

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 166 (2015)

Heft: 5

Artikel: Veränderungen deutscher Wälder durch Klimawandel und Stickstoffdeposition

Autor: Nickel, Stefan / Schröder, Winfried / Jenssen, Martin

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097544>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Veränderungen deutscher Wälder durch Klimawandel und Stickstoffdeposition

Stefan Nickel

Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Universität Vechta (DE)

Winfried Schröder

Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Universität Vechta (DE)*

Martin Jenssen

Waldkunde-Institut Eberswalde (DE)

Veränderungen deutscher Wälder durch Klimawandel und Stickstoffdeposition

Gemäss den Grundsätzen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel sollen die Ergebnisse der Klima(folgen)forschung einschliesslich deren Unsicherheiten im Sinne des Vorsorgeprinzips in Programmen und Instrumenten des Umwelt- und Naturschutzes stärker berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund wird eine Methode zur bundesweiten Kartierung klimabedingter Veränderungen der Wald- und Forstökosysteme vorgestellt. Als Grundlage wird ein System von Wald- und Forstökosystemtypen entwickelt und verwendet. Der dargestellte Modellierungsansatz beruht auf «Classification and Regression Trees (CART)» und stützt sich auf flächendeckend verfügbare Geoinformationen zu Klima, Boden und vegetationskundlichen Merkmalen. Die Methode ermöglicht grossräumige Kartierungen von Waldökosystemtypen in zumindest grober zeitlicher Auflösung (hier: Zeitfenster 1961–1990, 1991–2010, 2011–2040, 2041–2070). Möglichkeiten des Abgleichs der Ökosystemtypen mit den Lebensraumtypen nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) und einer darauf aufbauenden Einstufung der Veränderungsdisposition im Klimawandel werden aufgezeigt.

Keywords: climate change, ecosystem classification, Germany, monitoring data, potential natural vegetation, reference status

doi: 10.3188/szf.2015.0325

* Postfach 1553, DE-49364 Vechta, E-Mail winfried.schroeder@uni-vechta.de

Klimawandel und atmosphärische Stoffeinträge können Strukturen und Funktionen von Ökosystemen so verändern, dass deren Integrität, d.h. ihre Selbstorganisationsfähigkeit und Funktionalität sowie die Übereinstimmung abiotischer und biotischer Eigenschaften mit dem natürlichen Standortpotenzial (Kay 1991, Müller 2004), beeinträchtigt wird (Matson et al 1999, Phoenix et al 2006, Walther et al 2002). Solche Auswirkungen von Klimawandel und atmosphärischer Deposition werden zunehmend auch im Hinblick auf die Ziele des Naturschutzes und der Landschaftspflege diskutiert (Balla et al 2013, Korn et al 2014). Dies entspricht unter anderem dem Grundsatz der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (BMU 2008), die Ergebnisse der Klimaforschung einschliesslich deren Unsicherheiten im Sinne des Vorsorgeprinzips in Programmen und Instrumenten des Umwelt- und Naturschutzes stärker zu berücksichtigen.

Klimawandelbedingte Veränderungen biogeografischer Areale sind empirisch und modelltechnisch schon recht gut abgebildet (Jantsch et al 2014). Doch sind auch entsprechende Veränderungen auf

Ökosystemebene zu erwarten (Baron et al 2013, Porter et al 2013, Vose et al 2012, Wohlgemuth 2015). Aus Sicht des behördlichen Umwelt- und Naturschutzes in Deutschland werden auch solche synökologische Ansätze zur Analyse und räumlichen Darstellung klimabedingter Veränderungen auf Ökosystemtypenebene benötigt. Deshalb wurde eine Methode zur räumlichen und naturschutzfachlichen Analyse der Integrität von Wald- und Forstökosystemtypen unter dem Einfluss von Klimaveränderungen und atmosphärischen Stickstoffeinträgen entwickelt (Jenssen et al 2013). Diese beschränkt sich vorderhand auf Deutschland und umfasst 1) eine Typologie der Wald- und Forstökosysteme, 2) ein Indikatoren- und Referenzsystem für die Einstufung der Ökosystemintegrität, 3) ein numerisches Modell für die standortspezifische Abschätzung künftiger Ökosystemzustände, 4) eine Methode zur prädiktiven Kartierung von Arealverschiebungen räumlicher Komplexe von Ökosystemtypen sowie 5) Methodenbausteine zur Einstufung der Veränderungen. Vorausgesetzt werden allgemein verfügbare beziehungsweise leicht ermittelbare vegetations- und bodenkundliche Informationen sowie Daten zu Zeit-

verläufen der Entwicklung von Klimawandel und atmosphärischen Stoffeinträgen. Eine räumliche Erweiterung des Ansatzes auf Europa ist vorgesehen. Auf Basis der strukturell wie funktional begründeten Ökosystemtypisierung erfolgen kleinmasstäbige Kartierungen klimabedingter Ökosystemveränderungen flächendeckend für den Wald in Deutschland. Im Hinblick auf naturschutzfachliche Analysen werden zudem Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Klassifikationssystemen, hier insbesondere den Lebensraumtypen (LRT) des Anhangs I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie)¹, aufgezeigt.

Methoden und Ergebnisse

Ökosystemtypisierung

Ökosystemtypen sind nach Hofmann (1997) Einheiten, die sich durch eine interne Homogenität in wesentlichen Merkmalen ihrer Strukturen, Funktionen sowie bezüglich wuchsbestimmender ökologischer Faktoren auszeichnen. Die Ökosystemtypisierung erfolgte anhand von 21 600 Vegetationsanalysen

(Jenssen et al 2013) aus ganz Deutschland. Diese und andere Monitoringdaten, etwa des ICP-Forests-Level-II-Programms (De Vries et al 2003), ermöglichen für jeden Ökosystemtyp, dessen Zustand und zukünftige Entwicklungen anhand von Indikatoren folgender Funktionen zu quantifizieren: Lebensraumfunktion, Nettoprimärproduktion, Kohlenstoffspeicherung, Nährstoffhaushalt, Wasserhaushalt und Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Umweltbedingungen.

Die Ökosystemtypen wurden mithilfe eines dreidimensionalen Öko-Codes (z.B. C4-6d-B1 für den Rohhumus-Fichten-Hochbergwald) klassifiziert, wobei die drei Bausteine des Codes folgende Bedeutung haben:

1. pflanzengeografisch-ökoklimatische Region (Pflanzengesellschaften, Florenelemente); Beispiel: Hochberglagen – laubwaldfrei (oreal), Öko-Code C4-XX-XX

¹ Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen.

Ökosystemtyp		Potenzielle natürliche Vegetation	Lebensraumtyp
Code	Bezeichnung		
1. Waldökosysteme			
1.3. Atlantisch-subatlantisch-zentraleuropäische Tiefland-Waldökosysteme			
1.3.1. Tiefland-Buchenwald-Ökosysteme			
Eb-7n-C2	Moder-Buchen-Feuchtwald	Lb2f	9110
Eb-7n-E2	Mull-Eschen-Buchen-Feuchtwald	Nc6a	9130
Eb-5r-E2	Mull-Schatthang-Karbonatbuchenwald	Nc4b	9130
Eb-4n-C2	Moder-Sand-Traubeneichen-Buchenwald	Lb2c	9110
Eb-5n-C2	Moder-Buntsand-Buchenwald	Lc3a	9110
1.8. Hochmontan-subalpine Nadelbaumwälder und -gehölze			
1.8.1. Fichten-Hochbergwald-Ökosysteme			
Cg-7ü1-T4	Fichten-Bergauenwald	S3	9410
C4-8o-T3	Sauermoor-Fichten-Hochbergwald	S2	*91D0, 9410
C4-7m-Ta1N	Fichten-Block-Hochbergwald	SSF, T3	9410
C4-6d-B1	Rohhumus-Fichten-Hochbergwald	S1a	9410
C4-6d-Ta1N	Karbonat-Fichten-Hochbergwald	T2, T1	9410
2. Forstökosysteme			
2.1. Nadelbaumforsten			
2.1.4. Kiefern-Halbtrockenforsten			
Ec-2n-b1	Rohhumus-Kiefern-Halbtrockenforst	Ec-3n-B2	–
Eb, Ec-3n-c1	Moderrohhumus-Kiefern-Halbtrockenforst	Eb, Ec-3n-C1	–
Ec-3n-c2	Moder-Kiefern-Halbtrockenforst	Ec-3n-D1	–

