

Klimawandel in Brandenburg – Risiken für Eichen-Kiefern-Mischbestände

PETRA LASCH, MARTIN GUTSCH, FELICITAS SUCKOW

Einleitung

Die Wälder Brandenburgs sind gegenwärtig noch von Kiefernreinbeständen dominiert. Sie erleben seit Jahrzehnten den weltweit beobachteten Klimawandel und werden diesem auch weiterhin ausgesetzt sein. Die damit verbundenen Folgen und Risiken beeinflussen den Erfolg des angestrebten ökologischen Waldumbaus und stehen im Fokus wissenschaftlicher und forstpraktischer Untersuchungen. Dabei gilt es insbesondere die Frage zu beantworten, wie die Wälder an zu erwartende klimatische Entwicklungen mit vorhersehbaren und nichtvorhersehbaren Risiken anzupassen sind (JENSSEN et al. 2007, WAGNER 2008). Im Folgenden greifen wir daher einen Aspekt dieser Frage auf und untersuchen, welche Risiken für Mischbestände von Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) und Traubeneichen (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) unter projiziertem Klimawandel in Brandenburg auftreten können. Zu diesem Zweck haben wir drei Eichen-Kiefern-Mischbestände ausgewählt, die im Rahmen des BMBF-Projekts Oak-Chain intensiv untersucht wurden. Sie unterscheiden sich in den vorherrschenden klimatischen Bedingungen und liegen in bzw. nahe Brandenburg (ELMER et al. 2009). Mit Hilfe des Waldwachstumsmodells 4C soll untersucht werden, wie sich die Produktivität und der Stoffhaushalt dieser Bestände unter sich ändernden Klimabedingungen entwickeln können.

Rezenter Klimawandel

Wie in den meisten Regionen der Erde, hat sich in Deutschland in den letzten Jahrzehnten die Durchschnittstemperatur deutlich erhöht: seit 1901 um 0,9 K (DWD 2007). Diese Änderung ist stärker als der weltweite Trend, der bei einem Anstieg von 0,7 K seit 1850 liegt (IPCC 2007). Die Niederschlagsentwicklung ist im Zeitraum 1951 – 2003 räumlich hingegen wesentlich differenzierter, der Osten Deutschlands ist eher durch einen leichten Niederschlagsrückgang gekennzeichnet, im Westen und Süden jedoch hat der Niederschlag deutlich zugenommen (GERSTENGARBE 2009).

Klimatische Einordnung Brandenburgs

Das Klima in Brandenburg ist im Vergleich zu den anderen Bundesländern recht trocken sowie im Nordwesten ozeanisch und im Südosten kontinental ge-

prägt mit relativ großen Temperaturschwankungen zwischen den Jahreszeiten. Diese betragen im Südosten im langjährigen Mittel zwischen wärmstem und kältestem Monat bis zu 19,3 K (RIEK und STÄHR 2004). Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8,7 °C mit einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssumme von 557 mm (DWD 2007). Den Niederschlägen stehen potenzielle Verdunstungsraten von durchschnittlich 600 mm pro Jahr gegenüber (WATTENBACH et al. 2005). Subtrahiert man diese vom Niederschlag, erhält man die klimatische Wasserbilanz (KWB). In den trockeneren Gebieten im Zentrum und im Osten Brandenburgs ist die klimatische Wasserbilanz negativ und kleiner als -60 mm, im feuchteren Norden und Süden positiv und größer als 10 mm (RIEK und STÄHR 2004).

Beobachtete Trends für Temperatur und Niederschlag

In einer Studie zur klimatischen Entwicklung in Brandenburg (GERSTENGARBE et al. 2003) wurde für den Zeitraum 1951 – 2000 festgestellt, dass je nach Region die Jahresmittel der Lufttemperatur zwischen 7,8 und 9,5 °C schwanken. Das Jahresmittel der Lufttemperatur hat in diesem Zeitraum zwischen 0,7 und 1,5 K zugenommen, die größte Erwärmung trat im nördlichen Brandenburg auf (WECHSUNG et al. 2009). Der Jahresniederschlag variiert räumlich wenig und liegt in fast ganz Brandenburg zwischen 500 und 600 mm. Es gibt Regionen in Brandenburg mit leichtem Rückgang und leichter Zunahme des Jahresniederschlags, diese Trends sind aber nicht statistisch zu sichern. Betrachtet man dagegen die Jahreszeiten, so ist festzustellen, dass im Sommer ein Rückgang des Niederschlags zu verzeichnen ist, im Winter dagegen eine Zunahme (WECHSUNG et al. 2009).

Zukünftiger Klimawandel in Brandenburg

Globale Einordnung

Aussagen über zukünftige Klimaänderungen werden mit Hilfe von CO₂-Emissionsszenarien (SRES-Szenarien) und globalen Zirkulationsmodellen (GCM) abgeleitet und in den regelmäßigen Berichten des IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) global dargestellt (IPCC 2007). Demnach ist weltweit je nach Annahme für die CO₂-Emissionen mit einem

Anstieg der globalen Oberflächentemperatur im Bereich von 1.1-6.4 K für 2090-2099 im Vergleich zu 1980 – 1999 zu rechnen (PACHAURI und REISINGER 2008).

