

J. SUTMÖLLER, E. SCHÖNFELDER, H. MEESENBURG

7 Perspektiven der Anwendung von Klimaprojektionen in der Forstwirtschaft

Perspectives of applying projections of climate change in forestry

Zusammenfassung

Der Klimawandel betrifft die Forstwirtschaft in vielfältiger Weise. Bis zum Ende des Jahrhunderts ist nach den Klimaprojektionen mit einer deutlichen Temperaturzunahme und veränderten Niederschlagsverteilung zu rechnen. Die Andauer und Intensität von Trockenperioden werden zunehmen. Die Jahre 2018 und 2019 haben gezeigt, dass aufeinanderfolgende Trockenjahre zu einer starken Zunahme biotisch und abiotisch bedingter Waldschäden führen können. Um die Ergebnisse der Klimamodelle für forstliche Fragestellungen zu nutzen, ist es notwendig, ein Downscaling der Modellergebnisse durchzuführen. Mithilfe des *Quantil Mapping (QM)* werden die Rasterdaten der Klimaszenarien auf ausgewählte Stationen des Deutschen Wetterdienstes angepasst. Das Verfahren erzeugt kontinuierliche Zeitreihen für verschiedene Klimavariablen in täglicher Auflösung. In diesem Beitrag wird das Verfahren vorgestellt und die Nutzung der Klimadaten für forstliche Fragestellungen in Nordwestdeutschland anhand ausgewählter Beispiele dargestellt.

Summary

Climate change affects forestry in manifold ways. According to climate projections, a significant increase in temperature and a change in precipitation seasonality can be expected by the end of the century. The duration and intensity of drought periods will increase. The years 2018 and 2019 demonstrated that consecutive drought years can severely increase biotic and abiotic damage to forest ecosystems. The use of the results of climate models for forestry issues requires downscaling. Raster data of the climate scenarios are adapted to selected climate stations of the German Weather Service using *quantile mapping (QM)*. The method generates transient time series of various climate variables in daily resolution. A brief description of the method is followed by a presentation of selected examples on the use of climate data for forest management in Northwest Germany.

1 Einleitung

Das Jahr 2018 war in Deutschland das wärmste Jahr seit Beginn der regelmäßigen Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881. Gleichzeitig zählt 2018 zu den niederschlagsärmsten Jahren seit Messbeginn. Die Serie zu warmer und zu trockener Monate setzte sich auch in den Jahren 2019 und 2020 fort. Viele Böden in Nordwestdeutschland waren zu Beginn der Vegetationsperiode 2019 nur unzureichend mit Wasser gefüllt (SUTMÖLLER et al. 2019), so dass die Bäume bereits frühzeitig unter Wassermangel litten. Infolge der sichtbaren Schäden wird der Waldzustand im Kontext der Klimaerwärmung auch in der Öffentlichkeit kontrovers diskutiert. Neben den direkten Folgen der Trockenheit sind die geschwächten Bäume anfälliger für biotische Schäden

(z. B. Borkenkäferbefall) und Stürme. Die Forstwirtschaft in Deutschland ist von einer Vielzahl an Waldschäden betroffen, deren Ursache unter anderem in der rasant voranschreitenden Klimaänderung begründet ist.

Die Jahre 2018 und 2019 können als Blaupause für ein zukünftiges Klima in Deutschland dienen. Nach den aktuellen Klimaprojektionen werden in Zukunft die Andauer und Intensität von Trockenperioden zunehmen. Für die Forstwirtschaft mit ihren langen Produktionszeiträumen von 100 und mehr Jahren stellen Klimaprojektionen ein wichtiges Planungsinstrument dar, um auf abgesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen Anpassungsstrategien zu entwickeln, die die Ökosystemleistungen der Wälder sichern können.

Auf Grundlage des ReKliEs-De-Projektvorhabens (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland) stehen erstmals für Deutschland umfassende Ensembles regionaler Klimaprojektionen der aktuellen RCP-Klimaszenarien (*Representative Concentration Pathway*) des IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) in einer hohen räumlichen Auflösung zur Verfügung (HÜBENER et al. 2017). Die Daten wurden für verschiedene Klimavariablen nach einem 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 Kern-Ensemble ausgewählt, das nach vorgegebenen Qualitätskriterien die Bandbreite des Gesamtensembles repräsentiert (Tab. 7-1, DALELANE et al. 2018). Für das Klimaszenario RCP2.6 („Klimaschutz-Szenario“), das annähernd die Vorgaben des Pariser Klimaschutzabkommens abbildet, liegen für fünf der acht Modellsimulationen des RCP8.5-Kern-Ensembles Ergebnisse vor (Tab. 7-1).

Die Ergebnisse des RCP8.5-Ensembles werden herangezogen, da dieses „Weiter-wie-bisher-Szenario“ auch aufgrund der aktuellen Emissionsentwicklung die maximalen Anpassungserfordernisse für die forstliche Planung bedingt. Um Entscheidungsträgern aus der Forstplanung und der Politik jedoch auch die Auswirkungen des Klimawandels und die dabei notwendigen Anpassungsmaßnahmen bei Erreichen des 2-Grad-Ziels zu verdeutlichen, wird an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) auch das RCP2.6-Szenario in den Auswertungen berücksichtigt. Ziel ist es, den Entscheidungsträgern zu verdeutlichen, welche Schäden vermieden werden können, wenn das „Klimaschutz-Szenario“ eingehalten wird.