Tab 1 Ökosystemtypologie (Auszug). **Ökosystem-Code:** Pflanzengeografisch-ökoklimatische Region: Cg = Hochbergwaldlagen insgesamt, C4 = Hochberglagen – laubwaldfrei (oreal), Eb = subatlantisches Tiefland, Ec = zentraleuropäisches Tiefland; Wasserhaushaltstyp: 2n = sehr trocken, 3n = trocken, 4n = mässig trocken, 5n = mittelfrisch, 6d = dauerfrisch, 7n = mittelfeucht, 7ü1 = dauerfeucht-überflutet, 7m = dauerfeucht-mineralisch, 8o = dauernass-organisch; Humuszustand: T4 = Sauer-Basen-Volltorf, T3 = Sauer-Volltorf, Ta1N = Tangel/Kalk, B1/b1 = Rohhumus, B2 = Moder-Rohhumus, C1/c1 = Rohhumus-Moder, C2/c2 = Moder, D1 = Braunnull; E2 = Kalkmull, Wurmmull; **Potenzielle natürliche Vegetation** (Suck et al 2010): S1a = Wollreitgras-Fichtenwälder, S2 = Torfmoos-Fichtenwälder, S3 = Waldschachtelhalm-Fichtenwälder, SSF = Fichten- und Karpaten-Ebereschen-Blockwälder, Lb2c = Schattenblumen-Buchenwälder, Lb2f = Faulbaum-Buchenwälder, Lc3a = typische Hainsimsen-Buchenwälder, Nc4b = Christophskraut-Waldgersten-Buchenwälder, Nc6a = Eschen-Buchenwälder, T1 = Alpenlattich-Fichtenwälder, T2 = Alpendost-Fichtenwälder, T3 = Streifenfarn-Fichtenwälder; **Lebensraumtyp** nach Anhang I der FFH-Richtlinie: 9110 = Hainsimsen-Buchenwald (Luzulo-Fagetum); 9130 = Waldmeister-Buchenwald (Asperulo-Fagetum); *91D0 = Moorwälder; 9410 = montane bis alpine bodensaure Fichtenwälder (Vaccinio-Piceetea).

2. Wasserhaushaltstyp inkl. Anmerkungen zu edaphisch-reliefbedingten Besonderheiten (Konstanz oder Variabilität, Durchströmungsverhältnisse des Bodens u.a.) mit einer Skala von 1 = dürr bis 9 = dauerhaft sehr nass; Beispiel: dauerfrisch, Öko-Code XX-6d-XX

3. Stoffkreislauftyp, charakterisiert durch den zugehörigen Humuszustand (z.B. Mull, Moder, Torf, Tangel); Beispiel: Rohhumus, Öko-Code XX-XX-B1

Insgesamt wurden 135 naturnähere Wald-Ökosystemtypen und 45 naturfernere Forstökosystemtypen, die derzeit in Deutschland vorkommen, quantitativ beschrieben.

Regionalisierung aktueller Wald- und Forstökosystemtypen Deutschlands

Die bundesweite Kartierung der Ökosystemtypen stützt sich wesentlich auf die Karte der potenziellen natürlichen Vegetation (pnV) Deutschlands (Suck et al 2010, 2013). Diese enthält Informationen zur potenziellen Verbreitung von Komplexen natürlicher Vegetationseinheiten und deren Beschreibung im Hinblick auf die Artenvorkommen mit einer Stetigkeit über 20% und deren mittlerer Mengenfaltung. Die Zuordnung dieser Vegetationskomplexe zu den in ihnen derzeit flächenmässig dominierenden Ökosystemtypen erfolgte auf Grundlage der oben genannten Vegetationsdatenbank (Jenssen et al 2013) nach Regeln (R1). Entscheidendes Kriterium für die Zuordnung der natürlichen Vegetationseinheiten zu einem derzeit vorkommenden, aktuellen Ökosystemtyp ist die Homogenität der Mengenfaltung der vorkommenden Arten (Hofmann & Passarge 1964). Formal wird das Homogenitätskriterium über eine Optimierung der prozentualen Ähnlichkeit nach Jenssen (2010) abgebildet:

$$S(p_1, \dots, p_r, p_1^o, \dots, p_r^o) = \sum_{i=1}^r \min(p_i, p_i^o) \times 100\% \quad 1)$$

Berechnet wird hierfür zunächst für jeden Ökosystemtyp die mittlere Mengenfaltung p_i^o aller Arten aus der Gesamtheit der Vegetationsaufnahmen der Datenbank, die diesem Ökosystemtyp zugeordnet wurden. Anschliessend wird mit den mittleren Deckungswerten p_i der mit einer Stetigkeit über 20% innerhalb der natürlichen Vegetationseinheiten vorkommenden Arten die Ähnlichkeit der Vegetationszusammensetzung zwischen den kartierten pnV-Einheiten und verschiedenen Ökosystemtypen bestimmt. Eine kartierte pnV-Einheit wird demjenigen natürlichen Ökosystemtyp zugeordnet, mit dem sie die höchste prozentuale Ähnlichkeit (S) nach Gleichung 1 besitzt (Tabelle 1).

Aktuelle Wald- und Forstökosysteme sind die unter gegenwärtiger Nutzung tatsächlich ausgebildeten Wald- und Forstökosystemtypen. Ihre Regionalisierung erfolgt, indem aus der Karte der pnV abgeleitete potenzielle natürliche Ökosystemtypen, d.h. unter heutigen Standort- und Umweltbedingungen in Selbstorganisation sich ausbildende naturnahe Waldökosystemtypen, mit den Landnutzungs-klassen der Corine Land Cover² und Informationen zur aktuellen Baumartenverteilung³ räumlich miteinander verknüpft werden. Ausgeschlossen werden Wälder mit nicht standortgerechter Bestockung. Aktuelle Wälder und Forsten werden nach den in

2 Corine Land Cover 2000 der Europäischen Umweltagentur (EEA). www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database (7.7.2015). Die Corine Land Cover 2005 lag zum Zeitpunkt der Verwendung der Daten für Deutschland noch nicht flächendeckend vor.

3 Daten zur Verbreitung von 30 Baumarten der Europäischen Umweltagentur (EEA), Auflösung 1 km × 1 km.

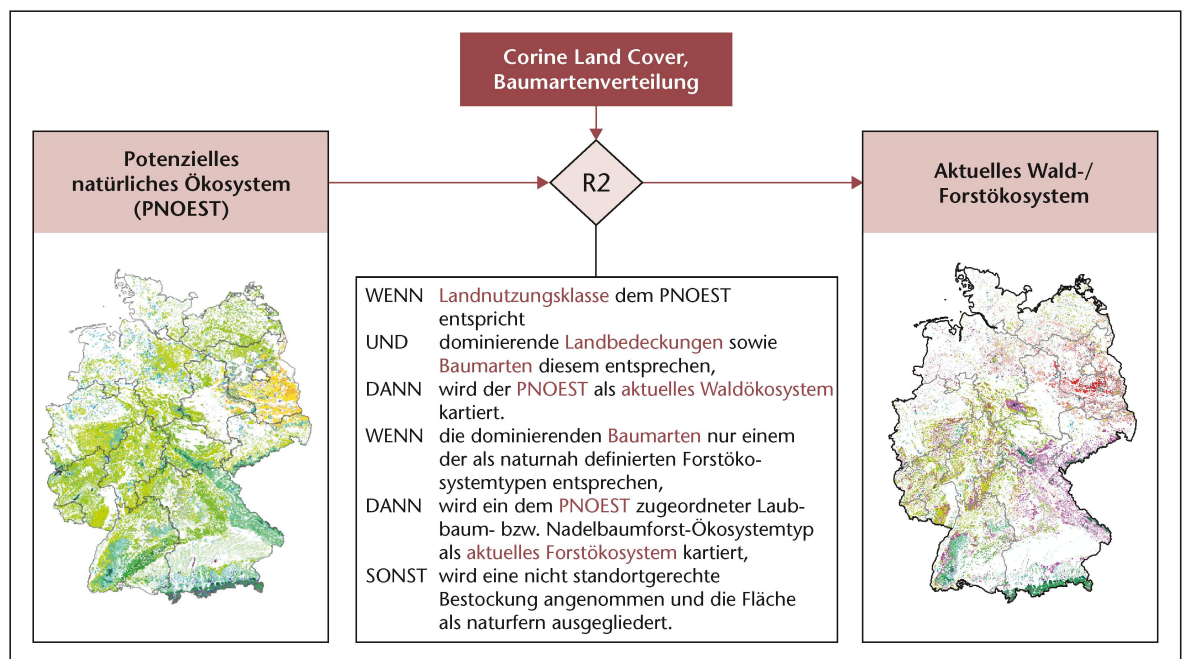


Abb 1 Regelbasierte Kartierung der aktuellen Wald- und Forstökosysteme in Deutschland.