Regionale Klimamodelle und Szenarien

Die auf globaler Ebene simulierten Ergebnisse der GCM können nicht für regionale Studien verwendet werden, da sie nur Aussagen für größere Regionen (z. B. ganz Deutschland oder größere Teilregionen) zulassen. Es gibt eine Reihe dynamischer und statistischer Verfahren, um regionale Klimaszenarien zu entwickeln. Diese Klimaszenarien, auch Klimaprojektionen genannt, beschreiben mögliche Klimaänderungen relativ kleinräumig in der Zukunft, sind jedoch keine Vorhersagen. Im Folgenden wurde auf Klimaszenarien des statistischen Modells STAR 2.0 (ORLOWSKY et al. 2008) zurückgegriffen.

Klimaprojektionen für Brandenburg

In den oben erwähnten Studien zu Brandenburg und Ostdeutschland wurden Klimaszenarien mittels STAR erstellt und analysiert. Ausgangspunkt dafür waren Simulationen mit dem GCM ECHAM5/OM für das SRES-Szenario A1B, wonach die CO₂-Konzentration der Atmosphäre bis 2055 auf ca. 542 ppm steigt. Da die Temperaturänderung mit einer unsicheren Niederschlagsänderung verbunden ist, wurden je Fläche drei Realisierungen eines STAR-Szenarios ausgewählt. Diese entsprechen dem Temperaturtrend des GCM, unterscheiden sich aber in der Niederschlagsentwicklung. Danach können die Jahresmitteltemperaturen in Brandenburg gegen Ende des Szenarienzeitraums bis zu 2.4 K höher liegen als im Zeitraum 1951 – 2006. Die Niederschläge können gegen Ende des Szenarienzeitraums leicht abnehmen, die Verschiebung der Niederschlagsmuster (Abnahme der Sommerniederschläge und Zunahme der Winterniederschläge) wird sich weiter fortsetzen (WECHSUNG et al. 2009). Die für

unsere Untersuchungsflächen K1-K3 analysierten klimatischen Daten für 1957 – 2006 und 2007 – 2056 (Tab. 1) zeigen diese beschriebenen Trends. Der östlichste Standort K3 ist der wärmste und trockenste unter heutigem Klima und auch die Realisierungen des Klimaszenarios zeigen diese Eigenschaft. K2 ist der Standort mit den höchsten Niederschlägen für die Vergangenheit, und diese Eigenschaft bleibt unter den Klimaszenarien erhalten.

Risiken/ Wirkungen des Klimawandels in Brandenburg für Eichen-Kiefern-Mischbestände

Das Waldwachstumsmodell 4C

Zur Untersuchung der zu Beginn aufgeworfenen Fragen wird das Waldwachstumsmodell 4C (*FORESEE-FORESt Ecosystems in a changing Environment*) eingesetzt, das unter Szenarien der Klimaänderung und der Bewirtschaftung die Dynamik und das Wachstum von Waldbeständen abbildet (LASCH et al. 2005). Der Wald ist ein Ökosystem, das gegenüber seiner Umwelt offen ist in Bezug auf Stoff-, Energie- und Informationsflüsse, und damit in ständigem Austausch mit der Umwelt steht. Klima und Boden sind wichtige Faktoren, die die Waldentwicklung beeinflussen. Die Grundprozesse der Energiespeicherung (Photosynthese) und Energiefreisetzung (Atmung bzw. Respiration) werden durch Temperatur, Licht, Feuchtigkeit und Nährstoffversorgung gesteuert. Die Bindung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre durch die Photosynthese bestimmt die Zuwachsraten des Baumes, die durch die Wasser- und Nährstoffversorgung über den Boden limitiert werden. Der Bodenwasservorrat wird durch den Bestandesniederschlag, der nach Passieren der Vegetationsschicht den Boden erreicht, gespeist. Mit dem Wasser nimmt der Baum auch Nährstoffe aus dem Boden auf. Durch die Zersetzung der Streu werden mit den abgestorbenen Nadeln oder Blättern, Zweigen und Ästen sowie den abgestorbe-

Tabelle 1: Klimadaten und Szenariorealisationen: 50-jährige Temperaturjahresmittel (T) und Jahresniederschlagssummen (N) für den Zeitraum 1957 – 2006 (Basis) und 2007 – 2056 (SI, SII, SIII) für die Flächen K1, K2, K3

		Tw [°C]	Ts [°C]	T [°C]	Nw [mm]	Ns [mm]	N [mm]
K1	B	0.8	17.1	8.8	122.4	170	535.7
	SI	2.3	18.2	10.3	132.5	148.8	518.2
	SII	2.8	18.2	10.3	128.8	149.6	538.5
	SIII	2.7	18.2	10.3	131.5	154.3	554.9
K2	B	0.2	17.2	8.6	129.7	195	590.7
	SI	1.9	18.4	10.3	122.6	150.7	509.9
	SII	2.7	18.2	10.3	131.5	154.3	560.6
	SIII	2.4	18.5	10.3	144.1	181	611.8
K3	B	0.5	18	9.3	112.9	170.7	523.1
	SI	2.1	19.3	10.8	112.6	131.6	465.4
	SII	2.5	19.3	10.8	129.6	144.3	511.1
	SIII	2.5	19.3	10.8	122.7	143.4	507.8

T_w – Mittelwert für Dezember, Januar, Februar

T_s – Mittelwert für Juni, Juli, August

N_w – Niederschlagssumme für Dezember, Januar, Februar

N_s – Niederschlagssumme für Juni, Juli, August

nen Wurzeln wieder Nährstoffe dem Boden zugeführt. Dieser Kreislauf wird durch Einträge aus der Luft (Deposition) angereichert.

