

Modellierung klimainduzierter Arealveränderungen der Flora von Deutschland

Dissertation

zur Erlangung des
Doktorgrades der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät I – Biowissenschaften –

der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg,

vorgelegt

von Herrn Sven Pompe

geb. am 25.10.1977 in Mühlhausen/Thüringen

Gutachter:

1. Prof. Dr. Ingolf Kühn
2. Prof. Dr. Helge Bruelheide
3. Prof. Dr. Stefan Dullinger

Halle/Saale, den 28.05.2014

Tag der Verteidigung: 07.10.2014

Vorbemerkung

Die vorliegende Arbeit entstand u. a. im Rahmen eines vom Bundesamt für Naturschutz geförderten Projektes mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zu dem Thema „Modellierung der Auswirkung des Klimawandels auf die Flora in Deutschland“ (FKZ 805 81 001). Ziel des Vorhabens war eine Gefährdungsabschätzung möglicher klimainduzierter Änderungen von Pflanzenverbreitungsgebieten in Deutschland. Auf der Basis von modellierten und beobachteten Arealverschiebungen sollten damit u. a. erste Grundlagen für die naturschutzfachliche Bewertung möglicher klimabedingter Risiken für die Flora und die Ableitung von Handlungsmöglichkeiten gelegt werden. Die vorliegende Arbeit umfasst somit Ergebnisse, die im Rahmen dieses Projektes produziert wurden (vgl. BfN-Skripten 304).

In dieser Dissertation diskutierte Publikationen:

- Bergmann J, Pompe S, Ohlemüller R, Freiberg M, Klotz S, Kühn I (2010) The Iberian Peninsula as a potential source for the plant species pool in Germany under projected climate change. *Plant Ecology* 207(2): 191-201 (Kapitel 2)
- Pompe S, Hanspach J, Badeck F, Klotz S, Thuiller W, Kühn I (2008) Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany. *Biology Letters* 4(5): 564-567 (Kapitel 3)
- Pompe S, Hanspach J, Badeck FW, Klotz S, Bruehlheide H, Kühn I (2010) Investigating habitat-specific plant species pools under climate change. *Basic and Applied Ecology* 11(7): 603-611 (Kapitel 4)
- Pompe S, Hanspach J, Badeck F, Klotz S, Bruehlheide H, Kühn I (eingereicht, *Frontiers of Biogeography*) Using ecological and life-history characteristics for projecting species responses to climate change (Kapitel 5)

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 The Iberian Peninsula as a potential source for the plant species pool in Germany under climate change	20
3 Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany.....	21
4 Investigating habitat-specific plant species pools under climate change	22
5 Using ecological and life-history characteristics for projecting species responses to climate change	23
6 Gesamtdiskussion	24
7 Zusammenfassung	39
Anhang	43
Danksagung	44
Erklärung über den persönlichen Anteil an den Publikationen	45
Lebenslauf	46
Publikationen	48
Eigenständigkeitserklärung	51

1 Einleitung

Globaler Wandel

Der Mensch hat seit seinem Auftreten in der Erdgeschichte die Umwelt verändert (Chapin et al. 2000). Seit der Industrialisierung in den letzten Jahrhunderten hat sein Einfluss globale Dimensionen erreicht (Rockström et al. 2009). Durch die Zerstörung aber auch Schaffung von Ökosystemen werden komplette funktionelle Zusammenhänge und Kreisläufe beeinflusst (IPCC 2013). Dies führt auf der Ebene des Klimas u. a. zur Erwärmung der Atmosphäre, des Ozeans, verändert globale Wasserzyklen, die Eis- und Schneebedeckung und beeinflusst das Entstehen und die Intensität von Wetterextremen (IPCC 2013). Berechnungen zeigen, dass sich seit 1880 dadurch die globale Oberflächentemperatur um ca. 0.85°C im Mittel erwärmte (IPCC 2013). Als Folge des projizierten antropogen bedingten Klimawandels droht der Verlust an biologischer Vielfalt (Thuiller et al. 2005). Vorhersagen lassen sich mögliche Entwicklungen nicht. Unbestreitbar ist aber, dass der Mensch entscheidend in die Umwelt eingreift und das in bisher nicht aufgetretenen kurzen Zeiträumen. Dadurch ist die Erwärmung wesentlich schneller als nach den letzten Eiszeiten (Houghton et al. 2001; IPCC 2013).

Neben dem Klimawandel ist laut Sala et al. (2000) die Landnutzung ein wesentlicher Treiber der Änderungen der Biodiversität (Poschlod et al. 2005). Schlussendlich ist die geografische Verteilung einer Vielzahl von Pflanzenarten in Deutschland dadurch von Landnutzungseinflüssen überformt (z. B. Kulturen von Wirtschaftswald, Begleitflora im Ackerbau, vgl. Hausrath 1911). Dabei sind zwei Entwicklungen zu berücksichtigen. Durch Landnutzung bzw. Landumnutzung können ggf. Arten einwandern, was zur Erhöhung der Artenvielfalt führen kann (vgl. Pompe 2004 zur Ausbildung von artenreichen Xerotherm-Rasengesellschaften nach Auflassung von Weinanbauflächen). Durch Biotopzerstörung, Fragmentierung bzw. Isolierung von Landschaften oder eine intensive Nutzung können natürliche Anpassungsmaßnahmen (u. a. Wanderungsbewegungen, genetischer Austausch) der Pflanzen unterbrochen sein und ein negativer Effekt auf die Diversität die Folge sein (Flynn et al. 2009). Weitere Risiken für Ökosysteme (vgl. Sala et al. 2000) sind der Eintrag von Stickstoff und damit eine Nährstoffanreicherung, die Einwanderung von neuen (invasiven) Arten oder Wirkungen steigender Kohlendioxidkonzentrationen (z. B. Versauerung der Meere). Der Verlust an Arten und der Pflanzenartenvielfalt sind Marker dieser Einflüsse (Thomas et al. 2004; MEA

2005), was wiederum die Dynamik und Funktion von kompletten Ökosystemen verändert (Cardinale et al. 2012; Hooper et al. 2012). Der Naturschutz muss sich diesen Anforderungen zur Erhaltung der Biodiversität global und regional stellen (CBD 2002; Korn und Eppele 2006), denn durch starke klimatische Änderungen kann es zu Verschiebungen der Verbreitungsmuster von Arten und damit funktioneller Gemeinschaften und Pflanzengesellschaften kommen (Pompe et al. 2011). Aus Sicht des Naturschutzes können damit potentiell auch Schutzziele (z. B. Artenvielfalt, Schutz seltener Arten und Biotope) gefährdet sein (Badeck et al. 2008).

Klimainduzierte Veränderungen in der Flora Deutschlands

Das Klima spielt biogeografisch bei der Verbreitung von Pflanzen eine große Rolle (Woodward 1987). In Verbindung mit der weltweit beobachteten globalen Erwärmung werden seit den 1990er Jahren zunehmend Veränderungen in der Natur festgestellt, u. a. Veränderungen in der Blühphänologie oder dem Blattaustrieb (Menzel et al. 2011; Ziegler 2011) sowie Verschiebungen von Arealgrenzen (vgl. Pompe et al. 2009). Bereits im letzten Jahrhundert konnten in den verschiedensten Regionen eindeutig Veränderungen (überwiegend Veränderungen an der Kältengrenze, vgl. Badeck et al. 2008) nachgewiesen werden (Walther et al. 2002; Parmesan und Yohe 2003; Root et al. 2003; Leuschner und Schipka 2004; Menzel et al. 2006; Parmesan 2006), die auf den anthropogen verursachten Klimawandel zurückzuführen sind. Für Deutschland kann zum Beispiel für die Stechpalme (*Ilex aquifolium*) oder für die Lorbeerkirsche (*Prunus laurocerasus*) eine Arealausweitung nachgewiesen werden, da vor allem gestiegene mittlere Januartemperaturen und weniger extreme Frostereignisse eine Arealausdehnung ermöglichten (Walther et al. 2005; Berger et al. 2007). Beispiele von Arealausweitungen konnten auch für seltenere Arten wie dem Affen-Knabenkraut nachgewiesen werden (*Orchis simia*, vgl. Pompe et al. 2009 und darin zitierte Literatur). Die Ausbreitung (u. a. an der Gebirgsgrenze, Dullinger et al. 2012; Pauli et al. 2012) und die Einwanderung von Arten (z.B. Meerfenchel, *Chrithmum maritimum*, auf Helgoland, vgl. Lübbert 2008) sind dabei gegenwärtig auffälliger als ein klimabedingter Rückzug von Arten in Deutschland (Pompe et al. 2009).

Szenarien

Neben der Suche nach den Ursachen für den klimatischen Wandel ist die Abschätzung künftiger Trends des Klimas ein wesentlicher Bestandteil der Klimawirkungsforschung.

Dem liegen quantitative Kenntnisse über das Klimasystem zu Grunde, wobei mittels komplexer Modelle das Klima in seiner Dynamik und die Folgen des Klimawandels verstanden werden sollen. Dabei gibt es nicht nur eine mögliche Entwicklung anhand derer potentielle Auswirkungen auf die Umwelt abgelesen werden können. Entscheidend ist natürlich, wie und mit welchen Daten derartige Modelle gefüttert werden, um komplexe Wirkungen des Klimasystems und deren Rückkopplung mit weiteren Komponenten (u. a. Kohlendioxidausstoß, Wasserhaushalt sozio-ökonomische Faktoren, Energiepolitik) abzubilden. Diese werden in quantitative Aussagen wie atmosphärischer Kohlendioxidgehalt und schließlich Klimaentwicklung übersetzt (vgl. Pompe et al. 2011; Spangenberg et al. 2012). Das Ganze ist natürlich kein Blick in die Glaskugel. Es handelt sich nicht um Vorhersagen, wie die Zukunft aussieht oder aussehen könnte. Szenarien sind Gedankenexperimente, die zwar hoch komplex auf der Grundlage vieler Daten erstellt werden aber letztlich nur eine Variante einer möglichen Entwicklung unter gegebenen Voraussetzungen und Eingangsdaten darstellen (Pompe et al. 2009; Spangenberg 2012). Die Arbeit mit Szenarien kann dazu beitragen, Prozesse und Muster zu verstehen und einzelne Ursachen und Wirkungen auf Ökosysteme abzuschätzen. Die Mehrzahl der Klimaszenarien basieren auf Daten des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) und Emissionsszenarien, die vereinfacht in vier Szenario-Familien unterteilt werden (IPCC 2007). Diese Szenarien reichen von einer Stabilisierung der „Treibhausgas“-Emissionen bis hin zu Varianten des ökonomischen Liberalismus und entsprechender Veränderungen in der Umwelt (vgl. hierzu Pompe et al. 2011; Spangenberg et al. 2012). Die zugrunde liegenden Annahmen für die ökonomischen Trends, der Bevölkerungsentwicklung, des technischen Fortschritts oder des Klimaschutzes variieren, so dass moderate (+1.8°C) bis extreme klimatische Änderungen (+4.0°C) der mittleren globalen Jahrestemperatur bis 2100 projiziert werden (IPCC 2007).

Konsens besteht darüber, dass ein Temperaturanstieg von mehr als 2°C bis zum Ende des Jahrhunderts zu enormen Auswirkungen auf Klima- und Ökosysteme führen könnte (IPCC 2014). Deshalb wurde das 2°C Limit auch als Leitplanke und Ziel in der Klimapolitik definiert (UNFCCC 2010).

In den letzten Jahren gibt es Bestrebungen kombinierte Effekte von Landnutzungs- und Klimaänderungen zu analysieren (vgl. Jetz et al. 2007; de Chazal und Rounsevell 2009). Natürlich hängen die Ergebnisse von Landnutzungsszenarien ebenso wie Klimaszenarien stark von den Eingangsparametern ab, die in ein Modell gegeben werden.

Änderungen der globalen Handelsstrategie können so großen Einfluss auf die regionalen Landnutzungstypen haben (z. B. der Anbau von Bioenergiepflanzen, die Nahrungsmittelproduktion). Über alle Szenarien hinweg, die bis 2080 für Europa und kombiniert mit den o. g. IPCC Emissionsszenarien vorliegen, wird generell eine Abnahme von Acker- und Grasland projiziert (Rounsevell et al. 2006). Für die Produktion von Rohstoffen (vor allem für die Bioenergieerzeugung) und Waldflächen wird eine Zunahme projiziert.

Es existiert eine Vielzahl von Studien, die Effekte des Klimawandels (Parmesan et al. 2003; Thuiller et al. 2005; Walther et al. 2005) oder Landnutzungswandels (Poschlod et al. 2005; Reidsma et al. 2006; de Lima et al. 2012) auf die Biodiversität untersuchen. Als Hilfsmittel dienen u. a. Computer-gestützte Modelle. Hier werden mit Hilfe wahrscheinlicher Szenarien Verbreitungsänderungen von Arten abgebildet. Diese können anhand von potentiellen Indikationen in die Naturschutzpolitik fließen. Zur Verbesserung der Informationslage zu den Risiken für die Flora in Deutschland werden in der vorliegenden Arbeit Auswirkungen der beiden stärksten Treiber Klima- und Landnutzungswandel (Sala et al. 2000) quantifiziert. Dafür werden drei Szenarien eingesetzt: (i) ein „Nachhaltigkeitsszenario“ (SEDG, Sustainable Europe Development Goal, Temperaturerhöhung in Europa um 2,4°C), (ii) ein Szenario mittlerer Veränderungen mit der Fortsetzung aktueller politischer Strategien und der Ausrichtung auf den technischen Fortschritt in der Klimaanpassung (BAMBU, Business As Might Be Usual, +3,1°C) und (iii) ein Extremszenario (GRAS, GRowth Applied Strategy, +4,1°C), das auf wirtschaftlichen Liberalismus basiert (Settele et al. 2008).

