

Christian Wirth, Helge Bruelheide, Nina Farwig,
Jori Maylin Marx, Josef Settele (Hrsg.)



Faktencheck Artenvielfalt

Bestandsaufnahme und Perspektiven für den Erhalt
der biologischen Vielfalt in Deutschland

natürlich oekom!

Mit diesem Buch halten Sie ein echtes Stück Nachhaltigkeit in den Händen. Durch Ihren Kauf unterstützen Sie eine Produktion mit hohen ökologischen Ansprüchen:

- Verzicht auf Plastikfolie
- Finanzierung von Klima- und Biodiversitätsprojekten
- kurze Transportwege – in Deutschland gedruckt

Weitere Informationen unter www.natürlich-oekom.de
und #natürlicheoekom



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Großes Coverbild:

Baumweißling (*Aporia crataegi*) auf Weißdorn (*Crataegus*). Tagfalter wie der Baumweißling sind insbesondere als Raupen auf ganz bestimmte Pflanzen und spezifische klimatische Bedingungen angewiesen. Ist diese Kombination nicht mehr gegeben, ist das Fortbestehen der Art gefährdet.

Kleine Coverbilder (v. l. n. r.):

- Traktor im Einsatz auf einem Feld. Landnutzung ist eine wichtige Ursache von Veränderungen der biologischen Vielfalt.
- Seehund (*Phoca vitulina*) am Strand von Helgoland. Alle Säugetierarten der Nord- und Ostsee gelten als bedroht.
- Umbau der Emschermündung in den Rhein bei Dinslaken. Renaturierungen können die natürliche Dynamik von Fließgewässern wiederherstellen und Lebensräume schaffen.
- Springschwanz (Collembola). Bodenbiodiversität wird häufig übersehen, erbringt aber wichtige Ökosystemleistungen.
- Zwei Personen im Gespräch auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche. Wissenstransfer und Partizipation sind Voraussetzungen für das Gelingen von Schutzmaßnahmen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

Erschienen 2024 im oekom verlag, München
oekom – Gesellschaft für ökologische Kommunikation mbH
Goethestraße 28, 80336 München
+49 89 544184 – 200
www.oekom.de

© Christian Wirth, Helge Bruelheide, Nina Farwig, Jori Maylin Marx, Josef Settele (Hrsg.)

Layout und Satz: Markus Miller

Korrektur: Maïke Specht

Umschlaggestaltung: Laura Denke, oekom verlag

Umschlagabbildungen: Vorderseite oben: © Jörg Freyhof, Mitte v. l. n. r.: © Pixabay/lebenslotse, © Adobe Stock/LarsSchmidtEisenlohr, © IMAGO/Rupert Oberhäuser, © Julian Taffner (Terra Aliens), © Adobe Stock/Chanelle Malambo/peopleimages.com, unten: © Adobe Stock/agrus, Rückseite: © Daniela Leitner

Druck: Esser printSolutions GmbH, Ergolding



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-NC-ND 4.0. Diese Lizenz erlaubt das Vervielfältigen und Weiterverbreiten des Werkes, nicht jedoch seine Veränderung und seine kommerzielle Nutzung. Die Verwendung von Materialien Dritter (wie Grafiken, Abbildungen, Fotos, Auszügen etc.) in diesem Buch bedeutet nicht, dass diese ebenfalls der genannten Creative-Commons-Lizenz unterliegen. Stehen verwendete Materialien nicht unter der genannten Creative-Commons-Lizenz, ist die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers für die Weiterverwendung einzuholen.

In dem vorliegenden Werk verwendete Marken, Unternehmensnamen, allgemein beschreibende Bezeichnungen etc. dürfen nicht frei genutzt werden. Die Rechte des jeweiligen Rechteinhabers müssen beachtet werden, und die Nutzung unterliegt den Regeln des Markenrechts, auch ohne gesonderten Hinweis.

Alle Rechte vorbehalten

ISBN: 978-3-98726-095-7

E-ISBN: 978-3-98726-336-1

<https://doi.org/10.14512/9783987263361>

Christian Wirth, Helge Bruelheide, Nina Farwig,
Jori Maylin Marx, Josef Settele (Hrsg.)

FAKTENCHECK ARTENVIELFALT

**Bestandsaufnahme und Perspektiven für den
Erhalt der biologischen Vielfalt in Deutschland**

Vorwort

Wir leben in Zeiten schneller Veränderung und mehrfacher Krisen. Eine davon ist die Biodiversitätskrise. Damit wird der weltweite Verlust an biologischer Vielfalt bezeichnet, der von uns Menschen verursacht wird: das Verschwinden von Lebensräumen, der rasche Wandel von Lebensgemeinschaften, das Schrumpfen von Populationen von Tieren und Pflanzen, deren genetische Verarmung und schließlich ihr Aussterben. Als Konsequenz ändern sich auch die Funktionsweise und Leistungsfähigkeit von Ökosystemen, häufig zum Negativen. Diese Zusammenhänge wurden für unseren Planeten eindrucksvoll im Bericht des Weltbiodiversitätsrats zusammengefasst (IPBES 2019).

Doch wie äußert sich die Biodiversitätskrise in Deutschland? Wie ändert sich die biologische Vielfalt unserer heimischen Lebensräume? Was sind die Gründe für diese Änderungen, was die Konsequenzen für unsere Ökosysteme und damit für unsere Lebensgrundlage? Wie steht es um unsere Bemühungen, die biologische Vielfalt zu schützen und zu fördern? Und wie um unsere Fähigkeit, eine Transformation zu einem Wirtschaften *mit* und *für* die biologische Vielfalt einzuleiten?

Trotz der Bedeutung dieser Fragen gibt es bislang keine repräsentative und langjährige Erfassung der biologischen Vielfalt und ihrer Einflussfaktoren in Deutschland. Ebenso wenig gibt es eine systematische Erfassung der Leistungsfähigkeit unserer Ökosysteme oder der Erfolge von Fördermaßnahmen. Gleichzeitig wird in kaum einem Land so viel zur biologischen Vielfalt geforscht und erhoben wie in Deutschland – in Universitäten, Forschungseinrichtungen, Gesellschaften und Verbänden. Wissenschaftliche Durchbrüche der letzten Jahrzehnte – man denke an die automatische Bilderkennung oder genetische Bestimmungsmethoden wie das Metabarcoding – haben eine Flut neuer Daten und Erkenntnisse erzeugt, die einen wichtigen Beitrag zur Praxis des Biodiversitätsschutzes leisten können.

Im *Faktencheck Artenvielfalt*, einem Projekt der BMBF-Forschungsiniziative zum Erhalt der Artenvielfalt (FEEdA, www.feda.bio), haben sich über 150 Autor:innen aus verschiedensten Disziplinen der Wissenschaft und der Praxis zusammengetan. Über 200 weitere Expert:innen aus Wissenschaft, Verbänden und Behörden haben den *Faktencheck Artenvielfalt* in einem zweistufigen Begutachtungsprozess unterstützt. Uns eint das Ziel, den aktuellen Wissensstand zur biologischen Vielfalt in

Deutschland umfassend aufzubereiten und Handlungsoptionen für eine Bewahrung und nachhaltige Nutzung der biologischen Vielfalt zu bewerten. Wir möchten damit einen Beitrag dazu leisten, dass Deutschland die international vereinbarten Biodiversitätsziele erreicht und damit seinen Teil zum globalen Erhalt der biologischen Vielfalt beiträgt – um ihrer selbst willen, als natürliche Grundlage für das menschliche Wohlergehen und als Teil unserer Kultur.

Der *Faktencheck Artenvielfalt* handelt von der gesamten biologischen Vielfalt in allen ihren Facetten. Dazu gehören neben der Artenvielfalt auch die funktionelle und genetische Vielfalt sowie die Vielfalt der Lebensräume. Wir verwenden die Begriffe »Biologische Vielfalt« und »Biodiversität« synonym, Letzteren aufgrund seiner Kürze in zusammengesetzten Wörtern (z. B. »Biodiversitätsmonitoring«). Wir haben insgesamt für die Hauptlebensräume Agrar- und Offenland, Wald, Binnengewässer und Auen, Küsten und Küstengewässer, urbane Räume sowie übergreifend für den Lebensraum Boden (Abb. 1) folgende Themengebiete bearbeitet: (1) Status und Trends der biologischen Vielfalt und (2) deren Auswirkungen auf Ökosystemleistungen, (3) direkte sowie (4) indirekte Treiber von Biodiversitätsänderungen, (5) Instrumente und Maßnahmen zur Förderung der biologischen Vielfalt und (6) Mechanismen des gesellschaftlichen transformativen Wandels zur Nachhaltigkeit (Abb. 2). Den übergreifenden Themen »Indirekte Treiber« und »Transformationspotenziale« wurde jeweils ein zusätzliches Kapitel gewidmet. Der *Faktencheck Artenvielfalt* hat über 6.000 Publikationen ausgewertet, die in einer speziell dafür entwickelten Datenbank hinterlegt sind (<https://www.feda.bio/de/faktencheck-artenvielfalt-literaturdatenbank/>). Zusätzlich haben wir einen Datensatz von über 15.000 Zeitreihen der biologischen Vielfalt zusammengestellt und ausgewertet. Der breite Ansatz des *Faktencheck Artenvielfalt* erlaubt es uns, recht genau bestehende Wissenslücken zu identifizieren, deren man sich bei politischen Entscheidungen bewusst sein sollte.

Der Fokus des *Faktencheck Artenvielfalt* liegt auf Deutschland. Die kürzlich erschienenen *10Must-Knows24* bündeln Erkenntnisse zum Erhalt der biologischen Vielfalt auf globaler Ebene und leiten daraus Empfehlungen für die Politik ab. Beide Ansätze ergänzen sich und weisen auf die Dringlichkeit des Handelns zur Bewältigung der Biodiversitätskrise hin und zeigen

Handlungsoptionen für den Schutz und die nachhaltige Nutzung von biologischer Vielfalt auf.

In der Zeit der Erarbeitung des *Faktencheck Artenvielfalt* ist den Menschen in Deutschland bewusst geworden, dass auch bei uns eine freiheitliche Demokratie keine Selbstverständlichkeit ist. Die Grenzen des Sagbaren verschieben sich. Die bekannten Rezepte zur Aushöhlung von Demokratien werden auch in Deutschland erprobt. Grundzutaten sind Wissenschaftsfeindlichkeit, die Leugnung von Fakten und die aktive Verbreitung von Falschinformationen. Das vorliegende Buch ist ein Ausdruck

unserer Überzeugung, dass Wissen die Basis für die Lösungen der Biodiversitätskrise ist. Allerdings ist die Bündelung von Wissen zwar eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung für den erforderlichen Prozess des transformativen Wandels. Dieser Wandel wird sich nur vollziehen, wenn er von Werten und Überzeugungen getragen wird – und er darf sich nur vollziehen, wenn diese mit unserem Grundgesetz vereinbar sind.

Christian Wirth, Nina Farwig, Jori Maylin Marx, Helge Bruelheide, Josef Settele



Christian Wirth



Nina Farwig



Jori Maylin Marx



Helge Bruelheide



Josef Settele

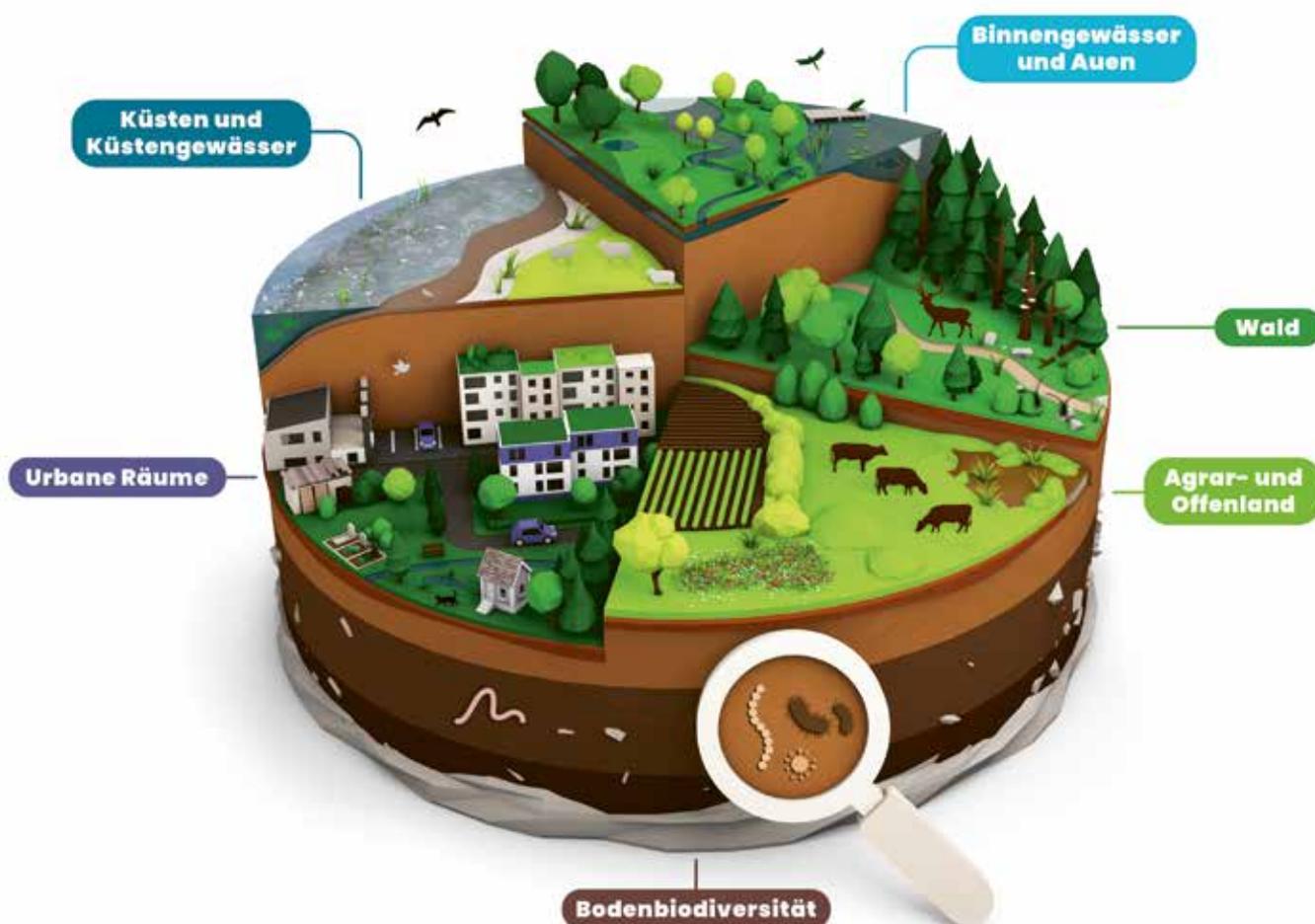


Abbildung 1: Lebensräume im *Faktencheck Artenvielfalt*

Geleitworte



Veronika von Messling

Veronika von Messling

Liebe Leserinnen und Leser, wir sehen es auch bei uns in Deutschland: Lebensräume gehen verloren, und immer mehr Arten sterben aus. Zum Teil sind die Ökosysteme der Welt, in der wir leben, aus dem Gleichgewicht geraten. Die Herausforderungen sind groß. Umso wichtiger ist es, dass wir entschlossen handeln und unsere natürlichen Lebensgrundlagen schützen.

Mir geht es um die Frage, wie dies gelingen kann. Dafür ist es unerlässlich, dass wir die Lage genau analysieren, die konkreten Veränderungen sehen und ihre Ursachen verstehen. Der *Faktencheck Artenvielfalt* setzt hier an. Die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben große Wissenslücken zur Biodiversität in Deutschland geschlossen und zeigen Chancen auf, wie wir die Artenvielfalt erhalten und nachhaltig nutzen können. Für diese engagierte Arbeit danke ich allen Beteiligten. Das Thema hat für uns im Ministerium und in der Bundesregierung besondere Priorität und ist Teil der konkreten Missionen, die unsere Zukunftsstrategie

als der zentrale Wegweiser für Forschung und Innovation benennt.

Schauen wir auch auf die Lösungen. Wissenschaft und Innovation eröffnen uns neue Chancen, um unsere Ökosysteme effektiv zu schützen. Neue Geoinformationssysteme, fortschrittliche Technologien zur Analyse von Umwelt-DNA und Auswertungen auf der Grundlage künstlicher Intelligenz tragen dazu bei, zielgenaue Maßnahmen gegen den Artenverlust zu ergreifen.

Wir haben es in der Hand, diese Herausforderung anzugehen und etwas zu verändern. Jede und jeder Einzelne kann dazu einen Beitrag leisten: Das fängt im Alltag an, führt über die ehrenamtliche Naturschutzarbeit bis hin zur Bürgerwissenschaft für den Erhalt der Biodiversität. Lassen auch Sie sich inspirieren. Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre.

Prof. Dr. Veronika von Messling – Leiterin der Abteilung Lebenswissenschaft am Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)



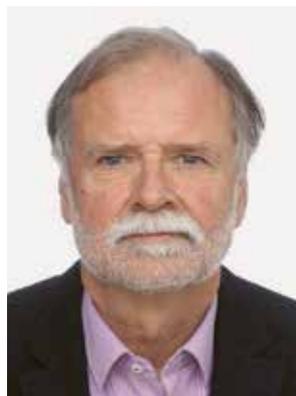
Sandra Diaz

Sandra Diaz

Der Mensch hat das Antlitz der Erde tiefgreifend verändert. In hohem Tempo verlieren wir vor allem Wälder und Feuchtgebiete. Arten gehen schneller verloren als je zuvor in der Geschichte der Menschheit. Das 2019 veröffentlichte Globale Assessment des Weltbiodiversitätsrates IPBES hat vielen Menschen auf der ganzen Welt diese Fakten unmissverständlich vor Augen geführt. Nationale Entscheidungsträger:innen benötigen jedoch eine größere Detailtiefe und eine höhere räumliche Auflösung der Aussagen, um effektiv handeln zu können.

Der *Faktencheck Artenvielfalt* ist eine beeindruckende Leistung, die auf Tausenden von Studien und Berichten aufbaut, einen neu zusammengestellten Datensatz mit über 15.000 Zeitreihen zu Tier- und Pflanzenarten verwendet und die Expertise von Natur- und Sozialwissenschaftler:innen sowie Praktiker:innen vereint. Er geht weit über die Feststellung der Fakten zur biologischen Vielfalt hinaus und zeigt die sozialen, wirtschaftlichen und institutionellen Hemmnisse auf, die eine breite Anwendung von geeigneten Maßnahmen verhindern und damit einer Trendumkehr zu einer Erholung der biologischen Vielfalt entgegenstehen. Visionär ist auch die Verknüpfung der biologischen Vielfalt mit Menschenrechten und den Rechten der Natur. Der *Faktencheck Artenvielfalt* ist sicherlich beispielgebend und setzt einen sehr hohen Standard für künftige nationale Assessments.

Prof. Dr. Sandra Díaz – Co-Vorsitzende des globalen Berichtes des Weltbiodiversitätsrates (IPBES)



Volker Mosbrugger

Volker Mosbrugger

Wir alle wissen: Die Menschheit zerstört derzeit in rasantem Tempo ihr Lebenserhaltungssystem – die Biosphäre –, und wir spüren zunehmend die humanitären wie wirtschaftlichen Folgen. Aber wissen wir auch genug, um erfolgreich gegensteuern zu können? Die Antwort ist leider Nein, und das gilt selbst für Deutschland, dessen Naturkapital zu den weltweit am besten erforschten zählt. Im Rahmen der »BMBF-Forschungsinitiative zum Erhalt der Artenvielfalt« (FEaA) hat sich daher eine interdisziplinäre Vielfalt von über 150 Forschenden mit dem Projekt *Faktencheck Artenvielfalt* das Ziel gesetzt, für die Großlebensräume in Deutschland anhand vorliegender Daten eine in ihrer räumlichen und inhaltlichen Detailtiefe und Komplexität bisher einmalige »systemische Anamnese« der Biodiversitätskrise in Deutschland zu erstellen. Entstanden ist ein höchst beeindruckendes Referenz- und Nachschlagewerk, das wir dringend brauchen, um praxisnahe, wirksame Maßnahmen zum Biodiversitätserhalt in Deutschland zu ergreifen. Man muss hoffen, dass es im Kontext des aktuellen Aufbaus eines »Nationalen Monitoringzentrums zur Biodiversität« hierzu regelmäßige Fortschreibungen geben wird.

Prof. Dr. Volker Mosbrugger – Sprecher der BMBF-Forschungsinitiative zum Erhalt der Artenvielfalt (FEaA)

Danksagung

Der Faktencheck Artenvielfalt – Bestandsaufnahme und Perspektiven für den Erhalt der biologischen Vielfalt in Deutschland ist das Werk einer bemerkenswert großen Anzahl engagierter Menschen, von denen sehr viele ihre Expertise ehrenamtlich zur Verfügung gestellt haben.

Zuerst danken wir unseren vielen Autor:innen – Expertinnen und Experten aus den Naturwissenschaften, Sozialwissenschaften und aus der Praxis, die als koordinierende Leitautor:innen und beitragende Autor:innen ihr Wissen und ihre Zeit in zahllosen Treffen und Workshops eingebracht haben. Sie haben nicht nur selbst umfangreiche Textbeiträge geliefert, sondern sich auch als interne Gutachter:innen betätigt. Ohne sie alle wäre ein Werk wie dieses nicht möglich gewesen. Wir danken auch ihren Institutionen, die ihnen dafür Freiräume gegeben haben.

Unsere Autor:innen wurden in ihrer Arbeit von Projektwissenschaftler:innen unterstützt, namentlich Julia S. Ellerbrok, Christian K. Feld, Sven Grüner, Dorothee Hodapp, Maria Sporbert, Ludwig Lettenmaier, Hong Hanh Nguyen, Christian Ristok, Anja Schmidt, Vera Schreiner und Theresa Spatz sowie von unserer Assistentin Lea von Sivers. Als großartiges Team haben sie den Kern des *Faktencheck Artenvielfalt* gebildet. Sie haben wesentliche inhaltliche Impulse gegeben und für Kohärenz gesorgt.

Ein besonderer Dank geht an alle, die uns mit einem oder mehreren externen Gutachten unterstützt haben, sowohl als Einzelpersonen als auch als Behörden und Institutionen. Diese kritische Begleitung war essenziell für die Qualitätssicherung. Sie hat vielfach zu zusätzlichen Recherchen und Neubewertungen geführt und das Ergebnis deutlich verbessert.

Wir danken zudem der BMBF-Forschungsinitiative zum Erhalt der Artenvielfalt (FEaA), insbesondere Volker Mosbrugger und Julian Taffner, sowie dem Projektträger VDI VDE IT und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, insbesondere Matthias Boysen und Christian Böhm, dafür, dass sie uns mit fortwährender Unterstützung, Engagement und Rat zur Seite standen. Sehr herzlich danken wir auch Daniela Leitner für die Erstellung der attraktiven Grafiken und den gemeinsamen kreativen Prozess.

Wir schätzen uns glücklich, Teil eines so spannenden Prozesses gewesen zu sein, und bedanken uns bei allen Beteiligten für die engagierte, kollegiale und inspirierende Zusammenarbeit.

Christian Wirth, Nina Farwig, Jori Maylin Marx, Helge Bruelheide und Josef Settele

Beitragende Autor:innen

Hermann Ansorge, Helen Ballasus, Tobias Behnen, Maarten Boersma, Katrin Böhning-Gaese, Alexandra Bökenkamp, Matthias Bösch, Anna Brietzke, Thorsten Brinkhoff, François Buscot, Markus Egermann, Silke Eilers, Peter Elsasser, Bert Engelen, Nina Eschke, Nestor Fernandez, Felix Fornoff, Johannes Förster, Tobias Gebhardt, Liana Geidezis, Nadine Gerner, Mayya Gogina, Andreas Gutmann, Cécilia Hagenow, Alexander Harpke, Anna-Lena Hendel, Elke Hietel, Christian von Hoermann, Kai Husmann, Ulf Karsten, Inga Kirstein, Martin Könncke, Ingrid Kröncke, Ingolf Kühn, Roman Lenz, Gunter Mann, Denise Marx, Julian Richard Mas-

senberg, Franca Maurer, Burghard Meyer, Christopher Morhart, Jennifer Müller, Martin Musche, Dominik Nachtsheim, Rolf Niedringhaus, Peter Otto, Christian Papilloud, Guy Péèr, Marianne Penker, Christian Poßer, Roxanne Rhein, Christian Ristok, Mark-Oliver Rödel, Martina Roß-Nickoll, Jenny García Ruales, Stefan Scheu, Nicolas Schoof, Elisabeth Schüler, Heiko Schumacher, Heiner Schumann, Mario Sommerhäuser, Axel Ssymank, Tanja M. Straka, Suleika Suntken, Katharina Talanow, Andreas Toschki, Holger Weimar, Sander Westerling, Benedikt Wiggering, Tobias M. Wildner, Helmut Winkler, Michael Zettler, Roland Zieschank

Gutachter:innen*

Rita Adrian, Günther Bachmann, Tanja Bogusz, Michael Bonkowski, Christian Borowski, Helmut Fischer, Jochen Fischer, Stefan Geisen, Stephan Hättenschwiler, Tina Heger, Jonas Hein, Marcus A. Horn, Klaus Jacob, Nadja Kabisch, Ulf Karsten, Stefan Klotz, Ingo Kowarik, Randolph Kricke, Franz Kroiher, Ingrid Kröncke, Ingolf Kühn, Jochen Lacombe, Simone Langhans, Franz Leibl, Sara Leonhardt, Juliane Mathey, Birte Matthiessen, Christian Maus, Eva Mehler, Michael Mutz, Felix Müller,

Moritz Nabel, Daniel Oesterwind, Rainer Oppermann, Michael Pester, Katrin Prager, Martina Roß-Nickoll, Sergei Schaub, Achim Schmalenberger, Flurina Schneider, Franz Schöll, Stefan Schrader, Christiane Schulz-Zunkel, Irmi Seidl, Johannes Sikorski, Peter Spörlein, Robert Spreter, Barbara Stammel, Johannes Steidle, Stefan Stoll, Andreas Toschki, Jeanette Völker, Stephan von Keitz, Reinhard Witt, Christopher Zimmermann, Yves Zinngrebe + 5 anonyme Gutachter:innen

Begutachtende Institutionen*

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bundesanstalt für Gewässer (BAFG), Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Deutscher Bauernverband (DBV), Deutscher Verband für Landschaftspflege (DVL) e.V., Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Forstliche Versuchsanstalt

Baden-Württemberg (FVA), Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde, Naturschutzbund (NABU), Nationalpark Harz, Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer, Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin, Umweltbundesamt (UBA), Thünen, Thüringenforst, World Wide Fund For Nature (WWF)

* Die Gutachter:innen und Institutionen haben entsprechend ihrer Expertise einzelne Abschnitte oder Kapitel des 1. oder 2. Entwurfs des *Faktencheck Artenvielfalt* begutachtet.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
Geleitworte	6
Danksagung	8
<i>Beitragende Autor:innen</i>	9
<i>Gutachter:innen</i>	9
<i>Begutachtende Institutionen</i>	9
Faktencheck Artenvielfalt	31
Zusammenfassung für die politische und gesellschaftliche Entscheidungsfindung	31
Autor:innen	31
Kurzfassung	34
Kernaussagen	37
Wie steht es um die biologische Vielfalt in Deutschland?	37
Welche Rolle spielt die biologische Vielfalt in Ökosystemen und für uns Menschen?	39
Was sind die Gründe für die Änderung der biologischen Vielfalt?	41
Welche Rahmenbedingungen bestehen für den Erhalt und die Förderung der biologischen Vielfalt?	43
Wie wirken konkrete Maßnahmen, um die biologische Vielfalt zu fördern?	45
Wie erzeugen wir Handlungsbereitschaft für die Bewahrung und Förderung der biologischen Vielfalt?	46
Was sind die positiven Wirkungsketten, die eine Trendumkehr bewirken können?	48
Hintergrund – Erläuterungen zu den Kernaussagen	52
A Status und Trends	52
B Ökosystemleistungen	63
C Direkte Treiber	71
D Indirekte Treiber	83
E Instrumente und Maßnahmen	87
F Transformationspotenziale	93
G Synthese: Positive Wirkungsketten für die biologische Vielfalt	98
H Wissenslücken und Forschungsbedarfe	102
Anhang	109
Abkürzungsverzeichnis	109
Definitionen	110
Methoden	111
<i>Literaturverzeichnis</i>	114

1 Einleitung	117
Autor:innen	117
1.1 Veranlassung und Motivation	118
1.2 Warum braucht es einen <i>Faktencheck Artenvielfalt</i> für Deutschland?	118
1.2.1 Wissen für Handelnde	119
1.2.2 Wissen aus technischer Innovation nutzbar machen	120
1.2.3 Naturschutztheorien und aktuelle Debatten – wo stehen wir?	122
1.2.4 Schutz der biologischen Vielfalt im globalen Wandel	123
1.2.5 Bislang wenig berücksichtigte Aspekte der biologischen Vielfalt	125
1.2.6 Umsetzungsdefizite verstehen und Transformation beschleunigen	126
1.2.7 Zusammenfassung der Ziele des <i>Faktencheck Artenvielfalt</i>	127
1.3 Konzeptionelle Grundlagen	127
1.3.1 Themeneingrenzung und Definitionen	127
1.3.1.1 Artenvielfalt – Biodiversität	127
1.3.1.2 Räumlicher und zeitlicher Bezug	128
1.3.2 Struktur des Berichts	128
1.3.3 Realisierung	132
<i>Literaturverzeichnis</i>	134
2 Themenbereiche im <i>Faktencheck Artenvielfalt</i>	141
Autor:innen	141
Beitragende Autor:innen	141
2.1 Status und Trends	142
2.1.1 Biodiversitätserfassung, Monitoringprogramme und Forschungsinitiativen	142
2.1.2 Biodiversitätsdaten – Verfügbarkeit und Defizite	145
2.1.3 Aktueller Kenntnisstand (und Wissenslücken)	147
2.1.3.1 Biologische Vielfalt in Deutschland und weltweit	147
2.1.3.2 Erhaltungs- und Gefährdungszustand	147
2.1.3.3 Endemiten und Taxa mit nationaler Verantwortlichkeit	150
2.1.3.4 Hotspots der biologischen Vielfalt in Deutschland	153
2.1.4 Literatur- und Datenanalyse von Trends der biologischen Vielfalt	153
2.1.5 Neue Methoden	156
2.2 Ökosystemleistungen	163
2.2.1 Ökosystemleistungen, Ökosystemfunktionen und biologische Vielfalt	163
2.2.2 Ansätze zur Erfassung des Zusammenhangs zwischen biologischer Vielfalt und ÖSL/ÖSF	164
2.2.3 Ökosystemleistungen im <i>Faktencheck Artenvielfalt</i>	166
2.3 Direkte Treiber	167
2.3.1 Einleitung	167
2.3.2 Veränderung der Struktur der Landschaft	167
2.3.3 Veränderte Land-/Meeresnutzung und direkte Ressourcenentnahme	172
2.3.4 Verschmutzung	176

2.3.5 Klimawandel	181
2.3.6 Invasive Arten	185
2.3.7 Treiberinteraktionen	188
2.4 Indirekte Treiber	189
2.4.1 Definitionen und Ansätze	189
2.4.2 Politische Rahmenbedingungen	189
2.5 Instrumente & Maßnahmen	191
2.5.1 Definitionen und Ansätze	191
2.5.2 Maßnahmentypen im <i>Faktencheck Artenvielfalt</i>	192
2.5.2.1 Flächenschutz	192
2.5.2.2 Management- und Impulsmaßnahmen	196
2.5.3 Evaluation der Wirksamkeit von Instrumenten & Maßnahmen zur Förderung der biologischen Vielfalt	197
2.6 Bodenbiodiversität	198
2.7 Transformationspotenziale zum Erhalt der biologischen Vielfalt	198
<i>Literaturverzeichnis</i>	200

3 Agrar- und Offenland 217

Autor:innen 217

Beitragende Autor:innen 217

Kapitelzusammenfassung 218

3.1 Lebensraum Agrar- und Offenland	222
3.1.1 Was ist Agrar- und Offenland?	222
3.1.1.1 Definition von Agrar- und Offenlandschaften	222
3.1.1.2 Regional-geografische Räume innerhalb Deutschlands	222
3.1.1.3 Entstehung und Entwicklung der Agrar- und Offenlandschaft	222
3.1.2 <i>Faktencheck Artenvielfalt</i> im Agrar- und Offenland	226
3.2 Status und Trends der Biodiversität im Agrar- und Offenland	226
3.2.1 Biodiversitätsmonitoringprogramme im Agrar- und Offenland	226
3.2.2 Status und Trends der Lebensräume und Organismengruppen im Agrar- und Offenland	228
3.2.2.1 Änderung der Landnutzungstypen seit 1950	228
3.2.2.2 Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturschutzwert (HNV Farmland)	229
3.2.2.3 Status und Trend der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands (Rote Liste)	230
3.2.2.4 Status und Trend der anderen Biotoptypen Deutschlands	231
3.2.2.5 Status und Trends der FFH-Lebensraumtypen des Agrar- und Offenlandes	233
3.2.2.6 Ergebnisse der Literatur- und Datenanalysen von Biodiversitätstrends (Weighted-Vote-Count-Analyse)	238
3.2.2.7 Status und Trends der Gefäßpflanzen im Agrar- und Offenland	243
3.2.2.8 Status und Trends der Pilze im Agrar- und Offenland am Beispiel der Ackerpilze unter besonderer Berücksichtigung der Mykorrhizabildner	246
3.2.2.9 Status und Trends der Wirbeltiere im Agrar- und Offenland	247
3.2.2.10 Status und Trends der Wirbellosen im Agrar- und Offenland	251

3.2.3	Anzahl/Änderung nicht einheimischer sowie sich ausbreitender einheimischer Arten im Agrar- und Offenland	258
3.2.4	Wissenslücken und Defizite	260
3.3	Auswirkungen von Biodiversitätsveränderungen auf Ökosystemleistungen im Agrar- und Offenland	262
3.3.1	Einleitung	262
3.3.2	Ausgewählte Ökosystemleistungen in der Agrar- und Offenlandschaft	263
3.3.2.1	Versorgende Ökosystemleistungen	263
3.3.2.2	Regulierende Ökosystemleistungen	264
3.3.2.3	Kulturelle Ökosystemleistungen	265
3.3.3	Synergien und Zielkonflikte zwischen Biodiversität und Ökosystemleistungen im Agrar- und Offenland	268
3.4	Direkte Treiber von Biodiversitätsveränderungen im Agrar- und Offenland	269
3.4.1	Einleitung	269
3.4.2	Veränderung der Struktur der Landschaft im Agrar- und Offenland	271
3.4.3	Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme im Agrar- und Offenland	272
3.4.3.1	Intensivierung im Feldfruchtanbau	272
3.4.3.2	Grünlandbewirtschaftung	273
3.4.3.3	Rückgang der Weidetiere	276
3.4.3.4	Andere Treiber der Landnutzungsänderung	277
3.4.4	Verschmutzung im Agrar- und Offenland	277
3.4.4.1	Düngemittel	278
3.4.4.2	Weitere Schadstoffe	281
3.4.4.3	Luftverschmutzung	282
3.4.5	Klimawandel im Agrar- und Offenland	282
3.4.6	Invasive gebietsfremde Arten im Agrar- und Offenland	283
3.4.7	Treiberinteraktionen im Agrar- und Offenland	285
3.5	Indirekte Treiber von Biodiversitätsänderungen im Agrar- und Offenland	286
3.5.1	Einleitung	286
3.5.2	Politische und rechtliche Treiber im Agrar- und Offenland	286
3.5.2.1	Agrarpolitik	286
3.5.2.2	Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)	288
3.5.2.3	Flurbereinigungsgesetz (FlurG)	288
3.5.2.4	Naturschutzpolitik	289
3.5.3	Wirtschaftliche und technologische Treiber im Agrar- und Offenland	289
3.5.3.1	Energieverfügbarkeit und Mechanisierung	289
3.5.3.2	Mechanisierung und Intensivierung in der Landwirtschaft	290
3.5.3.3	Wirtschaftliche Entwicklungen	293
3.5.4	Gesellschaftliche Treiber im Agrar- und Offenland	295
3.5.4.1	Das Konsumverhalten	296
3.5.4.2	Das gesellschaftliche Engagement	297
3.5.5	Synergien/Barrieren zwischen indirekten Treibern & Biodiversität	298
3.5.5.1	Flächenkonkurrenz als Barriere und Potenzial für Synergien	298

3.6 Instrumente und Maßnahmen im Agrar- und Offenland	299
3.6.1 Einleitung	299
3.6.2 Ausgewählte Instrumente im Agrar- und Offenland	299
3.6.2.1 Ordnungsrechtliche Instrumente	299
3.6.2.2 Finanzielle Förderinstrumente	299
3.6.2.3 Informationelle und organisatorische Instrumente	300
3.6.3 Ausgewählte Maßnahmen im Agrar- und Offenland	301
3.6.3.1 Flächenschutzmaßnahmen inkl. Bezug zu oben genannten Instrumenten und Bedeutung für Biodiversität im Agrar- und Offenland	301
3.6.3.2 Managementmaßnahmen inkl. Bezug zu oben genannten Instrumenten mit Bedeutung für Biodiversität im Agrar- und Offenland	302
3.6.3.3 Impulsmaßnahmen inkl. Bezug zu oben genannten Instrumenten mit Bedeutung für Biodiversität im Agrar- und Offenland	303
3.6.4 Evaluation von Instrumenten und Maßnahmen für Biodiversität (und Ökosystemleistungen) im Agrar- und Offenland	303
3.6.4.1 Gesamteinschätzung zu den Maßnahmen	303
3.7 Handlungsbedarf und Handlungsoptionen zum Biodiversitätsschutz in Agrar- und Offenland	311
3.7.1 Zusammenfassung von Wissenslücken	311
3.7.2 Handlungsbedarf und -optionen	312
3.7.2.1 Wechselwirkungsanalyse zwischen Maßnahmen und Ableitung der wichtigsten Handlungsoptionen	312
3.7.2.2 Allgemeine Schlussfolgerungen für Handlungsempfehlungen	314
<i>Literaturverzeichnis</i>	316
4 Wald	357
Autor:innen	357
Beitragende Autor:innen	357
Kapitelzusammenfassung	358
4.1 Einleitung	364
4.1.1 Was ist Wald?	364
4.1.1.1 Wichtige Charakteristika und Eigenschaften des Waldes für die biologische Vielfalt	364
4.1.1.2 Waldbiotop- und Waldlebensraumtypen	366
4.1.2 Waldnutzung damals und heute	366
4.1.2.1 1800–1920: Planmäßige und nachhaltige Bewirtschaftung im schlagweisen Hochwald	367
4.1.2.2 1920–1985: Phase des Vorratsaufbaus	368
4.1.2.3 1985–2015: Weg zur naturnahen Waldwirtschaft	369
4.1.2.4 Nach 2015: Waldwirtschaft im Zeichen des Klimawandels	370
4.1.3 <i>Faktencheck Artenvielfalt</i> im Wald	370
4.2 Status und Trends der biologischen Vielfalt im Wald	370
4.2.1 Biodiversitätsmonitoringprogramme im Wald	370
4.2.1.1 Systematische, flächenrepräsentative Erhebungen für Deutschland, welche mindestens einen biodiversitätsrelevanten Parameter abbilden	371

4.2.1.2	Über mehrere Jahre intensiv untersuchte Flächen mit Aufnahmen zur biologischen Vielfalt	372
4.2.1.3	Einzelhebungen, welche eine besondere Bedeutung aufgrund der aufgenommenen Parameter haben	372
4.2.1.4	Ausblick	373
4.2.2	Status und Trends der Lebensräume und Organismengruppen im Wald	373
4.2.2.1	Status und Trends der Waldlebensräume	373
4.2.2.2	Status und Trends Organismengruppen	375
4.2.3	Anzahl/Änderung nicht einheimischer Arten im Wald	397
4.2.4	Wissenslücken und Defizite	399
4.3	Auswirkungen von Veränderungen der biologischen Vielfalt auf Ökosystemleistungen im Wald	402
4.3.1	Einleitung	402
4.3.2	Ausgewählte Ökosystemleistungen des Waldes	403
4.3.2.1	Versorgende Ökosystemleistungen	403
4.3.2.2	Regulierende Ökosystemleistungen	405
4.3.2.3	Kulturelle Ökosystemleistungen	409
4.3.3	Synergien und Zielkonflikte zwischen biologischer Vielfalt und Ökosystemleistungen im Wald	411
4.4	Direkte Treiber von Veränderungen der biologischen Vielfalt im Wald	412
4.4.1	Einleitung	412
4.4.2	Veränderung der Struktur der Landschaft im Wald	412
4.4.2.1	Isolation und Waldgröße	412
4.4.2.2	Homogenisierung	414
4.4.2.3	Einfluss erneuerbarer Energien auf die biologische Vielfalt im Wald	415
4.4.3	Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme im Wald	415
4.4.3.1	Baumartenzusammensetzung	415
4.4.3.2	Bestandsstruktur	416
4.4.3.3	Totholz, alte Bäume und Biotopbäume	416
4.4.3.4	Holznutzung	418
4.4.3.5	Erschließung und Befahrung	419
4.4.3.6	Kalkung	419
4.4.4	Verschmutzung im Wald	421
4.4.4.1	Stickstoffeintrag	421
4.4.4.2	Schwefeleintrag	422
4.4.4.3	Pestizideinsätze	423
4.4.4.4	Schwermetallverschmutzung	424
4.4.4.5	Lichtverschmutzung	424
4.4.5	Klimawandel im Wald	424
4.4.5.1	Auswirkung von Temperaturerhöhung und intensiveren Dürreperioden ...	424
4.4.5.2	Verschiebung der Phänologie in der Vegetationsperiode	426
4.4.6	Invasive Arten im Wald	427
4.4.6.1	Pflanzen	427
4.4.6.2	Tiere	430
4.4.6.3	Pilze und Flechten	434