Die Abbildung dieser Prozesse im Waldwachstumsmodell 4C ermöglicht die Simulation der Entwicklung von Waldbeständen, die unterschiedlichem Klima und verschiedenen Bewirtschaftungsstrategien ausgesetzt sind. Dabei geht das Modell für jeden Bestand und den dazu gehörigen Boden von einem definierten Anfangszustand aus und simuliert das Wachstum unter Berücksichtigung der Konkurrenz der Bäume um Licht, Wasser und Nährstoffe (SUCKOW et al. 2001; LASCH und SUCKOW 2007). Die dazu benötigten meteorologischen Größen (Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Strahlung, Luftdruck, Windgeschwindigkeit) werden in Tagesauflösung bzw. die CO₂-Konzentration in jährlicher Auflösung in das Modell eingelesen. Die Bewirtschaftung wird mit Hilfe einer jährlich aufgelösten Beschreibung der zu erfolgenden Maßnahmen (Durchforstung, Ernte, Pflanzung) für das Modell bereitgestellt.

Eichen-Kiefern-Mischbestände entlang eines Klimagradienten in Brandenburg

Zur Bearbeitung von vielfältigen Forschungsfragen im Projekt OakChain wurden im subkontinentalen Nordostdeutschen Tiefland unter anderem drei Eichen-Kiefern-Mischbestände (K1-K3) entlang eines geographischen „Klimagradienten“ von Sachsen-Anhalt (nahe der Grenze zu Brandenburg) bis Südbrandenburg ausgewählt (Tab. 2).

Ziel dieser Auswahl war die Untersuchung des Wachstums von Kiefer und Eiche unter verschiedenen Klimabedingungen. Mit der Darstellung der klimatischen Wasserbilanz in Abb. 1 ist der „Klimagradient“ räumlich abgebildet. Dabei fällt auf, dass sich K1 und K2 in Bezug auf die klimatische Wasserbilanz nicht sehr stark unterscheiden. Für einen deutlicheren „Klimagradienten“ hätte man einen Bestand noch weiter im Nordwesten Brandenburgs auswählen müssen, jedoch konnte dort kein geeigneter Eichen-Kiefern-Mischbestand gefunden werden.

Tabelle 2: Übersicht über die Versuchsflächen (Angaben beziehen sich auf den 31.03.2006)

Fläche	K1	K2	K3
Land	Sachsen-Anhalt	Brandenburg	Brandenburg
Revier	Kümmernitz	Rochau	Schernsdorf
Teilfläche	1672 a0	5149 b2	156 b3
Wuchsgebiet	Westprignitz-Altmark Altmoränenland	Düben-Niederlausitzer Altmoränenland	Mittelbrandenburger Talsand-, Moränenland
Bodentyp	podsolige Braunerde	podsolige Pseudogley-Braunerde	Pseudogley-Braunerde
Humusform	Rohhumus bis rohhumusartiger Moder	Rohhumusartiger Moder	Mullartiger Moder bis F-Mull
Baumart/ Alter	Kiefer 140 Eiche 54-220	Kiefer 177 Eiche 90-200	Kiefer 121 Eiche 125
Best.-grad	1,08	1,21	1,22

