

Analyse der Hauptkomponenten des Wärmehaushalts brandenburgischer Wälder auf der Grundlage regionaler Klimaszenarien – Abgrenzung von Risikogebieten und Schlussfolgerungen für ein Klima-Monitoring

Principal components of the heat balance of forest ecosystems in the state Brandenburg – Regionalization of risk areas and areas suitable for climate monitoring on the basis of regional climate scenarios

Winfried Riek, Reinhard Kallweit & Alexander Russ

Abstract

In the course of global climate change expected modifications in heat balance will likely have a huge impact on the development and stability of Brandenburgian forest ecosystems. In this paper risk areas are statistically identified and regionalized. Furthermore, areas which are suitable for an ecological based climate impact monitoring are determined.

The basic idea of the methodological approach is the spatio-temporal analyses of climate indicators using multivariate-statistical procedures. For risk assessment, an algorithm was developed, in which expected temporal changes until the year 2050 or 2095 (climate scenario: A1B) are set in relation to the actual spatial range of ecological heat balance indicators. In this way expected changes can be evaluated concerning their disturbance potential. The estimated disturbance potentials are presented on raster maps with a resolution of 1 x 1 km.

Forest ecosystems are complex in their cause-effect behavior. Under the same influence conditions various system states are possible, making prognoses difficult. Therefore, the most promising way seems to be the empirical investigation of species-specific norms of reaction and population dynamic potentials of adaption on the basis of the actual climate in special regions. From the empirical results, large-scale predictions can be derived especially for the identified risk areas (predicting climate monitoring).

Regions suitable for climate monitoring were indentified using a similar approach as used in deriving risk areas. For this, the differences between the actual values of ecological heat balance indicators and the respective average of the total forest area of Brandenburg in the future (decade 2090–2100) were calculated. The regions with maximum similarity to the future conditions are presented on a raster map.

In further evaluation steps, the presented results will be combined with high resolution risk indicators for potential water deficiency and drought stress (100x100 m grid).

Keywords: regional climate change, heat balance, principal component analyses, risk management, forest management, north-eastern lowland (Germany)

Zusammenfassung

Die im Zuge des globalen Klimawandels erwarteten Veränderungen des Wärmehaushaltes werden mit großer Wahrscheinlichkeit erhebliche Auswirkungen auf die Entwicklung und Stabilität der brandenburgischen Waldökosysteme haben. Im vorliegenden Beitrag erfolgen zum einen die statistische Herleitung und räumliche Abgrenzung von Risikogebieten und zum anderen die Ausweisung von Flächen, die für ein Klima-Monitoring auf der ökologischen Wirkungsebene geeignet sind.

Grundgedanke der methodischen Herangehensweise ist die raum-zeitliche Verknüpfung von Klimaindikatoren auf multivariat-statistischer Basis. Für die Risikobewertung wurde ein Algorithmus entwickelt, bei dem die nach dem Klimaszenario A1B zu erwartenden zeitlichen Veränderungen bis zur Mitte bzw. bis zum Ende dieses Jahrhunderts in Relation zur aktuellen räumlichen Streubreite der ökologischen Kenngrößen des Wärmehaushaltes gesetzt und dadurch in ihrem Ausmaß und ihrer Bedeutung als Störungspotenzial bewertet werden. Die errechneten Störungspotenziale werden als Rasterkarten mit einer Auflösung von 1 x 1 km Rasterweite präsentiert.

Waldökosysteme sind in ihrem Ursache-Wirkungs-Verhalten komplex. Bei gleichen Einflussbedingungen sind verschiedene Systemzustände denkbar, die Vorhersagen schwer möglich machen. Deshalb erscheint es am erfolgversprechendsten, den Folgen des Klimawandels empirisch durch Beobachtung der artspezifischen Reaktionsnormen und populationsdynamischen Anpassungspotenziale der Waldökosysteme aufgrund des laufenden Witterungsgeschehens in ausgewählten Regionen zu begegnen. Aus den Beobachtungen können dann großräumige und insbesondere für die erarbeiteten Risikogebiete gültige Vorhersagen abgeleitet werden (prognostizierendes Klima-Monitoring).

Für dieses Klima-Monitoring geeignete Gebiete wurden analog zum dargelegten Vorgehen bei der Risikogebietsableitung unter Verwendung der Differenz zwischen aktueller Ausprägung der ökologischen Wärmehaushaltskennwerte und deren durchschnittlicher zukünftiger Ausprägung (Dekade 2090–2100) auf der Waldfläche Brandenburgs ermittelt. Die Gebiete mit maximaler Ähnlichkeit zu den zukünftigen Verhältnissen werden als Rasterkarte vorgestellt.

Die hier präsentierten Ergebnisse zum Wärmehaushalt sollen in bevorstehenden Auswertungsschritten mit räumlich hoch aufgelösten Risikoindikatoren zu potenziellem Wassermangel und Trockenstress (100x100 m Raster) verknüpft werden.

Schlüsselwörter: Regionaler Klimawandel, Wärmehaushalt, Hauptkomponentenanalyse, Risikomanagement, Waldbewirtschaftung, Nordostdeutsches Tiefland

1 Einführung

Brandenburg gilt als eines der von den voraussichtlichen Folgen des globalen Klimawandels besonders betroffenen Bundesländer. Nach den vorliegenden regionalen Klimaszenarien ist mit gravierenden Veränderungen forstlicher Standortseigenschaften zu rechnen (LINKE et al. 2010, LÜTTGER et al. 2003, GERSTENGARBE et al. 2003). Vor diesem Hintergrund erschienen eine Neubewertung der bestehenden Naturräume und deren Abgrenzung untereinander sinnvoll. Um Möglichkeiten für die Risikoanalyse und territoriale Risikoabgrenzung zu schaffen, wurde das Projekt „*Regionalisierung standortsbezogener Kennwerte unter besonderer Berücksichtigung von Klimaszenarien zur Ableitung dynamischer Wuchsräume*“ initiiert und im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde und der Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH) Eberswalde umgesetzt. Auf der Datengrundlage des regionalen Klimamodells WettReg werden in diesem Vorhaben die zu erwartenden Veränderungen des standörtlichen Wärme- und Wasserhaushaltes bis zum Jahr 2100 beschrieben sowie das daraus resultierende Störungspotenzial quantifiziert und für die Waldfläche Brandenburgs regionalisiert. Die konzeptionelle Herangehensweise ist bei RIEK (2010) erläutert. Der vorliegende Beitrag stellt die Behandlung des Wärmehaushaltes bei der Umsetzung der Projektziele in den Vordergrund. Für den Wärmehaushalt sind auf regionaler Ebene Aussagen zur zukünftigen Entwicklung trotz insgesamt gegebener Unsicherheiten der Modelle vergleichsweise robuster als für den Wasserhaushalt. Im Rahmen des oben genannten Projektes sollen die hier vorgestellten Ergebnisse zum Wärmehaushalt dann mit räumlich hoch aufgelösten Indikatoren zum Trockenstressrisiko verknüpft werden.

Der Wärmehaushalt entscheidet über die Länge der Vegetationsperiode und bestimmt maßgeblich die phänologischen Wachstums- und Entwicklungsphasen der Pflanzen im Jahresablauf. Durch die globale Erwärmung ist mit einer Verschiebung der phänologischen Eintrittstermine und Veränderung der Dauer der einzelnen Phasen zu rechnen. So können sich beispielsweise zu hohe Wintertemperaturen und ungenügende Kältereize verzögernd auf die Pflanzenentwicklung im Frühjahr auswirken. Je nachdem wie sich die temperaturgesteuerten phänologischen Prozesse und das mittlere Auftreten des letzten Frostes verschieben, wird das Spätfrostisiko baumartenspezifisch zu- oder abnehmen.

Die Hitzebelastung wird voraussichtlich insgesamt stark ansteigen. Bei akutem sommerlichem Hitzestress erreicht die Atmungsrate der Pflanze Größenordnungen der Bruttphotosynthese und das Wachstum wird eingestellt. Hitzestress tritt ab 30 °C Lufttemperatur zunehmend in Erscheinung (EITZINGER et al. 2009). Der Einfluss von höheren Temperaturen auf das Wachstum der Bäume hängt entscheidend von den weiteren Standortbedingungen ab. Auf Böden mit ausreichender Wasserversorgung ist infolge verlängerter Vegetationszeiten sowie in Verbindung mit hohen Stickstoffeinträgen und dem Anstieg der CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre mit einer Zunahme der Nettoprimärproduktion zu rechnen. Bei sich verschlechterndem Wasserangebot und zusätzlichen externen Risikofaktoren wie Waldbrand und Schadorganismen ist aber auch eine drastische Verminderung der

Gesamtwuchsleistung als Folge der Temperaturerhöhung denkbar. Da im kontinental geprägten Brandenburg schon heute meist der sommerliche Wassermangel als begrenzender Standortfaktor wirkt und das Reproduktionspotenzial vieler Schadorganismen bei steigenden Lufttemperaturen eher zu- als abnehmen wird, dürfte langfristig auf dem größten Teil der Waldfläche von einem verringerten Wachstum durch Hitze- und Trockenstress auszugehen sein.

2 Material und Methoden

2.1 Grundsätzliches

Zur Kennzeichnung des standörtlichen Wärmehaushaltes wird in der forstlichen Standortserkundung konventionell die Lufttemperatur als Hilfsgröße verwendet. Die Generierung adäquater Datensätze für die vorliegende Untersuchung mittels regionalisierter Klimaszenarien und deren Unsicherheiten werden in Abschnitt 2.2 erläutert.

In der Literatur existiert eine Vielzahl von ökologisch begründeten Indikatoren, deren Berechnungsgrundlage Temperaturangaben auf täglicher Basis bilden. Sie liegen als Durchschnitts-, Minimal- und Maximalwerte vor. Diese Primärdaten werden jahresweise zu aussagekräftigen Kennwerten aggregiert. Möglichkeiten der Aggregation sind (saisonale) Durchschnittswerte, kumulative Temperatursummen, Eintrittstermine sowie Über- und Unterschreitungszeiten definierter Schwellenwerte (Abschnitt 2.3). Im hier beschriebenen Vorhaben stellte sich zunächst die Frage, welche dieser aggregierten Kennwerte zu verwenden sind, um den Wärmehaushalt möglichst umfassend und zweckdienlich zu kennzeichnen und welche Kennwerte prinzipiell entfallen können, weil ihr Informationsgehalt mehr oder weniger redundant ist. Um subjektive Entscheidungsspielräume zu minimieren, wurde die Auswahl mit Hilfe des Verfahrens der Hauptkomponentenanalyse getroffen (Abschnitt 2.4). Die Auswahl erfolgte somit auf rein statistischer Grundlage. Auf eine Bewertung der Relevanz auf der Wirkungsebene und eine entsprechende Gewichtung einzelner Kennwerte wurde bewusst verzichtet, da der aktuelle Kenntnisstand über physiologische Reaktionsnormen verschiedener Baumarten und deren Provenienzen auf Einflüsse des Wärmehaushaltes hierfür noch zu gering bzw. zu wenig differenziert erscheint.