4.4.7	Andere direkte Treiber und Treiberinteraktionen im Wald	435
4.4.7.1	Auswirkungen natürlicher Störungen auf die biologische Vielfalt in Wäldern	435
4.4.7.2	Auswirkungen anthropogener Störungen auf die biologische Vielfalt in Wäldern	438
4.4.7.3	Tierische Nekromasse	439
4.4.7.4	Größere Pflanzenfresser und Prädatoren im Wald	440
4.5	Indirekte Treiber von Veränderungen der biologischen Vielfalt im Wald	441
4.5.1	Einleitung	441
4.5.2	Politische und rechtliche Treiber im Wald	441
4.5.2.1	Politische und rechtliche Treiber auf der strukturellen Makroebene	441
4.5.2.2	Politische und rechtliche Treiber auf der Meso- und Mikroebene	443
4.5.2.3	Akteursbezogene Treiber auf der Meso- und Mikroebene	444
4.5.3	Wirtschaftliche und technologische Treiber im Wald	445
4.5.3.1	Märkte und Rohstoffhandel	445
4.5.3.2	Technologische Treiber	448
4.5.4	Gesellschaftliche Treiber im Wald	448
4.5.4.1	Demografie und Eigentumsstrukturen	448
4.5.4.2	Konsumverhalten	449
4.5.4.3	Wahrnehmung von Wald, Waldbewirtschaftung und Waldnaturschutz durch die Gesellschaft	450
4.5.4.4	Wahrnehmung von Wald und Forstwirtschaft in den Medien	450
4.5.5	Synergien/Konflikte zwischen indirekten Treibern und biologischer Vielfalt	451
4.6	Instrumente und Maßnahmen	452
4.6.1	Einleitung	452
4.6.2	Ausgewählte Instrumente im Wald	452
4.6.2.1	Ordnungsrechtliche Instrumente	452
4.6.2.2	Finanzielle Anreizsysteme	452
4.6.2.3	Informationelle Instrumente	452
4.6.3	Bedeutung ausgewählter Maßnahmen im Wald für die biologische Vielfalt	454
4.6.3.1	Flächenhafte Schutzmaßnahmen	454
4.6.3.2	Managementmaßnahmen inkl. Bezug zu oben genannten Instrumenten und Bedeutung für die biologische Vielfalt im Wald	456
4.6.3.3	Impulsmaßnahmen inkl. Bezug zu oben genannten Instrumenten und Bedeutung für die biologische Vielfalt im Wald	461
4.6.4	Evaluation von Instrumenten und Maßnahmen für die biologische Vielfalt (und Ökosystemdienstleistungen) im Wald	462
4.7	Handlungsempfehlungen	464
4.7.1	Wissenslücken und Forschungsbedarf	464
4.7.1.1	Datenlücken	464
4.7.1.2	Wissenslücken	465
4.7.1.3	Dringender Forschungsbedarf	465
4.7.2	Rahmenbedingungen für Handlungsbedarfe und -optionen	466

4.7.3	Handlungsbedarfe und -optionen	466
4.7.3.1	Handlungsbedarfe und -optionen zur Situation der biologischen Vielfalt in Wäldern	467
4.7.3.2	Handlungsbedarfe und -optionen zur Erhöhung der biologischen Vielfalt	467
	<i>Literaturverzeichnis</i>	471
5	Binnengewässer und Auen	521
	Autor:innen	521
	Beitragende Autor:innen	521
	Kapitelzusammenfassung	522
5.1	Einleitung	530
5.1.1	Lebensräume	530
5.1.1.1	Fließgewässer	530
5.1.1.2	Auen	530
5.1.1.3	Quellen	533
5.1.1.4	Ästuare	533
5.1.1.5	Seen	533
5.1.1.6	Kleine Stillgewässer	534
5.1.1.7	Niedermoore	534
5.1.1.8	Grundwasser	536
5.1.2	Artenvielfalt in Binnengewässern und Auen	536
5.1.3	Kenntnisstand	537
5.1.4	Gliederung	538
5.2	Status und Trends der biologischen Vielfalt in Binnengewässern und Auen	538
5.2.1	Biodiversitätsmonitoringprogramme in Binnengewässern und Auen	538
5.2.1.1	Fließgewässer, Seen und Ästuare	538
5.2.1.2	Auen	540
5.2.1.3	Quellen	540
5.2.1.4	Kleine Stillgewässer	541
5.2.1.5	Niedermoore	541
5.2.1.6	Grundwasser	541
5.2.2	Status und Trends der Lebensräume und Organismengruppen in Binnengewässern und Auen	541
5.2.2.1	Lebensraumübergreifender Status und Trends der biologischen Vielfalt	541
5.2.2.2	Lebensraumspezifischer Status und Trends der biologischen Vielfalt	548
5.2.3	Anzahl/ Änderung nicht einheimischer Arten in Binnengewässern und Auen	560
5.2.4	Wissenslücken und Defizite	564
5.2.4.1	Monitoringprogramme	564
5.2.4.2	Quantifizierung von Artenvielfalt und biologischer Vielfalt	565
5.3	Auswirkungen von Veränderungen der biologischen Vielfalt auf Ökosystemleistungen von Binnengewässern und Auen	566
5.3.1	Einleitung	566
5.3.2	Ökosystemleistungen von Binnengewässern und Auen	567
5.3.2.1	Versorgende Ökosystemleistungen	568

5.3.2.2	Regulierende Ökosystemleistungen	568
5.3.2.3	Kulturelle Ökosystemleistungen	570
5.3.3	Synergien und Zielkonflikte zwischen biologischer Vielfalt und Ökosystemleistungen in Binnengewässern und Auen	571
5.3.3.1	Synergieeffekte	572
5.3.3.2	Zielkonflikte	572
5.4	Direkte Treiber von Veränderungen der biologischen Vielfalt in Binnengewässern und Auen	573
5.4.1	Einleitung	573
5.4.1.1	Historie direkter Treiber	574
5.4.1.2	Hierarchie der direkten Treiber	576
5.4.1.3	Wechselwirkungen zwischen direkten Treibern	577
5.4.2	Fließgewässer	578
5.4.2.1	Strukturelle Veränderungen in Fließgewässern	578
5.4.2.2	Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme in Fließgewässern	580
5.4.2.3	Verschmutzung in Fließgewässern	580
5.4.2.4	Klimawandel in Fließgewässern	581
5.4.2.5	Invasive Arten in Fließgewässern	581
5.4.2.6	Andere direkte Treiber und Treiberinteraktionen in Fließgewässern	582
5.4.3	Auen	582
5.4.3.1	Strukturelle Veränderungen in Auen	582
5.4.3.2	Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme in Auen	582
5.4.3.3	Verschmutzung in Auen	583
5.4.3.4	Klimawandel in Auen	584
5.4.3.5	Invasive Arten in Auen	584
5.4.4	Quellen	585
5.4.4.1	Strukturelle Veränderungen in Quellen	585
5.4.4.2	Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme in Quellen	585
5.4.4.3	Verschmutzung in Quellen	585
5.4.4.4	Klimawandel in Quellen	586
5.4.4.5	Invasive Arten in Quellen	586
5.4.4.6	Andere direkte Treiber und Treiberinteraktionen in Quellen	586
5.4.5	Ästuare	586
5.4.5.1	Strukturelle Veränderungen in Ästuaren	586
5.4.5.2	Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme in Ästuaren	587
5.4.5.3	Verschmutzung in Ästuaren	587
5.4.5.4	Klimawandel in Ästuaren	588
5.4.5.5	Invasive Arten in Ästuaren	588
5.4.6	Seen	588
5.4.6.1	Strukturelle Veränderungen in Seen	588
5.4.6.2	Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcennutzung in Seen	589
5.4.6.3	Verschmutzung in Seen	589
5.4.6.4	Klimawandel in Seen	590
5.4.6.5	Invasive Arten in Seen	591

5.4.7	Kleine Stillgewässer	591
5.4.7.1	Strukturelle Veränderungen in kleinen Stillgewässern	591
5.4.7.2	Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme in kleinen Stillgewässern	591
5.4.7.3	Verschmutzung in kleinen Stillgewässern	592
5.4.7.4	Klimawandel in kleinen Stillgewässern	592
5.4.7.5	Invasive Arten in kleinen Stillgewässern	592
5.4.8	Niedermoore	593
5.4.8.1	Strukturelle Veränderungen in Niedermooren	593
5.4.8.2	Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme in Niedermooren	593
5.4.8.3	Verschmutzung in Niedermooren	593
5.4.8.4	Klimawandel in Niedermooren	593
5.4.8.5	Invasive Arten in Niedermooren	594
5.4.9	Grundwasser	594
5.4.9.1	Strukturelle Veränderungen im Grundwasser	594
5.4.9.2	Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme im Grundwasser	594
5.4.9.3	Verschmutzung im Grundwasser	594
5.4.9.4	Klimawandel im Grundwasser	595
5.4.9.5	Invasive Arten im Grundwasser	595
5.4.9.6	Andere direkte Treiber und Treiberinteraktionen im Grundwasser	595
5.5	Indirekte Treiber von Veränderungen der biologischen Vielfalt in Binnengewässern und Auen	595
5.5.1	Einleitung	595
5.5.2	Politische und rechtliche Treiber in Binnengewässern und Auen	596
5.5.2.1	Kommunalabwasserrichtlinie	596
5.5.2.2	Nitratrichtlinie	596
5.5.2.3	Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie	596
5.5.2.4	Wasserrahmenrichtlinie	597
5.5.2.5	Gemeinsame Agrarpolitik der Europäischen Union (GAP)	599
5.5.2.6	Erneuerbare-Energien-Gesetz	599
5.5.2.7	EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie	600
5.5.2.8	Schifffahrt- und Wasserstraßenpolitik	600
5.5.3	Wirtschaftliche und technologische Treiber in Binnengewässern und Auen	601
5.5.3.1	Landwirtschaftssektor	601
5.5.3.2	Energiesektor	601
5.5.3.3	Verkehrssektor	602
5.5.4	Gesellschaftliche Treiber in Binnengewässern und Auen	602
5.5.4.1	Naturerlebnis und Problembewusstsein	602
5.5.4.2	Öffentlichkeitsbeteiligung	603
5.5.4.3	Citizen Science	603
5.5.5	Synergien/Konflikte zwischen indirekten Treibern und biologischer Vielfalt	604
5.6	Instrumente und Maßnahmen	604
5.6.1	Einleitung	604
5.6.2	Ausgewählte Instrumente in Binnengewässern und Auen	605

5.6.3	Ausgewählte Maßnahmen in Binnengewässern und Auen und ihre Evaluation	606
5.6.3.1	Flächenschutzmaßnahmen	606
5.6.3.2	Management- und Impulsmaßnahmen	607
5.7	Handlungsoptionen	615
5.7.1	Überwachung von Binnengewässern und Auen zielgerichtet ausweiten	618
5.7.2	Defizite bei der Umsetzung bestehender Richtlinien überwinden	619
5.7.3	Regelungslücken schließen	620
5.7.4	Hindernisse durch indirekte Treiber abbauen	620
	<i>Literaturverzeichnis</i>	622
	<i>Weblinks (in der Reihenfolge der Nennung)</i>	646
6	Küste und Küstengewässer	647
	Autor:innen	647
	Beitragende Autor:innen	647
	Kapitelzusammenfassung	648
6.1	Einleitung	653
6.1.1	Lebensraum Küste und Küstengewässer	653
6.1.1.1	Pelagial der Nord- und Ostsee	654
6.1.1.2	Benthal der Nord- und Ostsee	655
6.1.1.3	Salzgrünland der Nordseeküste	656
6.1.1.4	Salzgrünland, Brackwasserröhrichte und Hochstaudenfluren des Geolitorals der Ostseeküste	657
6.1.1.5	Sände, Sand-, Geröll- und Blockstrände	657
6.1.1.6	Küstendünen	657
6.1.1.7	Fels- und Steilküsten	658
6.1.2	<i>Faktencheck Artenvielfalt</i> im Lebensraum Küste und Küstengewässer	658
6.2	Status und Trends der biologischen Vielfalt an Küsten und in Küstengewässern	660
6.2.1	Biodiversitätsmonitoringprogramme an Küsten und in Küstengewässern	660
6.2.1.1	Europaweite Richtlinien für Meer und Küste	660
6.2.1.2	Nord- und ostseespezifische Abkommen	661
6.2.1.3	Weitere arten- und artengruppen-spezifische Abkommen	662
6.2.1.4	Entwicklungen in der Methodik	662
6.2.2	Status und Trends der Lebensräume und Organismengruppen an Küsten und in Küstengewässern	663
6.2.2.1	Status und Trends der Lebensraumtypen	663
6.2.2.2	Status und Trends der Organismengruppen	664
6.2.3	Anzahl/ Änderung nicht einheimischer Arten im Lebensraum Küste und Küstengewässer	696
6.2.4	Wissenslücken und Defizite	697
6.3	Auswirkungen von Veränderung der biologischen Vielfalt auf Ökosystemleistungen an Küsten und in Küstengewässern	699
6.3.1	Einleitung	699
6.3.1.1	Versorgende Ökosystemleistungen	701

6.3.1.2	Regulierende Ökosystemleistungen	702
6.3.1.3	Kulturelle Ökosystemleistungen	702
6.3.2	Ausgewählte Ökosystemleistungen der Küsten und Küstengewässer	702
6.3.2.1	Versorgende ÖSL: Fischerei und Aquakultur	703
6.3.2.2	Regulierende ÖSL: Klimaschutz, Elementzyklen, Habitatbildung	703
6.3.2.3	Kulturelle ÖSL: Tourismus und Wohlbefinden	705
6.3.3	Synergien und Zielkonflikte zwischen biologischer Vielfalt und Ökosystemleistungen an der Küste und in den Küstengewässern	705
6.4	Direkte Treiber von Veränderungen der biologischen Vielfalt an Küsten und in Küstengewässern	706
6.4.1	Einleitung	706
6.4.2	Veränderung der Struktur der Landschaft im Lebensraum Küste und Küstengewässer	707
6.4.3	Veränderte Land- und Meeresnutzung und direkte Ressourcenentnahme im Lebensraum Küste und Küstengewässer	708
6.4.3.1	Fischerei	708
6.4.3.2	Aquakultur	712
6.4.3.3	Sand- und Kiesabbau	712
6.4.3.4	Schifffahrt	712
6.4.3.5	Offshore-Windenergie und andere Konstruktionen in den Küstengewässern	712
6.4.4	Verschmutzung im Lebensraum Küste und Küstengewässer	713
6.4.4.1	Nährstoffeinträge	713
6.4.4.2	Schadstoffeinträge	716
6.4.4.3	Müll, Makro- und Mikroplastik	717
6.4.4.4	Beseitigung Munition, Kampfmittel	718
6.4.4.5	Lärmverschmutzung	718
6.4.5	Klimawandel im Lebensraum Küste und Küstengewässer	718
6.4.5.1	Anstieg des Temperaturmittelwerts	719
6.4.5.2	Hitzewellen	719
6.4.5.3	Meeresspiegelanstieg	720
6.4.5.4	Versauerung	721
6.4.5.5	Sauerstoffmangel	721
6.4.6	Invasive Arten im Lebensraum Küste und Küstengewässer	722
6.4.7	Andere direkte Treiber und Treiberinteraktionen im Lebensraum Küste und Küstengewässer	723
6.5	Indirekte Treiber von Veränderungen der biologischen Vielfalt an Küsten und in Küstengewässern	724
6.5.1	Einleitung	724
6.5.2	Politische und rechtliche Treiber im Lebensraum Küste und Küstengewässer	725
6.5.2.1	Meeresgovernance	725
6.5.2.2	Raumnutzung und Eingriffsregelung	727
6.5.2.3	Wirksamkeit von Meeresschutzrichtlinien und Biodiversitätsstrategien	728
6.5.2.4	EU-Fischereipolitik und ihre Wirksamkeit	729
6.5.2.5	Vorgaben und Maßnahmen in Bezug auf Verschmutzung, Abfälle und anderweitige Einträge und deren Wirksamkeit	729
6.5.2.6	Küstenschutz	731
6.5.2.7	Nicht einheimische Arten	731

6.5.3	Wirtschaftliche und technologische Treiber im Lebensraum Küste und Küstengewässer	731
6.5.3.1	Fischerei	731
6.5.3.2	Energiewende und Energiekrise	732
6.5.3.3	Technologische Weiterentwicklungen	733
6.5.3.4	Tourismusindustrie	733
6.5.4	Gesellschaftliche Treiber im Lebensraum Küste und Küstengewässer	733
6.5.4.1	Küstenschutz	734
6.5.4.2	Konsumverhalten	734
6.5.4.3	Gesellschaftlicher Bezug zu marinen Lebensräumen und Ocean Literacy ..	735
6.5.4.4	Auswirkungen von Krisen, Pandemien	735
6.5.5	Synergien/Konflikte zwischen indirekten Treibern und biologischer Vielfalt	735
6.6	Instrumente und Maßnahmen: Erfolg und Hindernisse an Küsten und in Küstengewässern	736
6.6.1	Einleitung	736
6.6.1.1	Definition von Instrumenten und Maßnahmen im <i>Faktencheck Artenvielfalt</i>	736
6.6.1.2	Besonderheiten von Instrumenten und Maßnahmen im Lebensraum Küste und Küstengewässer	737
6.6.1.3	Überblick zu biodiversitätsfördernden Instrumenten und Maßnahmen	737
6.6.2	Ausgewählte Instrumente an Küsten und in Küstengewässern	738
6.6.3	Ausgewählte Maßnahmen an Küsten und in Küstengewässern	738
6.6.3.1	Flächenschutzmaßnahmen	738
6.6.3.2	Managementmaßnahmen	741
6.6.3.3	Impulsmaßnahmen	742
6.6.4	Evaluation von Instrumenten und Maßnahmen für biologische Vielfalt	744
6.7	Handlungsbedarfe und Handlungsoptionen zum Biodiversitätsschutz an der Küste und in Küstengewässern	746
6.7.1	Generelle Rahmenbedingungen für Handlungsbedarfe und -optionen	746
6.7.2	Handlungsbedarfe	748
6.7.2.1	Operationale Ziele und Indikatoren	748
6.7.2.2	Effektive Schutzgebietsverwaltung und Schutzgebietsmanagement	749
6.7.2.3	Ökosystemarer Ansatz in der marinen Raumordnung	750
6.7.2.4	Nicht flächenbezogene Maßnahmen	750
6.7.3	Handlungsoptionen	751
	<i>Literaturverzeichnis</i>	753
7	Urbane Räume	787
	Autor:innen	787
	Beitragende Autor:innen	787
	Kapitelzusammenfassung	788
7.1	Einleitung	794
7.1.1	Urbane Räume und deren grüne Infrastruktur	795
7.1.2	Bedeutung und Entwicklung urbaner Räume in Deutschland	796
7.1.3	<i>Faktencheck Artenvielfalt</i> in urbanen Räumen	797

7.2 Status und Trends der biologischen Vielfalt in urbanen Räumen	798
7.2.1 Biodiversitätsmonitoring in urbanen Räumen	798
7.2.2 Status quo, Gefährdungs- und Schutzstatus, Trends der Artengruppen und Biodiversitätsfacetten	802
7.2.2.1 Status und Trends von Artengruppen in urbanen Räumen	806
7.2.2.2 Status und Trends von biologischer Vielfalt in Bestandteilen urbaner grüner und blauer Infrastruktur	822
7.2.3 Anzahl/Änderungen nicht einheimischer Arten im urbanen Raum	833
7.2.4 Wissenslücken und Defizite	835
7.3 Auswirkungen von Veränderungen der biologischen Vielfalt auf Ökosystemleistungen in urbanen Räumen	839
7.3.1 Relevanz von biologischer Vielfalt für Ökosystemleistungen in urbanen Räumen	840
7.3.2 Ausgewählte Ökosystemleistungen in urbanen Räumen	841
7.3.2.1 Regulierende Ökosystemleistungen	842
7.3.2.2 Kulturelle Ökosystemleistungen	843
7.3.3 Synergien und Zielkonflikte zwischen biologischer Vielfalt und Ökosystemleistungen in urbanen Räumen	845
7.4 Direkte Treiber von Veränderungen der biologischen Vielfalt in urbanen Räumen	845
7.4.1 Einleitung	845
7.4.2 Veränderung der Struktur der Landschaft im urbanen Raum	846
7.4.3 Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme im urbanen Raum	847
7.4.4 Verschmutzung im urbanen Raum	850
7.4.5 Klimawandel im urbanen Raum	852
7.4.6 Invasive Arten im urbanen Raum	853
7.4.7 Andere direkte Treiber und Treiberinteraktionen im urbanen Raum	854
7.5 Indirekte Treiber von Veränderungen der biologischen Vielfalt in urbanen Räumen	855
7.5.1 Politische und rechtliche Treiber im urbanen Raum	855
7.5.1.1 Grundlegende politische Rahmenbedingungen	855
7.5.2 Wirtschaftliche und technologische Treiber im urbanen Raum	858
7.5.3 Gesellschaftliche Treiber im urbanen Raum	859
7.5.4 Konflikte und Pandemien	861
7.6 Instrumente und Maßnahmen in urbanen Räumen	861
7.6.1 Einführung	861
7.6.2 Instrumente in urbanen Räumen	862
7.6.2.1 Ordnungsrechtliche Instrumente	862
7.6.2.2 Finanziell-anreizbasierte Instrumente	863
7.6.2.3 Informationelle Instrumente	863
7.6.3 Maßnahmen in urbanen Räumen	864
7.6.3.1 Flächenschutzmaßnahmen	865
7.6.3.2 Management- und Impulsmaßnahmen	866
7.6.4 Evaluation von ausgewählten Maßnahmen zum Schutz und zur Förderung der biologischen Vielfalt in urbanen Räumen	875
7.6.4.1 Flächenschutzmaßnahmen	875
7.6.4.2 Management- und Impulsmaßnahmen	876

7.7 Handlungsbedarfe und -optionen in urbanen Räumen	885
Literaturverzeichnis	889
8 Bodenbiodiversität	917
Autor:innen	917
Beitragende Autor:innen	917
Kapitelzusammenfassung	918
8.1 Themenbereich Bodenbiodiversität	923
8.1.1 Was ist Bodenbiodiversität?	923
8.1.2 Bodenbiodiversität im <i>Faktencheck Artenvielfalt</i>	929
8.2 Status und Trends der Bodenbiodiversität	930
8.2.1 Kenntnisstand – Erfassungsgrad und Artenzahlen	930
8.2.1.1 Endemismus	935
8.2.1.2 Invasive Arten und Neobiota	935
8.2.2 Räumliche und zeitliche/saisonale Verteilung von Bodenbiodiversität	936
8.2.3 Monitoring und Trends der Bodenbiodiversität	939
8.2.3.1 Ergebnisse der Literatur- und Datenanalysen von Biodiversitätstrends	943
8.3 Beziehungen zwischen Bodenbiodiversität und Ökosystemfunktionen	948
8.3.1 Vom Organismus zum Ökosystem	948
8.3.2 Ökosystemfunktionen der Bodenbiodiversität	949
8.3.3 Multifunktionalität für stabile Ökosystemfunktionen	954
8.4 Bodenbezogene Ökosystemleistungen	956
8.4.1 Bodenbezogene Ökosystemleistungen (ÖSL) – Konzept, Ansätze der Erfassung und Bewertung	956
8.4.2 Synergien und Zielkonflikte zwischen biologischer Vielfalt und bodenbezogenen Ökosystemleistungen	957
8.4.3 Bodenbiodiversität und bodenbezogene Ökosystemleistungen	958
8.4.3.1 Regulierende bodenbezogene Ökosystemleistungen	958
8.4.3.2 Versorgende bodenbezogene Ökosystemleistungen	962
8.4.3.3 Kulturelle bodenbezogene Ökosystemleistungen	962
8.5 Direkte Treiber der Bodenbiodiversität, der Ökosystemfunktionen und -leistungen	969
8.5.1 Einleitung	969
8.5.1.1 Klassifizierung der Wirkung von direkten Treibern auf die Bodenbiodiversität	969
8.5.1.2 Übersicht Direkte Treiber	970
8.5.2 Veränderung der Struktur der Landschaft im Lebensraum Boden	971
8.5.3 Veränderte Landnutzung und direkte Ressourcenentnahme im Lebensraum Boden	972
8.5.4 Verschmutzung im Lebensraum Boden	974
8.5.5 Klimawandel im Lebensraum Boden	978
8.5.6 Invasive Arten im Lebensraum Boden	979
8.5.7 Andere direkte Treiber und Treiberinteraktionen im Lebensraum Boden	979

8.6 Indirekte Treiber der Bodenbiodiversität, der Ökosystemfunktionen und -leistungen	980
8.6.1 Einleitung	980
8.6.2 Politische und rechtliche Treiber der Bodenbiodiversität	980
8.6.3 Wirtschaftliche und technologische Treiber der Bodenbiodiversität	983
8.6.4 Gesellschaftliche Treiber der Bodenbiodiversität	984
8.6.5 Synergien/Konflikte zwischen indirekten Treibern & biologischer Vielfalt	984
8.7 Nachhaltige Instrumente und Maßnahmen für den Schutz der Bodenbiodiversität	987
8.7.1 Instrumente	987
8.7.1.1 Ordnungsrechtliche Instrumente	987
8.7.1.2 Finanzielle anreizbasierte Instrumente	987
8.7.1.3 Informationelle Instrumente	988
8.7.2 Maßnahmen	988
8.7.2.1 Flächenschutzmaßnahmen	989
8.7.2.2 Allgemeine (Management-)Maßnahmen	989
8.7.2.3 Spezielle Maßnahmen nach Lebensräumen	992
8.7.3 Evaluation der beschriebenen Maßnahmen zum Schutz der Bodenbiodiversität	1004
8.8 Optionen für Entscheidungsträger:innen	1005
8.8.1 Hintergrund	1005
8.8.2 Zielgruppen und Handlungsspielräume	1006
8.8.3 Präzisierung von Zielen und Überwachung von deren Erreichung durch die Entwicklung von Indikatoren und Monitoringsystemen	1007
8.8.4 Handlungsoptionen	1009
8.8.4.1 Bodennutzer:innen und -eigentümer:innen	1009
8.8.4.2 Politik und Verwaltung	1009
8.8.4.3 Konsument:innen/Bürger:innen	1010
8.8.4.4 Bildung	1011
<i>Literaturverzeichnis – Kapitel Bodenbiodiversität</i>	1016

9 Indirekte Treiber der Biodiversitätsentwicklung	1049
Autor:innen	1049
Beitragende Autor:innen	1049
Kapitelzusammenfassung	1050
9.1 Einleitung	1055
9.1.1 Definition und Abgrenzung der indirekten Treiber	1055
9.1.1.1 Definition	1055
9.1.1.2 Abgrenzung der indirekten Treiber	1055
9.1.2 Zeitliche und räumliche Dimensionen von indirekten Treibern	1056
9.1.2.1 Zeitliche Dimension	1056
9.1.2.2 Räumliche Dimension	1057
9.1.3 Relevanz indirekter Treiber: Gesellschaftliche Veränderungen und Politik	1058
9.1.4 Exkurs: Biodiversitätsbewertung	1059
9.1.4.1 Potenzial und Grenzen der Biodiversitätsbewertung	1059
9.1.4.2 Studienlage zur Biodiversitätsbewertung: eine kritische Diskussion	1061

9.1.5	Weitere Vorgehensweise im Kapitel	1063
9.1.5.1	Kommentierte Gliederung	1063
9.1.5.2	Hintergrund zur Befragung der Bearbeitenden des <i>Faktencheck Artenvielfalt</i>	1063
9.2	Begünstigende und hemmende Faktoren	1064
9.2.1	Politik und Recht	1064
9.2.1.1	Naturschutzpolitik und ihre Umsetzung	1064
9.2.1.2	Politiken in den Lebensräumen	1068
9.2.1.3	Energiepolitik	1073
9.2.1.4	Umweltpolitik	1075
9.2.1.5	Governance und Mehrebenenstruktur	1076
9.2.1.6	Einschätzung innerhalb des <i>Faktencheck- Artenvielfalt</i> -Konsortiums	1076
9.2.2	Wirtschaft und Technologie	1077
9.2.2.1	Wirtschaftliche und technologische Dynamik seit 1945	1077
9.2.2.2	Wirtschaftswachstum und die Nutzung natürlicher Ressourcen	1078
9.2.2.3	Wohlstand, Flächenverbrauch und Versiegelung von Flächen	1081
9.2.2.4	Auswirkungen des Wachstums auf den ökologischen Fußabdruck	1082
9.2.2.5	Bewertung des Lebensraums durch wirtschaftliche Akteure: Produktion und verfügbare Ressourcen	1083
9.2.2.6	Biologische Invasion	1084
9.2.2.7	Leakage-Effekte im Umweltbereich	1084
9.2.2.8	Einschätzung innerhalb des <i>Faktencheck-Artenvielfalt</i> -Konsortiums	1084
9.2.3	Gesellschaft	1085
9.2.3.1	Bevölkerungsentwicklung (demografischer Wandel)	1085
9.2.3.2	Naturbewusstsein in der Bevölkerung	1088
9.2.3.3	Partizipative Ansätze	1089
9.2.3.4	Konsum von Fleisch und Ersatzprodukte	1089
9.2.3.5	Zunahme von zivilgesellschaftlichem Engagement für mehr Umwelt- und Klimaschutz	1089
9.2.3.6	Relevanz von Narrativen	1091
9.2.3.7	Pfadabhängigkeit	1091
9.2.3.8	Fake News	1092
9.2.3.9	Einschätzung innerhalb des <i>Faktencheck-Artenvielfalt</i> -Konsortiums	1092
9.3	Instrumente und Maßnahmen	1093
9.3.1	Politik und Recht	1093
9.3.1.1	Veränderung der Energieversorgung	1093
9.3.1.2	Potenziale der GAP nutzen	1094
9.3.1.3	Abbau der Umsetzungs- und Vollzugsdefizite	1095
9.3.1.4	Natur mit Rechten ausstatten	1096
9.3.1.5	Politische Gestaltung des Ausstiegs aus nicht nachhaltigen Technologien (Exnovation)	1097
9.3.1.6	Einschätzung innerhalb des <i>Faktencheck-Artenvielfalt</i> -Konsortiums	1098
9.3.2	Wirtschaft und Technologie	1098
9.3.2.1	Marktversagen und Korrektur	1098
9.3.2.2	Produktionstechnische Innovationsentwicklung	1098

9.3.2.3 Nudging	1099
9.3.2.4 Einschätzung innerhalb des <i>Faktencheck-Artenvielfalt-Konsortiums</i>	1102
9.3.3 Gesellschaft	1102
9.3.3.1 Bildung	1102
9.3.3.2 Einschätzung innerhalb des <i>Faktencheck-Artenvielfalt-Konsortiums</i>	1105
9.4 Exkurs: Covid-19-Pandemie und Krieg in der Ukraine	1105
9.4.1 Covid-19	1105
9.4.2 Krieg in der Ukraine	1107
<i>Literaturverzeichnis</i>	1109

10 Transformationspotenziale zum Erhalt der biologischen Vielfalt 1121

Autor:innen	1121
Beitragende Autor:innen	1121
Kapitelzusammenfassung	1122

10.1 Einleitung	1127
10.2 Gesellschaftliche Wandlungsprozesse und Transformationspotenziale: Eine Standortbestimmung	1128
10.2.1 Biodiversitätsziele auf verschiedenen Ebenen	1128
10.2.2 Gesellschaftliche Wandlungsprozesse mit positiven Auswirkungen für die biologische Vielfalt	1131
10.2.3 Methodisches Vorgehen	1131
10.3 Gelungene gesellschaftliche Wandlungsprozesse	1135
10.3.1 Vision des gesellschaftlichen Wandels	1135
10.3.2 Wissen im Wandel	1137
10.3.2.1 Dynamiken im Wandel	1142
10.3.3 Emanzipiertes Handeln und Handlungsräume im Wandel	1145
10.3.3.1 Ergebnisse der Fallstudienanalysen	1145
10.3.4 Governance-Ansätze aus den Fallstudien	1148
10.4 Governance-Ansätze zur Unterstützung transformativer Prozesse	1151
10.4.1 Ansätze zur Umsetzung und Durchsetzung von Umweltvorschriften und Umweltzielen	1152
10.4.1.1 Biologische Vielfalt und Ökosystemleistungen in der nationalen Berichterstattung	1152
10.4.1.2 Biologische Vielfalt und Ökosystemleistungen in der unternehmerischen Berichterstattung	1154
10.4.1.3 Umweltziele einklagbar machen: Zivilgesellschaftliches Engagement	1156
10.4.1.4 Stärkere Verankerung von Umweltbelangen im deutschen Rechtsrahmen	1157
10.4.2 Ansätze der Raum- und Landschaftsplanung	1157
10.4.3 Potenzialabschätzung verschiedener Ansätze zur Unterstützung transformativer Governance	1160

10.5 Synthese: Potenziale zur Unterstützung für transformativen Wandel zum Erhalt der biologischen Vielfalt	1164
10.6 Wissenslücken und Forschungsbedarf	1170
<i>Literaturverzeichnis</i>	1172

11 Synthese des Faktencheck Artenvielfalt 1179

Autor:innen 1179

11.1 Ziele	1180
11.2 Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung der Wirkungsketten	1180
11.3 Notwendiger Rahmen für den transformativen Wandel	1181
11.4 Positive Wirkungsketten für die biologische Vielfalt im Agrar- und Offenland	1183
11.5 Positive Wirkungsketten für die biologische Vielfalt der Wälder	1186
11.6 Positive Wirkungsketten für die biologische Vielfalt der Binnengewässer und Auen ..	1190
11.7 Positive Wirkungsketten für die biologische Vielfalt der Küsten und Küstengewässer	1193
11.8 Positive Wirkungsketten für die biologische Vielfalt der urbanen Räume	1195
11.9 Zusammenfassung der positiven Wirkungsketten für die Biodiversität über alle Lebensräume	1198
<i>Literaturverzeichnis</i>	1204

Anhang 1205

Abkürzungsverzeichnis	1206
Glossar	1210
Digitale Anhänge	1254
Über die Herausgeber:innen	1256

1.1 Veranlassung und Motivation

Biologische Vielfalt oder Biodiversität umfasst den Reichtum an biologischen Arten, ihre genetische, stammesgeschichtliche und funktionelle Vielfalt sowie die Vielfalt von Ökosystemen an Land und im Wasser (CBD 1992). Wir Menschen sind dabei, diese biologische Vielfalt auf unserem Planeten Erde im Anthropozän zu verringern und in ihrer globalen Verteilung grundlegend zu verändern. Die Anzahl und Häufigkeiten vieler Arten von Lebewesen sind rückläufig (Dirzo, Ceballos & Ehrlich 2022), es entstehen neuartige, oft verarmte Artengemeinschaften (Blowes et al. 2019; Newbold et al. 2018), und es sterben Arten mit ungekannt hoher Geschwindigkeit aus (Ceballos et al. 2015). Der globale Bericht des Weltbiodiversitätsrats fasst dies eindrücklich zusammen (IPBES 2019): Die Ausdehnung natürlicher Ökosysteme hat sich im Vergleich zum bekannten Ursprungszustand um 47 % verringert. Die Bestandsgrößen von Arten in ihrem natürlichen Vorkommen sind im Mittel um 23 % zurückgegangen. Weltweit sind 25 % aller untersuchten Arten akut bedroht, insbesondere Pflanzen, Amphibien und wild lebende Säugetiere. Die Biomasse Letzterer ist um 82 % zurückgegangen. Diese Veränderungen beeinträchtigen die Funktionsweise der Ökosysteme und schmälern ihre Fähigkeit, Leistungen zu erbringen, von denen wir als Menschen abhängen. Angesichts solcher Zahlen haben die Medien den Begriff »Biodiversitätskrise« geprägt. Krisen sind allerdings zeitlich begrenzt. Tatsächlich sind das Aussterben von Arten und das Verschwinden von Genen nicht umkehrbar.

Diese Entwicklung macht auch vor Deutschland nicht halt (Leopoldina 2020). Ein prägnantes Beispiel aus der jüngeren Zeit ist der starke Rückgang der Brutvogelvorkommen Europas und Deutschlands in den letzten Jahrzehnten (Burns et al. 2021; Kamp et al. 2021). Besonders die Vögel in der Agrarlandschaft sind von dieser Entwicklung betroffen, die mit der landwirtschaftlichen Intensivierung in Verbindung gebracht wird (DDA 2019). Seit 1960 zeigen 70 % der deutschen Pflanzenarten einen rückläufigen Trend ihrer Vorkommen (Eichenberg et al. 2021). Nicht nur seltene Pflanzenarten, sondern auch Arten mittlerer Häufigkeit verzeichnen deutliche Rückgänge (Jansen et al. 2020). Langzeitrends von Schmetterlingen im grenznahen Salzburger Land zeigen einen Rückgang der Vielfalt über die letzten 150–200 Jahre um 30–40 %, der nach einer ersten Welle der Flurbereinigung bereits ab 1920 einsetzte (Habel et al. 2016). Der alarmierende Insektenrückgang in Deutschland mit aktuell bis zu 75 % Verlust an Biomasse in ausgewählten Gebieten seit 1970 (Hallmann et al. 2017; Seibold et al.

2019) geht vermutlich schon von einer zuvor verarmten Fauna aus (Fartmann et al. 2021). Positive Trends wie die Erholung der biologischen Vielfalt in Fließgewässern stagnieren seit 2010 (Haase et al. 2023). Dass wir solche Trends überhaupt wahrnehmen, ist überwiegend dem Engagement von ehrenamtlichen Expert:innen von naturwissenschaftlichen Gesellschaften und Verbänden zu verdanken und deren Bereitschaft, die Daten gemeinsam mit der Wissenschaft und mit Behörden auszuwerten. Das Ausmaß der Änderungen, ihre Verzahnung mit dem Klimawandel und ihr möglicher Einfluss auf die Funktionsfähigkeit unserer Ökosysteme hat die biologische Vielfalt in den politischen Fokus gerückt (Bundesregierung 2018; Bundesregierung 2021; Settele 2020; WBGU 2020). Es waren vor allem die Ergebnisse jahrzehntelanger Forschung eines regionalen Verbands (Entomologischer Verein Krefeld 2022; Hallmann et al. 2017), die die Politik erreichten, und weniger diejenigen des behördlichen Monitorings oder der akademischen Forschung.

1.2 Warum braucht es einen Faktencheck Artenvielfalt für Deutschland?

Die aktuellen Biodiversitätsverluste und -änderungen treffen ein Land, das auf eine lange Naturschutztradition zurückblicken kann (Haber 2014). Moderne Naturschutzgesetze traten in der DDR 1970 und in der BRD 1976 in Kraft. Seitdem hat Deutschland eine ausdifferenzierte und in der Anlage fortschrittliche Naturschutzgesetzgebung, berücksichtigt Belange des Biodiversitätsschutzes im Planungsrecht, wendet mit Natura 2000 eines der weitreichendsten Naturschutzinstrumentarien weltweit an, verpflichtet sich in internationalen Abkommen zum Biodiversitätsschutz (u. a. in der Weltnaturkonferenz COP 15 der Convention on Biological Diversity CBD) und besitzt seit 2007 eine Nationale Biodiversitätsstrategie (NBS) sowie ein entsprechendes Bundesprogramm für die Biologische Vielfalt (BMUB 2007).

Die Diskrepanz zwischen politischem Anspruch und Instrumentarium einerseits und ökologischer und gesellschaftlicher Realität andererseits ist offensichtlich. Sie hat in den letzten Jahren zu verstärkten Anstrengungen geführt. Noch bevor die Vertragsstaatenkonferenz der CBD im Dezember 2022 auf den Bericht des Weltbiodiversitätsrats reagieren konnte, fanden dessen Ergebnisse Niederschlag in der Biodiversitätsstrategie 2030 des European Green Deal, der den Ländern Europas ambitionierte Ziele setzt. So sollen bis zum Jahr 2030 unter anderem 30 % der Land- und Meeresfläche unter Schutz gestellt, Europas Flüsse über eine Strecke von 25.000 km

renaturiert und von Querbauwerken befreit sowie der Pestizidverbrauch um die Hälfte reduziert werden. Dafür sollen pro Jahr 20 Mrd. € aufgewendet werden. Eine neue Fassung der Nationalen Biodiversitätsstrategie, die derzeit in Abstimmung ist und auch die Ergebnisse der CBD COP 15 in Montreal aufnimmt, wird diese Ziele nun auf Deutschland herunterbrechen (Anhang A1.3). Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) hat als erste Umsetzung das »Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz« mit einem Finanzvolumen von ursprünglich 4 Mrd. € (aktuell 3,5 Mrd. €) aufgesetzt. Mit der Novelle des Naturschutzgesetzes im Jahr 2022 (BNatSchG § 45d) werden erstmals nationale Artenhilfsprogramme aufgesetzt, und 2021 wurde ein Nationales Monitoringzentrum zur Biodiversität (NMBZ) gegründet.

