

2 Resilienz der Biosphäre

Felix P. Frey, Cristina Krahl Perez, Rainer Schliep

Der Mensch verändert seine Umwelt in nie dagewesenem Ausmaß. Die ökologischen Belastungsgrenzen der Erde im Bereich der biologischen Vielfalt sind bereits weit überschritten, wodurch die Resilienz der gesamten Biosphäre bedroht ist – und damit auch die Lebensgrundlagen der Menschheit auf der Erde. Für unsere Gesundheit und unser Überleben auf der Erde brauchen wir Menschen funktionsfähige, vielfältige Ökosysteme. Welchen konkreten Gefahren ist die Biosphäre ausgesetzt? Und welche Möglichkeiten bestehen, vor dem Hintergrund der aktuellen Biodiversitätskrise, die Resilienz unserer Biosphäre zu stärken?

Der Mensch verändert inzwischen seine Umwelt in einem solchen Ausmaß, dass die Wissenschaft dafür einen eigenen Begriff erfunden hat: Als Anthropozän wird diejenige erdgeschichtliche Epoche bezeichnet, in der die Menschheit zu einem der wichtigsten Einflussfaktoren auf die biologischen, geologischen und atmosphärischen Prozesse auf der Erde geworden ist. Der Rückgang der vom Menschen unbeein-

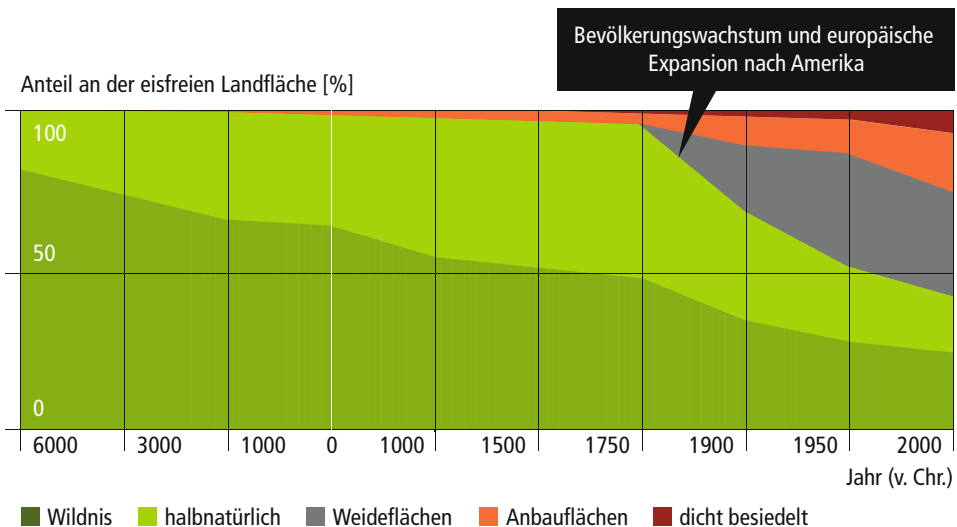


Abb. 2.1 Veränderung der Biosphäre durch den Menschen (nach Jones 2011, verändert)



flussten Landfläche auf rund 25 Prozent (s. Abb. 2.1) mag dafür als Sinnbild stehen. Aber auch andere Elemente unserer natürlichen Umwelt werden im Anthropozän stark vom Menschen beeinflusst: die auf der Erde jährlich zur Verfügung stehenden Ressourcen sind Jahr für Jahr früher verbraucht. 2016 wurde diese Grenze am 8. August erreicht; 1987 lag sie noch auf dem 19. Dezember des Jahres.

Am stärksten werden diese „planetaren Grenzen“ allerdings bei der biologischen Vielfalt überschritten (s. Abb. 2.3); sie geht weltweit in einem höchst alarmierenden Ausmaß verloren. Der Weltbiodiversitätsrat IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) schätzt, dass bereits bis zu 75 Prozent der terrestrischen Ökosysteme, 40 Prozent der Meeresökosysteme und 50 Prozent der Binnengewässer aufgrund menschlicher Aktivitäten stark verändert sind, während sich zugleich das Artensterben weiter beschleunigt (IPBES 2018, IPBES 2019b). Klimawandel, Abbau natürlicher Ressourcen, Umweltverschmutzung und invasive gebietsfremde Arten sowie die Wechselwirkungen dieser Faktoren haben zu einem beträchtlichen Rückgang der Vielfalt des Lebens auf der Erde geführt und werden vermutlich auch in Zukunft eine erhebliche Bedrohung unserer Lebensgrundlagen sein. Dabei sind die Verluste an Biodiversität von großer Bedeutung für das menschliche Wohlergehen. Nicht nur unsere Wirtschaft ist auf biologische Vielfalt angewiesen, sondern auch die menschliche Gesundheit, da mit weniger Biodiversität zum Beispiel die Fähigkeit der Ökosysteme beeinträchtigt wird, zuverlässig sauberes Wasser zu liefern, die Luft zu reinigen, das Klima zu regulieren oder unsere Nahrungsmittelversorgung zu sichern.

Ein hohes Maß an Biodiversität ermöglicht es Ökosystemen hingegen, ihre Funktionen trotz einzelner Biodiversitätsverluste aufrecht zu erhalten – funktionierende Ökosysteme sind sozusagen resilient. Dies wird ermöglicht durch eine Vielzahl an Organismen, die die Funktionen verloren gegangener einzelner Arten kompensieren können. Ein zu großer Verlust an Biodiversität jedoch bewirkt, dass Ökosysteme ihre Resilienz verlieren, somit schneller aus dem Gleichgewicht geraten und letztlich auch ihre Funktionen verlieren können. Resilienz in der Biosphäre meint verkürzt die Erhaltung der seit Jahrtausenden bestehenden lebensfreundlichen Bedingungen auf der Erde als Lebensgrundlage für die Menschheit. Eine sinnfällige Illustration dafür ist das Jenga-Spiel: eine gewisse Zeit lang kann man aus dem Turm Holzklötzchen entfernen, aber irgendwann wird die Konstruktion instabil und bricht zusammen. Dabei entspricht das Ökosystem dem Turm und die Arten den Holzklötzchen.