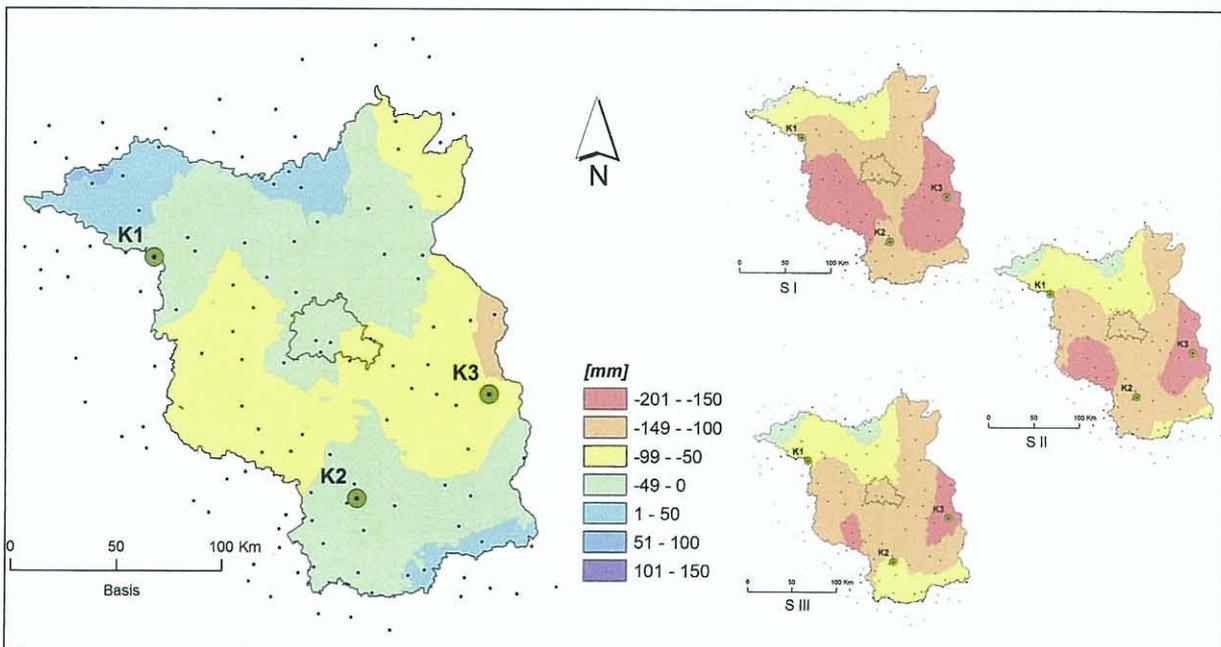


Abb. 1: Klimatische Wasserbilanz Brandenburgs interpoliert auf Basis von 122 Klimastationen (blaue Punkte) für das Basisszenario (Basis) 1961 – 1990 und drei Klimaszenariorealisierungen (SI, SII, SIII) 2031 – 2060

Auf Grund der erwarteten höheren Temperaturen in der Zukunft nimmt die potenzielle Verdunstung zu, dies führt auch bei sich nicht ändernden Jahresniederschlägen zu niedrigeren klimatischen Wasserbilanzen. Die drei Klimaszenariorealisationen mit unterschiedlichen Niederschlagssummen verdeutlichen diese Entwicklung. Der trockenste Standort K3 ist bei allen drei Klimaszenariorealisationen durch eine negative klimatische Wasserbilanz zwischen -200 und -150 mm charakterisiert. Die Standorte K2 und K1 sind sich bezüglich der klimatischen Wasserbilanz sehr ähnlich und haben je nach Szenariorealisation negative KWB-Werte zwischen -100 und -50 mm oder zwischen -150 und -100 mm (Abb. 1).

Analyse der Wirkungen von projizierten Klimaänderungen auf Waldfunktionen – Risiken und Potenziale

Simulationskonzept

Für die ausgewählten drei Mischbestände lagen detaillierte Bestandesinformationen und Bodenbeschreibungen von 2006 vor, so dass es möglich war, diese für die Anwendung mit dem Modell 4C aufzubereiten. Um die Wirkungen projizierter Klimaänderungen zu analysieren, wurden Modellsimulationen mit diesen Bestandes- und Bodendaten als Initialisierungen sowohl unter Klimaszenarien für 2007 – 2056 (SI-SIII) als auch unter Verwendung von gemessenen meteorologischen Daten für 1957 – 2006 (Basis) durchgeführt und verglichen. Dabei wurde für jede Fläche immer ein und dasselbe standortspezifische Bewirtschaftungsszenario angewendet. Da im Mittelpunkt der Analysen die Auswirkungen der Klimaänderung auf Eichen-Kiefer-Mischbestände standen und nicht die Analyse der Bewirtschaftungsstrategien, wurden in allen drei Beständen folgende Maßnahmen simuliert:

Am Anfang der Simulation wurden die Kiefern auf Grund des hohen Alters bis auf fünf im Bestand verbleibende Stämme entnommen (SCHRÖDER et al. 2009). Im Eichenoberbestand fand alle 10 Jahre eine Hochdurchforstung statt, so dass am Ende der Simulation zwischen 40 und 75 Alteichen pro Hektar vorhanden waren. Auf allen Flächen wurden Eichen mit 5000 Pflanzen pro Hektar entsprechend den waldbaulichen

Empfehlungen gepflanzt (MLUR 2004), wobei die Pflanzung auf K1 und K2 im ersten Jahr und auf K3 im 21. Jahr nach Start der Simulation erfolgte. Die spätere Pflanzung auf K3 erfolgte, da die Kiefer dort nur 20 % des Anfangsbestandes ausmachte und ihre Entnahme nicht wie in den beiden anderen Beständen den nötigen Wuchsraum bereitstellte. Das Ziel der Maßnahmen war es, einen zweischichtigen Eichenbestand mit einzelnen Altkiefern zu erzeugen.

Das Modell 4C erlaubt es, waldwachstumskundliche Größen (z. B. laufender Zuwachs, geerntetes Holz, Blattflächenindex, Nettoprimärproduktion), Größen zur Charakterisierung des Kohlenstoffhaushalts (z. B. Kohlenstoffspeicher im Boden und Bestand, jährliche Kohlenstoffakkumulation im Boden) und des Wasserhaushalts (z. B. jährliche Versickerung und Interzeption) zu analysieren. Es wurden Simulationen für jeweils 50 Jahre mit den oben genannten zugeordneten Klimaszenariorealisationen und Bewirtschaftungsszenarien für K1-K3 durchgeführt und die ausgewählten Größen für diesen Zeitraum gemittelt bzw. für den Zustand nach 50 Jahren zusammengestellt. Für das Basisszenario wurde mit einer konstanten CO₂-Konzentration von 350 ppm gerechnet, für die Szenariorealisationen wurde mit einem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration bis 2056 auf 542 ppm gerechnet.