Die Kaskade politischer Strategien (CBD → EU-Strategie → Nationale Strategie), die in den letzten Jahren stark vom IPBES-Bericht (IPBES 2019) inspiriert war, entfaltet nun verstärkt ihre Wirkung. Im Juli 2024 wurde die »Verordnung zur Wiederherstellung der Natur« (EU Nature Restoration Law, NRL) als Gesetz verabschiedet (Box 11.1) In der Dekade der Renaturierung (UN Decade of Restoration, 2021–2030) beginnt damit nun die Regionalisierung der Strategien auf Ebene der Bundesländer und Gemeinden und schließlich – in stärkerem Maß als bisher – die konkrete Umsetzung in der Fläche. Auch wurde die Einbindung nicht staatlicher Akteure dabei verstärkt. So besteht Hoffnung, dass sich die Lücke zwischen Anspruch und Realität schließen lässt. Für die nächsten Schritte brauchen die Akteure aus der Lokalpolitik, den Verbänden, der Landnutzung, der Planung und dem Landschaftsbau das beste Grundlagen- und Handlungswissen – wissenschaftlich geprüft und aktuell, in möglichst hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und fußend auf den für Deutschland relevanten Erfahrungen. Solches Wissen ist vorhanden, aber es ist in verschiedenen Teildisziplinen, Akteursgruppen, Behörden und Bundesländern versprengt. Daher ist es ein zentrales Anliegen des *Faktencheck Artenvielfalt*, dieses verteilte Wissen zum aktuellen Status und die Trends der biologischen Vielfalt (Kap. 2.1) sowie die Auswirkung dieser Trends auf die Bereitstellung von Ökosystemleistungen (Kap. 2.2) zu bündeln. Wir werden die Ursachen dieser Trends (direkte Treiber) analysieren (Kap. 2.3) sowie die zugrunde liegenden indirekten Treiber gesellschaftlicher Prozesse (Kap. 2.4) herausarbeiten. Wir werden im nächsten Schritt die Erfolge und Misserfolge von Instrumenten und Maßnahmen zur Förderung der biologischen Vielfalt beleuchten (Kap. 2.5). Ein besonderes Kapitel widmet sich den Ver-

hältnissen bei der bisher stark vernachlässigten biologischen Vielfalt im Boden (Kap. 2.6). Schließlich werden die Bedingungen herausgearbeitet, unter denen die Bereitschaft für eine gesellschaftliche Transformation zum nachhaltigen Umgang mit der biologischen Vielfalt gegeben ist (Kap. 2.7).

Wir möchten bereits an dieser Stelle betonen, dass wir schon seit geraumer Zeit genug wissen, um im Sinne des Biodiversitätsschutzes zu handeln. Die Gründe für die Umsetzungs- und Vollzugsdefizite werden im Kapitel zu den indirekten Treibern (Kap. 9) und im Kapitel zu den Transformationspotenzialen (Kap. 10) beleuchtet. Mehr und präziseres Wissen ist aber ebenso Teil der Lösung wie die politikgerechte Vermittlung dieses Wissens. Beides erhöht die Erfolgsaussichten, die Geschwindigkeit und die Akzeptanz unseres Handelns. Im Folgenden möchten wir die Notwendigkeit für einen Faktencheck zum jetzigen Zeitpunkt anhand von sechs Schlaglichtern ausführen.

1.2.1 Wissen für Handelnde

Das Wissen, das der IPBES-Bericht und vergleichbare überregionale Assessments (IPBES Regional Assessment Europe & Central Asia, CBO-5) in eindrücklicher Weise zusammenfassen, lässt sich nicht ohne Weiteres auf die Skala herunterbrechen, auf der Instrumente und Maßnahmen zum Schutz der biologischen Vielfalt entschieden, geplant und umgesetzt werden. Nationale und regionale Programme und Gesetzgebungsverfahren, die künftig aus der neuen Nationalen Biodiversitätsstrategie abgeleitet werden, brauchen Information mit größtmöglicher Auflösung. Das möchten wir an drei Beispielen illustrieren.

(1) Biodiversitätsänderungen sind stark kontextabhängig, und sie variieren räumlich und zeitlich (Hallmann et al. 2021). Es gibt derzeit deutliche Unterschiede zwischen taxonomischen Gruppen (Engelhardt et al. 2022; Outhwaite et al. 2020), Habitatspezialisierungen (Kamp et al. 2021), Lebensraumtypen (van Klink et al. 2020; van Strien et al. 2016), Entwicklungsstadien von Ökosystemen (Kamp et al. 2020), bioklimatischen Regionen (Bowler et al. 2021) und häufigen versus seltenen Arten (Hallmann et al. 2021). Das Wissen über Richtung und Stärke solcher Trends erlaubt einen Abgleich mit regionalen Leitbildern (Lennartz 2003; Toschki et al. 2021) und eine Priorisierung von Programmen angesichts begrenzter Zeit und Ressourcen.

(2) Eine wichtige Frage bei der Entwicklung von Förderinstrumenten und der Planung von Maßnahmen ist

die nach den Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Nach dem IPBES-Bericht sind laut Expert:innenschätzung weltweit Habitatzerstörung und direkte Ausbeutung für etwas mehr als die Hälfte der Biodiversitätsverluste verantwortlich, gefolgt von Klimawandel und Umweltverschmutzung mit je ca. 15 % (IPBES 2019). Auch wenn die grundlegenden Zusammenhänge in Deutschland gut untersucht wurden, sind wir noch weit von einer quantitativen und flächenscharfen Kausalanalyse von Biodiversitätstrends (Attributierung) entfernt. Diese wird dadurch erschwert, dass Daten für die antreibenden Prozesse (Treiber), z. B. Pestizideinsatz, Düngung oder Landnutzungsänderungen, nicht in der benötigten räumlichen und zeitlichen Auflösung existieren oder bereitgestellt werden. Vorhandene Studien sind häufig korrelativ (z. B. Hallmann et al. 2014; Rigal et al. 2023; Sperle & Bruelheide 2021), oder sie schließen aus bekannten Eigenschaften und ökologischen Präferenzen von Arten indirekt auf die Ursachen hinter den Trends (Bowler et al. 2021; Haase et al. 2019). Eine regionale Differenzierung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen wird auch der *Faktencheck Artenvielfalt* nicht leisten können, aber er wird ein möglichst präzises Bild der Einzelstudien zeichnen und vor allem die Wissenslücken aufzeigen. Auch wenn unser Wissen um die Zusammenhänge auch mit dem *Faktencheck Artenvielfalt* lückig bleibt, reicht es bereits aus, um ein sofortiges Handeln zu motivieren und die Effizienz von Instrumenten und Maßnahmen zu erhöhen.

(3) Biodiversitätsschutz wird – auch in Zeiten beschleunigter Transformation – immer Abwägungen mit anderen gesellschaftlichen Zielen unterworfen sein (Riedel et al. 2016). Deshalb müssen angesichts lokaler Besonderheiten (Naturraum, Nutzungsgeschichte, rechtliche Zuständigkeiten, kulturelle Bindungen, regional bedeutsame Arten, Leitbilder) die wesentlichen Aktionsfelder und Stellschrauben zielgenau benannt werden. Nur so können trotz unvermeidlicher Interessenkonflikte und Randbedingungen positive Effekte erzielt werden.

Ziel des vorliegenden *Faktencheck Artenvielfalt* muss es also sein, das vorhandene Wissen zu Biodiversitätstrends und ihren Ursachen in der größtmöglichen räumlichen, zeitlichen und auch taxonomischen Auflösung bereitzustellen – oder in anderen Worten: den IPBES-Ansatz auf Deutschland und seine Regionen so weit wie möglich herunterzubrechen. Für diese Bewegung vom Allgemeinen zum Speziellen ist es unabdingbar, zusätzlich zu Artikeln in internationalen Peer-Review-Zeitschriften, die den IPBES-Berichten überwiegend zugrunde liegen, als

Quellen verstärkt deutsche Publikationen in regionalen Zeitschriften von Fachgesellschaften, Berichte von Behörden und Verbänden, Planungsgutachten und universitäre Qualifizierungsarbeiten einzubeziehen. Es sei allerdings eingeräumt, dass trotz der über 6.000 berücksichtigten Publikationen eine vollständige systematische Erfassung dieser Quellentypen im Rahmen des Projektes nicht möglich war. Der *Faktencheck Artenvielfalt* akquiriert und analysiert darüber hinaus auch Rohdaten, von denen der überwiegende Teil der langjährigen Arbeit von naturwissenschaftlichen Gesellschaften und Verbänden zu verdanken ist (Dröschmeister et al. 2006; Frohn & Rosebrock 2012; Sommerwerk, Geschke & Schliep 2021).

1.2.2 Wissen aus technischer Innovation nutzbar machen

Naturschutzbiologie hat auch in Deutschland eine lange Wissenschaftstradition (Haber 2014; Trepl 1994). Seit vielen Jahrzehnten sorgt eine engagierte Gemeinschaft von ehrenamtlichen Expert:innen dafür, dass wir wertvolle Basisdaten zu Verbreitungen und Trends für viele wichtige Organismengruppen zur Verfügung haben (Kap. 2.1.1). Das Rote-Liste-Zentrum des Bundesamts für Naturschutz koordiniert seit 2018 die Erstellung von Roten Listen für Deutschland (Binot-Hafke et al. 2000). Für viele Probleme des Biodiversitätsschutzes gibt es bewährte Handlungsrezepte und Gesetzesgrundlagen (aber siehe nächster Abschnitt). Gleichzeitig verdoppelt sich die Menge publizierten Wissens im Zuge der Digitalisierung in immer kürzeren Zeiträumen. Wir gewinnen nicht nur mehr Wissen pro Zeit, sondern durch technische Innovationen auch neuartiges Wissen. Die Rate, mit der sich dieser Wissenszuwachs in Leitfäden und Gesetzen niederschlägt, ist naturgemäß begrenzt, und der Brückenschlag zwischen Grundlagenforschung und Praxis bleibt eine Herausforderung (Riecken et al. 2020).

Von welchen Innovationen reden wir? Es gibt eine massive Verbesserung der Verfügbarkeit von ökologischen Daten zur biologischen Vielfalt durch eine Vielzahl von Datenbankprojekten. Wir verfügen nun über weitgehend frei zugängliche Datenbanken zur Verbreitung von Pflanzen (FlorKart, BfN 2016), Vögeln (Monitoring häufiger Brutvögel, ADEBAR, Gedeon et al. 2014), Säugetieren (Fauna Europaea 2016) und anderen Artengruppen (GBIF o. J.). Es existieren Datenbanken zu Pflanzengesellschaften (sPlot, Bruelheide et al. 2019), Waldökosystemen (FunDivEUROPE, Ratcliffe et al. 2016), zum ökologischen Langzeitmonitoring (eLTER-Datenbank DEIMS o. J.), zur Ausbreitung von invasiven Arten (GloNAF Hancock et al. 2022) und funk-

tionellen Merkmalen von Pflanzen (TRY, Kattge et al. 2020), Bodenorganismen (Edaphobase; Burkhardt et al. 2014), Süßwasserorganismen (freshwaterecology.info, Schmidt-Kloiber und Hering 2015) und Insekten (ITT, Hörren et al. 2022). Dies sind nur wenige Beispiele von vielen.

Die digitale und molekulare Revolution hat der Wissenschaft vielfältige Möglichkeiten für eine automatisierte Erfassung von biologischer Vielfalt eröffnet (van Klink et al. 2022; Wägele et al. 2022; Zeuss et al. 2023). Das Methodenspektrum umfasst DNA-Barcoding (Geiger et al. 2016; Rduch & Peters 2020) sowie Hochdurchsatzverfahren wie Metabarcoding, die die Basis von Umwelt-DNA-Methoden bilden (Pawlowski et al. 2018) und die es erlauben, ein holistisches Bild ganzer Artengemeinschaften aus Umweltproben (Boden, Wasser, Luft, Pflanzenmaterial, Darminhalte usw.) zu erhalten (Beng & Corlett 2020; Doi et al. 2017). Ein weiteres Feld der Entwicklung ist die automatische Bilderkennung. In Fotografien von Organismen und Gemeinschaften können mithilfe künstlicher Intelligenz einzelne Arten bestimmt werden (Bjerge, Mann & Høye 2022). Diese Methoden finden z. B. Anwendung bei der Auswertung der Proben von automatisierten Lichtfängen von Insekten (Schneider et al. 2022) oder bei der Smartphone-basierten Erhebungen von Pflanzen im Rahmen von Bürgerwissenschaften (Citizen Science; Wäldchen & Mäder 2018). Die Verwendung von optischen Sensoren der Fernerkundung zur Arterkennung ist mittlerweile ein etabliertes Forschungsfeld (Alleaume et al. 2018; Bae et al. 2019; Cavender-Bares, Gamon & Townsend 2020). Neben visuellen werden auch akustische Signale zur Artbestimmung verwendet, zum Beispiel zur Erfassung von Vögeln (Müller et al. 2023; Pérez-Granados & Traba 2021), Fischen (Linke et al. 2018) und Insekten (Hill et al. 2018). Die Technik des Regenradars lässt sich auf die Erfassung von Insektenhäufigkeiten anpassen (Brydegaard & Jansson 2019). Mit »Imaging Flow Cytometry« lassen sich Pollen und Sporen in Luftproben und Algen in Wasserproben mithilfe von künstlicher Intelligenz auf Art- oder Gattungsniveau bestimmen (Dunker et al. 2018; Dunker et al. 2021).

Viele dieser Methoden sind noch in der Entwicklung begriffen, und ihr robuster Routineeinsatz ist erst in mehreren Jahren denkbar. Kapitel 2.1.5 gibt einen Überblick über die faszinierenden Entwicklungen der letzten Jahre, aber auch die Herausforderungen, die noch gemeistert werden müssen, um die Methoden zur Einsatzreife zu bringen (siehe auch Programm BiodivKI der FEaA-Initiative des BMBF). Der *Faktencheck Artenvielfalt* legt daher ein besonderes Augenmerk auf erste Ergebnisse.

Zeitgleich vollzog sich eine Revolution bei Methoden für die Analyse komplexer ökologischer Daten (z. B. maschinelles Lernen, Strukturgleichungsmodellierung, Nullmodellansätze, hierarchische Bayesische Modellierung, Hybridmodellierung), die es ermöglicht, mit komplexen, heterogenen Daten umzugehen, wie sie typisch für die Ökologie und ehrenamtliches Monitoring sind und wie sie auch durch neue Detektionsmethoden entstehen. Es ist damit in den letzten Jahren eine neue Qualität von Resultaten erzielt worden, die eine größere Menge an Daten einbeziehen und komplexere Beziehungen abbilden. Als Beispiele seien Arbeiten der Integration von heterogenen Monitoringdaten genannt (Bowler et al. 2021; Eichenberg et al. 2021; Haase et al. 2023; Jandt et al. 2022; Jansen et al. 2020), die gemeinsam mit Fachgesellschaften, Verbänden und Behörden zusammengestellt wurden. Es besteht die Sorge, dass die Technologisierung zu einer Monopolisierung des Monitorings und der ökologischen Forschung in wenigen Einrichtungen führt und damit ein Auseinanderdriften von Forschung und Anwendung vor Ort bewirkt. Das Gegenteil scheint der Fall zu sein: Ehrenamt, Behörden und Wissenschaft proben den Schulterschluss, wie erfolgreiche Kooperationen belegen (z. B. Hallmann et al. 2017; 2021, sMon-Projekt [www.idiv.de/smon, Eichenberg et al. 2020] u. v. a.).

In einem Biodiversitätsassessment für Deutschland sollte die beeindruckende Entwicklung der deutschen Forschungslandschaft in dem Feld der Biodiversitätsforschung nicht unerwähnt bleiben. Mit einer Vielzahl von Verbundprojekten, institutionellen Neugründungen und jüngeren Initiativen der Ressortforschung nimmt Deutschland sowohl in der Grundlagen- als auch Anwendungsforschung im internationalen Vergleich mittlerweile eine Vorreiterrolle ein. Prominent sei das DFG-Schwerpunktprogramm »Biodiversitätsexploratorien« genannt, das mit Arbeiten zur Wechselwirkung von Landnutzung, biologischer Vielfalt und Ökosystemfunktionen international Maßstäbe gesetzt hat (Fischer et al. 2010). Ähnlich einflussreich ist die Forschungsgruppe »Jena Experiment«, die seit 2002 den Einfluss der Vielfalt von Pflanzenarten in Wiesen auf Ökosystemfunktionen untersucht (Weisser et al. 2017). Die DFG hat eine ständige Senatskommission für biologische Vielfalt eingerichtet und finanziert das Deutsche Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, das u. a. das internationale Synthese-Zentrum (sDiv) beherbergt. Die Leibniz-Gemeinschaft hat mit dem Senckenberg BiK-F ein Forschungszentrum für Biodiversität und Klima gegründet und etliche ihrer Forschungsmuseen im Rahmen des For-

schungsnetzwerks Biodiversität thematisch und strukturell stark erweitert. Eine Fusion der Forschungsmuseen in Bonn und Hamburg (LIB) widmet sich der Erforschung des Biodiversitätswandels. Das Helmholtz-Programm »Changing Earth – Sustaining Our Future« hat einen starken Bezug zur biologischen Vielfalt auf nationaler Ebene. Die Helmholtz-Gemeinschaft hat mit dem Helmholtz-Institut für Funktionelle Marine Biodiversität (HIFMB) in Oldenburg ein Zentrum für marine Biodiversitätsforschung gegründet und leitet u. a. mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) viele wichtige Programme, wie die europäische Infrastruktur zur sozio-ökologischen Langzeitforschung (eLTER) und das Tagfalter-Monitoring Deutschland (TMD), Letzteres gemeinsam mit der Nichtregierungsorganisation GfS (Gesellschaft für Schmetterlingsschutz). Wichtige Impulse gehen auch von der Ressortforschung aus. Beispielfähig genannt seien hier Initiativen der Thünen- und Julius-Kühn-Institute zum Biodiversitätsmonitoring in Agrarlandschaften (MonVIA; Verbundprojekt MonViA 2021) und im Wald (NatBioWald; Bolte et al. 2022) sowie das oben genannte Nationale Monitoring Zentrum zur Biodiversität des Bundesamts für Naturschutz. Wichtige Netzwerke, die für Deutschland relevant sind, wurden im Rahmen von EU-Projekten etabliert, z. B. Europa-BON für EU-weites Biodiversitätsmonitoring, FunDiv-Europe für Wald, MERLIN für Fließgewässer und LUCAS für Böden. Unzureichend ist bislang die Integration sozial- und geisteswissenschaftlicher Forschung sowie der Transformationsforschung (Kap. 1.2.6), erhält aber derzeit durch die BioDiWert-Projekte der FEaA-Initiative des BMBF unter Leitung von Senckenberg wichtige Impulse. Dieser Forschungslücke widmen wir in unserem Bereich daher besondere Aufmerksamkeit.

Ziel des *Faktencheck Artenvielfalt* muss es somit sein, die enormen Fortschritte in der Biodiversitätsforschung und der ökologischen Grundlagenforschung aufzuzeigen und so für den Erhalt der Artenvielfalt nutzbar zu machen. Die Erschließung dieses Wissens fließt in die Formulierung von Handlungsoptionen ein.

1.2.3 Naturschutztheorien und aktuelle Debatten – wo stehen wir?

Für den Erhalt der Artenvielfalt brauchen wir nicht nur das Detailwissen um Biodiversitätstrends und ihre Treiber, sondern auch Theorien und Wissen um grundlegende Zusammenhänge. Obwohl seit über 100 Jahren Bemühungen existieren, Lebensräume unter Schutz zu stellen, wurden erst seit den 1970er-Jahren Naturschutzmaßnahmen von Erkenntnissen der ökologischen Grundlagenforschung und hier besonders dem Zweig

der Naturschutzbiologie (engl. Conservation Biology) abgeleitet (Soulé & Wilcox 1980). So hat z. B. die Idee des Biotopverbunds ihren Ursprung in der Metapopulationstheorie (Chase et al. 2020), und die des Prozessschutzes basiert auf der Sukzessionstheorie (Kollmann et al. 2019). Es gibt immer noch etliche konzeptionelle Debatten, deren Klärung einen großen Einfluss auf die Art und Weise hätte, wie Landschaften geplant und Maßnahmen gestaltet werden. Im Folgenden werden einige Beispiele genannt.

Integration versus Segregation: Im segregativen Ansatz werden Schutz und Förderung von biologischer Vielfalt (in Schutzgebieten, Nationalparks usw.) von der Nutzung (Landwirtschaft, Industrie, Siedlung) getrennt (Plachter 1991). Schutzgebiete sind meist klein und sie liegen isoliert. Sie sind daher stark von umgebender Nutzung beeinflusst, sodass Arten mit komplexen Ansprüchen an Umwelt und Raum durch Flächenmangel geeigneter Habitate und limitierte Verbreitung und Genaustausch Probleme haben. Der Rückgang von biologischer Vielfalt auch in Schutzgebieten (Hallmann et al. 2017) deutet darauf hin, dass die Segregation alleine den Verlust der biologischen Vielfalt nicht stoppen kann. Daher sollten segregative Ansätze in Schutzgebieten auf kleiner Fläche den Erhalt wertvoller, intakter Ökosysteme sicherstellen (Maxwell et al. 2020), was aktuell mit < 5 % der Landesfläche unter strengem Schutz noch deutlich unter den 10 % anvisierter Gesamtfläche der CBD-Zielvorgabe liegt. Um 30 % geschützte Fläche zu erreichen, müssen integrative Ansätze mit einer naturverträglichen Nutzung (multifunktionales Flächenmosaik) im Fokus der verbleibenden Fläche stehen (Grass et al. 2019; Kremen 2015; WBGU 2020). Nur die Kombination beider Ansätze kann sowohl den Anteil von hochwertigen Habitaten und Wildnis erhöhen als auch die biologische Vielfalt der Kulturlandschaft Europas erhalten. Intelligente Konzepte liegen vor (z. B. WBGU 2024), aber für eine Umsetzung in der Fläche bräuchte es einen Paradigmenwechsel in der Landschaftsplanung.

Prozessschutz versus Kulturlandschutz: Prozessschutz ist eine Form des Flächenschutzes, der darauf setzt, dass eine vom Menschen großteils unbeeinflusste Entwicklung mit natürlichen Sukzessions- und Störungsprozessen langfristig ein hohes Maß an biologischer Vielfalt sowie leistungsfähige und stabile Ökosysteme hervorbringt (Perino et al. 2019; Plachter 1991). Prozessschutz wird z. B. in Kernzonen von Nationalparks und Naturwaldreservaten praktiziert und soll gemäß der Nationalen Biodiversitätsstrategie zukünftig auf 5 % der Wald-

fläche in Deutschland gelten. Kulturlandschutz ist eine Form des konservierenden Naturschutzes und beinhaltet häufig die Pflege wertvoller Bestandteile der Kulturlandschaften. Er fokussiert darauf, die Lebensbedingungen von Arten und Artengemeinschaften bedrohter Ökosysteme verschiedener Nutzungsformen (Streuwiesen, Kalkmagerrasen, Mittelwälder, Heidelandschaften usw.) zu optimieren, wofür vielfach Eingriffe und Pflegemaßnahmen notwendig sind. Dieser Ansatz wird in Biosphärenreservaten und in vielen Naturschutzgebieten verfolgt. Er ergibt sich auch vielfach aus der Befolgung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (Natura 2000) mit ihrem Fokus auf den Erhalt spezifischer Lebensraumtypen von gemeinschaftlicher Bedeutung und Verantwortungsarten. Beide Ansätze sind für den Erhalt der Artenvielfalt unverzichtbar und müssen jeweils abhängig vom Ökosystem und von den damit verbundenen Schutzziele zum Einsatz gebracht werden. Allerdings entstehen häufig Zielkonflikte zwischen Prozessschutz und Bestandsschutz (Erhalt von Arten und Lebensräumen), welche nicht nur Themen akademischer, sondern auch emotionaler Debatten sind.

Single Large Or Several Small (»SLOSS«): Bei begrenzter Fläche für die Ausweisung von Schutzgebieten besteht die Frage, ob es für den Erhalt der Artenvielfalt besser ist, wenige große oder viele kleine Schutzgebiete auszuweisen (Diamond 1975). Eine aktuelle Synthese dieser langjährigen Debatte kommt zu dem Schluss, dass die Antwort von drei Faktoren abhängt: der Beweglichkeit von Arten zwischen Gebieten, der Unterschiedlichkeit der Gebiete in der naturräumlichen Ausstattung und der Notwendigkeit zur Risikostreuung angesichts von Gefährdungen (Fahrig et al. 2022). Bei der Analyse dieser Faktoren ergibt sich überwiegend, dass viele kleine Schutzgebiete – solange die Gesamtfläche oder Habitatmenge identisch ist – für den Erhalt der Artenvielfalt weniger großen meist überlegen sind (Fahrig 2020; Fahrig et al. 2022; Riva & Fahrig 2023). Entsprechend sollte es in Diskussionen um Gebietsausweisungen im Zuge politischer Strategien (CBD → EU-Strategie → Nationale Strategie) zunächst um die Steigerung der hochwertigen Fläche oder Habitatmenge gehen und erst im zweiten Schritt um die Vernetzung von Schutzgebieten. Diese Ergebnisse sind bislang nur ungenügend in die Landschaftsplanung eingeflossen, was vor allem an der Verfügbarkeit und langfristigen Sicherung geeigneter Flächen liegt.

Management- und Impulsmaßnahmen: Um dem Schutz von Prozessen in Wildnisgebieten gerecht zu

werden und Konflikte auf angrenzenden Flächen zu minimieren, wird z. T. sowohl in Wildnisgebieten, aber insbesondere in deren Pufferzonen Management von Wildtieren oder gebietsfremden Arten betrieben (Scherfose 2014). In Gebieten, die dem Schutz wertvoller Bestandteile der Kulturlandschaft dienen, wird dieses Ziel mittels extensiver Nutzung, aktiver Pflegemaßnahmen oder der gezielten (Wieder-)Ansiedlung bestimmter Arten, etwa von Großsäugern, in Offenland-Lebensräumen erreicht (Allen et al. 2015). Zudem finden verschiedenste Management- und Impulsmaßnahmen außerhalb von Schutzgebieten statt, für die es anreizbasierte Instrumente gibt wie Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen oder Vertragsnaturschutz. Gegenstand der aktuellen Debatte ist, wie die begrenzten finanziellen und personellen Ressourcen erfolgsorientierter eingesetzt werden sollten, um mit evidenzbasierten Maßnahmen den Rückgang der Artenvielfalt aufzuhalten.

Ziel des *Faktencheck Artenvielfalt* ist es, den aktuellen Fortschritt bei der Entwicklung ökologischer Theorien zu beleuchten und vor allem auch die bisherigen Erfolge und Misserfolge von Naturschutzmaßnahmen zusammenzutragen, die sich aus den daraus resultierenden Naturschutzparadigmen ergeben (Box 11.1).

1.2.4 Schutz der biologischen Vielfalt im globalen Wandel

Dem Wissensgewinn, der im vorherigen Abschnitt skizziert wurde, steht eine wachsende Unsicherheit gegenüber. Dieser resultiert aus der Tatsache, dass unsere Umwelt in raschem Wandel begriffen ist. Neuartige Phänomene wie der sich beschleunigende Klimawandel, biologische Invasionen, eingeschleppte Pathogene, die Energiewende und die ungebremste Intensivierung der Landwirtschaft sind nicht nur selbst Treiber von Biodiversitätsänderungen, sondern sie verschieben das abiotische und biotische Koordinatensystem, in dem ökologische Prozesse heute ablaufen. Manches Erfahrungswissen, das im letzten Jahrhundert gewonnen wurde, ist nicht mehr gültig. Maßnahmen, die früher gegriffen haben, sind heute mitunter nicht mehr wirksam.

In Deutschland sind die Jahresdurchschnittstemperaturen seit Anfang der 1950er-Jahre um 1,8 °C angestiegen. Klimaextreme wie Starkregenereignisse oder kombinierte Hitze- und Trockenjahre (»hotter droughts«), häufen sich statistisch (UBA 2022). Viele einheimische Arten zeigen Stresssymptome und Bestandsrückgänge. Allein in den Jahren 2018/19 hat Deutschland 4,5 % seines Waldbestandes durch Trocken- und Hitzeschäden

verloren (Thonfeld et al. 2022). Dass dies auch Buchen-, Kiefern- und Mischwälder einschloss, die der potenziell natürlichen Waldvegetation nahekommen, zeigt das Ausmaß des ökologischen Umbruchs (Schuldt et al. 2020). Trendanalysen von Biodiversitätsänderungen weisen vermehrt Klimasignale auf, also einen Rückgang von kältetoleranten Arten («Klimaverlierer») und eine Zunahme von Arten mit hohen Temperaturansprüchen («Klimagewinner»), z. B. bei Libellen (Bowler et al. 2021; Ott 1996), Heuschrecken in Bayern (Engelhardt et al. 2022), aquatischen Wirbellosen (Haase et al. 2019), marinen Wirbellosen (Lackschewitz et al. 2014), Blaualgen (Adrian et al. 2016), Pflanzen (Sperle & Bruelheide 2021) und Vögeln (Kamp et al. 2021). Es gibt in der Folge nicht nur Verschiebungen im Gefüge einheimischer Arten. Gleichzeitig fassen besser angepasste Neobiota Fuß, werden potenziell invasiv und überprägen autochtone Artengemeinschaften (BfN o.J.; Kowarik & Rabitsch 2010). Gleiches gilt für Pathogene, die – durch Erwärmung gefördert – zum Verschwinden von ökologischen Schlüsselarten, wie z. B. der Gemeinen Esche, führen können (Linnakoski et al. 2019; Wirth et al. 2021). Es entstehen neuartige Biozönosen, sogenannte Novel Ecosystems (Teixeira & Fernandes 2020). Diese Änderungen haben tiefgreifende Konsequenzen für den Naturschutz. So ist die Erholung der biologischen Vielfalt in Fließgewässern durch die Verbesserung der Wasserqualität ab 2010 zum Erliegen gekommen – eventuell durch höhere Wassertemperaturen (Haase et al. 2023). Die Erwärmung der Seen führt durch zunehmende Schichtung indirekt zu einer Eutrophierung (Adrian et al. 2016).

Der Klimawandel kann sich auch indirekt negativ auf die biologische Vielfalt auswirken, wenn Klimaschutzmaßnahmen, wie Hochwasserschutz, Anbau von Pflanzen für die Bioenergiegewinnung, Windenergie- oder Wasserkraftanlagen, Habitate zerstören oder unattraktiver machen (Ellerbrok et al. 2022; Tudge, Purvis & De Palma 2021). Darüber hinaus kann es dazu kommen, dass Vögel und Säugetiere Gebiete großflächig meiden (Tolvanen et al. 2023). Die enge Verzahnung der Biodiversitätskrise mit der Klimakrise ist aber auch eine große Chance. Biodiversitätsschutz wird zu Klimaschutz, wenn totholzreiche Altwälder geschützt, Überflutungsflächen zurückgewonnen und Moore wiedervernässt werden (IPCC 2022; Pörtner et al. 2021; TU Berlin & BfN 2023). Das neue Aktionsprogramm »Natürlicher Klimaschutz« des BMUV nimmt diesen Gedanken auf. Das bedeutet, dass traditionelle Naturschutzinstrumente um die Klimadimension erweitert werden müssen. Man kann die Biodiversitäts- und Klimakrise nicht mehr getrennt verstehen und bekämpfen.

Nicht nur das Klima wandelt sich rapide, sondern auch die Nutzung und die Struktur unserer Landschaft. Intensive Landnutzungsformen dominieren zusehends (Grünlandeinsaat, Energiemais, Kurzumtriebsplantagen, Folienkulturen) und extensive verschwinden (Mittelwälder, Streuwiesennutzung). Windkraft- und Photovoltaikanlagen – wichtige neue Einnahmequellen für Landwirte – sind als Strukturelemente innerhalb weniger Jahre vielerorts Bestandteile des Landschaftsbilds geworden (Gasparatos et al. 2017). Der vermeintliche Konflikt mit der Nahrungsmittelproduktion ist derzeit in Mitteleuropa wohl die größte Bedrohung der biologischen Vielfalt. Mit der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) ist die Landwirtschaft politisch überprägt. Die GAP hat die Industrialisierung der Landwirtschaft stark vorangetrieben, mit negativen Konsequenzen für viele Arten des Offenlandes (Leopoldina 2020). Mit der Intensivierung der Landwirtschaft sind auch die Entwicklung und der Einsatz von immer neuen Pflanzenschutzmitteln (z. B. Neonicotinoide) verbunden. Neben ihrer sofortigen lokalen Wirkung entfalten diese ihre ökologische Breitenwirkung erst Jahre später (Woodcock et al. 2017). Das Greening-Programm der GAP hat sich bisher als weitgehend wirkungslos erwiesen (Pe'er et al. 2019), und ob die GAP-Reform von 2020 mit ihren neuen Mechanismen (z. B. Ökoregelungen, Konditionalität) und ihrer teilweisen Revision mit Beginn des Krieges in der Ukraine Verbesserungen bringt, ist ungewiss. Auch die Ziele des Green Deals sind größtenteils nicht flächenscharf, sondern eher generisch formuliert wie: Halbierung chemisch-synthetischer Pestizide, Reduktion von Düngemitteln um 20 % oder Erreichen von 25 % „ökologischen Landbaus. Somit besteht weiterhin viel Selbstverpflichtung an der wichtigsten Schraube für Biodiversitätsschutz auf über 50 % der Landfläche (Grunewald & Bastian 2023a). Ein weiteres Phänomen sich ändernder Rahmenbedingungen ist die Deeutrophierung der Küstengewässer. Durch einen geringeren Nährstoffeintrag der großen Flüsse seit den 1990er-Jahren sinken die Biomasse und Diversität des Zooplanktons (Dippner & Kröncke 2015), mit weitreichenden Konsequenzen für die Nahrungsketten.

In der Gesamtschau gilt: Der rasche Wandel unserer Landschaft erfordert eine stete Überprüfung unseres Wissens und unserer Rezepte für den Biodiversitätsschutz. Den Klimawandel zu stoppen, ist eine Generationenaufgabe. Ziel des *Faktencheck Artenvielfalt* muss daher sein, ein besonderes Augenmerk auf die Möglichkeiten für Biodiversitätsschutz unter veränderten Vorzeichen zu legen. Die zugrunde liegenden Artikel und Berichte hierzu sind naturgemäß wenige Jahre alt. Die Forschung, insbesondere zu den Interaktionen

anderer Treiber von Biodiversitätsveränderungen mit dem Klimawandel, beginnt gerade erst.

1.2.5 Bislang wenig berücksichtigte Aspekte der biologischen Vielfalt

Der Rückgang der biologischen Vielfalt wird vor allem als Problem erkannt, wenn die Vielfalt bekannt ist und geschätzt wird (Bermudez & Lindemann-Matthies 2020). Tatsächlich gibt es aber viele Facetten der biologischen Vielfalt, die bislang kaum untersucht wurden und für die daher weder der aktuelle Zustand noch die Änderungsraten bekannt sind. Dies gilt z. B. für Arten, die in schwer zugänglichen Lebensräumen vorkommen (»hidden biodiversity«, »dark taxa«). Eine durch die Biodiversitätsforschung und den Naturschutz besonders vernachlässigte Sphäre ist der Boden, dem wir im *Faktencheck Artenvielfalt* ein eigenes Kapitel widmen und den wir auch durch Bodenboxen in jedem Lebensraumkapitel in den Fokus rücken. »Hidden biodiversity« findet sich aber auch außerhalb des Bodens, z. B. in Seesedimenten oder in den oberen Baumkronen unserer Wälder. »Versteckt« sind auch Arten, die schwer bestimmbar sind wie Fliegen, Erzwespen, Kleinschmetterlinge, Pilze, Algen oder Prokaryoten wie Bakterien und Archaeen. Das ist relevant, weil sowohl das Monitoring als auch die Schutzmaßnahmen von gut bekannten Organismengruppen dominiert werden: Wildblumenwiesen werden für Bestäuber wie Wildbienen angelegt. Auch innerhalb häufig untersuchter Artengruppen gibt es einzelne Familien und Gattungen, die nur von wenigen Expert:innen bestimmt werden können (z. B. Brombeeren und Habichtskräuter innerhalb der höheren Pflanzen). Wir kennen naturgemäß auch keine Trends von Arten, die noch gar nicht beschrieben wurden. Von den vermuteten 8 Mio. biologischen Arten auf der Erde sind erst 1,6 Mio. beschrieben (IPBES 2019). Berücksichtigt man Mikroorganismen, sind die Schätzungen um Größenordnungen höher. Man geht davon aus, dass weniger als 1% der Bakterien und Archaeen bekannt sind (Overmann et al. 2019). Auch in Deutschland werden noch neue Arten entdeckt (z. B. Disney 2020). Allein 2020 wurden in Deutschland 134 neue mikrobielle Arten neu beschrieben (bacdive.dsmz.de). Die Facette der genetischen Diversität innerhalb von Populationen ist bislang überwiegend in Fallstudien untersucht worden. Systematische Erfassungen der genetischen Vielfalt wild lebender Arten gibt es in Deutschland für einige ökonomisch bedeutsame Baumarten (GenMon-Projekt) und wenige prominente Tierarten wie den Wolf. Dies ist eine entscheidende Wissenslücke, da eine hohe genetische Vielfalt die Überlebenschance von Populationen

angesichts schneller Umweltänderungen typischerweise erhöht und andererseits eine Verminderung der genetischen Vielfalt ein Frühwarnzeichen für den Zusammenbruch von Populationen sein kann (Exposito-Alonso et al. 2022; Hoban et al. 2022).

Biologische Vielfalt und ihre Antwort auf Umweltveränderungen sind stark skalenabhängig (Spake et al. 2022). Die Artenvielfalt kann auf kleinen Probestellen konstant bleiben, während die Diversität in der gesamten Landschaft (Beta- bzw. Gamma-Diversität) sinkt. Dies ist etwa der Fall, wenn Melioration oder Stoffeinträge dazu führen, dass kleinräumige Umweltvariabilität nivelliert wird und sich dadurch Floren und Faunen über Landschaften hinweg angleichen (Homogenisierung). Dieser Prozess kann durch Invasionen verstärkt werden (Nehring 2003; Winter et al. 2009; aber siehe Kühn et al. 2003). In Gewässern konnte gezeigt werden, dass Invasionen von Genotypen die genetische Diversität von Populationen durch Homogenisierung verringern (Baur et al. 2022; Gergs et al. 2015). In terrestrischen Studien gibt es dagegen wenig Belege für genetische Homogenisierung (Kottler et al. 2021). Bei starker Fragmentierung kann dagegen der Fall eintreten, dass die biologische Vielfalt auf lokaler Ebene abnimmt, aber auf der Landschaftsskala zunimmt (Riva & Fahrig 2023). Es gibt in Deutschland bislang kein Monitoring von biologischer Vielfalt, das solche Skaleneffekte systematisch im Design berücksichtigt, obwohl dies durchaus möglich wäre. Eine weitere Facette, für die repräsentative Trends unbekannt sind, ist die funktionelle Diversität der Organismen in ihrer Wirkung in Ökosystemen. Diese Facette ist wichtig, um den Einfluss von Biodiversitätsänderungen auf Ökosystemfunktionen und die Erbringung von Ökosystemleistungen zu ermessen (Grunewald & Bastian 2023b). Einer großen Anzahl von Experimenten, die diese Frage adressieren (Cardinale et al. 2012; Hong et al. 2022; Xu et al. 2020), stehen vergleichsweise wenige Freilandstudien gegenüber (van der Plas 2019), und eine Übertragung experimenteller Ergebnisse auf das Freiland ist problematisch (Hagan, Vanschoenwinkel & Gamfeldt 2021). Systematische nationale Erhebungen von Diversitäts-Funktions-Beziehungen beschränken sich üblicherweise auf opportunistische Analysen von Waldinventuren (Ratcliffe et al. 2016). Neuere Monitoringansätze der biologischen Vielfalt im Wald planen, ausgewählte Ökosystemfunktionen zu erfassen (Initiative NatBioWald, Bolte et al. 2022).

Die genannten Beispiele sollen verdeutlichen, wie weit wir noch davon entfernt sind, die relevanten Facetten der biologischen Vielfalt zu quantifizieren und ihre Entwicklung zu verfolgen. Dass dies aber notwendig ist, be-

tont die UN-Arbeitsgruppe GEO BON (Group on Earth Observation – Biodiversity Observation Networks) mit ihrem Konzept der »Essential Biodiversity Variables« (EBV; Pereira et al. 2013). Dieses Konzept adressiert neben der Artenvielfalt auch die Abundanzen von Organismen, deren genetische und funktionelle Variabilität sowie die Ökosystemstrukturen und -funktionen.

In diesem Sinne ist es das Ziel des *Faktencheck Artenvielfalt*, den Stand des fragmentierten Wissens zu diesen essenziellen Parametern in Deutschland zusammenzutragen. Die Erweiterung unseres Blicks auf eine breitere Palette von EBVs hilft, ein ganzheitliches Verständnis komplexer Biodiversitätsveränderungen zu erlangen und somit evidenzbasierte, wirksamere Handlungsstrategien zur Steigerung der biologischen Vielfalt und ihrer potenziell positiven Wirkung auf Ökosystemleistungen zu entwickeln.

1.2.6 Umsetzungsdefizite verstehen und Transformation beschleunigen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Bedeutung unserer Wissensgrundlage betont – Handlungswissen auf der Skala der Umsetzung, neue Erkenntnisse durch wissenschaftliche Innovation und aktualisiertes Wissen angesichts des raschen Wandels der Rahmenbedingungen.

Zu Beginn der Dekade der Biodiversität (2010–2019) belegten zahlreiche Beispiele, dass es möglich ist, biologische Vielfalt durch nachhaltige Nutzung langfristig zu erhalten (Perrings et al. 2010). Dass die Dekade der Biodiversität nun hinter uns liegt, ohne dass ein einziges der 20 Aichi-Ziele der Vertragsstaatenkonferenz 2010 der CBD in Nagoya erreicht wurde, lässt sich nicht durch einen Mangel an Wissen zu Biodiversitätstrends und deren Ursachen erklären.

Die Gründe liegen tiefer, und sie sind seit längerer Zeit bekannt (z. B. Club of Rome 1972; Meadows et al. 1982). Die Biodiversitätskrise – in Deutschland und weltweit – ist gemeinsam mit dem menschengemachten Klimawandel und der aktuellen Pandemie ein Symptom einer Systemkrise (Settele 2020): Unsere Lebensweise zeichnet sich durch die Verdrängung natürlicher Lebensräume und die Übernutzung von Ressourcen aus. Wir haben es bislang nicht geschafft, eine Wirtschaftsweise zu etablieren, die sowohl das Wohlergehen der gesamten Weltbevölkerung sicherstellt als auch die ökologischen Grenzen des Planeten berücksichtigt. In der Folge schreitet der globale Biodiversitätsverlust trotz vielfältiger internationaler, europäischer und nationaler Bemühungen voran und bleibt eine zentrale globale und nationale Herausforderung (Díaz et al. 2019).

