

9 Fortschreibung der Klimafolgenforschung

Hans Hamkens, Johannes Suttmöller

9.1 ReKliEs-De-Kernensemble

Im Rahmen des ReKliEs-De-Projektvorhabens (*Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland*) wurden erstmalig für Deutschland und die großen nach Deutschland entwässernden Flüsse belastbare Klimaprojektionen mit einer hohen regionalen räumlichen Auflösung bereitgestellt. Die Datenbasis ergänzt die Ergebnisse des europäischen Klimaforschungsprojektes EURO-CORDEX. Damit stehen umfassende Ensembles regionaler Klimaprojektionen der aktuellen RCP-Klimaszenarien (*Representative Concentration Pathway*) des IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) zur Verfügung (HÜBENER et al. 2017), die als Entscheidungsgrundlage für die Klimafolgenforschung und mögliche Anpassungsmaßnahmen genutzt werden können.

Die Daten wurden für verschiedene Klimavariablen nach einen einheitlichen Format ausgewertet und aufbereitet. Aus dem Gesamtensemble mit 26 verschiedenen Modellkombinationen für das RCP8.5-Klimaszenario (*Weiter-wie-bisher-Szenario*) wurde für Anwender von Wirkmodellen im Rahmen des Bund-Länder-Fachgespräches ein sogenanntes Kernensemble ausgewählt, das nach vorgegeben Qualitätskriterien die Bandbreite des Gesamtensembles repräsentiert (DALELANE et al. 2018). Das Kernensemble umfasst 7 Klimaläufe des RCP8.5-Klimaszenarios und besteht aus 5 Simulationen mit dynamischen Regionalmodellen und 2 Simulationen mit einem statistischen Regionalmodell.

Für die Jahresmitteltemperatur zeigen alle Modellergebnisse einen einheitlichen Trend zu einer deutlichen Temperaturerhöhung zum Ende des Jahrhunderts im Flächenmittel von Deutschland (s. Abb. 53). Im Vergleich zum Mittelwert der Periode 1971 bis 2000 wird die Jahresmitteltemperatur in der Periode 2071 bis 2100 um 2.8 K bis 4.7 K ansteigen. Die stärkste Erwärmung wird in den 2 Simulationen mit dem statistischen Modell WETTREG2013 berechnet. Weiterhin wird erwartet, dass beim RCP8.5-Szenario die Intensität und Andauer von Witterungsextremen wie Starkregen, Hitze- und Trockenperiode sowie Dürren deutlich zunehmen wird.

Bei den Niederschlägen zeigen die Modellergebnisse bei den Jahressummen keinen einheitlichen Trend (s. Abb. 53). Während einige Modelle im dreißigjährigen Mittel bis zum Ende des Jahrhunderts eine leichte Zunahme von bis zu 10 % erwarten lassen, berechnet ein Teil der Modelle langfristig im Flächenmittel von Deutschland eine leichte Abnahme von bis zu 10 % der Jahresniederschlagssumme im Vergleich zur Periode 1971 bis 2000. Zwischen den Jahreszeiten kommt es nach den Modellergebnissen jedoch zu deutlichen Verschiebungen. Nach den meisten

Simulationen muss in den Wintermonaten mit einer signifikanten Erhöhung der Niederschläge gerechnet werden. Im Sommer wird es dagegen trockener und infolge der höheren Temperaturen steigt auch der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre erheblich an. Erste Auswertungen zur Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationszeit (KWB_{VZ}) zeigen für Sachsen-Anhalt eine Abnahme bis zum Ende des Jahrhunderts um bis zu 250 mm. Die KWB_{VZ} wird im dreißigjährigen Flächenmittel von Sachsen-Anhalt von derzeit rund -200 mm auf rund -450 mm im pessimistischsten Klimalauf abnehmen.