Ökologische Nischenmodelle

Um zu verstehen, wie Pflanzen und Ökosysteme aktuell und bei fortschreitendem Klimawandel reagieren, braucht es theoretische Konzepte. Es gibt unterschiedliche Ansätze, die auf die mathematische Beschreibung von Zusammenhängen in der Natur abzielen (Guisan und Zimmermann 2000): Prozessbasierte oder mechanistische Modelle werden eingesetzt, um möglichst detailliert funktionelle Zusammenhänge zum Beispiel für Wachstum, Populationsdynamik, Sukzession oder Vegetationsdynamik (vgl. Kühn et al. 2009) zu beschreiben. Dieser Typ der Modellierung kann zwar ökologische Prozesse gut abbilden, aber ist aufwändig zu parametrisieren (vgl. Kühn et al. 2009). Um für eine Vielzahl von Arten Klimawirkungen abzuschätzen, steht deshalb ein weiteres Werkzeug

zur Verfügung. So genannte statistische Modelle erlauben es, mittels verschiedener statistischer Herangehensweisen Muster aktueller Pflanzenverbreitungen zu verstehen. Darüber hinaus kann der Nutzer auch Projektionen für die Zukunft unter veränderten Umweltbedingungen ableiten (Pearson und Dawson 2003; Kühn et al. 2009). So wurden Modelle entwickelt, welche die Verbreitung von Arten (ihr Areal) mit Umweltfaktoren in Beziehung setzen. Ihren Ursprung haben diese Modelle bereits in den frühen 80er Jahren des letzten Jahrhunderts (Box 1981) und sind in ihrer einfachsten Form (i. e. S. bioklimatische Modellierung) in ihrer ökologischen Theorie dem Konzept der fundamentalen ökologischen Nische (vgl. Hutchinson 1957; Person und Dawson 2003) zuzuordnen. Aus der Verschneidung von beobachteten Vorkommen/Nichtvorkommen mit weiteren Umweltfaktoren können realisierte Nischen berechnet werden. Mit Hilfe gemessener Variablen (z. B. Klimaparametern, Landnutzungsvariablen, Bodenfaktoren) werden diese im geografischen Raum projiziert (aus Kühn et al. 2009). Die Modelle können bei mehreren Fragestellungen eingesetzt werden, u. a. helfen, das Vorkommen und Nicht-Vorkommen von Pflanzen im geografischen Raum zu erklären oder mögliche Auswirkungen des Klimawandel zu untersuchen. Unter der Annahme, dass die Beziehung zwischen den einzelnen Umweltparametern und der Art konstant bleibt, lassen sich so mögliche Verbreitungsgebiete unter Klimawandel ableiten (vgl. Kühn et al. 2009; Pompe et al. 2011). Mit dieser Methode können vergleichsweise schnell für eine Vielzahl von Arten Berechnungen durchgeführt werden. Von Nachteil ist, dass dabei nicht alle ökologischen und biologischen Prozesse einbezogen werden. Derartige Verfahren sind somit nicht unkritisch zu bewerten. Der Nutzer nimmt in Kauf, dass biotische Interaktionen (z. B. Konkurrenz, Fraß), mikro-evolutionäre Veränderungen oder innerartliche Plastizität nicht betrachtet werden (Kühn et al. 2009; Kissling und Montoya 2011; Schweiger et al. 2012). Fehler können zusätzlich in Abhängigkeit zur Verfügung stehender Daten und der Datenverarbeitung auftreten. Die Wahl der Eingangsparameter (z. B. die Auswahl der beschreibenden Umweltvariablen) kann wesentlichen Einfluss auf die Güte des Modells haben. Verbreitungsmuster können möglicherweise nicht gut beschrieben werden, falls Arten noch nicht alle potenziell besiedelbaren Bereiche erreicht haben - i. e. S. ihre nacheiszeitliche Ausbreitung noch nicht abgeschlossen haben (Svenning et al. 2008). Modellprojektionen können voneinander abweichen, je nachdem auf welcher geografischen Skala und Auflösung gearbeitet wird (Randin et al. 2009; Pompe et al. 2011). D. h., erfasst der Nutzer nicht den kompletten Umweltgradienten, um das

Verbreitungsgebiet einer Art mit den Umweltparametern abzugleichen, können bei der Extrapolation in die potentiellen „Zukünfte“ Klimatoleranzen unterschätzt und damit das Risiko für eine Art unter Klimawandel an Areal zu verlieren, überschätzt werden (Pompe et al. 2009). Eine räumliche Extrapolation mit diesem Verfahren ist somit nicht für jede Art möglich, was eine Lücke für die Bewertung von Risiken in der Liste der Pflanzenarten hinterlässt. Nicht zuletzt spielt beim Einsatz o. g. Methoden die Wahl des statischen Analyseverfahrens eine Rolle. Es ist sinnvoll, hier zu unterscheiden, ob ein Modell primär zum Verstehen aktueller Verbreitungsmuster genutzt werden soll und damit komplexer in seiner Datengrundlage und Wahl der statistischen Methode sein kann oder zur Extrapolation in die Zukunft genutzt wird (Randin et al. 2006; Elith und Leathwick 2009; Marmion et al. 2009; Peterson et al. 2011; Araújo und Townsend Peterson 2012; Heikkinen et al. 2012). In den letzten Jahren gibt es daher Bestrebungen, statistische Methoden weiterzuentwickeln, um deren Vorhersagekraft zu verbessern (u. a. gibt es Ansätze biotische Interaktionen einzubeziehen, Kissling et al. 2012; Schweiger et al. 2012; Wisz et al. 2013; Araújo und Rozenfeld 2014; Silva et al. 2014). Weitere Arbeiten beschäftigen sich mit einem besseren mechanistischen Verständnis von Verbreitungsmustern (Rickebusch et al. 2008; Gouveia et al. 2013; Leroux et al. 2013). Sicher wird es hier in Zukunft weitere Entwicklungen geben.

Zusammenfassend bergen der generelle Drang zur Vereinfachung der Natur durch Modelle, Fehler in Daten oder Modellierungsansatz und die Missachtung von ökologischen Prozessen in rein korrelativen Ansätzen Unsicherheiten (vgl. Kühn et al. 2009). Daneben ist zu berücksichtigen, dass Szenarien als quantitative Projektionen auch auf einer starken Vereinfachung der Prozesse des Klimasystems durch Klimamodelle beruhen (vgl. hierzu Spangenberg et al. 2012). Generell ist deshalb zu beachten, dass es sich ausschließlich um Projektionen - nicht Vorhersagen - auf der Grundlage von Modell- bzw. Szenarioannahmen handelt (z. B. Keyfitz 1972). Dies ist bei der Auswertung der vorliegenden Arbeit immer zu berücksichtigen (Dormann 2007).

Artenpool

Falls sich Vegetationsgrenzen unter Klimawandel verschieben, bedeutet das gleichzeitig, dass neben positiver oder negativer Wirkungen auf die Wuchsorte bzw. das Vorkommen einheimischer Pflanzenarten bisher gebietsfremde Arten in ihrer Ausbreitung gefördert werden könnten. Dabei können die Pflanzen aus den Gebieten Europas entstammen, die

heute dem „künftigen“ Klima in Deutschland entsprechen (sog. Klima-analoge Räume, vgl. Ohlemüller et al. 2006). Szenarienauswertungen von Metzger et al. (2008) ergaben, dass sich Klimatypen in Europa nordwärts bis zum Ende des Jahrhunderts verschieben, wodurch Arten mediterraner Gebiete in Mitteleuropa profitieren könnten. Wenn es unter Klimawandel zu einer Verschiebung von Klimatypen kommt, ist davon auszugehen, dass keine kompletten Vegetationstypen wandern. Regionale Unterschiede im Grad der Klimaänderung einzelner Parameter könnten zu weiteren unterschiedlichen Entwicklungen auf räumlicher Ebene (Garcia et al. 2014) und damit auch zu Änderungen im Artenpool führen (vgl. Zobel 1992; 1997). Biodiversitätsänderungen in Deutschland werden dadurch auch auf der Ebene der Einwanderung von bisher gebietsfremden Arten wahrscheinlich. Langfristig könnten dadurch besonders geschützte Biotope und Pflanzengemeinschaften (Artenpool) starken Veränderungen unterliegen (Pompe et al. 2011). Als Folge des Klimawandels kann es Unterschiede in der räumlichen und zeitlichen Dimension geben, was von Unterschieden im Grad der regionalen Klimaentwicklung und individuellen Artreaktionen (z. B. Ausbreitungsstrategien) abhängig ist. Negative Effekte sind vor allem bei Trockenheit für Feuchtlebensräume zu erwarten und demnach der darin vorkommenden Pflanzenarten. Auswirkungen auf den aktuellen Artenpool, Artengruppen und Biotop-spezifische Gemeinschaften (z. B. Wälder, Gebüsche, Magerasen, Wiesen und Weiden) sollten deshalb vor diesem Hintergrund stärker untersucht werden (Pompe et al. 2011).

Pflanzeigenschaften

Pflanzeigenschaften können der Schlüssel zum Verstehen pflanzengeografischer Wandlungen sein. Gewöhnlicherweise teilt man dazu Pflanzen in funktionelle Typen ein, was z. T. auf der Basis von morphologischen, physiologischen, biochemischen Eigenschaften basiert (Woodward und Cramer 1996; Lavorel et al. 2007). Im einfachsten Fall werden so generelle Muster von Pflanzengruppen oder Vegetationstypen in Bezug zu ihren Pflanzeigenschaften und unter Klimawandel auf biogeografischer Ebene analysiert (vgl. Kühn et al. 2009).

Klimareaktionen von Pflanzen, die mit Hilfe von räumlich expliziten Arealen (vgl. ökologische Nischenmodellierung) erstellt sind, zeigten bereits statistische Zusammenhänge zu Pflanzeigenschaften oder geografischen Charakteristika (vgl. Broennimann et al. 2006). Beispielsweise wurde nachgewiesen, dass Arten, die

mehrere Florenzzonen besiedeln bzw. deren klimatische Nische größer ist, flexibler unter Klimawandel reagierten (Thuiller et al. 2004; Thuiller et al. 2005; Broennimann et al. 2006). Es existieren somit bereits auf geografischer Ebene Muster, die eindeutig Zusammenhänge zwischen Arteigenschaften (z. B. Blattmerkmale) und dem Klima/Klimawandel widerspiegeln (Barboni et al. 2004; Küster et al. 2011). Pflanzeigenschaften könnten somit als Wegweiser möglicher Artreaktionen dienen bzw. als methodische Ergänzung in der Risikobewertung eingesetzt werden (Pompe et al. 2009). Ob eine Art stark oder weniger stark auf das Klima reagiert, kann natürlich von mehreren Pflanzeigenschaften abhängig sein (Barboni et al. 2004). Dies können Habitatpräferenzen sein, ökologisch-biologische Eigenschaften unterschiedlicher Lebensformtypen, Blattmerkmale, Pflanzenstrategien (vgl. Klotz et al. 2002) oder Ellenberg-Zeigerwerte (Ellenberg et al. 1991). Merkmale, die für die Reaktion einer Art unter Klimawandel entscheidend sind, müssen nicht für andere Arten zutreffen bzw. könnten in Abhängigkeit weiterer Faktoren beeinflusst sein. Falls derartige Interaktionen in Modellen berücksichtigt werden, könnte dies die „Vorhersagekraft“ von Modellen erheblich steigern (Küster et al. 2008). Modelle wären damit ein diagnostisch effizientes Werkzeug (Barboni et al. 2004). Derartige Untersuchungen mehrerer Faktoren und ihrer Zusammenhänge mit dem Klimawandel sind bisher selten (Pompe et al. 2011). Die Rolle von Interaktionen zwischen einzelnen Pflanzenmerkmalen oder/und ökologischen Charakteristika sollte deshalb in der Klimawirkungsforschung stärker untersucht und Merkmale hinsichtlich ihrer Eignung als Indikator geprüft werden (vgl. Pompe et al. 2009). Das würde auch für die Pflanzen eine Rolle spielen, für die bisher nur unzureichend Informationen über deren tatsächliche Verbreitungsgebiete vorliegen, um o. g. ökologische Nischenmodelle zur Risikobewertung einzusetzen.

Zielstellung

Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist die Gefährdungsabschätzung für Pflanzenarten in Deutschland unter potentielltem Klima- und Landnutzungswandel. Dafür werden vier methodische Ansätze kombiniert. Die folgenden Kapitel (2-5) präsentieren diese in Einzelarbeiten, die jeweils zu einem besseren Verständnis von möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora beitragen und aufeinander aufbauend ein komplexes Bild möglicher pflanzengeografischer Änderungen widerspiegeln. Im Detail werden hierfür:

- modellierte Änderungen der Klimatypen Deutschlands und deren Bedeutung für die einheimische Flora analysiert. Dafür werden Klima-analoge Regionen in Europa als Quelle neuer Artenpools für Deutschland definiert.
- mit Hilfe von ökologischen Nischenmodellen Arealszenarien unter Klimawandel in Deutschland projiziert und Veränderungen artspezifisch erfasst. Mögliche Änderungen des einheimischen Artenpools werden durch die Einwanderung neuer Florenelemente unter Klimawandel quantifiziert.
- Auswirkungen auf Biotop-spezifische Gemeinschaften identifiziert,
- die Zusammenhänge zwischen biologischen und ökologischen Pflanzenmerkmalen mit Mustern von projizierten Arealveränderungen unter Klimawandel identifiziert. Über den Schluss auf die Rolle von Pflanzenmerkmalen unter Klimawandel können so auch Projektionen für Pflanzenarten durchgeführt werden, für die aktuell nur unzureichende Verbreitungsangaben vorliegen,

In Kapitel 2 wird gezeigt, wie Klimaszenarien genutzt werden können, um auf geografischer Ebene potentielle Artenpools zu identifizieren. Es werden dafür erstmals Florenelemente von ggf. neu in Deutschland auftretenden Klimatypen (räumliche Auflösung 10'×10') in Szenarien (2071-80) aus den Gebieten entnommen, die den Klimabedingungen für den Zeitraum 1961-90 in Regionen Europas entsprechen. Hierfür werden exemplarisch für die Iberische Halbinsel analoge Klimatypen zu Deutschland unter drei Klimawandelszenarien identifiziert und der entsprechende Artenpool für Deutschland quantifiziert und ökologisch charakterisiert.