Es bedarf einer Transformation unserer Gesellschaft hin zu einem nachhaltigen Lebensstil (Leclère et al. 2020). Der *Faktencheck Artenvielfalt* möchte einen Beitrag dazu leisten, dies für den Umgang mit der biologischen Vielfalt in Deutschland herauszuarbeiten. Im Kontext des *Faktencheck Artenvielfalt* wird Transformation verstanden als ein dynamischer, strukturell tiefgreifender/substanzieller gesellschaftlicher Wandel, der das Erreichen der international vereinbarten Biodiversitätsziele ermöglicht. Dies erfordert einen systemischen Ansatz, der bei den indirekten Treibern ansetzt. Wir müssen über den Tellerrand der Biodiversitätsdomäne blicken. Neben naheliegenden Forderungen wie der Förderung einer biodiversitätsfreundlichen Landwirtschaft oder der Reduktion der Bodenversiegelung müssen wir breiter gefasste Themenbereiche adressieren, z. B. den Umbau von schädigenden finanziellen Anreizen (biodiversitätsschädigende Direktzahlungen im Agrarbereich, finanzielle Förderung fossiler Energien und Verkehr, (Teil-)Befreiung von Firmen vom Europäischen Emissionshandelssystem), einen naturverträglichen Ausbau erneuerbarer Energien, eine rohstoffeffiziente und regionale Kreislaufwirtschaft, Einführung neuer Finanzprodukte (Green Bonds), eine veränderte Ernährungsweise usw. (Leclère et al. 2020; WBGU 2020; Böhning-Gaese & Bauer [2023]). Wir müssen analysieren, inwieweit multiple Werte und Verantwortungen für biologische Vielfalt in Politiken/Programmen berücksichtigt werden, etwa durch Umweltbilanzierung von Individuen über Firmen hin zu Staaten (Karlsson-Vinkhuyzen et al. 2017; Whitehorn et al. 2019). Dies schließt auch Transparenz in Lieferketten ein (Garrett et al. 2021; Grabs & Carodenuto 2021), denn nur so können wir Verantwortung übernehmen für Biodiversitätsverluste in Gebieten, die für uns produzieren (Marques et al. 2019; Carrasco et al. 2017). Eine solche Transformation gelingt nur, wenn aus dem Nischenthema Biodiversitätsschutz mit Verortung in spezialisierten Ressorts ein gesellschaftliches Querschnittsthema wird, das auch in Wirtschaft und Gesellschaft ausstrahlt. Es braucht ein »Mainstreaming« der Problematik des Biodiversitätsverlustes in der Gesellschaft und der Biodiversitätspolitik quer durch die Sektoren, ähnlich wie es sich derzeit bei der Klimapolitik abzeichnet (Cardona Santos et al. 2023; Perino et al. 2021).

Wenn sich die gesellschaftlichen Akteur:innen einigt und sowohl einen rechtlichen Rahmen als auch Geld bereitgestellt haben bzw. finanzielle Fehlanreize umgebaut haben – EU Green Deal, EU Nature Restoration Law, Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz belegen, dass erste Schritte getan werden (du Toit &

Pettorelli 2019) –, folgt die Umsetzung von Maßnahmen. Auch hier besteht ein Bedarf für Transformation. Mit dem »Mainstreaming« wird der Bedarf an Beteiligung und Teilhabe der Akteur:innen weiter ansteigen. Wird dies erfolgreich organisiert und kompetent von der Wissenschaft begleitet, so kann die Motivation der Menschen vor Ort nicht nur für die Umsetzung, sondern auch für die Erfolgskontrolle steigen (Admiraal et al. 2017; Salvatori et al. 2020). Der *Faktencheck Artenvielfalt* wird dies anhand von Fallbeispielen für Deutschland nachvollziehen und analysieren. Wir verwenden dafür ein abgewandeltes DPSIR-Schema (Drivers, Pressures, States, Impacts, Responses), in dem die Systemzusammenhänge von Prozessen des Umweltwandels abgebildet werden (Abb. 1.1). Bei der Transformation liegt der Fokus auf den Drivers (hier: indirekte gesellschaftliche Treiber) und den Responses (gesellschaftliche Antworten in Form von Instrumenten und Maßnahmen). Ein öffentlicher Diskurs über Ursache-Wirkungs-Ketten kommt einem Mainstreaming der Umsetzung gleich. Dieser Diskurs ist wichtig, damit ein gemeinsames Verständnis, eine »Folklore« der biologischen Vielfalt wächst (siehe Mission B: Mission B – für mehr Biodiversität o. J.). So festigen sich kulturelle Rahmenbedingungen, die Eigenverantwortung ermöglichen.

Es reicht also nicht, die Trends und Mechanismen naturwissenschaftlich zu analysieren. Es gilt, die dahinterliegenden indirekten Treiber (Ökonomie, Rechtsrahmen, Religion, Traditionen) zu verstehen. Basierend auf dieser Kenntnis, gilt es, die Bedingungen für Deutschland herauszuarbeiten, unter denen die gesellschaftliche Bereitschaft wächst, den Schutz der biologischen Vielfalt als essenzielle Zukunftsaufgabe anzunehmen und zu realisieren. Ökonomische und ordnungsrechtliche Instrumente sowie kulturelle Rahmenbedingungen sind wichtig, und diese wiederum sind hochspezifisch für Regionen und Länder. Ein Ziel des *Faktencheck Artenvielfalt* ist es daher, beispielhaft zu ermitteln, wie Prozesse gesellschaftlichen Wandels ablaufen und wo für Deutschland mögliche Hebelpunkte (»leverage points«) für eine schnelle Transformation liegen können. Der *Faktencheck Artenvielfalt* möchte dem gesellschaftlichen Mainstreamingprozess für das Thema biologische Vielfalt eine kompetente Begleitung sein.

1.2.7 Zusammenfassung der Ziele des *Faktencheck Artenvielfalt*

Der *Faktencheck Artenvielfalt* möchte für Deutschland für die Themengebiete (i) Status & Trends der biologischen Vielfalt, (ii) Auswirkungen der Trends auf Ökosystemleistungen, (iii) direkte und (iv) indirekte Treiber

von Biodiversitätsveränderungen, (v) Evaluierung von Instrumenten und Maßnahmen, (vi) Bodenbiodiversität und (vii) gesellschaftliche Transformation zu einer biodiversitätsfördernden Lebensweise Folgendes leisten:

- Grundlagen- und Handlungswissen auf der für die regionale Planung und Umsetzung von Maßnahmen zum Erhalt der biologischen Vielfalt relevanten räumlichen und zeitlichen Skala für Deutschland bereitstellen
- neueste Erkenntnisse der Biodiversitätsforschung zu ökologischen Grundlagen und wissenschaftlichen Durchbrüchen in die Naturschutzpraxis transportieren, aber auch Wissenslücken herausarbeiten
- die Herausforderungen des Klimawandels und anderer Aspekte des schnellen globalen Wandels für Konzepte zur Förderung der biologischen Vielfalt analysieren
- eine umfassendere Strategie zum Schutz von biologischer Vielfalt befördern, in der ein breiteres Spektrum von Facetten der biologischen Vielfalt (Abundanzen, genetische Vielfalt, Ökosystemfunktionen) berücksichtigt wird, und den Boden als vernachlässigte Sphäre in den Fokus rücken
- Wissen synthetisieren, wie Prozesse gesellschaftlichen Wandels ablaufen und wo die Hebelpunkte (»leverage points«) für eine schnelle Transformation liegen, um die international vereinbarten Biodiversitätsziele in Deutschland in der vorgesehenen Frist zu erreichen
- dem gesellschaftlichen Mainstreamingprozess für das Thema biologische Vielfalt eine kompetente Begleitung sein.

1.3 Konzeptionelle Grundlagen

1.3.1 Themeneingrenzung und Definitionen

1.3.1.1 Artenvielfalt – Biodiversität

Auch wenn der *Faktencheck Artenvielfalt* den Erhalt der Artenvielfalt in den Mittelpunkt stellt, berücksichtigt er sämtliche Facetten der biologischen Vielfalt gemäß der CBD-Definition. Dies umfasst zum einen die genetische und phänotypische Vielfalt innerhalb von Arten und von Individuen innerhalb von Populationen von Arten als wesentliche Triebkraft der Evolution. Zum anderen umfasst es die Vielfalt der Arten nicht nur in taxonomischer, sondern auch in funktioneller Hinsicht. Neben Maßzahlen für die Vielfalt werden auch solche für die Abundanz, Abundanzverteilungen und Vitalität berücksichtigt. Berücksichtigt wird auch die biologische Vielfalt auf höherer Aggregationsebene (Gemeinschaften, Interaktionsnetzwerke, Ökosysteme, Diversitäten

auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen), d. h. auf den Skalen, auf denen normalerweise Landnutzungs- und Planungsentscheidungen getroffen werden. Der Bezug zwischen rein naturwissenschaftlichen Maßzahlen und pragmatisch bzw. normativ definierten Maßzahlen (Charakter-, Flaggschiff-, Indikator-, Leit-, Schlüssel-, Schirm-, Zielarten, Neobiota) wird diskutiert. Neben der Diversität wird auch ein starker Fokus auf die Änderungen in der taxonomischen oder funktionellen Zusammensetzung von Gemeinschaften gelegt und hier insbesondere Verschiebungen im Gefüge durch Land-/Meeresnutzung, Verschmutzung, Klimawandel und biologische Invasionen gelegt.

Die Facetten der Biodiversität wurden weiterentwickelt, die Facetten selbst sind Sache der Evolution und umfassen nicht nur den Schutz der biologischen Vielfalt, sondern auch deren nachhaltige Nutzung und eine gerechte Verteilung ihrer ökonomischen Nutzbarkeit (Convention on Biological Diversity – CBD 1992). Hier stehen primär die durch die biologische Vielfalt ermöglichten Leistungen von Ökosystemen im Fokus (Myers 1996), da diese für das menschliche Leben essenziell sind. Der *Faktencheck Artenvielfalt* orientiert sich an der CICES-Nomenklatur (<https://cices.eu/>). Zentrale Leistungen umfassen neben der Bereitstellung von Nahrung und Rohstoffen (Versorgung mit sauberem Wasser, Biomasseproduktion, Bestäubung) auch die Regulation des Gas- und Wasserhaushalts, Steuerung des Klimas, Bodenbildung, Erosionskontrolle, Nährstoffzyklen und kulturelle Leistungen wie Erholung, Heimatgefühl und Wissensgewinn. Funktionelle Gruppen bzw. funktionelle Diversität werden genutzt, um die Vielfalt an Funktionen, welche Arten in Ökosystemen ausüben, zu beschreiben. Diese sind relevant für Ökosystemprozesse und -leistungen sowie Dynamik und Stabilität von Ökosystemen.

1.3.1.2 Räumlicher und zeitlicher Bezug

Raumbezug: Das Zielgebiet des *Faktencheck Artenvielfalt* ist Deutschland. Informationen aus anderen Regionen werden verwendet, wenn die Ergebnisse, Phänomene, Prozesse unmittelbar für Deutschland relevant und für eine vergleichende Einordnung notwendig sind. Dies ist z. B. für die angrenzenden mitteleuropäischen Länder der Fall. Insbesondere für wichtige Themen, für die große Kenntnislücken bestehen, wird auch exemplarisch auf Studien temperater Biome außerhalb Europas oder auch angrenzender Biome (boreal, mediterran) zurückgegriffen. In jedem Fall wird der räumliche Bezug eindeutig ausgewiesen. Da Deutschland erhebliche Gradienten in der naturräumlichen Ausstattung und

der Landnutzung aufweist, die einen großen Einfluss auf alle im *Faktencheck Artenvielfalt* erfassten Muster und Prozesse der biologischen Vielfalt haben können, wird angestrebt, Aussagen spezifisch für naturräumliche Großregionen zu differenzieren. Wir orientieren uns hierfür an der vom BfN vorgeschlagenen Gliederung (Ssymank 1994).

Die **zeitlichen Bezüge** sind stark von der Datenverfügbarkeit geprägt. Für die meisten Artengruppen oder Biodiversitätsmaßzahlen liegen keine systematisch erfassten langfristigen Beobachtungsdaten vor. Daher ist es im Rahmen des *Faktencheck Artenvielfalt* kaum möglich, die Zeitbezüge streng zu standardisieren. Als Anhaltspunkt bezeichnen wir Trends seit 1990 als »Kurzzeittrends« und seit 1950 als »Langzeittrends«. Abweichungen in den einzelnen Kapiteln sind möglich, wenn die Datenverfügbarkeit es ermöglicht oder Eigenheiten des Lebensraumtyps dies erfordern (z. B. längere Betrachtungszeiträume bei Wäldern). Bei Prognosen orientieren wir uns an Zeitschritten, die durch politische Ziele definiert werden, z. B. CBD-Post-2020-Ziele bis 2030 bzw. 2050 oder UN-SDG-Ziele bis 2030.

1.3.2 Struktur des Berichts

Der Bericht orientiert sich an der Grundstruktur, aber nicht an der exakten Nomenklatur des DPSIR-Schemas (Abb. 1.1; Glossar). Dieses ordnet die Wirkzusammenhänge von Umweltveränderungen fünf Komponenten zu. Die »Drivers« entsprechen den gesellschaftlichen Treibern (Ökonomie, Wertvorstellungen, Krisen usw.), die sich in der Natur in »Pressures« manifestieren, also zu direkten Treibern werden (Landnutzung, Jagd, N-Immissionen usw.), die wiederum einen Einfluss auf den Zustand (»State«) der biologischen Vielfalt und deren Änderung haben (Status & Trends). Status und Trends der biologischen Vielfalt haben Auswirkungen (»Impact«) auf uns Menschen über die Bereitstellung von Ökosystemleistungen. Sind diese Auswirkungen negativ, kann es eine korrigierende Antwort (»Responses«) der Gesellschaft geben, indem sie z. B. Politikinstrumente entwickelt und konkrete Maßnahmen veranlasst, um die Situation zu verbessern (Instrumente & Maßnahmen). Der *Faktencheck Artenvielfalt* sieht Transformation als eine zusätzliche Komponente, die all die Prozesse umfasst, die die Bereitschaft der Gesellschaft steuern, Antworten zu entwickeln. Diese sechs Komponenten finden sich in den Themenbereichen des *Faktencheck Artenvielfalt* wieder (s. u.).

Ein wesentliches Merkmal des *Faktencheck Artenvielfalt* ist seine Matrixstruktur. Wir adressieren Fragen zur biologischen Vielfalt in Deutschland für die Ökosys-

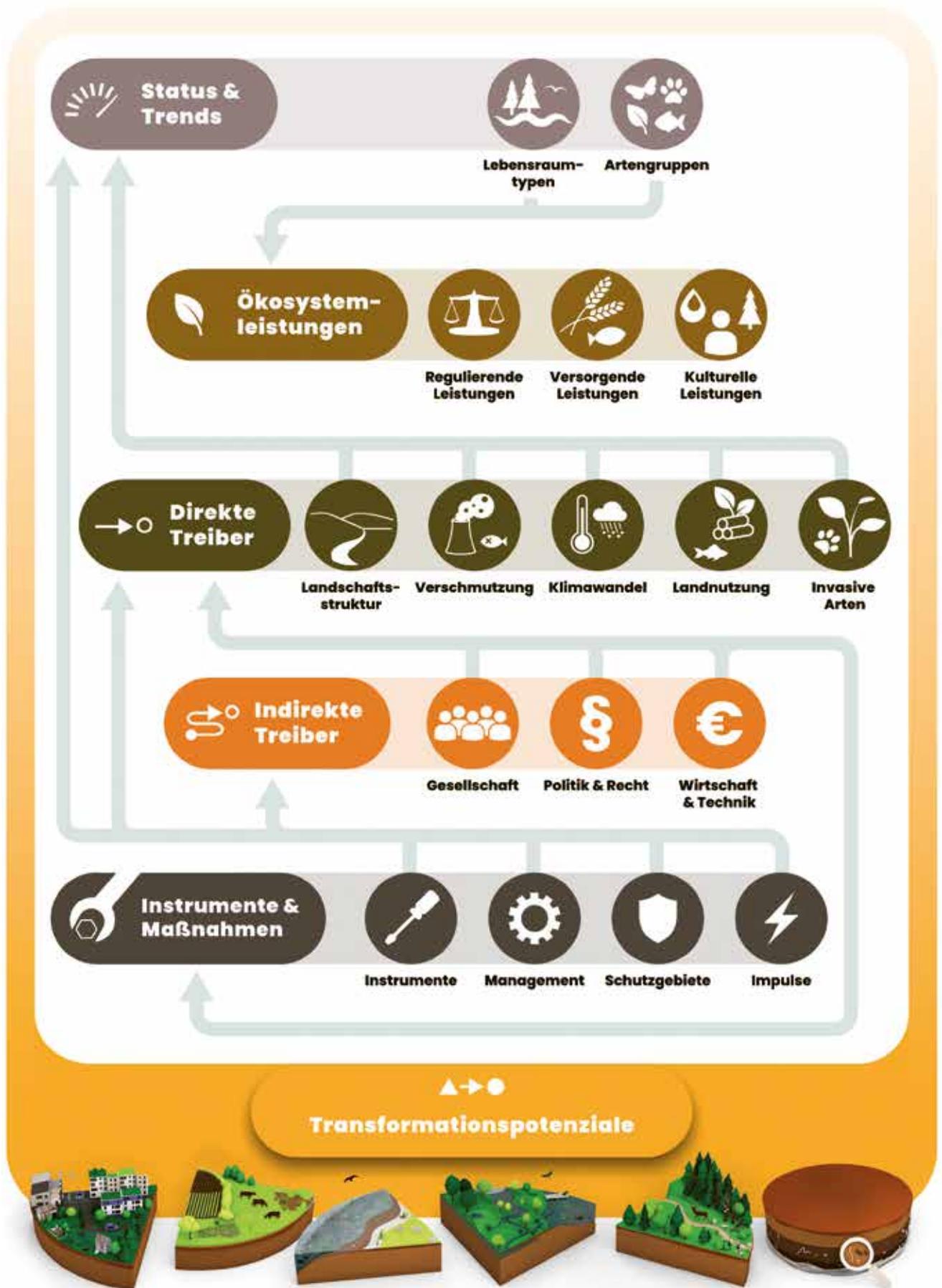


Abbildung 1.1: Die Themenbereiche des Faktencheck Artenvielfalt stellen die Wirkungszusammenhänge von gesellschaftlichen Prozessen (Transformationspotenziale, indirekte Treiber, Instrumente und Maßnahmen) und Umweltänderungen (direkte Treiber) auf die biologische Vielfalt (Status und Trends) und Ökosystemleistungen dar (angelehnt an DPSIR – Drivers, Pressures, States, Impacts, Responses).

teme von fünf wichtigen **Lebensräumen** (Abb.1.2): (1) **Agrar- und Offenlandschaften inklusive Hochmooren** (Kap. 3), **Wälder** (Kap. 4), **Binnengewässer und Auen inklusive Niedermooren** (Kap. 5), **Küsten und Küstengewässer** (Kap. 6) und **Urbane Räume** (Kap. 7) sowie weitere, etwa alpine Lebensräume, die im Kapitel 3 behandelt werden oder die subalpinen Wälder, die in Kapitel 4 zu finden sind. Die **Lebensräume des Faktencheck Artenvielfalt** sind angelehnt an die übergeordneten Einheiten der FFH-Lebensraumtypen und entsprechen in etwa den Ökosystemklassifikationen nach DESTATIS (o. J.) sowie Grunewald et al. (2020) bzw. sind leicht in diese überführbar. Bei einer Untergliederung der Lebensraumtypen innerhalb der entsprechenden Kapitel erfolgt diese entweder anhand der Unterkategorien der FFH-Lebensraumtypen oder gemäß der Klassifikation, der die Biotoptypenkartierung des BfN zugrunde liegt. Eine Zuordnung von Sonderstandorten findet innerhalb der Lebensraum-Kapitel statt.

Für jeden dieser Großlebensräume werden neben seiner generellen Charakterisierung und der Herausstellung der Bedeutung für die biologische Vielfalt sechs Fragestellungen bearbeitet, die auch schon oben unter den Zielen genannt wurden: (1) Wie ist der aktuelle Sta-

tus der biologischen Vielfalt, und welche Trends sehen wir? (2) Was ist über die Konsequenzen der Änderungen der biologischen Vielfalt für Ökosystemfunktionen und -leistungen bekannt? (3) Welche direkten Treiber verursachen Änderungen in der biologischen Vielfalt? (4) Auf welche indirekten Treiber können diese Zusammenhänge zurückgeführt werden? (5) Was sind Erfolgsfaktoren und Hindernisse von Instrumenten und Maßnahmen (in Bezug auf direkte oder indirekte Treiber) zu deren Förderung der biologischen Vielfalt? (6) Welche Kenntnisse lassen sich daraus ableiten für einen Umbau (Transformation) unserer Gesellschaft hin zu einer nachhaltigen und biodiversitätsfördernden Handlungsweise?

Die oben aufgeführten sechs Fragen repräsentieren die **Themenbereiche** (Abb.1.1), die für jeden der Lebensräume (Abb.1.2) in gleicher Weise, d. h. mit standardisierten Methoden und harmonisierter Begrifflichkeit, beantwortet werden. Dadurch lassen sich in einer Synthese (Kap. 11) Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Lebensräumen deutlich herausarbeiten und für differenzierte Empfehlungen für die Umsetzung und das Schließen von Wissenslücken nutzen. Das entstehende Gesamtbild der Problematik und der Lösungs-



Abbildung 1.2: Lebensräume des Faktencheck Artenvielfalt. Für jeden der Lebensräume werden die in Abbildung 1.1 dargestellten Themen bearbeitet.

möglichkeiten soll eine Basis für eine gesellschaftliche Transformation (Kap.10) liefern. Als weiteres Querschnittsthema wird eine detaillierte Betrachtung der bislang vernachlässigten Bodenbiodiversität (Kap. 8) erarbeitet.

Im Folgenden werden Ansätze und Festlegungen zu den einzelnen Fragen erläutert:

Status und Trends: Hier wird für die relevanten und typischerweise gut erfassten Artengruppen der Wirbeltiere (Säugetiere, Vögel, Amphibien und Reptilien, Fische), gut erfassten Insektengruppen, Phytoplankton, Makrozoobenthos, marinen Wirbellosen, Pflanzen (Gefäßpflanzen, Moosen und anderen), Pilzen und Flechten, Prokaryoten herausgestellt, für welche Arten und Gruppen dieser Lebensraum von besonderer Bedeutung ist. Für diese Gruppen werden auch der aktuelle Status und die bekannten Trends berichtet. Dasselbe gilt, soweit bekannt, für wichtige Biodiversitätsfacetten (inklusive struktureller, funktioneller und genetischer Diversität). Es wird auch explizit erwähnt, zu welchen Artengruppen oder Facetten keine oder qualitativ unzureichende Informationen vorliegen. Datengrundlagen sind typischerweise Statusänderungen in Roten Listen, Ergebnisse von Monitoringstudien und Ergebnisse von anderen wissenschaftlichen Forschungsarbeiten. Ein besonderes Augenmerk wird auf neuere Erkenntnisse von Datensynthesen und die Anwendung neuer Methoden zum Umgang mit heterogenen Datenquellen (Kap.1.2.2) gelegt. Die Ergebnisse dieses Abschnitts dienen als Grundlage für die Diskussion der Ökosystemkonsequenzen sowie der Kausalanalysen in Bezug auf direkte und indirekte Treiber.

Auswirkungen von Biodiversitätsänderungen auf Ökosystemleistungen: In diesem Abschnitt wird für jeden Lebensraum ein Überblick über die Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Biodiversitätsänderungen und Konsequenzen für Ökosystemfunktionen und Ökosystemleistungen für uns Menschen gegeben. Neben Änderungen der Artenvielfalt wird auch auf die Änderung in der Zusammensetzung insbesondere infolge von Landnutzung, Klimawandel und biologischen Invasionen eingegangen. Ein starker Fokus wird auf Studien gelegt, die auf großen räumlich-zeitlichen Skalen durchgeführt wurden und die damit eine hohe Relevanz für die Naturschutzplanung und Landnutzung haben. Im Rahmen dieses Kapitels wird auch untersucht, welchen Einfluss gezielte Maßnahmen zur Förderung von biologischer Vielfalt auf Ökosystemfunktionen und -leistungen haben und inwieweit Synergien

bzw. Trade-offs vorliegen. Der *Faktencheck Artenvielfalt* verwendet die Klassifizierung der Ökosystemleistungen (ÖSL) nach einer deutschen Übersetzung der internationalen Klassifizierung von Ökosystemleistungen CICES (CICES V5.1; Anhang A2.4). In dieser Klassifizierung werden ÖSL jeweils Regulationsleistungen, Versorgungsleistungen oder kulturelle Leistungen zugeordnet und zudem in biotisch und abiotisch aufgeteilt. Für den *Faktencheck Artenvielfalt* sind in erster Linie die biotischen ÖSL relevant, die abiotischen können jedoch eine Rolle in der Frage nach den Synergien und Trade-offs spielen. Wo nötig, wird Bezug genommen auf das erweiterte Konzept »Nature's Contribution to People – NCP« (»Beiträge der Natur zum menschlichen Wohlergehen«), das im internationalen Kontext häufiger im Gebrauch ist. Es werden auch Disservices, also negative Auswirkungen der biologischen Vielfalt auf uns Menschen, berücksichtigt, wenn sie für den jeweiligen Lebensraum relevant sind.

Direkte Treiber von Änderungen der biologischen Vielfalt: Bezüglich der Definition von direkten Treibern halten wir uns an die Klassifikation des IPBES Global Assessments, das folgende Großgruppen benennt/unterteilt: (i) Veränderung der Struktur der Landschaft, (ii) Veränderte Land-/Meeresnutzung und direkte Ressourcenentnahme, (iii) Verschmutzung, (iv) Klimawandel, (v) Invasive gebietsfremde Arten, (vi) Andere direkte Treiber und Treiberinteraktionen. Für alle diese Treiber werden Intensität und Trends beleuchtet. In jedem Lebensraumkapitel liegt der Schwerpunkt auf denjenigen direkten Treibern, die entweder einen nachweisbaren oder einen sehr wahrscheinlichen Effekt auf die Facetten der biologischen Vielfalt haben. Die Schilderung erfolgt anhand der genannten taxonomischen Gruppen und Biodiversitätsfacetten. Da es nur wenige repräsentative und valide Kausalanalysen gibt, werden hier auch Daten aus vergleichbaren Nachbarregionen verwendet.

Indirekte Treiber von Änderungen der biologischen Vielfalt: Auch bei den indirekten Treibern folgen wir IPBES und teilen diese in drei Großgruppen ein: (i) Politische und rechtliche Treiber, (ii) Wirtschaftliche und technologische Treiber, (iii) Gesellschaftliche Treiber, inklusive kultureller Prägungen und gesellschaftlicher Narrative. Für diese drei Großgruppen und deren Wechselwirkungen untereinander werden hierarchische Bezüge zu den direkten Treibern hergestellt, da indirekte Treiber alleine keine Wirkung auf die biologische Vielfalt entfalten können. Auch hier gilt es, Trends in der Wirkungsstärke indirekter Treiber einzuschätzen. In-

direkte Treiber können sowohl hemmende als auch begünstigende Wirkung auf die biologische Vielfalt haben. Letzteres ist der Fall, wenn ein Instrument angewendet wird, um biologische Vielfalt zu fördern. Im Rahmen des *Faktencheck Artenvielfalt* werden solche begünstigenden und hemmenden Faktoren für die biologische Vielfalt sowie die Relevanz der indirekten Treiber in den verschiedenen Lebensraumkapiteln erörtert. Zudem werden Ergebnisse einer Befragung aller Bearbeitenden des *Faktencheck Artenvielfalt* vorgestellt, welche zum Ziel hat, die drei Großgruppen von indirekten Treibern übergreifend einzuordnen, um Erkenntnisse über Zielkonflikte und Barrieren gewinnbringend für die Transformation zu nutzen.

Evaluierung von Instrumenten und Maßnahmen: Ziel dieses Abschnitts ist eine Evaluierung der Wirksamkeit von Instrumenten und Maßnahmen zur Förderung der biologischen Vielfalt. Diese Analyse soll die wichtigsten Stellschrauben für positive Effekte auf die biologische Vielfalt herausarbeiten und damit die Schwerpunktsetzung bei zukünftigen Programmen erleichtern. Der *Faktencheck Artenvielfalt* unterscheidet bei den Instrumenten zwischen ordnungsrechtlichen (Gesetze, Richtlinien), finanziellen, anreizbasierten (Entlohnung von Maßnahmen oder Ergebnissen in der Fläche) und informationellen (Bildungs-, Beratungsangeboten). Unter Maßnahmen zum Erhalt und zur Förderung der biologischen Vielfalt verstehen wir die konkrete Umsetzung in der Fläche. Wir unterscheiden drei Typen von Maßnahmen: (i) Flächenhafte Schutzmaßnahmen, (ii) Managementmaßnahmen (Veränderung in der Flächennutzung oder Bewirtschaftungsweise), (iii) Impulsmaßnahmen (i. d. R. nur einmalige Eingriffe/Installationen von Strukturen). Um die Wirksamkeit von Schutzgebieten zu evaluieren, haben wir im *Faktencheck Artenvielfalt* exemplarisch 20 % aller FFH-Gebiete in Bezug auf die Bewertung der dort vorkommenden Lebensraumtypen und Artengruppen ausgewertet und dabei die Rolle der angegebenen direkten Treiber und ihre Wirkungsstärke miterfasst. Da für den Erfolg von Management- und Impulsmaßnahmen nur eine geringe Datengrundlage zur Verfügung stand, haben wir diese im Rahmen einer Umfrage innerhalb des *Faktencheck Artenvielfalt* evaluieren lassen. Dabei wurde lebensraumspezifisch bewertet, welche Bedeutung die verschiedenen Maßnahmen für den Schutz der biologischen Vielfalt haben und mit welcher Häufigkeit und Effektivität sie umgesetzt werden. Gleichzeitig wurde die Relevanz von v. a. ordnungsrechtlichen Instrumenten für den Schutz und die Förderung verschiedener Artengruppen erfragt.

Handlungsbedarfe und Handlungsoptionen: Dieser Abschnitt stellt für jeden Lebensraum das Fazit aus den vorangegangenen Abschnitten dar. Er fokussiert einerseits auf bestehende Wissenslücken zu allen Aspekten des Kapitels und andererseits auf die Möglichkeiten, die sich aus der Instrumenten- und Maßnahmenanalyse ergeben. Dieses Kapitel dient als Ansatzpunkt für das Transformationskapitel und die vergleichende Synthese.

Thematische Kapitel: Zusätzlich zu den Lebensraumkapiteln hebt der *Faktencheck Artenvielfalt* zuvor unterrepräsentierte Themenbereiche hervor. Daher gibt es ein separates Kapitel zum Thema **Bodenbiodiversität** (Kap. 8), das zusätzlich zu den Zuarbeiten zu den Lebensräumen die besondere Rolle der Bodenbiodiversität hervorhebt. Diese ist trotz ihrer immens wichtigen Rolle für die Funktion und Stabilität von Ökosystemen vergleichsweise wenig erforscht. Die politisch-rechtlichen, wirtschaftlich-technologischen und gesellschaftlichen Faktoren, welche die biologische Vielfalt beeinflussen, werden in einem eigenen Kapitel zum Thema **indirekte Treiber** (Kap. 9) betrachtet. Ein weiteres Querschnittsthema, das in Publikationen zum Thema der biologischen Vielfalt bislang kaum bearbeitet wurde, sind die gesellschaftliche Transformation und die Potenziale für »leveragepoints« (Hebelpunkte) zur biodiversitätsfördernden Bewirtschaftung unserer Landschaft. Da dies einen ganzheitlichen Blick auf Prozesse erfordert, die in aller Regel lebensraumübergreifend entstehen und wirken, gibt es ein separates Kapitel zum Thema **Transformationspotenziale** (Kap. 10). Hier geht es darum auszuloten, welche Möglichkeiten mithilfe eines Zusammenspiels von politischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Instrumenten und Prozessen bestehen, dominante Strukturen, etablierte Praktiken zu hinterfragen, zu verändern, zu delegitimieren und/oder zu ersetzen (Wittmayer et al. 2015, Wunder et al. 2019) oder neu einzurichten mit dem Ziel, positive Wirkungen im Sinne international vereinbarter Biodiversitätsziele zu erreichen. Entsprechende Handlungsoptionen sollen aufzeigen, wie Transformationsprozesse angestoßen oder weiter gestaltet werden können.

1.3.3 Realisierung

Die Realisierung des *Faktencheck Artenvielfalt* erfolgte seit 2021 in einem Zusammenspiel aus acht Kapitelgruppen und der Projektleitung, die aus den vier Seniorherausgeber:innen, vier Projektwissenschaftlerinnen und einer Assistentin bestand. Das gesamte Team des *Faktencheck Artenvielfalt* (siehe auch www.feda.bio/de/faktencheck-artenvielfalt/) war in die Forschungsiniti-

ative zum Erhalt der Artenvielfalt (FEa) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) eingebunden und wurde von der FEa Koordinationsstelle unterstützt.

Jeder Lebensraum sowie die Themenbereiche »Bodenbiodiversität«, »Indirekte Treiber« und »Transformationspotenziale« wurden durch eine Kapitelgruppe aus Expert:innen der Naturwissenschaften, Sozialwissenschaften und der Praxis erarbeitet. Diese wurden von 2 bis 5 koordinierenden Leitautor:innen gesteuert, die bis zu 15 weitere Leitautor:innen für die Ausarbeitung der Kapitel gewonnen haben. Jede Kapitelgruppe wurde von einer/m Projektwissenschaftler:in unterstützt. Insgesamt haben 50 koordinierende Leitautor:innen, 96 Leitautor:innen und ca. 60 beitragende Autor:innen an der Erstellung des *Faktencheck Artenvielfalt* mitgewirkt.

Die Projektleitung unterstützte die acht Kapitelgruppen und sorgte für die inhaltliche Integration der Ergebnisse. Sie organisierte auch die drei Reviewprozesse (Abb.1.3) durch Expert:innen, Behörden und Stake-

holder. Ein erster Rohentwurf (0. Entwurf) wurde am 31.01.2022 fertiggestellt und einem internen Review unterzogen. Der 1. Entwurf wurde am 14.11.2022 in eine externe Begutachtung an 59 externen Expert:innen gegeben, die insgesamt 3.113 Kommentare übermittelten. Der 2. Entwurf (präfinale Version) wurde am 01.09.2023 in das sogenannte Behördenreview gegeben, an dem sich 28 externe Institutionen (Behörden, Verbände, Ressortforschungseinrichtungen) sowie weitere 27 externe Expert:innen beteiligten, die 2.183 weitere Kommentare abgaben. Jeder Kommentar wurde einzeln beantwortet und in einer Datenbank erfasst.

Weitere Aufgaben der Projektleitung umfassten die externe Kommunikation (Ministerien, Behörden, Verbände, Öffentlichkeit). Die Projektleitung koordinierte die Erstellung des finalen Berichts, verfasste die einleitenden Kapitel und eine themenübergreifende Synthese. Zudem fungiert sie als herausgebende Instanz des Berichts und koordinierte die Erstellung einer Zusammenfassung für Entscheidungsträger:innen.

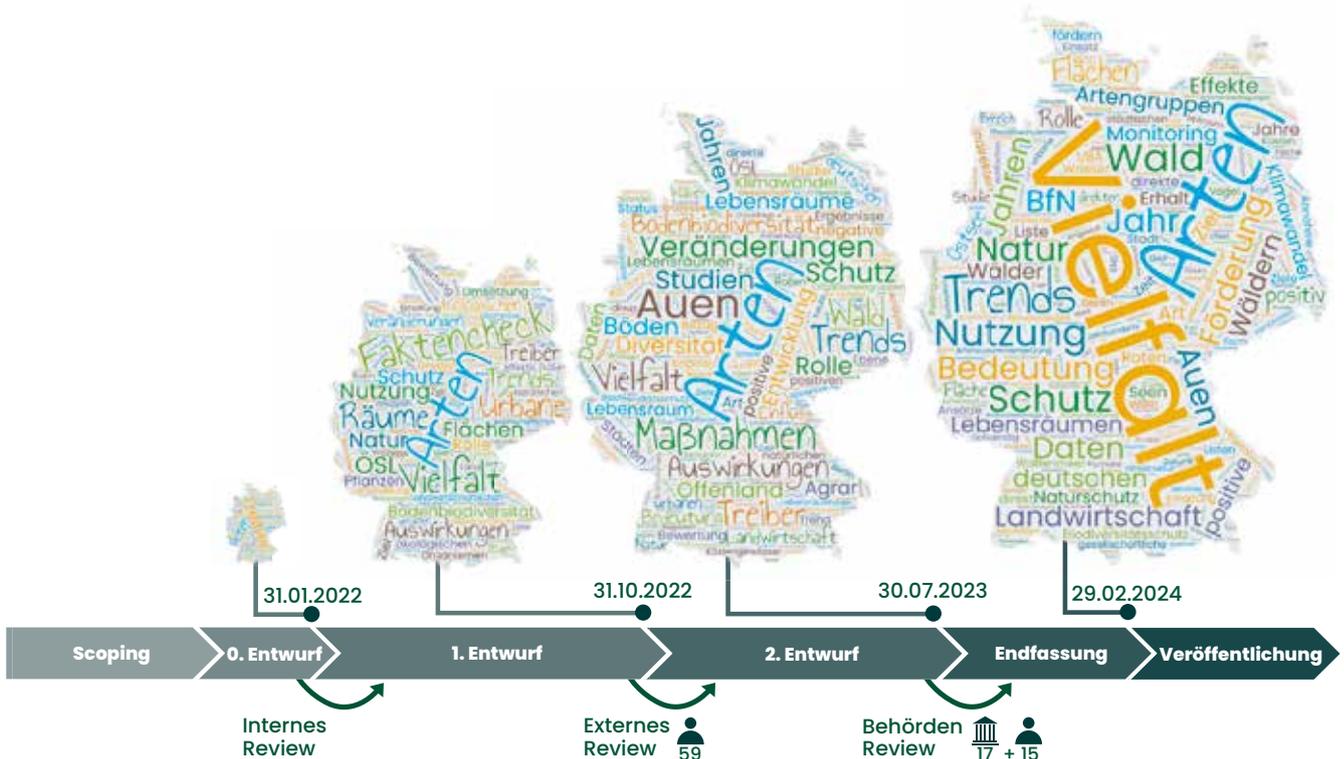


Abbildung 1.3: Zeitstrahl der Realisierung des *Faktencheck Artenvielfalt* als Projekt der Forschungsinitiative zum Erhalt der Artenvielfalt (FEa).