Status Quo

Umweltveränderungen, verursacht durch menschliche Aktivitäten, stellen Pflanzen- und Tierarten immer wieder vor neue Anpassungsherausforderungen. Laut dem Weltbiodiversitätsrat IPBES (2018) sind in Europa und Zentralasien Landnutzungsänderungen und vor allem die Intensivierung der Landnutzung die unmittelbaren Hauptursachen für die

Abnahme der Biodiversität und für den Verlust von Ökosystemleistungen. Treiber des Biodiversitätsverlusts sind unter anderem eine nicht nachhaltige Land- und Forstwirtschaft, die Zerschneidung natürlicher Lebensräume durch Infrastrukturen wie Straßen oder Bahntrassen, der Flächenverlust in Folge zunehmender Urbanisierung und Bodenversiegelung sowie der Rohstoffabbau beispielsweise im Braunkohletagebau.

Durch menschliche Handlungen sind weltweit etwa 25 Prozent der Arten der bisher erfassten Tier- und Pflanzengruppen gefährdet. Diese Zahl deutet darauf hin, dass innerhalb der nächsten Jahrzehnte etwa eine Million Arten aussterben könnten (IPBES 2019a). In den Medien wird zurzeit besonders auf die Folgen des Klimawandels als Treiber des Biodiversitätsverlusts hingewiesen, die sowohl marine als auch terrestrische Ökosysteme betreffen. Infolge der erhöhten Jahresdurchschnittstemperaturen und der damit einhergehenden Extremwetterereignisse verlagern viele Arten ihre Lebensräume in kühlere Regionen, sodass massive Artenverluste für die tropischen Lebensräume in Südamerika, Afrika und Teilen Asiens vorhergesagt werden. Auch in den Meeren verlagern sich Fischpopulationen in Folge der Erwärmung. Zudem verändert sich der Lebensraum Meer durch die großen Mengen an Kohlendioxid, die durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzt und zu einem großen Teil im Meer als Kohlensäure fixiert werden (Sabine et al. 2004). Das Meerwasser wird dadurch saurer, was beispielsweise zu Korallensterben führen kann. Der Forschungsstand zu den Auswirkungen der Versauerung auf die Grundlage der ozeanischen Nahrungskette, das Plankton, ist allerdings noch sehr unsicher.

Unter anderem durch die Wanderungsbewegungen infolge des Klimawandels hat die Gesamtanzahl invasiver Arten seit 1980 um 40 Prozent zugenommen (IPBES 2019a). Die Zuwanderung fremder Arten in terrestrischen Systemen hat vor allem Folgen für die Landwirtschaft und die lokalen Ökosysteme. Einheimische, bereits gefährdete Arten können im Konkurrenzkampf mit invasiven Arten oftmals drastisch dezimiert werden. Darüber hinaus sind einige invasive Insekten als Schädlinge in der Landwirtschaft bekannt und gefürchtet, wie zum Beispiel der Maiswurzelbohrer. Invasive Stechmücken bergen zudem Risiken für die menschliche Gesundheit.

Der Rückgang der artenreichsten Klasse der Tiere, der Insekten, verursacht Entwicklungen im weltweiten Ökosystem, die sehr besorgniserregend sind (Husemann 2019). So sind bestäubende Insekten sowohl eine Voraussetzung für die menschliche Ernährungssicherung als auch für den Erhalt natürlicher Ökosysteme. Weiterhin stehen eine Vielzahl der Ökosystemleistungen, von denen Wirtschaft und menschliche Gesundheit profitieren, in enger Verbindung mit der Insektenfauna (Krüß et al. 2019). Zu diesen Leistungen zählen beispielsweise verschiedene Zersetzungsprozesse, Nährstoffzyklen, die Bodengesundheit oder die notwendige Bestäubung von

Pflanzen (Zaller 2020). Rund 35 Prozent der landwirtschaftlichen Produktion ist auf Bestäuber angewiesen (Klein et al. 2007). Durch das Insektensterben ist bereits jetzt schon ein Viertel der Wildpflanzen auf dem Planeten stark gefährdet (Imran 2020). Obwohl die in Deutschland beheimateten rund 33.000 Insektenarten dringend notwendig für intakte Ökosysteme und damit die Sicherstellung wichtiger Ökosystemleistungen sind, ist das Wissen zur Bedeutung von Insekten in der Bevölkerung relativ gering (Krüß et al. 2019). Bis zum Jahr 2050 wird die Erdbevölkerung auf geschätzte neun Milliarden Menschen angestiegen und mehr noch als heute auf eine stabile Nahrungsmittelproduktion angewiesen sein (Brown und Paxton 2009).

In einer Reihe neuerer Studien wird die Tragweite des Insektenschwunds deutlich. In den letzten 27 Jahren konnte etwa der Krefelder Entomologenverein eine Abnahme von ca. 75 Prozent der Biomasse von Fluginsekten feststellen und eine Reduzierung der Pflanzenvielfalt von 50 Prozent beobachten (Stadmann und Adelman 2019). Erst durch diese Studien wurde das Insektensterben in den deutschen Medien zu einem Thema. Der Rückgang an Insektenarten wird dabei in allen Landschaften beobachtet, sowohl auf Weiden und Ackerflächen als auch in Naturschutzgebieten. In Wiesen und Wäldern beträgt der Schwund an Insektenbiomasse bereits ein Drittel, im Grünland sogar zwei Drittel. Zu den betroffenen Arten gehören sowohl örtlich sesshafte als auch wandernde Insekten (Zaller 2020). In Deutschland wurde für die Datenaufnahme von gefährdeten Arten eine sogenannte Rote Liste entwickelt, die zur Analyse von Bestandsentwicklungen dient (Ries et al. 2019). Weiteres Monitoring ist Voraussetzung dafür, dass die gegenwärtig vorhandenen Insektenpopulationen korrekt erfasst werden können. Eine lückenlose Datengrundlage ist unabdingbar, um zutreffende Rückschlüsse auf die Entwicklungen in der Insektenfauna zu ziehen und geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen zu können.