In Kapitel 3 werden mittels ökologischer Nischenmodelle für Pflanzenarten in Deutschland klimatisch passende Räume in drei alternativen Klima- und Landnutzungsszenarien (2051-80) mit klimatisch geeigneten geografischen Räumen des Zeitraums 1961-90 verglichen. Rein bioklimatische Modelle (vgl. Thuiller et al. 2005) werden um Boden- und Landnutzungsinformationen zur Verbesserung der Vorhersagekraft von statistischen Modellen ergänzt. Die Modelle werden auf Europäischer Skala (räumliche Auflösung 50×50km²) kalibriert und räumlich für drei Szenarien extrapoliert (ca. 130 km² je Rasterzelle). So können erstmals für die deutsche Flora Einzelartenreaktionen (i. e. S. potentieller Arealverlust und -gewinn, n=550), aber auch von derzeit gebietsfremden Arten (n=295) mögliche Verschiebungen von Verbreitungsgebieten quantifiziert werden.

Der Grad der Veränderung klimatisch passender Regionen in Deutschland kann für Arten bestimmter Biotope stärker bzw. schwächer ausfallen (Kapitel 4). Aussagen über positive oder negative Reaktionen der Einzelarten aus Kapitel 3 werden quantifiziert, um mögliche Risiken für die Flora in den terrestrischen Hauptbiotypen (vgl. Haeupler 2002 in Klotz 2002) zu untersuchen. Zudem werden Indikationen für besonders geschützte Arten getroffen (Ludwig und Schnittler 1996). Es wird quantifiziert, wie sich der modellierte Artenpool für diese Biotypen unter drei verschiedenen Klima- und Landnutzungsszenarien unterscheidet. Damit können erstmals Risiken für die regionalen Vorkommen von Pflanzengemeinschaften auf der Basis einer umfassenden Datengrundlage abgeschätzt werden.

In Kapitel 5 wird in einem neuartigen Verfahren der Einsatz von Pflanzeigenschaften für die Risikobewertung unter Klimawandel untersucht. Das theoretische Konzept beruht auf der Annahme, dass biologisch-ökologische Eigenschaften einer Pflanze die Widerstandsfähigkeit oder Anpassungsfähigkeit an veränderte Umweltbedingungen bestimmen. Davon hängt also ab, ob eine Pflanzenart unter dem projizierten Klimawandel „erfolgreich“ ist und ihre Verbreitungsgrenzen verschieben könnte oder im geografischen Raum an ihre Grenzen gelangt und als „Verlierer“ des Klimawandels Areal reduziert. Im statistischen Sinne sollten deshalb Pflanzenmerkmale Muster der Arealszenarien einzelner Arten erklären können. Um dies zu testen, werden biologische und ökologische Pflanzenmerkmale (z. B. Blattmerkmale, Strategietypen, Ellenberg-Zeigerwerte, Bestäubertypen) in Bezug zu modelliertem Arealverlust und Arealgewinn von 195 Pflanzenarten aus Kapitel 3 ausgewertet. Die statistischen Informationen werden in einem Modell genutzt, um potentielle klimabedingte Reaktionen für weitere 688 Arten zu projizieren, welche nicht durch räumliche Extrapolation (Kapitel 3) produziert werden können. Dies ist u. a. der Fall, wenn aufgrund mangelnder Datengrundlage über Verbreitungsinformationen räumlich explizite Projektionen mit Hilfe ökologischer Nischenmodelle ungeeignet sind.

Kapitel 6 fasst die wichtigsten Ergebnisse aus Kapitel 2 bis 5 in einer abschließenden Diskussion zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf.

Literaturverzeichnis

- Araújo MB, Rozenfeld A (2014) The geographic scaling of biotic interactions. *Ecography* 37(5): 406-415
- Araújo MB, Townsend Peterson A (2012) Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology* 93(7): 1527-1539
- Badeck FW, Pompe S, Kühn I, Glauer A (2008) Zeitlich hochauflösende Klimainformationen auf dem Messtischblattraster und für Schutzgebiete in Deutschland. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 40(10): 343-345
- Barboni D, Harrison SP, Bartlein PJ, Jalut G, New M, Prentice IC, Sacherz-Goñi M-F, Spessa A, Davis B, Stevenson AC (2004) Relationships between plant traits and climate in the Mediterranean region: a pollen data analysis. *Journal of Vegetation Science* 15(5): 635-64
- Berger S, Soehlke G, Walther GR, Pott R (2007) Bioclimatic limits of cold-hardy evergreen broad-leaved species at their northern distributional limit in Europe. *Phytocoenologia* 37(3-4): 523-539
- Box EO (1981) *Macroclimate and plant forms: an introduction to predictive modelling in phytogeography*. Junk, The Hague
- Broennimann O, Thuiller W, Hughes G, Midgley GF, Alkemade JMR, Guisan A (2006) Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change. *Global Change Biology* 12(6): 1079-1093
- Cardinale BJ, Duffy JE, Gonzalez A, Hooper DU, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace GM, Tilman D, Wardle DA et al. (2012) Biodiversity loss and its impact on humanity 486: 59-67
- CBD (2002) *Convention on biological diversity*, Rio de Janeiro
- Chapin III FS, Zavaleta ES, Eviner VT, Naylor RL, Vitousek PM, Reynolds HL, Hooper DU, Lavorel S, Sala OE, Hobbie SE, Mack MC, Diaz S (2000) Consequences of changing biodiversity. *Nature* 405: 234-242
- de Chazal J, Rounsevell MDA (2009) Land-use and climate change within assessment of biodiversity change. *Global Environmental Change* 19(2) 306-315

- de Lima RF, Dallimer M, Atkinson PW, Barlow J (2012) Biodiversity and land-use change: understanding the complex responses of an endemic-rich bird assemblage. *Diversity and Distributions* 19(4): 411-422
- Dormann CF (2007) Promising the future? Global change projections of species distributions. *Basic and Applied Ecology* 8(5): 387-39
- Dullinger S, Gattringer A, Thuiller W, Moser D, Zimmermann NE, Guisan A, Willner W, Plutzer C, Leitner M, Mang T et al. (2012) Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. *Nature Climate Change* 2: 619-622
- Elith J, Leathwick JR (2009) Species distribution models: ecological explanation versus prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 40: 677-697
- Ellenberg H, Weber HE, Düll R, Wirth V, Werner W, Paulißen D (1991) Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica* 1818, Verlag Erich Goltze, Göttingen
- Flynn DF, Gogol-Prokurat M, Nogeire T, Molinari N, Richers BT, Lin BB, Simpson N, Mayfield MM, DeClerck F (2009) Loss of functional diversity under land use intensification across multiple taxa. *Ecology Letters* 12(1): 22-23
- Garcia RA, Cabeza M, Rahbek C, Araújo MB (2014) Multiple Dimensions of Climate Change and their implications for biodiversity. *Science* 344(6183), DOI: 10.1126/science.1247579
- Gouveia SF, Hortal J, Tejedo M, Duarte H, Cassemiro FAS, Navas CA, Diniz-Filho JAF (2013) Climatic niche at physiological and macroecological scales: the thermal tolerance–geographical range interface and niche dimensionality. *Global Ecology and Biogeography* 23(4): 446-456
- Guisan A, Zimmermann, NE (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3): 147-186
- Haeupler H (2002) Soziologische Bindung der Arten . In: Klotz S, Kühn I, Durka W (eds) *BIOLFLOR - Eine Datenbank zu biologisch-ökologischen Merkmalen der Gefäßpflanzen in Deutschland*. Schriftenreihe für Vegetationskunde 38: 273-281
- Heikkinen RK, Marmion M, Luoto M (2012) Does the interpolation accuracy of species distribution models come at the expense of transferability? *Ecography* 35(3): 276-288

- Hausrath H (1911) Pflanzengeografische Wandlungen der Deutschen Landschaft. Wissenschaft und Hypothese XIII, B.G. Teubner, Leipzig Berlin
- Hooper DU, Adair EC, Cardinale BJ, Byrnes JEK, Hungate BA, Matulich KL, Gonzalez A, Duffy JE, Gamfeldt L, O'Connor MI (2012) A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature* 486: 105-108
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA (eds) (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, Cambridge University Press
- Hutchinson GE (1957) Concluding remarks. *Cold Spring Harbour Symposium on Quantitative Biology* 22: 415-427
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland
- IPCC (2013) *Summary for Policymakers*. In Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Jetz W, Wilcove DS, Dobson AP (2007) Projected impacts of climate and land-use change on the global diversity of birds. *PLoS Biol* 5(6): 1211-1219
- Keyfitz N (1972) On Future Population. *Journal of the American Statistical Association* 67: 347-363
- Kissling WD, Dormann CF, Groeneveld J, Hickler T, Kühn I, McInerney GJ, Montoya JM, Römermann C, Schiffers K, Schurr FM et al. (2012) Towards novel approaches to modelling biotic interactions in multispecies assemblages at large spatial extents. *Journal of Biogeography* 39(12): 2163-2178
- Klotz S, Kühn I, Durka W (2002) *Bioflor-Eine Datenbank mit biologisch-ökologischen Merkmalen zur Flora von Deutschland*. Schriftenreihe für Vegetationskunde 38. Bundesamt für Naturschutz, Bonn
- Korn H, Epple C (eds) (2006) *Biologische Vielfalt und Klimawandel - Gefahren, Chancen, Handlungsoptionen*. BfN-Skripten 148. Bonn Bad Godesberg

- Kühn I, Pompe S, Trautmann S, Böhning-Gaese K, Rabitsch W (2013) Arealänderungen in der Zukunft. In Essl F, Rabitsch W (eds) Biodiversität und Klimawandel, Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa. Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Kühn I, Vohland K, Badeck F, Hanspach J, Pompe S, Klotz S (2009) Aktuelle Ansätze zur Modellierung der Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die biologische Vielfalt. *Natur und Landschaft* 84(1): 8-12
- Küster EC, Bierman SM, Klotz S, Kühn I (2011) Modelling the impact of climate and land use change on the geographical distribution of leaf anatomy in a temperate flora. *Ecography* 34(3): 507-518
- Küster EC, Kühn I, Bruelheide H, Klotz S (2008) Trait interactions help explain plant invasion success in the German flora. *Journal of Ecology* 96(5): 860-868
- Lavorel S, Diaz S, Cornelissen JHC, Garnier E, Harrison SP, McIntyre S, Pausas JG, Pérez-Harguindeguy N, Roumet C, Urcelay C (2007) Plant Functional Types: Are We Getting Any Closer to the Holy Grail? In: Canadell JG, Pataki D, Pitelka LF (eds) *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. The IGBP Series, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Leroux SJ, Larrivé M, Boucher-Lalonde V, Hurford A, Zuloaga J, Kerr JT, Lutscher F (2013) Mechanistic models for the spatial spread of species under climate change. *Ecological Applications* 23(4): 815-828
- Leuschner C, Schipka F (2004) *Vorstudie Klimawandel und Naturschutz in Deutschland*. BfN-Skripten 115. Bonn Bad Godesberg
- Lübbert J, Berger S, Walter GR (2008) Klimatisch bedingt treten neue Pflanzenarten auf. In Lozán JL (eds) *Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken*. Wissenschaftliche Auswertungen und GEO Verlag, Hamburg: 82-85
- Ludwig G, Schnittler M (1996) Rote Liste gefährdeter Pflanzen Deutschlands. *Schriftenreihe für Vegetationskunde* 28: 21-187
- Marmion M, Parviainen M, Luoto M, Heikkinen RK, Thuiller W (2009) Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions* 15(1): 59-69
- MEA (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*. Island Press, Washington

- Menzel A, Sparks TH, Estrella N, Koch E, Aasa A, Ahas R, Alm-Kübler K, Bissolli P, Braslavska O, Briede A et al. (2006) European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12(10): 1969-1976
- Menzel A, Seifert H, Estrella N (2011) Effects of recent warm and cold spells on European plant phenology. *International Journal of Biometeorology* 55(6): 921-932
- Metzger MJ, Bunce RGH, Leemans R, Viner D (2008) Projected environmental shifts under climate change: European trends and regional impacts. *Environ Conserv* 35(1): 64-75
- Ohlemüller R, Gritti ES, Sykes MT, Thomas CD (2006) Towards European climate risk surfaces: the extent and distribution of analogous and non-analogous climates 1931–2100. *Global Ecology and Biogeography* 15(4): 395-405
- Parmesan C (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu The Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37: 637-669
- Parmesan C, Yohe G (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37-42
- Pauli H, Gottfried M, Dullinger S, Abdaladze O, Akhalkatsi M, Alonso JLB, Coldea G, Dick J, Erschbamer B, Calzado RF et al. (2012) Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. *Science* 336(6079): 353-355
- Pearson R, Dawson TP (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12: 361-371
- Peterson, AT, Soberón J, Pearson RG, Anderson RP, Nakamura M, Martinez-Meyer E, Araújo MB (2011) *Ecological niches and geographical distributions*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA
- Pompe S (2004) Sukzession in aufgelassenen Weinbergen des Mittleren Saaletals bei Jena. *Hercynia* 37(2): 175-199
- Pompe S, Berger S, Bergmann J, Badeck F, Lübbert J, Klotz S, Rehse AK, Söhlke G, Sattler S, Walther GR, Kühn I (2011) Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland. *BfN-Skripten* 304. Bonn Bad Godesberg