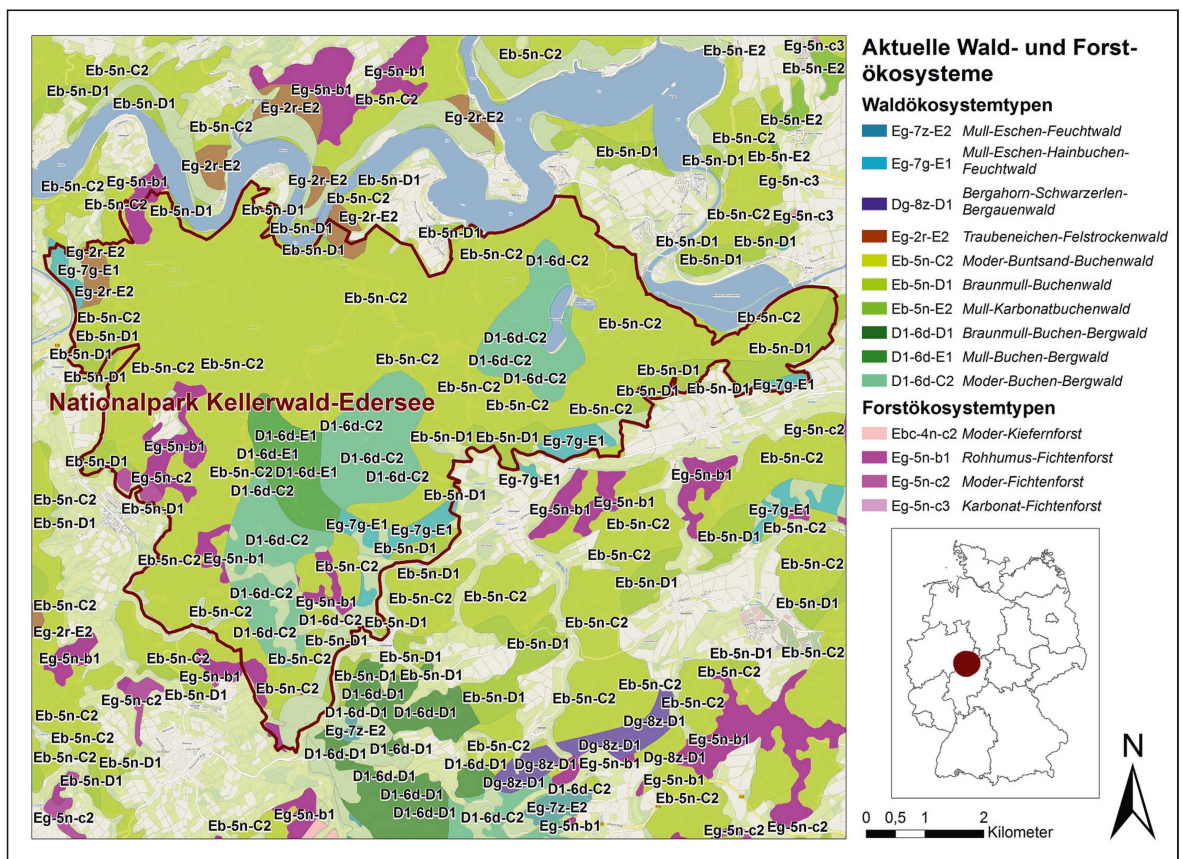


Abb 2 Aktuelle Wald- und Forstökosysteme im Nationalpark Kellerwald-Edersee (Deutschland).

Abbildung 1 verdeutlichteten Hauptregeln (R2) bestimmt.

Beispielsweise wird in einem Bereich mit potenziellem Vorkommen des Rohhumus-Traubeneichenwaldes (Ec-3n-B2) bei aktuellem Vorkommen von *Pinus sylvestris* der Rohhumus-Kiefern-Halbtrockenforst (Ec-2n-b1) als sekundäres Ökosystem, d.h. «Forstökosystem», kartiert beziehungsweise bei nicht standortgerechter Bestockung die Fläche ausgegliedert. Das Ergebnis der Regionalisierung der aktuellen Wälder und Forsten zeigt Abbildung 2 am Beispiel des Nationalparks Kellerwald-Edersee (Hessen).

Prädiktive Kartierung von Wald- und Forstökosystemtypen

Bei einer prädiktiven Kartierung wird die räumliche Verteilung einer Zielgröße durch Anwendung eines empirisch-statistischen Modells aus vorhandenen Daten geschätzt (Schröder et al 2006, 2007, Schröder & Pesch 2007). Die nachfolgend erläuterte prädiktive Kartierung der Ökosystemtypen fusst auf Berechnungen mit «Classification and Regression Trees (CART)». CART ermittelt diejenigen Ausprägungen von Objektmerkmalen, welche die statistische Verteilung der Objekte in den Stufen einer Zielvariablen durch eine Folge von Teilungen der jeweiligen Objektmenge in zwei Untergruppen Schritt für Schritt homogener werden lässt (Breiman et al 1984). Das in der vorliegenden Untersuchung berechnete CART-Modell stützt sich auf bundesweit

vorliegende Daten zu Klima, Orografie und Bodentextur und zielt auf eine räumlich explizite Prädiktion der derzeitigen Wald- und Forstökosystemtypen für die vier Zeitfenster 1961–1990 (Referenzzustand), 1991–2010 (aktueller Zustand) sowie 2011–2040 und 2041–2070. Als Prädiktoren für die Zielvariable Wald- und Forstökosysteme wurden verwendet:

- mittleres monatliches Temperaturminimum, -maximum und -mittel, mittlere monatliche relative Luftfeuchte, mittlere monatliche Evapotranspiration, mittlere monatliche Niederschlagssumme, aggregiert über die Jahre 1961–1990 in einer räumlichen Auflösung von 10 km × 10 km. Diese Prädiktoren wurden mit Werten aus dem statistischen regionalen Modell STAR II⁴ (Orlowsky et al 2008) parametrisiert;
- orografische Höhe in einer räumlichen Auflösung von 50 m × 50 m;⁵
- Bodenart (BÜK 1000).⁶

Auf der Grundlage einer Verschneidung der raumbezogenen Daten zu den gewählten Prädiktoren mit der Karte der aktuellen Wald- und Forstökosystemtypen ergab die Entscheidungsbaumanalyse ein CART-Modell mit 44 Raumklassen auf neun Ebe-