2.2 Generierung von Lufttemperaturdaten

Die für die Kennzeichnung des Wärmeangebotes benötigten Daten zur Lufttemperatur wurden mit Hilfe des statistischen Regionalmodells WettReg in der Version von 2006 für das IPCC-Szenario A1B erzeugt. Dieses Szenario liegt hinsichtlich des CO₂-Ausstoßes und der entsprechenden Klimaerwärmung im mittleren Bereich. Im WettReg-Modell wird – von der Beziehung zwischen Großwetterlagen und der regionalen Ausprägung meteorologischer Kenngrößen ausgehend – von den Ergebnissen der Globalmodelle auf regionale Klimaänderungen geschlossen (SPEKAT et al. 2007, ENKE et al. 2005a,b).

Die Simulationen erzeugen Zeitreihen von Klimakennwerten an den im WettReg-Datensatz von 2006 deutschlandweit verwendeten 273 Klimastationen und 2.943 Niederschlagsstationen des DWD. Dabei umfasst jede Simulation 7.300 (= 365x20) Tage, also 20 „Modelljahre“, deren statistisches Verhalten dem Klima in einer Szenariendekade entspricht. Für eine bessere Abschätzung der Modellvariabilität wurden

jeweils 10 Simulationen gerechnet, so dass für jede Dekade insgesamt 200 Realisierungen von Witterungsverläufen auf Tagesbasis zur Verfügung stehen (SPEKAT et al. 2007).

Im vorstehend zitierten Bericht erfolgte die Validierung der Modelldaten anhand des Vergleichs des mit ECHAM5-Kontrolllaufdaten angetriebenen WettReg-Verfahrens für das Klima des Zeitbereichs 1971–2000. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Lufttemperaturwerte in den Sommermonaten in der Nordhälfte Deutschlands vom Modell als ganz leicht zu warm geschätzt werden; in den Wintermonaten liegt eine generell leicht zu kalte Einschätzung des Modells mit Schwerpunkt im Osten Deutschlands vor. Die Abweichungen sind jedoch an keiner Stelle größer als 0,6 K. Die Werte für das Jahr sind praktisch ausgeglichen.

Beim Vergleich von Dekadensimulationen zeigte sich eine charakteristische dekadische Temperaturwelle: 1971–1980 war das Modell wärmer als die Messungen, 1981–1990 waren beide etwa gleich und 1991–2000 war das Modell kälter als die Messungen. Für den gesamten 30-jährigen Zeitraum kompensieren sich die Muster. Der Grund dafür liegt in einem Phänomen, das im Kontrolllauf des ECHAM5-Modells auftritt. Dort ist eine mit den WettReg-Ergebnissen gleichsinnige Welle vorhanden, die ihren Weg in die WettReg-Regionalisierung über die daraufhin veränderten Häufigkeiten der Zirkulationsmuster im globalen Klimamodell findet. Die Temperaturwelle zwischen 1971 und 2000 ist somit systemimmanent korrekt und gibt einen Hinweis darauf, dass für Temperaturgrößen die Resultate stabiler werden, wenn Mittelungsperioden von mehr als 10 Jahren Länge verwendet werden (SPEKAT et al. 2007). Daraus ergibt sich der Anspruch, wie generell für Klimauntersuchungen gebräuchlich, auf 30-jährige Mittelungsperioden zurückzugreifen.

Es ist den Autoren bewusst, mit der Reduzierung der verwendeten Datensätze auf nur zehn Simulationen einer Dekade eines Regionalisierungsmodells (WettReg 2006) und nur eines antreibenden globalen Modelllaufs (ECHAM5-MPI-OM) für nur ein Emissionsszenario (A1B) das Thema der möglichen Änderung des Wärmeangebotes nicht abschließend behandeln zu können. Es ist aber auch aus Sicht der agierenden Experten unstrittig, sich gegenwärtig nur in den Grundzügen der regionalen Klimaänderungen festlegen zu können. Das weiter entwickelte Folgemodell WettReg2010 wird gegenwärtig zwar vor allem für die Periode 2071–2100 als plausibler angesehen, stellt aber wie WettReg2006 auch nur eine mögliche Simulation der Klimaentwicklung dar. Auf Basis eines neuen globalen Modells sollen 2013/14 neue Regionalisierungen vorliegen (KREIENKAMP 2012 pers. Mitteilung), auf die der zwischenzeitlich für Impactstudien entwickelte Methodenapparat angewandt werden kann. Vergleiche der regionalen Klimaszenarien der Region (LINKE et al. 2010) haben eine recht gute Übereinstimmung unterschiedlicher regionaler Projektionen der Klimamodelle STAR, CLM, REMO und WettReg für die Mitte und das Ende unseres Jahrhunderts bestätigt und kamen auch beim Vergleich der Grundaussagen von WettReg2006 und WettReg2010 zu prinzipiell übereinstimmenden Tendenzen (LINKE & STANISLAWSKY 2010).

Die grundsätzliche Übertragbarkeit von – im Freiland gewonnenen – DWD-Klimadaten auf Waldgebiete konnte für den Zeitraum 1996–2003 anhand der Messdaten von acht Level II Waldklimastationen in Berlin und Brandenburg überprüft werden (RIEK & KALLWEIT 2007).

Für die vorliegende Studie wurden für alle Dekaden im Zeitraum 1960 bis 2100 somit 200 Realisierungen täglicher Temperaturwerte (Mittelwert, Minimal- und Maximaltemperatur) für sieben DWD-Stationen in Brandenburg (Angermünde, Cottbus, Doberlug, Lindenberg, Marnitz, Neuruppin, Potsdam) mittels der von der Firma CEC-Potsdam entwickelten Software IDP selektiert. Diese Stationsdaten der WettReg Klimaprojektionen waren Grundlage für die Durchführung der Hauptkomponentenanalyse (Abschnitt 2.4).

In einem weiteren Schritt waren die Kennwerte des Wärmehaushaltes auf ein brandenburgweites 1x1 km Raster zu übertragen (Regionalisierung). Die Bearbeitung erfolgte durch die Firma CEC-Potsdam im Auftrag des Landeskompetenzzentrums Forst Eberswalde (KREIENKAMP & SPEKAT 2009). Die Datengrundlage für die 1x1 km Rasterung sind Stationswerte von 62 Stationen des deutschlandweiten Datensatzes in und um Brandenburg, die auf die einzelnen Zellen des Darstellungsgitters interpoliert wurden. Dafür wurden zwei bereits in der Software IDP implementierte Methoden in Kombination genutzt:

1. höhenabhängige Regression mit Ausgleich der Residuen durch eine Trendfläche als vertikale Interpolation
2. abstandsgewichtende Interpolation (IDW – Inverse-Distance-Weighting Interpolation) als horizontale Interpolation (SCHULLA 1997).

Für die zu rasternden Stationen wurde die lineare Höhenabhängigkeit ermittelt. Diese lineare Funktion wurde genutzt, um alle Werte auf das Niveau 0 m ü. NN zu reduzieren. Damit liegen nur noch die Anomalien zu diesem Niveau vor. Für jeden Stationswert wurde dann die Differenz zwischen Messwert und den sich aus der Regressionsbeziehung der kontinuierlich aufzeichnenden Stationen ergebenden Schätzwerten gebildet (Anomalien).

Die abstandsgewichtende Interpolationen geht davon aus, dass der Wert einer Messgröße an einer Interpolationsstelle durch die Entfernungen der Interpolationsstelle zu den verschiedenen Stützstellen – in der Praxis also zu den Stationsstandorten – und deren Messwerte beschrieben werden kann. Die Abhängigkeit des Interpolationswertes von der Entfernung der Stützstellen ist umgekehrt proportional, d. h. mit größer werdender Entfernung der Stützstelle zur Interpolationsstelle nimmt deren Einfluss auf den Interpolationswert ab.

Durch die Potenzierung der inversen Entfernung mit dem festgelegten Exponenten p (hier 2) kann die Abnahme des Gewichtes mit der Entfernung gesteuert werden. Der Interpolationswert ergibt sich aus der Summe aller beitragenden gewichteten Stützstellenwerte.

Für jeden Gitterpunkt wurde aus einem digitalen Höhenmodell (1x1 km) eine mittlere Höhe herausgelesen. Die für den Gitterpunkt vorliegende Anomalie konnte nun, entsprechend der mittleren Höhe, auf das entsprechende Niveau geprägt werden (KREIENKAMP & SPEKAT 2009).

Die Rasterung der Stationsinformationen auf das enge Raster von 1x1 km soll nicht eine mit der Interpolation nicht erreichbare Genauigkeit der Datenlage zur Klimaprojektion vorspiegeln, sondern verfolgt den alleinigen Zweck, vorhandene Rauminformationen aus dem digitalen Höhenmodell, der Waldbedeckung, Boden- und Klimainformationen im 100 m Raster maßstäblich anzunähern.

2.3 Indikatoren des Wärmehaushaltes

Als Auslöser von Hitze- und Kältestress und damit wesentliche Steuerungsgröße der Phänologie ist der Wärmehaushalt in der forstlichen Standortsökologie neben dem Wasser- und dem Nährstoffhaushalt eines der drei sogenannten Standortselemente. Eine Zusammenstellung ökologisch begründeter Kennwerte des Wärmehaushaltes von Waldstandorten findet sich neben der Forstlichen Standortaufnahme (AK Standortskartierung 2003) bei RASPE (2001) und RASPE et al. (2010). Die aus der Landwirtschaft stammenden Temperatursummen weisen oft eine enge Beziehung zur phänologischen Entwicklung auf. Sie werden für die Wachstumsperioden berechnet, bei denen die Tagesmitteltemperatur über einer pflanzenabhängigen Basistemperatur liegt, ab der Wachstum stattfindet (CHMIELEWSKI & HENNIGES 2007, EITZINGER et al. 2009, KÄTZEL 2008). Im vorliegenden Projekt wurden nach Sichtung der Literatur die in Tabelle 1 aufgeführten ökologisch begründeten Kennwerte des Wärmehaushaltes verwendet und für die brandenburgischen Klimastationen aus den vorliegenden

Temperaturdaten (Abschnitt 2.2) für die 14 Dekaden des Zeitraums 1960 bis 2100 berechnet. Gegenüber den Originalangaben in der Literatur wurden die Kennwerte teilweise aus operationalen Gründen leicht modifiziert.

2.4 Hauptkomponentenanalyse und Regionalisierung

Die Hauptkomponentenanalyse dient prinzipiell dazu, eine größere Anzahl mehr oder weniger interkorrelierter Variablen durch eine kleinere Anzahl unkorrelierter Variablen, die sog. Hauptkomponenten, ohne wesentlichen Informationsverlust zu ersetzen. Die Hauptkomponenten werden hierbei als Linearkombinationen der originären Variablen ermittelt (BACKHAUS et al. 2000).

Als mögliche Eingangsgrößen für die Hauptkomponentenanalyse dienen die in Tabelle 1 dargestellten Kennwerte. Die Analyse wurde sowohl für einzelne Dekaden und

Tab. 1: Liste der ökologisch begründeten Indikatoren des Wärmehaushaltes.