- Pompe S, Berger S, Walther GR, Badeck F, Hanspach J, Sattler S, Klotz S, Kühn I (2009) Mögliche Konsequenzen des Klimawandels für die Pflanzenwelt in Deutschland. *Natur und Landschaft* 84(1): 2-7
- Poschlod P, Bakker JP, Kahmen S (2005) Changing land use and its impact on biodiversity. *Basic and Applied Ecology* 6(2): 93-98
- Randin CF, Dirnböck T, Dullinger S, Zimmermann NE, Zappa M, Guisan A (2006) Are niche-based species distribution models transferable in space? *Journal of Biogeography* 33: 1689-1703
- Reidsma P, Tekelenburg T, van den Berg M, Alkemade R (2006) Impacts of land-use change on biodiversity: An assessment of agricultural biodiversity in the European Union. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114: 86-102
- Rickebusch S, Thuiller W, Hickler T, Araujo MB, Sykes MT, Schweiger O, Lafourcade B (2008) Incorporating the effects of changes in vegetation functioning and CO₂ on water availability in plant habitat models. *Biology Letters* 4(5): 556–559
- Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin FS, Lambin EF, Lenton TM, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber HJ et al. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472-475
- Root TL, Price JT, Hall KR, Schneider SH, Rosenzweig C, Pounds JA (2003) Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421: 57-60
- Rounsevell M, Reginster I, Araújo MB, Carter TR, Dedoncker N, Ewert F, House JI, Kankaanpää, Leemans R, Metzger MJ et al. (2006) A coherent set of future land use change scenarios for Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114(1): 57-68
- Sala OE, Chapin FS, Armesto JJ, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke LF, Jackson RB, Kinzig A et al. (2000) Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287(5459): 1770-1774
- Schweiger O, Heikkinen RK, Harpke A, Hickler T, Klotz S, Kudrna O, Kühn I, Pöyry J, Settele J (2012) Increasing range mismatching of interacting species under global change is related to their ecological characteristics. *Global Ecology and Biogeography* 21(1): 88-99

- Settele J, Kudrna O, Harpke A, Kühn I, van Swaay C, Verovnik R, Warren M, Wiemers M, Hanspach J, Hickler T et al. (2008) Climatic Risk Atlas of European Butterflies. Pensoft, Sofia
- Silva DP, Gonzalez VH, Melo GAR, Lucia M, Alvarez LJ, de Marco P (2014) Seeking the flowers for the bees: Integrating biotic interactions into niche models to assess the distribution of the exotic bee species *Lithurgus huberi* in South America. *Ecological Modelling* 273: 200-209
- Spangenberg JH, Bondeau A, Carter TR (2012) Scenarios for investigating risks to biodiversity. *Global Ecology and Biogeography* 21: 5-18
- Svenning JC, Normand S, Skov F (2008) Postglacial dispersal limitations of widespread forest plant species in nemoral Europe. *Ecography* 31(3): 316-326
- Thomas JA, Telfer MG, Roy DB, Preston CD, Greenwood JJD, Asher J, Fox R, Clarke RT, Lawton JH (2004) Comparative losses of British butterflies, birds, and plants and the global extinction crisis. *Science* 303(5665): 1879-1881
- Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB, Sykes MT, Prentice IC (2005) Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 102(23): 8245-8250
- Thuiller W, Lavorel S, Midgley GF, Lavergne S, Rebelo AG (2004) Relating plant traits and species distributions along bioclimatic gradients for 88 *Leucadendron* species in the Cape Floristic Region. *Ecology* 85(6): 1688-1699
- UNFCCC (2010) Outcome of the work of the ad hoc working group on long-term cooperative action under the convention. Draft decision-/CP.16. Cancun. http://unfccc.int/files/meetings/cop_16/application/pdf/cop16_1ca.pdf, 02.05.2014
- Walther GR, Berger S., Sykes MT (2005) An ecological 'footprint' of climate change. *Proceedings of the Royal Society B* 272(1571): 1427-1432
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin J, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-295
- Wisz MS, Pottier J, Kissling WD, Pellissier L, Lenoir J, Damgaard CF, Dormann CF, Forchhammer MC, Grytnes J-A, Guisan A et al. (2013) The role of biotic interactions in shaping distributions and realised assemblages of species: implications for species distribution modelling. *Biological Reviews* 88(1): 15-30

Woodward FI (1987) Climate and plant distribution. Cambridge University Press, Cambridge

Woodward FI, Cramer W (1996) Plant functional types and climatic changes: introduction. *Journal of Vegetation Science* 7: 306-308

Ziegler C (2011) Phänologische Beobachtungen an Buchen. *Natur in NRW* 2011(1): 9-15

Zobel M (1992) Plant-species coexistence - the role of historical, evolutionary and ecological factors. *Oikos* 65: 314-320

Zobel M (1997) The relative role of species pools in determining plant species richness. An alternative explanation of species coexistence? *Trends in Ecology and Evolution* 12(7): 266-269

2 The Iberian Peninsula as a potential source for the plant species pool in Germany under climate change

Jessica Bergmann, Sven Pompe, Ralf Ohlemüller, Martin Freiberg, Stefan Klotz, Ingolf Kühn

Plant Ecology (2009), 207: 191-201.

Abstract

The application of niche-based modelling techniques to plant species has not been explored for the majority of taxa in Europe, primarily due to the lack of adequate distributional data. However, it is of crucial importance for conservation adaptation decisions to assess and quantify the likely pool of species capable of colonising a particular region under altered future climate conditions. We here present a novel method that combines the species pool concept and information about shifts in analogous multidimensional climate space. This allows us to identify regions in Europe with a current climate which is similar to that projected for future time periods in Germany. We compared the extent and spatial location of climatically analogous European regions for three projected greenhouse gas emission scenarios in Germany for the time period 2071-2080 (+2.4°C, +3.3°C, +4.5°C average increase in mean annual temperature) to those of the recent past in Europe (1961-90). Across all three scenarios, European land areas which are characterised by climatic conditions analogue to those found in Germany decreased from 14% in 1961-1990 to ca. 10% in 2071-2080. All scenarios show disappearing current climate types in Germany, which can mainly be explained with a general northwards shift of climatically analogous regions. We estimated the size of the potential species pool of these analogous regions using floristic inventory data for the Iberian Peninsula as 2,354 plant species. The identified species pool in Germany indicates a change towards warmth and drought adapted southern species. About one-third of the species from the Iberian analogous regions are currently already present in Germany. Depending on the scenario used, 1,372 (+2.4°C average change of mean annual temperature), 1,399 (+3.3°C) and 1,444 (+4.5°C) species currently not found in Germany, occur in Iberian regions which are climatically analogous to German 2071-80 climate types. We believe that our study presents a useful approach to illustrate and quantify the potential size and spatial distribution of a pool of species potentially colonising new areas under changing climatic conditions.

3 Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany

Sven Pompe, Jan Hanspach, Franz Badeck, Stefan Klotz, Wilfried Thuiller, Ingolf Kühn
Biology Letters (2008), 4(5): 564-567

Abstract

We present niche-based modelling to project the distribution of 845 European plant species for Germany using three different models and three scenarios of climate and land use changes up to 2080. Projected changes suggested large effects over the coming decades, with consequences for the German flora. Even under a moderate scenario (approx. +2.2°C), 15-19% (across models) of the species we studied could be lost locally-averaged from 2995 grid cells in Germany. Models projected strong spatially varying impacts on the species composition. In particular, the eastern and southwestern parts of Germany were affected by species loss. Scenarios were characterized by an increased number of species occupying small ranges, as evidenced by changes in range-size rarity scores. It is anticipated that species with small ranges will be especially vulnerable to future climate change and other ecological stresses.

4 Investigating habitat-specific plant species pools under climate change

Sven Pompe, Jan Hanspach, Franz -W. Badeck, Stefan Klotz, Helge Bruelheide, Ingolf Kühn

Basic and Applied Ecology (2010), 11: 603-611.

Abstract

We used 474 European plant species to analyse the impacts of climate and land-use change on the composition of habitat-specific species pools in Germany. We quantified changes in the probability of occurrence of species in a grid cell using an ensemble of three statistical modelling techniques, namely generalized linear models (GLMs), generalized additive models (GAMs) and random forests (RFs), under three scenarios (average change +2.2, +2.9, and +3.8°C up to 2080). We evaluated the impact on single species occurrence and resulting species pools considering their affiliation to ten major terrestrial habitat types in both current (1961-90) and future projections (2051-80). Current habitat-specific species pools declined in size across all scenarios, e.g. by $24 \pm 13\%$ (mean \pm s.d.) under the most severe scenario. We show that species responses may strongly vary among scenarios and different habitats with a minimum average projected range loss of 14% ($\pm 18\%$; species typical to urban habitats under moderate climate change assumptions, average temperature increase +2.2°C) to a maximum average projected range loss of 56% ($\pm 29\%$; species assemblages from mountain communities below the alpine zone at +3.8°C). A separate analysis of species composition in habitat-specific species pools revealed a significant interaction between the scenario and the major habitat classes. We found a higher risk for habitat types with high conservation value characterised by a significant association between number of nationally endangered species and projected range loss in major habitats. Thus, habitat-specific management and application of measures favouring dispersal are required for mitigation of climate change impacts.

5 Using ecological and life-history characteristics for projecting species responses to climate change

Sven Pompe, Jan Hanspach, Franz Badeck, Stefan Klotz, Helge Bruelheide, Ingolf Kühn
(eingereicht, *Frontiers of Biogeography*)

Abstract

Assessing the impact of climate change on range dynamics is difficult in the absence of large-extent distribution data. We developed a novel two-step approach as a complement to biodiversity risk assessment: We established relationships between modelled range loss and gain of 195 plant species under an A1FI climate change scenario up to 2080 and ecological and life history traits namely life-form, leaf persistence, ecological strategy, pollen vector, Ellenberg indicator values, and characteristics derived from species ranges. The resulting coefficients were then used to predict climatic sensitivity for 688 plant species without spatially explicit distributional information. For those species, the models predicted a mean range loss of $34\pm 20\%$ (mean \pm standard deviation, $R^2=0.29$) and a mean range gain of $3\pm 4\%$ ($R^2=0.30$). Specifically, measures related to species distribution, such as range size, related significantly to both range loss and range gain. Other traits associated with range loss (e.g. life form, number of floristic zones) were not necessarily related to range gain (e.g. Ellenberg indicator of temperature), indicating two distinct ecological processes. We found interaction effects between moisture indicator values with life form for range loss and between moisture and temperature indicator values for range gain. This shows that the response of species to climate change are complex and context dependent. Thus, our results highlight the importance to incorporate trait interactions in models to assess risks of climate change.

6 Gesamtdiskussion

Szenarien

In den hier vorliegenden Einzelarbeiten wurden unter Berücksichtigung von projizierten Klima- und Landnutzungsänderungen in drei verschiedenen Szenarien mögliche Auswirkungen auf den floristischen Artenpool in Deutschland bis 2080 untersucht. Klimatische Trends weisen auf systematische Verschiebungen hin, wobei jahreszeitliche und regionale Besonderheiten auffallen (Zebisch et al. 2005; UBA 2007; Kapitel 3, 4). Der Süden und Südwesten Deutschlands zeigten bereits in den 90ern einen auffallenden Erwärmungstrend, wobei Wintertemperaturen erheblich stärker zunahm (z. B. um 2.3°C zwischen 1981-2000) als Temperaturen in den Sommermonaten (+0.7°C, Zebisch et al. 2005). Badeck et al. (2008) konnten bei Auswertungen von Klimadaten der Jahre 1951 bis 2003 zeigen, dass für Deutschland die Anzahl der Frosttage bereits statisch signifikant abnahm bzw. Frostereignisse unter -10°C seltener geworden sind. Klimaszenarien lassen auf einen weiteren Trend in diese Richtung schliessen (Badeck et al. 2008). Wintertemperaturen in Deutschland könnten sich weiter stärker erhöhen als das u. a. für die Jahresmitteltemperatur der Fall ist (Kapitel 2, 4). Auch bei international koordinierten Schutzanstrengungen kommt es fortschreitend zu Änderungen des Klimas (vgl. IPCC 2007; 2013), wobei in den hier vorliegenden Szenarien eine Jahresmitteltemperatur von ca. 2,2 bis 4,5°C je nach Grundannahme bis 2080 für Deutschland projiziert wird (Kapitel 2, 3, 4). Es ist zu beachten, dass der Grad der Erwärmung nicht alle Facetten klimatischer Änderungen widerspiegelt und im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur als theoretisches Konstrukt zur Veranschaulichung dient. Neben regionalen Unterschieden (Kapitel 2) konnten saisonale Besonderheiten der Klimaänderung nachgewiesen werden (Kapitel 4). Die Projektionen gehen so beispielsweise über alle Szenarien hinweg von einer Zunahme des Winterniederschlags (>15%) und einer Abnahme des Sommerniederschlags (>14%) aus (Kapitel 3). Über Vergleiche von Referenzperioden der Klimaentwicklung im letzten Jahrhundert (1961-90) mit den projizierten Entwicklungen des Klimas in drei Szenarien (2051-80) konnten potentielle Veränderungen von Klimatypen in Deutschland quantifiziert werden (Kapitel 2).