4 Statistisches Regionalisierungsmodell (STAR II). www.climate-service-center.de/011667/index_0011667.html (16.7.2015).

5 Höhenmodell des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG), Frankfurt a.M.

6 Nutzungsspezifische Bodenübersichtskarte 1:1000000 (BÜK 1000), Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

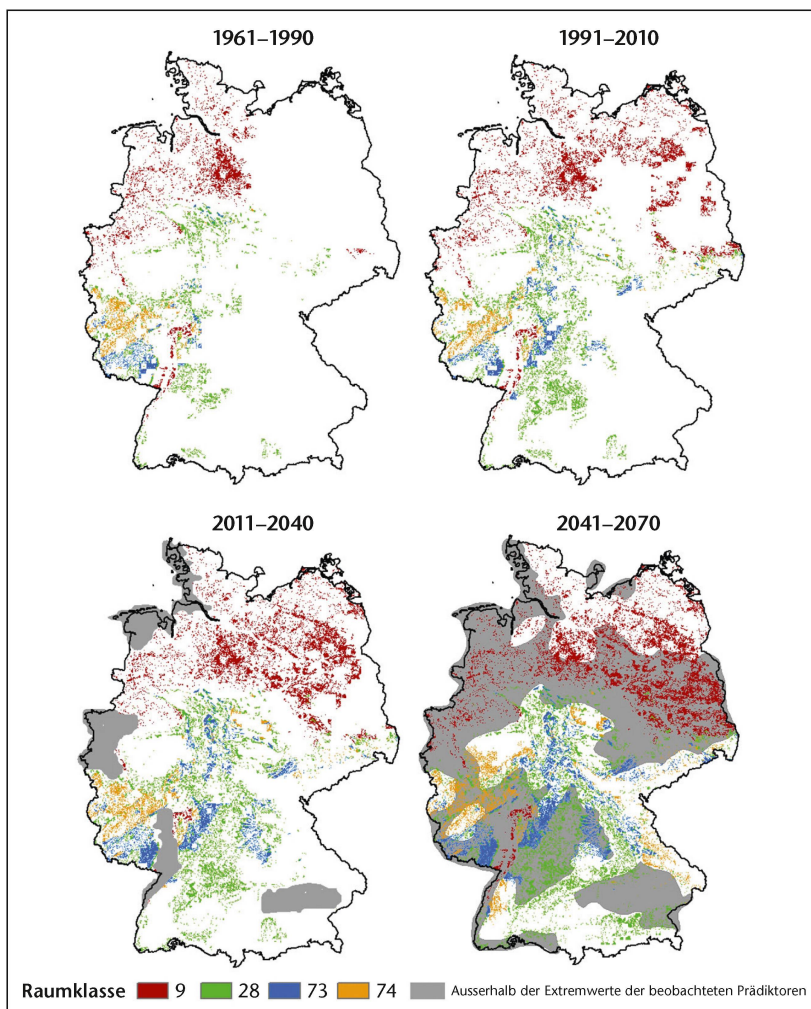


Abb 3 Veränderung der biogeografischen Räumuster der aktuellen Wald- und Forstökosystemtypen in Abhängigkeit von einem sich ändernden Klima. Dargestellt sind 4 von 44 Endknoten (= Raumklassen) des CART-Modells auf Basis eines Rasters von 500 m × 500 m. Jeder Endknoten umfasst mehrere Ökosystemtypen mit jeweils einem dominant auftretenden Wald- und Forstökosystemtyp: 9 = Ea-5n-c2, Atlantischer Moder-Kiefernforst; 28 = Eb-7n-D1, Braunnull-Buchen-Feuchtwald; 73 = Eb-5n-C2, Moder-Buntsand-Buchenwald; 74 = Eb-5n-D1, Braunnull-Buchenwald. Bereiche, bei denen Kennwerte für Temperatur, Niederschlag, Evapotranspiration und relative Luftfeuchte vorhergesagt wurden, die ausserhalb der Extremwerte der im Zeitraum 1961–1990 beobachteten Prädiktoren liegen, d.h. Bereiche, bei denen für die Zeitfenster 2011–2040 und 2041–2070 für Deutschland neuartige, mit dem statistischen Modell nicht fassbare Kombinationen der Klimakennwerte vorhergesagt werden, sind grau unterlegt.

Pflanzengeografisch-ökoklimatische Region	Flächenanteil (%)				
	1961–1990	1991–2010	2011–2040	2041–2070	Trend
B – Krummholzlagen	0.10	0.10	0.08	0.05	↘
C – Hochbergwaldlagen	5.37	4.98	4.02	3.27	↘↘
D – Bergwaldlagen	14.82	13.93	12.40	10.23	↘↘
E – Tieflagen bis untere Bergwaldlagen	79.71	80.99	83.50	86.45	↗
En – nordeuropäisch	0.04	0.00	0.00	0.00	↘↘
Ea – atlantisch	7.02	14.17	10.58	17.60	↗
Eb – subatlantisch	25.61	29.65	27.94	34.77	↗↗
Ec – zentraleuropäisch	16.97	8.34	10.34	8.02	↘↘
Ed – subkontinental	4.81	4.11	8.12	0.39	↘↘
Ee – submediterran	0.05	0.10	0.07	0.15	↗↗
Eg – allgemein	25.23	24.63	26.46	25.53	↗↗

Tab 2 Klimawandelbedingte Veränderungen der Flächenanteile der Wald- und Forstökosystemtypen, gruppiert nach ihrer pflanzengeografisch-ökoklimatischen Region. ↗ = Zunahme; ↗↗ = Zunahme, statistisch signifikant nach Mann-Kendall ($p < 0.1$); ↘ = Abnahme; ↘↘ = Abnahme, statistisch signifikant ($p < 0.1$).

nen mit einer Klassifikationsgüte von circa 43% (= Anteil der korrekt klassifizierten Objekte im Verhältnis zum gesamten Trainingsdatensatz). Dabei entspricht jeder der Klassen des Entscheidungsbaumes eine Mischung verschiedener Ökosystemtypen mit jeweils einem dominant auftretenden Wald-beziehungsweise Forstökosystemtyp. Jenssen et al (2013) beschreiben die 44 Raumklassen anhand der gewählten Prädiktoren quantitativ.

Die Anwendung des CART-Modells auf die bis zum Jahr 2070 berechneten STAR-II-Klimadaten ergibt die in Abbildung 3 dargestellten Veränderungen der biogeografischen Räumuster der Wald- und Forstökosystemtypen. Grundlage für die Modellierung ist das RCP8.5-Szenario des Weltklimarates (Nakicenovic & Swart 2001), das von einer weiteren, ungebremsten Zunahme der Treibhausgaskonzentration ausgeht und mit einer globalen Temperaturzunahme von 2.6 bis 4.8 °C bis ins Jahr 2100 rechnet.

Gruppiert man die Wald- und Forstökosystemtypen entsprechend ihren Zuordnungen zu pflanzengeografisch-ökoklimatischen Regionen (Ziffer 1 des Ökosystem-Codes), ergeben sich aus dem prozentualen Auftreten dieser Gruppen in den 44 Raumklassen und dem Flächenanteil der Raumklassen in Deutschland die in Tabelle 2 aufgezeigten Veränderungen über die vier Zeitfenster. Demnach nehmen entlang des Höhengradienten die Ökosystemtypen der subalpinen Krummholzlagen, Hochbergwaldlagen und Bergwaldlagen von 1961–1990 bis 2041–2070 deutlich ab (von 20.3% auf 13.6%), die Ökosystemtypen der Tieflagen bis unteren Bergwaldlagen entsprechend zu (von 79.7% auf 86.5%). Auffällig ist, dass die standörtlichen Potenziale für die nordeuropäisch, subkontinental und zentraleuropäisch geprägten Ökosystemtypen (En, Ec, Ed) gegen diesen Trend abnehmen, d.h., die Tieflagen bis unteren Bergwaldlagen eine (nach heutiger Klassifikation) zunehmend atlantisch bis subatlantische Klimatönung erfahren. Nach Mann-Kendall können diese Trends überwiegend als statistisch signifikant ($p < 0.1$) angesehen werden.

Zeitraum	Flächenanteil (%)				
	LRT *4070	LRT 9110	LRT 9130	LRT *91G0	LRT 9410
1961–1990	0.10	12.76	27.01	0.16	1.40
1991–2010	0.10	14.54	28.96	0.09	1.57
2011–2040	0.08	13.88	29.38	0.15	1.18
2041–2070	0.05	16.03	35.11	0.02	0.95
Trend	↘	↗	↗↗	↘↘	↘↘

Tab 3 Klimawandelbedingte Veränderungen der Flächenanteile ausgewählter Wald- und Forstökosystemtypen-Gruppen. Lebensraumtypen (LRT): *4070 = Buschvegetation mit *Pinus mugo* und *Rhododendron hirsutum* (*Mugo – Rhododendretum hirsutii*), 9110 = Hainsimsen-Buchenwald (*Luzulo-Fagetum*), 9130 = Waldmeister-Buchenwald (*Asperulo-Fagetum*), *91G0 = Pannonische Wälder mit *Quercus petraea* und *Carpinus betulus* (*Tilio-Carpinetum*), 9410 = Montane bis alpine bodensaure Fichtenwälder (*Vaccinio-Piceetea*). ↗ = Zunahme; ↗↗ = Zunahme, statistisch signifikant nach Mann-Kendall ($p < 0.1$); ↘ = Abnahme; ↘↘ = Abnahme, statistisch signifikant ($p < 0.1$).