Tab. 1: *Ecologically based indicators of the heat balance.*

Kürzel	Bedeutung	Einheit
Temp Jahr Temp VZ Temp NVZ Temp Januar Temp Juli	mittlere Tagesmitteltemperatur im Jahr / in der Vegetationszeit / in der Nichtvegetationszeit / im Januar / im Juli	[°C]
Temp NVZ min	minimale Tagesmitteltemperatur in der Nichtvegetationszeit	[°C]
erster Tag T>0 letzter Tag T>0 Dauer T>0 erster Tag T>5 letzter Tag T>5 Dauer T>5 erster Tag T>7 letzter Tag T>7 Dauer T>7 erster Tag T>10 letzter Tag T>10 Dauer T>10	erster / letzter Tag des Zeitraums, in dem die Schwellenwerte 0°C / 5°C / 7°C / 10°C der Tagesmitteltemperatur anhaltend überschritten werden sowie Anzahl der Tage zwischen diesen Terminen	[laufender Jahrestag], [Anzahl der Tage]
WS Jahr T>0 WS Jahr T>5 WS VZ T>5 WS NVZ >5 WS Jahr T>7 WS VZ T>7 WS Jahr T>10 WS VZ T>10	Wärmesummen, ermittelt durch Addition der Tagesmitteltemperaturen, die über den Schwellenwerten 0°C / 5°C / 7°C / 10°C liegen; bezogen auf das Jahr / die Vegetationszeit / die Nichtvegetationszeit	[K]
gew GTS 01.02 gew GTS 01.03. gew GTS 15.03. gew GTS 01.04. gew GTS 15.04. gew GTS 01.05. gew GTS 15.05.	gewichtete „Grünland-Temperatur-Summe“ zu den Zeitpunkten 01.03. / 15.03. / 01.04. / 15.04. / 01.05. / 15.05. ermittelt durch Addition der gewichteten Tagesmitteltemperaturen > 0°C ab Jahresbeginn (Gewichtung: im Januar mit Faktor 0,5; im Februar mit Faktor 0,75; ab März mit Faktor 1)	[K]
Frosttage	Tage mit Tagesminimumtemperatur <0°C	[Anzahl der Tage]

Eistage	Tage mit Tagesmaximumtemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$	[Anzahl der Tage]
kalte Tage	Tage mit Tagesmitteltemperatur $< -10^{\circ}\text{C}$	[Anzahl der Tage]
sehr kalte Tage	Tage mit Tagesmitteltemperatur $< -15^{\circ}\text{C}$	[Anzahl der Tage]
extremer Frost	Tage mit Tagesminimumtemperatur $< -25^{\circ}\text{C}$	[Anzahl der Tage]
Frostschock	Tage mit Tagesmaximumtemperatur $> 0^{\circ}\text{C}$ und Tagesminimumtemperatur $< -3^{\circ}\text{C}$ und Differenz zwischen Minimum- und Maximumtemperatur $> 15\text{ K}$	[Anzahl der Tage]
Sommertage	Tage mit Tagesmaximumtemperatur $> 25^{\circ}\text{C}$	[Anzahl der Tage]
Hitzetage	Tage mit Tagesmaximumtemperatur $> 30^{\circ}\text{C}$	[Anzahl der Tage]
extreme Hitzetage	Tage mit Tagesmaximumtemperatur $> 35^{\circ}\text{C}$	[Anzahl der Tage]
Tropennächte	Tage mit Tagesminimumtemperatur $> 20^{\circ}\text{C}$	[Anzahl der Tage]
Hitzesumme	Summe der Differenzen zwischen Tagesmaximumtemperatur und 35°C aller Tage mit Tagesmaximumtemperatur $> 35^{\circ}\text{C}$	[K]
Spätfrost Jahrestag Frühfrost Jahrestag	letzter / erster Tag mit Tagesminimumtemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$	[laufender Jahrestag]
Frühfrost VZ	Tage mit Tagesminimumtemperatur $< -3^{\circ}\text{C}$ während der Vegetationszeit	[Anzahl der Tage]
Wärmertage ($> 5^{\circ}\text{C}$) NVZ	Tage mit Tagesmitteltemperatur $> 5^{\circ}\text{C}$ in der Nichtvegetationszeit	[Anzahl der Tage]
Frostwechsel	Tage mit Tagesminimumtemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$ und Tagesmaximumtemperatur $> 0^{\circ}\text{C}$	[Anzahl der Tage]
Frostrocknis	Summe der Differenzen zwischen Tagesminimum- und Tagesmaximumtemperatur aller Tage mit Tagesminimumtemperatur $< -3^{\circ}\text{C}$ und Tagesmaximumtemperatur $> 10^{\circ}\text{C}$	[K]
Wintertage	Tage mit Tagesmitteltemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$	[Anzahl der Tage]
Temp Jul-Jan	Differenz der mittleren Tagesmitteltemperaturen im Juli und Januar	[K]
Frostindex nach Liu	Tage in der Nichtvegetationszeit mit Tagesminimumtemperatur $< -3^{\circ}\text{C}$ und einer Differenz zum vorausgegangenen 20-tägigen Mittel der Minimumtemperaturen $> 8\text{ K}$ (LIU et al. 1998)	[Anzahl der Tage]
Spätfrostsumme (K)	Summe der Tagesminimumtemperaturen aller Tage mit Tagesminimumtemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$ in den Monaten April und Mai	[K]
Spätfrostsumme (Tage)	Tage mit Tagesminimumtemperaturen $< 0^{\circ}\text{C}$ in den Monaten April und Mai	[Anzahl der Tage]
erste Pentade $T > 5$ letzte Pentade $T > 5$ Pentaden $T > 5$ erste Pentade $T > 6$ letzte Pentade $T > 6$ Pentaden $T > 6$ erste Pentade $T > 8$ letzte Pentade $T > 8$ Pentaden $T > 8$ erste Pentade $T > 10$ letzte Pentade $T > 10$ Pentaden $T > 10$	erste / letzte Pentade in der die Temperaturschwellenwerte $5^{\circ}\text{C} / 6^{\circ}\text{C} / 8^{\circ}\text{C} / 10^{\circ}\text{C}$ überschritten werden sowie Anzahl der Überschreitungen pro Jahr	[laufender Jahrestag], [Anzahl der Tage]

Klimastationen als auch unter Berücksichtigung aller Stationen und Dekaden im Zeitraum 1960 bis 2100 durchgeführt. Nach entsprechenden Studien wurde deutlich, dass sich bei den verschiedenen Varianten stets identische Strukturen für die ersten sieben Hauptkomponenten ergeben. Die weiteren Hauptkomponenten weisen je nach zugrunde liegendem Datensatz (unterschiedliche Dekaden bzw. Stationen) leicht voneinander abweichende Ladungsstrukturen auf, was in ihrem insgesamt geringen Erklärungsbeitrag an der Gesamtvarianz begründet ist. Die hier vorgestellte Hauptkomponentenlösung (Abschnitt 3.1) ist das Ergebnis der simultanen Analyse aller Datensätze von 7 Klimastationen aus 14 Dekaden.

Die sich anschließenden Auswertungen erfolgen anhand derjenigen Klimakennwerte, die mit den Hauptkomponenten jeweils am engsten korreliert sind, d. h. die höchsten Faktorladungsbeiträge aufweisen (BACKHAUS et al. 2000). Der Vorteil dieser Werte gegenüber den Hauptkomponenten selbst wird vor allem darin gesehen, dass die Klimakennwerte, da sie konkrete Einheiten aufweisen, anschaulicher und einfacher interpretierbar sind als die abstrakt skalierten Hauptkomponenten.

Die so identifizierten Klimakennwerte wurden für die Gitterpunkte des im o. g. Vorhaben verwendeten brandenburgweiten 1 x 1 km-Raster für die drei Dekaden 2001–2010, 2046–2055 und 2091–2100 berechnet.

3 Ergebnisse

3.1 Faktorladungsmatrix

Als mögliche Eingangsgrößen für die Hauptkomponentenanalyse stehen die in Tabelle 1 aufgeführten insgesamt 67 integrierenden Merkmale des Wärmehaushaltes zur Verfügung.

Der Einsatz der Hauptkomponentenanalyse setzt zwar keine bestimmte Verteilung der Eingangsgrößen voraus, doch fällt die Interpretation der Hauptkomponenten einfacher, wenn annähernde Normalverteilung gegeben ist. Aus diesem Grund und um Verzerrungen bei der Extraktion der Hauptkomponenten zu vermeiden, wurden einige Kennwerte, welche aufgrund des sehr seltenen Auftretens bestimmter Merkmalsausprägungen extrem schiefe Häufigkeitsverteilungen aufweisen, von der Analyse ausgeschlossen. Dieses betrifft die folgenden acht der in Tabelle 1 aufgeführten 67 Kennwerte:

extremer Frost
Frühfrost VZ
sehr kalte Tage
Frostschock
Frostrocknis
extreme Hitzetage
Tropennächte
Hitzesumme

Der Ausschluss der genannten Kennwerte suggeriert eine Einschränkung der Aussagemöglichkeiten zur Wirkung von ökologisch oftmals entscheidenden klimatischen Extremereignissen. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass steigende Mittelwerte der Temperatur sowohl in den globalen Modellen (IPCC 2011) als auch im verwendeten Regionalisierungsansatz WettReg (KRAUS & HÜBENER 2010) bisher in keinen statistisch gesicherten Zusammenhang mit der Zu- bzw. Abnahme von Extremwerten gebracht werden können.

Im Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse mit den verbleibenden Kennwerten des Wärmehaushaltes ergibt sich nach Varimax-Rotation (BACKHAUS et al. 2000) eine schlüssig interpretierbare Faktorladungsmatrix (Tab. 2). Die in dieser Matrix dargestellten Koeffizienten beschreiben den Zusammenhang zwischen den einzelnen Kennwerten des Wärmehaushaltes und den Hauptkomponenten. Faktorladungen $<0,4$ wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit in der Tabelle nicht ausgewiesen.

Die erklärte Varianz durch die nach dem sog. Eigenwertkriterium (Eigenwert >1 ; BACKHAUS et al. 2000) abgeleiteten 11 Hauptkomponenten beträgt 85,1 % der Gesamtvarianz aller untersuchten Kennwerte des Wärmehaushaltes. Dabei weisen die ersten beiden Hauptkomponenten den mit Abstand höchsten Erklärungsbeitrag von 19,1 % bzw. 16,5 % auf. Die ersten sieben Hauptkomponenten leisten jeweils Erklärungsbeiträge >5 % und tragen zusammen zur Erklärung von 69,6 % der Gesamtvarianz bei. Im Einzelnen stellen sich diese sieben Hauptkomponenten wie folgt dar:

Hauptkomponente 1 (H1):

Hauptkomponente 1 erklärt mit 19,1 % den größten Teil der Gesamtvarianz und steht im Wesentlichen für die Temperatursausprägung in der Vegetationszeit und das Vorkommen entsprechender Hitzeextreme. Erhöhte Ladungen erhält diese Hauptkomponente von den Tagesmitteltemperaturen in der Vegetationszeit, der Anzahl an Tagen mit Tagesmaximumtemperaturen $>25^{\circ}\text{C}$ (Sommertage) bzw. $>30^{\circ}\text{C}$ (Hitzetage) und den sowohl auf die Vegetationszeit als auch auf das gesamte Jahr bezogenen Wärmesummen.

Hauptkomponente 2 (H2):

Hauptkomponente 2 bringt den Wärmehaushalt im (zeitigen) Frühjahr zum Ausdruck. Vor allem die „gewichteten Grünland-Temperatur-Summen“ kommen in ihm zum Ausdruck. Die größte Ladung geht vom entsprechenden Wert, berechnet bis zum 15.04. aus. Merkmale wie die Anzahl der Wärme- bzw. Frosttage in der Nichtvegetationszeit, Tage mit Frostwechsel und auch die Mitteltemperatur der Nichtvegetationszeit, die offensichtlich stark vom Temperaturverlauf bis Ende April geprägt werden, weisen ebenfalls erhöhte Ladungsbeiträge auf. Die Hauptkomponente erklärt 16,5 % der Gesamtvarianz.