Literaturverzeichnis

- Admiraal J. F., Van Den Born R. J. G., Beringer A., Bonaiuto F., Cicero L., Hiedanpää J., Knights P., Knippenberg L. W. J., Molinario E., Musters C. J. M., Naukkarinen O., Polajnar K., Popa F., Smrekar A., Soinen T. et al. (2017): Motivations for committed nature conservation action in Europe. *Environmental Conservation* 44 (2): 148–157. DOI: 10.1017/S037689291700008X
- Adrian R., Hessen D. O., Blenckner T., Hillebrand H., Hilt S., Jeppesen E., Livingstone D. M. & Trolle D. (2016): Environmental Impacts—Lake Ecosystems. In: M. Quante & F. Colijn (Hrsg.): *North Sea Region Climate Change Assessment. Regional Climate Studies*. Springer International Publishing, Cham: 315–340.
- Alleaume S., Dusseux P., Thierion V., Commagnac L., Laventure S., Lang M., Féret J.-B., Hubert-Moy L. & Luque S. (2018): A generic remote sensing approach to derive operational essential biodiversity variables (EBVs) for conservation planning. *Methods in Ecology and Evolution* 9 (8): 1822–1836. DOI: 10.1111/2041-210X.13033
- Bae S., Levick S. R., Heidrich L., Magdon P., Leutner B. F., Wöllauer S., Serebryanyk A., Nauss T., Krzystek P., Gossner M. M., Schall P., Heibl C., Bässler C., Doerfler I., Schulze E.-D. et al. (2019): Radar vision in the mapping of forest biodiversity from space. *Nature Communications* 10 (1): 4757. DOI: 10.1038/s41467-019-12737-x
- Baur B., Steinmann P., Landert P., Gilgado J. D. & Rusterholz H.-P. (2022): Invading non-native populations replace native ones of the endangered freshwater snail *Theodoxus fluviatilis* in the river Rhine. *European Journal of Environmental Sciences* 12 (1): 5–15. DOI: 10.14712/23361964.2022.1
- Beng K. C. & Corlett R. T. (2020): Applications of environmental DNA (eDNA) in ecology and conservation: opportunities, challenges and prospects. *Biodiversity and Conservation* 29 (7): 2089–2121. DOI: 10.1007/s10531-020-01980-0
- Bermudez G. M. A. & Lindemann-Matthies P. (2020): »What Matters Is Species Richness«—High School Students’ Understanding of the Components of Biodiversity. *Research in Science Education* 50 (6): 2159–2187. DOI: 10.1007/s11165-018-9767-y
- BfN – Bundesamt für Naturschutz & Netzwerk Phytodiversität Deutschland (2016): *FlorKart – FlorenKartierung Gefaesspflanzen*.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz & Nehring S. (o. J.): *Neobiota: Startseite*. <https://neobiota.bfn.de/> (aufgerufen am 31.03.2022)
- Binot-Hafke M., Gruttke H., Ludwig G. & Riecken U. (Hrsg.) (2000): *Bundesweite Rote Listen. Bilanzen, Konsequenzen, Perspektiven*. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg. 255 S.
- Bjerge K., Mann H. M. R. & Høye T. T. (2022): Real-time insect tracking and monitoring with computer vision and deep learning. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 8 (3): 315–327. DOI: 10.1002/rse2.245
- Blowes S. A., Supp S. R., Antão L. H., Bates A., Bruelheide H., Chase J. M., Moyes F., Magurran A., McGill B., Myers-Smith I. H., Winter M., Bjorkman A. D., Bowler D. E., Byrnes J. E. K., Gonzalez A. et al. (2019): The geography of biodiversity change in marine and terrestrial assemblages. *Science* 366 (6463): 339–345. DOI: 10.1126/science.aaw1620
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2007): *Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin. 180 S.
- Böhning-Gaese, K. & Bauer, F. (2023) *Vom Verschwinden der Arten. Der Kampf um die Zukunft der Menschheit*. Klett-Cotta, Stuttgart. 253 S.
- Bolte A., Ammer C., Kleinschmit J., Kroihner F., Krüger I., Meyer P., Michler B., Müller-Kroehling S., Sanders T. & Sukopp U. (2022): Nationales Biodiversitätsmonitoring im Wald. *Natur und Landschaft* 97 (08): 398–401. DOI: 10.19217/NuL2022-08-04
- Bowler D. E., Eichenberg D., Conze K., Suhling F., Baumann K., Benken T., Bönsel A., Bittner T., Drews A., Günther A., Isaac N. J. B., Petzold F., Seyring M., Spengler T., Trockur B. et al. (2021): Winners and losers over 35 years of dragonfly and damselfly distributional change in Germany M. Franzén (Hrsg.): *Diversity and Distributions* 27 (8): 1353–1366. DOI: 10.1111/ddi.13274
- Bruehlheide H., Dengler J., Jiménez-Alfaro B., Purschke O., Hennekens S. M., Chytrý M., Pillar V. D., Jansen F., Kattge J., Sandel B., Aubin I., Biurrun I., Field R., Haider S., Jandt U. et al. (2019): sPlot – A new tool for global vegetation analyses. *Journal of Vegetation Science* 30 (2): 161–186. DOI: 10.1111/jvs.12710
- Brydegaard M. & Jansson S. (2019): Advances in entomological laser radar. *The Journal of Engineering* 2019 (21): 7542–7545. DOI: 10.1049/joe.2019.0598
- Bundesregierung (2018): *Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land – Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD*. Berlin. 175 S.
- Bundesregierung (2021): *Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit – Koalitionsvertrag zwischen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP*. Berlin. 178 S.
- Burkhardt U., Russell D. J., Decker P., Döhler M., Höfer H., Lesch S., Rick S., Römbke J., Trog C., Vorwald J., Wurst E. & Xylander W. E. R. (2014): The Edaphobase project of GBIF-Germany—A new online soil-zoological data warehouse. *Applied Soil Ecology* 83: 3–12. DOI: 10.1016/j.apsoil.2014.03.021
- Burns F., Eaton M. A., Burfield I. J., Klvaňová A., Šilarová E., Staneva A. & Gregory R. D. (2021): Abundance decline in the avifauna of the European Union reveals cross-continental similarities in biodiversity change. *Ecology and Evolution* 11 (23): 16647–16660. DOI: 10.1002/ece3.8282
- Cardinale B. J., Duffy J. E., Gonzalez A., Hooper D. U., Perrings C., Venail P., Narwani A., Mace G. M., Tilman D., Wardle D. A., Kinzig A. P., Daily G. C., Loreau M., Grace

- J. B., Larigauderie A. et al. (2012): Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature* 486 (7401): 59–67. DOI: 10.1038/nature11148
- Cardona Santos E. M., Kinniburgh F., Schmid S., Büttner N., Pröbstl F., Liswanti N., Komarudin H., Borasino E., Ntawuhiganayo E. B. & Zinngrebe Y. (2023): Mainstreaming revisited: Experiences from eight countries on the role of National Biodiversity Strategies in practice. *Earth System Governance* 16: 100177. DOI: 10.1016/j.esg.2023.100177
- Carrasco L. R., Chan J., McGrath F. L. & Nghiem L. T. P. (2017): Biodiversity conservation in a telecoupled world. *Ecology and Society* 22 (3): art24. DOI: 10.5751/ES-09448-220324
- Cavender-Bares J., Gamon J. A. & Townsend P. A. (Hrsg.) (2020): Remote sensing of plant biodiversity. 1. Aufl. Springer. Cham. 581 S.
- CBD – Convention on Biological Diversity (1992): 1992 Convention on Biological Diversity.
- Ceballos G., Ehrlich P. R., Barnosky A. D., García A., Pringle R. M. & Palmer T. M. (2015): Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances* 1 (5): e1400253. DOI: 10.1126/sciadv.1400253
- Chase J. M., Jeliaskov A., Ladouceur E. & Viana D. S. (2020): Biodiversity conservation through the lens of metacommunity ecology. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1469 (1): 86–104. DOI: 10.1111/nyas.14378
- DDA – Dachverband Deutscher Avifaunisten (Hrsg.); Gedeon K., Grüneberg C., Mitschke A., Sudfeldt C., Eikhorst W., Fischer S., Flade M., Frick S., Geiersberger I., Koop B., Kramer M., Krüger T., Roth N., Ryslavý T., Stübing S. et al. (2014): Atlas Deutscher Brutvogelarten – Atlas of German Breeding Birds. Stiftung Vogelmonitoring Deutschland (Hrsg.): Münster.
- DDA – Dachverband Deutscher Avifaunisten (Hrsg.); Gerlach B., Dröschmeister R., Langgemach T., Borkenhagen K., Busch M., Hauswirth M., Heinicke T., Kamp J., Karthäuser J., König C., Markones N., Prior N., Trautmann S., Wahl J. & Sudfeldt C. (2019): Vögel in Deutschland – Übersichten zur Bestandssituation. Dachverband Deutscher Avifaunisten e. V. Münster. 63 S.
- DEIMS-SDR – Dynamic Ecological Information Management System – Site and dataset registry: DEIMS-SDR. <https://deims.org/> (aufgerufen am 29.08.2023)
- Destatis – Statistisches Bundesamt: Ökosystematlas. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Service/Statistik-Visualisiert/Oekosystematlas/_inhalt.html (aufgerufen am 29.08.2023)
- Diamond J. M. (1975): The island dilemma: Lessons of modern biogeographic studies for the design of natural reserves. *Biological Conservation* 7 (2): 129–146. DOI: 10.1016/0006-3207(75)90052-X
- Díaz S., Settele J., Brondízio E. S., Ngo H. T., Agard J., Arneth A., Balvanera P., Brauman K. A., Butchart S. H. M., Chan K. M. A., Garibaldi L. A., Ichii K., Liu J., Subramanian S. M., Midgley G. F. et al. (2019): Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science* 366 (6471): eaax3100. DOI: 10.1126/science.aax3100
- Dippner J. W. & Kröncke I. (2015): Ecological forecasting in the presence of abrupt regime shifts. *Journal of Marine Systems* 150: 34–40. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2015.05.009
- Dirzo R., Ceballos G. & Ehrlich P. R. (2022): Circling the drain: the extinction crisis and the future of humanity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 377 (1857): 20210378. DOI: 10.1098/rstb.2021.0378
- Disney R. H. L. (2020): Two new species of *Phora* Latreille (Diptera: Phoridae) from Germany. *Entomologist's Gazette* 71 (2): 130–134. DOI: 10.31184/G00138894.712.1761
- Doi H., Katano I., Sakata Y., Souma R., Kosuge T., Nagano M., Ikeda K., Yano K. & Tojo K. (2017): Detection of an endangered aquatic heteropteran using environmental DNA in a wetland ecosystem. *Royal Society Open Science* 4 (7): 170568. DOI: 10.1098/rsos.170568
- Dröschmeister R., Benzler A., Berhorn F., Doerpinghaus A., Eichen C., Fritsche B., Graef F., Neukirchen M., Sukopp U., Weddeling K. & Züghart W. (2006): Naturschutzmonitoring: Potenziale und Perspektiven. *Natur und Landschaft* 81 (12): 578–584.
- Dunker S., Boho D., Wäldchen J. & Mäder P. (2018): Combining high-throughput imaging flow cytometry and deep learning for efficient species and life-cycle stage identification of phytoplankton. *BMC Ecology* 18 (1): 51. DOI: 10.1186/s12898-018-0209-5
- Dunker S., Motivans E., Rakosy D., Boho D., Mäder P., Hornick T. & Knight T. M. (2021): Pollen analysis using multi-spectral imaging flow cytometry and deep learning. *New Phytologist* 229 (1): 593–606. DOI: 10.1111/nph.16882
- Eichenberg D., Bernhardt-Römer M., Bowler D., Bruelheide H., Conze K.-J., Dauber J., Dengler J., Engels D., Fartmann T., Frank D., Geske C., Grescho V., Harter D., Henle K., Hofmann S. et al. (2020): Langfristige Biodiversitätsveränderungen in Deutschland erkennen – mit Hilfe der Vergangenheit in die Zukunft schauen. *Natur und Landschaft* 95 (11): 479–491. DOI: 10.17433/11.2020.50153851.479-491
- Eichenberg D., Bowler D. E., Bonn A., Bruelheide H., Grescho V., Harter D., Jandt U., May R., Winter M. & Jansen F. (2021): Widespread decline in Central European plant diversity across six decades. *Global Change Biology* 27 (5): 1097–1110. DOI: 10.1111/gcb.15447
- Ellerbrok J. S., Delius A., Peter F., Farwig N. & Voigt C. C. (2022): Activity of forest specialist bats decreases towards wind turbines at forest sites. *Journal of Applied Ecology* 59 (10): 2497–2506. DOI: 10.1111/1365-2664.14249
- Engelhardt E. K., Biber M. F., Dolek M., Fartmann T., Hochkirch A., Leidinger J., Löffler F., Pinkert S., Poniatowski D., Voith J., Winterholler M., Zeuss D., Bowler D. E. & Hof C. (2022): Consistent signals of a warming climate in occupancy changes of three insect taxa over 40 years in central Europe. *Global Change Biology* 28 (13): 3998–4012. DOI: 10.1111/gcb.16200
- Entomologischer Verein Krefeld (2022): Biodiversitätsverluste in FFH-Lebensraumtypen des Offenlandes. Dokumentation zu den Ergebnissen eines Forschungsprojektes. *Series Naturalis* 2: 1–335.
- Exposito-Alonso M., Booker T. R., Czech L., Gillespie L., Hateley S., Kyriazis C. C., Lang P. L. M., Leventhal L., Noguez-Bravo D., Pagowski V., Ruffley M., Spence J. P., Toro

- Arana S. E., Weiß C. L. & Zess E. (2022): Genetic diversity loss in the Anthropocene. *Science* 377 (6613): 1431–1435. DOI: 10.1126/science.abn5642
- Fahrig L. (2020): Why do several small patches hold more species than few large patches? D. Storch (Hrsg.): *Global Ecology and Biogeography* 29 (4): 615–628. DOI: 10.1111/geb.13059
- Fahrig L., Watling J. I., Arnillas C. A., Arroyo-Rodríguez V., Jörger-Hickfang T., Müller J., Pereira H. M., Riva F., Rösch V., Seibold S., Tscharrntke T. & May F. (2022): Resolving the SLOSS dilemma for biodiversity conservation: a research agenda. *Biological Reviews* 97 (1): 99–114. DOI: 10.1111/brv.12792
- Fartmann T., Stuhldreher G., Streitberger M. & Helbing F. (2021): Die Bedeutung der Habitatqualität für den Schutz der Insektendiversität. Mikroklima, Phytodiversität, Habitatheterogenität und Totholz sind Schlüsselfaktoren für artenreiche Insektengemeinschaften. *Naturschutz und Landschaftsplanung: Zeitschrift für angewandte Ökologie* 53 (7): 12–17.
- Fischer M., Bossdorf O., Gockel S., Hänsel F., Hemp A., Hesenmöller D., Korte G., Nieschulze J., Pfeiffer S., Prati D., Renner S., Schöning I., Schumacher U., Wells K., Buscot F. et al. (2010): Implementing large-scale and long-term functional biodiversity research: The Biodiversity Exploratories. *Basic and Applied Ecology* 11 (6): 473–485. DOI: 10.1016/j.baae.2010.07.009
- Frohn H.-W. & Rosebrock J. (2012): Ehrenamtliche Kartierungen für den Naturschutz. Historische Analysen, aktuelle Situation und Zukunftspotenziale. Ergebnisse des F+E-Vorhabens (FKZ 3511 80 1500) »Perspektive Ehrenamt: Zukunftspotenziale für den Naturschutz und den Umsetzungsprozess der NBS«. Bundesamt für Naturschutz. Bonn-Bad Godesberg. 310 S.
- Garrett R. D., Levy S. A., Gollnow F., Hodel L. & Rueda X. (2021): Have food supply chain policies improved forest conservation and rural livelihoods? A systematic review. *Environmental Research Letters* 16 (3): 033002. DOI: 10.1088/1748-9326/abe0ed
- Gasparatos A., Doll C. N. H., Esteban M., Ahmed A. & Olang T. A. (2017): Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 (NA): 161–184. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.030
- GBIF – Global Biodiversity Information Facility: GBIF. <https://www.gbif.org/> (aufgerufen am 29.08.2023)
- Geiger M. F., Astrin J. J., Borsch T., Burkhardt U., Grobe P., Hand R., Hausmann A., Hohberg K., Krogmann L., Lutz M., Monje C., Misof B., Morinière J., Müller K., Pietsch S. et al. (2016): How to tackle the molecular species inventory for an industrialized nation—lessons from the first phase of the German Barcode of Life initiative GBOL (2012–2015). *Genome* 59 (9): 661–670. DOI: 10.1139/gen-2015-0185
- Gergs R., Koester M., Grabow K., Schöll F., Thielsch A. & Martens A. (2015): *Theodoxus fluviatilis*' re-establishment in the River Rhine: a native relict or a cryptic invader? *Conservation Genetics* 16 (1): 247–251. DOI: 10.1007/s10592-014-0651-7
- Grabs J. & Carodenuto S. L. (2021): Traders as sustainability governance actors in global food supply chains: A research agenda. *Business Strategy and the Environment* 30 (2): 1314–1332. DOI: 10.1002/bse.2686
- Grass I., Loos J., Baensch S., Batáry P., Librán-Embid F., Ficiciyan A., Klaus F., Riechers M., Rosa J., Tiede J., Udy K., Westphal C., Wurz A. & Tscharrntke T. (2019): Land-sharing/-sparing connectivity landscapes for ecosystem services and biodiversity conservation. *People and Nature* 1 (2): 262–272. DOI: 10.1002/pan3.21
- Grunewald K., Schweppe-Kraft B., Syrbe R.-U., Meier S., Krüger T., Schorcht M. & Walz U. (2020): Hierarchical classification system of Germany's ecosystems as basis for an ecosystem accounting – methods and first results. *One Ecosystem* 5: e50648. DOI: 10.3897/oneeco.5.e50648
- Grunewald K. & Bastian O. (2023a): Ökosystemleistungen – Blick auf den Nutzen der Natur. In: K. Grunewald & O. Bastian (Hrsg.): *Ökosystemleistungen*. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg: 1–23.
- Grunewald K. & Bastian O. (Hrsg.) (2023b): *Ökosystemleistungen. Konzept, Methoden, Bewertungs- und Steuerungsansätze*. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg.
- Haase P., Pilotto F., Li F., Sundermann A., Lorenz A. W., Tonkin J. D. & Stoll S. (2019): Moderate warming over the past 25 years has already reorganized stream invertebrate communities. *Science of The Total Environment* 658: 1531–1538. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.234
- Haase P., Bowler D. E., Baker N. J., Bonada N., Domisch S., Garcia Marquez J. R., Heino J., Hering D., Jähnig S. C., Schmidt-Kloiber A., Stubbington R., Altermatt F., Álvarez-Cabria M., Amatulli G., Angeler D. G. et al. (2023): The recovery of European freshwater biodiversity has come to a halt. *Nature* 620 (7974): 582–588. DOI: 10.1038/s41586-023-06400-1
- Habel J. C., Segerer A., Ulrich W., Torchyk O., Weisser W. W. & Schmitt T. (2016): Butterfly community shifts over two centuries. *Conservation Biology* 30 (4): 754–762. DOI: 10.1111/cobi.12656
- Haber W. (2014): *Landwirtschaft und Naturschutz*. Wiley-VCH Verlag. Weinheim, Germany. 298 S.
- Hagan J. G., Vanschoenwinkel B. & Gamfeldt L. (2021): We should not necessarily expect positive relationships between biodiversity and ecosystem functioning in observational field data F. Courchamp (Hrsg.): *Ecology Letters* 24 (12): 2537–2548. DOI: 10.1111/ele.13874
- Hallmann C. A., Foppen R. P. B., van Turnhout C. A. M., de Kroon H. & Jongejans E. (2014): Declines in insectivorous birds are associated with high neonicotinoid concentrations. *Nature* 511 (7509): 341–343. DOI: 10.1038/nature13531
- Hallmann C. A., Sorg M., Jongejans E., Siepel H., Hofland N., Schwan H., Stenmans W., Müller A., Sumser H., Hörren T., Goulson D. & de Kroon H. (2017): More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas E. G. Lamb (Hrsg.): *PLOS ONE* 12 (10): e0185809. DOI: 10.1371/journal.pone.0185809
- Hallmann C. A., Ssymank A., Sorg M., de Kroon H. & Jongejans E. (2021): Insect biomass decline scaled to species diversity: General patterns derived from a hoverfly commu-

- nity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118 (2): e2002554117. DOI: 10.1073/pnas.2002554117
- Hancock S. C., Essl F., Kraak M.-J., Dawson W., Kreft H., Pyšek P., Pergl J., van Kleunen M., Weigelt P., Winter M., Gartner G. & Lenzner B. (2022): Introducing the combined atlas framework for large-scale web-based data visualization: The GloNAF atlas of plant invasion. *Methods in Ecology and Evolution* 13 (5): 1073–1081. DOI: 10.1111/2041-210X.13820
- Hill A. P., Prince P., Piña Covarrubias E., Doncaster C. P., Snaddon J. L. & Rogers A. (2018): AudioMoth: Evaluation of a smart open acoustic device for monitoring biodiversity and the environment. *Methods in Ecology and Evolution* 9 (5): 1199–1211. DOI: 10.1111/2041-210X.12955
- Hoban S., Archer F. I., Bertola L. D., Bragg J. G., Breed M. F., Bruford M. W., Coleman M. A., Ekblom R., Funk W. C., Grueber C. E., Hand B. K., Jaffé R., Jensen E., Johnson J. S., Kershaw F. et al. (2022): Global genetic diversity status and trends: towards a suite of Essential Biodiversity Variables (EBVs) for genetic composition. *Biological Reviews* 97 (4): 1511–1538. DOI: 10.1111/brv.12852
- Hong P., Schmid B., De Laender F., Eisenhauer N., Zhang X., Chen H., Craven D., De Boeck H. J., Hautier Y., Petchey O. L., Reich P. B., Steudel B., Striabel M., Thakur M. P. & Wang S. (2022): Biodiversity promotes ecosystem functioning despite environmental change. *Ecology Letters* 25 (2): 555–569. DOI: 10.1111/ele.13936
- Hörren T., Sorg M., Hallmann C. A., Zizka V. M. A., Szymank A., Noll N. W., Schäffler L. & Scherber C. (2022): A universal insect trait tool (ITT, v1.0) for statistical analysis and evaluation of biodiversity research data. *bioRxiv*. 2022.01.25.477751. DOI: <https://doi.org/10.1101/2022.01.25.477751>
- IPBES – Intergovernmental Science-Policy Platform On Biodiversity And Ecosystem Services (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Zenodo. Bonn, Germany.
- IPCC – Intergovernmental panel on Climate Change (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1. Aufl. H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lössche, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Hrsg.): Cambridge University Press. Cambridge UK and New York, NY, USA. 3056 S.
- Jandt U., Bruelheide H., Berg C., Bernhardt-Römermann M., Blüml V., Bode F., Dengler J., Diekmann M., Dierschke H., Doerfler I., Döring U., Dullinger S., Härdtle W., Haider S., Heinken T. et al. (2022): ReSurveyGermany: Vegetation-plot time-series over the past hundred years in Germany. *Scientific Data* 9 (1): 631. DOI: 10.1038/s41597-022-01688-6
- Jansen F., Bonn A., Bowler D. E., Bruelheide H. & Eichenberg D. (2020): Moderately common plants show highest relative losses. *Conservation Letters* 13 (1): e12674. DOI: 10.1111/conl.12674
- Jong Y. D. (2016): *Fauna Europaea*. DOI: 10.15468/YMK1BX
- Kamp J., Trappe J., Dübbers L. & Funke S. (2020): Impacts of windstorm-induced forest loss and variable reforestation on bird communities. *Forest Ecology and Management* 478 (NA): 118504. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118504
- Kamp J., Frank C., Trautmann S., Busch M., Dröschmeister R., Flade M., Gerlach B., Karthäuser J., Kunz F., Mitschke A., Schwarz J. & Sudfeldt C. (2021): Population trends of common breeding birds in Germany 1990–2018. *Journal of Ornithology* 162 (1): 1–15. DOI: 10.1007/s10336-020-01830-4
- Karlsson-Vinkhuyzen S., Kok M. T. J., Visseren-Hamakers I. J. & Termeer C. J. A. M. (2017): Mainstreaming biodiversity in economic sectors: An analytical framework. *Biological Conservation* 210 (Part A): 145–156. DOI: 10.1016/j.biocon.2017.03.029
- Kattge J., Bönisch G., Díaz S., Lavorel S., Prentice I. C., Leadley P., Tautenhahn S., Werner G. D. A., Aakala T., Abedi M., Acosta A. T. R., Adamidis G. C., Adamson K., Aiba M., Albert C. H. et al. (2020): TRY plant trait database – enhanced coverage and open access. *Global Change Biology* 26 (1): 119–188. DOI: 10.1111/gcb.14904
- van Klink R., Bowler D. E., Gongalsky K. B., Swengel A. B., Gentile A. & Chase J. M. (2020): Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances. *Science* 368 (6489): 417–420. DOI: 10.1126/science.aax9931
- van Klink R., August T., Bas Y., Bodesheim P., Bonn A., Fossøy F., Høye T. T., Jongejans E., Menz M. H. M., Miraldo A., Roslin T., Roy H. E., Ruczyński I., Schigel D., Schäffler L. et al. (2022): Emerging technologies revolutionise insect ecology and monitoring. *Trends in Ecology & Evolution* 37 (10): 872–885. DOI: 10.1016/j.tree.2022.06.001
- Kollmann J., Kirmer A., Tischew S., Hölzel N. & Kiehl K. (2019): *Renaturierungsökologie*. Springer Spektrum. Berlin. 489 S.
- Kottler E. J., Dickman E. E., Sexton J. P., Emery N. C. & Franks S. J. (2021): Draining the Swamping Hypothesis: Little Evidence that Gene Flow Reduces Fitness at Range Edges. *Trends in Ecology & Evolution* 36 (6): 533–544. DOI: 10.1016/j.tree.2021.02.004
- Kowarik I. & Rabitsch W. (2010): *Biologische Invasionen. Neophyten und Neozoen in Mitteleuropa*. 2., wesentlich erw. Aufl. Ulmer. Stuttgart (Hohenheim). 492 S.
- Kremen C. (2015): Reframing the land-sparing/land-sharing debate for biodiversity conservation. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1355 (1): 52–76. DOI: 10.1111/nyas.12845
- Kühn I., Brandl R., May R. & Klotz St. (2003): Plant distribution patterns in Germany – Will aliens match natives? *Feddes Repertorium* 114 (7–8): 559–573. DOI: 10.1002/fedr.200311015
- Lackschewitz D., Reise K., Buschbaum C. & Karez R. (2014): Neobiota in deutschen Küstengewässern. Eingeschleppte und kryptogene Tier- und Pflanzenarten an der deutschen Nord- und Ostseeküste. Juli 2014. LLUR SH. Kiel. 216 S.
- Leclère D., Obersteiner M., Barrett M., Butchart S. H. M., Chaudhary A., De Palma A., DeClerck F. A. J., Di Marco M., Doelman J. C., Dürauer M., Freeman R., Harfoot M., Hasegawa T., Hellweg S., Hilbers J. P. et al. (2020): Bending

- the curve of terrestrial biodiversity needs an integrated strategy. *Nature* 585 (7826): 551–556. DOI: 10.1038/s41586-020-2705-y
- Lennartz G. (2003): Der bioökologisch-soziologische Klassifikationsansatz und dessen Anwendung in der Naturschutzpraxis, dargestellt am Beispiel der Borstgrasrasen (Violion) der Eifel unter Berücksichtigung der Laufkäfer, Spinnen, Heuschrecken, Tagfalter und Schwebfliegen. Shaker. Aachen. 273 S.
- Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2020): Biodiversität und Management von Agrarlandschaften. Umfassendes Handeln ist jetzt wichtig. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina. Halle (Saale).
- Linke S., Gifford T., Desjonquères C., Tonolla D., Aubin T., Barclay L., Karaconstantis C., Kennard M. J., Rybak F. & Sueur J. (2018): Freshwater ecoacoustics as a tool for continuous ecosystem monitoring. *Frontiers in Ecology and the Environment* 16 (4): 231–238. DOI: 10.1002/fee.1779
- Linnakoski R., Kasanen R., Dounavi A. & Forbes K. M. (2019): Editorial: Forest Health Under Climate Change: Effects on Tree Resilience, and Pest and Pathogen Dynamics. *Frontiers in Plant Science* 10 (1157): 3. DOI: 10.3389/fpls.2019.01157
- Marques A., Martins I. S., Kastner T., Plutzer C., Theurl M. C., Eisenmenger N., Huijbregts M. A. J., Wood R., Stadler K., Bruckner M., Canelas J., Hilbers J. P., Tukker A., Erb K. & Pereira H. M. (2019): Increasing impacts of land use on biodiversity and carbon sequestration driven by population and economic growth. *Nature Ecology & Evolution* 3 (4): 628–637. DOI: 10.1038/s41559-019-0824-3
- Maxwell S. L., Cazalis V., Dudley N., Hoffmann M., Rodrigues A. S. L., Stolton S., Visconti P., Woodley S., Kingston N., Lewis E., Maron M., Strassburg B. B. N., Wenger A., Jonas H. D., Venter O. et al. (2020): Area-based conservation in the twenty-first century. *Nature* 586 (7828): 217–227. DOI: 10.1038/s41586-020-2773-z
- Meadows D., Heck H. D. & Meadows D. L. (Hrsg.) (1982): Die Grenzen des Wachstums. Bericht d. Club of Rome zur Lage d. Menschheit. 364.-373. Tsd. Rowohlt. Reinbek bei Hamburg. 180 S.
- Meadows D. H. & Club of Rome (Hrsg.) (1972): The Limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. Universe Books. New York. 205 S.
- Mission B: Mission B – für mehr Biodiversität. <https://missionb.ch/de/missionb> (aufgerufen am 29.08.2023)
- MonViA – Verbundprojekt MonViA (2021): Bundesweites Monitoring der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften – Jahresbericht 2021. BLE. 60 S.
- Müller J., Mitesser O., Cadotte M. W., Van Der Plas F., Mori A. S., Ammer C., Chao A., Scherer-Lorenzen M., Baldrian P., Bässler C., Biedermann P., Cesarz S., Claßen A., Delory B. M., Feldhaar H. et al. (2023): Enhancing the structural diversity between forest patches—A concept and real-world experiment to study biodiversity, multifunctionality and forest resilience across spatial scales. *Global Change Biology* 29 (6): 1437–1450. DOI: 10.1111/gcb.16564
- Myers N. (1996): Environmental services of biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 93 (7): 2764–2769. DOI: 10.1073/pnas.93.7.2764
- Nehring S. (2003): Gebietsfremde Arten in den deutschen Gewässern—ein Risiko für die Biodiversität. 498: 40–52.
- Newbold T., Hudson L. N., Contu S., Hill S. L. L., Beck J., Liu Y., Meyer C., Phillips H. R. P., Scharlemann J. P. W. & Purvis A. (2018): Widespread winners and narrow-ranged losers: Land use homogenizes biodiversity in local assemblages worldwide. *PLOS Biology* 16 (12): e2006841. DOI: 10.1371/journal.pbio.2006841
- Ott J. (1996): Zeigt die Ausbreitung der Feuerlibelle in Deutschland eine Klimaveränderung an? 28: 53–61.
- Outhwaite C. L., Gregory R. D., Chandler R. E., Collen B. & Isaac N. J. B. (2020): Complex long-term biodiversity change among invertebrates, bryophytes and lichens. *Nature Ecology & Evolution* 4 (3): 384–392. DOI: 10.1038/s41559-020-1111-z
- Overmann J., Huang S., Nübel U., Hahnke R. L. & Tindall B. J. (2019): Relevance of phenotypic information for the taxonomy of not-yet-cultured microorganisms. *Systematic and Applied Microbiology* 42 (1): 22–29. DOI: 10.1016/j.syapm.2018.08.009
- Pawlowski J., Kelly-Quinn M., Altermatt F., Apothéloz-Perret-Gentil L., Beja P., Boggero A., Borja A., Bouchez A., Cordier T., Domaizon I., Feio M. J., Filipe A. F., Fornaroli R., Graf W., Herder J. et al. (2018): The future of biotic indices in the ecogenomic era: Integrating (e)DNA metabarcoding in biological assessment of aquatic ecosystems. *Science of The Total Environment* 637–638 (NA): 1295–1310. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.002
- Péer G., Zinngrebe Y., Moreira F., Sirami C., Schindler S., Müller R., Bontzorlos V., Clough D., Bezák P., Bonn A., Hansjürgens B., Lomba A., Möckel S., Passoni G., Schleyer C. et al. (2019): A greener path for the EU Common Agricultural Policy. *Science* 365 (6452): 449–451. DOI: 10.1126/science.aax3146
- Pereira H. M., Ferrier S., Walters M., Geller G. N., Jongman R. H. G., Scholes R. J., Bruford M. W., Brummitt N., Butchart S. H. M., Cardoso A. C., Coops N. C., Dulloo E., Faith D. P., Freyhof J., Gregory R. D. et al. (2013): Essential Biodiversity Variables. *Science* 339 (6117): 277–278. DOI: 10.1126/science.1229931
- Pérez-Granados C. & Traba J. (2021): Estimating bird density using passive acoustic monitoring: a review of methods and suggestions for further research. *Ibis* 163 (3): 765–783. DOI: 10.1111/ibi.12944
- Perino A., Pereira H. M., Navarro L. M., Fernández N., Bullock J. M., Ceaușu S., Cortés-Avizanda A., van Klink R., Kuemmerle T., Lomba A., Péer G., Plieninger T., Rey Benayas J. M., Sandom C. J., Svenning J.-C. et al. (2019): Rewilding complex ecosystems. *Science* 364 (6438): eaav5570. DOI: 10.1126/science.aav5570
- Perino A., Pereira H. M., Felipe-Lucia M., Kim H., Kühl H. S., Marselle M. R., Meya J. N., Meyer C., Navarro L. M., van Klink R., Albert G., Barratt C. D., Bruelheide H., Cao Y., Chamoin A. et al. (2021): Biodiversity post-2020: Closing the gap between global targets and national-level im-

- plementation. *Conservation Letters* 15 (2): e12848. DOI: 10.1111/conl.12848
- Perrings C., Naeem S., Ahrestani F., Bunker D. E., Burkill P., Canziani G., Elmquist T., Ferrati R., Fuhrman J., Jaksic F., Kawabata Z., Kinzig A., Mace G. M., Milano F., Mooney H. et al. (2010): Ecosystem Services for 2020. *Science* 330 (6002): 323–324. DOI: 10.1126/science.1196431
- Plachter H. (1991): *Naturschutz*. G. Fischer. Stuttgart.
- van der Plas F. (2019): Biodiversity and ecosystem functioning in naturally assembled communities. *Biological Reviews*. brv.12499. DOI: 10.1111/brv.12499
- Pörtner H. O., Scholes R. J., Agard J., Archer E., Arneth A., Bai X., Barnes D., Burrows M., Chan L., Cheung W. L., Diamond S., Donatti C., Duarte C., Eisenhauer N., Foden W. et al. (2021): IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) and Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Ratcliffe S., Liebergesell M., Ruiz-Benito P., Madrigal González J., Muñoz Castañeda J. M., Kändler G., Lehtonen A., Dahlgren J., Kattge J., Peñuelas J., Zavala M. A. & Wirth C. (2016): Modes of functional biodiversity control on tree productivity across the European continent. *Global Ecology and Biogeography* 25 (3): 251–262. DOI: 10.1111/geb.12406
- Rduch V. & Peters R. S. (2020): GBOL III: Dark Taxa – die dritte Phase der German Barcode of Life Initiative hat begonnen. *KOENIGIANA* 14 (2): 91–107. DOI: NA
- Rewilding Europe (Hrsg.); Allen D., Bosman I., Collier S., Enderadzi M., Helmer W. & Schepers F. (2015): *Rewilding Europe – Annual Review 2015*. Amsterdam. 92 S.
- Riecken U., Ammer C., Baur B., Bonn A., Diekötter T., Hotes S., Krüß A., Klimek S., Leyer I., Werk K., Ziegenhagen B. & Farwig N. (2020): Notwendigkeit eines Brückenschlags zwischen Wissenschaft und Praxis im Naturschutz: Chancen und Herausforderungen. *Natur und Landschaft* 95 (8): 364–370. DOI: 10.17433/8.2020.50153829.364-37
- Riedel W., Lange H., Jedicke E. & Reinke M. (Hrsg.) (2016): *Landschaftsplanung*. 3. Aufl. Springer Spektrum. Berlin, Heidelberg. 535 S.
- Rigal S., Dakos V., Alonso H., Auniņš A., Benkó Z., Brotons L., Chodkiewicz T., Chylarecki P., De Carli E., Del Moral J. C., Domşa C., Escandell V., Fontaine B., Foppen R., Gregory R. et al. (2023): Farmland practices are driving bird population decline across Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120 (21): e2216573120. DOI: 10.1073/pnas.2216573120
- Riva F. & Fahrig L. (2023): Landscape-scale habitat fragmentation is positively related to biodiversity, despite patch-scale ecosystem decay. *Ecology Letters* 26 (2): 268–277. DOI: 10.1111/ele.14145
- Salvatori V., Balian E., Blanco J. C., Ciucci P., Demeter L., Hartel T., Marsden K., Redpath S. M., von Korff Y. & Young J. C. (2020): Applying Participatory Processes to Address Conflicts Over the Conservation of Large Carnivores: Understanding Conditions for Successful Management. *Frontiers in Ecology and Evolution* 8 (NA): NA. DOI: 10.3389/fevo.2020.00182
- Scherfose V. (Hrsg.) (2014): *Nationalparkmanagement in Deutschland*. Bundesamt für Naturschutz. Bonn-Bad Godesberg. 261 S.
- Schmidt-Kloiber A. & Hering D. (2015): www.freshwaterecology.info – An online tool that unifies, standardises and codifies more than 20,000 European freshwater organisms and their ecological preferences. *Ecological Indicators* 53: 271–282. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.02.007
- Schneider S., Taylor G. W., Kremer S. C., Burgess P., McGroarty J., Mitsui K., Zhuang A., deWaard J. R. & Fryxell J. M. (2022): Bulk arthropod abundance, biomass and diversity estimation using deep learning for computer vision. *Methods in Ecology and Evolution* 13 (2): 346–357. DOI: 10.1111/2041-210X.13769
- Schuldt B., Buras A., Arend M., Vitasse Y., Beierkuhnlein C., Damm A., Gharun M., Grams T. E. E., Hauck M., Hajek P., Hartmann H., Hiltbrunner E., Hoch G., Holloway-Phillips M., Körner C. et al. (2020): A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology* 45 (NA): 86–103. DOI: 10.1016/j.baae.2020.04.003
- Seibold S., Gossner M. M., Simons N. K., Blüthgen N., Müller J., Ambarlı D., Ammer C., Bauhus J., Fischer M., Habel J. C., Linsenmair K. E., Nauss T., Penone C., Prati D., Schall P. et al. (2019): Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature* 574 (7780): 671–674. DOI: 10.1038/s41586-019-1684-3
- Settele J. (2020): *Die Triple-Krise: Artensterben, Klimawandel, Pandemien. Warum wir dringend handeln müssen*. Edel Books. Hamburg. 319 S.
- Sommerwerk N., Geschke J. & Schliep R. (2021): *Vernetzung und Kooperation ehrenamtlicher und akademischer Forschung im Rahmen des nationalen Biodiversitätsmonitorings. Herausforderungen und Lösungsstrategien*. *Naturschutz und Landschaftsplanung (NuL)* 53 (8): 30–36. DOI: 10.1399/NuL.2021.08.03
- Soulé M. E. & Wilcox B. A. (Hrsg.) (1980): *Conservation biology: an evolutionary-ecological perspective*. Sinauer Associates. Sunderland, Mass. 395 S.
- Spake R., Barajas-Barbosa M. P., Blowes S. A., Bowler D. E., Callaghan C. T., Garbowski M., Jurburg S. D., van Klink R., Korell L., Ladouceur E., Rozzi R., Viana D. S., Xu W.-B. & Chase J. M. (2022): Detecting Thresholds of Ecological Change in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources* 47 (1): 797–821. DOI: 10.1146/annurev-environ-112420-015910
- Sperle T. & Bruelheide H. (2021): Climate change aggravates bog species extinctions in the Black Forest (Germany). *Diversity and Distributions* 27 (2): 282–295. DOI: 10.1111/ddi.13184
- Ssymank A. (1994): *Neue Anforderungen im europäischen Naturschutz. Das Schutzgebietssystem Natura 2000 und die FFH – Richtlinie der EU*. *Natur und Landschaft* 69 (9): 395–406.
- van Strien A. J., Meyling A. W. G., Herder J. E., Hollander H., Kalkman V. J., Poot M. J. M., Turnhout S., van der Hoorn B., van Strien-van Liempt W. T. F. H., van Swaay C. A. M., van Turnhout C. A. M., Verweij R. J. T. & Oerlemans N. J. (2016): Modest recovery of biodiversity in a western Eu-

- ropean country: The Living Planet Index for the Netherlands. *Biological Conservation* 200 (NA): 44–50. DOI: 10.1016/j.biocon.2016.05.031
- Teixeira C. P. & Fernandes C. O. (2020): Novel ecosystems: a review of the concept in non-urban and urban contexts. *Landscape Ecology* 35 (1): 23–39. DOI: 10.1007/s10980-019-00934-4
- Thonfeld F., Gessner U., Holzwarth S., Kriese J., Da Ponte E., Huth J. & Kuenzer C. (2022): A First Assessment of Canopy Cover Loss in Germany's Forests after the 2018–2020 Drought Years. *Remote Sensing* 14 (3): 562. DOI: 10.3390/rs14030562
- du Toit J. T. & Pettorelli N. (2019): The differences between rewilding and restoring an ecologically degraded landscape. *Journal of Applied Ecology* 56 (11): 2467–2471. DOI: 10.1111/1365-2664.13487
- Tolvanen A., Routavaara H., Jokikokko M. & Rana P. (2023): How far are birds, bats, and terrestrial mammals displaced from onshore wind power development? – A systematic review. *Biological Conservation* 288: 110382. DOI: 10.1016/j.biocon.2023.110382
- Toschki A., Burkhardt U., Haase H., Höfer H., Jänsch S., Oellers J., Römbke J., Roß-Nickoll M., Salamon J.-A., Schmelz R. M., Scholz-Starke B. & Russell D. (2021): Die Edaphobase-Länderstudien. Synökologische Untersuchungen von Bodenorganismen in einem Biotop- und Standortgradienten in Deutschland 2014–2018. DOI: 10.34750/PECK14-2021
- Trepl L. (1994): Geschichte der Ökologie vom 17. Jahrhundert bis zur Gegenwart. 2. Aufl. Beltz Athenäum Verlag. Weinheim, Deutschland. 280 S.
- TU Berlin – Technische Universität Berlin & BfN – Bundesamt für Naturschutz (2023): Indikator-Factsheet: Rückgewinnung natürlicher Überflutungsflächen.
- Tudge S. J., Purvis A. & De Palma A. (2021): The impacts of biofuel crops on local biodiversity: a global synthesis. *Biodiversity and Conservation* 30 (11): 2863–2883. DOI: 10.1007/s10531-021-02232-5
- UBA – Umweltbundesamt (2022): Die Risiken des Klimawandels für Deutschland. 20 S.
- Wägele J. W., Bodesheim P., Bourlat S. J., Denzler J., Diepenbroek M., Fonseca V., Frommolt K.-H., Geiger M. F., Gemeinholzer B., Glöckner F. O., Haucke T., Kirse A., Kölpin A., Kostadinov I., Kühl H. S. et al. (2022): Towards a multisensor station for automated biodiversity monitoring. *Basic and Applied Ecology* 59 (NA): 105–138. DOI: 10.1016/j.baae.2022.01.003
- Wäldchen J. & Mäder P. (2018): Machine learning for image based species identification. *Methods in Ecology and Evolution* 9 (11): 2216–2225. DOI: 10.1111/2041-210X.13075
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2020): Landwende im Anthropozän. Von der Konkurrenz zur Integration. Hauptgutachten. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Berlin. 415 S.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (2024): Biodiversität. Jetzt dringend handeln für Natur und Mensch. Politikpapier 13. Berlin: WBGU.
- Weisser W. W., Roscher C., Meyer S. T., Ebeling A., Luo G., Allan E., Beßler H., Barnard R. L., Buchmann N., Buscot F., Engels C., Fischer C., Fischer M., Gessler A., Gleixner G. et al. (2017): Biodiversity effects on ecosystem functioning in a 15-year grassland experiment: Patterns, mechanisms, and open questions. *Basic and Applied Ecology* 23 (Supplement C): 1–73. DOI: 10.1016/j.baae.2017.06.002
- Whitehorn P. R., Navarro L. M., Schröter M., Fernandez M., Rotllan-Puig X. & Marques A. (2019): Mainstreaming biodiversity: A review of national strategies. *Biological Conservation* 235 (NA): 157–163. DOI: 10.1016/j.biocon.2019.04.016
- Winter M., Schweiger O., Klotz S., Nentwig W., Andriopoulos P., Arianoutsou M., Basnou C., Delipetrou P., Didžiulis V., Hejda M., Hulme P. E., Lambdon P. W., Pergl J., Pyšek P., Roy D. B. et al. (2009): Plant extinctions and introductions lead to phylogenetic and taxonomic homogenization of the European flora. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (51): 21721–21725. DOI: 10.1073/pnas.0907088106
- Wirth C., Engelmann R. A., Haack N., Hartmann H., Richter R., Schnabel F., Scholz M. & Seele-Dilbat C. (2021): Naturschutz und Klimawandel im Leipziger Auwald. Ein Biodiversitätshotspot an der Belastungsgrenze. *Biologie in unserer Zeit* 51 (1): 55–65. DOI: 10.11576/biuz-4107
- Woodcock B. A., Bullock J. M., Shore R. F., Heard M. S., Pereira M. G., Redhead J., Ridding L., Dean H., Sleep D., Henrys P., Peyton J., Hulmes S., Hulmes L., Sárosspataki M., Saure C. et al. (2017): Country-specific effects of neonicotinoid pesticides on honey bees and wild bees. *Science* 356 (6345): 1393–1395. DOI: 10.1126/science.aaa1190
- Xu S., Eisenhauer N., Ferlian O., Zhang J., Zhou G., Lu X., Liu C. & Zhang D. (2020): Species richness promotes ecosystem carbon storage: evidence from biodiversity-ecosystem functioning experiments. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 287 (1939): 20202063. DOI: 10.1098/rspb.2020.2063
- Zeuss D., Bald L., Gottwald J., Becker M., Bellafkir H., Bendix J., Bengel P., Beumer L. T., Brandl R., Brändle M., Dahlke S., Farwig N., Freisleben B., Friess N., Heidrich L. et al. (2023): Nature 4.0: A networked sensor system for integrated biodiversity monitoring. *Global Change Biology* 30 (1): e17056. DOI: 10.1111/gcb.17056

2

THEMENBEREICHE IM *FAKTENCHECK* *ARTENVIELFALT*

Autor:innen

Jori Maylin Marx, Julia S. Ellerbrok, Anja Schmidt, Theresa Spatz, Maria Sporbert,
Lea von Sivers, Helge Bruelheide, Nina Farwig, Josef Settele, Christian Wirth

Beitragende Autor:innen

Nico Eisenhauer, Jennifer Hauck, Sven Grüner, Sebastian Lakner, Vera Schreiner,
Pia Sommer, Christian Ristok

2.1 Status und Trends

Das Kapitel »Status und Trends der Biodiversität« gibt einen Überblick über die wichtigsten Monitoringprogramme des jeweiligen Lebensraums und zeigt auf, zu welchen Biodiversitätsfacetten und/oder Organismengruppen es noch Wissenslücken und Defizite gibt, die es zu schließen gilt. Es werden jeweils der aktuelle Zustand und die Entwicklung (Trends) der Lebensräume und der darin vorkommenden Organismengruppen beschrieben, um zu zeigen, wie sich die Biodiversität insbesondere im Laufe der letzten 30 Jahre verändert hat. Es werden Artengruppen herausgestellt, für welche der jeweilige Lebensraum von besonderer Bedeutung ist. Die fundierten Aussagen sind das Ergebnis einer intensiven Literaturrecherche zu Statusänderungen in Roten Listen, Monitoringstudien und wissenschaftlichen Forschungsarbeiten. Betrachtet werden auch die Zahl und die Veränderung von nicht einheimischen Arten, auf deren Rolle aber genauer im Kapitel »Direkte Treiber – Invasive Arten« eingegangen wird.