Produktivität

Betrachtet man die Produktivität und das Wachstum der Mischbestände über den 50-jährigen Simulationszeitraum, so zeigen sich deutliche Trends. Unter der Klimaszenariorealisation SI, die für alle Standorte die trockenste Szenariorealisation ist (Tab. 1), sind die mittleren jährlichen Werte der NPP und der mittlere jährliche laufende Zuwachs des Gesamtbestandes immer geringer als für die beiden anderen Klimaszenariorealisationen (Tab. 3). Im Mittel der drei Klimaszenariorealisationen ist für K1-K3 sowohl die NPP als auch der laufende jährliche Zuwachs des Gesamtbestandes höher als unter dem Basisklima. Die relativen Änderungen dieser Größen gegenüber den Werten des Basiszeitraums zeigen, dass es nur für K2 und K3 und die trockenste Szenariorealisation SI Rückgänge gibt (Tab. 3). Auf Grund der Unsicherheit der Niederschlagsentwicklung für die nächsten 50 Jahre kann man davon ausgehen, dass vor allem die zuneh-

Tabelle 3: Jahresmittel des laufenden Zuwachses (IZ) und der Nettoprimärproduktion (NPP) und die relativen Änderungen unter den Klimaszenariorealisationen unter SI-SIII gegenüber dem Basisszenario (rÄ) für die Bestände K1-K3

	K1				K2				K3			
	B	SI	SII	SIII	B	SI	SII	SIII	B	SI	SII	SIII
NPP [t C/ha]	4.0	4.4	4.9	4.8	5.1	4.9	5.5	5.9	5.0	4.9	5.3	5.3
rÄ [%]		9.6	20.4	19.4		-3.4	7.1	14.9		-2.8	4.5	6.2
IZ Kiefer [m ³ /ha]	0.5	0.8	0.7	0.7	0.4	0.7	0.7	0.6	0.4	1.5	1.8	1.6
rÄ [%]		57.6	54.5	48.9		60.4	51.8	45.0		242.4	310.7	264.6
IZ Eiche [m ³ /ha]	5.0	5.1	5.9	6.0	7.7	6.8	7.8	8.7	6.1	5.3	5.8	6.2
rÄ [%]		3.5	18.9	21.4		-11.4	1.7	13.9		-13.5	-5.3	1.6
IZ gesamt [m ³ /ha]	5.5	5.9	6.7	6.8	8.1	7.5	8.5	9.4	6.6	6.8	7.6	7.8
rÄ [%]		8.3	22.0	23.9		-7.4	4.5	15.6		3.7	16.0	19.3

mende CO₂-Konzentration und die längeren Vegetationsperioden, die hier nicht dargestellt wurden, eine steigende Produktivität verursachen können, wenn sie nicht durch stärkere Niederschlagsrückgänge gedämpft wird.

Die Simulation der drei betrachteten Bestände weist demzufolge keinen gravierenden Rückgang in der Produktivität bis 2056 auf. Zu ähnlichen Aussagen kommen zwei aktuelle Studien, die in diesen oder vergleichbaren Beständen stattfanden. Die dendrochronologischen Untersuchungen von SCHRÖDER et al. (2009) in diesen Beständen zeigten einen artspezifischen Zuwachsverlauf, wobei in den letzten Jahren die Sensitivität der Kiefer gegenüber Witterungseinflüssen bis auf das Niveau der Eiche zunahm. Es gab aber keine Hinweise für ein erhöhtes Risiko starker Zuwachseinbußen aufgrund sich ändernder klimatischer Bedingungen. In Bezug auf das Anpassungspotenzial der Kiefer in Brandenburg anhand physiologischer Untersuchungen, weisen KÄTZEL und LÖFFLER (2007) auf große Unterschiede hinsichtlich der standörtlichen und genetischen Rahmenbedingungen hin. Dabei wird die Anpassungsfähigkeit der Kiefer insbesondere im südlichen Brandenburg als hoch eingeschätzt.

Die relative geringere Änderung der Produktivität für die trockenere Szenariorealisation SI zeigt sich auch im Blattflächenindex (LAI). Insbesondere für K1 und K2 wird ein geringerer LAI nach 50 Jahren simuliert als unter dem Basisszenario. Für alle Flächen wird im Mittel der drei Szenariorealisationen SI-SIII ein leicht geringerer LAI berechnet als unter dem Basisszenario (Abb. 2). Für die Fläche K3 sind die LAI-Werte am Ende der Simulationsperiode unter den drei Szenariorealisationen sehr ähnlich, dies ist eine Folge der späteren Pflanzung der Eiche im Vergleich zu K1 und K2 und der Auswirkung der Klimarealisierungen auf die Bewirtschaftung.

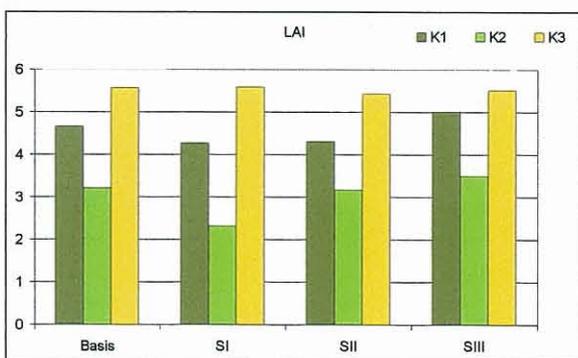


Abb. 2: Blattflächenindex (LAI, m²/m²) nach 50 Jahren für K1-K3 unter dem Szenario B (Basis) und den Szenariorealisationen SI-SIII