Mögliche biogeografische Effekte auf die Pflanzenwelt in Deutschland waren bisher nur wenig bekannt (vgl. Kapitel 1). Allerdings ist das Wissen darüber notwendig, um eventuelle Risiken für einzelne Arten und Lebensgemeinschaften in Biotopen unter

Klimawandel zu erkennen und auch die damit verbundenen Mechanismen zu verstehen (Badeck et al. 2007). Die Analyse Klima-analoger Räume gibt hierfür einen ersten Anhaltspunkt und macht vor allem die klimatische Dimension dieser potentiellen Auslenkung bis zum Ende des Jahrhunderts greifbar (Kapitel 2). Zwar wurden potentielle Artenpools nur exemplarisch für die Iberische Halbinsel quantifiziert, könnten aber für andere Regionen identifiziert werden. Die in dieser Arbeit vorliegenden Arealszenarien zeigen eine Neuordnung hin zu trockenheits-adaptierten und thermophilen Pflanzenarten (Kapitel 2, 3). Folglich können sich Verbreitungsgrenzen von Arten verschieben, die bisher durch das Klima in ihrer Ausbreitung limitiert waren. Im einfachsten Falle werden durch die Erhöhung der Temperatur kältesensitive Arten gefördert (Walter et al. 2002; Kapitel 2). Allerdings ergeben sich auch bei der Einhaltung des 2°C Zieles als definierte politische Leitplanke (UNFCCC 2010) negative Konsequenzen für die Flora in Deutschland, was in allen Einzelarbeiten nachgewiesen werden konnte. Die Änderungen des Klimas wirken dabei nicht proportional und Arealänderungen in den Szenarien steigen nicht-linear an (Kapitel 3, 4). Negative Effekte wie der Verlust von Areal könnten damit stärker zunehmen als sich klimatische Parameter ändern. Die Einzelarbeiten lassen hierbei auch Rückschlüsse auf regional unterschiedliche Trends in der Klimaentwicklung und Einflüsse auf den Artenpool zu. Das betrifft biogeografisch Regionen, in denen der Anteil von Artenverlust (i. e. S. Rückgang der Artenzahlen) oder die Schaffung von Klimaräumen in den Projektionen für bisher gebietsfremde Arten (Kapitel 2, 3, 4) besonders hoch ist. In Zukunft können so Analysen zur Wechselwirkung zwischen regionalen Klimaänderungen und Effekten auf die Flora weitere Aufschlüsse geben.

Ökologische Nischenmodelle

In einer Vielzahl von ökologischen Nischenmodellen unterscheiden sich die Areale zur Kalibrierung und Extrapolation der Modelle nicht (vgl. Pompe et al. 2009). Das theoretische Konzept der Arbeit ging davon aus, mögliche Klimatoleranzen von Arten unter Klimaänderung zu berücksichtigen, was bei deren Fehlen zur Überschätzung von Arealveränderungen (z. B. Arealverlust) führen könnte (Pompe et al. 2011). Für die vorliegende Arbeit bedeutete dies, die Verteilung einer Art im geografischen Raum möglichst entlang des vollständigen Umweltgradienten abzubilden. Dafür wurden Verbreitungsdaten der Europäischen Flora (Atlas Florae Europaeae, Kapitel 3) mit Klima-, Boden- und Landnutzungsdaten verschnitten, um den „Gleichgewichtszustand“ zwischen

Umwelt und Areal einer Art statistisch zu ermitteln. Neben dem Klimawandel (als Haupttriebkraft auf biogeografischer Ebene) wurde der Landnutzungswandel als weiterer Auslöser von Veränderungen der biologischen Vielfalt in die Modelle integriert (Kapitel 3, 4, 5). Dieser hat im Mittel eine nicht unerhebliche Bedeutung mit ca. 16% Erklärungskraft im Modell (nach Klima mit 56% und Bodenfaktoren 25%, vgl. Kapitel 3). Der hier verfolgte Ansatz der Kombination von Klima-, Boden- und Landnutzungsinformationen zur Modellkalibrierung lieferte eine realistischere Abbildung von räumlichen Mustern der Pflanzenverbreitung in Deutschland als ein rein bioklimatisch kalibriertes Modell (Thuiller et al. 2005; vgl. Kapitel 2). Erstmals wurde so unter Berücksichtigung von möglichen Klima- und Landnutzungsänderungen eine Gefährdungsabschätzung für eine Vielzahl von Pflanzenarten in Deutschland auf räumlich expliziter Ebene durchgeführt.

Wichtig erscheint hier zu betonen, dass die Datenqualität entscheidenden Einfluss auf die Güte der Modellergebnisse hat (Austin und Van Niel 2011). Verbreitungsdaten der Flora sind u. a. davon beeinflusst, in welcher Art Vegetationsaufnahmen durchgeführt wurden und zeitlich strukturiert waren (Machecha und Schmitlein 2008). Pflanzenverbreitungsdaten im internationalen Vergleich, wie sie in der vorliegenden Analyse eingesetzt wurden, können sich vor allem durch Zeiträume und geografische Auflösung der Aufnahme unterscheiden (Kalwij et al. 2014). Ursachen für Pflanzenvorkommen können zudem in einigen Fällen für die hier angewandten ökologischen Nischenmodelle „unsichtbar“ sein. Modelle stoßen so bei Arten, die vor allem an kleinräumige Strukturen (z. B. im Alpenraum) oder an frequente Störungen angepasst sind, an ihre Grenzen (Austin und Van Niel 2011). Mögliche Skalenprobleme müssen somit bei der Interpretation der Ergebnisse aus ökologischen Nischenmodellen berücksichtigt werden (Hanspach et al. 2011). Pearson und Dawson (2003) oder Luoto et al. (2007) zeigten hierzu, dass das Klima auf der Makro-Skala eine Rolle spielt, auf kleineren Ebenen dann aber die Landnutzung immer mehr an Bedeutung gewinnt, d. h. je heterogener ein Analysebereich begutachtet wird (geografische Auflösung), desto mehr treten Landnutzungseinflüsse in den Vordergrund. Die Wahl der räumlichen Auflösung spielt also eine entscheidende Rolle (Trivedi et al. 2008; Randin et al. 2009). Die Heterogenität der Lebensräume, die tatsächlich innerhalb einer Rasterzelle (AFE; 50×50km bzw. FLORKART; 11×12km) vorhanden ist, kann im Rahmen dieser Studie aber nicht betrachtet werden. Eine räumlich differenzierte Betrachtung könnte hier weitere Aufschlüsse geben.

Artenpool

Mit den ermittelten Klimatypen in den Szenarien wurden mögliche Veränderungen hin zu mediterranen (oder ähnlichen) Klimatypen und Artengemeinschaften nachgewiesen (Kapitel 2, 3). Generalisierungen über alle Arten hinweg sind dennoch nur schwer möglich. Arten reagieren individuell. Allerdings konnten Gruppenunterschiede auf der Ebene von Biotoptypen oder Pflanzeigenschaften nachgewiesen werden (vgl. Kapitel 4, 5). Eine Untersuchung auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ebenen wäre angebracht, um weitere Aufschlüsse über Unterschiede in den einzelnen Regionen zu bekommen. Vor allem in Nord-Ost und Süd-West-Deutschland sind in den Arealen Szenarien Veränderungen im Artenpool auffällig, u. a. durch hohe Verluste an Pflanzenarten. Allerdings profitierten Süd- und Mitteldeutschland in den Projektionen von Artenzuwanderung. Unterschiedliche naturräumliche Aspekte spielen somit eine Rolle (Kapitel 3). Vergleichbare räumliche Muster sind auch in den Szenarien Biotop-spezifischer Artgemeinschaften vorhanden. Der Grad der Klimaänderung in den Szenarien bestimmt hierbei die Entwicklung der Artenpools, d. h. die Änderungen in den Artenzahlen (Kapitel 4). Mehr als ein Beispiel dafür ist die Identifikation von Klima-analogen Regionen für die möglichen „Zukünfte“ Deutschlands (Kapitel 2). Hier wird die Dimension der Veränderung klar, die sich aufgrund des Klimawandels für Deutschland ergeben könnte. Eine Schlüsselstellung nimmt dabei die potentielle ökologische Antwort ein. Die Modellierungen der Studie zeigten, dass Arten bei einer möglichen Klimaerwärmung ihre Verbreitungsgrenzen verschieben (Kapitel 3) und dadurch auch derzeit gebietsfremde Arten ihr Areal in Richtung Deutschland expandieren. Arten aus mediterranen Regionen müssen daher als potentielle Kandidaten für eine Einwanderung in Betracht gezogen werden. Das könnte unter Umständen in einigen Regionen zunächst zu einem Zuwachs der Artenvielfalt führen (Kapitel 3), wenn man von großen Distanzen, die geografisch überschritten werden müssen, absieht. Unter den projizierten zeitlich kurzen Dimensionen der Klimaänderungen wird es jedoch schwierig für einige Arten, Schritt halten zu können (Menéndez et al. 2006; Dullinger et al. 2012). Ein rascher Klimawandel könnte somit limitierend auf die Ausbreitung gebietsfremder Arten wirken, wenn die Distanzen zu groß sind (Corlett und Westcott 2013; Cunze et al. 2013). Die Geschwindigkeit, mit der sich Pflanzen an neue Arealgrenzen räumlich anpassen, hängt zusätzlich von weiteren Umwelteinflüssen und biologischen Eigenschaften der Pflanzen wie dem Lebenszyklus und dem Strategietyp ab (Chapin et al. 1993; Barboni et al. 2004;

Broennimann et al. 2006). Menschliche Aktivitäten können hierbei den Prozess verlangsamen (u. a. durch Biotopzerstörung und Fragmentierung) aber auch als Vehikel direkt oder indirekt beschleunigen (Hulme 2009). Zwar können Migrationsbewegungen in Modelle bereits integriert werden (Thuiller et al. 2009; Horn et al. 2012), aber konkrete Daten über die Geschwindigkeit von Wanderungsbewegungen von Pflanzenarten liegen nur unzureichend vor. Es ist eine wissenschaftliche Herausforderung, diese Informationen zur Verfügung zu stellen, um so ermitteln zu können, welche Arten fähig sind, den projizierten Änderungen über weite Distanzen zu folgen (Engler et al. 2009). Häufig werden aus diesem Grund (wie in der hier vorliegenden Untersuchung) nur zwei Migrationsvarianten kombiniert (Pompe et al. 2009). Das maximale Verbreitungsgebiet wird unter der Annahme der Überbrückung aller Distanzen quantifiziert. Zusätzlich kann der geografische Raum ermittelt werden, den eine Art verliert. Die gewählten Migrationsvarianten mit „keiner Ausbreitung“ oder „voller Ausbreitung“ zu neuen Klimaräumen sind natürlich zu pessimistisch bzw. zu optimistisch gewählt. Die Nutzung dieser beiden Extremvarianten erlaubt jedoch, potentielle Veränderungen zu erfassen. Vorliegende Modelle könnten um eine dynamische Komponente wie Migrationsraten (sowohl zeitlich als auch räumlich) erweitert werden und dabei für den Naturschutz und das Monitoring weitere relevante Informationen liefern (Cunze et al. 2013; Midgley et al. 2006; Thuiller 2003).

Pflanzeigenschaften

In der Bewertung der Risiken des Klimawandels ist es sinnvoll, Pflanzenmerkmale als Indikator zu nutzen, da artspezifische Reaktionen unter Klimawandel beeinflussen (Kapitel 5; Broennimann et al. 2006). Eine zentrale Rolle spielen An- und Abwesenheit bestimmter funktioneller Pflanzenmerkmale aber auch Interaktionen zwischen Pflanzeigenschaften (Thuiller et al. 2006; Gallagher et al. 2012) bzw. Flora und Fauna. Das betrifft beispielsweise Pflanze-Bestäuber-Aktivitätszeiten oder Pflanze-Herbivoren-Interaktionen (Visser und Both 2006; Schweiger et al. 2008). Die Klimaerwärmung kann somit zur Veränderung von Ökosystemfunktionen führen, was aber nicht gleichzeitig bedeutet, dass der Verlust von Arten funktionelle Änderungen im Ökosystem zur Folge hat (Craine et al. 2011; Gallagher et al. 2012). Eine drängende Frage ist, welche Pflanzeigenschaften gesicherte Erkenntnisse zu möglichen Reaktionen unter Klimawandel liefern können (Kapitel 5). Die vorliegende Arbeit fasst hierfür unterschiedliche Faktoren zum Begriff