Naturschutzfachliche Analyse

Als Grundlage für eine naturschutzfachliche Analyse dieser Trends wurden Möglichkeiten und Grenzen der Zuordnung der Ökosystemtypen zu den Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinie geprüft (Tabelle 1). Viele der Waldökosystemtypen korrespondieren mit dem Klassifikationssystem der FFH-Richtlinie wie beispielsweise der C3-6d-B2 mit Lebensraumtyp (LRT) 9110 «Hainsimsen-Buchenwald (*Luzulo-Fagetum*)». Nicht immer jedoch ist eine eindeutige Zuordnung möglich, da innerhalb der FFH-Lebensraumtypen deutliche Variationen in Bezug auf Boden- und Feuchteigenschaften auftreten können, die zu unterschiedlichen ökologischen Funktionen und Reaktionen auf Umweltveränderungen führen. Der entscheidende Vorzug der Ökosystemtypisierung

ist die vergleichsweise höhere innere Homogenität der Einheiten in wesentlichen Merkmalen der Struktur, der wuchsbestimmenden ökologischen Faktoren und der in den Ökosystemen ablaufenden Prozesse.

Gruppiert man die in Abbildung 2 dargestellten Wald- und Forstökosystemtypen in den CART-Raumklassen anhand der zugeordneten FFH-Lebensraumtypen, ergeben sich die in Tabelle 3 aufgezeigten Veränderungen des für diese LRT charakteristischen naturräumlichen Potenzials. So resultieren hieraus bis zum Jahr 2070 deutliche Belastungen für den prioritären LRT *4070 «Buschvegetation mit *Pinus mugo* und *Rhododendron hirsutum* (*Mugo – Rhododendretum hirsutii*)» sowie den LRT 9410 «Montane bis alpine bodensaure Fichtenwälder (*Vaccinio-Piceetea*)». Dieser negative Trend entspricht den durch Tabelle 2 verdeutlichten Entwicklungen in den subalpinen Krummholzlagen und Hochbergwaldlagen. Der Rückgang des LRT *91G0 «Pannonische Wälder mit *Quercus petraea* und *Carpinus betulus* (*Tilio-Carpinetum*)» überrascht zunächst, ist doch der typische Standort durch trockene bis wechsellrockene Böden in wärmebegünstigten Lagen gekennzeichnet (Ssymank et al 1998). Besonderheiten ergeben sich hier vor allem durch den Wechsel der Raumklassen 18, 29 und 65 zur Raumklasse 9. Neben dem nicht unerwarteten Anstieg der mittleren Lufttemperatur erhöht sich hier nämlich auch die mittlere Niederschlagsmenge von 549–576 auf 779 mm (Zunahme um 202–230 mm). Dies entspricht dem in Tabelle 2 aufgezeigten Wandel von den subkontinentalen Lagen mit relativ geringen Niederschlägen zu den eher atlantisch bis subatlantisch geprägten Klimatönungen.

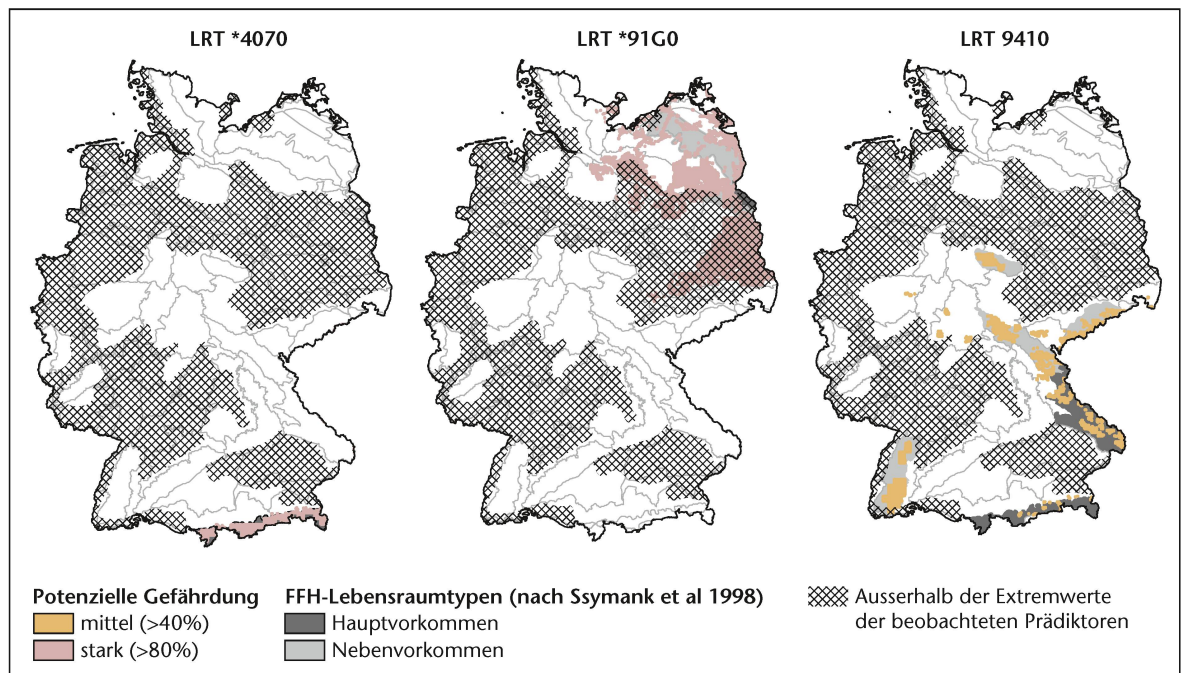


Abb 4 Kartierung klimawandelbedingter Veränderungsdispositionen ausgewählter FFH-Lebensraumtypen bis zum Jahr 2070. Lebensraumtypen (LRT): *4070 = Buschvegetation mit *Pinus mugo* und *Rhododendron hirsutum* (*Mugo – Rhododendretum hirsutii*), *91G0 = Pannonische Wälder mit *Quercus petraea* und *Carpinus betulus* (*Tilio-Carpinetum*), 9410 = Montane bis alpine bodensaure Fichtenwälder (*Vaccinio-Piceetea*).

Die Veränderungsanalyse der CART-Raumklassen zwischen den Zeitfenstern 1961–1990 und 2041–2070 ermöglicht ferner eine Allokation von Gefährungsdispositionen für bestimmte FFH-Lebensraumtypen (Abbildung 4). Hierfür werden Arealverluste zwischen 1961–1990 und 2041–2070 von >80% als starke Veränderungen und Arealverluste von 40–80% als mittlere Veränderungen des LRT-spezifischen Standortpotenzials eingestuft. Der Vergleich mit bekannten Verbreitungsarealen der LRT (Szymank et al 1998) führt zur räumlichen Darstellung der zu erwartenden Veränderungsdispositionen. Demnach liefert die prädiktive Kartierung ein deutliches Signal für den Rückgang des LRT *4070 in den Naturräumen der deutschen Alpen und Vor-alpen. Mittlere klimabedingte Änderungen des natürlichen Standortpotenzials für den LRT 9410 ergeben sich im Schwarzwald, im Oberpfälzer und im Bayerischen Wald, im Thüringisch-Fränkischen Mittelgebirge, im Sächsischen Mittelgebirge sowie im Harz. Starke Potenzialveränderungen sind bis 2070 auch im Verbreitungsschwerpunkt des LRT *91G0 (Unteres Odertal und Nördliches Mittelmärkisches Plattenland) zu erwarten.