Tab.: 7-1: Für das Kern-Ensemble des Bund-Länder-Gespräches ausgewertete Simulationen des ReKliEs-De-Ensembles.

Modell (GCM_RCM_Szenario*)	RCP8.5	RCP2.6
E12_RAC_RXX	X	X
MI5_CLM_RXX	X	X
HG2_WRF_RXX	X	-
MP1_CLM_RXX	X	X
MP1_WRF_RXX	X	X
HG2_W13_RXX	X	-
MP1_W13_RXX	X	X

*GCM = General Circulation Model (Global Climate Model), RCM = Regional Climate Model

2 Quantile Mapping – eine Methode zur Biaskorrektur und zum Downscaling von Klimaprojektionsdaten

Im Rahmen des ReKliEs-De-Projektvorhabens erfolgten Klimasimulationen einheitlich auf einem Modellgitter mit einer räumlichen Auflösung von 0,11° (ca. 12 km). Diese decken die großen Flussgebiete Deutschlands lückenlos ab (HÜBENER et al. 2017). Die Modelldaten umfassen sowohl die Vergangenheit (ab 1951) und projizieren gleichzeitig mögliche Klimaverläufe bis zum Jahr 2100, sodass für jeden Modelllauf eine kontinuierliche Zeitreihe in täglicher Auflösung vorliegt. Die Modelldatenauflösung ist für forstliche Planungen allerdings nicht ausreichend, sodass ein Verfahren gefunden werden musste, um die Projektionen mit einer deutlich höheren räumlichen Auflösung abzubilden. An der NW-FVA wurden dazu mithilfe des *Quantile Mapping*-Verfahrens die Modelldatenergebnisse auf Gitterbasis an ausgewählte Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) angepasst (FEIGENWINTER et al. 2018). Die so erzeugten Zeitreihen an den Klimastationen können in einem zweiten Schritt mittels Regionalisierungsverfahren an beliebige Punkte und in beliebige Rasterweiten interpoliert werden.

2.1 Methodik

Das verwendete Verfahren des *Quantile Mapping* (QM) erlaubt es, aus den Klimamodellwerten plausible Schätzwerte für die DWD-Stationen abzuleiten (FEIGENWINTER et al. 2018). Ausgangspunkt des QM-Verfahrens ist eine Kalibrierungsperiode, in welcher sowohl tägliche Beobachtungen, als auch tägliche Modellwerte vorliegen. Hier hat sich ein Zeitraum von mindestens 30 Jahren als ausreichend für eine stabile Schätzung erwiesen, wobei mindestens 25 Jahre mit Messwerten belegt sein müssen. Für jeden Tag eines Jahres werden kumulative Verteilungen sowohl der Messwerte als auch der Modellwerte berechnet (Abb. 7-1). Die Berechnung erfolgt in diskretisierter Form als Perzentile zwischen 0 und 1 mit einem Abstand von 0,01. Zusätzlich werden für jeden Tag neben den entsprechenden Tageswerten auch die Werte der benachbarten 30 Tage herangezogen (je 15 Tage vor und nach dem Termin).

Für jeden Tag des Jahres können aus projizierten Modellwerten zukünftige Werte an den einzelnen DWD-Stationen aus der Differenz der Verteilungen geschätzt werden. Dazu wird aus dem projizierten Modellwert für einen bestimmten Tag des Prognosebereiches der zugehörige Perzentilwert der kumulativen Verteilung des Kalibrierungsbereiches für diesen Tag berechnet und die Differenz zur Verteilungsfunktion der Messwerte addiert (Abb. 7-1). Das Fehlen einzelner Tagesmesswerte ist relativ unschädlich für das Verfahren, da die Perzentile der Verteilung davon nur wenig beeinflusst werden. Größere Ungenauigkeiten bei der Prognose sind zu erwarten, wenn die prognostizierten Modellwerte in die extremen Randbereiche der Verteilungsfunktion des Kalibrierungsbereiches fallen. Hier wäre zu überlegen, den Kalibrierzeitraum zu erweitern bzw. die Anzahl der benachbarten Tageswerte

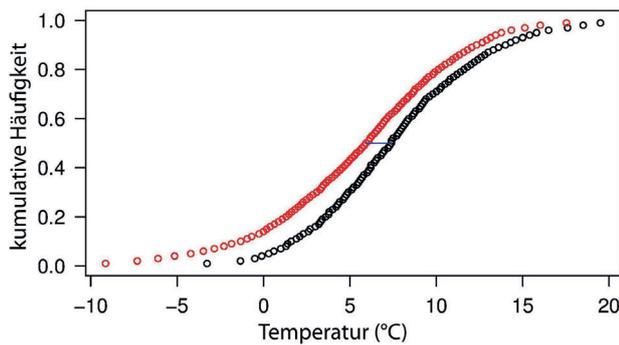


Abb. 7-1: Kumulative Verteilungen der Lufttemperatur anhand der Perzentile für einen beliebigen Tag (rot=Modellwerte, schwarz=Messwerte, blau=Differenz der Mediane).

zu erhöhen, um den Definitionsbereich dieser Verteilung zu vergrößern.