Hauptkomponente 3 (H3):

Diese Hauptkomponente steht für die Temperatursausprägung zum Jahresbeginn. Die größten Ladungen erhält sie von der mittleren Temperatur im Januar, dem Datum der ersten Pentade $>5^{\circ}\text{C}$ bzw. $>6^{\circ}\text{C}$ sowie der Grünlandtemperatursumme im Januar. Der Beitrag zur Gesamtstreuung beträgt 9,7 %.

Hauptkomponente 4 (H4):

Während die Hauptkomponenten 2 und 3 die mittleren Temperatursausprägungen in der zweiten Hälfte der Nichtvegetationsperiode widerspiegeln, handelt es sich bei Hauptkomponente 4 um die Ausbildung der winterlichen Kälteextreme. Die minimale Tagesmitteltemperatur in der Nichtvegetationszeit, die Anzahl „kalter Tage“ und „Eistage“ sowie der Frostindex nach Liu (LIU et al. 1998) bestimmen diese Hauptkomponente, die einen Erklärungsbeitrag von 6,9 % der Gesamtstreuung aufweist.

Hauptkomponente 5 (H5):

Die Temperatursausprägung in den Monaten November und

Tab. 2: Faktorladungsmatrix (Ladungen <0,40 nicht dargestellt).**Tab. 2:** Factor loading matrix (loadings <0,40 not shown).

Kürzel (vgl. Tab.1)	Komponente										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temp VZ	0,89										
Sommertage	0,88										
WS VZ T>5	0,88										
WS VZ T>7	0,87										
Hitzetage	0,84										
WS VZ T>10	0,83										
Temp Juli	0,77										
WS Jahr T>10	0,71										
WS Jahr T>7	0,66	0,46									
WS Jahr T>0	0,65	0,50									
WS Jahr T>5	0,64	0,49									
Temp Jahr	0,60	0,51									
gew GTS 15.04.		0,90									
gew GTS 01.04.		0,88									
gew GTS 01.05.		0,82									
gew GTS 15.03.		0,79									
gew GTS 15.05.		0,75									
Wärmertage (>5°) NVZ		0,67									
Frosttage		-0,65									
Frostwechsel		-0,64									
Temp NVZ		0,63									
gew GTS 01.03.		0,60	0,44								
WS NVZ T>5		0,59									
Wintertage		-0,58		-0,48							
erste Pentade T>8		-0,50	-0,43								
Pentaden T>8		0,44						0,43			
Temp Januar			-0,83								
erste Pentade T>6			-0,79								
gew GTS 01.02			0,76								
erste Pentade T>5			0,74	0,45							
Temp Jul-Jan			-0,71	-0,42							
Pentaden T>5			0,68		0,55						
Pentaden T>			0,65		0,54						
Temp NVZ min				-0,82							
kalte Tage				0,81							
Frostindex nach Liu				-0,78							
Eistage		-0,42		-0,65							
letzte Pentade T>5					0,87						
letzte Pentade T>6					0,86						
letzte Pentade T>8					0,62						
letzter Tag T>5						0,83					
letzter Tag T>7						0,77					
Frühfrost Jahrestag						0,74					
Dauer T>5						0,64	0,55				
Dauer T>7						0,57	0,51				
erster Tag T>5							-0,80				
erster Tag T>7							-0,79				
Spätfrost Jahrestag							-0,74				
Spätfrostsumme [K]								0,86			
Spätfrostsumme [Tage]								-0,81			
erster Tag T>0		-0,42						-0,62			
Pentaden T>10		0,45							0,74		
letzte Pentade T>10									0,61		
erste Pentade T>10		-0,50							-0,55		
Dauer T>10										0,88	
erster Tag T>10										-0,68	
letzter Tag T>10										0,62	
letzter Tag T>0											0,85
Dauer T>0							0,42				0,75

Dezember insbesondere der Zeitpunkt des Wintereinbruchs kommt in Hauptkomponente 5 zum Ausdruck, die durch das jeweilige Datum der letzten Pentade $>5^{\circ}\text{C}$, $>6^{\circ}\text{C}$ bzw. $>8^{\circ}\text{C}$ und in abgeschwächtem Maße durch die Anzahl der entsprechenden Pentaden pro Jahr geladen wird. Der Erklärungsbeitrag an der Gesamtstreuung beträgt 6,6 %.

Hauptkomponente 6 (H6):

Die Temperatursausprägungen im Oktober und November liegen der Hauptkomponente 6 zugrunde. Kennzeichnend sind die Daten für die erste Unterschreitung der Tagesmittel 5°C und 7°C und hiermit eng zusammenhängend die Anzahl der Tage dauerhafter Überschreitung der entsprechenden Schwellenwerte. Des Weiteren lädt das Datum von Frühfrost (erster Tag mit Tagesminimumtemperatur $<0^{\circ}\text{C}$) diese Hauptkomponente. Sie erklärt 5,6 % der Gesamtstreuung.

Hauptkomponente 7 (H7):

Die Hauptkomponente 7 charakterisiert im Wesentlichen die Temperaturverhältnisse in der Zeit von Mitte April bis Anfang Mai. Insbesondere wird der Beginn der frostfreien Periode (letzter Tag mit Tagesminimumtemperatur $<0^{\circ}\text{C}$) durch sie zum Ausdruck gebracht. Die größte Ladung erfolgt durch das jeweilige Datum (Jahrestag) der dauerhaften Überschreitung einer Tagesmitteltemperatur von 5°C bzw. 7°C . Der Erklärungsbeitrag an der Gesamtvarianz beträgt 5,2 %.

Die weiteren vier Hauptkomponenten haben jeweils Erklärungsbeiträge $<5\%$ an der Gesamtvarianz der Wärmehaushaltskennwerte. Ihr kumulativer Erklärungsbeitrag wirkt sich dennoch merklich aus. So steigt die gesamte erklärte Varianz durch ihre Berücksichtigung von 69,6 % auf 85,1 %.

Es zeigt sich allerdings, dass die Struktur der Ladungsmatrix bei diesen Hauptkomponenten nicht mehr so stabil ist, wenn Teilkollektive (Daten bestimmter Dekaden oder einzelner Klimastationen) betrachtet werden. Inhaltlich erscheinen die vier Hauptkomponenten durchaus bedeutsam für die vollständige Kenzeichnung des Wärmehaushaltes, so dass sie keinesfalls unberücksichtigt bleiben sollten. Im Einzelnen sind diese Hauptkomponenten wie folgt zu interpretieren:

Hauptkomponente 8 (H8):

Sie ähnelt der Hauptkomponenten 7, bringt aber nicht wie diese den Zeitpunkt der letzten Nachtfröste sondern vielmehr Umfang und Intensität dieser Fröste zum Ausdruck. Als wesentliche Faktoren fließen die Summe der Minimumtemperaturen $<0^{\circ}\text{C}$ in den Monaten April und Mai sowie die Anzahl der Tage mit Minimumtemperatur $<0^{\circ}\text{C}$ während dieses Zeitraums in die Hauptkomponente ein.

Hauptkomponente 9 (H9):

Die Anzahl der Pentaden $>10^{\circ}\text{C}$ sowie das Datum der ersten und letzten Pentade $>10^{\circ}\text{C}$ laden die Hauptkomponente 9. Das Auftreten von Wärmeperioden insbesondere außerhalb der konventionellen Vegetationsperiode wirken sich somit differenzierend auf die Ausprägung dieser Hauptkomponente aus.

Hauptkomponente 10 (H10):

Sie ähnelt der Hauptkomponenten 9, bezieht sich aber nicht auf das Auftreten von Pentaden sondern auf den zusammenhängenden Zeitraum mit Tagesmitteltemperaturen $>10^{\circ}\text{C}$, dessen Dauer, erster und letzter Tag die Komponente laden.

Tab. 3: Zusammenfassung der Kennwerte des Wärmehaushaltes mit maximaler Ladung auf die ermittelten Hauptkomponenten.

Tab. 3: Indicators of heat balance with maximum loadings on the calculated principal components.

Hauptkomponente	Indikator des Wärmehaushaltes	Kürzel (vgl. Tab. 1)
H1	mittlere Tagesmitteltemperatur in der Vegetationszeit [$^{\circ}\text{C}$]	Temp VZ
H2	gewichtete Grünlandtemperatur-Summe zum Zeitpunkt 15.04. [K]	Gew GTS 15.04.
H3	mittlere Tagesmitteltemperatur im Monat Januar [$^{\circ}\text{C}$]	Temp Januar
H4	minimale Tagesmitteltemperatur in der Nichtvegetationszeit [$^{\circ}\text{C}$]	Temp NVZ min
H5	letzte Pentade in der die Temperaturschwelle 5°C überschritten wird [laufender Jahrestag]	Letzte Pentade T >5
H6	letzter Tag des Zeitraums, in dem die Temperaturschwelle 5°C dauerhaft überschritten wird [laufender Jahrestag]	Letzter Tag T >5
H7	erster Tag des Zeitraums, in dem die Temperaturschwelle 5°C dauerhaft überschritten wird [laufender Jahrestag]	Erster Tag T >5
H8	Summe der Tagesminimumtemperaturen aller Tage mit Tagesminimumtemperatur $<0^{\circ}\text{C}$ in den Monaten April und Mai [K]	Spätfrostsumme (K)
H9	Anzahl der Pentaden in denen die Temperaturschwelle 10°C überschritten wird [Anzahl Tage]	Pentaden T >10
H10	Anzahl der Tage an denen die Temperaturschwelle von 10°C dauerhaft überschritten wird [Anzahl Tage]	Dauer T >10
H11	letzter Tag des Zeitraums, in dem die Temperaturschwelle 0°C dauerhaft überschritten wird [laufender Jahrestag]	Letzter Tag T >0

Konventionell wird in der forstlichen Standortskunde die Vegetationszeit durch diesen Kennwert definiert.

Hauptkomponente 11 (H11):

Die größte Ladung erfährt Hauptkomponente 11 durch das Datum der ersten Unterschreitung des 0 °C-Schwellenwertes der Tagesmitteltemperatur. Die Hauptkomponente kennzeichnet den Zeitraum Ende November bis Mitte Dezember und ähnelt der Hauptkomponenten 5. Darüber hinaus fließt die Dauer des zusammenhängenden Zeitraums mit Tagesmitteltemperaturen >0 °C in die Hauptkomponenten 11 ein.

Eine Zusammenfassung der die Hauptkomponenten jeweils am stärksten ladenden ökologischen Kennwerte des Wärmehaushaltes findet sich in Tabelle 3. Mit den in dieser Tabelle aufgeführten Indikatoren erfolgen alle weiteren Auswertungen dieser Studie. Sie bringen sowohl alle mittleren

Ausprägungen als auch die Extreme diverser Aspekte des Wärmehaushalts umfassend zum Ausdruck.