Diskussion

Methodenwahl

Für die Projektion des zukünftig zu erwartenden Klimas und von biogeografischen Mustern stehen wie in vielen anderen Fällen empirischer und statistischer Analysen mehrere Methoden mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen zur Verfügung (Dhanjal et al 2014, Guisan & Zimmermann 2000, LUA-BB 2010). Die Auswahl der Verfahren und ihrer Anwendungsspezifikationen ist bearbeiterabhängig und somit subjektiv (Johnston 1968). Diese unumgängliche, primäre Subjektivität kann durch transparente Dokumentation auf einer zweiten Ebene Objektivierung ermöglichen. Denn die Nachvollziehbarkeit ermöglicht es, zu prüfen, ob die Ergebnisse bearbeiterunabhängig reproduzierbar und insofern objektiv sind (Schröder et al 1991).

Die klimatischen Randbedingungen für die Projektion von Wald- und Forstökosystemtypen-Regionen mit CART wurden mit STAR-II-Daten berechnet (Orlowsky et al 2008). STAR II ist eines von vier Simulationsmodellen, die in Deutschland für regionale Klimaprojektionen verwendet werden (LUA-BB 2010): WettReg und STAR II sind statistische, CLM und REMO dynamische Klimamodelle. Beide dynamischen Modelle liefern für diese Untersuchung nicht ausreichend viele Szenarien (Jenssen et al 2013). Vorteile von WettReg, dem wetterlagenbasierten Regionalisierungsverfahren (Spekat et al 2007), sind die statistisch konsistente Beschreibung des gegenwärtigen und zukünftigen Klimas in Raum und

Zeit, die Ausnutzung von dynamischen Eigenschaften des Globalmodells sowie eine Rechnerressourcen schonende Herstellungsweise der Modelldaten. Nachteile von WettReg sind die Bindung an das Vorhandensein von Stationsdaten in hoher räumlicher Dichte sowie die Nichtberücksichtigung neuer Wetterlagen oder dynamischer Prozesse aus der Klimaänderung (LUA-BB 2010). Vorteile des hier gewählten STAR II bilden dagegen die physikalische Konsistenz der meteorologischen Beobachtungsgrößen durch einen rekombinatorischen Ansatz, der von den Defiziten globaler Modelle unabhängige Antrieb, die gute Wiedergabe der Beobachtungsdaten sowie eine Rechnerressourcen schonende Herstellungsweise der Modelldaten auch bei sehr grossen Ensembles (hier: 1000 Realisierungen, aus denen der Medianwert ausgewählt wurde). Einschränkungen für dieses Modell ergeben sich aus seiner Bindung an das Vorhandensein von Stationsdaten in hoher räumlicher Dichte sowie aus der ausschliesslich statistischen Kopplung der Wetterelemente an die Temperaturänderungen und die Datenverfügbarkeit bis 2070 (LUA-BB 2010).

Chi-square Automatic Interaction Detection (Kass 1980) hätte für diese Untersuchung anstelle des in Umweltwissenschaften immer häufiger für Vorhersagen (Burrows 1997, Chen et al 2014) eingesetzten CART verwendet werden können. Dasselbe gilt für Quick, Unbiased and Efficient Statistical Tree (Loh & Shih 1997) und Random Forests (Breiman et al 2001), die eine Erweiterung des CART-Algorithmus darstellen und die sich in verschiedenen Studien für die prädiktive Kartierung ökologischer Phänomene in terrestrischen und marinen Umweltmedien bewährt haben (Prasad et al 2006, Cutler et al 2007, Gonzalez-Mirelis & Lindegarth 2012). Für diese Studie wurde auf CART unter anderem deshalb zurückgegriffen, weil es die methodische Anschlussfähigkeit an die ökologische Raumgliederung Deutschlands (Schröder et al 2006) sichert.

Potenzial der Methodik

Die dargestellte Methodik ermöglicht eine integrative Analyse der Veränderung der Integrität von Waldökosystemen im Klimawandel und – hier aus Platzgründen nicht behandelt – in Kombination mit Stoffeinträgen. Die Methodik basiert auf einer umfangreichen vegetationskundlichen Datenbank (Jenssen et al 2013), bundesweit verfügbaren Daten aus Kartengrundlagen und langfristigen Monitoringprogrammen und wird – hier aus Platzgründen nicht dargestellt – durch dynamische Modellierungen zukünftiger Klima- und Bodenverhältnisse ergänzt. Die Methodik ermöglicht die Bestimmung und Kartierung potenziell natürlicher Waldökosystemtypen sowie aktueller Wald- und Forstökosystemtypen. Für bestimmte Klimaszenarien und atmosphärische Stickstoffeinträge (2011–2070) können zukünftig plausible Ökosystementwicklungen pro-

jjiziert und bewertet werden. Das Bewertungskonzept stellt eine Ergänzung bereits existierender Bewertungsverfahren für Ökosystemzustände dar, indem es abiotische Umweltfaktoren und ihre Veränderungen als Treiber biologischer Veränderungen und Ökosystemfunktionen stärker einbezieht. Gleichzeitig soll es dazu dienen, die Ursachen von Störungen möglichst früh zu erkennen und geeignete Massnahmen zum Erhalt und zur Entwicklung eines guten Ökosystemzustands abzuleiten.

Grundlegender Bestandteil der Methodik ist die Typisierung von Wald- und Forstökosystemen Deutschlands. Ihre Konkordanz zu anderen Ökosystemklassifizierungen, für die bisher keine bundesweit durchgeführte räumliche Konkretisierung vorliegt (European Nature Information System; Riecken et al 2006), wurde erreicht. Damit ist die entwickelte Ökosystemtypisierung anschlussfähig, und die mit ihr verknüpften Systematisierungen gewinnen an ökologisch fundierter Interpretierbarkeit und räumlicher Differenzierung.

Die Prädiktionsergebnisse bestätigen räumlich konkretisierend plausible, räumlich aber nicht explizierte Annahmen. Sie verdeutlichen den Verlust an Höhenzonierung und die Zunahme atlantischer Klimatelemente mit submediterraner Tönung. Letztere ist vor allem eine Folge der Zunahme von Intensität und Dauer sommertrockener Phasen, während abnehmende Kontinentalität des Klimas durch Zunahme von Wintermilde und Winterniederschlägen angezeigt wird. Abschliessend sei nochmals auf die Klassifikationsgüte des Entscheidungsbaummodells von 43% hingewiesen.

Einschränkungen der Methodik

Wie jede andere Methodik ist auch die vorgestellte mit Einschränkungen behaftet. Diese sind zum Teil grundsätzlicher Art, wie die Tatsache, dass Prognosen nicht ex ante, sondern nur ex post verifiziert werden können. Als induktive Schlüsse sind sie logisch nicht vollständig zu rechtfertigen (Stegmüller 1986). Andere Einschränkungen sind praktischer Natur und können durch Weiterentwicklung gemindert werden. So wirken sich neben den massstabsbedingten Generalisierungseffekten die vereinfachten Modellannahmen sowie die Qualität der Daten zur Baumartenverteilung und Landnutzung erheblich auf das Kartierungsergebnis aus.

Die hier vorgestellte kleinmasstäbige Kartierung, die flächendeckend für Deutschland durchgeführt werden kann, wurde im Projekt (Jenssen et al 2013) durch eine standortbezogene, nicht flächendeckende Veränderungsanalyse zur Ökosystemintegrität durch Koppelung der Ökosystemtypisierung mit dynamischen Modellen ergänzt. Mit grossräumigen Kartierungen ist naturgemäss der Nachteil verknüpft, dass die räumliche Auflösung der verwendeten Daten und der daraus abgeleiteten Ergebnisse

gegenüber der nur für kleine Regionen oder einzelne Standorte durchführbaren dynamischen Modellierung geringer ist. Hinzu kommen die geringere zeitliche Auflösung und der statische Charakter der prädiktiven flächendeckenden Kartierung. Angesichts der Grobschnittigkeit und relativ geringen Klassifikationsgüte von 43%, dafür aber mit der flächenspezifischen Abschätzbarkeit der Folgen von Klimaveränderungen für FFH-Waldlebensraumtypen kann das hier vorgestellte Entscheidungsbaummodell als Zwischenschritt zu vertiefenden standörtlichen Betrachtungen mit dynamischen Modellen des Wasser- und Stoffhaushalts, zum Beispiel im FFH-Monitoring (Sachteleben & Behrens 2010), dienen.