Kohlenstoffspeicherung

Zur Beurteilung des Kohlenstoffhaushaltes der Mischbestände unter den Klimaprojektionen wurden vier Komponenten des Kohlenstoffhaushaltes herangezogen: Boden, Totholz, oberirdische und unterirdische Biomasse und geerntetes Holz. In Abb. 3 werden die

Werte nach 50 Jahren Simulationszeit unter Bewirtschaftung dargestellt. Die geringsten Änderungen unter Klimaszenariorealisationen (verglichen mit dem Basisszenario für 1957 – 2006) zeigt der Bodenkohlenstoff. Für K1 und K2 liegen die Werte dafür unter den Klimaszenariorealisationen etwas höher, d. h. diese Klimaprojektionen begünstigen die Kohlenstoffakkumulation im Boden auf Grund vor allem von höheren Streueinträgen durch Blattfall. Hinzu kommt eine Verschiebung der Kohlenstoffverteilung innerhalb des Baumes. Je trockener ein Standort desto mehr Kohlenstoff wird für Aufbau und Erhaltung von Feinwurzelbiomasse verwendet (LYR und HOFFMANN 1992; GREGORY 2006). Dieser Effekt wird auch im Modell 4C simuliert und führt zu um 15 – 25 % höheren Wurzel-/Blatt-Verhältnissen je nach Klimaszenariorealisation in allen drei Beständen. Deshalb ist denkbar, dass auch das Verhältnis von oberirdischer zu unterirdischer Biomasse abnimmt.

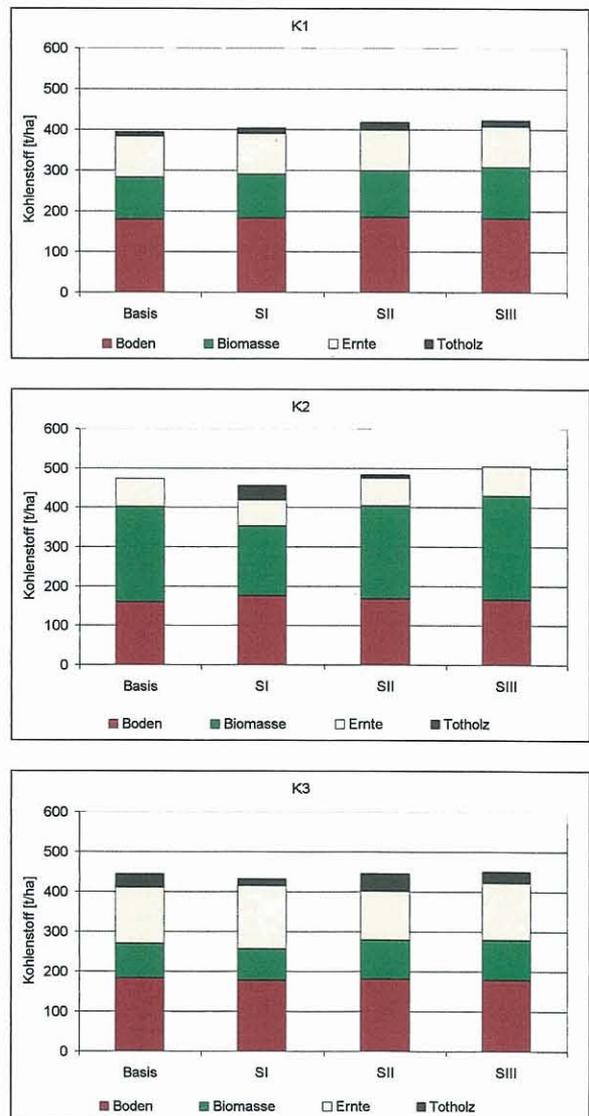


Abb. 3: Der gespeicherte Kohlenstoff im Boden, in der unter- und oberirdischen Biomasse, im geernteten Holz und im Totholz am Ende der 50-jährigen Simulationsperiode unter dem Basisklima (B) und drei Szenariorealisationen (SI-SIII) und Bewirtschaftung

Die ober- und unterirdische Biomasse variiert stärker zwischen dem Basisszenario und den drei Szenariorealisationen. Es ist deutlich zu sehen, dass die trockene Szenariorealisation zu Rückgängen in der gesamten Biomasse führt, unter den mittleren und feuchten Realisierungen (SII, SIII) dagegen eher höhere Biomassen simuliert werden. Für alle drei Bestände wird unter der mittleren und feuchten Szenariorealisation eine höhere Kohlenstoffspeicherung in der Summe aller Komponenten berechnet. Diese Ergebnisse entsprechen den Feststellungen über die Produktivität der Bestände unter diesen Klimaszenariorealisationen (siehe Darlegungen zum Abschnitt „Produktivität“ dieser Schrift). Auch bezüglich der Kohlenstoffspeicherung gilt, dass die Änderungen im Rahmen dieser Szenariorealisationen eher zu höheren Kohlenstoffvorräten in den Komponenten führen, allerdings nicht, wenn ein Niederschlagsrückgang angenommen wird.