3.2 Vergleich der Dekaden

Im Folgenden werden die ermittelten 11 Indikatoren des Wärmehaushaltes (Tab. 3) hinsichtlich ihrer Dynamik im Vergleich der Dekaden 2001–2010 (D2005), 2046–2055 (D2050) und 2091–2100 (D2095) dargestellt. Dieser Vergleich erfolgt zunächst auf der Grundlage der Häufigkeitsverteilungen dieser Indikatoren in den Dekaden und deren Überlappungsbereiche. Die zeitliche Veränderung im Simulationszeitraum wird hierbei mit der räumlichen Varianz innerhalb der Region Brandenburg verglichen und damit in ihrer Ausprägung und Bedeutung anschaulicher und quantitativ interpretierbar. Große Überlappungsspannen der Häufigkeitsverteilungen deuten auf relativ geringfügige

Tab. 4: Überlappungsbereiche der Kennwerte des Wärmehaushaltes in den Dekaden 2000–2010 (D2005), 2045–2055 (D2055) und 2090–2100 (D2095).

Tab. 4: *Overlapping ranges of the indicators for heat balance in the decades 2000–2010 (D2005), 2045–2055 (D2055) and 2090–2100 (D2095).*

Kennwertbezeichnung und Gesamtspanne im Zeitraum 2005 – 2095)	Werte-Überlappungsbereich D2005 – D2050	Anteil der Waldfläche im Überlappungsbereich [%]		Werte-Überlappungsbereich D2050 – D2095	Anteil der Waldfläche im Überlappungsbereich [%]	
		D2005	D2050		D2050	D2095
Temp VZ (vgl. H1) 14,8 – 18,1 °C	15,8 – 16,3 °C	51	15	16,8 – 17,3 °C	48	15
Gew GTS 15.04. (vgl. H2) 277 – 481 K	285 – 349 K	95	85	ohne	-	-
Temp Januar (vgl. H3) -0,85 – +4,33 °C	ohne	-	-	ohne	-	-
Temp NVZ min (vgl. H4) -12,5 – -5,7 °C	ohne	-	-	-7,6 – 7,4 °C	10	8
Letzte Pentade T > 5 (vgl. H5) 347 – 362	ohne	-	-	ohne	-	-
Letzter Tag T > 5 (vgl. H6) 283 – 307	291 – 294	37	31	301 – 302	18	14
Erster Tag T > 5 (vgl. H7) 120 – 101	113 – 115	7	5	106 – 110	66	35
Spätfrostsumme (K) (vgl. H8) -30,0 – -4,0 K	-26,7 – -12,8 K	94	80	-10,8 – -10,3 K	6	3
Pentaden T > 10 (vgl. H9) 156 – 196	164 – 172	72	48	ohne	-	-
Dauer T > 10 (vgl. H10) 99 – 140	ohne	-	-	130 – 133	41	39
Letzter Tag T > 0 (vgl. H11) 320 – 352	321 – 332	97	78	321 – 337	100	23

Veränderungen eines Merkmals zwischen den betrachteten Dekaden hin. Dieses ist dann der Fall, wenn schon heute größere Gebiete existieren, in denen Bedingungen vorherrschen wie sie für – im Allgemeinen andere – Gebiete innerhalb Brandenburgs nach den Ergebnissen der Szenariorechnungen für zukünftige Dekaden zu erwarten sind.

Im Ergebnis dieses raum-zeitlichen Datenvergleichs zeigen sich bei mehreren Kennwerten bedeutende Überschneidungen der Häufigkeitsverteilungen zwischen den Dekaden; einige Kennwerte stellen sich im Zeitvergleich hingegen vollkommen anders dar und weisen überhaupt keine Überlappung auf. Im letztgenannten Fall sind die laut Modellszenarien zu erwartenden Ausprägungen aktuell selbst in den wärmsten Gebieten Brandenburgs nicht zu finden. Sie stellen somit für die Region vollkommen neue Verhältnisse dar. Welche Indikatoren im Einzelnen hiervon betroffen sind, ergibt sich aus Tabelle 4, deren Aufbau zunächst am Beispiel der Tagesmitteltemperatur in der Vegetationszeit (Kennwert: „Temp VZ“) erläutert wird:

Aus den Angaben geht hervor, dass die Häufigkeitsverteilungen von „Temp VZ“ in den Dekaden D2005 und D2050 eine Überlappung im Wertebereich von 15,8°C bis 16,3°C aufweisen. In der Dekade D2005 befinden sich 51 % und in der Dekade D2050 15 % der Waldfläche Brandenburgs in diesem Überlappungsintervall. Unterschiedliche Prozentanteile ergeben sich immer dann, wenn schiefe Verteilungsfunktionen vorliegen. Die betroffenen Regionen gehen aus dem Kartogramm in Abbildung 1 hervor. In dem hellgrau gekennzeichneten Gebiet liegen in der Dekade D2005 hinsichtlich des Kennwerts „Temp VZ“ vergleichbare Verhältnisse vor wie in der Dekade D2050 in dem dunkelgrau gekennzeichneten Gebiet.

Die Übersicht in Tabelle 4 zeigt, dass die Überschneidung bei

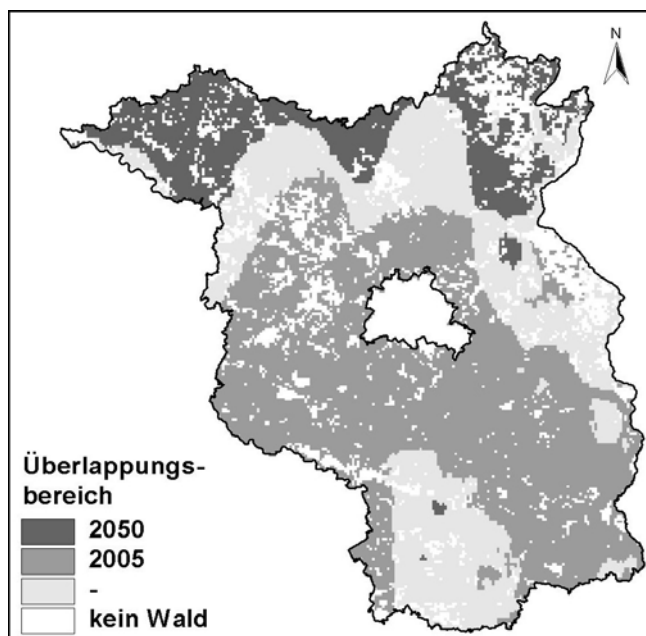


Abb. 1: Zugehörigkeit zum Überlappungsbereich der Häufigkeitsverteilungen von „Temp VZ“ (mittlere Tagesmitteltemperatur in der Vegetationszeit) in den Dekaden D2005 und D2095.

Fig. 1: Spatial visualization of the frequency distribution overlapping ranges of „Temp VZ“ (daily average temperature during the growing season) in the decades D2005 and D2095.

einigen Kennwerten noch deutlich größere Flächen umfasst als dies bei „Temp VZ“ der Fall ist. Auffällig ist die hohe Übereinstimmung zwischen aktueller Ausprägung und szenarisch bis 2050 zu erwartender bei den Hauptkomponenten H2 und H8, welche sich auf die Monate März und April beziehen. So ist davon auszugehen, dass insbesondere die Spätfrostgefahr bei Eintreten des hier verwendeten WettReg-Szenarios bis 2050 in gleichem Maße wie aktuell bestehen bleibt.

Bei anderen Kennwerten, insbesondere bei denjenigen welche die Hauptkomponenten H3, H4 und H5 laden, besteht indes so gut wie keine Überlappung der Häufigkeitsverteilungen. Dieses bedeutet, dass im Zeitraum von Ende November bis Anfang Februar sowohl hinsichtlich der mittleren Verhältnisse als auch in Bezug auf extreme Ereignisse zukünftig bei Eintreten des verwendeten Klimaszenarios gravierende Veränderungen zu erwarten sind.

Des Weiteren zeigt Tabelle 4, dass sich einige Merkmale zwischen den ersten beiden der betrachteten Dekaden kaum verändern, dann aber im Zeitraum 2050 bis 2100 in ihrer Dynamik deutlich zulegen (H7, H10), während es sich bei anderen Merkmalen genau umgekehrt verhält (insbesondere H8). Im Falle der Hauptkomponenten H8 heißt dieses, dass sich die Spätfrostgefahr nur bis zur Mitte dieses Jahrhunderts kaum verändert und dann aber sehr deutlich abnimmt.

3.3 Territoriale Abgrenzung von Risikogebieten

Durch den Klimawandel ergeben sich sowohl Chancen als auch Risiken für die bestehenden Waldökosysteme. Nach STOCK (2003) ist „das Ziel der Ableitung von Auswirkungen des Klimawandels nicht die Vorhersage, sondern die Vermeidung negativer Konsequenzen durch Aufzeigen von Handlungsoptionen. Vor diesem Hintergrund gewinnt ein raumorientiertes Risikomanagement an Bedeutung, das vor allem auf regionaler und lokaler Ebene nicht nur Risiken vorausschauend verringert, sondern auch günstige Alternativen aufzeigen und Chancen eröffnen kann.“ Wenn bestimmte Ausprägungen von Klimakenngrößen wiederholt oder anhaltend über- bzw. unterschritten werden, können suboptimale klimatische Bedingungen eines Systems in Richtung Optimum verschoben werden (z. B. Verlängerung der Vegetationszeit), was neue waldbauliche Potenziale eröffnet. Andererseits werden sowohl die durchschnittlichen Ausprägungen während bestimmter Jahresabschnitte als auch – und dieses vermutlich in noch stärkerem Maße – das Auftreten und die Häufigkeit von Extremwerten die Risiken für bestehende Wälder verstärken.

Der Kenntnisstand über die physiologischen und ökologischen Standortsamplituden von Baumarten und deren Provenienzen reicht in Hinblick auf den Wärmehaushalt jedoch nicht aus, um diesbezüglich differenzierte Grenzwerte oder auch nur Schwellenbereiche definieren zu können. Daher erscheint es zweckmäßiger, Risiken als Störungspotenziale an der zu erwartenden Veränderung an sich festzumachen. Da sich die Veränderungen der abgeleiteten Wärmehaushaltsindikatoren (Tab. 3) zudem nur anhand eines einheitlichen Bewertungsmaßstabs vergleichend interpretieren lassen, wurde hier ein spezieller Ansatz geschaffen, bei welchem die zeitlichen Veränderungen der ermittelten Indikatoren auf der Grundlage ihrer jeweiligen regionalen Streubreite bewertet werden. Den Ansatz verdeutlichen die Gleichungen Gl. (1) und Gl. (2). In diesen Gleichungen wird die Veränderung der Kennwerte zwischen den Dekaden

$$\text{StP_WHIn}_{2005-2050} = (|\text{WHIn}_{D2005} - \text{WHIn}_{D2050}|) / \text{WHIn}_{\text{regio}} * 100 \% \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\text{StP_WHIn}_{2005-2095} = (|\text{WHIn}_{D2005} - \text{WHIn}_{D2095}|) / \text{WHIn}_{\text{regio}} * 100 \% \quad (\text{Gl. 2})$$

WHIn_{D2005} , WHIn_{D2050} , WHIn_{D2095} = Wärmehaushaltsindikator n (vgl. Tab. 3; $n=1, \dots, 11$) in den Dekaden D2005, D2050 bzw. D2095

$\text{WHIn}_{\text{regio}}$ = Spanne der regionalen Streuung der Wärmehaushaltsindikatoren WHIn ($n=1, \dots, 11$) in der Dekade 2005, ermittelt als Differenz zwischen 1- und 99-Perzentil innerhalb der Waldfläche von Brandenburg

$\text{StP_WHIn}_{2005-2050}$, $\text{StP_WHIn}_{2005-2095}$ = Störungspotenziale der Wärmehaushaltsindikatoren WHIn ($n=1, \dots, 11$) im Zeitvergleich der Dekaden D2005 und D2050 bzw. D2005 und D2095

2001–2010 (D2005), 2046–2055 (D2050) sowie 2091–2100 (D2095) zu ihrer (aktuellen) räumlichen Streubreite prozentual in Beziehung gesetzt.