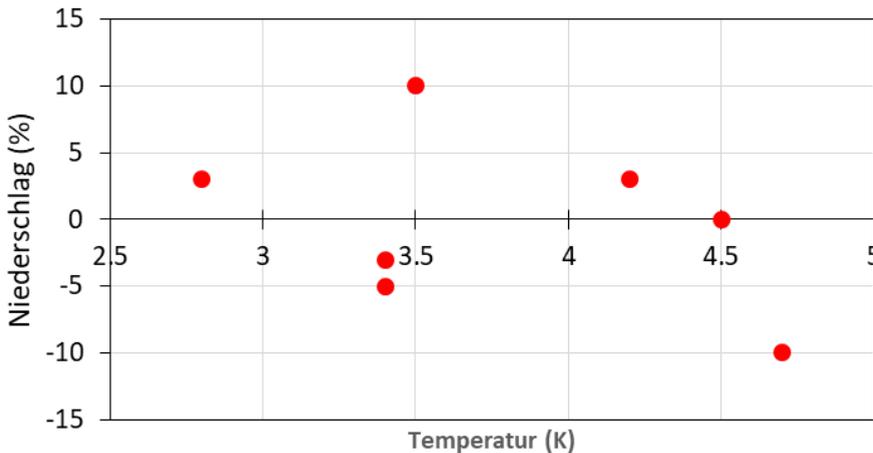


Abbildung 53: Änderungssignale Temperatur und Niederschlag für das ReKliEs-De-Kernensemble für Deutschland; 2071 bis 2100 versus 1971 bis 2000 (Jahreswerte)

9.2 Anpassung des waldbaulichen Entscheidungsalgorithmus

Die neueren Entwicklungen der Klimafolgenforschung in Deutschland (s. Kap. 9.1) machen eine Anpassung des waldbaulichen Entscheidungsalgorithmus *baklava* (s. Kap. 4.3) notwendig. Da die bisherige klimaangepasste Baumartenempfehlung einzig auf dem regionalisierten STARS II-Modell mit dem Globalmodell ECHAM6 beruht, wurde der Fokus der Weiterentwicklung des Algorithmus auf die Einbindung von Ensembles regionaler Klimaprojektionen gelegt. Explizit ist hier das ReKliEs-De-Kernensemble des vorhergehenden Abschnitts gemeint, welches sieben Klimamodelle beinhaltet. Die Herausforderung bestand dabei auf den Verzicht der Bildung von Mittelwert oder Median und einer daraus abgeleiteten Baumartenempfehlung, da die Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Klimamodelle als gleich anzusehen ist. Die Nutzung von Lageparametern würde diese Aussage verwischen.

In der Weiterentwicklung von *baklava* wird daher für jede Klimaprojektion des Ensembles eine eigene Baumartenempfehlung berechnet. Durch Bildung von absoluten Häufigkeiten (H_7) für die jeweiligen Mischbestandstypen kann somit über die

gesamte Bandbreite des Ensembles die Empfehlung mit Robustheitsgraden angegeben werden. Vereinfacht gesagt bedeutet dies, dass je höher der Robustheitsgrad ist, desto mehr Klimamodelle empfehlen einen bestimmten Mischbestandstyp.

Für eine übersichtliche und nachvollziehbare Darstellung der Robustheitsgrade wurden diese in vier Gruppen unterteilt (s. Tab. 29). Die Schwellenwerte der jeweiligen Gruppen wurden auf Basis der Zusammensetzung des ReKliEs-De-Kernensembles getätigt, um die darin enthaltenen Modellfamilien (statistisch oder dynamisch) angemessen berücksichtigen zu können. Wie bereits in Kapitel 9.2 beschrieben, besteht das Kernensemble aus sieben Klimäläufen mit zwei statistischen und fünf dynamischen Regionalmodellen, wobei die statistischen Regionalmodelle grundsätzlich zu einer pessimistischeren Einschätzung des Klimas kommen. Eine *sehr klimarobuste* Baumartenempfehlung mit einer absoluten Häufigkeit ≥ 6 beinhaltet somit immer mindestens ein statistisches Modell, während dies bei der *klimarobusten* und *bedingt klimarobusten* Empfehlung nicht zwingend der Fall ist. Bei einer absoluten Häufigkeit von ≤ 2 wird die Robustheit als zu gering angesehen, um sie in eine Empfehlung aufnehmen zu können.

Tabelle 29: Schwellenwerte der Robustheitsgrade zur Diskretisierung von absoluten Häufigkeiten

Robustheitsgrad	Schwellenwerte von H_7
sehr klimarobust	≥ 6
klimarobust	$= 5$
bedingt klimarobust	$\geq 3 \ \& \ \leq 4$
ausgeschlossen	≤ 2

Es muss darüber hinaus beachtet werden, dass die Mischbestandstypen in den meisten Fällen durch Alternativen in der Zusammensetzung geprägt sind. Ein BZT 32 kann beispielsweise entweder mit der Buche oder mit den Alternativen Roteiche, Winterlinde und Hainbuche empfohlen werden. Jede dieser Baumarten hat jedoch eine eigene Einordnung des Trockenstressrisikos. Das hat zur Folge das eindeutige Baumartenkombinationen innerhalb der Mischbestandstypen unterschiedliche Robustheitsgrade aufweisen können. Für den Wissenstransfer ist daher eine Anpassung der verschiedenen Anwendungen (s. Kap. 6) notwendig.