Im Folgenden (Kap. 2.1.1) wird ein Überblick über wichtige lebensraumübergreifende Monitoringprogramme, Biodiversitätserfassungen und Forschungsinitiativen zu den verschiedenen Organismengruppen in Deutschland gegeben. Es folgt eine Einschätzung der Verfügbarkeit und Defizite der vorhandenen Biodiversitätsdaten (Kap. 2.1.2). Unter 2.1.3 werden lebensraumübergreifend der aktuelle Kenntnisstand und bekannte Wissenslücken zu den verschiedenen Facetten der Biodiversität zusammengefasst (Kap. 2.1.3.1). Ein Fokus liegt dabei auf den Einschätzungen der Roten Listen zur Gefährdungssituation und Bestandsentwicklung von Arten (Kap. 2.1.3.2). Des Weiteren werden Endemiten und Taxa mit nationaler Verantwortlichkeit vorgestellt (Kap. 2.1.3.3) sowie Hotspots der biologischen Vielfalt in Deutschland gezeigt, die auf Grundlage von Artenhäufigkeiten von verschiedenen Organismengruppen identifiziert wurden (Kap. 2.1.3.4). Im Rahmen des *Faktencheck Artenvielfalt* wurden auch eigene umfangreiche Analysen zu Biodiversitätstrends durchgeführt. Über die verschiedenen Lebensräume und Organismengruppen hinweg wurden publizierte Biodiversitätstrends aus zahlreichen Studien zusammengetragen, mit Rohdaten von direkten Beobachtungen zu 15.272 Zeitreihen verknüpft und einer gemeinsamen Analyse unterzogen. Das Ziel war es, ein räumlich explizites, möglichst umfassendes Bild der vorhandenen Datenlage zu gewinnen, das über eine reine Einschätzung von Expert:innen hinausgeht. Mit der gewichteten Stimmzählung (Weighted Vote Count – WVC) wurde eine Möglichkeit gefunden,

die heterogene Datenlage von Biodiversitätstrends zu beschreiben (Kap. 2.1.4).

2.1.1 Biodiversitätserfassung, Monitoringprogramme und Forschungsinitiativen

Eine wichtige Basis für die Entwicklung und Durchführung von Maßnahmen zum Erhalt und zur Förderung der biologischen Vielfalt sind einerseits Beobachtungen des Zustands und der Dynamik der Biodiversität in Raum und Zeit und andererseits Kenntnisse über ökologische Grundlagen und Zusammenhänge, die in der konkreten Ausgestaltung von Schutz- und Managementmaßnahmen Niederschlag finden. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über Ausgestaltung und Defizite bestehender Monitoringsysteme, die in den Kapiteln zu einzelnen Lebensräumen spezifisch bewertet werden.

Biodiversitätsmonitoring ist eine systematische, wiederholte und standardisierte Erfassung des Zustands der Bestandteile der Biodiversität. Ein Monitoring liefert kontinuierlich oder in definierten Zeiträumen regelmäßig Daten, die nach Methoden erhoben werden, die über Zeit und Raum hinweg vergleichbar sind (NMZB o. J.). Im Kontext der Umweltplanung ist Monitoring die »kontinuierliche oder regelmäßige Beobachtung von biotischen und/oder abiotischen Komponenten der Umwelt, um schädliche Stoffe oder Einflüsse zu erkennen und zu quantifizieren« (Schaefer 2012). Neben anlassunabhängigem Monitoring umfasst Monitoring auch die Erfolgskontrolle von Maßnahmen (anlassbezogene Erfolgskontrolle). Zu den in Deutschland gesetzlich vorgeschriebenen und institutionell durchgeführten Monitoringprogrammen gehört vor allem das vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) koordinierte und auf der Habitats Directive der Europäischen Kommission basierende Monitoring der **Fauna-Flora-Habitat-(FFH-)**Lebensraumtypen und der Arten der FFH-Anhänge (Rat der Europäischen Gemeinschaft 1992), das auf der Habitats Directive der Europäischen Kommission (FFH-Richtlinie) basiert. Das im Rahmen der FFH-Richtlinie eingerichtete Natura-2000-Schutzgebietssystem umfasst in Deutschland rund 4.500 gemeldete FFH-Gebiete, die 9,3 % der terrestrischen Fläche in Deutschland ausmachen, dazu über 2 Mio. ha Meeres-, See-, Bodden- und Wattflächen. Hinzu kommen 742 Vogelschutzgebiete (11,3 % der Landfläche). Hierbei ist zu beachten, dass sich Vogelschutz- und FFH-Gebiete vielfach überschneiden. Insgesamt bedecken diese Natura-2000-Gebiete 15,5 % der Landfläche sowie 45 % der marinen Fläche Deutschlands (BfN o. J.). Im verpflichtenden Monitoring der FFH-Lebensräume und -Arten müssen die Mitgliedstaaten den Erhaltungszustand der für ihr Gebiet in

den Anhängen 1 und 2 vorkommenden Lebensraumtypen und Arten monitoren und alle sechs Jahre den jeweiligen Zustand für alle Arten und Lebensraumtypen (LRT) an die EU melden. Für Deutschland wurden dazu vom BfN einheitliche Bewertungsschemata erstellt (BfN & BLAK 2017a; BfN & BLAK 2017b). Das FFH-Monitoring deckt weder alle LRT ab, noch basiert es auf freizugänglichen (Roh-)Daten, die die Auswertungen über die Kategorien des Erhaltungszustands (günstig, ungünstig-unzureichend, ungünstig-schlecht) hinweg erlauben würden. Des Weiteren wird vom BfN das **bundesweite Insektenmonitoring** koordiniert, das für häufige Insekten regelmäßig auf den bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen erfolgen soll und durch ein Monitoring für seltene Insektengruppen ergänzt wird. Die Durchführung obliegt den Bundesländern, die ein Minimalprogramm realisieren müssen und optional Erweiterungsbausteine wählen können. Ein entsprechender Methodenleitfaden wurde publiziert (BfN 2020b). Das **Monitoring auf Flächen des Nationalen Naturerbes** (NNE-Monitoring) läuft seit 2012 unter Federführung des BfN und der Naturstiftung David und ist ein Gemeinschaftsprojekt von Bund, Ländern, Stiftungen und Naturschutzorganisationen. Das Monitoring dokumentiert dabei die naturschutzfachlichen Maßnahmen und die Entwicklung der Naturerbeflächen. Das Ökosystemmonitoring des BfN befindet sich aktuell noch in Erprobung und soll zukünftig die Veränderungen der Biotope in der Gesamtlandschaft auf den bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen dokumentieren.

Im Agrar- und Offenland ist das vom BfN koordinierte **Monitoring der Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert** (High Nature Value Farmland, HNV-Farmland-Monitoring), ein bundesweites Programm, das auf Stichprobenflächen den Zustand und die Entwicklung von Landwirtschaftsflächen erfasst. Das HNV-Monitoring umfasst allerdings nur wenige Arten ausgewählter Organismengruppen (sogenannte Kenntaxa), Indikatoren und Lebensraumtypen in der Agrarlandschaft (BfN 2017c). Im Wald wird deutschlandweit im zehnjährigen Turnus die **Bundeswaldinventur** (BWI) durchgeführt. Koordiniert vom Thünen-Institut für Waldökosysteme und finanziert vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, werden dabei auch besonders geschützte Biotope, FFH-Lebensraumtypen und biodiversitätsfördernde Strukturen erfasst. Das Monitoring von Flächen mit natürlicher Waldentwicklung (Naturwaldreservate, Kernzonen von Nationalparks und von Biosphärenreservaten) wird von verschiedenen forstlichen Forschungsanstalten sowie Nationalparkverwaltungen durchgeführt. Im Süßwasser ist das Monitoring zum

ökologischen Zustand der Fließgewässer und Seen nach der **Wasserrahmenrichtlinie** (WRRL) zu nennen, welche eine Berichterstattung aber nur für Fließgewässer mit Einzugsgebieten größer als 10 km² und für Seen mit einer Fläche größer als 0,5 km² vorsieht, sodass die zahlenmäßig weit bedeutenderen kleineren Oberflächengewässer (Quellen, Quellbäche, kleinere Seen, Sölle, Tümpel, Weiher) nicht berücksichtigt werden, obwohl sie für die Biodiversität eine große Rolle spielen. Im marinen Bereich gibt es mit dem Übereinkommen über den Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets (**Helsinki-Übereinkommen**, HELCOM) und des Nordostatlantiks (**Oslo-Paris-Übereinkommen**, OSPAR) wichtige koordinierte Monitoringprogramme.

Zahlreiche Institutionen führen ein kontinuierliches Monitoring durch und betreuen unter anderem jahrzehntelange Zeitreihen, wodurch es beispielsweise eine umfassende Datenlage zu den Fischvorkommen der Nord- und Ostsee gibt. Daten zur Insektenvielfalt und Populationsentwicklung werden bundesweit und lebensraumübergreifend seit 2019 im **Malaisefallen-Projekt** gesammelt, das in das deutsche **Netzwerk für ökologisch-ökosystemare Langzeitforschung** (LTER-D) integriert ist. Allein für 2019 und 2020 konnten im Malaisefallen-Projekt aus über 1.000 Insektenproben mittels DNA-Metabarcoding über 31.000 Insektenarten nachgewiesen und somit Daten zur Insektenvielfalt und Populationsentwicklung in typischen Lebensräumen gesammelt werden (Buchner et al. 2023). Das LTER-D wird seit 2006 von außeruniversitären Forschungseinrichtungen (u. a. Senckenberg, AWI, IOW), Hochschulen, Nationalparks und Biosphärenreservaten sowie Vereinen getragen. Für urbane Räume gibt es aktuell weder ein standardisiertes Biodiversitätsmonitoring noch eine systematische bundesländerübergreifende Datenhaltung, was deutschlandweite, vergleichende Auswertungen nahezu unmöglich macht. Die Datenlage in urbanen Räumen ist außerdem abhängig von der Stadtgröße und dem Vorkommen von Universitäten. Mit den **Bodendauerbeobachtungsflächen** werden seit Mitte der 1980er-Jahre bestimmte abiotische und biotische Bodenvariablen erfasst, wie z. B. die Populationen von Regenwürmern und die mikrobielle Biomasse. Die Flächen werden vom Umweltbundesamt (UBA) koordiniert, Einrichtung und Betrieb der Flächen wurden dabei zwischen den Ländern abgestimmt, die Erfassungsmethoden und die Datenverfügbarkeit sind jedoch heterogen und noch nicht zentral organisiert. Für die **Umweltprobenbank des Bundes** werden typische Ökosysteme Deutschlands und auch Organismen verschiedener Gruppen, einschließlich des Menschen, regelmäßig be-

probt, wobei auch Non-Target-Screening sowie genetische Methoden zum Einsatz kommen (UBA 2022a).

Neben den bundesweiten Aktivitäten gibt es eine Vielzahl weiterer Monitoringaktivitäten und Erhebungen von Daten zu Biodiversitätstrends auf Ebene der einzelnen Bundesländer, die von den jeweiligen Landesämtern koordiniert werden, z. B. die Ökologische Flächenstichprobe, die durch das Landesamt für Natur, Umwelt- und Verbraucherschutz (LANUV) in Nordrhein-Westfalen umgesetzt wird. In Baden-Württemberg (LUBW) gibt es seit 2006, in Sachsen-Anhalt (LHW) seit 2008 außerdem ein grundwasserfaunistisches Dauermonitoring, um nur ein paar Beispiele zu nennen.

Ein großer Teil der Erfassung von Biodiversität in Deutschland in terrestrischen Lebensräumen erfolgt ehrenamtlich durch verschiedene Fachgesellschaften, z. B. die Deutsche Gesellschaft für Herpetologie und Terrarienkunde (DGHT), das Netzwerk für botanische Vielfalt in Deutschland (NetPhyD e. V.), die Deutsche Gesellschaft für Mykologie e. V. (DGfM), die Gesellschaft deutschsprachiger Odonatologen e. V. (GdO), den Dachverband Deutscher Avifaunisten (DDA), die Gesellschaft der deutschen Koleopterologen (Verzeichnis der Käfer Deutschlands, ColKat), die Arachnologische Gesellschaft (AraGes), die Deutsche Gesellschaft für OrthopteroLOGIE e. V. (DGfO). Weitere Erfassungen erfolgen durch Vereine, wie z. B. den Entomologischen Verein Krefeld, Verbände (z. B. NABU, BUND), Museen, Universitäten (z. B. Vegetationszeitreihen) sowie durch einzelne Expert:innen und engagierte Bürger:innen

(Citizen Science). Das **Monitoring häufiger Brutvogelarten** (MhB) in Deutschland gehört zu den Programmen mit der größten Datentiefe, die auch weitergehende wissenschaftliche Auswertungen erlaubt. Das MhB sowie das Monitoring seltener (MsB) und rastender Wasservögel werden vom Dachverband Deutscher Avifaunisten koordiniert, von überwiegend Ehrenamtlichen durchgeführt und in Zusammenarbeit mit dem BfN sowie den Bundesländern und Wissenschaftler:innen ausgewertet. Um die Standardisierung des MsB weiter voranzutreiben und sukzessiv immer mehr Arten abdecken zu können, wurde 2017 damit begonnen, einfache, bundesweit einheitliche Erfassungsvorgaben für die MsB-Arten abzustimmen und zu etablieren. Dieser Prozess soll kontinuierlich fortgeführt werden. Ein weiteres systematisches und standardisiertes Monitoringprogramm mit starker Einbindung von Bürger:innen ist das **Tagfalter-Monitoring Deutschland**, das vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung und von der Gesellschaft für Schmetterlingsschutz gemeinsam koordiniert wird und einer europaweit standardisierten Vorgehensweise unter dem Dach von Butterfly Conservation Europe folgt.

Eine wichtige Informationsquelle und wissenschaftliche Dokumentationsgrundlage zu Bestandsgröße und Gefährdungsgrad von Tieren, Pflanzen und Pilzen sind die **Roten Listen**. Die rund 650 Autor:innen der verschiedenen Roten Listen sind überwiegend ehrenamtlich tätige Expert:innen, die für die jeweilige Artengruppe alle verfügbaren Bestandsdaten zusammentragen und diese durch Informationen der Naturschutzbehörden der

Tab. 2.1: Auswahl wertvoller Programme/Initiativen von Fachgesellschaften und Verbänden zum Monitoring biologischer Vielfalt, welche von der Beteiligung von engagierten Bürger:innen leben. Es existieren viele weitere Initiativen, die häufig auf Länderebene koordiniert werden.

Programm/Initiative	Fachgesellschaften/ Verbände	Beschreibung	Link
Tagfalter Monitoring Deutschland	GfS	Jährliche Erfassung aller tagaktiven Schmetterlinge entlang von Transekten	www.tagfalter-monitoring.de
Stunde der Gartenvögel/ Wintervögel	NABU	Erfassung aller Vögel am zweiten Maiwochenende bzw. im Januar	www.nabu.de/tiere-und-pflanzen/aktionen-und-projekte/stunde-der-gartenvoegel/
Wildkatzenmonitoring	BUND	Monitoring von Wildkatzen mit Baldrian-Lockstockmethode	https://www.bund.net/themen/tiere-pflanzen/wildkatze/wildkatzenschutz/
Entwicklung einer teilautomatischen Pflanzenbestimmung	flora incognita	Pflanzenbestimmung mit künstlicher Intelligenz	https://floraincognita.de/
OrthopteraWeb	DGfO	OrthopteraWeb bündelt viele in Deutschland verfügbare Heuschreckenfund	dgfo-articulata.de/deutschlandportal
Insektenmonitoring	Entomologischer Verein Krefeld	Erfassung der Insektenvielfalt	www.entomologica.org
Die Citizen Science Plattform		Verschiedene Mitmachformate für interessierte Bürger:innen	www.buergerschaftenwissen.de
naturgucker.de	naturgucker.de gemeinnützige eG	Beobachtungen von Pflanzen-, Pilz- und Tierarten	https://nabu-naturgucker.de/

Länder, der jeweiligen Fachgesellschaften, Sammlungen der Naturkundemuseen und anderen Quellen ergänzen. Die daraus abgeleiteten Bestandsgrößen und -trends werden dann Schätzklassen zugeordnet. Das Rote-Liste-Zentrum koordiniert die Planung und Redaktion der bundesweiten Roten Listen zu mehr als 60 unterschiedlichen Artengruppen und ist zusammen mit dem Bundesamt für Naturschutz (BfN) Herausgeber der Listen.

Die erhobenen Daten zu Biodiversitätstrends von Behörden, Forschungsinstituten, Vereinen, Fachgesellschaften oder Verbänden liefern wertvolle Dokumentationen zu Veränderungen der biologischen Vielfalt und ermöglichen eine Einordnung in Rote-Listen-Kategorien durch Expert:innenvotum. Die räumliche und zeitliche Abdeckung ist jedoch sehr heterogen und weist teils erhebliche Informationslücken in den verschiedenen Lebensräumen und Organismengruppen auf. Für eine statistische und räumlich explizite Auswertung sind sie allerdings in vielen Fällen kaum verwendbar. Letztere erfordert ein systematisches Monitoring der biologischen Vielfalt in Deutschland.

2.1.2 Biodiversitätsdaten – Verfügbarkeit und Defizite

Auch wenn es etliche Monitoringprogramme in Deutschland gibt und neue Initiativen angestoßen werden, so können auch klare Defizite benannt werden, die die Verknüpfung der Daten und eine umfassende wissenschaftliche Auswertung und Vorhersage der gesamten biologischen Vielfalt erschweren. Die wichtigsten Defizite, die auch die Möglichkeit des vorliegenden *Faktencheck Artenvielfalt* begrenzen, seien hier kurz genannt. Sie werden in den einzelnen Kapiteln und in der Synthese spezifischer erläutert und diskutiert.

- **Fehlen eines integrierten nationalen Monitoringprogramms:** Monitoringprogramme können immer nur Teile der Biodiversität abbilden. Idealerweise würden die (wenigen) ausgewählten Beobachtungen in einem gemeinsamen räumlichen und zeitlichen Kontext erfasst, sodass eine umfassende Auswertung mit gemeinsamen Treiberdaten und Stratifizierungsvariablen möglich wird, die in den Abwägungsprozessen der Landschaftsplanung genug Schlagkraft erzielt. Die oben genannten Monitoringprogramme sind hochgradig heterogen in Bezug auf das Untersuchungsdesign (Flächengrößen, Raster, Einmal- vs. Wiederholungsinventuren, Taktung von Inventurintervallen usw.), die Auswahl und Kategorisierung biologischer Taxa, die verwendeten Methoden und die Verfügbarkeit von Treiberdaten. Zusätzliche Heterogenität entsteht durch Verwaltungsstrukturen,

z. B. die föderale Struktur, die unterschiedliche Auslegungen von Inventurvorschriften ermöglicht (z. B. Verwendung unterschiedlicher Habitatdefinitionen im Kontext der FFH-Richtlinie). Synergien der Programme können so nicht entstehen, und gemeinsame Auswertungen sind kaum möglich oder mit hohen Unsicherheiten verbunden.

- **Geringe Datenmobilisierung:** Auch wenn bisher nur wenige Monitoringinitiativen koordiniert und methodisch vereinheitlicht sind, so besteht doch mit modernen statistischen Methoden die Möglichkeit einer quantitativen Post-hoc-Integration (Jansen et al. 2020; Eichenberg et al. 2021; Bowler et al. 2021; Jandt et al. 2022a). Solche Ansätze werden aber dadurch behindert, dass Monitoringdaten und Treiberdaten (s. u.) kaum frei verfügbar sind. Das FFH-Monitoring deckt weder alle Lebensraumtypen ab, noch basiert es auf frei zugänglichen (Roh-)Daten, die Auswertungen über die Kategorien des Erhaltungszustands (günstig, ungünstig-unzureichend, ungünstig-schlecht) hinweg erlauben würden. Die FFH-Daten können aber beim BfN angefragt werden und werden in Abstimmung mit den Ländern zur Verfügung gestellt. Gesellschaften, Verbände und Vereine können nicht verpflichtet werden, ihre Daten der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen. Relevante Daten aus Forschungsprojekten der DFG, der EU und des BMBF werden bislang noch kaum zentral zur Verfügung gestellt, auch wenn sich dies durch die BMBF-Initiative NFDI4Biodiversity und die Änderung in den Begutachtungsverfahren deutlich verbessern wird. Bei der Vielfalt der Akteur:innen ist der Aufwand der Zusammenführung von Daten sehr hoch und erfolgt derzeit eher exemplarisch durch wissenschaftliche Institutionen (z. B. am Deutschen Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) im Rahmen des sMon-Projekts, www.idiv.de/smon).
- **Fehlen von Treiberdaten:** Fehlende Treiberdaten in der erforderlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung erlaubt bislang kaum Ursachenforschung. Biodiversität kann nur gezielt erhalten und gefördert werden, wenn die Ursachen für die Biodiversitätsänderungen bekannt sind. Es fehlen aber oft harmonisierte und hochaufgelöste Daten zu den Treibern, die auf die Biodiversität wirken, oder sie werden zur Auswertung nicht zur Verfügung gestellt (Lichtverschmutzung, Änderungen im Lokalklima, Intensität touristischer Nutzung, Düngermengen, Pestizideinsatz, forstliche Eingriffe, Kalkung usw.).
- **Taxonomischer Fokus/Lebensraumfokus:** Neben Behörden und Forschungsinstituten wird die Biodi-

versitätserfassung in terrestrischen Lebensräumen derzeit in großen Teilen von den ehrenamtlichen Beiträgen von Gesellschaften, Vereinen und Verbänden getragen und ist von den taxonomischen Präferenzen dieser Akteursgruppen geprägt (z. B. Vögel, Säugetiere, Fische, Amphibien, Reptilien und Tagfalter). Die Zahl der Expert:innen mit taxonomischen Kenntnissen nimmt jedoch ab, und der Verlust von taxonomischer Expertise erschwert ein standardisiertes Biodiversitätsmonitoring, unabhängig von den eingesetzten Methoden. Das hat auch zur Folge, dass schwer bestimmbare, schwer zugängliche oder wenig attraktive taxonomische Gruppen, die aber funktionell bedeutsam sind oder hohen Indikatorwert haben, nicht oder wenig berücksichtigt werden. So fehlen insbesondere Biodiversitätserfassungen zu einem Großteil der Bodenorganismen (z. B. Nematoden, Rädertiere, Protozoen, Pilze, Bakterien, Archaeen – um nur einige zu nennen) sowie zu Larvenstadien von Insekten. Trends der für Bestäubungsleistungen essenziellen Insektengruppen wie Nachtfalter, Hymenopteren und Dipteren (Haut- und Zweiflügler) werden nicht oder nur grob über Rote Listen erfasst. So fokussiert das BfN, basierend auf Änderungen im Gefährdungsstatus (vor und nach 1990) und deren Ursachen, auf planungsrelevante Tiergruppen (Günther et al. 2005). Es gibt neben dem Boden noch weitere Lebensräume, die kaum untersucht werden. Hierzu zählen z. B. das Grundwasser und die schwer zugänglichen Baumkronen.

- **Geringe zeitliche Abdeckung:** Bis auf wenige Ausnahmen wie das Vogelmonitoring oder die seit Jahrzehnten durchgeführte Kartierung der Gefäßpflanzen (Florenkartierung) wurden bundesweite Erfassungsprogramme erst in den letzten 10 bis 15 Jahren etabliert, konnten also Veränderungen der Biodiversität, die schon in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts auftraten, nicht erfassen. Die Rekonstruktion und Harmonisierung älterer Datensätze ist sehr aufwendig und bleibt bislang auf einzelne wissenschaftliche Projekte beschränkt (Habel et al. 2014; van Klink et al. 2020; Baranov et al. 2020; Jandt et al. 2022b).

Als Fazit kann festgehalten werden, dass für den Zeitraum, den der *Faktencheck Artenvielfalt* in den Blick nimmt (Kap. 1.3.1), bisher keine über Artengruppen und Lebensräume hinweg standardisierte regelmäßige Erfassung der biologischen Vielfalt existiert, die repräsentative Trend- und Ursachenanalysen ermöglicht. Auch gibt es für den Zeitraum nur wenige Ansätze einer bundesweiten flächendeckenden Mobilisierung, Sichtbar-

machung, Verschneidung und Auswertung der bereits vorhandenen Daten zu Trends und deren Ursachen. Das erschwert die Argumentation in gesellschaftlichen Abwägungsprozessen und die Integration deutscher Monitoringdaten in aktuell in Planung befindliche EU-weite oder globale Monitoringsysteme (z. B. GEO-BON, eLTER). Die Möglichkeiten und Herausforderungen einer europaweiten Integration stellt das laufende EU-Projekt EUROPABON (EuropaBON & iDiv 2022) in den Fokus. Trotz der vielen Herausforderungen zeigen die vorhandenen Daten zahlreiche negative, aber auch einige positive Trends für Deutschland, die dringend einer Absicherung und Kausalanalyse bedürfen. Die ableitbaren Aussagen sind aber durch die Heterogenität der Daten von hoher Unsicherheit geprägt. Nichtsdestotrotz kommt diesen Daten eine besondere Bedeutung zu, weil damit historische Zeitreihen dokumentiert wurden, die auch für ein zukünftiges standardisiertes und integriertes Monitoring eine wichtige Bezugsbasis darstellen.

In den vergangenen Jahren wurden – auch durch richtungsweisende Vorhaben im Koalitionsvertrag der Bundesregierung der 19. Legislaturperiode – wichtige Schritte unternommen, um einige dieser Defizite abzubauen. Mit dem kürzlich gegründeten **Nationalen Monitoring Zentrum für Biodiversität (NMZB)**, das im Januar 2021 unter Leitung des BfN seine Arbeit aufnahm, steht nun eine Institution zur Verfügung, die den Koordinierungsaufwand für die Zusammenführung und Harmonisierung von Monitoringdaten leistet und auch den Aufbau neuer Monitoringprogramme begleitet. Weiterhin gibt es neue Initiativen (primär geleitet vom BfN und UBA), um ein flächendeckendes, harmonisiertes Bodenmonitoring in Deutschland zu etablieren; ein **Bodenmonitoringzentrum** wurde kürzlich vom UBA eingerichtet. Das BMEL plant, unterstützt durch weitere Ressorts, derzeit ein **Nationales Biodiversitätsmonitoring im Wald (NaBioWald)**. Die Planungen hierzu sind noch in den Anfängen. Ein solches Programm würde eine wichtige Lücke füllen. Ein bundesweit harmonisiertes **Biodiversitätsmonitoring für die Agrarlandschaft (MonViA)** ist vom BMEL initiiert worden und derzeit in der Erprobung. Auch wird derzeit ein Monitoring von Habitaten und Arten in allen **Nationalparks** Deutschlands aufgebaut. Im bundesweiten Biodiversitätsmonitoring wird daran gearbeitet, die Synergien verschiedener Monitoringprogramme zu nutzen: Das MhB, HNV-Monitoring, das Ökosystemmonitoring und das Insektenmonitoring werden z. B. auf der gleichen bundesweiten Flächenkulisse durchgeführt. Das Insektenmonitoring, das NNE-Monitoring und das in Planung befindliche NaBioWald verwenden identische

Erfassungsmethoden, um die Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen.

2.1.3 Aktueller Kenntnisstand (und Wissenslücken)

2.1.3.1 Biologische Vielfalt in Deutschland und weltweit

Im *Faktencheck Artenvielfalt* werden alle Facetten der Biodiversität betrachtet. Der Fokus bei den meisten Erfassungen liegt aktuell aber auf der Artenzahl (bzw. Artenvielfalt oder Artenreichtum). Wichtige weitere Facetten der biologischen Vielfalt wie Artenzusammensetzung, Häufigkeitsverteilungen, funktionelle sowie genetische Vielfalt werden im Monitoring wenig oder nicht berücksichtigt. Neue, automatisierte Monitoringmethoden werden konventionelle Methoden nicht ersetzen, aber in entscheidenden Aspekten ergänzen. So wird es möglich, schwer bestimmbare oder kleine Arten zu erfassen und ein weiteres Spektrum von Facetten der biologischen Vielfalt zu erheben (Kap. 2.1.5). Aufgrund fehlender bzw. lückenhafter Informationen zu Populationsgrößen oder genetischer Diversität geben die folgenden Zahlen ein Bild über den aktuell bekannten Artenreichtum Deutschlands. Von den geschätzt derzeit weltweit 1,8 Mio. beschriebenen Tier-, Pflanzen- und Pilzarten (Chapman 2009) sind in Deutschland etwa 72.000 Arten nachgewiesen. Bei den Tierarten machen die Insekten weltweit die größte Gruppe aus, circa 1 Mio. der derzeit etwa 1,28 Mio. beschriebenen Tierarten zählen zur Klasse der Insekten

(IUCN 2014), aber die große Mehrheit ist weiterhin unbekannt, und neuere Schätzungen liegen bei etwa 5,5 Mio. (Stork 2018) oder sogar noch mehr Arten (IPBES 2019a). Von den weltweit ca. 10.000 Vogelarten kommen in Deutschland insgesamt 251 Brutvogelarten vor, des Weiteren 68 überwinternde Arten und 34 durchziehende Vogelarten (DDA 2019). Bezogen auf die Anzahl an Brutvogelarten, gehört Deutschland damit zu den artenreichsten Ländern Mitteleuropas. Etwa 330.000 Pflanzenarten sind derzeit weltweit beschrieben, wovon ca. 282.000 Arten auf die gut untersuchten Farn- und Blütenpflanzen (Gefäßpflanzen) entfallen (IUCN 2014). Der Gesamtbestand an wild lebenden Pflanzenarten in Deutschland wird auf über 9.500 Arten geschätzt und liegt damit im Weltmaßstab im durchschnittlichen Bereich. Zu dieser Gruppe der Pflanzen zählen circa 3.000 Arten an Gefäßpflanzen und mehr als 1.000 Moosarten. Die weltweite Artenzahl von Pilzen wird auf 2,2–3,8 Mio. geschätzt, wovon ca. 150.000 beschrieben sind (Lücking et al. 2020) und von denen etwa 14.000 Arten in Deutschland vorkommen (BfN 2016). Eine systematische Erhebung der Artenvielfalt in Deutschland für Mikroorganismen ist derzeit nicht vorhanden, nur ein Bruchteil der molekularbiologisch identifizierten Bodenmikroorganismen sind valide beschrieben.

2.1.3.2 Erhaltungs- und Gefährdungszustand

Der vierte Nationale FFH-Bericht (Berichtsperiode 2013–2018) ergab, dass 32 % der bewerteten Lebens-

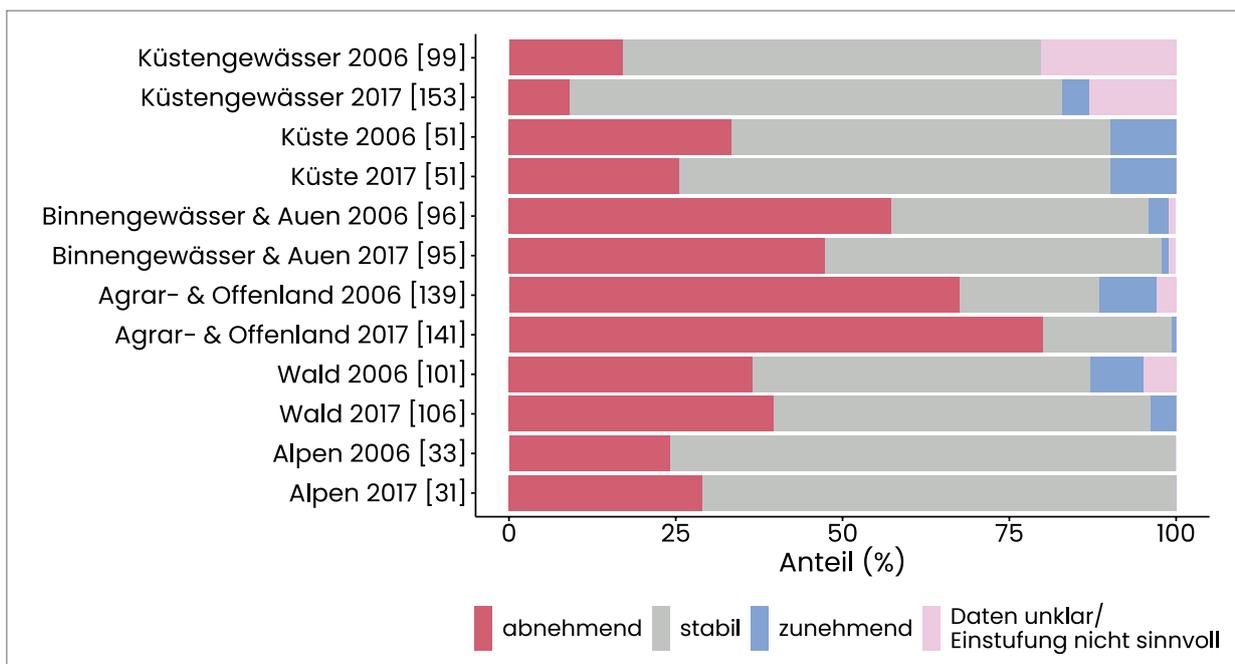


Abbildung 2.1: Vergleich der Entwicklungstendenzen der Hauptgruppen gefährdeter Biotoptypen – Küsten, Gewässer, Offenland, Wälder, Alpen – im Vergleich 2006 und 2017, nach Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands. Modifiziert nach: BfN 2017b. Zahl in eckigen Klammern = Anzahl der Biotoptypen je Hauptgruppe.

raumtypen (LRT) einen ungünstigen bis unzureichenden und 37 % sogar einen ungünstigen bis schlechten Erhaltungszustand aufweisen. Nur für 30 % der bewerteten LRTs wurde ein günstiger Erhaltungszustand nachgewiesen. In den Alpen ist die Situation überwiegend günstig, in Nordwestdeutschland hingegen überwiegend schlecht. Besonders ungünstig ist der Zustand bei den Lebensräumen des Grünlandes, bei marinen und Küstenlebensräumen, Binnengewässern, aber auch bei Mooren, Sümpfen und Gletschern. Überwiegend positiv ist der Zustand nur bei Felsen und Schutthalden (BfN & BMU 2020). Details zu Zustand und Entwicklung der FFH-Lebensraumtypen finden sich in den jeweiligen Lebensraumkapiteln.

Laut Roter Liste der gefährdeten Biotoptypen (BfN 2017b) sind knapp zwei Drittel der in Deutschland vorkommenden Biotope gefährdet, 40 % davon zeigen eine negative Entwicklungstendenz (Abb. 2.1). Besonders dramatisch ist die Entwicklung im Agrar- und Offenland, wo sich die Situation seit der letzten Fassung der Roten Liste von 2006 noch einmal deutlich

verschlechtert hat. Positive Entwicklungen gab es dagegen bei Küstenbiotopen sowie Biotopen der Binnengewässer und Auen. Details zu Zustand und Entwicklung der Biotoptypen finden sich in den jeweiligen Lebensraumkapiteln.

Die flächenmäßige Veränderung der Biotoptypen setzt eine präzise räumliche Dokumentation im zeitlichen Verlauf voraus. Flächendeckend sind diese Informationen für Deutschland aktuell nicht verfügbar. Lüttgert et al. (2022 [Abb. 2.2]) haben die flächenmäßige Veränderung der geschützten Biotoptypen für Baden-Württemberg für die Zeiträume 1989–2005 und 2006–2021 analysiert. Es zeigt sich, dass in Baden-Württemberg alle Biotoptypen des Offenlandes und der Binnengewässer und Auen in ihrer Fläche abnahmen. Lediglich Nadelwälder, was vor allem Forste umfasst, zeigen einen Flächengewinn. Es ist zu betonen, dass diese Veränderungen nicht repräsentativ für ganz Deutschland angesehen werden können, so zeigt beispielsweise die Bundeswaldinventur für Bayern und bundesweit ein gegenteiliges Bild für die Nadelwaldfläche.