Die gesamten Rechnungen, das Bearbeiten der Klimadateien und die Transformation der Modellwerte auf die DWD-Messstationen erfolgt in der Statistikumgebung R. Die Klimadateien wurden mit der Library „ncdf.tools“ verarbeitet. Die Berechnungen mit den Modellwerten erfolgt mit der noch unveröffentlichten Library, die im Rahmen der neuen Schweizer Klimaszenarien CH2018 entwickelt wurde.

2.2 Ergebnisse der Modellkalibrierung / -validierung

Die Modellkalibrierung erfolgte für den Zeitraum von 1971 bis 2000. Entsprechend der Vorgabe zur Mindestanzahl von Beobachtungsdaten liegen deutschlandweit für den Kalibrierzeitraum Daten des DWD von 4185 Niederschlagsstationen sowie Zeitreihen für die Temperatur an 489 Stationen, die relative Feuchte an 375 Stationen, die Sonnenscheindauer an 272 Stationen und die Windgeschwindigkeit an 242 Stationen vor (in den Zeitreihen wurden teilweise Lücken gefüllt). Für die Güte der Anpassung wurden das Bestimmtheitsmaß und die Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) herangezogen. Die Gütemaße beziehen sich jeweils auf das dreißigjährige Jahresmittel sowie auf die Mittelwerte der Quartale (Jahreszeiten). Dabei zeigte sich, dass das Bestimmtheitsmaß und die NSE für die Jahresmitteltemperatur und die mittlere Jahresniederschlagssumme eine sehr hohe Anpassungsgüte in der Kalibrierperiode von mehr als 0,99 erzielen, wobei Werte von 1.0 vollständige Übereinstimmung bedeuten würden. Für die Mittelwerte der Quartale liegt die Übereinstimmung in der Kalibrierperiode bei mehr als 0,95. Auch für die übrigen Klimavariablen ergibt sich für die Kalibrierperiode eine sehr gute Anpassung, wobei für einzelne Quartale insbesondere bei der relativen Feuchte die NSE auch weniger als 0,80 beträgt. Für den Validierungszeitraum von 1951 bis 1980 ergibt sich für die meisten Modellsimulationen bei allen Klimavariablen eine erwartungsgemäß geringere, jedoch ebenfalls noch hohe Modellgüte von mehr als 0,90. Die Bandbreite der Abweichung für die Jahresmitteltemperatur ist in der Kalibrierperiode für alle Modellsimulati-

onen an den Stationen des DWD sehr gering. An den meisten Stationen liegt die Abweichung bei $\pm 0,1$ K (Abb. 7-2, oben links). In der Validierungsperiode 1951 bis 1980 sind die Abweichungen etwas größer und betragen bezogen auf die Jahresmitteltemperatur maximal $-1,0$ K bis $+1,0$ K. Die Quartil-Werte (Wertebereich zwischen 25 und 75 %-Quartil) schwanken dabei lediglich um $0,2$ K (Abb. 7-2, oben rechts). Die Streuung der Quartile und der *Whisker* (Min-, Max-Werte) ist bei allen Modellläufen ähnlich. Die korrigierten mittleren Niederschlagssummen zeigen für die Kalibrierperiode eine geringe Abweichung von rund ± 10 % im Vergleich zu den Stationsmesswerten (Abb. 7-2, unten links). Für die Periode 1951 bis 1980 sind die berechneten Abweichungen mit ± 30 % größer (Abb. 7-2, unten rechts).

Das QM-Verfahren zeigt für die Mitteltemperaturen und die mittleren Niederschlagssummen eine sehr gute Anpassung der Modellwerte an die Messwerte der DWD-Stationen. Die für die Kalibrierperiode gefundenen Regressionsbeziehungen liefern auch für die Periode 1951 bis 1980 gute Ergebnisse. Die etwas stärkere Streuung ergibt sich aus dem Fehler der Modellsimulationen der Regionalmodelle für die Validierungsperiode. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das verwendete Downscaling- und Biaskorrekturverfahren sehr robust ist und damit auf den Projektionszeitraum bis 2100 fortgeschrieben werden kann. Für jeden Klimaparameter einer Modellsimulation steht somit eine kontinuierliche Zeitreihe von 1951 bis 2100 zur Verfügung. Eine Ausnahme bildet das Regionalmodell WRF, dessen Simulation erst im Jahr 1970 startet.