Da die räumliche Spanne der Standortseigenschaften insbesondere des Wärmehaushalts und das damit korrespondierende (natürliche) Baumartenspektrum innerhalb Brandenburgs eine dem Praktiker vertraute und anschauliche Größe darstellt, erlaubt der hier berechnete Index, der sich auf eben diese Spanne bezieht, eine nachvollziehbare Einschätzung des mit den zu erwartenden Veränderungen einhergehenden Störungspotenzials.

In Tabelle 5 sind verschiedene statistische Kennzahlen der so ermittelten Störungspotenziale dargestellt. Da es sich bei den Störungspotenzialen nach Gl. (1) bzw. Gl. (2) um Prozentangaben handelt, lässt sich aus Tabelle 5 beispielsweise entnehmen, dass die Veränderung des Indikators „Temp Januar“ bis zum Ende dieses Jahrhunderts fast viermal so hoch ist (368 %) wie dessen aktuell in Brandenburg zu beobachtende räumliche Streubreite. Beim Indikator „Spätfrostsumme (K)“ indes beträgt die zeitliche Veränderung lediglich 74 % der aktuellen räumlichen Variabilität, ist also geringer als diese. Die beiden genannten Indikatoren bilden die Extreme, zwischen denen sich alle anderen einordnen.

Die Angaben zu Standardabweichung sowie Minimal- und Maximalwerten erlauben zudem eine Einschätzung der räumlichen Unterschiede der ermittelten Störungspotenziale. Gemessen anhand der Standardabweichung bzw. des daraus berechneten Variationskoeffizienten (VK) treten die größten räumlichen Unterschiede bei den Kennwerten „Letzter Tag $T > 0^\circ$ “ (VK 26 %), „erster Tag $T > 5^\circ$ “ (VK 23 %) sowie „Spätfrostsumme (K)“ (VK 20 %) bzw. bei den entsprechenden Hauptkomponenten H11, H7 und H8 (Tab. 2) auf.

Die letzte Zeile in Tabelle 5 enthält statistische Angaben zu den nach Gl. (3) bzw. Gl. (4) berechneten mittleren Störungspotenzialen. Die für die einzelnen Wärmehaushaltsindikatoren ermittelten Störungspotenziale gehen bei der Mittelwertberechnung gleich gewichtet ein.

Anhand dieser über alle Indikatoren des Wärmehaushaltes gemittelten Werte lässt sich das Störungspotenzial insgesamt grob abschätzen. Nicht-additive Effekte im Zusammenwirken der Klimakenngrößen wurden aufgrund der hohen Unsicherheiten in Bezug auf derartige Komplexwirkungen nicht berücksichtigt. Den Angaben in Tabelle 5 kann entnommen werden, dass sich der Wärmehaushalt um durchschnittlich

87 % (D2005 bis D2050) bzw. 176 % (D2005 bis D2095) der aktuellen regionalen Streubreite des Wärmehaushaltes in Brandenburg verändern wird. Die zwischen den Dekaden D2005 und D2050 zu erwartenden Veränderungen liegen somit noch im Bereich der aktuellen Variation des Wärmehaushaltes. Bis zum Ende des Jahrhunderts (D2095) sind mit 176 % der aktuellen Streubreite jedoch Bedingungen zu erwarten, die etwas in Brandenburg völlig Neues darstellen. Die so ermittelten Relativwerte des Störungspotenzials bilden eine geeignete Grundlage für die angestrebte territoriale Abgrenzung von Risikogebieten.

Die für die Dekaden D2050 bzw. D2095 berechneten, im 1 x 1 km-Raster vorliegenden Störungspotenziale sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 als Karten dargestellt. In beiden Darstellungen wurden die Bewertungsklassen anhand der Quintile ausgewiesen. Aus dem Vergleich der Abbildungen wird ersichtlich, dass zwischen mittelfristigen (D2050) und langfristigen (D2095) Risikoregionen zu unterscheiden ist. Die höchsten mittelfristigen Störungspotenziale lassen sich auf größeren Flächenanteilen in den Wuchsgebieten WG 9 (Nordostbrandenburger Jungmoränenland) und WG 24 (Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland) östlich und südöstlich von Berlin sowie für WG 23 (Hoher Fläming) und dem westlichsten brandenburgischen Bereich in WG 11 (Ostniedersächsisch-altmärkisches Altmoränenland) identifizieren (Wuchsgebietsbezeichnungen nach GAUER & ALDINGER 2005). Langfristig bildet ein Band beginnend östlich von Berlin bis in den Nordwesten Brandenburgs ein großes zusammenhängendes Gebiet mit erhöhten Störungspotenzialen (Abb. 3).

Auffallend sind des Weiteren große Flächenanteile im Süden und Nordosten Brandenburgs, für die sowohl mittel- als auch langfristig sehr geringe bis gar keine Störungspotenziale ausgewiesen werden. Insbesondere in den betreffenden Regionen in Südbrandenburg dürften jedoch trockenheitsbedingte Gefahren (z. B. Trockenstress, Waldbrand) aufgrund der häufig geringen Wasserspeicherkapazitäten dieser überwiegend grundwasserfernen und humusarmen Sandstandorte eine größere Bedeutung für die Vitalität der Bestände haben. Insgesamt erscheint, dass die Veränderungen und daraus resultierenden Störungspotenziale überwiegend heute noch eher kühlere Regionen betreffen, während in Gebieten, die sich auch schon in der Vergangenheit als sehr heiß erwiesen, vergleichsweise geringe Veränderungen des Wärmehaushaltes zu erwarten sind.

$$\text{StP_ges2005-2050} = [\text{StP_WHI1}_{2005-2050} + \dots + \text{StP_WHI11}_{2005-2050}] / 11 \quad \text{Gl. (3)}$$

$$\text{StP_ges2005-2095} = [\text{StP_WHI1}_{2005-2095} + \dots + \text{StP_WHI11}_{2005-2095}] / 11 \quad \text{Gl. (4)}$$

StP_ges2005-2050 , StP_ges2005-2095 = Gesamtstörungspotenziale aller 11 Wärmehaushaltsindikatoren im Zeitvergleich der Dekaden D2005 und D2050 bzw. D2005 und D2095

Tab. 5: Störungspotenziale als relative Änderung der Wärmehaushaltskennwerte (Angaben in Prozent der aktuellen räumlichen Spannweite der jeweiligen Kennwerte).

Tab. 5: Potentials of disturbance derived from relative changes of heat balance indicators (in percent of the actual range of these indicators).

Kennwert (Kürzel vgl. Tab. 1)	Störungspotenzial [%] im Vergleich der Dekaden D2005 bis D2050					Störungspotenzial [%] im Vergleich der Dekaden D2005 bis D2095				
	mean	med	SD	min	max	mean	med	SD	min	max
Temp VZ	70	72	6	54	81	134	132	6	125	151
Gew GTS 15.04.	19	21	6	2	32	172	173	8	152	192
Temp Januar	211	212	13	189	232	368	369	13	341	390
Temp NVZ min	156	157	13	128	185	240	238	11	213	283
Letzte Pentade T > 5	133	129	25	4	192	205	200	23	54	269
Letzter Tag T > 5	73	74	27	14	140	147	143	25	89	218
Erster Tag T > 5	-104	-106	33	-194	-10	-177	-187	40	-233	-66
Spätfrostsumme (K)	11	12	7	-28	30	74	74	15	38	116
Pentaden T > 10	39	35	11	22	80	138	137	11	114	178
Dauer T > 10	116	116	21	28	199	150	147	19	87	228
Letzter Tag T > 0	21	25	31	-54	161	136	140	35	37	239
alle Kennwerte vgl. Gl. (3), Gl. (4)	87	86	6	71	103	176	176	7	158	201

mean = arithmetischer Mittelwert, med = Median, SD = Standardabweichung, min = Minimalwert, max = Maximalwert

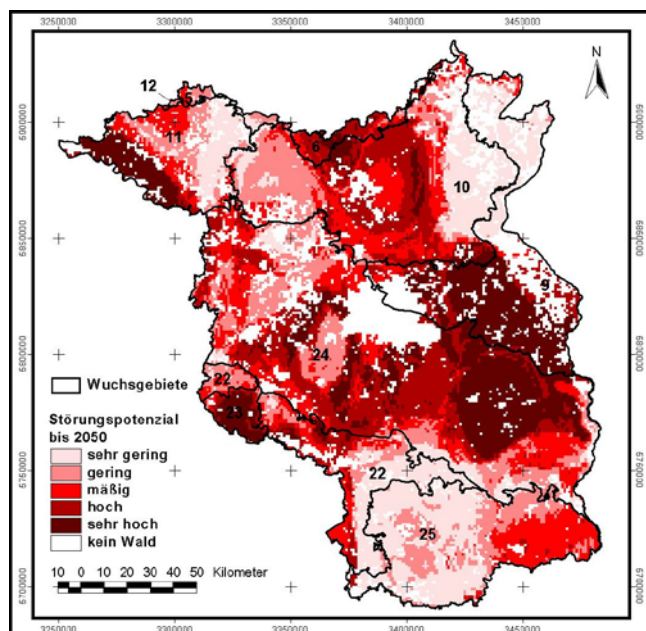


Abb. 2: Störungspotenzial bis zur Dekade D2050 (die Bewertungsstufen beziehen sich auf die Quintile der Häufigkeitsverteilung des Indexwertes StP_ges2005–2050; vgl. Gl. 3).

Fig. 2: Potential of disturbance for the decade D2050 (rating levels derived from the quintiles of the frequency distribution of index value StP_ges2005–2050; see Gl. 3).

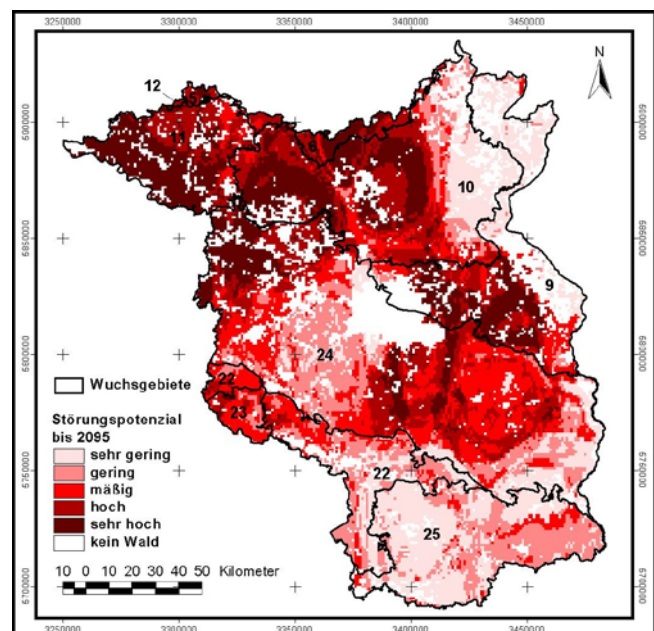


Abb. 3: Störungspotenzial bis zur Dekade D2095 (die Bewertungsstufen beziehen sich auf die Quintile der Häufigkeitsverteilung des Indexwertes StP_ges2005–2095; vgl. Gl. 4).