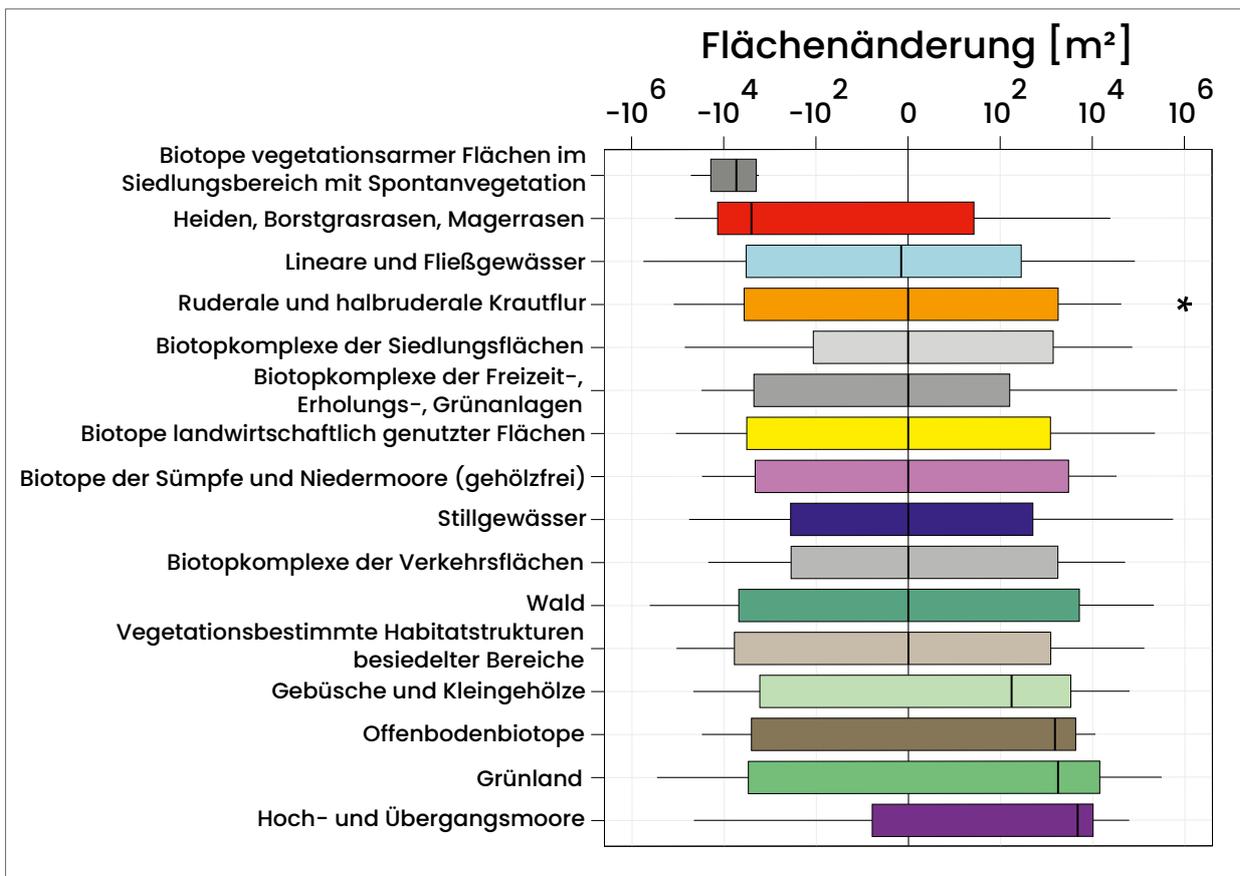


Abbildung 2.2: Flächenänderung in m² zwischen t1 (1989–2005) und t2 (2006–2021) für alle Gruppen von geschützten Biotoptypen in Baden-Württemberg. Die Flächen sind auf einer log₁₀-Skala aufgetragen. Mittlere Unterschiede pro Gruppe sind durch ein Rautensymbol gekennzeichnet. Signifikante Unterschiede gemäß Wilcoxon Signed Rank Tests sind mit einem Sternchen gekennzeichnet. Klammern um ein Sternchen zeigen an, dass eine zusätzliche Analyse, bei der Ausreißer (Beobachtungen, die außerhalb des Bereichs zwischen dem 1. und 99. Perzentil pro Lebensraumtyp liegen) ausgeschlossen wurden, zu einer Umkehrung der Richtung des mittleren Trends führte. Quelle: Lüttgert et al. 2022

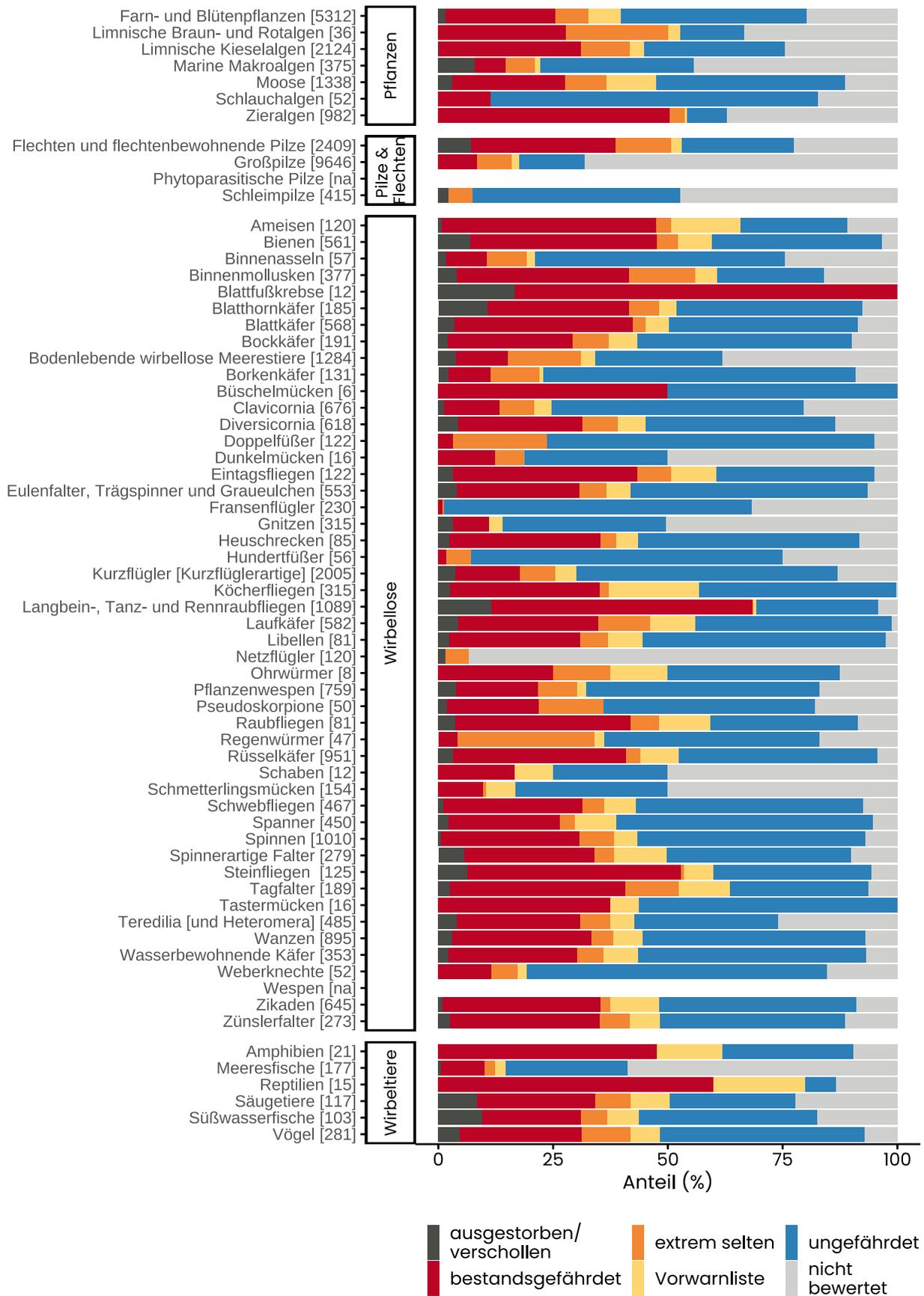


Abbildung 2.3: Gefährdungssituation auf Grundlage der aktuellen Roten Listen der jeweiligen Organismengruppen.

[Die Rote Liste der Wespen von 2011 unterliegt derzeit einer Überarbeitung, und die der phytoparasitischen Pilze wird aktuell von Fachleuten bearbeitet, daher hier jeweils als »na« gekennzeichnet]. Quellen: Haupt et al. 2009; Binot-Hafke et al. 2011; BfN 2011; Becker et al. 2013; Thiel et al. 2013; Grüneberg et al. 2015; Metzging et al. 2018; BfN 2020b; Rote-Liste-Gremium Amphibien und Reptilien 2020a; Rote-Liste-Gremium Amphibien und Reptilien 2020b; Ries et al. 2021.

Von den etwa 72.000 in Deutschland einheimischen Tier-, Pflanzen- und Pilzarten (Großpilze, Schleimpilze und Flechten) wurden rund 30.000 auf ihre Gefährdung hin untersucht und diese in den Roten Listen veröffentlicht. Für Mikroorganismen fehlen Rote Listen generell. Auch wenn dies bedeutet, dass nur etwas mehr als 40 % der bekannten Taxa bewertet wurden, ist dies im globalen Vergleich ein sehr hoher Wert. Fast ein Drittel der in den Roten Listen bewerteten Arten gilt als bestandsgefährdet, d. h., sie sind vom Aussterben bedroht oder stark gefährdet, circa 3 % gelten als ausgestorben (BfN 2016; J. Freyhof [mündl. Mitt.]) (Abb. 2.3).

Etwa 41 % der bewerteten Säugetierarten sind gefährdet (BfN 2020c), 43 % der bewerteten Vogelarten (Ryslavy et al. 2020) sowie 42 % der bewerteten Süßwasserfischarten und -neunaugen (BfN 2023a) und 18 % der Meeresfische und -neunaugen (Thiel et al. 2013). Hier ist zu erwähnen, dass für 22 % der Meeresfische eine Bewertung aufgrund unzureichender Daten nicht möglich war. Zu den am stärksten gefährdeten Tiergruppen zählen unter anderem die Reptilien (69 % gefährdet) und Amphibien (50 % gefährdet; Rote-Liste-Gremium Amphibien und Reptilien 2020a; Rote-Liste-Gremium Amphibien und Reptilien 2020b).

Bei den Wirbellosen sind besonders Arten in den Gruppen der Ameisen (52 %; Seifert 2011), Bienen (48 %; Westrich et al. 2011) und Tagfalter und Widderchen (41 %) gefährdet (Kap. 3.2.2.10; Reinhardt & Bolz 2012). Alle zwölf in Deutschland vorkommenden Blattfußkrebsarten sind gefährdet oder bereits ausgestorben (Simon 2016).

Von den Farn- und Blütenpflanzen gelten 27,5 % (1.000 Arten) als gefährdet (Metzing et al. 2018), in der Gruppe der Moose 25 % der Arten (Caspari et al. 2018). Bei den 1.946 gut untersuchten »echten« Flechten sind besonders viele Arten ausgestorben (7,8 %) oder gefährdet (36,6 %; Wirth et al. 2011). Bei den mehr als 6.000 Arten von Großpilzen gelten 800 Arten als gefährdet, jedoch ist die Datenlage bei rund 50 % der Arten unzureichend für eine Einschätzung (Dämmrich et al. 2016).

Auch in anderen Artengruppen ist die Einschätzung der Gefahrensituation aufgrund der unzureichenden Datenlage nicht möglich, das umfasst beispielsweise 43 % der marinen Makroalgen sowie die prokaryotische Biodiversität (BfN 2016).

Die Bestandsentwicklung ist bei vielen Arten in Deutschland rückläufig (BfN 2016). Vergleicht man die Kriterien »langfristiger Bestandstrend« (die vergangenen 50 bis 150 Jahre) und »kurzfristiger Bestandstrend« (die vergangenen 10 bis 25 Jahre), lassen sich Trendänderungen in den aktuellen Roten Listen ablesen. Für

etwa zwei Drittel der bewerteten Taxa kann die langfristige und kurzfristige Bestandsentwicklung beurteilt werden (Abb. 2.4). Für die übrigen Taxa ist aufgrund der ungenügenden Datenlage derzeit eine Beurteilung der Trends nicht möglich. Zeigen Bestände kurzfristig einen gleichbleibenden Trend oder sogar eine deutliche Zunahme, kann das als Erfolg des Naturschutzes und erfolgreicher Maßnahmen angesehen werden. Einzelne Zunahmen der Populationsgrößen zeigen sich innerhalb der gut dokumentierten Gruppen der Säugetiere, Vögel und Libellen, aber nicht für Arten, die auf seltene oder gefährdete Habitate angewiesen sind.

2.1.3.3 Endemiten und Taxa mit nationaler Verantwortlichkeit

Nach der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt hat Deutschland eine besondere Verantwortlichkeit für die Erhaltung von Arten mit bedeutenden Vorkommen in Deutschland (kurz »Verantwortungsarten«), wozu insbesondere die Endemiten in Deutschland zählen. Bisher wurden 1.524 Taxa (Arten und Unterarten) aus 14 Tiergruppen hinsichtlich der nationalen Verantwortlichkeit und der Anzahl der Endemiten untersucht (BfN 2016). Bei der Gruppe der Pflanzen ist darauf hinzuweisen, dass für derartige Schutzwertanalysen die taxonomische Eigenständigkeit von Sippen berücksichtigt werden sollte (BfN 2002). Unter den Mollusken zählen etwa die vom Aussterben bedrohte Schwäbische Grasschnecke (*Vallonia suevica*) und die stark gefährdete Rhön-Quellschnecke (*Bythinella compressa*) zu den Endemiten (BfN 2012b). Schließt man die sich asexuell fortpflanzenden Populationen sogenannter apomiktischer Arten aus, sind bei den Farn- und Blütenpflanzen 25 Sippen in Deutschland endemisch, beispielsweise das Bayerische Löffelkraut (*Cochlearia bavarica*) mit seinem kleinen Vorkommen im nördlichen Alpenvorland oder das Bodensee-Vergissmeinnicht (*Myosotis rehsteineri*). Einer der wenigen bekannten bodenassoziierten Endemiten Deutschlands ist der Badische Riesenregenwurm (*Lumbricus badensis*; [BfN 2021a]). Es ist zu erwähnen, dass auch im Grundwasser zahlreiche Endemiten und kryptische Arten vorkommen. Eine Auswertung der grundwasserfaunistischen Daten bezüglich ihrer Endemiten gibt es für Deutschland jedoch bislang nicht (Hans Jürgen Hahn, mündl. Mitt.). Allgemein ist Deutschland im Gegensatz zu südeuropäischen Ländern vergleichsweise arm an Endemiten, so sind beispielsweise in Spanien 700 endemische Gefäßpflanzen bekannt (Moreno Saiz, Lozano & Ollero 2003). Für 161 Taxa von Tierarten trägt Deutschland eine besondere Verantwortung. Von den bewerteten Taxa sind sieben Endemiten, die

alle zu den Süßwasserfischen zählen, wie die Fontane-Maräne (*Coregonus fontanae*) in Brandenburg und die Chiemsee-Renke (*Coregonus hoferi*) im bayerischen Alpenvorland. Schwerpunktorkommen in Deutschland haben beispielsweise die Gelbbauchunke (*Bombina variegata*) und die Plumpschrecke (*Isophya kraussii*). Zu den 16 Säugetierarten nationaler Verantwortlichkeit

zählen beispielsweise der Gartenschläfer (*Eliomys quercinus*), die Wildkatze (*Felis silvestris silvestris*), die Bayerische Kurzhohrmaus (*Microtus bavaricus*) und zahlreiche Fledermausarten (BfN 2021a). Auf der Liste der Verantwortungsarten der Vögel finden sich unter anderem die Trauerente (*Melanitta nigra nigra*) und der Rotmilan (*Milvus milvus*).

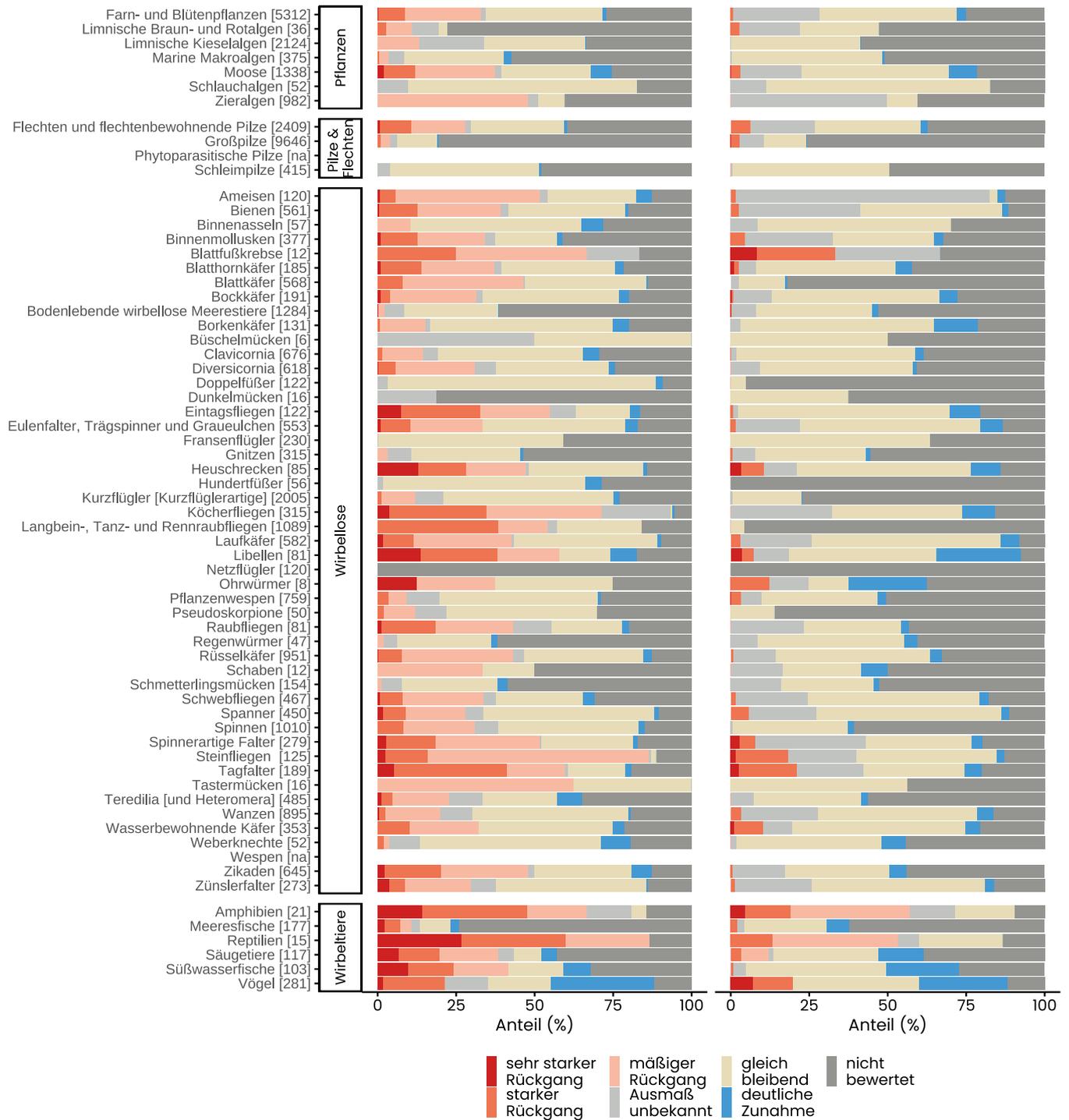


Abbildung 2.4: Langfristige (links) und kurzfristige (rechts) Bestandssituation auf Grundlage der aktuellen Roten Listen der jeweiligen Organismengruppen. Die Rote Liste der Wespen von 2011 unterlag zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Grafik einer Überarbeitung, und die der phytoparasitischen Pilze wurde von Fachleuten bearbeitet, daher hier jeweils als »na« gekennzeichnet.

Quellen: Haupt et al. 2009; Binot-Hafke et al. 2011; 2011; Becker et al. 2013; Thiel et al. 2013; Grüneberg et al. 2015; Gruttke et al. 2016; Metzging et al. 2018; Rote-Liste-Gremium Amphibien und Reptilien 2020a; Rote-Liste-Gremium Amphibien und Reptilien 2020b; Ries et al. 2021.

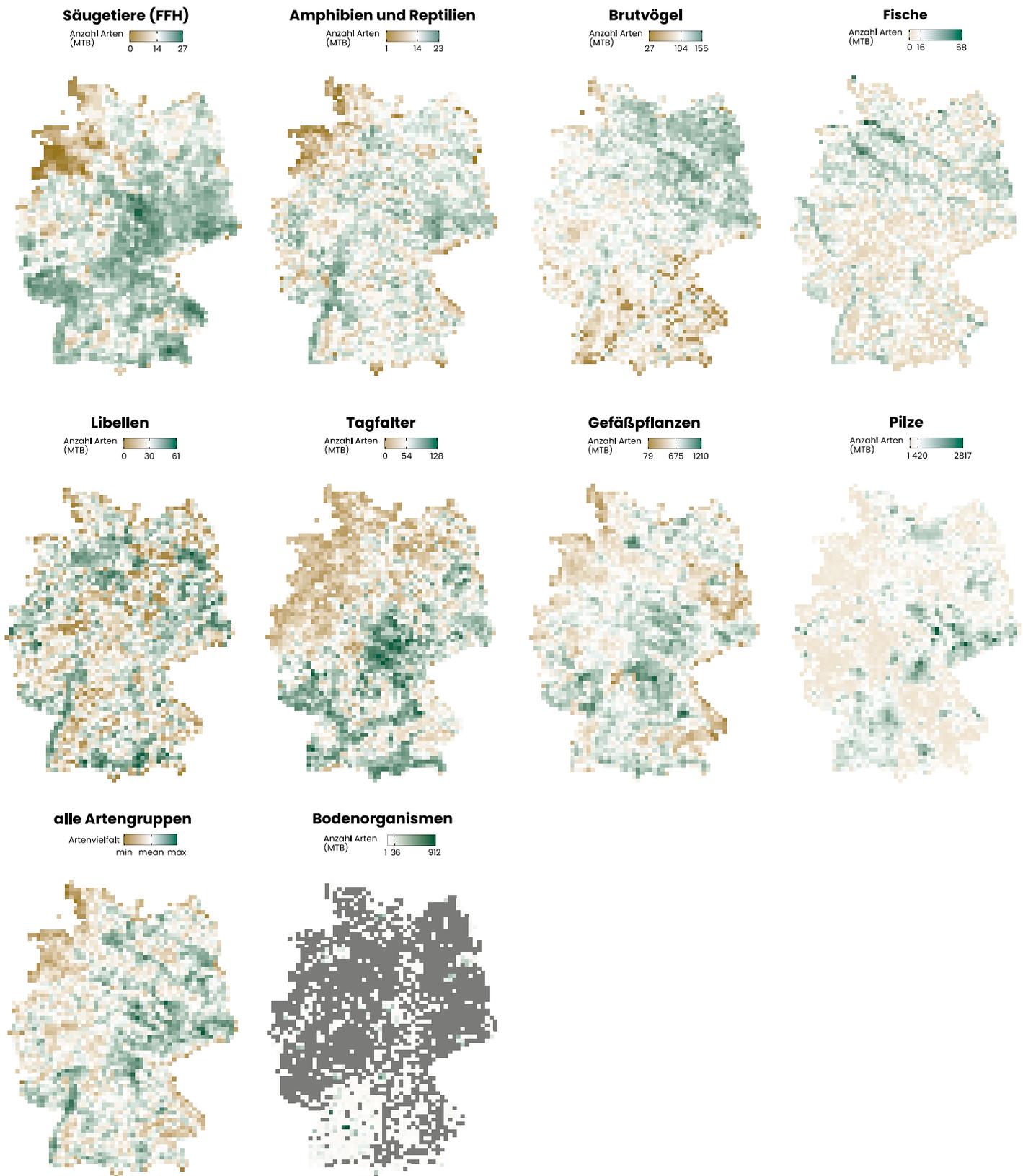


Abbildung 2.5: Verteilung der Arthäufigkeiten auf Messtischblattskala für die verschiedenen Organismengruppen sowie die vorab skalierte und dann aufsummierte Verteilung der Arthäufigkeiten aller Artengruppen mit Ausnahme der Bodenorganismen. Messtischblätter mit geringer Artenzahl sind braun und jene mit hoher Artenzahl grün dargestellt. Messtischblätter mit fehlender Information sind grau.

Quellen: Atlas Deutscher Brutvogelarten (www.dda-web.de/voegel/voegel-in-deutschland); GfI-Fischartenatlas (www.biodiv-atlas.de/fische/#!/browse); FFH-Bericht 2019 BfN (www.bfn.de/ffh-bericht-2019#anchor-2818); Verbreitungsatlas der Amphibien und Reptilien Deutschlands (www.feldherpetologie.de/atlas/); Gesellschaft deutschsprachiger Odonatologen e.V. (www.libellula.org/); Tagfalteratlas (www.ufz.de/tagfalter-atlas/); FlorKart Florenkartierung Gefäßpflanzen (www.bfn.de/floristische-kartierung); Deutsche Gesellschaft für Mykologie e. V. (www.dgfm-ev.de/), Edaphobase Datenbank Bodenzologie (<https://portal.edaphobase.org/>).

2.1.3.4 Hotspots der biologischen Vielfalt in Deutschland

Anhand bundesweit vorliegender Daten wurden 30 Hotspots der biologischen Vielfalt in Deutschland ermittelt (BfN 2012a). Die 30 Hotspots, welche einen besonderen Reichtum charakteristischer Lebensräume, Tier- und Pflanzenarten aufweisen, finden sich in ganz Deutschland – von der Ostsee (»Usedom und Ostvorpommersche Küste«) bis zu den Alpen (»Allgäuer Alpen«) – und nehmen zusammen etwa 11 % der Fläche Deutschlands ein. Als Grundlage für die Ermittlung der Hotspots dienten bundesweit vorliegende Daten zum Vorkommen verschiedener Artengruppen.

An die Arbeit von Ackermann & Sachteleben (BfN 2012a) anknüpfend, haben wir den Kontakt zu den Fachgesellschaften und weiteren Fachleuten verschiedener Organismengruppen aufgebaut und Informationen zur Artenvielfalt, basierend auf den Artenzahlen je Gruppe, zusammengetragen (Abb. 2.5). Dank ihrer langjährigen, häufig ehrenamtlichen Monitoringtätigkeiten haben diese Expert:innen für Deutschland hiermit eine essenzielle Datengrundlage zusammengetragen. Wir sind uns potenzieller Vorbehalte gegenüber der Aussagekraft dieser Daten bewusst (ausschließlicher Fokus auf Artenzahlen, mangelnde Flächenrepräsentativität, Beobachter:innenbias, Monitoringbias). Wir möchten jedoch betonen, dass diese Darstellung der Verteilung der Artenvielfalt einen sehr guten Ein- und Überblick über die Artenvielfalt Deutschlands gibt. Für Brutvögel sind das Nordost- und das Nordwestdeutsche Tiefland die artenreichsten Großlandschaften (DDA 2014). Für die Libellen zeigt sich kein klares Häufigkeitsmuster. Die Tagfaltervielfalt ist, ähnlich der Pflanzenvielfalt, im Norddeutschen Tiefland geringer als in den Mittelgebirgs-, Voralpen- und Alpenregionen. Insgesamt bestätigt die Aufsummierung über alle von uns erfassten Artengruppen die von Ackermann & Sachteleben (BfN 2012a) beschriebenen Muster. Darüber hinaus ist aber auch der vergleichsweise höhere Artenreichtum Ostdeutschlands auffällig sowie Hotspots entlang der großen Flusstäler und in den Trockengebieten.

Die Datengrundlage zu räumlichen Mustern der Verbreitung von Bodenorganismen ist noch unzureichend, wobei mittlerweile Datenbanken und Monitoringprogramme für bodenassoziierte Organismengruppen häufiger werden (Kap. 8.1.1 und 8.2.2).

2.1.4 Literatur- und Datenanalyse von Trends der biologischen Vielfalt

Für den *Faktencheck Artenvielfalt* wurde über die verschiedenen Lebensräume eine vergleichende Literatur-

analyse durchgeführt. Es wurde dabei englischsprachige und deutschsprachige Literatur berücksichtigt. Englischsprachige Literatur wurde gemäß den Empfehlungen für systematische wissenschaftliche Untersuchungen in der Ökologie (Gusenbauer & Haddaway 2020; Foo et al. 2021) im Web of Science und in Scopus gesucht. Um gezielt auf die Biodiversität abzielen, wurden passende Schlagwörter im Bereich der Biodiversität, des Lebensraumtyps und der Region definiert. Die vollständigen Jahresindizes einer Liste von relevanten deutschsprachigen Zeitschriften wurden anhand der Überschriften nach potenziell relevanten Artikeln durchsucht (Anhang A2.2). Forschungsberichte wurden u. a. über die Webseiten von UBA, BfN, des Thünen-Instituts sowie über die Webseiten der Landesumweltämter und weiterer länderspezifischer Behörden identifiziert. Zudem wurden Recherchen über Google und Google Scholar durchgeführt, um relevante Publikationen aus dem deutschsprachigen Raum zu identifizieren. Weitere Quellen bestanden z. B. in ausgewählten akademischen Abschlussarbeiten (Bachelor-/Masterarbeiten und Dissertationen). Weitere relevante Artikel wurden während des Schreibprozesses durch die Autorenschaft ergänzt. Hinzu kam die statistische Auswertung von vorhandenen Monitoringdaten und Daten aus Wiederholungsstudien. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik sowie eine Liste der analysierten Artikel und Datensätze finden sich in Anhang A2.1.

Ziel der Analyse war es, das Literaturwissen zu zeitlichen Biodiversitätstrends zu extrahieren und ein räumlich explizites, möglichst umfassendes Bild der vorhandenen Datenlage zu gewinnen, das über eine reine Expert:inneneinschätzung hinausgeht. Es ist zu betonen, dass es nicht »das eine« Maß für biologische Vielfalt gibt, sondern die biologische Vielfalt mit verschiedenen Maßzahlen (bspw. Artenzahl, Biomasse, Artenzusammensetzung) bestimmt werden sollte (Sinclair et al. 2024). So zeigen van Klink et al. (2023) für terrestrische Insekten und Haase et al. (2023) in Fließgewässern die Komplexität der zeitlichen Veränderungen von »biologischer Vielfalt« durch die Untersuchung mehrerer sich günstig ergänzender Metriken. Aufgrund der hohen Variabilität zwischen Arten und Lebensräumen konnte bislang keine der genannten einzelnen Untersuchungen, auch wenn sie auf langen Zeitreihen, aggregierten Daten oder Kartierungen beruhen, ein Gesamtbild über Biodiversitätsänderungen in Deutschland liefern. Der *Faktencheck Artenvielfalt* geht einen wichtigen Schritt, diese Lücke zu schließen.

Anders als bei den Rote-Liste-Trends, die Populationsentwicklungen einzelner Arten in den Blick nehmen,

fokussiert diese Analyse auf Facetten der biologischen Vielfalt von Lebensgemeinschaften (Artenzahl, Häufigkeiten und »Effektive Artenzahl«, die die Häufigkeitsverteilung von Arten einer Gemeinschaft berücksichtigt).

Wir kategorisieren die Biodiversitätsmaße in drei größere Gruppen:

- **Artenzahl** ist die präsenz-basierte Anzahl unterschiedlicher Taxa, unabhängig von ihrer Dominanz oder Seltenheit. Für Organismengruppen, die mehrfach im Jahr gemessen werden, wurden die Artenlisten jahrweise zusammengefasst, da uns die Langzeittrends und nicht die saisonalen Entwicklungen interessieren. Von Zeitreihen, die aus der Literaturanalyse stammen, wird der Trend so übernommen, wie er in der jeweiligen Publikation beschrieben wurde, von denen, die auf Rohdaten basieren, wird der zeitliche Trend der log-transformierten Artenzahl errechnet.
- Eine Reihe von Diversitätsmaßen bezieht die relative Abundanz der Arten in den Lebensgemeinschaften mit ein. Indizes wie Shannon, Simpson oder die Serie der Hill-Numbers sind weit verbreitet. Während in der Literaturanalyse die jeweils angegebenen Maße benutzt werden, wird für die Analyse der vorliegenden Daten die Effektive Artenzahl (**Effective Number of Species, ENS**) als Diversitätsmaß verwendet. ENS ist weniger als andere Maße durch Unterschiede bei der Probenahme, der Größe des Artenpools und räumlicher Aggregation von Individuen beeinflusst (Chase & Knight 2013). Zur Vereinfachung der Darstellung werden in der Darstellung alle dominanzbezogenen Diversitätsmaße unter der Rubrik ENS dargestellt.
- Unabhängig von der Artenzahl und Diversität kann sich auch die Individuenzahl oder die Biomasse in einem Lebensraum verändern. Dabei ist für verschiedene Organismengruppen die Angabe von Abundanz oder Biomassen per Art oft eine logische Folge der Biologie bzw. des Monitoringansatzes. Dennoch wird beides, die Gesamtbiomasse und die gesamte Abundanz (pro Flächenmaß oder Volumen), hier gemeinsam als **Abundanz** vorgestellt. Auch wenn die Maße zwischen den verschiedenen Zeitserien differieren, so sind diese innerhalb der jeweiligen Zeitserien konsistent.

Insgesamt wurden 15.272 Zeitreihen zu Biodiversitätstrends aus Literatur und Datenerhebungen zusammengetragen (Stand 19.12.2023). Zur Auswertung der zeitlichen Biodiversitätstrends nutzen wir die Methode des Weighted Vote Count (gewichtete Stimmzählung). Beim

Vote Count wird jeder einzelnen Studie oder jedem Datensatz ein bestimmtes Ergebnis zugewiesen und dann der prozentuale Anteil der Stimmen für jedes Ergebnis angegeben. Anstelle einer einfachen Mittelwertbildung werden im *Faktencheck Artenvielfalt* die Stimmen beim Weighted Vote Count nach der Anzahl der Beobachtungsjahre gewichtet. Dadurch erhalten Studien mit einer größeren Anzahl an Beobachtungsjahren ein stärkeres Gewicht. Die zeitlichen Trends werden dann den Kategorien positiv, negativ, neutral, negativ zu positiv (Zunahme nach vorheriger Abnahme) und positiv zu negativ (Abnahme nach vorheriger Zunahme) zugeordnet. Für die Literaturanalyse wird dies aus den Schlussfolgerungen der Artikel übernommen, für die Datenanalyse erfolgt die Zuordnung anhand der statistischen Analyse von linearen und nicht linearen Regressionen.

Während die Roten Listen vor allem detaillierte Informationen zu Einzelarten verschiedener Organismengruppen liefern, findet die Auswertung des Weighted Vote Count ausschließlich auf Ebene der Hauptgruppen (Pflanzen, Pilze & Flechten, Wirbeltiere, Wirbellose) statt. Eine detaillierte Aufschlüsselung nach Organismengruppen erfolgt dann jeweils in den Lebensraumkapiteln.

Es ist ferner zu berücksichtigen, dass die Zeitreihen nur einen Ausschnitt der Biodiversitätsveränderung darstellen können, weil auf stark degradierten oder verschwundenen Habitatflächen ein Monitoring normalerweise nicht weitergeführt wird. Extreme Verschlechterungen werden so nicht erfasst, obwohl sie vielerorts auftreten. Für ein vollständigeres Bild von Biodiversitätsveränderungen müsste die Umwandlung von Flächen oder Flächenanteilen einzelner Habitattypen einbezogen werden, was aber außerhalb der Möglichkeiten des *Faktencheck Artenvielfalt* lag.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass mehrere Gründe dazu führen können, dass im Weighted Vote Count mehr positive Trends zu finden sind, als es die Roten Listen für die Organismengruppen widerspiegeln. Zum einen gibt es bei Monitoringdaten einen statistischen Bias hin zu positiven Trends der Artenzahl, weil die Detektionswahrscheinlichkeiten für lokale Aussterbe- und Einwanderungsereignisse nicht gleich sind. So wird ein lokales Einwandern von neuen Arten in der Regel eher festgestellt als ein Aussterben an vorhandenen Arten. Dadurch entsteht ein temporäres Ungleichgewicht zugunsten von neu hinzukommenden Arten, das erst nach Jahrzehnten abnimmt und daher einen positiven Trend vortäuscht. Zudem stammt eine Vielzahl der Studien, die in den Weighted Vote Count eingegangen sind, aus Habitattypen, die im Fokus des

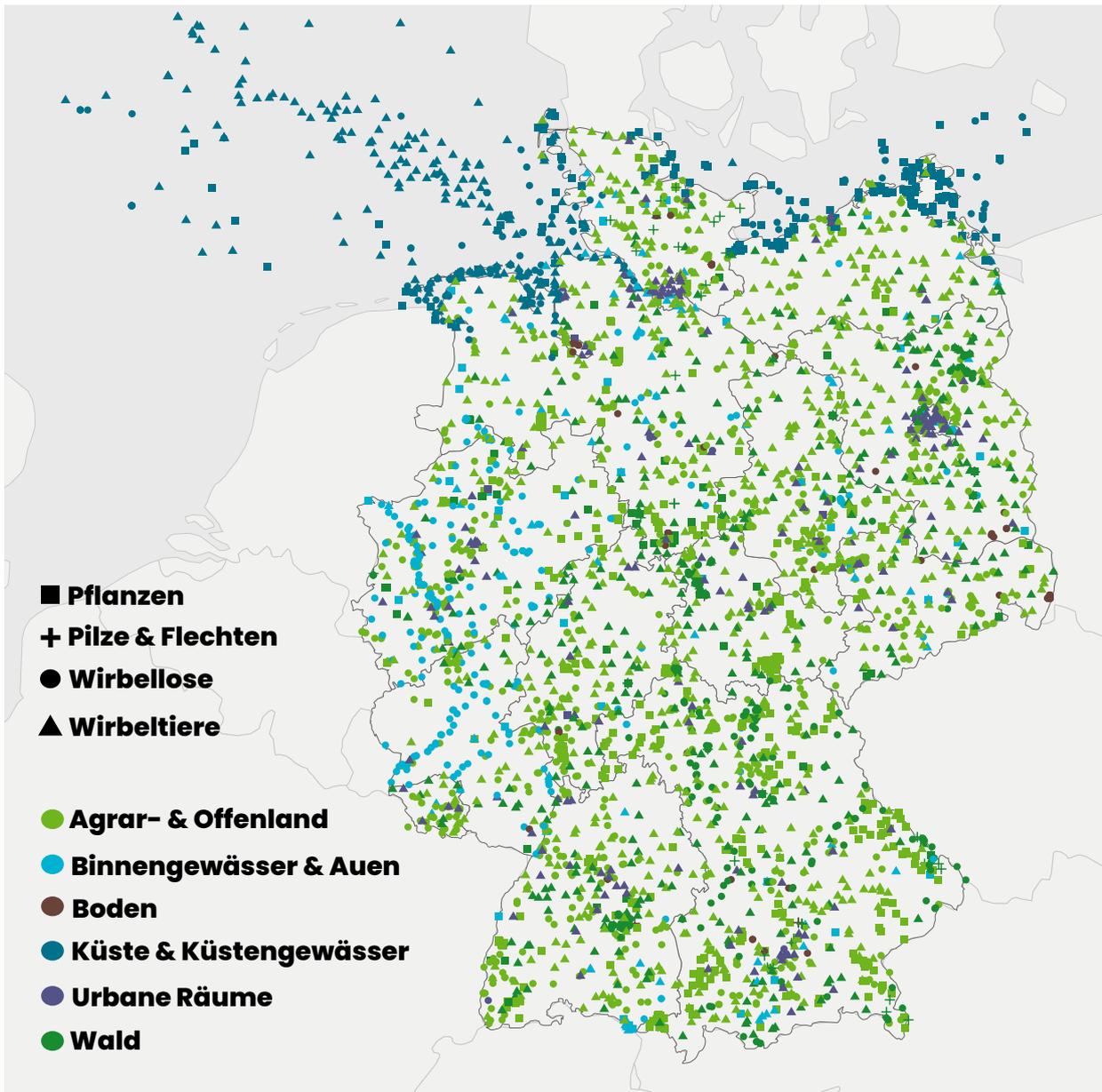


Abbildung 2.6: Geografische Lage der Untersuchungsorte zu Biodiversitätstrends, extrahiert aus Literatur, Monitoringdaten und Wiederholungsstudien. Die Farbe steht für den Lebensraum und die Form für die Organismengruppe, wobei an einigen Standorten mehr als eine Organismengruppe untersucht wurde.

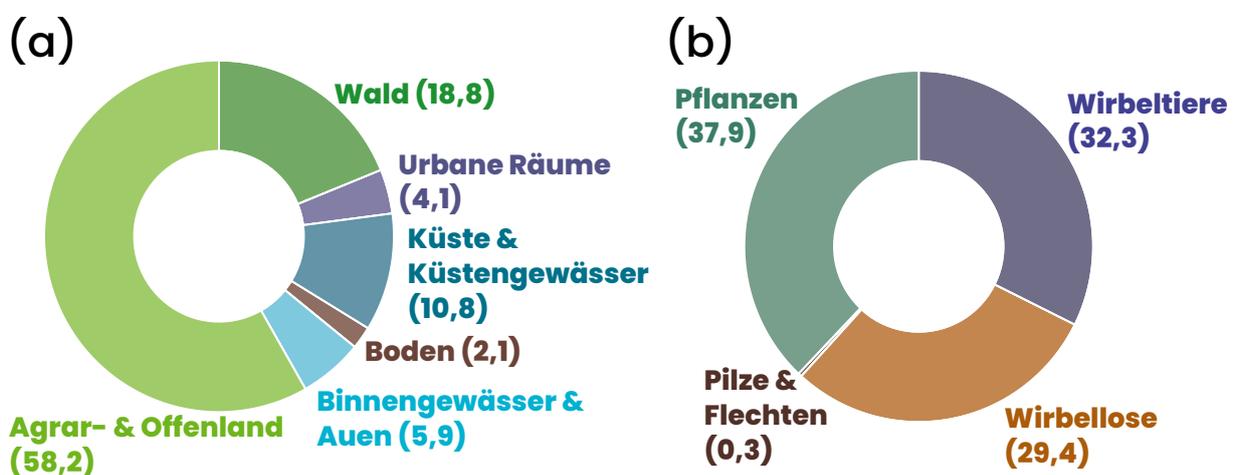


Abbildung 2.7: Prozentuale Verteilung der Trends, die in den WVC eingegangen sind, auf die (a) Lebensräume und (b) Organismengruppen

Naturschutzes stehen, in Naturschutzgebieten durchgeführt wurden oder Untersuchungen des Erfolgs einer bestimmten durchgeführten Maßnahme dokumentieren. Diese Informationen zu Schutzstatus bzw. durchgeführten Maßnahmen wurden gemeinsam mit den Trendangaben aus der Literatur extrahiert, werden aber in dieser Gesamtübersicht nicht differenziert, da diese Informationen nicht für alle Datensätze zugänglich waren und deshalb nicht in die Analyse einbezogen werden konnten. Das bedeutet, dass jegliche Analysen aus dem Weighted Vote Count stets mit einer möglichen positiven Überschätzung von Trends einhergehen. Ebenso ist zu beachten, dass die Datenlage stark zwischen den einzelnen Lebensraumtypen, Organismengruppen und Regionen variiert und somit nicht repräsentativ für die Gesamtzahl an Arten und Biotopen in Deutschland ist (Abb. 2.6, 2.7).