Seit einigen Jahren rücken auch die Weltmeere zunehmend in den Fokus der Biodiversitätspolitik und -forschung. Ozeane und Küsten verfügen über eine enorme Vielfalt an Leben in den unterschiedlichsten Lebensräumen. Sie beherbergen die größten Tiere, die auf der Erde leben, und Milliarden kleinster Organismen. Das Phytoplankton, winzige photosynthetisierende Mikroorganismen, liefert 50 Prozent des gesamten Sauerstoffs auf der Erde. Ökosysteme des Tiefseemeeresbodens profitieren von den sich zersetzenden Organismen aus der Lichtzone der Ozeane oder von der Energie unterseischer Heißwasser-Schlote, an denen teils extreme Umweltbedingungen mit Temperaturen von bis zu 400 °C herrschen (WWF/IUCN 2001). Es wird geschätzt, dass allein die Tiefsee 10 Millionen Arten beherbergt (Glowka 1995). Seit Tausenden von Jahren leben die Menschen in der Nähe der Ozeane und nutzen deren Ressourcen. Etwa 40 Prozent der Weltbevölkerung lebt weniger als 100 Kilometer von Küsten entfernt. Die Fischerei liefert mehr als 15 Prozent der weltweiten Nahrungsaufnahme an tierischem Eiweiß. Ozeane spielen eine wichtige Rolle bei der Regulierung des globalen Klimasystems, und Küstenökosysteme erbringen wirt-

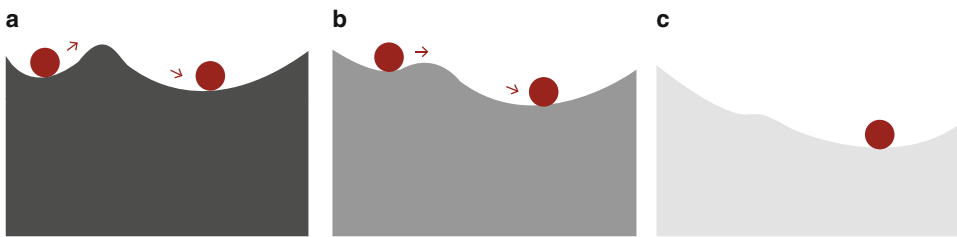


Abb. 2.2 Adaptive Kapazität und Multistabilität eines Systems (nach Gunderson 2000, verändert): In diesen drei Modellbeispielen **a–c** für die Stabilität eines Systems ist die Kugel das **System**, die Pfeile zeigen **Systemstörungen** an. Tiefgelegene Punkte bedeuten **Systemstabilität**. Die Form der Bereiche um die lokalen Minima repräsentieren den Spielraum für mögliche Auslenkungen bis hin zu einem **Kippunkt**, ab dem das System in einen neuen Gleichgewichtszustand übergeht. Dieses Modell für resiliente Systeme verlässt die Vorstellung von Stabilität als starrem Zustand mit festen Grenzen. Vielmehr bewegen sich resiliente Systeme in veränderlichen „Landschaften“ und streben dabei immer einen stabilen Zustand an – unabhängig von den jeweiligen Umweltbedingungen. **a** Das stabile System (links, z. B. intaktes Korallenriff) bricht nur bei großen Systemstörungen zusammen und geht in einen neuen Gleichgewichtszustand (rechts) über; **b** Das weniger stabile System (durch Erderwärmung geschädigtes Korallenriff) bricht bereits durch leichte Systemstörungen zusammen; **c** das System ist in einen neuen, (weniger biodiversen) Gleichgewichtszustand übergegangen.

schaftlich bezifferbare Leistungen wie Tourismus und Schutz vor Stürmen, die auf jährlich fast 26 Milliarden US-Dollar geschätzt werden (CBD 2022b).

Die biologische Vielfalt der Meere ist für das menschliche Wohlergehen von entscheidender Bedeutung. Die Meeres- und Küstenökosysteme sind jedoch zahlreichen Bedrohungen ausgesetzt: Überfischung, Korallensterben, Verschmutzung, Erwärmung, Meeresspiegelanstieg und Versauerung oder vom Menschen verursachter Unterwasserlärm. All diese Belastungen wirken sich negativ auf die Meeresökosysteme aus und beeinträchtigen ihre Fähigkeit, Leistungen und Ressourcen bereitzustellen, die auch für uns Menschen essenziell wichtig sind. Um dem entgegenzuwirken, muss das Verständnis zum ökologischen und biologischen Wert der Ozeane verbessert werden, und die Auswirkungen der wichtigsten Bedrohungen für die biologische Vielfalt der Meere und Küstengebiete müssen besser verstanden und reduziert werden (ebd.).

Die menschliche Existenz ist klar von der Resilienz der Ökosysteme der Erde abhängig. Dementsprechend trug bereits der globale Bericht mehrerer UN-Organisationen aus dem Jahr 2000 zur Lage der Ökosysteme weltweit den Titel „das schwindende

Netz des Lebens“ (UNDP / UNEP / World Bank / WRI 2000). Eines der Probleme in der Biodiversitätsforschung¹ besteht allerdings nach wie vor darin, dass nicht genau bekannt ist, ab welchem Punkt natürliche Systeme so geschwächt sind, dass sie zusammenbrechen, beziehungsweise so stark gestört sind, dass sie in einen neuen Gleichgewichtszustand übergehen. In manchen Fällen ist diese Veränderung unumkehrbar (s. Abb. 2.2). Wie also kann die Menschheit ihre natürlichen Lebensgrundlagen schützen und nachhaltig nutzen?

Auswirkungen des Biodiversitätsverlusts und aktuelle Entwicklungen

Die Notwendigkeit des Biodiversitätsschutzes ist aufgrund der komplexen und räumlich stark variierenden Wechselwirkungen zwischen Biodiversität und menschlicher Nutzung einer breiten Öffentlichkeit, aber häufig auch der Politik weit weniger eingängig als beispielsweise Maßnahmen gegen den Klimawandel. Begriffe wie „Biodiversität“, „Ökosystem“ oder „Ökosystemleistungen“ sind naturwissenschaftlich-technisch geprägt und erscheinen im gesellschaftlichen Diskurs zur Erhaltung unserer Lebensgrundlagen oft sperrig (Richerzhagen und Rodriguez de Francisco 2020). Während die wissenschaftliche Gemeinschaft seit Ende der 1980er Jahre mithilfe des Weltklimarates IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) in der gesellschaftlichen Debatte um den Klimaschutz auf wissenschaftlicher Grundlage griffige Aussagen und prägnante Zielsetzungen wie das 1,5-Grad-Ziel formuliert hat, stellt sich die kommunikative Aufgabe in der Biodiversitätskrise komplexer dar. Vor dem Hintergrund der regionalen Vielfalt natürlicher Lebensräume und menschlicher Nutzungen von Ökosystemleistungen und Komponenten biologischer Vielfalt ergibt sich eine Fülle unterschiedlicher Problemlagen. Für sie müssen jeweils individuelle Lösungen in Abwägungen zwischen menschlichen Interessen und naturschutzbezogenen Anforderungen gefunden werden. Die Komplexität der Aufgabe wird noch gesteigert durch die Tatsache, dass alle diese Lösungen miteinander verknüpft sind: Maßnahmen hier haben auch Auswirkungen auf benachbarte Lebensräume und Landnutzungsmuster oder gar weit entfernte Regionen. Denn selbst räumlich weit entfernte menschliche und natürliche Systeme sind sozioökonomisch und ökologisch miteinander gekoppelt. Die gesamte Bandbreite der zu berücksichtigenden Aspekte im Biodiversitätsschutz wird durch den Ökosystemansatz des Übereinkommens über die biologische Vielfalt CBD (Convention on Biological Diversity) beschrieben, der in fünf Leitlinien und zwölf Prinzipien den Handlungsrahmen des Übereinkommens aufspannt (CBD 2022a).