Pflanzeigenschaften bzw. -merkmale zusammen. Dazu zählen klassische „Leistungsmerkmale“ wie Blattmerkmale, Strategie-, Bestäuber- oder Lebensformtyp, jedoch auch Ellenberg-Zeigerwerte und geografische Charakteristika (Kapitel 5). Hier ist es wichtig, sich über die Theorie im Hintergrund im Klaren zu sein. Das Konzept der ökologischen Zeigerwerte beruht auf der Indikatorfunktion und gibt die ökologischen Bedingungen wieder, unter denen eine Art am Besten und Häufigsten wächst (Ellenberg 1991). Die Anwendung von Zeigerwerten als universelles Werkzeug der Klimafolgenforschung kann kritisiert werden, da diese somit primär ökologische Standortbedingungen widerspiegeln. Dennoch dienen die Zeigerwerte als plausible Faktoren und können auch in der Biogeografie mit biologischem Verständnis eingesetzt werden (Petřík und Wild 2006). Die vorliegenden Modelle sind insofern durch diese zusätzlichen ökologischen Prädiktoren interessant und interpretierbar. Was aber eigentlich interessiert, sind die Effekte der einzelnen Variablen. Eine besondere Stellung nimmt für beide Varianten der Projektion (Arealverlust, Arealgewinn) die Größe des Areals ein, dass eine Art in Deutschland einnimmt (Kapitel 5). Man kann argumentieren, dass der Ausgangspunkt dieser Merkmals-basierten Analyse das Fehlen der Verbreitungsangaben in Europa war, aber das Modell so angelegt war, dass Verbreitungsdaten auf nationaler Ebene einbezogen werden mussten, um für weitere Arten Risiken zu extrapolieren. Im Interesse der Abschätzung von Klimarisiken erschien dies als sinnvoll, da bereits in anderen Studien Zusammenhänge zwischen projizierten Arealveränderungen und der Arealgröße nachgewiesen wurden (Thuiller et al. 2005a). Schlussendlich liegen die Daten in einer optimalen Güte für Deutschland vor und die Haupteffekte sind signifikant. Jedoch sind für Arealverlust und Arealgewinn die Effekte nicht identisch. Für Pflanzenarten mit einem großen Areal in Deutschland projizierten die Modelle einen geringeren Arealverlust, während für Arten mit einem kleinen Areal Zugewinne identifiziert wurden. Dies muss nicht verkompliziert werden und kann u. a. daran liegen, dass Wärme liebende Arten, die bisher nur lokal vorkommen, an Areal gewinnen. Im Nachhinein erscheint das als vergleichenswert, auch für verschiedene Pflanzengruppen. Beispielsweise konnte für Pflanzen mit skleromorphen oder mesomorphen Blattstrukturen nachgewiesen werden, dass diese unter Klimawandel profitieren könnten (Küster et al. 2011). Das betrifft nicht nur die Anatomie der Blätter, sondern bezieht auch andere Pflanzenorgane ein (Klotz und Kühn 2002), die für den Wasserhaushalt bedeutsam sind (z. B. Wurzeln). Die Feuchtigkeitsverhältnisse sind somit ein kritischer Faktor in der Bewertung von Risiken

unter Klimawandel. Das bestätigen auch Untersuchungen auf biogeografischer Ebene, wobei eine Veränderung der Niederschlagsmuster entscheidend auf die Vegetationsveränderung wirken könnte (Engler et al. 2011).

Auf der Ebene der Haupteffekte ist jedoch noch nicht alle Information gewonnen, sofern Interaktionen zugelassen werden. Wenn Arealverlust und -gewinn im Modell betrachtet wurden, zeigte sich die häufigste Reaktion für die Feuchtezahl nach Ellenberg, die signifikante Ergebnisse zusammen mit dem Lebensformtyp, der Anzahl der floristischen Zonen (für den Arealverlust) und dem Ellenberg Indikator Temperatur (für Arealgewinn) aufwies. Der Zusammenhang zwischen der Feuchtezahl als Prädiktor und modelliertem Arealgewinn war wie erwartet negativ, d. h. der Arealgewinn ist für die Arten hoch, die an trockene Standortbedingungen angepasst sind. Der Einbezug von Interaktionen zwischen Pflanzeigenschaften (vgl. Kapitel 5) ergab eine wichtige Zusatzinformation, was sich in einem positiven Koeffizienten für den Haupteffekt Feuchtezahl und einer Interaktion mit dem Ellenberg Indikator Wertes für Temperatur zeigte. Der Interaktionseffekt hatte somit Einfluss auf die Haupteffekte. Der Grund dafür liegt an artspezifischen Antworten für jeweils unterschiedliche Stufen der Indikatorwerte. Analogieschlüsse über einfache Merkmalszusammenhänge unter Klimawandel sind dann logischerweise minderwertig für die Risikobewertung und generell für das Anpassungsmanagement. Insgesamt dürfte hierzu eine weitere Untersuchung regionaler Unterschiede der Areal szenarien (u. a. für den Süd-Westen und den Nord-Osten Deutschlands) auch auf der Ebene der Merkmale und Merkmals-Interaktionen weitere Aufschlüsse geben (vgl. Kapitel 3, Küster et al. 2011). Das ist sowohl für die Bewertung artspezifischer Antworten als auch Signale von Pflanzengruppen relevant, welche aufgrund von Merkmalen zusammen gefasst werden können. Nobis et al. (2009) wiesen u. a. auf das Klima und die Klimaerwärmung als wesentlichen Treiber der Neophyten-Vorkommen hin. Angesichts des Klimawandels ist u. a. mit einer verstärkten Veränderung der Flora durch invasive gebietsfremde Arten zu rechnen (Kleinbauer et al. 2010; Kühn et al. 2013). Allerdings sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Faktoren zu berücksichtigen, um mögliche Etablierungserfolge zu verstehen (Küster et al. 2008).

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit den Möglichkeiten der Ableitung von standardisierten Verfahren aus den o. g. Zusammenhängen zwischen Areal szenarien und Pflanzenmerkmalen. Die Analyse folgte einem Zwei-Stufen-Modell: (i) Auswertung auf der Basis der Areal szenarien für Arealverlust und -gewinn unter Berücksichtigung der

Merkmale und Merkmalskombinationen (Kapitel 5) und der (ii) Extrapolation des Zusammenhangs auf andere Arten. Nachteil dieser Nutzungskette ist, dass Fehler, die bereits in den ökologischen Nischenmodellen vorliegen (Kapitel 1), auch in der Konstruktion der folgenden Modelle weiter vorhanden sind (Kapitel 5). Eine Propagierung der Modellfehler und Modellunsicherheiten ist m. W. in statistischen Modellen bislang nur unzureichend gelöst (im Gegensatz zu Bayesischen Modellen). I. e. S. bedeutet dies, dass die Datenwahl und -aufbereitung, die Wahl der geografischen Skala, die Modellselektion und -Kalibrierung/Validierung entscheidend Ergebnisse beeinflussen und damit bei der Interpretation auf allen Ebenen der Einzelarbeiten berücksichtigt werden müssen. Es ist beispielsweise wichtig, die Effekte unterschiedlicher Emissionsszenarien zu berücksichtigen. Natürliche Variabilität wird immer dann wichtig wenn sich die Untersuchung auf verschiedene Zeiträume, Regionen oder Klimaentwicklungen bezieht. Damit könnten nachfolgend weitere Simulationen integriert und gemeinsam ausgewertet werden. Der Grad der Klimaänderung könnte für die Bewertung von Merkmalen im Anpassungsmanagement ein wichtiges Entscheidungskriterium sein. In den hier vorliegenden Einzelmodellen für Arealverlust und -gewinn stellt sich das Problem, dass nur der Lebensformtyp als wirklich „echtes“ Pflanzenmerkmal im Modell verblieb (Kapitel 5). Extreme klimatische Änderungen wie sie exemplarisch in den Analysen zwischen Arealverlust oder -gewinn und Pflanzenmerkmalen hinterlegt wurden (+3.8°C bis 2080, Kapitel 5), könnten dazu führen, dass diese Merkmale in der Modellvereinfachung selektiert wurden. Die Dimension klimatischer Änderungen ist zu umfassend, als dass den Arten die gewünschten Optionen zur Toleranz zur Verfügung stehen könnten.

Schlussfolgerung

Feldstudien zeigen, dass für den deutschen Raum gegenwärtig Landnutzungseinflüsse das größere Problem für den Naturschutz darstellen und das Vorkommen der heimischen Flora in erster Linie von Bewirtschaftungsformen abhängig ist (Pompe et al. 2011). Die vorliegende Arbeit zeigt aber, dass der Einfluss des Klimawandels zunehmend den Druck in Richtung Verkleinerung von Pflanzenarealen in Deutschland und damit negative Folgen für die Biodiversität verschärfen kann. Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Flora und Fauna sind in einer Vielzahl von Arbeiten verfasst (z. B. Thuiller et al. 2005b; Walther et al. 2005; Araujo et al. 2006; Normand et al. 2007; Parmesan 2006; Settele et al. 2008; Chen et al. 2011). Die hier vorliegenden Ergebnisse stellen eine

umfassende Grundlage für weitere Arbeiten (Modellierung, Freilandbeobachtung) zu pflanzengeografischen Änderungen unter Klimawandel in Deutschland dar (z. B. Hetzel et al. 2012; Hickler et al. 2012; Kropp et al. 2009; Kühn et al. 2013) und liefern regionale und überregionale Ergebnisse (siehe Pompe et al. 2011). Dynamische Naturschutz- und Nutzungskonzepte werden in Zukunft eine große Rolle spielen und Themen wie Waldumbau, Management des Schutzgebietssystems und Schutz von Schutzobjekten, Überwindung von Migrationsbarrieren und Förderung der Etablierung und Anpassungsfähigkeit von Arten umfassen (vgl. Boye und Klingenstein 2006). Für eine differenzierte Bewertung verschiedener Pflanzengruppen, Pflanzenmerkmale, biologischer Interaktionen ist der Fokus auf eine hohe Qualität der Daten und Modellierungsmethoden zu legen. Forschung und Praxis sollten näher verbunden werden, um konkrete Aussagen für den Naturschutz zu ermöglichen. Freilandbeobachtungen, lang angelegte Feldstudien und Szenarien-Arbeit müssen kombiniert werden, um das Wissen über die Wirkung des Klimawandels auf Pflanzen, Pflanzengemeinschaften und Pflanzenverbreitung auf einer breiten Basis zu entwickeln und bessere „Vorhersagemodelle“ zu entwickeln.

Literaturverzeichnis

- Araújo MB, Thuiller W, Pearson RG (2006) Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography* 33(10): 1712-1728
- Austin MP, Van Niel KP (2011) Improving species distribution models for climate change studies: variable selection and scale. *Journal of Biogeography* 28(1): 1-8
- Badeck F, Böhning-Gaese K, Cramer W, Ibisch P, Klotz S, Kreft S, Kühn I, Vohland K, Zander U (2007) Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel - Risiken und Handlungsoptionen. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 46: 151-167
- Badeck FW, Pompe S, Kühn I, Glauer A (2008) Zeitlich hochauflösende Klimainformationen auf dem Messtischblattraster und für Schutzgebiete in Deutschland. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 40(10): 343-345
- Barboni D, Harrison SP, Bartlein PJ, Jalut G, New M, Prentice IC, Sanchez-Goñi M-F, Spessa A, Davis B, Stevenson AC (2004) Relationships between plant traits and climate in the Mediterranean region: a pollen data analysis. *Journal of Vegetation Science* 15(5): 635-646
- Boye P, Klingenstein F (2006) Naturschutz im Wandel des Klimas. *Natur und Landschaft* 81: 574-577
- Broennimann O, Thuiller W, Hughes G, Midgley GF, Alkemade JMR, Guisan A (2006) Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change. *Global Change Biology* 12(6): 1079-1093
- Chapin SF III, Rincon E, Huante P (1993) Environmental responses of plants and ecosystems as predictors of the impact of global change. *Journal of Biosciences*, 18(4): 515-524
- Chen IC, Hill JK, Ohlemüller R, Roy DB, Thomas CD (2011) Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science* 333(6045): 1024-1026
- Corlett RT, Westcott DB (2013) Will plant movements keep up with climate change? *Trends in Ecology and Evolution* 28(8): 482-488
- Craine JM, Nippert JB, Gene Towne E, Tucker S, Kembel SW, Skibbe A, McLauchlan KK (2011) Functional consequences of climate change induced plant species loss in a tallgrass prairie. *Oecologia* 165(4): 1109-1117

- Cunze S, Heydel F, Tackenberg O (2013) Are Plant Species Able to Keep Pace with the Rapidly Changing Climate? PlosOne, doi: 10.1371/journal.pone.0067909
- Dullinger S, Gatringer A, Thuiller W, Moser D, Zimmermann NE, Guisan A, Willner W, Plutzer C, Leitner M, Mang T et al. (2012) Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. *Nature Climate Change* 2: 612-622
- Engler R, Randin, CF, Thuiller W, Dullinger S, Zimmermann NE, Araújo MB, Pearman PB, Lay GL, Piedallu C, Albert CH et al. (2011) 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology* 17(7): 2330-2341
- Engler R, Randin CF, Vittoz P, Czaka T, Beniston M, Zimmermann NE, Guisan A (2009) Predicting future distributions of mountain plants under climate change: does dispersal capacity matter? *Ecography* 32(1): 34-45
- Gallagher RV, Hughes L, Leishmann MR (2012) Species loss and gain in communities under future climate change: consequences for functional diversity. *Ecography* 36(5): 531-540
- Hanspach J, Kühn I, Schweiger O, Pompe S, Klotz S (2011) Geographical patterns in prediction errors of species distribution models. *Global Ecology and Biogeography* 20(5): 779-788
- Hetzel I (2012) Ausbreitung klimasensitiver ergasiophygotischer Geholzsippen in urbanen Wäldern im Ruhrgebiet. *Dissertationes Botanicae*, Stuttgart
- Hickler T, Bolte A, Harthard B, Beierkuhnlein C, Blaschke M, Blick T, Brüggemann W, Dorow WHO, Fritze MA, Gregor T et al. (2012) Folgen des Klimawandels für die Biodiversität in Wald und Forst. In Mosbrugger V, Brasseur G, Schaller M, Stribny B (eds) *Klimawandel und Biodiversität - Folgen für Deutschland*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, Germany
- Horn S, Raabe A, Will H, Tackenberg O (2012) TurbSeed - A model for wind dispersal of seeds in turbulent currents based on publicly available climate data. *Ecological Modelling* 237-238: 1-10
- Hulme PE (2009) Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. *Journal of Applied Ecology* 46(1): 10-18
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland

- IPCC (2013) Summary for Policymakers. In Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Kalwij JM, Robertson MP, Ronk A, Zobel M, Pärtel M (2014) spatially-explicit estimation of geographical representation in large-scale species distribution datasets. *PLoS ONE* 9(4): e95065. doi: 10.1371/journal.pone.009
- Kleinbauer I, Dullinger S, Klingenstein F, May R, Nehring S, Essl F (2010) Ausbreitungspotenzial ausgewählter neophytischer Gefäßpflanzen unter Klimawandel in Deutschland und Österreich. *BfN-Skripten* 275, Bonn Bad Godesberg
- Klotz S, Kühn I (2002) Blattmerkmale. In Klotz S, Kühn I, Durka W (eds) *Bioflor-Eine Datenbank mit biologisch-ökologischen Merkmalen zur Flora von Deutschland*. Schriftenreihe für Vegetationskunde 38. Bundesamt für Naturschutz, Bonn
- Kropp J, Holsten A, Lissner T, Roithmeier O, Hattermann F, Huang S, Rock J, Wechsung F, Lüttger A, Pompe S, Kühn I, Costa L, Steinhäuser M, Walther C, Klaus M, Ritchie S, Metzger M (2009) *Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren*. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV)
- Kühn I, Pompe S, Trautmann S, Böhning-Gaese K, Rabitsch W (2013) Arealänderungen in der Zukunft. In Essl F, Rabitsch W (eds) *Biodiversität und Klimawandel, Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Küster EC, Bierman SM, Klotz S, Kühn I (2011) Modelling the impact of climate and land use change on the geographical distribution of leaf anatomy in a temperate flora. *Ecography* 34(3): 507-518
- Küster EC, Kühn I, Bruelheide H, Klotz S (2008) Trait interactions help explain plant invasion success in the German flora. *Journal of Ecology* 96(5): 860-868

- Luoto M, Virkkala R, Heikkinen RK (2007) The role of land cover in bioclimatic models depends on spatial resolution. *Global Ecology and Biogeography* 16(1): 34-42
- Mahecha MD, Schmidtlein S (2008) Revealing biogeographical patterns by nonlinear ordinations and derived anisotropic spatial filters. *Global Ecology and Biogeography* 17(2): 284-296
- Menéndez R, Megias AG, Hill JK, Braschler B, Willis SG, Collingham Y, Fox R, Roy DB, Thomas CD (2006) Species richness changes lag behind climate change. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences Series B* 273: 1465-1470
- Midgley GF, Hughes GO, Thuiller W, Rebelo AG (2006) Migration rate limitations on climate change-induced range shifts in Cape Proteaceae. *Diversity and Distributions* 12(5): 555-562
- Nobis MP, Jaeger JAG, Zimmermann NE (2009) Neophyte species richness at the landscape scale under urban sprawl and climate warming. *Diversity and Distributions* 15(6): 928-939
- Normand S, Svenning J-C, Skov F (2007) National and European perspectives on climate change sensitivity of the habitats directive characteristic plant species. *Journal for Nature Conservation* 15(1): 41-53
- Pearson R, Dawson TP (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12: 361-371
- Parmesan C (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology and Systematics* 37: 637-669
- Petřík P, Wild J (2006) Environmental correlates of the patterns of plant distributions at the meso-scale: a case study from Northern Bohemia (Czech Republic) *Preslia* 78: 21-234
- Pompe S, Berger S, Bergmann J, Badeck F, Lübbert J, Klotz S, Rehse AK, Söhlke G, Sattler S, Walther GR, Kühn I (2011) Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland. *BfN-Skripten* 304, Bonn Bad Godesberg
- Pompe S, Berger S, Walther GR, Badeck F, Hanspach J, Sattler S, Klotz S, Kühn I (2009) Mögliche Konsequenzen des Klimawandels für die Pflanzenwelt in Deutschland. *Natur und Landschaft* 84(1): 2-7

- Randin CF, Engler R, Normand S, Zappa M, Zimmermann NE, Pearman PB, Vittoz P, Thuiller W, Guisan A (2009) Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence. *Global Change Biology* 15(6): 1557-1569
- Schweiger O, Settele J, Kudrna O, Klotz S, Kühn I (2008) Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. *Ecology* 89: 3472-3479
- Settele J, Kudrna O, Harpke A, Kühn I, van Swaay C, Verovnik R, Warren M, Wiemers M, Hanspach J, Hickler T et al. (2008) Climatic Risk Atlas of European Butterflies, Pensoft, Sofia
- Thuiller W (2003) BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* 9(10): 1353-1362
- Thuiller W, Lafourcade B, Engler, R, Araújo MB (2009) BIOMOD - a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography* 32(3): 369-373
- Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB (2005a) Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecology and Biogeography* 14(4): 347-357
- Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB, Sykes MT, Prentice IC (2005b) Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 102(23): 8245-8250
- Thuiller W, Laval S, Sykes M, Araújo MB (2006) Using niche-based modeling to assess the impact of climate change on tree functional diversity in Europe. *Diversity and Distributions* 12(1): 49-60
- Trivedi MR, Berry PM, Morecroft MD, Dawson TP (2008) Spatial scale affects bioclimate model projections of climate change impacts on mountain plants. *Global Change Biology* 14(5): 1089-1103
- UBA (2007) Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG, Hintergrundpapier, Dessau <http://www.accg.v.at/pdf/RegionaleKlimaaenderungen.pdf>, 21.01.2014
- UNFCCC (2010) Outcome of the work of the ad hoc working group on long-term cooperative action under the convention. Draft decision-/CP.16. Cancun. http://unfccc.int/files/meetings/cop_16/application/pdf/cop16_1ca.pdf, 02.05.2014

- Visser ME, Both C (2005) Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B* 272(1581): 2561-2569
- Walther GR, Berger S, Sykes MT (2005) An ecological 'footprint' of climate change. *Proceedings of the Royal Society B* 272(1571): 1427-1432
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin J, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-295
- Zebisch M, Grothmann T, Schröter D, Hasse C, Fritsch U, Cramer W (2005) *Climate Change in Germany - Vulnerability and Adaption of Climate sensitive Sectors*. Umweltbundesamt, Berlin

7 Zusammenfassung

Durch den Eingriff des Menschen ändern sich global nachweislich Stoff- und Energiekreisläufe, was Folgen für das Klima und die biologische und funktionelle Vielfalt von Ökosystemen hat. Inwiefern bestimmte Arten, Artengruppen oder Regionen künftig durch den Klimawandel in Deutschland betroffen sind, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, nämlich dem Grad der Klimaänderung und der Vulnerabilität von Arten und Gebieten. Mögliche Auswirkungen des anthropogen bedingten Klimawandels lassen sich mit Hilfe von Szenarien erfassen. Eine klassische Route der Analyse ist es, die direkten Wirkungen des Klimawandels zu erfassen. Insbesondere die Kombination von Klima- und Landnutzungsänderungen ist im Allgemeinen nur unzureichend in der Szenarienforschung abgedeckt, um Gefahren für die pflanzliche Diversität im aktuellen Jahrhundert abzuschätzen. Statistik kann an dieser Stelle eine Entscheidungshilfe darstellen. Entsprechend dieser Basis wurden vier unterschiedliche Forschungsansätze kombiniert, die über die Abschätzung von modellierten Wahrscheinlichkeiten Risiken für die Flora in Deutschland erfassen. Schlussendlich wurden Situationen erfasst, die auf biogeografischer Ebene (Makroskala) mit „gemessenen“ Werten den Ist-Zustand der einheimischen Flora darstellen (u. a. Klima, Pflanzenareale, biologische und ökologische Charakteristika von Pflanzengemeinschaften), um aus theoretischer und praktischer Sicht mit Hilfe unterschiedlicher Methoden der statistischen Projektion mögliche Entwicklungen für verschiedene Alternativen der „Zukunft“ zu konstruieren.

Das Klima unterliegt Gesetzmäßigkeiten. Biogeografisch gesehen führt das gegebenenfalls zu einer Neuordnung bzw. Verschiebung von Klimaregionen bereits bis zum Ende des Jahrhunderts. Zu diesem Zweck wurde erstmals für Deutschland versucht, Klimatypen der Gegenwart (1961-90) und Szenarien (2071-80) zu vergleichen. Als Modellverfahren wurde hierfür eine Clusteranalyse zur Gruppenbildung in Deutschland (10'×10') gewählt, wobei jeweils sechs Klimatypen für drei Klimaszenarien separiert wurden (ca +2,4, +3,3, +4,5°C Jahresmitteltemperatur). Die Clustervarianten dienten dem räumlichen Vergleich von Regionen in Deutschland, die in den Szenarien dem gegenwärtigen Klima in Europa entsprechen (sog. Klima-analoge Regionen). Mit dieser Herangehensweise sollte die Dimension klimatischer Änderungen greifbar gemacht werden, um in den Klima-analogen Regionen nach möglichen Artenpools fahnden zu können. Die Klimaänderungen entsprechen einer großen Entfernung im Raum, wobei eine

Verlagerung von Klimatypen aus Süd- und Süd-West Europa in Richtung Mitteleuropa nachgewiesen werden konnte. Am Beispiel der Iberischen Halbinsel wurde der potentielle Artenpool identifiziert (n=2354 Arten) und dessen ökologische Charakteristik (Ellenberg-Zeigerwerte) quantifiziert. Die identifizierten Pflanzenarten konnten vor allem mediterranen sowie eurosibirischen Elementen zugeordnet werden und zeigten einen Trend zu Wärme liebenden und trockenheits-adaptierten Arten. Neben „Süd-Nord-Bewegungen“ waren Veränderungen der Gradienten zwischen dem ozeanischen und dem kontinentalen Klimaeinfluss auffallend.

Angesichts dieser Trends ist es umso wichtiger, die geografische Dimension der Klimaänderung für einzelne Arten in Deutschland zu erfassen. Um mögliche Risiken für die Flora in Deutschland abzuschätzen, wurden mit Hilfe ökologischer Nischenmodelle Unterschiede zwischen klimatisch geeigneten geografischen Räumen der Klimareferenzperiode (1961-90) und Szenarien (2051-80) für 845 Pflanzenarten quantifiziert. Negative Auswirkungen auf die Artenvielfalt durch Klimaveränderungen ergaben sich vor allem für Nord-Ostdeutschland und Süd-Westdeutschland, leichte Artzunahmen für die Mittelgebirge im Südosten Deutschlands. Weitreichende Konsequenzen ergaben sich bereits bei moderaten Klimaänderungen (+2,2°C), wobei ein Verlust von 15-19% der Arten projiziert wurde. Die nichtlineare Zunahme der Auswirkungen des Klimawandels (+2,2, +2,9, +3,8°C der Jahresmitteltemperatur) spricht auch unter dem Aspekt des Biodiversitätsschutzes für das 2°C Stabilisierungsziel. Bisher für Deutschland gebietsfremde Arten könnten vom Klimawandel durch Zugewinn klimatisch passender Gebiete in Deutschland profitieren. Knapp die Hälfte der Arten, die in Deutschland aktuell nicht vorkommen (n=295), könnten unter Klimawandel das Areal in Deutschland erweitern, vorausgesetzt große räumliche Distanzen können in kurzen Zeiträumen überwunden werden.

Als Folge des Klimawandels resultiert eine potentielle Neuordnung von Pflanzengemeinschaften. Die Auswirkungen auf einzelne Biotope sind bisher nicht ausreichend untersucht. Auf der Grundlage ökologischer Nischenmodelle wurden für 474 Pflanzenarten Einflüsse des Klima- und Landnutzungswandels in Bezug zu ihren Hauptbiotoptypen (n=10) quantifiziert. Der Vergleich zwischen zwei Referenzzeiträumen (1961-90 und 2051-80) ergab für alle Biotop-spezifischen Artenpools negative Konsequenzen, wobei Unterschiede zwischen den Biotopen nachgewiesen wurden. Für den projizierten Arealverlust reichten diese im Detail für Arten urban geprägter Biotope im Mittel von ca.

14% (moderates Szenario, +2,2°C) bis ca. 56% für Arten alpiner Biotop unter dem Extremszenario (+3,8°C). Für Biotop mit hohem Naturschutzwert, die u. a. durch eine hohe Zahl an Arten mit nationalem Schutzstatus (Rote Liste) charakterisiert sind, wurde statistisch ein erhöhtes Risiko, Arten zu verlieren, nachgewiesen.

Der Einsatz von ökologischen Nischenmodellen in der Risikobewertung ist nicht für alle Pflanzenarten geeignet. Pflanzenmerkmale können an dieser Stelle als methodisches Vehikel einbezogen werden. In einem zweistufigen Verfahren wurden dafür Arealnszenarien auf der Grundlage ökologischer Nischenmodelle im Extremszenario (+3,8°C Jahresmitteltemperatur) für 195 Pflanzenarten in Verbindung mit biologischen und ökologischen Pflanzenmerkmalen (d. h. geografische Charakteristika, Lebensformspektren, Strategietypen, Blattmorphologie, Bestäubertyp und Ellenberg-Weigerwerten) analysiert. Die resultierenden Koeffizienten aus jeweils einem Modell für Arealverlust bzw. -gewinn wurden eingesetzt, um die Sensitivität von 688 Pflanzenarten abzuschätzen, für die gegenwärtig eine Anwendung ökologischer Nischenmodelle aufgrund unzureichend vorliegender Verbreitungsdaten ungeeignet ist. Für diese Arten wurde ein mittlerer Arealverlust von 34% ($R^2=0,29$) bzw. mittlerer Arealgewinn von 3% ($R^2=0,30$) projiziert. Erwartungsgemäß fiel der Arealverlust statistisch signifikant niedriger für an Trockenheit und Hitze angepasste Arten (z. B. Therophyten) aus. Als signifikanter Prädiktor für beide Projektionen, d. h. Arealverlust und -gewinn, wurden die Größe des Areals, welches eine Pflanze aktuell besiedelt, und der Ellenberg Weigerwert für Feuchtigkeit identifiziert. Darüber hinaus war die Variablenselektion nach statistischer Vereinfachung der Modelle zu Arealverlust und -gewinn hinreichend verschieden. D. h. Pflanzenmerkmale, die statistisch signifikant mit dem modellierten Arealverlust zusammen hängen, suggerieren nicht gleichzeitig eine Verbindung mit Arealgewinn und umgekehrt. Ein Schlüsselement sind Interaktionseffekte, die vor allem die „Feuchte“ als einen kritischen Faktor in der Risikobewertung aufdeckten. Interaktionseffekte der Ellenberg-Feuchtezahl und Lebensformtypen für den Arealverlust bzw. der Temperatur- und Feuchtezahl für den Arealgewinn konnten nachgewiesen werden. Analogieschlüsse über einfache Merkmalszusammenhänge unter Klimawandel zu ziehen, ist somit mit Risiken behaftet und kann logischerweise zu unsicheren Prognosen im Anpassungsmanagement führen.