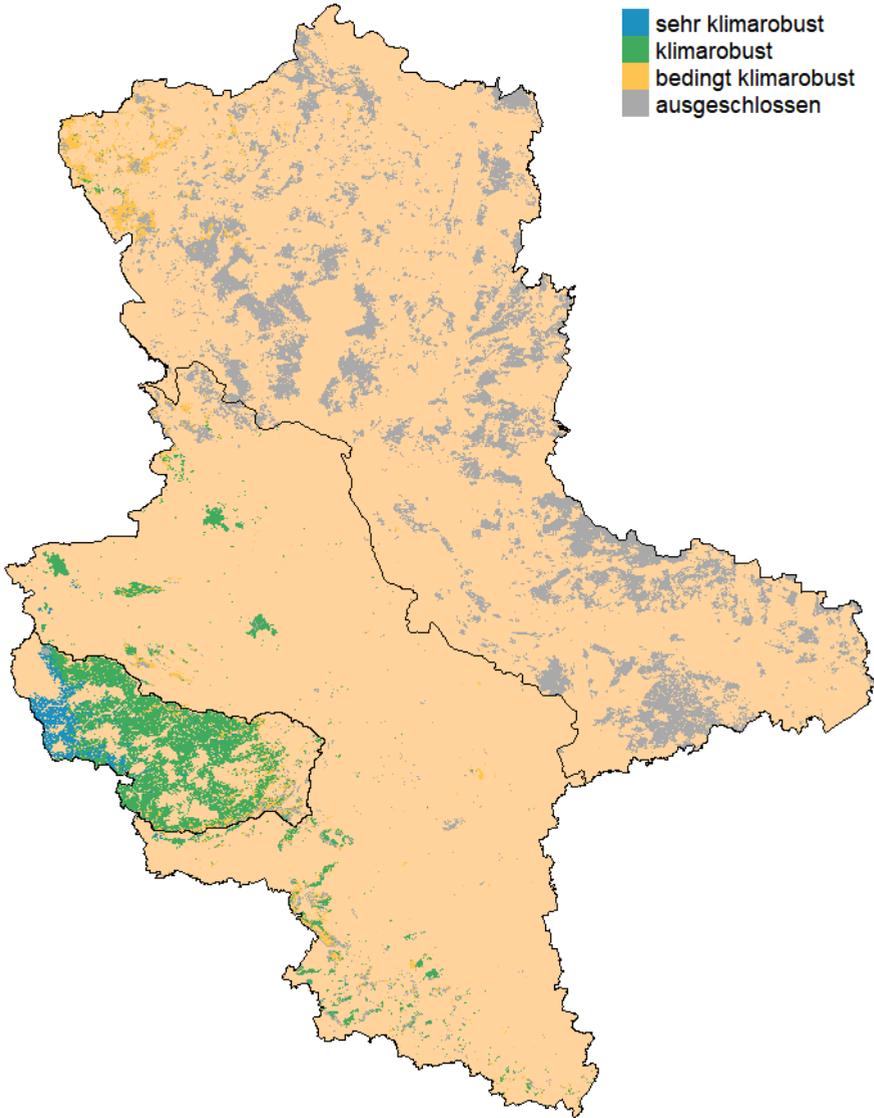


Abbildung 54: Karte der Robustheitsgrade des ReKliEs-De-Kernensembles für den BZT 50 (Buche) in Sachsen-Anhalt

Einen beispielhaften Überblick der Anwendung von *baklava* mit der Berücksichtigung von Klimaensembles wird in Abbildung 54 für den BZT 50 (Buche) dargestellt. Da die anderen Buchen-BZT den gleichen Planungsbereich in Abhängigkeit von Trophie und Standortwasserbilanz haben, kann daraus die Robustheit von Standorten mit führender Buche abgelesen werden. Nicht daraus ablesbar sind Standorte

mit der Buchenempfehlung als Misch- oder Begleitbaumart. Grundsätzlich lässt sich im Vergleich zur Empfehlung gemäß dem Klimamodell ECHAM6/STARS II (s. Abb. 27) ein größeres Flächenpotenzial für führende Buche ablesen. Bezogen auf die Robustheit zeigt sich aber auch hier ein deutlicher Abwärtstrend von den höheren Lagen bis ins Tiefland ab. Im Bereich des bisherigen feuchten Tieflandes im Nordwesten des Landes hat die Empfehlung von Buchen-BZT nur noch eine bedingte Robustheit vorzuweisen. Dementsprechend hoch ist das Risiko auf solchen Standorten einzuschätzen.