¹ *Biodiversitätsforschung ist die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Vielfalt des Lebens auf allen seinen organisatorischen Ebenen: auf genetischer Ebene, auf Ebene der Arten und auf Ebene der Lebensräume bzw. Ökosysteme.*

Um den Schutz der Biodiversität voranzubringen, gilt es, sowohl naturwissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Forschung zu verknüpfen als auch gesellschaftliche Gruppen, die sogenannten Stakeholder, einzubinden. Die Aufgabe der Naturwissenschaften besteht hauptsächlich in der Identifizierung von Arten und der Untersuchung von Interaktionen und Interdependenzen zwischen diesen und ihren Lebensräumen. Nur was wir kennen, können wir auch erhalten. Um die Ergebnisse der naturwissenschaftlichen Forschung jedoch einzuordnen und in die Praxis umzusetzen, bedarf es einer sozialwissenschaftlichen Begleitung. Zwar ist der ökonomische und gesellschaftliche Wert von Biodiversität schwer in Zahlen zu fassen, denn die Folgen eines Biodiversitätsverlusts sind meist nicht direkt sichtbar. Doch Biodiversität bildet eine langfristige Grundlage für unsere Kultur und die Wirtschaft. Gleichzeitig spielen die Aktivitäten von Wirtschaft, Politik, Soziologie und Kultur entscheidende Rollen im Biodiversitätsschutz – oder aber beim Verlust von Biodiversität.

Um Empfehlungen zu geben, welche Maßnahmen zum Biodiversitätsschutz langfristig effektiv und vorteilhaft sind, analysieren die Sozialwissenschaften das Verhalten von Menschen und Bevölkerungsgruppen, erforschen, was in der Gesellschaft auf Interesse und was auf Ablehnung stößt, und wie ablehnenden Haltungen begegnet werden kann. In diesem Kontext ist es auch Aufgabe der Sozialwissenschaften, relevante Stakeholder, also Bürgerinnen und Bürger, Politiker und Politikerinnen, Unternehmen und gesellschaftliche Gruppen in alle Schritte der Forschung einzubeziehen, und dies nicht erst bei der Ergebnispräsentation, sondern bereits bei der Aufgabenstellung, der Methodenentwicklung und der Analyse. Im Rahmen von Konzepten wie „citizen science“ können diese Stakeholder zusätzlich praktische Expertise in die Forschung einfließen lassen. Außerdem bewirkt diese frühe Einbeziehung, dass die Gesellschaft in den Biodiversitätsschutz direkt einbezogen wird und dadurch ein intrinsisches Interesse daran entwickelt. Die Kommunikation muss ein integraler Bestandteil von Biodiversitätsforschung sein, denn es muss gelingen, nicht nur bei interessierten Naturschützern, sondern in allen Teilen der Gesellschaft ein Bewusstsein für den Wert von Biodiversität zu schaffen – ein „wir brauchen Biodiversität“. Beim Klimawandel ist es bereits gelungen, ein vormaliges Randthema einer breiten Öffentlichkeit bewusst zu machen. Dies sollte auch im Biodiversitätsbereich gelingen und wird dort unter dem englischen Schlagwort *Mainstreaming* verfolgt: die konsequente Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen in allen Politikbereichen.

Biodiversität hat direkte und indirekte Einflüsse auf die menschliche Gesundheit. Indirekt stellt Biodiversität Ökosystemleistungen wie sauberes Trinkwasser, Luft zum Atmen und eine vielfältige Ernährung bereit. Daneben profitiert die menschliche Gesundheit in direkter Weise von Biodiversität, da sie Quelle neuer Arzneimittel und Impfstoffe ist. Es lässt sich hochrechnen, dass ein Großteil, nämlich mehr als 60 Prozent aller Medikamente in den Industrienationen Produkte natürlichen Ursprungs

oder Metabolite davon sind, also ihren Ursprung in pflanzlichen, tierischen, pilzlichen oder mikrobiologischen Lebewesen haben (Mathur und Hoskins 2017). Auch Impfstoffe werden aus natürlichen Quellen, den eigentlichen Krankheitserregern entwickelt. Aktuelle Forschung deutet außerdem darauf hin, dass Biodiversität einen positiven Einfluss auf die menschliche Psyche hat und beispielsweise durch Reduktion von Stress Krankheiten wie einem Herzinfarkt oder einer Depression vorbeugen oder diese mildern kann. So legt zum Beispiel ein Studienergebnis aus Leipzig nahe, dass ein Zusammenhang zwischen der Reduktion des Depressionsrisikos und dem Vorhandensein von Stadtbäumen besteht (Marselle et al. 2020). Es ist zu vermuten, dass eine Verringerung der natürlichen Vielfalt negative Effekte auf die unmittelbare Lebensgrundlage und die psychische Resilienz des Menschen hat. Neben diesen positiven Effekten kann Biodiversität die menschliche Gesundheit allerdings auch negativ beeinflussen wie etwa durch allergene Pflanzenpollen oder Infektionskrankheiten, die durch Mücken und Zecken übertragen werden.

Neben bereits bekannten Infektionskrankheiten sind die meisten – etwa 70 Prozent – der neu auftretenden Infektionskrankheiten wie Ebola, Zika oder Nipah-Enzephalitis und fast alle bekannten Pandemien wie Influenza, HIV/AIDS oder COVID-19 Zoonosen (IPBES 2020). Zoonosen werden durch Mikroben verursacht, die ursprünglich tierische Erreger waren. Diese Mikroben werden durch den Kontakt zwischen Wildtieren, Nutztieren und Menschen übertragen. Aktuell werden schätzungsweise 1,7 Millionen noch unentdeckte Viren in Säugetieren und Vogelarten vermutet, von welchen rund 600.000 bis über 800.000 die Fähigkeit haben, Menschen zu infizieren. Die wichtigsten Reservoirs für Erreger mit pandemischem Potenzial besitzen Nutztiere wie Schweine, Kamele und Geflügel sowie Wildtiere aus der Gruppe der Säugetiere wie Fledermäuse, Nagetiere und Primaten. Dazu kommen noch einige wildlebende Vogelarten, wobei vor allem Wasservögel wie Enten und Möwen als Reservoir hervorgehoben sind. Über den Zusammenhang zwischen der Verschlechterung von Ökosystemen und dem Risiko des Auftretens von Krankheiten bestehen große Wissenslücken. Schließlich fehlen ausreichende Daten über die relative Bedeutung des legalen und illegalen Wildtierhandels für das Auftreten von Zoonosen (IPBES 2020).