Die im Rahmen der Dissertation durchgeführten Untersuchungen erfassen erstmals mögliche Risiken von mehr als 1200 Pflanzenarten in Deutschland unter Klima- und

Landnutzungswandel. Dazu zählen mögliche Einflüsse auf Arealmuster gebietstypischer und gebietsfremder Arten bzw. Artenpools. Die Ergebnisse bestätigen, dass der Grad der Klimaänderung ein entscheidender Faktor in der Bewertung der Risiken und möglicher Anpassungskonzepte für den Naturschutz ist. Es ist darauf hinzuweisen, dass die hier identifizierten Muster erste theoretische Bausteine für eine weitere Arbeit im Bereich der Modellierung, Datensammlung und einem begleitenden Monitoring sind. Stärken und Schwächen der einzelnen Verfahren wurden in den Einzelarbeiten jeweils diskutiert und sollten ein Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen sein.

Anhang

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Ingolf Kühn für die Grundlage dieser Arbeit, die wissenschaftliche Betreuung und Geduld, mich zu unterstützen. Ich danke Franz Badeck, Stefan Klotz, und Helge Bruelheide für gewinnbringende Diskussionen. Ohne die bereichernden Tipps und Beiträge dieser Personen wäre diese Arbeit nicht entstanden. Des Weiteren danke ich dem Bundesamt für Naturschutz und dem Department Biozönoseforschung für den finanziellen Rahmen zum Gelingen dieser Arbeit. Für die Bereitstellung von Daten, Informationen und die intensive Zusammenarbeit möchte ich vor allem Jan Hanspach, Jessica Bergmann, Eva Küster, Gudrun Carl, Oliver Schweiger, Stefan Fronzek, Wilfried Thuiller und Joachim Glauer danken. Eine Vielzahl von Kollegen hat zum Gelingen von Aufgaben im Rahmen dieser Forschungsarbeit beigetragen. Dafür möchte ich ehemaligen Kollegen im Department Biozönoseforschung am UFZ Halle, am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, den Mitgliedern im EU-Projekt ALARM danken. Jederzeit standen diese Personen für konstruktive Gespräche zur Verfügung. Ein besonderer Dank geht natürlich auch an meine Familie und Freunde, die mich während dieser Zeit unterstützten.

Erklärung über den persönlichen Anteil an den Publikationen

Bergmann J, Pompe S, Ohlemüller R, Freiberg M, Klotz S, Kühn I (2010) **The Iberian Peninsula as a potential source for the plant species pool in Germany under projected climate change**. *Plant Ecology* 207: 191-201 (Kapitel 2)

Datenerhebung: 15% (J. Bergmann 55%, R. Ohlemüller 30%)
Datenanalyse: 10% (J. Bergmann 65%, R. Ohlemüller 25%)
Schriftliche Umsetzung: 45% (Manuskriptentwurf aus Diplomarbeit Jessica Bergmann 30%, R. Ohlemüller 15%, Korrekturen durch I. Kühn, S. Klotz, M. Freiberg 10%)

Pompe S, Hanspach J, Badeck F, Klotz S, Thuiller W, Kühn I (2008) **Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany**. *Biology Letters* 4: 564-567 (Kapitel 3)

Datenerhebung: 60% (J. Hanspach 30%, F. Badeck & I. Kühn 10%)
Datenanalyse: 75% (J. Hanspach 10%, Wilfried Thuiller & Ingolf Kühn 15%)
Schriftliche Umsetzung: 80% (Korrekturen durch F. Badeck, J. Hanspach, S. Klotz, W. Thuiller, I. Kühn 20%)

Pompe S, Hanspach J, Badeck FW, Klotz S, Bruelheide H, Kühn I (2010) **Investigating habitat-specific plant species pools under climate change**. *Basic and Applied Ecology* 11: 603-611 (Kapitel 4)

Datenerhebung: 80% (J. Hanspach 10%, I. Kühn 10%)
Datenanalyse: 100%
Schriftliche Umsetzung: 90% (Korrekturen durch F. Badeck, J. Hanspach, H. Bruelheide, S. Klotz, I. Kühn 10%)

Pompe S, Hanspach J, Badeck F, Klotz S, Bruelheide H, Kühn I (eingereicht) **Using ecological and life-history characteristics for projecting species responses to climate change** (Kapitel 5)

Datenerhebung: 80% (J. Hanspach und I. Kühn 20%)
Datenanalyse: 100%
Schriftliche Umsetzung: 90% (Korrekturen durch H. Bruelheide, F. Badeck, J. Hanspach, S. Klotz, I. Kühn 10%)

Halle/Saale, den 28.05.2014
Unterschrift:

Lebenslauf

Name Sven Pompe, Dipl.-Biol.
Geb. 25.10.1977, Mühlhausen (Thüringen)
Adresse Goetheweg 129, 99974 Mühlhausen
Geschlecht männlich
Nationalität deutsch

Berufserfahrung

11/2013 – 06/2014 TUM, Freising
Department: Department of Ecology and Ecosystem-management
Consultant Datenmanagement Jena Experiment (DFG, FOR 4151)

04/2009 – 11/2013 FSU Jena *co* MPI-BGC *co* TUM, Jena/Freising
Department: Multitrophic Interactions / Biogeochemical Processes /
Department of Ecology and Ecosystemmanagement
Datenmanager Jena Experiment (DFG, FOR 456, 4151)

09/2005 – 03/2009 UFZ, Halle (Saale)
Department: Community Ecology
Wissenschaftler (BfN, Nr 80581001)

07/2005 – 12/2005 MDC, Berlin
Department: Bioethics and Science Communication
Honorarkraft (BMBF, 01GP0155)

03/2004 – 06/2005 MDC *co* FZ Jülich, Berlin/Jülich
Department: Bioethics and Science Communication
Wissenschaftlicher Mitarbeiter (EU CA-006793, BMBF, 01GP0155)

09/1996 – 09/1997 Zivildienst am Landesfachkrankenhaus für Psychiatrie
Neurologie Pfafferoode/Mühlhausen/Thüringen

Ausbildung

10/1997 – 03/2004 FSU, Jena
Biologie (Diplom)
Hauptfach Ökologie, Nebenfächer Botanik, Genetik,
Umweltrecht

09/1984 – 06/1996 POS Altengottern, POS Grossengottern, Friedrich Ludwig Jahn
Gymnasium, Grossengottern/Thüringen

Diplomarbeit Sukzession historisch genutzter Weinberge im Mittleren Saaletal bei
Jena (Betreuer Dr. Winfried Voigt, Dr. Heinich Dörfelt)

Doktorarbeit Modellierung klimainduzierter Arealveränderungen der Flora von
Deutschland (Betreuer: Prof. Dr. Helge Bruelheide, Prof. Dr. Ingolf
Kühn), Fachgebiet: Biologie

Halle/Saale, den 28.05.2014

Unterschrift:

Publikationen

- Badeck F-W, Pompe S, Kühn I, Glauer A (2008) Zeitlich hochauflösende Klimainformationen auf dem Messtischblattraster und für Schutzgebiete in Deutschland. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 40(10): 343-345
- Bergmann J, Pompe S, Ohlemueller R, Freiberg M, Klotz S, Kühn I (2010) The Iberian Peninsula as a potential source for the plant species pool in Germany under projected climate change. *Plant Ecology* 207(2): 191-201
- Ebeling A, Pompe S, Baade J, Eisenhauer N, Hillebrand H, Proulx R, Roscher C, Schmid B, Wirth C, Weisser WW (2014) A trait-based experimental approach to understand the mechanisms underlying biodiversity-ecosystem functioning relationships. *Basic and Applied Ecology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.baae.2014.02.003>
- Hanspach J, Kühn I, Pompe S, Klotz S (2010) Predictive performance of plant species distribution models depends on species traits. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics* 12(3): 219-225
- Hanspach J, Kühn I, Schweiger O, Pompe S, Klotz S (2011) Geographical patterns in prediction errors of species distribution models. *Global Ecology and Biogeography* 20(5): 779-788
- Hickler T, Bolte A, Harthard B, Beierkuhnlein C, Blaschke M, Blick T, Brüggemann W, Dorow WHO, Fritze M-A, Gregor T, Ibisch P, Kölling C, Kühn I, Musche M, Pompe S, Petercord R, Schweiger O, Seidling W, Trautmann S, Waldenspuhl T, Walentowski H, Wellbrock N (2012) Folgen des Klimawandels für die Biodiversität in Wald und Forst. In Mosbrugger V, Brasseur G, Schaller M, Stribny B (eds) *Klimawandel und Biodiversität - Folgen für Deutschland*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- Kropp J, Holsten A, Lissner T, Roithmeier O, Hattermann F, Huang S, Rock J, Wechsung F, Lüttger A, Pompe S, Kühn I, Costa L, Steinhäuser M, Walther C, Klaus M, Ritchie S, Metzger M (2009) *Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren*. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV)

-
- Kühn I, Pompe S, Trautmann S, Böhning-Gaese K, Rabitsch W (2013) Arealänderungen in der Zukunft. In Essl F, Rabitsch W (eds) Biodiversität und Klimawandel, Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa. Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Kühn I, Vohland K, Badeck F, Hanspach J, Pompe S, Klotz S (2009) Aktuelle Ansätze zur Modellierung der Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die biologische Vielfalt. *Natur und Landschaft* 84(1): 8-12
- Michalski SG, Durka W, Jentsch A, Kreyling J, Pompe S, Schweiger O, Willner E, Beierkuhnlein C (2010) Evidence for genetic differentiation and divergent selection in an autotetraploid forage grass (*Arrhenatherum elatius*). *Theoretical and Applied Genetics* 120(6): 1151-1162
- Nagy L, Badeck F-W, Pompe S, Gottfried M, Pauli H, Grabherr G (2010) Is atmospheric nitrogen deposition a cause for concern in alpine ecosystems? In: Settele J, Penev LD, Georgiev TA, Grabaum R, Grobelnik V, Hammen V, Klotz S, Kotarac M, Kühn I (eds) Atlas of biodiversity risk. Pensoft, Sofia
- Pompe S (2004) Sukzession in aufgelassenen Weinbergen des Mittleren Saaletals bei Jena. *Hercynia* 37(2): 175-199
- Pompe S, Bader M, Tannert C (2005) Stem-cell research: the state of the art - Future regulations of embryonic-stem-cell research will be influenced more by economic interests and cultural history than by ethical concerns. *Embo Reports* 6: 297-300
- Pompe S, Berger S, Bergmann J, Badeck F, Lübbert J, Klotz S, Rehse A-K, Söhlke G, Sattler S, Walther G-R, Kühn I (2011) Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland. BfN-Skripten 304. Bonn Bad Godesberg
- Pompe S, Berger S, Walther G-R, Badeck F, Hanspach J, Sattler S, Klotz S, Kühn I (2009) Mögliche Konsequenzen des Klimawandels für die Pflanzenwelt in Deutschland. *Natur und Landschaft* 84(1): 2-7
- Pompe S, Hanspach J, Badeck FW, Klotz S, Bruehlheide H, Kühn I (2010) Investigating habitat-specific plant species pools under climate change. *Basic and Applied Ecology* 11(7): 603-611
- Pompe S, Hanspach J, Badeck F, Klotz S, Thuiller W, Kühn I (2008) Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany. *Biology Letters* 4(5): 564-567

-
- Pompe S, Simon J, Wiedemann PM, Tannert C (2005) Future trends and challenges in pathogenomics - A foresight study. *Embo Reports* 6: 600-605
- Pompe S, Tannert C (2004) Stand der Stammzellforschung und Ethikdebatte in Deutschland. In Tannert C Wiedemann P (eds) *Stammzellen im Diskurs: Ein Lese- und Arbeitsbuch zu einer Bürgerkonferenz*. München. Ökom-Verlag
- Roscher C, Schumacher J, Lipowsky A, Gubsch M, Weigelt A, Pompe S, Kollé O, Buchmann N, Schmid B, Schulze E-D (2013) A functional trait-based approach to understand community assembly and diversity–productivity relationships over 7 years in experimental grasslands. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 15(3): 139-149

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Es wurden von mir keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt. Die in den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen wurden von mir als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde weder an einer Fakultät der Martin-Luther-Universität noch an einer anderen wissenschaftlichen Einrichtung zur Erlangung eines Doktorgrades eingereicht. Auch habe ich mich bisher nicht mit einer anderen Arbeit um eine Promotion beworben.

Halle/Saale, den 28.05.2014

Sven Pompe