Zu beachten ist ferner, dass die berechneten biogeografischen Veränderungen auf Ökosystemtypenebene aufgrund des gewählten Klimamodells STAR II noch nicht beobachtete Extremwerte nicht berücksichtigen und auf die heutigen Ökosystemtypen Deutschlands beschränkt sind (Abbildungen 3 und 4). Beispielsweise findet ein subatlantisches Laubwaldklima mit submediterraner Prägung keinen Niederschlag in der aktuellen bundesweiten Verteilung der Ökosystemtypen. Es ist vielmehr davon auszugehen, dass gebietsweise ein zumindest für Deutschland qualitativ neuartiges Klima zu erwarten ist, das auch zu neuen Vegetationsformen und damit Ökosystemtypen führt. Betrachtet man die europäische Ebene, so findet man eine gewisse Ähnlichkeit zwischen den Klimaszenarien für die norddeutsche Tiefebene und dem heutigen Klima zum Beispiel in kollinen und submontanen Gebieten des französischen Zentralmassivs. Dort gibt es eine pnV, in der die Buche aufgrund der Sommertrockenheit zurückgedrängt wird und die Traubeneiche einen höheren Anteil in Buchenmischwäldern ausmacht, ähnlich wie in den zentraleuropäischen Buchenmischwäldern. Damit ist der oben geschilderte Trend zur Abnahme der zentraleuropäischen Ökosystemtypen wieder zu relativieren, was aber mit dem bislang auf die pnV Deutschlands beschränkten statistischen Ansatz nicht weiter geprüft werden kann. Hierfür wären weiterführende Untersuchungen, zum Beispiel auf Grundlage der Karte der pnV Europas (Bohn et al 2000/2003, Bohn et al 2005), sinnvoll. Zukünftige Arbeiten sollten darauf abzielen, neben CART auch andere Algorithmen für die Prädiktion zukünftiger Ausprägungen der Wald- und Forstökosysteme anzuwenden und diesbezügliche Ergebnisse sowohl statistisch wie auch nach fachlichen Gesichtspunkten vergleichend zu bewerten.

Ausblick

In Expertenworkshops wurde die Methodik grundsätzlich positiv aufgenommen, und es wurden Vorschläge für deren Weiterentwicklung erarbeitet.

Demnach liesse sich der praktische Nutzen der Methodik erhöhen, indem die auf Stoff-, Wasser- und Energiehaushalt ausgerichtete Bewertung noch stärker mit fachlichen Bewertungen (z.B. Naturschutz) verknüpft wird, um eine noch umfassendere Aussage zur Ökosystemintegrität aus Sicht potenzieller Anwender zu erreichen. Es sollten die wissenschaftlichen Grundlagen des Bewertungskonzeptes weiterentwickelt und die Praktikabilität der erarbeiteten Methoden in weiteren Beispielgebieten überprüft werden. Der entwickelte Ansatz sollte von der Bundesebene bis zur lokalen Ebene räumlich konkretisiert werden.

Entsprechend diesen und anderen hier nicht einzeln aufgeführten Empfehlungen werden in einem Anschlussprojekt 1) die datenbasierte Kartierung der Ökosystemtypen überprüft und verbessert, 2) die bisher erarbeiteten Grundlagen des Bewertungssystems weiterentwickelt und 3) unter Mitwirkung von Vertretern aus der Praxis (Bund, Länder, Kommunen, Schutzgebietsverwaltungen) die Bewertungsansätze zu einem praxistauglichen integrierten Bewertungssystem für Ökosystemfunktionen konkretisiert. ■

Eingereicht: 17. Juli 2014, akzeptiert (mit Review): 4. August 2015

Dank

Für die finanzielle Förderung und den fachlichen Rat bedanken wir uns beim Umweltbundesamt (Dessau, Deutschland).

Literatur

- BALLA S, BERNOTAT D, FROMMER J, GARNIEL A, GEUPEL M ET AL (2014)** Stickstoffeinträge in der FFH-Verträglichkeitsprüfung: Critical Loads, Bagatellschwelle und Abschneidekriterium. *Waldökol Landschaftsforsch Natursch* 14: 43–56.
- BARON JS, HALL EK, NOLAN BT, FINLAY JC, BERNHARDT ES ET AL (2013)** The interactive effects of human-derived nitrogen loading and climate change on aquatic ecosystems of the United States. *Biogeochemistry* 114: 71–92.
- BMU (2008)** Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Berlin: Bundesministerium Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. 78 p.
- BOHN U, NEUHÄUSL R, GOLLUB G, HETTWER C, NEUHÄUSLOVÁ Z ET AL (2000/2003)** Karte der natürlichen Vegetation Europas. Massstab 1:2 500 000. Teil 1, Erläuterungstext, 655 p. Teil 2, Legende, 153 p. Teil 3, Karten: 9 Blätter, Legendenblatt, Übersichtskarte 1:10 Mio. Münster: Landwirtschaftsverlag.
- BOHN U, HETTWER C, GOLLUB G, EDITORS (2005)** Anwendung und Auswertung der Karte der natürlichen Vegetation Europas. Bonn: Bundesamt Naturschutz, BfN-Skripten 156. 452 p.
- BREIMAN L, FRIEDMAN J, OLSHEN R, STONE C (1984)** Classification and Regression Trees. Belmont, CA: Wadsworth. 358 p.
- BREIMAN L (2001)** Random Forests. *Machine learning* 45: 5–32.
- BURROWS WR (1997)** CART regression models for predicting UV radiation at the ground in the presence of cloud and other environmental factors. *J Appl Meteor* 36: 531–544.

- CHEN G, LI X, CHEN J, ZHANG Y, PEIJENBURG WJGM (2014)** Comparative study of biodegradability prediction of chemicals using decision trees, functional trees, and logistic regression. *Environ Toxicol Chem* 33: 2688–2693.
- CUTLER DR, EDWARDS TC JR, BEARD KH, CUTLER A, HESS KT ET AL (2007)** Random forests for classification in ecology. *Ecology* 88: 2783–2792.
- DE VRIES W, VEL E, REINDS GJ, DEELSTRA H, KLAP JM ET AL (2003)** Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe – 1. Objectives, set-up and evaluation strategy. *For Ecol Manage* 174: 77–95.
- DHANJAL C, BASKIOTIS N, CLÉMENÇON S, USUNIER N (2014)** An empirical comparison of V-fold penalisation and cross-validation for model selection in distribution-free regression. *Pattern Anal Appl*. doi: 10.1007/s10044-014-0381-y
- GONZALEZ-MIRELIS G, LINDEGARTH M (2012)** Predicting the distribution of out-of-reach biotopes with decision trees in a Swedish marine protected area. *Ecol Appl* 22: 2248–2264.
- GUISAN A, ZIMMERMANN NE (2000)** Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol Model* 135: 147–186.
- HOFMANN G, PASSARGE H (1964)** Über Homogenität und Affinität in der Vegetationskunde. *Arch Forstwes* 13: 1119–1138.
- HOFMANN G (1997)** Mitteleuropäische Wald- und Forstökosystemtypen in Wort und Bild. *Allg Forst Z Waldwirtsch Umweltvorsorge, Sonderheft*, 85 p.
- JANTSCH MC, FISCHER HS, WINTER S, FISCHER A (2014)** How are plant species in central European Beech (*Fagus sylvatica* L.) forests affected by temperature changes? Shift of potential suitable habitats under global warming. *Ann Bot* 4: 97–113.
- JENSSEN M (2010)** Modellierung und Kartierung räumlich differenzierter Wirkungen von Stickstoffeinträgen in Ökosysteme im Rahmen der UNECE-Luftreinhaltekonvention. Teilbericht III: Modellierung der Wirkung der Stickstoff-Deposition auf die biologische Vielfalt der Pflanzengesellschaften von Wäldern der gemässigten Breiten. Dessau: Umweltbundesamt, UBA-Texte 09/2010. 50 p.
- JENSSEN M, HOFMANN G, NICKEL S, PESCH R, RIEDIGER J ET AL (2013)** Bewertungskonzept für die Gefährdung der Ökosystemintegrität durch die Wirkungen des Klimawandels in Kombination mit Stoffeinträgen unter Beachtung von Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen. Dessau: Umweltbundesamt, UBA-Texte 87/2013. 381 p.
- JOHNSTON RJ (1968)** Choice in classification: The subjectivity of objective methods. *Ann Ass Am Geogr* 58:575–589.
- KASS GV (1980)** An exploratory technique for investigating large quantities of categorical data. *Appl Stat* 29:119–127.
- KAY JJ (1991)** A nonequilibrium thermodynamic framework for discussing ecosystem integrity. *Environ Manage* 14: 483–495.
- KORN H, BOCKMÜHL K, SCHLIEP R, EDITORS (2014)** Biodiversität und Klima. Ergebnisse und Dokumentation des 10. Workshops. Vilm: Bundesamt Naturschutz, BfN-Skripten 357. 119 p.
- LOH WY, SHIH YS (1997)** Split selection methods for classification trees. *Stat Sinica* 7: 815–840.
- LUA-BB (2010)** Auswertung regionaler Klimamodelle für das Land Brandenburg. Darstellung klimatologischer Parameter mit Hilfe vier regionaler Klimamodelle (CLM, REMO, WettReg und STAR) für das 21. Jahrhundert, Kurzfassung. Potsdam: Landesumweltamt Brandenburg, Fachbeiträge des Landesumweltamtes 113. 24 p.
- MATSON PA, MCDOWELL WH, TOWNSEND AR, VITOUSEK PM (1999)** The globalization of N deposition: ecosystem consequences in tropical environments. *Biogeochemistry* 46: 67–83.
- MÜLLER F (2004)** Ecosystem indicators for the integrated management of landscape health and integrity. In: Joergensen SE, Constanza R, Fu-Liu X, editors. *Handbook of ecological indicators for assessment of ecosystem health*. Boca Raton: Taylor & Francis. pp. 277–303.