Die Genomsequenzierung hat sich in den vergangenen Jahrzehnten stetig weiterentwickelt. Mithilfe der sogenannten Metagenomik ist es mittlerweile möglich, genetisches Material direkt aus Umweltproben zu extrahieren. Dies war nicht immer so: Um genügend DNA für eine Sequenzanalyse aus Kleinstlebewesen gewinnen zu können, waren mikrobiologische Methoden lange Zeit darauf angewiesen, Mikroorganismen zunächst im Labor zu vermehren. Mittlerweile lässt sich genetisches Material jedoch nicht nur aus diesen wenigen, im Labor kultivierbaren Mikroorganismen gewinnen, sondern auch aus kleinsten Spuren von Lebewesen in Gewässer- oder Bodenproben, die uns vorher verborgen waren. Im Jahr 2020 haben Wissenschaftler allein in Was-

ser- und Erdproben, in pflanzlichen, tierischen und menschlichen Geweben sowie in Abwässern und Laboren rund 12.000 neue Mikrobenarten entdeckt (Nayfach et al. 2021). Die Identifizierung von Arten durch Metagenomik bedeutet demnach einen unvergleichlichen Fortschritt für die Biodiversitätsforschung. Sie ermöglicht es, komplexe Zusammenhänge mikrobieller Netzwerke zu erkennen, die essenziell für das Funktionieren von Ökosystemen sind (Gilbert et al. 2011).

Eine weitere Entwicklung, die durch neues Wissen zur Funktion von Genen möglich wurde, ist die Nutzung von Gentechnik oder Genomeditierung in der Bekämpfung vektorübertragener Infektionskrankheiten. Eine aktuelle Anwendung dieser Technologie läuft seit 2021 auf den Florida Keys, wo sich die invasive Ägyptische Tigermücke (*Aedes aegypti*) immer weiter ausgebreitet, die Gelbfieber, Chikungunya, das Zika-Virus und das Denguefieber überträgt. Zu ihrer Bekämpfung werden jetzt gentechnisch veränderte männliche Stechmücken eingesetzt, die außerhalb der Laborumgebung innerhalb weniger Tage sterben, da sie auf ein bestimmtes Antibiotikum im Futter angewiesen sind. Diese Männchen paaren sich in den Sümpfen mit Weibchen der gleichen Art und vermachen auch den Nachkommen das Selbstmordgen, welche nach kurzer Zeit noch im Larvenstadium verenden. Ein erster Test auf den Kaimaninseln war mit einer Reduktion der Tigermückenpopulation um 80 Prozent bereits 2009 erfolgreich (Subbaraman 2011).

Eine Weiterentwicklung dieses „lebenden Insektizids“ ist die derzeit umstrittene Gene Drive-Technologie, mit deren Hilfe die normalen Regeln genetischer Vererbung ausgeschaltet werden könnten. Die Idee: Die Freisetzung männlicher Mücken, die ein Gen an ihre Nachkommen weitergeben, das alle weiblichen, jedoch nicht die männlichen Mücken sterben lässt. Somit verbreiten die männlichen Nachkommen das Gen weiter in der Population und löschen am Ende theoretisch die gesamte Population aus (Hammond et al. 2021). Ziel ist, einzelne Malaria übertragende Stechmückenspezies auszurotten, ohne dabei Biotope durch Pestizideinsatz oder Trockenlegung zu zerstören. Damit könnten 200 Millionen Malariaerkrankte und 1,8 Millionen Tote pro Jahr verhindert werden (Braun 2016). Andererseits ist jedoch nicht immer absehbar, welche Auswirkungen die Ausrottung einzelner Arten auf die Funktionalität von Ökosystemen hat. Mitte Dezember 2016 beschloss die 13. Vertragsstaatenkonferenz des Übereinkommens über die biologische Vielfalt CBD in Cancún (Mexiko) daher die Anwendung des Vorsorgeprinzips auf Gene Drives.

Zentrale Gegenstände der Biodiversitätsforschung sind neben der Beschreibung der verschiedenen Arten und Ökosysteme auch das Verständnis ihrer Dynamik und der ökologischen Interaktionen zwischen ihnen. Ein besseres Verständnis dieser ökologischen Prozesse ist unter anderem für den Biodiversitätsschutz oder für das Verständnis von Ökosystemfunktionen und damit auch für das Verständnis der Resilienz der Biosphäre von großer Bedeutung. Dabei wird in der Biodiversitätsforschung seit geraumer Zeit

verstärkt auf den Nutzen künstlicher Intelligenz (KI) und Digitalisierung gesetzt. Der Einsatz von Technologien soll vor allem dazu dienen, die Datengrundlage zu Arten und Ökosystemen zu verbessern und diese universell zugänglich und nutzbar zu machen. KI hat das Potenzial, die Forschung zu den hochdynamischen und hochkomplexen Zusammenhängen im Bereich der Biodiversität deutlich voranzubringen. Der Einsatz von KI ermöglicht neben der Durchführung von Studien mit sehr hohen Datenmengen auch die Analyse langer Zeitreihen und räumlicher Dynamiken. Letztere Analysen können zur Simulation von Wechselwirkungen, zur Mustererkennung und Theoriebildung genutzt werden. Die Biodiversitätsforschung profitiert von den neuen KI-Methoden, insbesondere aufgrund des Vorhandenseins lückenhafter Spezies-Datenbanken wie beispielsweise von Insekten. KI kann hier zur automatisierten Arterfassung genutzt werden. Der KI-Einsatz in der Biodiversitätsforschung erfordert die enge Vernetzung der beteiligten Disziplinen Informatik, Biologie und Ökologie.

Handlungserfordernisse

Der Druck auf die biologische Vielfalt und die Lebensräume hält unvermindert an: sowohl an Land als auch auf See weisen die meisten der relevanten Nachhaltigkeitsindikatoren für Deutschland kaum Verbesserungen auf. Ob Freiraumverluste, Stickstoffeinträge in Nord- und Ostsee, Artenvielfalt und Landschaftsqualität, überall verzeichnen die Indikatoren stagnierende oder sogar negative Trends.