2.3 Interpolation von Stationsdaten

Um Aussagen für bestimmte Standorte beziehungsweise für die Planungseinheiten der Forstwirtschaft treffen zu können, ist es notwendig, die Stationsdaten in die Fläche zu interpolieren. Hierzu wurden verschiedenen Verfahren getestet und mittels Gütekriterien überprüft. Der Methodenvergleich ergab, dass in Abhängigkeit des untersuchten Klimaparameters verschiedene Interpolationsverfahren die beste Anpassung erzielten (AHRENDTS et al. 2018). Das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH hat umfangreiche Verfahren zur Interpolation von meteorologischen Antriebsdaten implementiert. Für die Klimavariablen Temperatur und Niederschlag zeigte das kombinierte Verfahren aus *Inverse Distance Weighting* (IDW) und Höhenregression eine hohe Anpassungsgüte an unabhängige Messdaten von Intensivmessflächen in Nordwestdeutschland. Auch die räumliche Interpolation auf verschiedene Rasterweiten (1 km bis 200 m räumliche Auflösung) zeigte plausible Ergebnisse. Mit den erprobten Regionalisierungsverfahren ist es möglich, die räumliche Verteilung ausgewählter Klimavariablen und abgeleiteter Indikatoren zu schätzen.

3 Nutzung von Klimaprojektionsdaten für die Forstpraxis

Bereits in der Vergangenheit wurden an der NW-FVA die Ergebnisse von Klimaszenarien genutzt, um das zukünf-

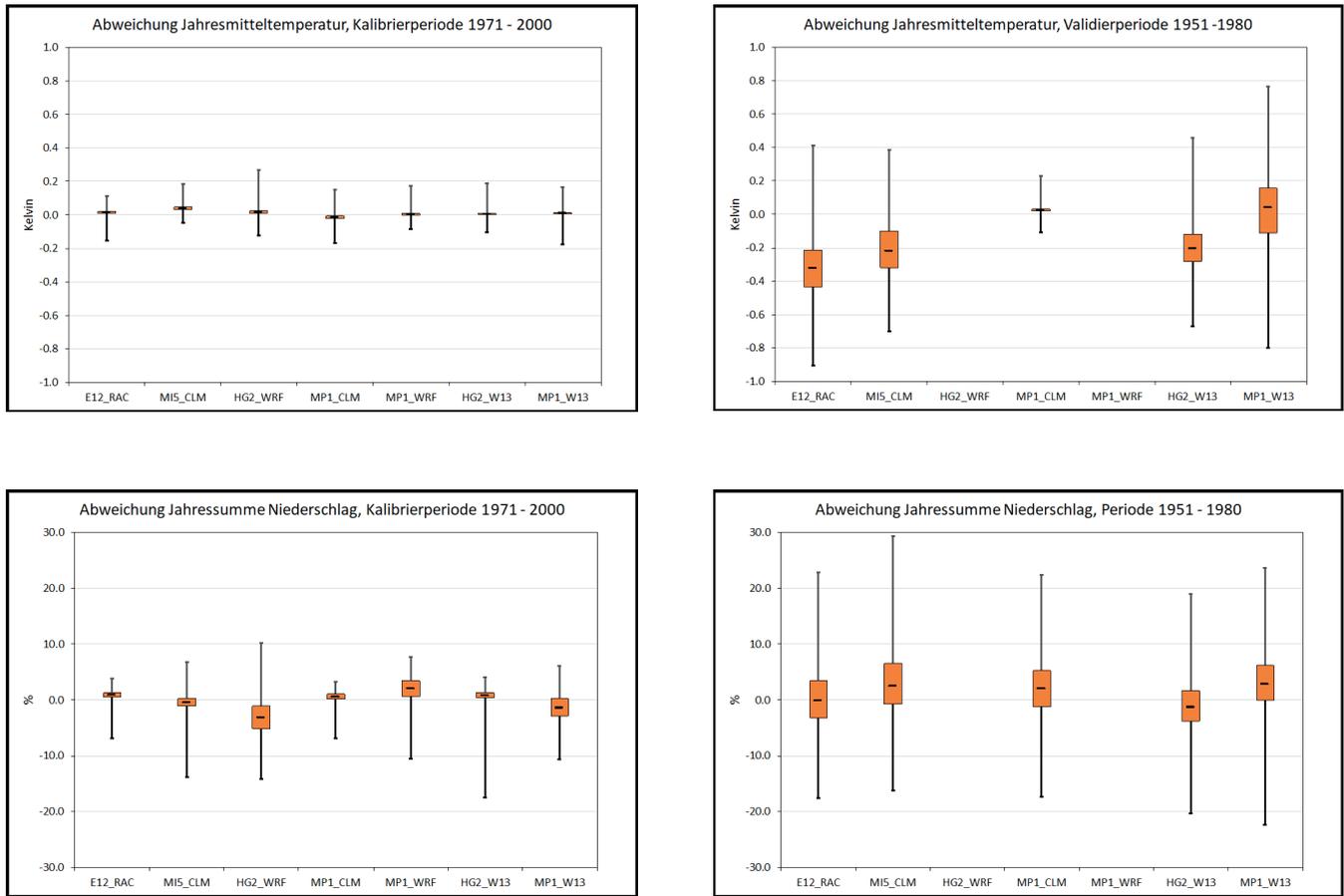


Abb. 7-2: Abweichungen zwischen beobachteter und mithilfe des *Quantile Mapping*-Verfahrens simulierter Jahresmitteltemperatur (oben) und Jahressumme des Niederschlags (unten) an den Stationen des DWD für die Projektionen des Kern-Ensembles, Periode 1971 – 2000 (links), Periode 1951 – 1980 (rechts). Die senkrechten Striche geben die maximale Spannweite, die Boxen die beiden zentralen Quartile (25%- und 75%-Quantil), der horizontale Strich den Median der Abweichungen an.