Der hier vorgestellte Ansatz beseitigt weitestgehend das Problem scharfer räumlicher Übergänge von Baumartenempfehlungen auf kleinstem Raum. Diese kamen bisher in Gebieten vor, in denen sich die Standortwasserbilanz (gemäß ECHAM6/STARS II) um die Schwellenwerte des Trockenstressrisikos (s. Tab. 6) bewegt. Die Nutzung von Ensembles bietet nun eine räumliche Verdichtung von klimasensitiven Informationen. Dadurch ist es entsprechend der Robustheitsgrade möglich eine Reihenfolge von BZT-Empfehlungen auf einem Standort zu geben, um eine strategische Priorisierung zu unterstützen. Die Einschätzung des Trockenstressrisikos ist allerdings nur ein Indikator von vielen, der in der waldbaulichen Realität die Baumartenwahl beeinflusst. Für eine verbesserte Baumartenempfehlung ist deshalb die Einbindung weiterer Indikatoren geplant. Als nächster Schritt hierfür ist eine Anpassung des Algorithmus an ein multikriterielles Entscheidungsmodell notwendig.

Ein weiterer Vorteil der Nutzung von Klimaensembles ist die hohe Anpassungsfähigkeit des Algorithmus an neue Modellgenerationen der Klimafolgenforschung. Nach Bereitstellung und Regionalisierung neuer Ensembles wird lediglich eine Neu-einschätzung der Robustheitsgrade notwendig, um *baklawa* anwenden zu können. Damit ist die methodische Grundlage für eine schnelle Anpassung der klimasensitiven Baumartenempfehlung an der NW-FVA grundsätzlich gegeben. Ein kurzer Überblick zum aktuellsten Sachstandsbericht und der darin verwendeten Modellgeneration wird im nächsten Kapitel kurz umrissen.

9.3 IPCC-Bericht 2021

Im Jahr 2021 wurde der erste Teil des Sechsten Sachstandsberichtes des IPCC der Öffentlichkeit vorgestellt (IPCC 2021). Der Bericht der Arbeitsgruppe I befasst sich mit dem aktuellen Kenntnisstand zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. In dem Bericht werden die Ursachen und Folgen der beobachteten Klimaveränderung dokumentiert. Demnach ist es wissenschaftlich erwiesen, dass infolge der menschlichen Aktivitäten der globale Temperaturanstieg im Vergleich zur vorindustriellen Zeit bereits rund 1 K beträgt. Ursache sind die anthropogenen Treibhausgasemissionen. So ist die CO₂-Konzentration seit Ende des 19. Jahrhunderts von rund 300 ppm auf mittlerweile 420 ppm (Stand 2022) angestiegen. Die aktuellen Forschungsergebnisse belegen, dass infolge der menschlichen Emissionen

die globale Oberflächentemperatur um rund 0,2 K pro Jahrzehnt zunimmt. Die globale Erwärmung wird unter den getroffenen Annahmen zur Emissionsentwicklung bis spätestens zum Jahr 2050 das 1,5 °C-Ziel des Pariser Klimaabkommens überschreiten. Die beobachtete Zunahme extremer Witterungsereignisse wie Starkregen und Dürren können ebenfalls mit einer hohen Wahrscheinlichkeit auf die erhöhten Treibhausgasemissionen zurückgeführt werden.

Im sechsten Sachstandsbericht werden fünf Hauptemissionsszenarien betrachtet, die unterschiedliche Treibhausgas- und Landnutzungspfade beschreiben. Diese Projektionen weisen auf mögliche zukünftige Entwicklungspfade hin und dienen als Antrieb für globale Klimamodelle. Die neue Generation von Szenarien lehnt sich an die RCP-Emissionspfade (*Representative Concentration Pathways*, s. Kap. 3.3.2) an. Entsprechend wurde die Bezeichnung der SSP-Szenarien (*Shared Socioeconomic Pathways*) für den zusätzlichen Strahlungsantrieb aus der Vorgängergeneration übernommen. Das RCP2.6-Szenario (2 °C-Ziel) ist mit dem neuen SSP1-2.6 zu vergleichen. Die SSP-Szenarien stellen die sozioökonomischen Veränderungen in den Mittelpunkt der Betrachtungen. Dabei wird für jeden Emissionspfad ein Budget von zukünftigen Treibhausgasemissionen geschätzt, die im aktuellen CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*, EYRING et al. 2016) verwendet werden.

