, land: 100 km, ocean: 50 km, ocean biogeochemistry: 50 km, sealce: 50 km.

Quelle: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CMIP6%3A+Global+climate+projections#CMIP6:Globalclimateprojections-Grids>

CMIP6 Shared Socioeconomic Pathway (SSP) Experiments

Experiment	Extended Description
historical	The historical experiment is a simulation of the recent past from 1850 to 2014, it is performed with a coupled atmosphere-ocean general circulation model (AOGCM). In the historical simulations the model is forced with changing conditions (consistent with observations) which include atmospheric composition, land use and solar forcing. The initial conditions for the historical simulation are taken from the pre-industrial control simulation (piControl) at a point where the remaining length of the piControl is sufficient to extend beyond the period of the historical simulation to the end of any future "scenario" simulations run by the same model. The historical simulation is used to evaluate model performance against present climate and observed climate change.
SSP5-8.5	SSP5-8.5 is a scenario experiment extending into the near future from 2015 to 2100, it is performed with a coupled atmosphere-ocean general circulation model (AOGCM). The forcing for the CMIP6 SSP experiments is derived from shared socioeconomic pathways (SSPs), a set of emission scenarios driven by different socioeconomic assumptions, paired with representative concentration pathways (RCPs), global forcing pathways which lead to specific end of century radiative forcing targets. SSP5-8.5 is based on SSP5 in which climate change mitigation challenges dominate and RCP8.5, a future pathway with a radiative forcing of 8.5 W/m ² in the year 2100. The ssp585 scenario represents the high end of plausible future forcing pathways. SSP5-8.5 is comparable to the CMIP5 experiment RCP8.5.
SSP3-7.0	SSP3-7.0 is a scenario experiment extending into the near future from 2015 to 2100, it is performed with a coupled atmosphere-ocean general circulation model (AOGCM). The forcing for the CMIP6 SSP experiments is derived from shared socioeconomic pathways (SSPs), a set of emission scenarios driven by different socioeconomic assumptions, paired with representative concentration pathways (RCPs), global forcing pathways which lead to specific end of century radiative forcing targets. SSP3-7.0 is based on SSP3 in which climate change mitigation and adaptation challenges are high and RCP7.0, a future pathway with a radiative forcing of 7.0 W/m ² in the year 2100. The SSP3-7.0 scenario represents the medium to high end of plausible future forcing pathways. SSP3-7.0 fills a gap in the CMIP5 forcing pathways that is particularly important because it represents a forcing level common to several (unmitigated) SSP baseline pathways.
SSP1-2.6	SSP1-2.6 is a scenario experiment extending into the near future from 2015 to 2100, it is performed with a coupled atmosphere-ocean general circulation model (AOGCM). The forcing for the CMIP6 SSP experiments is derived from shared socioeconomic pathways (SSPs), a set of emission scenarios driven by different socioeconomic assumptions, paired with representative concentration pathways (RCPs), global forcing pathways which lead to specific end of century radiative forcing targets. SSP1-2.6 is based on SSP1 with low climate change mitigation and adaptation challenges and RCP2.6, a future pathway with a radiative forcing of 2.6 W/m ² in the year 2100. The SSP1-2.6 scenario represents the low end of plausible future forcing pathways. SSP1-2.6 depicts a "best case" future from a sustainability perspective.

Quelle: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CMIP6%3A+Global+climate+projections#CMIP6:Globalclimateprojections-Grids>



The socioeconomic "Challenge Space" to be spanned by the CMIP6 SSP experiments (O'Neil et al. 2014).
https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CMIP6%3A+Global+climate+projections?preview=/208492026/208502234/image2020-11-30_18-47-7.png