tige Anbaurisiko der Hauptbaumarten abschätzen zu können (SPELLMANN et al. 2007). In der Regel wurden dabei jedoch die Ergebnisse nur eines Regionalmodells berücksichtigt (z. B. WETTREG, STARS II). Folglich wurde die Unsicherheit der Klimaentwicklung, die beispielsweise für das RCP8.5 eine Temperaturzunahme zwischen +3 und +5 K für den Zeitraum von 2071 bis 2100 erwarten lässt (HÜBENER et al. 2017), außer Acht gelassen. Für einzelne Auswertungen wurde lediglich aus verschiedenen Modellläufen eines Regionalmodells anhand der mittleren Niederschlagssummen eine „trockene“ (niederschlagsarme) und eine „feuchte“ (niederschlagsreiche) Variante ausgewählt, um die Spannweite möglicher Entwicklungen zu erfassen (SPELLMANN et al. 2007).

Das ReKliEs-De-Projektvorhaben hat jedoch gezeigt, dass die Ergebnisse der Regionalmodelle in Abhängigkeit von dem antreibenden Globalmodell sehr stark variieren können. Dies betrifft insbesondere den Projektionszeitraum von 2071 bis 2100 (HÜBENER et al. 2017). Da die Klimavariablen sich dabei nicht in eine einheitliche Richtung verändern, z. B. nach trocken warm, ist es notwendig, die vollständige Bandbreite der zukünftigen Klimaentwicklung zu berücksichtigen. Dies ist umso notwendiger, wenn weitere Klimakennwerte, wie die kli-

matische Wasserbilanz und andere Trockenheitsindizes abgeleitet werden.

3.1 Auswertungsmethoden und Anwendungsbereiche in der Forstwirtschaft

Die Auswirkungen des Klimawandels betreffen die Forstwirtschaft in vielfältiger Weise. Die Klimamodelle lassen eine veränderte saisonale Niederschlagsverteilung und eine deutliche Temperaturzunahme bis zum Jahr 2100 erwarten. Dies würde sich auf die Standortverhältnisse und damit die Produktivität der Wälder auswirken. Zusätzlich ist damit zu rechnen, dass biotische (Schadinsekten und Pilze) und abiotische Risiken (Trockenheit, Stürme) zunehmen und die Vitalität und das Wachstum der Bäume vermindern. Die Jahre 2018 und 2019 haben gezeigt, dass als Folge von zwei Trockenjahren eine erhöhte Mortalität (Absterberate) auftritt. Waldbaukonzepte erfassen und beschreiben die verschiedenen Risiken modellgestützt, um diese in eine Gesamtstrategie für Anpassungsmaßnahmen umzusetzen (SPELLMANN et al. 2007, BÖCKMANN et al. 2019).

Es wird erwartet, dass in Zukunft die Wälder in Deutschland einem erhöhten Trockenstressrisiko ausgesetzt sein werden. Insbesondere die Temperaturzunahme und die Verlängerung

der Vegetationsperiode werden den Verdunstungsanspruch der Bäume stark erhöhen. Um das Trockenstressrisiko abzuschätzen, werden verschiedene Indikatoren verwendet. Ein einfacher und flächenhaft zu bestimmender Indikator stellt die Standortwasserbilanz dar, die sich aus der Summe der klimatischen Wasserbilanz (KWB) und dem pflanzenverfügbaren Bodenwasser, der nutzbaren Feldkapazität (nFK), berechnet. Die KWB ist die Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung. Die potenzielle Verdunstung wird nach FAO-Norm für eine einheitliche Grasbedeckung und dem Ansatz von Penman/Monteith berechnet. Die nFK kann aus Bodenübersichtskarten oder der Forstlichen Standortkartierung abgeleitet werden. Die Forstliche Standortkartierung beschreibt die Wuchsbedingungen von Waldstandorten hinsichtlich Wasser- und Nährstoffversorgung in einer hohen räumlichen Auflösung. Die Einschätzung des Trockenstressrisikos für die Hauptbaumarten erfolgt anhand von Schwellenwerten der Standortwasserbilanz, die aus Auswertungen zu forstlichen Inventuren, wie der Bundeswaldinventur (einer großflächigen Erfassung der Waldverhältnisse in Deutschland), Literaturrecherchen und Expertenwissen beruhen (BÖCKMANN et al. 2019). Anhand der Klassifizierung kann für jedes Ergebnis eines Modelllaufes zur Standortwasserbilanz eine flächenhafte Abschätzung des Trockenstressrisikos erfolgen. Da jede Modellsimulation gleich wahrscheinlich ist, wird aus den einzelnen Risikoeinstufungen ein Gesamtrisiko für jede Baumart abgeleitet (Abb. 7-3). Zur Einschätzung des Trockenstressrisikos werden noch weitere Trockenstressindikatoren wie die relative Verdunstung (Verhältnis tatsächlicher zu potenzieller Verdunstung) oder der relative nutzbare Bodenwassergehalt, der das Verhältnis zwischen aktuellem Bodenwassergehalt und nFK angibt, ausgewertet. Diese erfordern jedoch den Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen und werden deshalb meist nur auf der Plotskala, z. B. für die Traktecken der Bundeswaldinventur, berechnet.