Wasserhaushalt

Als Indikatoren für den Wasserhaushalt der drei Mischbestände werden die jährliche Versickerungsrate, die jährliche Interzeption (Niederschlag, der die Blätter benetzt und wieder verdunstet) und die jährliche Transpiration (Verdunstung von Wasser durch die oberirdischen Pflanzenorgane) betrachtet (Abb. 4). Für alle drei Bestände zeigt sich, dass die Versickerung unter jeder Realisierung des Klimaszenarios gegenüber der Versickerung unter dem Basisszenario zurückgeht. Dies ist vor allem bedingt durch geringere Niederschläge (siehe Tab. 1), höheren Verdunstungsbedarf auf Grund höherer Temperaturen und leicht höherer Interzeption, verursacht durch den höheren LAI im Fall der Szenarios SII und SIII. Für die Fläche K3 mit den trockensten Klimabedingungen ist die Versickerung besonders niedrig und die Interzeption am höchsten, was sich auch durch die leicht abweichende Bewirtschaftung (längerer Verbleib der alten Eichen im Bestand und spätere Verjüngung der Eiche) im Vergleich zu K1 und K2 erklären lässt. Die Versickerung ist für K2 immer am höchsten, dies ist auch die Fläche mit den höchsten Niederschlägen.

Zusammenfassung

Die Analysen mit dem klimasensitiven Waldwachstumsmodell 4C erlauben es, die Auswirkungen von Klimaprojektionen auf die Produktivität von Eichen-Kiefern-Mischbeständen zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass an den betrachteten Standorten die zukünftige Produktivität dieser Bestände vor allem von der Entwicklung der Niederschlagsverhältnisse abhängt. Dies kann sich im ungünstigsten Fall eines Niederschlagsrückgangs vor allem im Sommer an dem trockensten Standort negativ auswirken. Die Bestände auf den beiden niederschlagsreicheren Standorten K1 und K2 können die projizierte Erwärmung mit einem Niederschlagsrückgang bis zu 77 % im (meteorologischen) Sommer zu ihrem Vorteil nutzen: Das Modell berechnet hier eine höhere NPP und höhere Zuwächse als unter dem Basisszenario. An allen Standorten

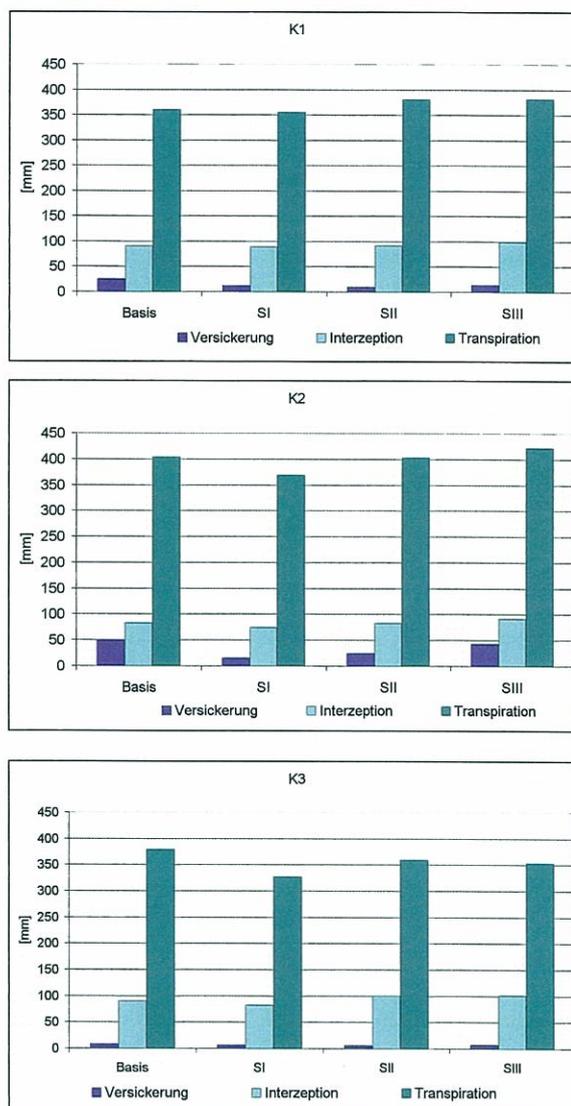


Abb. 4: Mittlere jährliche Versickerungsraten, Interzeption und Transpiration der Bestände, gemittelt über 50 Jahre für die Flächen K1-K3 unter Bewirtschaftung und Basisklimaszenario (B) und drei Szenariorealisationen (SI-SIII)

nehmen in allen Klimaszenariorealisationen im Sommer die Niederschläge ab, dies führt aber im Rahmen der betrachteten Szenarien bezüglich der Produktivität und auch der Kohlenstoffspeicherung nicht zu gravierenden Einbußen. Allerdings bezieht sich diese Aussage nur auf den direkten Einfluss der Klimabedingungen auf das Baumwachstum. Weitere Risikofaktoren, wie die Entwicklung von Krankheitserregern, Fraßinsekten sowie Extremereignisse (z. B. Sturmereignisse, Spätfröste) und deren Einfluss auf die Vitalität von Kiefer und Eiche (KÄTZEL et al. 2006; MÖLLER et al. 2007) werden im Modell und dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Sie stellen aber wichtige Einflussfaktoren dar, die in die Gesamtbewertung des Risikopotenzials von Kiefer und Eiche unter Klimawandel mit einbezogen werden müssen.