Der Rahmen für Biodiversitätspolitik und -forschung wird auf internationaler (UN), regionaler (EU) und nationaler Ebene abgesteckt. Aktuell befindet sich das System im Umbruch, in vielen Prozessen ist man im Begriff, Zielsetzungen zu aktualisieren und Forschungsanstrengungen neu zu fokussieren. Beispiele sind das derzeit in Verhandlung befindliche neue Zielsystem der CBD, das sogenannte Post-2020-Rahmenwerk, die Ausweitung der europäischen Biodiversitätsforschung mit der Europäischen Biodiversitätspartnerschaft Biodiversa+, sowie die ersten Ansätze zur Aktualisierung der Nationalen Biodiversitätsstrategie in Deutschland. Im Vordergrund der globalen Nachhaltigkeitsagenda wie auch der Arbeit des Weltbiodiversitätsrates IPBES stehen vor allem integrierte Ansätze zur Bewältigung der Biodiversitätskrise: die globalen Nachhaltigkeitsziele betonen die Überwindung des Silodenkens genauso wie die neu angelaufenen IPBES-Berichte zu transformativem Wandel und zum Nexus zwischen Biodiversität, Klima, Gesundheit und Ernährung.

Richerzhagen und Rodriguez de Francisco (2020) bekräftigen: „An konkreten Zielen hat es bisher nicht gemangelt. Trotz all der Strategien, Gesetze und Förderprogramme, ob auf internationaler, europäischer oder nationaler Ebene, ist der Verlust von Biodiversität nicht aufzuhalten.“ Handlungsbedarfe sehen Autorin und Autor bei der Umsetzung vereinbarter Ziele, bei der Veränderung individueller Verhaltensweisen, bei der langfristigen Wertschätzung von Biodiversität, bei der Berücksich-

tigung von Kosten, die durch die Inanspruchnahme von Biodiversität entstehen, bei der Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen in anderen Politikbereichen, beim Ausgleich zwischen privatwirtschaftlichen Interessen und gesellschaftlichen Belangen, und schließlich bei der finanziellen Unterstützung des Natur- und Artenschutzes in den biodiversitätsreichen Schwellen- und Entwicklungsländern durch die Industrieländer (ebd.). Letztendlich aber sind all diese Handlungsfelder miteinander verknüpft, und dies oft auf sehr komplexe Weise, wie sich am Beispiel genetischer Ressourcen zeigt.

Die notwendige (Gewinn-)Beteiligung von Staaten und nichtstaatlichen Gruppen wie indigenen Gemeinschaften an der Nutzung ihrer genetischer Ressourcen (Access and Benefit Sharing, ABS) wurde international durch das Nagoya-Protokoll im Rahmen des Übereinkommens über die biologische Vielfalt (CBD) geregelt (CBD 2011). Allerdings scheitert die Umsetzung dieses internationalen Vorteilsausgleichs häufig an bürokratischen Hürden nationaler Institutionen sowie diversen Einzelinteressen gesellschaftlicher Gruppen und Staaten (Heinrich et al. 2020). Diese Gemengelage führt nicht selten zum Erliegen des Austauschs genetischer Ressourcen und zum illegalen Transport über Ländergrenzen hinweg. Trotz des Nagoya-Protokolls fehlen also zeitgemäße, robuste und einfache internationale Mechanismen zum Austausch genetischen Materials.

Die Bewahrung von Landrassen und wilden Verwandten von Nutzpflanzen hat jedoch eine große Bedeutung für die Sicherung der Welternährung. Sie verfügen oft über genetische Eigenschaften, die genutzt werden können, um Nutzpflanzen an den Klimawandel oder neuartige Krankheiten anzupassen und damit die Resilienz und Produktivität der Landwirtschaft zu stärken. Diese genetischen Ressourcen sind jedoch noch ungenügend geschützt und nicht nur durch den mangelnden internationalen Austausch, sondern auch durch lokale Umweltkatastrophen und Kriege gefährdet. Der Global Crop Diversity Trust – eine unabhängige internationale Organisation mit dem Ziel, die Vielfalt der Nutzpflanzen zu bewahren und verfügbar zu halten – entwickelt Strategien für den Schutz der Agrobiodiversität (Crop Trust 2019). Je nach Nutzpflanze sind spezifische Erhaltungsstrategien notwendig, die zum einen die Aufbewahrung von Samen und Pflanzenteilen *ex situ*, also in Genbanken einschließen. Dabei ist das Ziel, den Großteil der genetischen Variation auf mehrere Genbanken verteilt zu sichern. Zu diesem Zweck wurde auch das sogenannte „Svalbard Global Seed Vault“, ein Saatgutlager im ewigen Eis Spitzbergens eingerichtet, das im Fall von Extremereignissen Pflanzenmaterial bereitstellen kann, die anderswo verloren gingen. Hier sind bereits über eine Million Saatgutproben aus fast allen Ländern der Welt eingelagert (Crop Trust 2021). Die Erhaltungsstrategien schließen aber auch die Ausweisung und Kontrolle von Schutzgebieten ein, um ganze Pflanzenpopulationen *in situ*, also in der Umwelt, zu schützen. Dies ist besonders wichtig für Nutzpflanzen

wie Vanille (Bramel und Frey 2021), deren zahlreiche bisher nicht identifizierte wilde Verwandte in bisher wenig vom Menschen berührten Biodiversitäts-Hotspots wie dem Amazonasbecken vorkommen, die jedoch von Entwaldung bedroht sind.

Ein weiterer strittiger Punkt im Rahmen internationalen Austauschs genetischer Ressourcen sind digitale Sequenzinformation (DSI) über Lebewesen. Einerseits ist ein freier Austausch notwendig, um wissenschaftliche Forschung zu ermöglichen. Die freie Verfügbarkeit von DSI war eine der Voraussetzungen für die Entwicklung von Impfstoffen gegen Covid-19 und ermöglicht das Aufspüren von Duplikaten in Genbanken. Am Beispiel des Nutzpflanzen-Saatguts: Nur geschätzt 25 bis 30 Prozent der weltweit 7,4 Millionen Pflanzenproben in Genbanken sind keine unbemerkten Kopien (Schmitz et al. 2021). Zudem ermöglicht frei verfügbare DSI durch die Möglichkeit des Abgleichs genetischer Informationen die Identifizierung und den Schutz bedrohter Spezies im Wildtierhandel. Die Abschätzung möglicher Profite aus Sequenzinformationen und die Kontrolle des DSI-Austauschs sind allerdings hoch komplex. Die CBD-Vertragstaatenkonferenz hat aufgrund schwerwiegender Meinungsverschiedenheiten zu DSI einen wissenschaftlich-politischen Prozess etabliert, um adäquate Regelungen zu identifizieren (Biosafety Unit 2021).