Die Projektionen beginnen im Jahr 2015 und schreiben die Emissionsentwicklung bis zum Jahr 2100 fort. Bei den Szenarien mit hohen bis sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP3-7.0 und SSP5-8.5) wird es zur keiner Reduktion der Emissionen kommen. Im Gegenteil ist bis zum Jahr 2050 (SSP5-8.5) bzw. 2100 (SSP3-7.0) mit einer Verdoppelung der Treibhausgasemissionen zu rechnen. Beim mittleren Szenario SSP2-4.5 verbleiben die Emissionen in etwa auf dem heutigen Niveau und nehmen ab dem Jahr 2050 langsam ab. Die niedrigen bis sehr niedrigen Szenarien (SSP1-2.6 und SSP1-1.9) verfügen nur noch über ein geringes Restbudget an Emissionen. In beiden Szenarien würde der Treibhausgasausstoß bis zum Jahr 2050 auf null reduziert. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts wären dann negative Netto-Emissionen auf unterschiedlichen Niveaus notwendig, um den Erwärmungstrend zu stoppen bzw. eine Abnahme der globalen Erdoberflächentemperatur zu bewirken.

Die globale Erwärmung würde bei allen Szenarien zunächst ähnlich verlaufen. In der nahen Zukunft (2021 bis 2040) liegt der beste Schätzwert der Temperaturzunahme bei 1,5 K im Vergleich zur vorindustriellen Zeit. Mittelfristig (2041 bis 2060) würde die Erwärmung zwischen 1,6 K (SSP1-1.9) und 2,4 K (SSP5-8.5) betragen. Zum Ende des Jahrhunderts (2081 bis 2100) würde die globale Mitteltemperatur um 1,4 K (SSP1-1.9) bis 4,4 K (SSP5-8.5) über dem Wert der vorindustriellen Zeit liegen (s. Abb. 55, IPCC 2021). Da die Bandbreite in jedem Szenario relativ groß ist, könnte im ungünstigsten Fall sogar eine noch stärkere Temperaturzunahme im globalen Mittel eintreten. Da sich die Landmassen deutlich stärker im Vergleich zu den Ozeanen erwärmen, wäre die Erwärmung in Mitteleuropa deutlich höher als dies durch die Mittelwerte induziert wird.

In Abhängigkeit vom Entwicklungspfad, den die Menschheit einschlagen wird, ist aufgrund der bereits beobachteten Klimaveränderung mit hohen Anpassungsanforderungen zu rechnen. Sollten die pessimistischen Szenarien (SSP3-7.0, SSP5-8.5) eintreten, würde in weiten Teilen der Erde eine Anpassung nicht oder nur eingeschränkt möglich sein. Welcher Entwicklungspfad wahrscheinlich ist, wird in der wissenschaftlichen Community kontrovers diskutiert. Im Kontext der Risikovor-sorge und der aktuellen Emissionsentwicklung ist die Forstwirtschaft jedoch gut beraten, sich an den pessimistischen Szenarien zu orientieren.

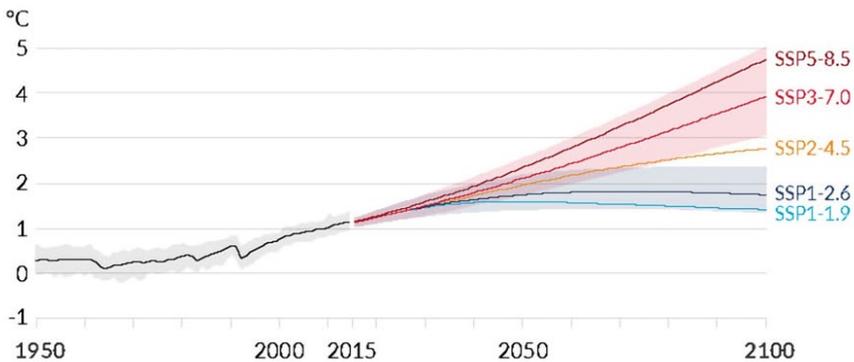


Abbildung 55: Globale Erwärmung für die neuen SSP-Haupt-szenarien (IPCC 2021)