Stärker betroffen von den möglichen Klimaänderungen ist der Wasserhaushalt, die Versickerung kann hier über

alle Standorte und Szenariorealisationen betrachtet bis auf 30 % zurückgehen. Sie ist aber auch stark beeinflusst von der Bewirtschaftung, die die Dichte des Bestandes und damit die Blattfläche, die Interzeption und Transpiration bestimmt. Hier hat die Forstwirtschaft Möglichkeiten, negative Folgen des Klimawandels durch Anpassungsmaßnahmen zu kompensieren. Dazu gehören Bewirtschaftungsformen, die die Grundwasserspende der Bestände erhöht. Dies kann über eine Beeinflussung der Bestandesdichte und -struktur und die Durchforstungsstärke gesteuert werden.

Literatur

- DWD (2007): Zahlen und Fakten zur DWD-Pressekonferenz am 24.4.2007: Klimawandel im Detail – Zahlen und Fakten zum Klima in Deutschland. Berlin.
- ELMER, M.; GUTSCH, M.; BACHMANN, U.; BENS, O.; SUCKOW, F.; HÜTTL, F. (2009): Der Einfluss des Umbaus von Kiefern-Reinbeständen in Traubeneichen-Kiefern-Mischwäldern auf Standortqualität und Bestandesklima. *Forst und Holz*, 64 (3): 12-17.
- GERSTENGARBE, F.-W.; BADECK, F.-W.; HÄTTERMANN, 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 PIK-Report 83, Potsdam.
- GERSTENGARBE, F.-W. (2009): Aktuelle Klimaentwicklungen – global bis regional. Erneuerbare Energien, Verband der Elektrizitätswirtschaft e. V. (im Druck).
- GREGORY, P. (2006): *Plant Roots. Growth, activity and interaction with soils*. Oxford, Blackwell Publishing.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., Cambridge University Press.
- JENSSEN, M.; HOFMANN, G.; POMMER, U. (2007): Die natürlichen Vegetationspotenziale Brandenburgs als Grundlage klimaplastischer Zukunftswälder. Beiträge zur Gehölkunde 2007. GANDERT, K.-D. pp 17-29.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S. (2007): Langzeituntersuchungen zu physiologischen Anpassungsreaktionen der Kiefer auf Dauerbeobachtungsflächen der forstlichen Umweltkontrolle (Level-II). Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland – Ökologie und Bewirtschaftung. Eberswalde, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. XXXII: 133-144.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S.; HEYDECK, P.; KALLWEIT, R.; MÖLLER, K. (2006): Das „Eichensterben“ als Komplexkrankheit. Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Eberswalde, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. XXV: 94-97.
- LASCH, P.; BADECK, F.-W.; SUCKOW, F.; LINDNER, M.; MOHR, P. (2005): Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). *Forest Ecology and Management*, 207 (1-2): 59-74.
- LASCH, P.; SUCKOW, F. (2007): Reaktion von Kiefernbeständen unter Klimaänderungen – eine Analyse mit dem Waldwachstumsmodell 4C. Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland – Ökologie und Bewirtschaftung. Eberswalde, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Bd. XXXII: 230-237.
- LYR, H.; HOFFMANN, G. (1992): *Wachstum und Umwelt. Physiologie und Ökologie der Gehölze*. H. LYR; H. J. FIEDLER und W. TRANQUILLINI. Jena, Gustav Fischer Verlag, pp 397-460.
- MLUR (2004): *Waldbau-Richtlinie 2004. „Grüner Ordner“ der Landesforstverwaltung Brandenburg*. MLUR. Potsdam.
- MÖLLER, K.; WALTER, C.; ENGELMANN, A.; HIELSCHER, K. (2007): Die Gefährdung der Gemeinen Kiefer durch Insekten. Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland – Ökologie und Bewirtschaftung. Eberswalde, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. XXXII: 245-258.
- ORLOWSKY, B.; GERSTENGARBE, F.-W.; WERNER, P. C. (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theoretical and Applied Climatology*, 92 (3-4): 209-223.
- PACHAURI, R. K.; REISINGER, A. und Kernautorteam (2008): *Klimaänderung 2007 Synthesebericht*. D. IPCC-Koordinierungsstelle. Stuttgart.
- RIEK, W.; F. STÄHR, F. (2004): *Eigenschaften typischer Waldböden im Nordostdeutschen Tiefland unter besonderer Berücksichtigung des Landes Brandenburg – Hinweise für die Waldbewirtschaftung*. Eberswalde, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. XIX.
- SCHRÖDER, J.; LÖFFLER, S.; MICHEL, A.; KÄTZEL, R. (2009): Genetische Differenzierung, Zuwachsentwicklung und Witterungseinfluß in Mischbeständen von Traubeneiche und Kiefer. *Forst und Holz*, 64 (3): 18-24.
- SUCKOW, F.; BADECK, F.-W.; LASCH, P.; SCHABER, J. (2001): Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Test und Anwendungen des Sukzessionsmodells FORESEE. *Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol.*, 35 (2): 84-87.

WAGNER, S. (2008): Klimawandel-Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. AFZ-DerWald, 63 (20): 1104-1107.

WATTENBACH, M.; HATTERMANN, F.; WENG, R.; WECHSUNG, F.; KRYSANOVA, V.; BADECK, F.-W. (2005): A simplified approach to implement forest eco-hydrological properties in regional hydrological modelling. Ecological Modelling, 187 (1): 40-59.

WECHSUNG, F.; GERSTENGARBE, F.-W.; LASCH, P.; LÜTTGER, A. Hrsg. (2009): Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel. PIK-Report.112, Potsdam.