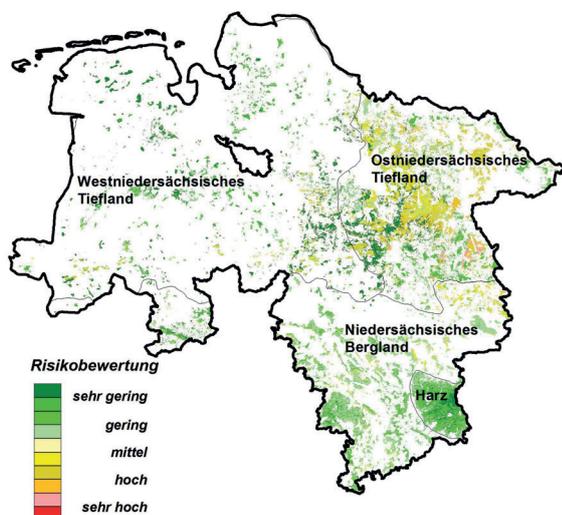


Abb. 7-3: Trockenstressrisiko abgeleitet aus der Standortwasserbilanz für eine hypothetische Baumart für die Waldflächen in Niedersachsen.

Die Produktivität eines Waldstandortes wird an der NW-FVA mit einem klimasensitiven Standort-Leistungsmodell beschrieben (ALBERT und SCHMIDT 2012). Das Modell benötigt neben den Klimavariablen Temperatur- und Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode Informationen zum atmosphärischen Stickstoffeintrag und zur Wasser- und Nährstoffversorgung eines Standortes. Die Wasserversorgung eines Standortes hängt maßgeblich von den physikalischen Bodeneigenschaften (Bodenart, Lagerung, etc.) und den klimatischen Verhältnissen ab. Im Kontext des Klimawandels kann die Bestandesproduktivität durch die Verschiebung im Standort-Leistungs-Bezug abgeschätzt werden. Anhand sogenannter mehrdimensionaler Ökogramme (Abb. 7-4) wird die Veränderung der Produktivität anschaulich dargestellt (ALBERT und SCHMIDT 2012). Das Beispiel zeigt für drei Zeitabschnitte im Vergleich zum status quo die Veränderung der Standortleistungsfähigkeit. Da zwei Varianten des Klimaszenarios („trocken“ und „feucht“) berücksichtigt werden, kann ein Unsicherheitsbereich angegeben werden. Die Berücksichtigung von mehr als zwei Modellvarianten kann durch Ertragsklassenhüllen, die den Unsicherheitsbereich umschließen, veranschaulicht werden.

Die biotischen Risiken werden infolge der Klimaerwärmung zunehmen, da viele wärmeliebende Schadinsekten und Pilze günstigere Bedingungen für ihre Entwicklung und Ausbreitung vorfinden werden. Gleichzeitig ist damit zu rechnen, dass auch neue nicht heimische Arten einwandern werden. Im Jahr 2019 stellte vor allem der Borkenkäfer für die Fichte eine große Bedrohung dar. Flächenhaft wurden viele Bestände befallen und starben ab. Mithilfe eines statischen Modells wird an der NW-FVA die Befallswahrscheinlichkeit für die Fichte geschätzt (OVERBECK und SCHMIDT 2012). Das Modell benötigt als Klimaparameter die Temperatursumme in der Vegetationszeit und erlaubt damit das Borkenkäferbefallsrisiko unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen zu schätzen. Neben den Schadinsekten spielen Pilze zunehmend eine bedeutende Rolle im Schadbild der Bäume. Teilweise treten diese im Zusammenspiel mit den Schadinsekten auf. Einer der wichtigsten Haupttreiber für die Entstehung neu entstehender oder neu auftretender pilzlicher Waldbaumerkrankungen ist der Klimawandel.

Für die Abschätzung des aktuellen und zukünftigen Waldbrandrisikos anhand verschiedener Waldbrandindizes werden als Treibervariablen ebenfalls flächenhafte Daten der Klimaelemente benötigt. Für das Norddeutsche Tiefland ist bis zum Ende des Jahrhunderts mit einer deutlichen Zunahme des Waldbrandrisikos zu rechnen (SPELLMANN et al. 2017).