Bei der Bewertung der Ergebnisse des WVC ist zu beachten, dass die Grunderwartung bei einer neutralen Entwicklung der Biodiversität nicht ein neutraler Trend, sondern ein transienter Anstieg der Biodiversität ist. Die Hintergründe und Simulationen hierzu finden sich publiziert (Kuczynski, Ontiveros & Hillebrand 2023). Zusammengefasst erfasst das Monitoring die Einwanderung und das lokale Aussterben von Arten, wobei in einer neutralen Situation die gesamte Zahl an Einwanderungen und Aussterbeereignissen gleich ist. Allerdings finden die beiden Prozesse nicht zeitgleich statt, da Aussterben ein langwieriger Prozess ist, der zudem oft erst durch die Einwanderung neuer Arten ausgelöst wird. Diese zeitliche Verzögerung des Artverlustes ist als Extinction Debt bekannt (Tilman & Downing 1994), im Kontext von Zeitreihenanalysen bedeutet es jedoch, dass Einwanderungen oft vor den Aussterbeereignissen auftreten und die Biodiversität in einer transienten Phase zunächst ansteigt, da die relative Zahl an Einwanderungen, die der Aussterbeereignisse solange übersteigt, wie veränderte Umweltbedingungen weitere Einwanderungen erlauben. Kuczynski, Ontiveros & Hillebrand (2023) zeigten durch Simulationen, dass diese transiente Phase mehrere Jahrzehnte andauern können und damit länger als die mediane Dauer der im WVC analysierten Zeitreihen. Für die Bewertung der Ergebnisse des WVC ist es daher von zentraler Bedeutung, diesen Bias zu positiven Trends zu berücksichtigen: Eine ausgeglichene Balance zwischen ansteigenden und abnehmenden Trends der Biodiversität ist kein Grund zur Entwarnung, da neutrale und negative Trends eine negative Abweichung von der Erwartung eines positiven Trends sind.

Über alle Lebensraumtypen hinweg waren insgesamt 64 % der Trends für alle drei untersuchten Biodiversi-

tätsmaße nicht signifikant (= neutral). Die Auswertung zeigt, dass für 85 % der kurzen Zeitreihen (< 5 Jahre Länge) keine Änderungen gefunden werden konnten, während bei Zeitreihen von einer Länge von mindestens 15 Jahren 45 % einen signifikanten (= positiven oder negativen) Trend aufwiesen. Über alle Lebensräume und Organismen hinweg überwogen bei den langen Zeitreihen die negativen Trends (24 %) die positiven Trends (19 %). Bei Zeitreihen von einer Länge von mindestens 20 Jahren war das Verhältnis positiv = 19 %, negativ = 22 %, neutral = 59 %, und bei Zeitreihen von einer Länge von mindestens 30 Jahren war das Verhältnis positiv = 21 %, negativ = 24 %, neutral = 55 %.

Trotz der Komplexität der zugrunde liegenden Biodiversitätsdaten spiegeln die Ergebnisse des Weighted Vote Count durchaus die Einschätzungen von Expert:innen der jeweiligen Lebensräume wider, zeigen aber auch klare Datenlücken zu zahlreichen Gruppen auf, für die keine (ausreichenden) Daten vorliegen. Lebensraum-spezifische Auswertungen finden sich in den jeweiligen Lebensraumkapiteln.

Eine lebensraumübergreifende Auswertung wurde im Rahmen des *Faktencheck Artenvielfalt* ebenfalls durchgeführt, Informationen dazu finden sich in Anhang A2.1.

2.1.5 Neue Methoden

Der weitaus größte Teil der Ergebnisse, die im *Faktencheck Artenvielfalt* zusammengefasst werden, entstammt konventionellen Erfassungen der biologischen Vielfalt, z. B. Vegetationsaufnahmen bei Feldbegehungen oder Zählung von größeren Meerestieren bei Überfliegungen. Solche konventionellen Erfassungen sind auch in Zukunft aus verschiedenen Gründen essenziell. Sie werden aber durch automatisierte Methoden in wichtigen Aspekten ergänzt. In der letzten Dekade hat die digitale und molekulare Revolution der Wissenschaft vielfältige Möglichkeiten für eine automatisierte Erfassung von biologischer Vielfalt eröffnet. Eine ausführliche Diskussion über Potenziale und Herausforderungen für Deutschland findet sich jeweils in Wägele et al. (2022) und Zeuss et al. (2023).

Genetische Methoden

DNA-Barcoding ist eine Methode zum Nachweis von Arten anhand von definierten Genfragmenten (sog. Markergenen) (Geiger et al. 2016; Rduch & Peters 2020). Man spricht von Metabarcoding, wenn dies aus einer einzigen Probe heraus für viele Arten gleichzeitig erfolgt (Pawlowski et al. 2018). Für die Erfassung und das Monitoring von biologischer Vielfalt ist vor allem das Me-

tabarcoding relevant. Bei den Proben unterscheidet man zwischen Bulk-Proben, die überwiegend die Zielorganismen selbst enthalten (z. B. Insektenfänge aus Malaisefallen; Buchner et al. 2023) und Umwelt-DNA-Proben (englisch eDNA für *environmental*), in denen in einer Matrix einer Umweltprobe Spuren von DNA der Zielorganismen enthalten sind, z. B. von Fischen oder Makroinvertebraten in Wasserproben (Hering et al. 2018; Leese et al. 2021; Ohnesorge et al. 2023), von Insekten an Pflanzenproben (Krehenwinkel et al. 2022), von Pilzen in Bodenproben (Lofgren & Stajich 2021) oder von Insekten in Luftproben (Roger et al. 2022).

Die Analyse solcher Proben umfasst als wesentliche Schritte die Konservierung, die Probenvorbereitung, die Extraktion der relevanten DNA-Fragmente, deren Vervielfältigung mit der PCR-Methode (Polymerase-Kettenreaktion), ihre Sequenzierung und schließlich die Auswertung. Letztere enthält neben verschiedenen Qualitätskontrollen den Abgleich mit Genbibliotheken, in denen Gensequenzen für bekannte Arten hinterlegt sind (Leese et al. 2023). Für jeden dieser Schritte gibt es je nach Probentyp unterschiedliche Verfahrensweisen, deren Kombinationen das Endergebnis maßgeblich beeinflussen können. Für die Anwendung von Metabarcodingmethoden ist daher eine Standardisierung (Vereinheitlichung) zwingend erforderlich, z. B. durch Festlegung von internationalen Normen sowie eine Qualitätssicherung mit Zertifizierung von Laboren. Handlungsempfehlungen hierfür sind unter der Federführung des Bundesamts für Naturschutz erarbeitet worden (Leese et al. 2023). Diese Publikation gibt auch einen Überblick zu laufenden internationalen Standardisierungsprojekten sowie zur Spezialisierung und Qualität verschiedener Genbibliotheken.

Wie jede Methode hat auch das DNA-Metabarcoding seine Herausforderungen und prinzipiellen Begrenzungen. Es kann aus verschiedenen Gründen zu Fehlbestimmungen kommen. Die Artenlisten des Metabarcodings müssen daher derzeit von Expert:innen halb automatisch auf Stimmigkeit (Plausibilität) überprüft werden. Dabei werden Artbestimmungen aus deutlich anderen Lebensräumen oder fernen biogeografischen Regionen (z. B. »Hochgebirgsarten« in Proben aus Norddeutschland) herausgefiltert. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass auch die herkömmliche morphologische Artbestimmung nicht fehlerfrei erfolgt und deren Fehlerrate angesichts der abnehmenden taxonomischen Expertise (Löbl et al. 2023) vermutlich steigen wird. Direkte Vergleiche anhand derselben Proben zeigen für Insekten eine Übereinstimmung von 55 % (Rommel et al. 2024). Etwa 20 % der Arten konnten nur mit einer der beiden Methoden

(morphologische Bestimmung oder Metabarcoding) gefunden werden. Das Metabarcoding weist geringere Detektionsraten für kleine und seltene Arten auf. Die Standardisierung steht vor der Herausforderung, dass die Methodenentwicklung rasant fortschreitet und die Genbibliotheken noch ständig an Umfang zunehmen, insbesondere für viele Gruppen der Wirbellosen und für Algen. So könnte allein durch den Methodenfortschritt im Laufe der nächsten Jahre die verbesserte Auffindbarkeit von Arten eine Zunahme an biologischer Vielfalt suggerieren. Für die Planung eines Langzeitmonitorings ist es daher notwendig, dass nicht nur die Sequenzdaten nach FAIR-Prinzipien hinterlegt, sondern die Organismenproben selbst archiviert werden, damit solche methodischen Verzerrungen im Nachgang quantifiziert werden können. Metabarcodingmethoden weisen primär das Vorkommen von Arten nach, nicht deren Häufigkeiten. Änderungen der Biodiversität kündigen sich aber zunächst in Verschiebungen der relativen Häufigkeiten an. Auch die absolute Häufigkeit von Arten ist ein wichtiger Indikator für den Zustand von Ökosystemen (Pereira et al. 2013). Methoden sind in Entwicklung, um aus der Häufigkeit der nach der Vervielfältigung durch die PCR gelesenen Sequenzen einer Art in der Metabarcoding-Analyse (*Reads*) Rückschlüsse auf die relativen Häufigkeiten von Arten in einer Probe ziehen zu können. Ein Vergleich von gemessenen Häufigkeiten mit der Anzahl von *Reads* zeigt am Beispiel von Fischen einen statischen Zusammenhang, der allerdings nicht stark ausgeprägt ist (Elbrecht et al. 2018) und seltenere Arten nicht gut abbildet (Skelton, Cauvin & Hunter 2023). Ein Grund für diese Unschärfe liegt unter anderem darin, dass die Teilschritte der Methode Gensequenzen mit unterschiedlicher Empfindlichkeit auffinden und vervielfältigen. Neuere Ansätze modellieren z. B. das selektive Verhalten der PCR, um diese Verzerrungen in der Analyse zu verringern (Shelton et al. 2023).

Die Nutzung von Umwelt-DNA muss mit dem Problem umgehen, dass DNA über weite Strecken über die Luft und insbesondere in Fließgewässern verdriftet werden kann (Shogren et al. 2017), sodass eine genaue Lokalisierung der Herkunft oft nicht möglich ist. Bei der Probenahme und im Laborprozess kann es zu Kontaminationen kommen, die durch möglichst sauberes Arbeiten minimiert werden müssen (Hutchins, Simantel & Sepulveda 2022). Einen guten Überblick methodischer Herausforderungen geben Wägele et al. (2022).

Die Vorteile des Metabarcodings liegen auf der Hand. Typischerweise werden durch diese Methode deutlich mehr Arten gefunden als mit herkömmlichen morphologischen Methoden (z. B. Elbrecht et al. 2018). Dies hat

verschiedene Gründe, u. a. die höhere Trennschärfe für kryptische oder schwer unterscheidbare Schwesterarten (Dark Taxa) und das Auffinden von Spuren von Arten in Umwelt-DNA, die aufgrund ihrer Seltenheit oder ihres Verhaltens schwer gefangen werden können (Hidden Biodiversity). Nach erfolgreicher Standardisierung werden für die großflächige Anwendung des Metabarcodings keine taxonomischen Expert:innen mehr benötigt, was den potenziellen Kreis der Erfasser:innen von biologischer Vielfalt dramatisch erweitert. Personen mit taxonomischer Expertise sind trotzdem für den Aufbau der Genbibliotheken und für verschiedene Schritte der Qualitätssicherung unerlässlich. Die Kosten für Erfassungen mit Metabarcoding sind geringer als mit konventionellen Methoden (Buchner et al. 2023). Insbesondere Umwelt-DNA-Analysen sind minimalinvasiv und stören damit nicht die natürliche Dynamik von Lebensgemeinschaften.

DNA-basierte Methoden sind auch von entscheidender Bedeutung für die Erfassung von bisher vernachlässigten Facetten der biologischen Vielfalt. So wird Metabarcoding heute auch eingesetzt, um die genetische Vielfalt innerhalb von Populationen zu bestimmen (Elbrecht et al. 2018; Zizka, Weiss & Leese 2020). Es ist sehr wahrscheinlich, dass in Zukunft Änderungen der genetischen Vielfalt im Zuge einer genetischen Standardisierung ermittelt werden. Ein weiteres faszinierendes Feld ist die Nachverfolgung von Interaktionen, z. B. zwischen Bestäubern und Pflanzen (Thomsen & Sigsgaard 2019) oder in Nahrungsketten (Schmidt et al. 2018). Die Analyse kann nach Verfügbarkeit aus aktuellen oder auch archivierten Umweltproben erfolgen (Krehenwinkel et al. 2022).

Von allen modernen (halb-)automatisierten Methoden ist das Metabarcoding diejenige, die einer standardmäßigen Anwendung am nächsten steht. Es erhält in der Ressortforschung große Aufmerksamkeit, wie durch Initiativen des Umweltbundesamts (z. B. DNA-Metabarcoding in der behördlichen Praxis – www.gedna.de), der Umweltprobenbank (www.TrendDNA.de) oder die Planungen für ein zukünftiges Bodenbiodiversitätsmonitoring belegt wird. Weit fortgeschritten ist der Einsatz im Bereich des Monitorings der biologischen Vielfalt in Fließgewässern. Es ist zu betonen, dass die Probenahme selbst noch nicht automatisiert erfolgt, sondern nur Teile der Laboranalysen. Automatisierte Probenehmer für Insekten, für Luft- und Wasserproben (sog. Multi-sampler) sind in der Entwicklung (Wägele et al. 2022). Für andere Substrate (z. B. Boden oder Pflanzenblätter) gestaltet sich die Automatisierung bislang schwierig. Die Zukunft liegt vermutlich in der Kombination von passi-

ven Sammlern für bewegliche Substrate (Luft, Wasser) und beweglichen Sammelrobotern, die Proben entlang von festgelegten Pfaden aktiv aufnehmen können (s. u.). Beide Systeme können auf Umweltreize reagieren und Proben in anderer Frequenz unter bestimmten Bedingungen (z. B. Klima oder Licht) oder nach besonderen Ereignissen (z. B. Hochwasser, Beweidung) nehmen.

Sensorbasierte Methoden

Da es unterschiedliche Signaltypen gibt (visuelle, akustische, chemische, kinetische usw.), welche für die Erfassung von Biodiversität genutzt werden können, ist die Palette an zugrunde liegenden Methoden und Anwendungen außerordentlich vielfältig. Allen sensorbasierten Methoden ist aber gemein, dass sie auf sehr großen Datenmengen fußen. Sie verdanken ihre Entwicklung weniger der Sensorentwicklung als den Errungenschaften der digitalen Revolution, die es ermöglicht, Terabytes an Information in Bildern, Filmsequenzen, Klängen, Vibrationsmustern und Reflexionsereignissen zu erfassen, zu speichern und zu verarbeiten. Letzteres wird möglich durch entscheidende Fortschritte des maschinellen Lernens. Hierbei kommen Algorithmen zum Einsatz, die häufig der Klasse der neuronalen Netzwerke (z. B. Convolutional Neural Networks; CNN) angehören und die sich durch Expert:innenwissen so trainieren lassen, dass sie in Bildern oder Klängaufnahmen selbsttätig und mit hoher Präzision Muster – im vorliegenden Fall Arten und deren Verhalten – erkennen.

Die **automatisierte Bilderkennung** zur Erfassung der biologischen Vielfalt ist ein dynamisches Forschungsfeld. Idealerweise ist auf den Bildern eine Vielzahl von Arten des Ökosystems gleichzeitig gut erkennbar. Ein Beispiel sind Bilder von Lichtfangeinrichtungen (Bjerge, Mann & Høye 2022; Schneider et al. 2022). Dabei handelt es sich um weiße Schirme, die im Freiland nachts mit Licht mit hohem UV-Anteil ausgeleuchtet werden. Dies lockt Nachtfalter und andere Insekten an und macht sie gemeinsam und hell erleuchtet sichtbar. Weitere Anwendungen sind Fotofallen, die per Bewegungs- oder Wärmesensor aktiviert werden und sich besonders für die Erfassung größerer Säugetiere eignen (Burton et al. 2015; Mitterwallner et al. 2023). Ein weiteres Beispiel ist die automatische Bilderkennung von Kleinstlebewesen in Wasserproben in Kombination mit Durchflusszytometrie, bei der z. B. einzellige Algen oder Pollenkörner gezählt und bestimmt werden können (Dunker et al. 2021). Eine besondere Form der bildgestützten Erfassung von biologischer Vielfalt sind Smartphone-Aufnahmen, die mithilfe spezialisierter Apps wie FloraIncognita (Mäder et al. 2021) oder iNaturalist (www.inaturalist.org) be-

stimmt werden. Die genannten Methoden sind noch in der Entwicklung, und es fehlen bislang vereinheitlichte Protokolle. Es gibt eine Reihe von Herausforderungen zu lösen. Für bildbasierte Methoden braucht es nicht nur eine Kamera, sondern auch steuernde Vorrichtungen, die dafür Sorge tragen, dass Bildausschnitt, Beleuchtung, Brennweite und Zeitpunkt der Aufnahme so kontrolliert werden, dass die Detektionswahrscheinlichkeit gleich bleibt (Wägele et al. 2022). Letztere wird auch durch biologische Faktoren beeinflusst, beispielsweise durch die Körpergröße und Bewegungs- und Aktivitätsmuster von Tieren oder den Umstand, dass Pflanzen in das Sichtfeld einer Kamera wachsen. Eine Standardisierung ist bei opportunistischen Bilderhebungen per Smartphone-App naturgemäß besonders schwierig. Beobachtungen häufen sich an touristischen Orten und für große, attraktive, wenig bewegliche Organismen. Dennoch können hier unter bestimmten Umständen relevante Muster durch die große Menge an verteilten Beobachtungen abgeschätzt werden (Mahecha et al. 2021). Damit die Arterkennung erfolgreich ist, braucht es umfangreiche Referenzdatenbanken mit Bildern korrekter bestimmter Arten, idealerweise in unterschiedlichen Ansichten, Varietäten, Altern und Geschlechtern. Diese entstehen als systematische fotografische Dokumentation von Sammlungsmaterial in Naturkundemuseen oder häufig als frei verfügbare Fotodatenbanken von ehrenamtlichen Expert:innen. Insbesondere für kleine und schwer bestimmbare Artengruppen (Mücken, Erzwespen, Nematoden usw.) sind die Bilddatenbanken noch sehr unvollständig. Meeressäuger und Meeressäugetiere werden im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen auf hoher See schon seit 2013 aus digitalen Fotografien erfasst, die aus Flugzeugen in Höhe von ca. 400 m mit einer Auflösung von 2 cm gemacht werden. Die Auswertung erfolgt allerdings noch durch Expert:innen und nicht automatisiert (BfN 2021b).

Perspektivisch wird der Bilderkennung eine wichtige Bedeutung zukommen, weil sie kostengünstig und mit hoher Frequenz Daten zur biologischen Vielfalt erheben kann. Die Methode erkennt nicht nur Arten, sondern auch Merkmale wie Körpergrößen und -formen, Geschlechter, Alter und Farbvarianten und kann daher für eine Vielzahl von ökologischen Auswertungen verwendet werden. Die meisten der genannten Probleme lassen sich durch Standardisierung, technische Innovation (v. a. für die Verarbeitung großer Datenmengen; selbsttrainierende Algorithmen) und modellbasierte Korrekturalgorithmen (MacKenzie et al. 2018) für geeignete Artengruppen lösen. Ein großes Potenzial besteht bezüglich der Standardisierung von Smartphone-basier-

ten Methoden (festgelegte Strecken, Zeiten und Aufnahmeprotokolle [Arazy & Malkinson 2021]). Mit der fortschreitenden Digitalisierung der naturkundlichen Sammlungen wachsen die Bilddatenbanken; in Zukunft müssen diese in maschinenlesbare Form überführt werden. Faszinierende Möglichkeiten ergeben sich aus der Kombination von Bilderkennung und Fernerkundung. Bildarchive, die über Smartphone-Apps wie iNaturalist generiert werden, können auch für die Kalibrierung von Drohnenfotografien für die großskalige Erfassung von Pflanzenarten verwendet werden (Soltani et al. 2022). Eine Anwendung für die Erkennung invasiver Pflanzenarten war bereits erfolgreich.

Die **akustische Erfassung** extrahiert artspezifische Lautäußerungen von Tieren aus natürlichen Klangbildern (Englisch »*sound scapes*«), die von verteilten Mikrofonen im Freiland aufgenommen werden. Die Information wird üblicherweise auf Speicherkarten gespeichert, die nach 1–4 Wochen händisch ausgetauscht werden. Anwendungen sind für alle Organismen mit Lautäußerungen bekannt, z. B. für Vögel (Pérez-Granados & Traba 2021), Fledermäuse (Brinklöv et al. 2023), Insekten (Hill et al. 2018) und sogar Fische (Linke et al. 2018) und Meeressäuger (Van Opzeeland & Hillebrand 2020). Auch bei der Analyse von Klangbildern kommen mittlerweile neuronale Netze zum Einsatz, die die überlagerten Frequenzspektren (»Spektrogramme«) häufig als 2-D-Bilder analysieren (Kahl et al. 2021). Das erfolgt auf diese Weise, weil sich die akustischen Signale sehr viel stärker überlagern als visuelle. Im Unterschied zur Bildanalyse (s. o.) dienen nicht einzelne artspezifische Frequenzspektren als Referenz, sondern von Expert:innen annotierte Klangbilder, in denen viele Arten gleichzeitig zu hören sind und die durch Nachtrainieren optimiert werden müssen (Müller et al. 2023a; Zeuss et al. 2023). Da dieser Prozess aufwendig ist, wird als Vorstufe häufig ein Index der Klangdiversität berechnet (z. B. Sueur et al. 2014), der zwar die einzelnen Arten nicht ausweist, aber die lokale Artenvielfalt abschätzen kann.

Herausforderung der Methode sind die großen Informationsmengen, die eine drahtlose Übertragung der Daten erschweren. Entwicklungen zur Vorprozessierung und Komprimierung der Daten zeigen allerdings erste Erfolge (Höchst et al. 2022). Die Isolierung von Artsignalen ist in Tonaufnahmen deutlich schwieriger als auf Bildern, und der Aufbau von Referenzdatenbanken annotierter Klangbilder ist aufwendig. Bei der Kalibrierung von Feldaufnahmen ist es schwer, Mikrofone so anzuordnen, dass sie dasselbe Klangbild erfassen wie ein Mensch, der lauschend durch einen Wald geht. Die geringe Reichweite von Mikrofonen ist ein prinzipiel-

les Problem, das bislang nur durch eine dichtere Aufstellung von Mikrofonstationen zu lösen ist. Es steht aber außer Frage, dass akustische Methoden ein fester Bestandteil des zukünftigen Monitorings sein werden. Neben der Arterkennung lassen sich damit auch tages- oder jahreszeitliche Verschiebungen von Aktivitätsmustern feststellen, was insbesondere im Kontext des Klimawandels von Bedeutung ist.

Fernerkundung und die automatisierte Analyse von Produkten der optischen Fernerkundung sind eine Facette der Bilderkennung, welche Informationen über Objekte (Vegetation, Gewässer, Bebauung), Landschaftsstrukturen oder Gebiete sammelt, ohne in direktem Kontakt mit ihnen zu stehen (Alleaume et al. 2018; Bae et al. 2019; Cavender-Bares, Gamon & Townsend 2020). Zur Gewinnung der Informationen wird elektromagnetische Strahlung verwendet, die von Objekten, Strukturen usw. emittiert oder reflektiert wird.

In Deutschland wird Fernerkundung im Kontext der biologischen Vielfalt vor allem für die Erfassung der Vegetation eingesetzt. Einen guten Überblick für naturschutzrelevante Anwendungen geben Stenzel und Feilhauer (BfN 2021c). Pflanzen reflektieren das Sonnenlicht in unterschiedlicher Weise je nach Wasser- und Pigmentgehalten der Blätter und deren strukturellen Eigenschaften wie Winkel, Größe oder Behaarung. Die Reflexion wird in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen (Bändern) erfasst. Je nach Anzahl der Bänder spricht man von Multispektralaufnahmen (bis 20 Bänder) oder Hyperspektralaufnahmen (häufig > 200 Bänder). Die Bilder unterscheiden sich stark in ihrer räumlichen Auflösung. Diese hängt im Wesentlichen davon ab, aus welcher Höhe die Aufnahme gemacht wurde. Die Auflösung variiert zwischen wenigen Zentimetern (Drohne), Dezimetern bis Metern (Flugzeug) bis 10–60 m (Satelliten). Für die Interpretation der Bilder müssen Algorithmen mit Felddaten bekannter pflanzlicher Vielfalt trainiert werden (*»ground truthing«*), z. B. mit Vegetationsaufnahmen, Waldinventuren oder Biotopkartierungen. Fernerkundungsbasierte Methoden der Erfassung biologischer Vielfalt funktionieren bereits für größere Objekte wie Bäume (Fassnacht et al. 2024; Richter et al. 2016), für die funktionale Diversität von Pflanzen (Lausch et al. 2018; Wallis et al. 2016) oder für klar abgegrenzte Pflanzengesellschaften des Offenlandes (Stenzel et al. 2017).

Herausforderungen bestehen wie bei den anderen Methoden in der Standardisierung und im Umgang mit großen Datenmengen. Letztere steigen mit der für die Bestimmung von Arten oder Vegetationstypen benötigten räumlichen, zeitlichen und spektralen Auflösung stark an. Auch fehlt es bislang noch an ausreichend Feld-

erhebungen, die spezifisch für die Kalibrierung von Fernerkundungsprodukten ausgelegt sind. Aus diesen Gründen wird Fernerkundung im behördlichen Naturschutz bislang noch nicht standardmäßig eingesetzt (BfN 2021c).

Das Potenzial ist aber sehr groß, z. B. für die Erfassung von Erhaltungszuständen von FFH-Lebensraumtypen (Feilhauer et al. 2014), von Sukzessionsprozessen (z. B. Verbuschung; Schmidt et al. 2017) oder von der Ausbreitung invasiver Pflanzenarten (Skowronek, Stenzel & Feilhauer 2018), aber auch die quantitative Erfassung der Effekte des Klimawandels auf Zustand und Diversität von Wäldern oder Stadtbäumen (Holzwarth et al. 2020; Fassnacht et al. 2024). Besonders geeignet ist die Fernerkundung für die Quantifizierung von pflanzlicher Diversität auf der Landschaftsskala (Betadiversität [Rocchini et al. 2018]) und für die Erfassung von struktureller Vielfalt (Cavender-Bares, Gamon & Townsend 2020). Insbesondere die Erfassung der Habitatvielfalt ist relevant, weil diese Rückschlüsse auf die zu erwartende Artenvielfalt ermöglicht (Rosenzweig 1995; Wallis et al. 2016). Es können mit Fernerkundung große Arten erfasst werden (Hollings et al. 2018) oder aber Landschaftsveränderungen (Senf, Seidl & Hostert 2017) oder -strukturen, welche von Arten gestaltet werden (z. B. Landschaftsingenieure [Wraase et al. 2023]). Faszinierende Möglichkeiten ergeben sich aus der Kombination von Bilderkennung und Fernerkundung. Bildarchive, die über Smartphone-Apps wie iNaturalist generiert werden, können auch für die Kalibrierung von Drohnenfotografien für die großskalige Erfassung von Pflanzenarten verwendet werden (Soltani et al. 2022).

Die genannten Beispiele nutzen die passive Fernerkundung, die überwiegend Reflexionen des Sonnenlichts analysiert. Eine weitere Form der Fernerkundung, die aktive Fernerkundung, gewinnt an Bedeutung, bei der Vegetation mit Laserstrahlen abgetastet wird (z. B. LiDAR – Light Detection and Ranging). Aus den entstehenden Reflexionsmustern können hochaufgelöste Punktwolken von pflanzlichen Objekten generiert werden. Die Methode wird vor allem zur Charakterisierung der Vegetationsstruktur verwendet, kann aber in Kombination mit optischen Methoden (s. o.) auch für die Arterkennung eingesetzt werden (Michałowska & Rapiński 2021). Mit Radartechnologie können in ähnlicher Weise Größenverteilungen und Dichten von flugfähigen Insekten erfasst werden (Zeuss et al. 2023).

Es gibt eine Reihe weiterer automatisierter Methoden, die in Erprobung sind. Hervorheben möchten wir eine **chemische Methode** der Erfassung der biologischen Vielfalt. Es ist möglich, Geruchsprofile (*»smell scapes«*) zu analysieren, die durch die Abgabe von flüchtigen

Substanzen von Pflanzen (pVOC, Plant Volatile Organic Compound) erzeugt werden. Diese pVOCs können mit sogenannten künstlichen Nasen bestimmt werden, die die Technologie der Gaschromatographie-Ionenmobilitätsspektrometrie (GC-IMS) nutzen. Da die Geruchsprofile artspezifisch sein können, ist es prinzipiell mit dieser Technologie möglich, das Vorkommen bestimmter Pflanzenarten zu ermitteln und auch deren Stressreaktionen und Aktivitätsmuster zu erkennen (Vautz, Hariharan & Weigend 2018). Diese Methoden sind aber noch nicht unter Freilandbedingungen getestet worden. Insbesondere ist die Erarbeitung von artspezifischen Referenzprofilen von volatilen Substanzen und deren Langlebigkeit in Luftproben noch in den Anfängen.

Integration automatisierter Systeme – Synergien und erste Pilotprojekte

Die genannten Methoden haben vor allem in Kombination eine Reihe von entscheidenden Vorteilen, die das Biodiversitätsmonitoring der Zukunft revolutionieren werden. Diese seien hier noch einmal zusammengefasst:

- Es können auch taxonomisch schwierige Gruppen (z. B. Fliegen, Erzwespen, Mikroorganismen) erfasst werden. Dadurch entsteht ein gesamtheitliches Bild der biologischen Vielfalt, und die Beschränkung auf wenige Zielarten(gruppen) (Jedicke 2016) entfällt perspektivisch.
- Die biologische Vielfalt kann standardisiert, kontinuierlich oder zeitlich hochaufgelöst erfasst werden anstatt in unregelmäßigen, langen, gestaffelten Inventurintervallen. Dies erlaubt es, Änderungen der biologischen Vielfalt in Bezug zu setzen zu kurzfristigen Pulsen, wie der Ausbringung von Pestiziden oder Wetterextremen, und die Einflüsse solcher Treiber von natürlichen Schwankungen und saisonalen Rhythmen zu trennen.
- Die Gesamtheit der automatisierten Methoden erlaubt es prinzipiell, neben dem Vorkommen von Arten auch deren Eigenschaften (Größen, Strukturen), Interaktionen, Aktivitäten und genetische Variabilität zu charakterisieren. Damit kann eine große Zahl an Facetten der biologischen Vielfalt zeitgleich erfasst werden, was mit bisherigen Monitoringprogrammen nicht möglich war. Dadurch steigt die ökologische Aussagekraft der Erfassungen (Pereira et al. 2013).
- Die Fernerkundung erlaubt die Skalierung von lokalen Intensivmessungen (automatisiert oder konventionell) in die Fläche. Damit wird es möglich, die biologische Vielfalt auf unterschiedlich großen Skalen zu erfassen, z. B. auf der lokalen Skala (Alpha-Diversität), in Bezug auf die räumliche Heterogenität (Beta-

Diversität) und für das Vorkommen von Arten oder Ökosystemen auf Landschaftsebene (Gamma-Diversität). Dies ist wichtig, weil direkte Treiber und Maßnahmen auf die biologische Vielfalt auf sehr unterschiedlichen Skalen wirken können (Spake et al. 2021; Chase et al. 2018).

- Automatisierte Methoden können schwer zugängliche Lebensräume besser erschließen, z. B. Baumkronen oder steile Felswände mit Drohnenflügen, unbemannte Tauchroboter für den Meeresgrund.
- Neue innovative Methoden, die z. B. auf der Nutzung von Smartphones oder Drohnen basieren, erlauben die Einbindung von Bürgerwissenschaftler:innen. Das hat zwei große Vorteile: (i) Die Anzahl von Erfasser:innen steigt beträchtlich und damit (ii) auch die gesellschaftliche Teilhabe und Aufmerksamkeit für den Schutz biologischer Vielfalt (Hecker et al. 2018; Kühl et al. 2020).

Da die Synergien der automatisierten Methoden untereinander und mit konventionellen Methoden offensichtlich sind, gibt es in jüngerer Zeit verschiedene Initiativen, die Konzepte für integrierte und automatisierte Monitoringstationen entwickeln. Sie kombinieren eine Vielzahl von fest installierten oder beweglichen Sensoren sowie Probenehmern, die miteinander kommunizieren und deren Ergebnisse drahtlos in vernetzte Cloud-Datenbanken überführt werden (Zeuss et al. 2023; Wägele et al. 2022; van Klink et al. 2022). Bewegliche Sensoren können an Drohnen befestigt sein, die regelmäßig programmierte Flugrouten absolvieren, oder auch an kleinen fahrbaren Robotern (»Rover«). Die erste deutsche Initiative dieser Art ist das AMMOD-Projekt (»Automated Multisensor Stations for Monitoring of Biodiversity« – <https://ammod.de/>), das vom Leibniz-Institut zur Analyse des Biodiversitätswandels (LIB) in Bonn ins Leben gerufen wurde (Wägele et al. 2022). Sehr fortgeschritten ist das Projekt »Natur 4.0« (in Analogie zur »Industrie 4.0«, die Menschen, Sensoren und Roboter mithilfe des Internets vernetzt und als Funktionseinheit begreift) (Zeuss et al. 2023). In diesem LOEWE-Projekt des Landes Hessen hat ein interdisziplinäres Team aus der Geografie, Informatik, Mathematik, Naturschutz, Ökologie und Ingenieurwissenschaften ein Pilotsystem eines modularen Umweltmonitorings im Universitätswald Marburg realisiert. Bei der Realisierung wurden viele Lösungen entwickelt, aber auch etliche Herausforderungen identifiziert, insbesondere die Energieversorgung, der Umgang mit großen Daten, deren Verarbeitung, Speicherung und Nachhaltung und vor allem inhaltliche Integration im Sinne der Fragestellungen.



Weltweit bemühen sich vergleichbare Initiativen darum, die technologischen Fortschritte bei den automatisierten Biodiversitätserfassungen in die Praxis von Monitoringprogrammen zu überführen. Theoretische Grundlagen der Integration der neuen Datenströme dieser vielfältigen Methoden werden in Hartig et al. (2023) diskutiert. Das Netzwerk von ökologischen Langzeituntersuchungsflächen eLTER (<https://elter-ri.eu/>) plant die Implementierung automatisierter Verfahren in ganz Europa. Dieses Programm umfasst Umwelt-DNA-Proben in Boden und Wasser, Metabarcoding von Insektenfallen, akustische Erfassungen (AudioMoth) und die Anwendung verschiedener Fernerkundungsmethoden. Zu erwähnen ist auch das LIFEPLAN-Projekt, das von der European Research Council gefördert wird und das einen Workflow für die Standardisierung und Integration von Daten aus automatisierten Erfassungsmethoden entwickelt (<https://www.helsinki.fi/en/projects/lifeplan>), sowie das EU-Konsortium MAMBO (Modern Approaches to the Monitoring of Biodiversity [Høye et al. 2023]).

Die Planung neuer Monitoringprogramme in Deutschland hat diese Entwicklungen im Blick (BfN 2020a; Bolte et al. 2022; NMZB 2023). Mit zunehmender Technologiereife und Konkretisierung der Konzepte wird es notwendig sein, die neuen Technologien in das Biodiversitätsmonitoring zu integrieren und das grundlegende Design entsprechend anzupassen. Es ist unbedingt notwendig, dass Entwicklungen in Deutschland so geplant werden, dass sie die Synergien mit internationalen Bemühungen maximieren und eine methodische Harmonisierung die Auswertung von Daten zur Entwicklung von biologischer Vielfalt grenzüberschreitend ermöglicht.

Abbildung 2.8: Das Natur 4.0-Projekt ist ein Beispiel für ein modernes netzwerkbasierendes Sensorsystem für eine automatisierte Erfassung der biologischen Vielfalt (Zeuss et al. 2023). Es vereint als drei wichtige Hauptkomponenten Sensoren, Datenübertragung und Datenspeicherung. Diese sind modular aufgebaut und können an die zu untersuchende Facette der biologischen Vielfalt angepasst werden. Die Sensoren (blau) werden eingesetzt, um biologische Vielfalt zu erfassen, die Aktivität einzelner Individuen zu verfolgen und wichtige Umweltdaten und ökosystemare Prozessdaten zu quantifizieren. Fernerkundungstechnologie wird ebenfalls eingesetzt. Die entstehenden Daten werden über unterschiedliche Übertragungsmodi (grün) in die Datenbank übertragen, die wiederum unterschiedliche Komponenten für verschiedene Datentypen enthält (rot). Eine Reihe von KI-basierten Auswertungsalgorithmen (z. B. zur Detektion von Vogelarten aus akustischen Signalen) greifen auf die Datenbank zu (gelb). Die Open-Source-Datenbanken erlauben auch eine schnelle Datenübertragung für externe Nutzer (dunkelgrün). Natur 4.0 ist eine interdisziplinäre Kooperation von Wissenschaftler:innen aus der Geografie, Informatik, Mathematik, Naturschutz, Ökologie und Ingenieurwissenschaften.

2.2 Ökosystemleistungen

2.2.1 Ökosystemleistungen, Ökosystemfunktionen und biologische Vielfalt

Der *Faktencheck Artenvielfalt* hat sich die Aufgabe gestellt, die Auswirkungen von Änderungen der biologischen Vielfalt, wie sie im Themenbereich »Status und Trends« herausgearbeitet werden, auf die Leistungsfähigkeit unserer Ökosysteme zu bewerten.

Als Ökosystemleistung (ÖSL; veraltet Ökosystemdienstleistung oder engl. ES, Ecosystem Service, alternativ NCP, Nature's Contribution to People) bezeichnet man den Beitrag der Ökosysteme zum menschlichen Wohlbefinden. Aus einem ökologischen Blickwinkel betrachtet, sind ÖSL emergente Eigenschaften der Funktionsfähigkeit von Ökosystemen und bezeichnen diejenigen Prozesse und Produkte, die das menschliche Leben ermöglichen und angenehm machen. Aus einer wirtschaftlichen Perspektive sind ÖSL die finanziellen Vorteile, die der Mensch direkt oder indirekt aus den Ökosystemen zieht. Was jedoch all diese Ansätze vereint, ist, dass ÖSL verdeutlichen, wie sehr Mensch und Natur verwoben sind (Burkhard & Maes 2017). Das ÖSL-Konzept bringt eine Systematik in die komplexen Abläufe natürlicher Systeme und ihrer Interaktion mit den Menschen (sozioökologische Systeme) und hilft uns zu verstehen, wie die von uns Menschen genutzten Leistungen von natürlichen Funktionen abhängen. Im *Faktencheck Artenvielfalt* verwenden wir die Nomenklatur von ÖSL nach CICES (s. u.).

Ökosystemfunktionen (ÖSF) sind die Basis von Ökosystemleistungen (Abb. 2.9). Es handelt sich dabei um biologische, chemische oder physikalische Prozesse, die erst durch eine physische, ökonomische oder ideelle Inwertsetzung durch den Menschen zu ÖSL werden, wodurch es in vielen Fällen leichter ist, die ÖSF als die daraus entstehende ÖSL zu quantifizieren. Eine ÖSF muss nicht immer eine ÖSL ergeben. So ist der Blattfraß einer Insektenkalamität in einem Fichtenwald zwar eine quantifizierbare Ökosystemfunktion, aber keine ÖSL. Andererseits liegen jeder ÖSL notwendigerweise ein bis mehrere ÖSF zugrunde. Der Ökosystemleistung der Kühlungswirkung eines benachbarten Waldstücks liegt eine ÖSF direkt zugrunde, nämlich dessen Evapotranspiration – eine 1:1-Beziehung. Der ÖSL der Erholung bei einem Waldspaziergang liegen viele ÖSF zugrunde, z. B. die Lichtextinktion (Schattenwurf), Habitatfunktion (singende Waldvögel) und die Produktion von volatilen Substanzen (Waldduft) – eine 1:n-Beziehung. Da der letztere Fall weitaus häufiger ist, ist es oftmals schwierig, einen direkten Zusammenhang von

»Entstanden ist ein beeindruckendes Referenz- und Nachschlagewerk, einzigartig in seiner räumlichen und inhaltlichen Detailtiefe, das wir dringend brauchen, um wirksame Maßnahmen zum Biodiversitätserhalt in Deutschland zu ergreifen.«

Volker Mosbrugger, Senckenberg Gesellschaft

Der Zustand der Natur verschlechtert sich weltweit – und damit auch ihre lebenswichtigen Beiträge für uns Menschen. So steht es im globalen Assessment des Weltbiodiversitätsrats IPBES. Gibt es eine Krise der biologischen Vielfalt auch bei uns in Deutschland? – Und wenn ja: Was sind die Gründe, und was können wir dagegen tun?

Diesen Fragen gehen 150 Autor:innen von 75 Institutionen und Verbänden im »Faktencheck Artenvielfalt« nach. Auch vor unserer Tür ist die biologische Vielfalt rückläufig. Wichtige Lebensräume schwinden, ehemals häufige Arten werden selten, viele Ökosysteme verarmen und sind einem rapiden Wandel unterworfen. Die Triebkräfte dahinter – ausgeräumte Landschaften, intensive Landnutzung, Einträge von Fremdstoffen, der Klimawandel – gehen von uns Menschen aus.

Aber es gibt auch gute Nachrichten: Als Hauptverursacher haben wir es selber in der Hand, diesen Trend umzukehren. Der »Faktencheck Artenvielfalt« zeigt ermutigende Beispiele auf und analysiert, was in der Praxis funktioniert und, wichtiger noch, unter welchen Bedingungen wir bereit sind, für die biologische Vielfalt aktiv zu werden. Eine gesellschaftliche Transformation hin zu einer Wirtschaftsweise mit und nicht gegen die biologische Vielfalt ist geboten – und möglich.