Fig. 3: Potential of disturbance for the decade D2095 (rating levels derived from quintiles of the frequency distribution of index-value StP_ges2005–2095; see Gl. 4).

$$\text{IDENT_WHIn} = (|\text{WHIn}_{\text{D2005}} - \text{WHIn}_{\text{mean2095}}|) / \text{WHIn}_{\text{regio}} * 100 \% \quad \text{Gl. (5)}$$

IDENT_WHIn = Ähnlichkeit der Wärmehaushaltsindikatoren WHIn (n = 1, ... 11) zwischen den Dekaden D2005 und D2095

WHIn_{D2005} = Wärmehaushaltsindikator WHIn (vgl. Tab. 3; n=1,...11) in der Dekade D2005

WHIn_{mean2095} = Mittelwert des Wärmehaushaltsindikators WHIn über die gesamte Waldfläche von Brandenburg in der Dekade D2095

WHIn_{regio} = Spanne der regionalen Streuung der Wärmehaushaltsindikatoren WHIn (n=1, ...11) in der Dekade 2005, ermittelt als Differenz zwischen 1- und 99-Perzentil innerhalb der Waldfläche von Brandenburg

$$\text{IDENT_ges2005-2095} = [\text{IDENT_WHI1}_{2005-2095} + \dots + \text{IDENT_WHI11}_{2005-2095}] / 11 \quad \text{Gl. (6)}$$

IDENT_ges2005-2095 = Gesamtähnlichkeit aller 11 Wärmehaushaltsindikatoren zwischen den Dekaden D2005 und D2095

Die Kartendarstellungen lassen auch erkennen, dass teilweise sehr starke Gradienten des Störungspotenzials über geringe Distanzen mitten durch die herkömmlichen Wuchsgebiete Brandenburgs verlaufen. Die Gradienten bilden sich meist in Ost-West-Richtung aus, so dass sie durch die ebenfalls tendenziell von (Süd-)Ost nach (Nord-)West orientierten Wuchsgebiete nicht getrennt werden. Dieses spricht dafür, dass die Wuchsgebiete teilweise neu geordnet werden müssen, wenn sie dem zu erwartenden Klimawandel gerecht werden sollen.

3.4 Gebiete für ein Klima-Monitoring

Ausgehend von den Befunden in Tabelle 4 und den Darlegungen in Abschnitt 3.2 stellt sich die Frage, in welchen Regionen Brandenburgs der Wärmehaushalt aktuell am ehesten mit den zukünftig im Durchschnitt zu erwartenden Verhältnissen übereinstimmt. Durch die bisherigen Ausführungen wurde deutlich, dass zwar bis zum Ende des Jahrhunderts ein tiefgreifender und unvergleichlicher Wandel der Wärmehaushaltsbedingungen erwartet wird, die Ähnlichkeit zu den über ein Zeitfenster von etwa 50 Jahren sich einstellenden Verhältnissen aber durchaus hinsichtlich der Mehrheit der Wärmehaushaltsindikatoren gegeben ist. Mit den Begrifflichkeiten der Zeitreihenanalyse gesprochen, weist der Wärmehaushalt in seiner Dynamik autokorrelative Eigenschaften insofern auf, als sich mit einer kennwertspezifischen Zeitverschiebung (Autokorrelationslänge) in bestimmten Gebieten Zustände und Auswirkungen beobachten lassen, die in Zukunft in Brandenburg großflächig verbreitet sein werden (OHLEMÜLLER et al. 2006). Hierin besteht die Chance für ein „Klima-(Zukunfts-)Monitoring“, da sich zukünftige Störungen und Adaptionsprozesse in diesen regionalen „Weisergebieten“ in situ beobachten lassen.

Das vorwiegend empirische Vorgehen bei der Klimafolgenabschätzung erscheint dem auf längere Sicht zu realisierenden Projektziel der Ableitung von waldbaulichen Handlungsempfehlungen adäquat, da bezüglich der Anpassungspotenziale auf Individuen-, Populations- und Ökosystemebene zurzeit noch große Wissenslücken bestehen (KÄTZEL 2008). Überdies sind zahlreiche denkbare Kombinationswirkungen in Ökosystemen, wie zum Beispiel Wirkungen von Ozon und erhöhten Lufttemperaturen hinsichtlich der Anfälligkeit gegenüber Krankheitserregern und Schadinsekten, noch völlig unzureichend untersucht. Aufgrund der zahlreichen bestehenden Unsicherheitsfaktoren erscheint ein territorial konzentriertes forstliches Umweltmonitoring am effektivsten, um den Erkenntnisgewinn diesbezüglich zu steigern.

Für die Auswahl geeigneter Regionen wurde der in Abschnitt 3.3 beschriebene Algorithmus des raum-zeitlichen Vergleichs von Veränderungen des Wärmehaushaltes in modifizierter Weise angewandt. In Abbildung 4 ist für die

1x1 km-Rasterpunkte die Ähnlichkeit zwischen den aktuellen (Dekade D2005) und den zukünftigen Bedingungen des Wärmehaushalts (Dekade D2095) als Karte dargestellt. Die Berechnung der Ähnlichkeit erfolgte nach Gl. (5) und Gl. (6). Danach werden zunächst die Differenzen zwischen den aktuellen Ausprägungen der 11 Wärmehaushaltsindikatoren (Tab. 3) an den Rasterpunkten und den jeweiligen Mittelwerten über alle Punkte der Dekade D2095 gebildet. Diese Differenzen stehen für die absoluten Ähnlichkeiten der aktuellen Kennwertausprägungen (D2005) zu den durchschnittlich in Brandenburg zu erwartenden (D2095). Die vergleichende Bewertung der Relevanz dieser Einzeldifferenzen erfolgt analog zum Vorgehen in Abschnitt 3.3 durch Division mit der regionalen aktuellen Streubreite der Kennwerte. Als integrierendes Ähnlichkeitsmaß ergeben sich somit nach Gl. (6) die Mittelwerte der Ähnlichkeiten aller 11 Einzelkennwerte.

In den in Abbildung 4 farblich gekennzeichneten Gebieten mit *hohen* (<5-Perzentil von IDENT_ges2005-2095) und *erhöhten* Ähnlichkeiten (<10-Perzentil) empfiehlt es sich im Rahmen eines Klima-Monitoring zum einen vorhandene forstliche Versuchsflächen oder eingerichtete Naturwaldparzellen zur Beobachtung von physiologischen Reaktionen und Anpassungen auf Baum- und Bestandesebene zu nutzen und zum anderen im Rahmen der routinemäßigen Überwachung von Forstschädlingen auf die Befallsstärke und Ausbreitungsdynamik wärmeliebender Schadinsekten und -erreger in besonderem Maße zu achten. So könnte das zukünftige bei insgesamt erhöhtem Wärmestress zu erwartende Anpassungsverhalten der verschiedenen Waldökosysteme Brandenburgs studiert werden.

In diesem Zusammenhang zeigt Abbildung 5 die Befallsgebiete des Eichenprozessionsspinners im Zeitraum 2004 bis 2011 (Quelle: LFE / Hauptstelle für Waldschutz, LFB 2011). Die Hauptbefalls- und Ausbreitungsgebiete innerhalb von Brandenburg weisen eine auffällige Kohärenz zu der in Abbildung 4 ausgewiesenen Region auf, für die aktuell (Dekade 2001–2010) die größte Ähnlichkeit mit den zu erwartenden Wärmehaushaltsbedingungen besteht. Da es sich mit großer Wahrscheinlichkeit beim Eichenprozessionsspinner um einen Bioindikator für den Klimawandel handelt (CUSTERS 2003, MÖLLER 2010), kann in dieser Übereinstimmung eine Bestätigung des hier vorgestellten Ansatzes gesehen werden.

Für die Massenvermehrung des Eichenprozessionsspinners sind vor allem die Wärmebedingungen während des ersten Raupenstadiums besonders förderlich. Durch wärmere Verhältnisse ab April kommt es zum früheren Schlüpfen der Rüpchen. Die Eichen, deren Knospen normalerweise als Übergangs-Nahrung für die Eirüpchen dienen, treiben ebenfalls wärmebedingt früher aus. Beobachtet wurde, dass sich der Austrieb der Eichen dabei deutlicher nach vorn verschiebt als der Raupenschlupf. Damit verkürzt sich die Hungerphase

der Eirümpchen. Entsprechend geringe Mortalitätsraten sind günstige Voraussetzungen für Massenvermehrungen (CUSTERS 2003). Die Hauptkomponenten H2, H7 und H8 bzw. die sie repräsentierenden Kennwerte „Gew GTS 15.04.“, „Erster Tag $T > 5^\circ\text{C}$ “ und „Spätfrostsumme (K)“ (Tab. 3) spiegeln besonders den Wärmehaushalt in diesem Jahresabschnitt

wider. Vor allem für H2 und H8 wurde eine große Übereinstimmung zwischen den Bedingungen in der aktuellen Dekade (D2005) und der Dekade D2050 ermittelt (Tab. 4).

Aufgrund der in Abschnitt 3.3 abgeleiteten Risikogebiete ist davon auszugehen, dass bis 2050 bzw. 2095 weiterhin großflächige Massenvermehrungen des Eichenprozessionsspinner (und ggf. anderer wärmeliebender Schadinsekten) begünstigt werden. Diese würden sich dann bevorzugt auf die (Eichen-)bestände der in Abbildung 2 und Abbildung 3 ausgewiesenen Gebiete mit hohem Störungspotenzial ausdehnen.

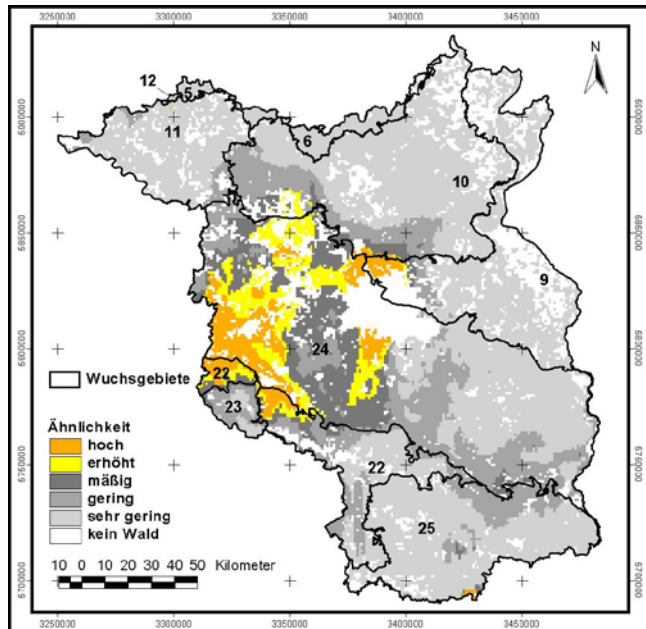


Abb. 4: Ähnlichkeit der aktuellen Wärmehaushaltsbedingungen mit denen der Dekade D2095; die Bewertungsstufen beziehen sich auf folgende Perzentile der Häufigkeitsverteilung des Indexwertes IDENT_ges2005–2095 (Gl. 6): <5- (hoch), <10- (erhöht), <20- (mäßig), <40- (gering) und <100-Perzentil (sehr gering).