4 Fazit und Ausblick

Die Forstwirtschaft ist aufgrund der langen Produktionszeiträume darauf angewiesen, wissenschaftlich abgesicherte Aussagen zu den klimatischen Veränderungen zu nutzen, um zukünftig durch nachhaltige und klimasensitive Anpassungsmaßnahmen die Produktionsgrundlagen und Ökosystemleistungen der Wälder zu sichern. Mit

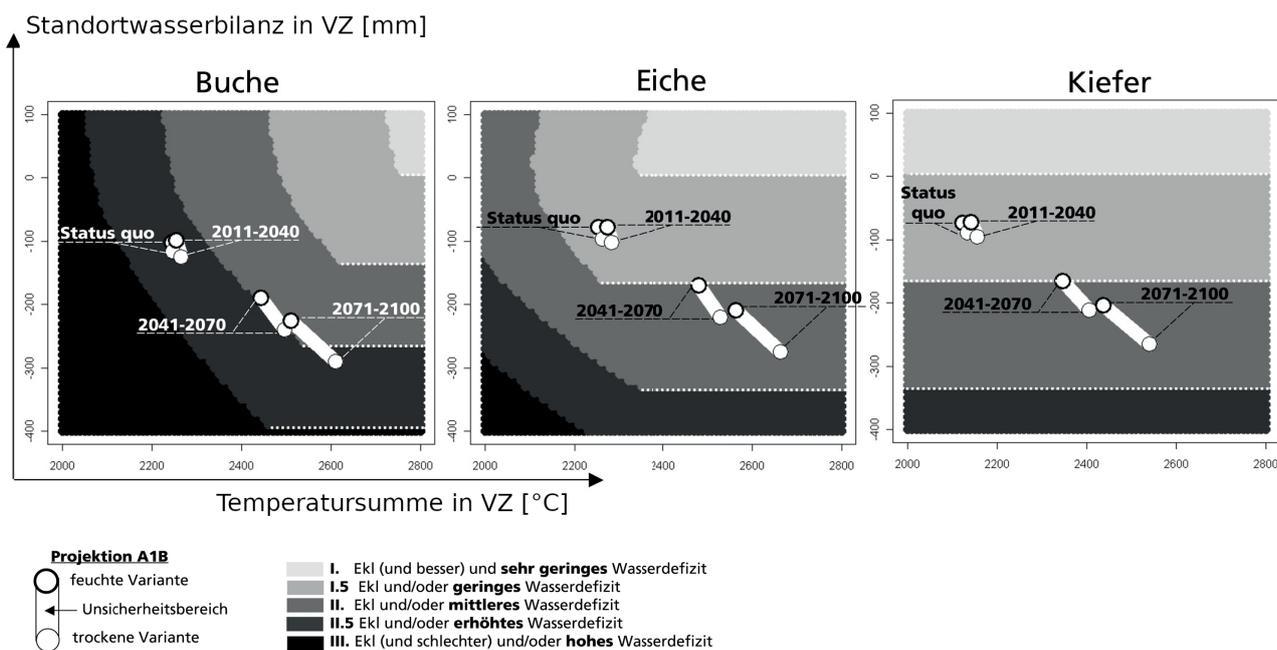


Abb. 7-4: Mehrdimensionale Ökogramme zur Standortleistungsfähigkeit für einen Standort und die Baumarten Buche, Eiche und Kiefer; VZ = Vegetationszeit, EKL = Ertragsklasse (ALBERT und SCHMIDT 2012).

dem ReKliEs-De-Projektvorhaben werden erstmalig für Deutschland Klimaprojektionsdaten bereitgestellt, die aufgrund der räumlichen Auflösung und dem einheitlichen Datenformat für vielfältige Anwendungsbereiche genutzt werden können. Die potenziellen Nutzer sind nun gefordert, diese Daten in ihre Wirkmodelle und Auswertungen einzubeziehen, damit möglichst viele Anwendungsbereiche mit dem gleichen Klimadatensatz arbeiten. Im Projekt ReKliEs-De wurde von Anfang an darauf Wert gelegt, die potenziellen Nutzer von Klimaprojektionsdaten einzubinden. Diese nutzerorientierte Herangehensweise hat dazu geführt, dass die Ergebnisse der verschiedenen Modellsimulationen so aufbereitet wurden, dass sie ein einheitliches Format und einen Mindestumfang an Klimavariablen umfassen. Gleichzeitig wurde mit dem Ergebnisbericht auch ein Nutzerhandbuch herausgegeben, das es nicht in der Verwendung von Datenbanken geschulten Anwendern ermöglicht, mit diesen umfangreichen Datensätzen zu arbeiten. Damit hat das Projekt aus unserer Sicht einen nicht zu unterschätzenden Beitrag zur Akzeptanz der Klimamodellierung geleistet.