- NAKICENOVIC N, SWART R, EDITORS (2001)** Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Geneva: IPCC. www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/089.htm (16.7.2015).
- ORLOWSKY B, GERSTENGARBE FW, WERNER PC (2008)** A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theor Appl Climatol* 92: 209–223.
- PHOENIX GK, HICKS WK, CINDERBY S, KUYLENTIERNIA JCI, STOCK WD ET AL (2006)** Atmospheric nitrogen deposition in world biodiversity hotspots: the need for a greater global perspective in assessing N deposition impacts. *Glob Chang Biol* 12: 470–476.
- PORTER EM, BOWMAN WD, CLARK CM, COMPTON JE, PARDO LH ET AL (2013)** Interactive effects of anthropogenic nitrogen enrichment and climate change on terrestrial and aquatic biodiversity. *Biogeochemistry* 114: 93–120.
- PRASAD AM, IVERSON LR, LIAW A (2006)** Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems* 9: 181–199.
- RIECKEN U, FINCK P, RATHS U, SCHRÖDER E, SSYMANK A (2006)** Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands. Bonn: Bundesamt Naturschutz, Naturschutz und Biologische Vielfalt 34. 318 p.
- SACHTELEBEN J, BEHRENS M (2010)** Konzept zum Monitoring des Erhaltungszustandes von Lebensraumtypen und Arten der FFH-Richtlinie in Deutschland. Bonn: Bundesamt Naturschutz, BfN-Skripten 278. 183 p.
- SCHRÖDER W, GARBE-SCHÖNBERG CD, FRÄNZLE O (1991)** Die Validität von Umweltdaten – Kriterien für ihre Zuverlässigkeit: Repräsentativität, Qualitätssicherung und -kontrolle. *Umweltwiss Schadstoff-Forsch* 3: 237–241.
- SCHRÖDER W, SCHMIDT G, HORNSMANN I (2006)** Landschaftsökologische Raumbgliederung Deutschlands. In: Fränzle O, Müller F, Schröder W, editors. *Handbuch der Umweltwissenschaften. Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung*. München: Wiley, 17 ed. 100 p.
- SCHRÖDER W, PESCH R (2007)** Synthesizing bioaccumulation data from the German Metals in Mosses Surveys and relating them to ecoregions. *Sci Total Environ* 374: 311–327.
- SCHRÖDER W, PESCH R, SCHMIDT G (2007)** Statistical classification of terrestrial and marine ecosystems for environmental planning. *Landscape Online* 2. 22 p.
- SPEKAT A, ENKE W, KREIENKAMP F (2007)** Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Dessau: Umweltbundesamt. 149 p.
- SSYMANK A, HAUKE, U, RÜCKRIEM, SCHRÖDER E (1998)** Das europäische Schutzgebietssystem Natura 2000. BfN-Handbuch zur Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie und der Vogelschutz-Richtlinie. Bonn: Bundesamt Naturschutz, Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz 53. 560 p.
- STEGMÜLLER W (1986)** Das Problem der Induktion: Humes Herausforderung und moderne Antworten. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft. 88 p.
- SUCK R, BUSHART M, HOFMANN, G, SCHRÖDER L, BOHN U (2010)** Karte der potentiellen natürlichen Vegetation Deutschlands: Band 1. Masstab 1 : 500 000; Karten und Legende. Bonn: Bundesamt Naturschutz. 24 p.
- SUCK R, BUSHART M, HOFMANN, G, SCHRÖDER L (2013)** Karte der potentiellen natürlichen Vegetation Deutschlands. Band 1: Kartierungseinheiten. Bonn: Bundesamt Naturschutz, BfN-Skripten 49. 305 p.
- VOSE JM, PETERSON DL, PATEL-WEYNAND T, EDITORS (2012)** Effects of climatic variability and change on forest ecosystems: a comprehensive science synthesis for the U.S. forest sector. Portland OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-870. 265 p.
- WALTHER GR, POST E, CONVEY P, MENZEL A, PARMESAN C ET AL (2002)** Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389–395.
- WOHLGEMUTH T (2015)** Climate change and tree responses in Central European forests. *Ann For Sci* 72: 285–287.

Modifications des forêts allemandes par le changement climatique et les dépôts d'azote

Selon les principes de la stratégie allemande d'adaptation au changement climatique, les résultats de la recherche sur le climat, ses conséquences et ses incertitudes doivent, selon le principe de précaution, mieux être intégrés dans les programmes et instruments de la protection de la nature et de l'environnement. Dans ce cadre est présentée une méthode permettant de cartographier à l'échelle du pays les changements des types d'écosystèmes naturels en Allemagne. Un ensemble de types d'écosystèmes forestiers a été développé et utilisé comme base. L'approche de modélisation présentée dans cet article repose sur la Classification and Regression Trees (CART) et se base sur les données géomatiques du climat, du sol et des caractéristiques de la végétation disponibles pour l'ensemble du pays. La méthode permet de cartographier à large échelle les types d'écosystèmes forestiers au moins grossièrement au fil du temps (ici: les périodes 1961–1990, 1991–2010, 2011–2040, 2041–2070). Les possibilités de recoupement des types d'écosystèmes avec les types d'habitats naturels selon l'annexe I des directives des habitats de la faune et de la flore (FFH-Richtlinie) ainsi qu'une classification y relative de la disposition au changement par rapport au climat sont démontrées.

Changes of forests in Germany due to climate change and nitrogen deposition

According to the principles of the German Strategy for Adaptation to Climate Change nature conservation programmes and instruments should take more account of the findings of climate research, including the relevant uncertainties. In this context, a method for mapping climate-induced changes of ecosystem types is presented. It is built on a classification system for forest ecosystem types in Germany. The modelling approach is based on Classification and Regression Trees (CART) and geographic information on climate, soil and vegetation features available with blanket coverage of Germany. This method allows users to produce nationwide maps in a coarse temporal resolution (here: 1961–1990, 1991–2010, 2011–2040, 2041–2070). It is demonstrated how the allocation of the ecosystem types to Habitats Directive Annex I habitat types can be used to estimate changes of habitat types as a result of climate warming.