Fig. 4: Similarity of the actual heat balance to the conditions of the decade D2095; rating levels derived from the following percentiles of index-value IDENT_ges2005–2095 (see Gl. 6): <5- (very high), <10- (high), <20- (moderate), <40- (low) and <100-percentile (very low).

4 Ausblick und weiteres Vorgehen

Im Rahmen des oben erwähnten Projektes „Regionalisierung standortsbezogener Kennwerte unter besonderer Berücksichtigung von Klimaszenarien zur Ableitung dynamischer Wuchsräume“ wird in einem nächsten Schritt die Modellierung des Wasserhaushaltes und die Ableitung von Trockenstresskenngrößen mit szenarischen Klimadaten erfolgen. Der Wasserhaushalt variiert durch unterschiedliche Boden-, Relief- und Grundwasserverhältnisse wesentlich kleinräumiger als der im vorliegenden Beitrag dargestellte Wärmehaushalt. Seine Modellierung wird gegenwärtig brandenburgweit für die gesamte Waldfläche auf der Grundlage von Standortdaten im 100x100 m Raster durchgeführt. Die Ergebnisse in Form von Kennwerten für Wassermangel sollen anschließend mit den hier vorgestellten Störungspotenzialen durch Änderungen des Wärmehaushaltes verknüpft werden. Im Ergebnis sind räumlich noch stärker differenzierte Aussagen zu Risikobereichen zu erwarten, die als Grundlage für die „Dynamisierung“ und ggf. Neuordnung von forstlichen Wuchsbezirken dienen können und für grundsätzliche waldbauliche Empfehlungen mit den sukzessiv zu erwartenden Ergebnissen des beschriebenen Klima-Monitoring zu verknüpfen sind.

Dank

Für die hilfreichen Kommentare zur Bioindikation des Eichenprozessionsspinner (Abschnitt 3.4) bedanken wir uns bei Frau Dr. Katrin Möller (Hauptstelle für Waldschutz, LFE).

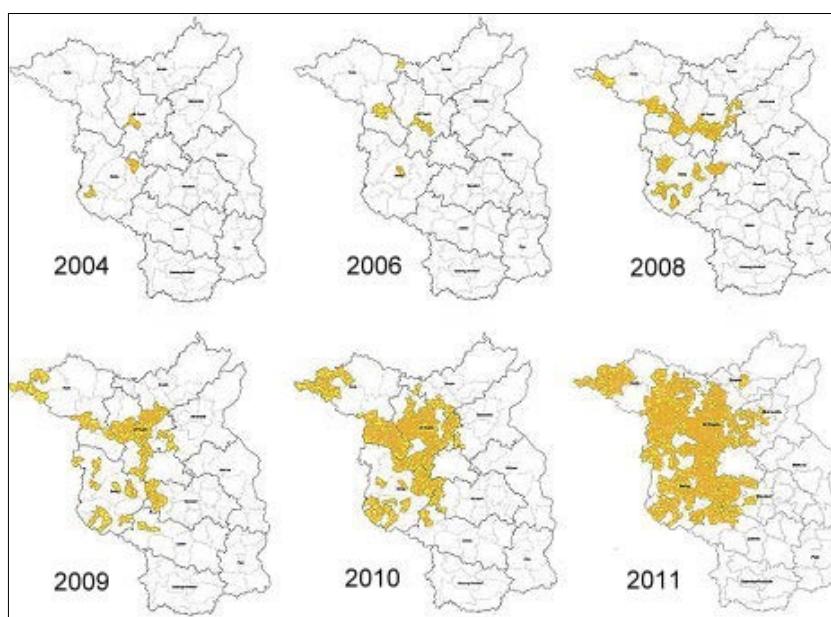


Abb. 5: Ausbreitungsgebiete des Eichenprozessionsspinner in Brandenburg im Zeitraum 2004 bis 2011 (Quelle: LFE / Hauptstelle für Waldschutz, LFB 2011).

Fig. 5: Circulation area of oak processionary moth in Brandenburg during the period 2004 to 2011 (Source: LFE / Hauptstelle für Waldschutz, LFB 2011).

Literatur

- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme. 6. Aufl., IHW-Verlag, Eching: 352 S.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W., WEIBER, R. (2000): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 13. Aufl., Springer-Verlag, Berlin: 583 S.
- CHMIELEWSKI, F.-M., HENNIGES, Y. (2007): Phänologische Modelle als Grundlage zur Abschätzung des Klimaimpakts. Proceedings zur 6. Fachtagung BIOMET, Berichte Meteorologisches Institut, Freiburg, **16**: 229-235.
- CUSTERS, C.J.L. (2003): Climate change and trophic synchronisation – a casestudy of the oak processionary caterpillar. Studentsverlag Wageningen University: 106 S.
- EITZINGER, J., KERSEBAUM, K.C., FORMAYER, H. (2009): Landwirtschaft im Klimawandel. Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. 1. Aufl., Agrimedia-Verlag, Clenze: 276 S.
- ENKE, W., DEUTSCHLÄNDER, T., SCHNEIDER, F., KÜCHLER, W. (2005a): Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. Meteorol. Z. **14**: 247-257.
- ENKE, W., SCHNEIDER, F., DEUTSCHLÄNDER, T. (2005b): A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. Theor. Appl. Climatol. **82**: 51-63.
- GAUER, J., ALDINGER, E. (2005): Waldökologische Naturräume Deutschlands. Mitt. des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung Nr. **43**: 324 S.
- GERSTENGARBE, F.-W., BADECK, F., HATTERMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F., WERNER, P.C. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. Potsdam Institute for Climate Impact Research, PIK Report, Bd. **83**, Potsdam: 77 S.
- IPCC, 2011: Summary for Policymakers. In: Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. FIELD, C. B., BARROS, V., STOCKER, T.F., QIN, D., DOKKEN, D., EBI, K.L., MASTRANDREA, M.D., MACH, K.J., PLATTNER, G.-K., ALLEN, S.K., TIGNOR, M. and P.M. MIDGLEY (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York: 29 S. http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_FD_SPM_final.pdf
- KÄTZEL, R. (2008): Klimawandel – Zur genetischen und physiologischen Anpassungsfähigkeit der Waldbaumarten. Archiv f. Forstwesen u. Landsch.ökol. **42** (1): 9-15.
- KRAUS, C., HÜBENER, H. (2010): WETTREG 2010 – Länderbewertung mit eingearbeiteten Anregungen der übrigen Ländervertreter, des UBA und von CEC; Stand 11/2010. http://www.anpassung.net/nn_700710/SharedDocs/Downloads/DE/WETTREG2010_E2_80_93L_C3_A4nderbewertung.html
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A. (2009): Regionalisierung standortsbezogener Kenwerte (1x1 km Raster-Interpolation) für Brandenburg. CEC, Potsdam GmbH. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Landesbetriebs Forst Brandenburg. Potsdam: 30 S.
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., ENKE, W. (2010): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Bericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Potsdam: 42 S.
- http://www.anpassung.net/cln_339/nn_701048/Shared-Docs/Downloads/DE/Transwetterlagen_Abschlussbericht.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/Transwetterlagen_Abschlussbericht.pdf
- LFB, LANDESBETRIEB FORST BRANDENBURG (2011): Eichenprozessionsspinner und Nonne auf dem Vormarsch. <http://forst.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.260712.de>
- LINKE, C., GRIMMERT, S., HARTMANN, I., REINHARDT, K. (2010): Auswertung regionaler Klimamodelle für das Land Brandenburg – Darstellung klimatologischer Parameter mit Hilfe vier regionaler Klimamodelle (CLM, REMO10, WettReg, STAR2) für das 21. Jahrhundert. Fachbeiträge des Landesumweltamtes des Landes Brandenburg **113**: 305 S.
- LINKE, C., STANISLAWSKY, J. (2010): Auswertung regionaler Klimamodelle für das Land Brandenburg – Teil 2 – Gegenüberstellung klimatologischer Parameter mittels WettReg und WettReg2010 und deren Einordnung in das Ensemble der Regionalmodelle. Fachbeiträge des Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg Heft **115**: 281 S.
- LIU, J.C., NÜSSLEIN, S., MÖSSMER, R. (1998): Zusammenhang zwischen Kronenzustand und Zuwachsentwicklung von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche auf Dauerbeobachtungsflächen von Witterungseinflüssen. Projektbericht zum Projekt V01 Teilprojekt DWE „Ergänzende wachstumkundliche Aufnahmen auf Dauerbeobachtungsflächen zum Waldzustand“. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft / SG III. (zit. nach RASPE 2001)
- LÜTTGER, A., GERSTENGARBE, F.-W., GUTSCH, M., HATTERMANN, F., LASCH, P., MURAWSKI, A., PETRASCHKE, J., SUCKOW, F., WERNER, P.C. (2011): Klimawandel in der Region Haveland-Fläming. PIK Report **121**: 177 S.
- MÖLLER, K. (2010): Wem schadet der Eichenprozessionsspinner – Wer muss handeln? – Argumente für die aktuelle Waldschutzstrategie. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe **44**: 71-81.
- OHLEMÜLLER, R., GRITTI, E.S., SYKES, M.T., THOMAS, C.D. (2006): Towards European climate risk surfaces: the extent and distribution of analogous and nonanalogous climates 1931–2100. Global Ecology and Biogeography **15**: 395-405.
- RASPE, S. (2001): Konzepte für eine integrierende Standardauswertung der Messergebnisse von den bayerischen Waldklimastationen. Schriftenreihe des Wissenschaftszentrums Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, der Technischen Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft. Bd. **184**: 179 S.
- RASPE, S., BEUKER, E., PREUHLER, T., BASTRUP-BIRK, A. (2010): Meteorological Measurements. Manual Part IX, 36 pp. In: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Hamburg. <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>
- RIEK, W. (2010): Regionale und standortsbedingte Unterschiede zu den Auswirkungen des Klimawandels. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe / Wissenstransfer in die Praxis, Bd. **44**: 38-48.
- RIEK, W., KALLWEIT, R. (2007): Einfluss des Wasserhaushalts auf den Kronenzustand der Kiefer (*Pinus sylvestris*) in Brandenburg. Archiv f. Forstwesen u. Landsch.ökol. **41**: 49-59.

- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen, Dissertation. Züricher Geografische Schriften, Heft **69**: 161 S.
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WettReg auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Forschungsbericht des CEC Potsdam GmbH im Rahmen des FuE-Vorhabens „Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland – Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarios für Deutschland“ des Umweltbundesamtes: 106 S.
- STOCK M. (2003): Chancen und Risiken von Regionen im Klimawandel: Welche Strategien kann die Wissenschaft ableiten? In: KARL, H., POHL, J. (Hrsg.): Raumorientiertes Risikomanagement in Technik und Umwelt: 35-62.

submitted: 10.08.2012
reviewed: 06.10.2012
accepted: 08.10.2012

Autorenanschrift:

Prof. Dr.-Ing. Winfried Riek
Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH)
und Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde
Alfred-Möller-Str.1
16225 Eberswalde
E-Mail: Winfried.Riek@hnee.de

Dr. Reinhard Kallweit
Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde
Alfred-Möller-Str.1
16225 Eberswalde
E-Mail: Reinhard.Kallweit@LFE-E.Brandenburg.de

Alexander Russ
Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH)
Alfred-Möller-Str.1
16225 Eberswalde
E-Mail: Alexander.Russ@hnee.de