Das Beispiel der genetischen Ressourcen macht klar, wie dringlich und komplex die Erhaltung der Biodiversität als menschliche Lebensgrundlage ist und dass sie eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe ist, die alle Gesellschaftsbereiche tangiert: Politik, Wissenschaft, Wirtschaft, Technik – die große Öffentlichkeit. Folgt man der Theorie zu den Grenzen des globalen Wachstums (Steffen et al. 2015; Persson et al. 2022), ist die Erhaltung der biologischen Vielfalt eine noch dringlichere Aufgabe als der Klimaschutz. Dies wird aus einer Darstellung der Teilbereiche des Erdsystems deutlich, die die planetare Belastung für jeden Teilbereich bilanziert. Auch wenn die planetaren Grenzen im Teilbereich Klima deutlich überschritten sind, liegt die Unversehrtheit der Biosphäre und hier besonders das Artensterben weit stärker außerhalb des sicheren Handlungsraums (s. Abb. 2.3).

Ausblick

Durch die erfolgreiche Arbeit des Weltbiodiversitätsrates IPBES und seine fundierten Berichte über den globalen Zustand der biologischen Vielfalt wird immer deutlicher, dass die Menschheit in Bezug auf die Unversehrtheit der Biosphäre den sicheren Handlungsraum bereits weit hinter sich gelassen hat. Die Weltgemeinschaft ringt weiter um die nötige Dynamik, um die Biodiversitätskrise entschlossen in den Griff zu bekommen. Allerdings binden die durch den Coronavirus SARS-CoV-2 ausgelöste Pandemie und der Überfall Russlands auf die Ukraine nicht nur in Europa gesellschaftliche Kräfte, die für die Bewältigung dieser Krise dringend benötigt würden.

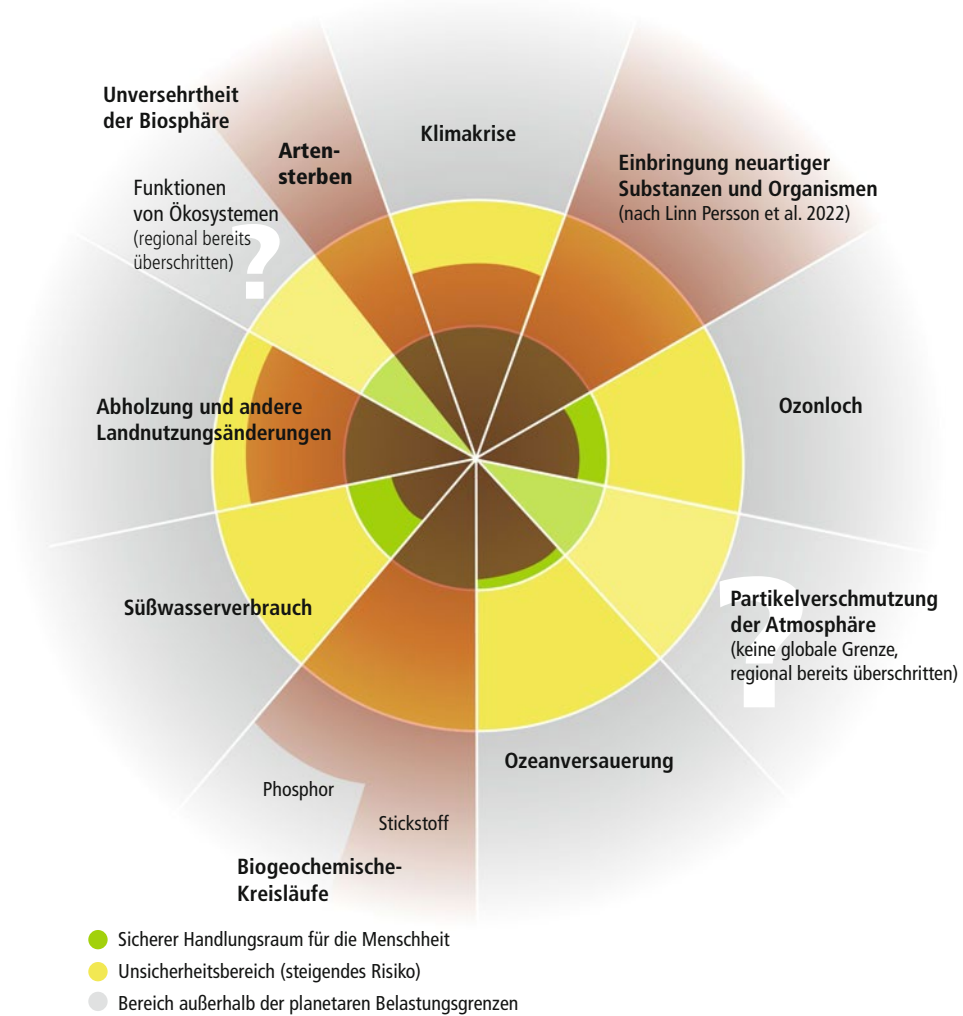


Abb. 2.3 Globale ökologische Belastungsgrenzen (nach Steffen et al. 2015, Persson et al. 2022, verändert): Die roten Sektoren beschreiben den derzeitigen Status der jeweiligen Teilbereiche, für die beiden nicht eingefärbten Bereiche ist der Status räumlich uneinheitlich. Der grüne innere Kreis markiert den sicheren Handlungsraum für die Menschheit, der gelbe Ring steht für den Unsicherheitsbereich mit steigendem Risiko. Der außerhalb des gelben Ringes gelegene Bereich liegt oberhalb der planetaren Belastungsgrenzen und ist mit einem hohen Existenzrisiko für die Menschheit verbunden.

Nach dem Auslaufen der UN-Dekade zur Biodiversität und dem Verfehlen der Aichi-Biodiversitätsziele für 2020 diskutieren die Mitglieder der CBD neue Zielsetzungen für die laufende Dekade und die Vision für 2050, die unter dem anspruchsvollen Titel „Leben in Harmonie mit der Natur“ läuft. Die zähen Verhandlungen zur Verabschiedung des neuen „Post 2020-Rahmenwerks“ zur biologischen Vielfalt verweisen allerdings auf die weiter bestehenden großen nationalen Unterschiede bei der Beurteilung der Dringlichkeit.