Für die forstliche Planung besteht aber weiter das Problem, dass die räumliche Auflösung der Klimamodelle nicht ausreichend ist. Das hier vorgestellte Verfahren zum Downscaling stellt eine Möglichkeit dar, die Daten auch für kleine Planungseinheiten zu nutzen. Es wäre jedoch wünschenswert, wenn ein Downscaling der Daten zentral durchgeführt würde und diese dann der Nutzergemeinde zur Verfügung gestellt würden. Dafür wäre eine Institution oder Arbeitsgruppe notwendig, die bereit wäre, das gesamte Postprocessing von Klimaprojektionsdaten in enger Abstimmung mit den Nutzern zu übernehmen. Da kontinuierlich neue Klimasimulationen durchgeführt werden, könnten durch einen zentralen Ansprechpartner auch

die Ergebnisse neuer Klimamodellläufe und weitere den Nutzer interessierende Anwendungsmöglichkeiten kommuniziert werden.

Klimaprojektionsdaten werden mittlerweile bei fast allen forstlichen Fragestellungen genutzt, sei es in Wirkmodellen als auch bei der Ableitung von waldbaulichen Anpassungsstrategien. Für die Forstpraxis besteht die große Herausforderung darin, trotz großer klimatischer Unsicherheiten zum Ende des Jahrhunderts, die Multifunktionalität der Wälder unter verändertem Klima zu erhalten und Optionen für forstliche Anpassungsstrategien abzuleiten. Dafür sollten die einzelnen Risiken integrativ zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt werden (SPELLMANN et al. 2017).

Danksagung

Die Autoren möchten den Projektpartnern von CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz und insbesondere Herrn Dr. Sven Kotlarski von MeteoSwiss für die Bereitstellung der R-Routinen zum *Quantile Mapping*-Verfahren und die Unterstützung danken.

Literatur

- AHRENDT, B., SCHMIDT-WALTER, P., FLECK, S., KÖHLER, M., WEIS, W., 2018: Wasserhaushaltssimulationen und Klimadaten. *Freiburger Forstliche Forschung* **101**, 74-94.
- ALBERT, M., SCHMIDT, M., 2012: Standort-Leistungs-Modelle für die Entwicklung von waldbaulichen Anpassungsstrategien unter Klimawandel. *Archiv f. Forstw. u. Lansch. ökol.* **46**, 57-71.

- BÖCKMANN, T., HANSEN, J., HAUSKELLER-BULLERJAHN, K., JENSEN, T., NAGEL, J., NAGEL, R. V., OVERBECK, M., PAMPE, A., PETEREIT-BITTER, A., SCHMIDT, M., SCHRÖDER, M., SCHULZ, C., SPELLMANN, H., STÜBER, V., SUTMÖLLER, J., WOLLBORN, P., 2019: Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt; Niedersächsische Landesforsten (Hrsg.): *Aus dem Walde - Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen*, Band 61, 170 S.
- DALELANE, C., FRÜH, B., STEGER, C., WALTER, A., 2018: A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble *J. Appl. Meteorol. Clim.* **57**, 477-491, doi: 10.1175/JAMC-D-17-0141.1.
- FEIGENWINTER, I., KOTLARSKI, S., CASANUEVA, A., FISCHER, A., SCHWIERZ, C., LINIGER, M. A. 2018: Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland. *Technical Report MeteoSwiss* **270**, 44 S.
- HÜBENER, H., BÜLOW, K., FOOKEN, C., FRÜH, B., HOFFMANN, P., HÖPP, S., KEULER, K., MENZ, C., MOHR, V., RADTKE, K., RAMTHUN, H., SPEKAT, A., STEGER, C., TOUSSAINT, F., WARRACH-SAGI, K., WOLDT, M., 2017: ReKliEs-De Ergebnisbericht. doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht.
- HÜBENER, H., SPEKAT, A., BÜLOW, K., FRÜH, B., KEULER, K., MENZ, C., RADTKE, K., RAMTHUN, H., RATHMANN, T., STEGER, C., TOUSSAINT, F., WARRACH-SAGI, K., 2017: ReKliEs-De Nutzerhandbuch. doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch.
- OVERBECK, M., SCHMIDT, M., 2012: Modelling infestation risk of Norway spruce by *Ips typographus* (L.) in the Lower Saxon Harz Mountains (Germany). *Forest Ecology and Management* **266**, 115-125.
- SPELLMANN, H., SUTMÖLLER, J., MEESENBURG, H., 2007: Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. Vorläufige Empfehlungen der NW-FVA am Beispiel des Fichtenanbaus. *AFZ/Der Wald*, **62**. Jg., 1246-1249.
- SPELLMANN, H. et al. 2017: Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland. *Beiträge aus der NW-FVA* **18**, 436 S.
- SUTMÖLLER, J., WAGNER, M., SCHELER, B., MEESENBURG, H., EICHHORN, J., 2019: Der Bodenfeuchtezustand zu Beginn der Vegetationszeit 2019. *AFZ-Der Wald* **74**, 15, 46-49.

Autoren

JOHANNES SUTMÖLLER
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Abteilung Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
37079 Göttingen
Johannes.Sutmoeller@nw-fva.de

DR. EGBERT SCHÖNFELDER
ehemals: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Abteilung Waldwachstum
Grätzelstraße 2
37079 Göttingen

DR. HENNING MEESENBURG
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Abteilung Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
37079 Göttingen
Henning.Meeseburg@nw-fva.de