Auf globaler Ebene stecken die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen den Handlungsrahmen für die Bewältigung der globalen Herausforderungen im Zeitraum bis 2030 ab. Der intendierte sektor- und themenübergreifende transformative Wandel hin zu einer global nachhaltigen Entwicklung unterstützt die Anstrengungen zur Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen in anderen Politikbereichen. Als Reaktion auf die Biodiversitäts-Krise sind viele Staaten auf der ganzen Welt bedeutende Verpflichtungen für den Schutz und die nachhaltige Nutzung biologischer Vielfalt eingegangen. Auf der Generalversammlung der Vereinten Nationen im Jahr 2020 haben sie sich verpflichtet, 30 Prozent der Landfläche und der Meere bis 2030 zu schützen und die Wiederherstellung von mindestens 15 Prozent der Lebensräume und der damit verbundenen Ökosystemprozesse zu erreichen. Der Weltbiodiversitätsrat IPBES hat mit dem Start zweier neuer Untersuchungen zu transformativem Wandel und dem Nexus zwischen Nahrungs- und Trinkwassersicherheit, menschlicher Gesundheit, Schutz der biologischen Vielfalt und Bekämpfung des Klimawandels die thematischen Schwerpunkte für die kommenden Jahre gesetzt. Klima, biologische Vielfalt und menschliche Gesellschaft werden zunehmend als gekoppelte Systeme gedacht, um politische Maßnahmen erfolgsorientiert umsetzen zu können und zugleich klima- als auch biodiversitätsverträgliche Entwicklungspfade zu ermöglichen (Pörtner et al. 2021).

In der Europäischen Union verpflichtet die EU-Biodiversitätsstrategie 2030 die Mitgliedstaaten, dafür zu sorgen, dass sich der Zustand aller geschützten Lebensräume und Arten bis zum Jahr 2030 nicht verschlechtert und dass mindestens 30 Prozent der Arten und Lebensräume, die sich derzeit nicht in einem günstigen Zustand befinden, bis 2030 einen positiven Trend aufweisen. Im Jahr 2020 hat die EU-Kommission die „Farm to Fork“-Strategie zur nachhaltigen Lebensmittelproduktion vorgestellt. Der neue, ganzheitliche Ansatz vom „Hof bis auf den Teller“ bezieht alle Wirtschaftssektoren ein und erkennt insbesondere die Schlüsselrolle von Landwirtinnen und Landwirten bei der Etablierung einer nachhaltigen Ernährung an. Die 2021 gestartete Europäische Biodiversitätspartnerschaft Biodiversa+ eröffnet die Chance, das Biodiversitätsmonitoring in Europa zu harmonisieren und grundlegend zu verbessern, naturbasierte Lösungen bei der Bekämpfung des Biodiversitätsverlustes in den Fokus zu rücken und die wissenschaftsbasierte Politikberatung zu Biodiversitätsaspekten sicherzustellen.

In Deutschland laufen erste Vorbereitungen zur Aktualisierung der Nationalen Biodiversitätsstrategie, die ja bereits 2007 verabschiedet wurde und nun an die aktuellen Entwicklungen und neuen Erkenntnisse angepasst werden muss. Eine offene Aufgabe auf nationaler Ebene bleibt die Einrichtung einer Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik zur Bündelung der nationalen Biodiversitätsaktivitäten und zur Verknüpfung mit den internationalen und europäischen biodiversitätsbezogenen Prozessen nach dem Vorbild anderer europäischer Länder wie beispielsweise Belgien, Frankreich und der Schweiz. Mit dem Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) soll gemeinsam vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV ein eigenständiges Forschungsprogramm aufgelegt werden, das stärker und gezielter als bisher Synergien zwischen Natur- und Klimaschutz schaffen soll.

Um zur Eingangsfrage zurückzukommen: Wie können Biodiversität und Ökosysteme vor dem Hintergrund der globalen Umweltänderungen als Lebensgrundlage für den Menschen stabilisiert werden? Viele Vorschläge liegen auf dem Tisch: die konsequente Berücksichtigung von Biodiversitätsbelangen in allen Politikbereichen, der Einsatz naturbasierter Lösungen für die Klimakrise, die Wiederherstellung degradierter Ökosysteme und die Ausweitung der Schutzgebiete an Land und auf See sind nur einige Beispiele für die diskutierten Lösungsansätze. Hier können ökonomische Anreizmechanismen eine wichtige Rolle spielen, besonders wenn ihre Wirksamkeit, Kosteneffizienz und Sozialverträglichkeit sichergestellt sind. Um die wissenschaftliche Basis für einen effizienten Biodiversitätsschutz weiter zu stärken, sind leistungsfähige Monitoringsysteme zur laufenden Erfassung von Zustand und Trends der Biodiversität erforderlich. Weitere Fortschritte bei den Bemühungen zur Erhaltung der biologischen Vielfalt sind von geplanten europäischen und nationalen Förderbekanntmachungen zu erwarten, die unter anderem die Interaktionen von Biodiversität und menschlicher Gesundheit sowie den Einsatz von KI in der Biodiversitätsforschung in den Fokus nehmen könnten. Um den Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse in die Praxis zu verbessern, muss die Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik ausgebaut, die Wissenschaftskommunikation ausgeweitet, müssen Formate des gesellschaftlichen Dialogs und zur Politikberatung aufgesetzt sowie die Anstrengungen zur Einbindung von Interessengruppen und zur Förderung von Citizen Science intensiviert werden. Nur so können in Gesellschaft, Politik und Wissenschaft erarbeitete Lösungen ihren Weg in die Umsetzung finden, um für mehr Resilienz unserer Biosphäre zu sorgen.

Literatur

- Biosafety Unit (2021): Digital sequence information on genetic resources. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Online verfügbar unter <https://www.cbd.int/dsi-gr/>, zuletzt aktualisiert am 04.05.2022, zuletzt geprüft am 04.05.2022.
- Bramel, Paula; Frey, Felix (2021): Global Strategy for the conservation and use of vanilla genetic resources. Bonn, Germany. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/355095429_Global_Strategy_for_the_conservation_and_use_of_vanilla_genetic_resources.
- Braun, Jörg (2016): Infektionskrankheiten. In: Klinikleitfaden Intensivmedizin. 9. Auflage. Hrsg. v. Roland Preuss Jörg Braun. München: Elsevier.
- Brown, Mark J.F.; Paxton, Robert J. (2009): The conservation of bees: a global perspective. In: Apidologie 40 (3), S. 410–416. <https://doi.org/10.1051/apido/2009019>.
- CBD (2011): Nagoya Protocol on access to genetic resources and the fair and equitable sharing of benefits arising from their utilization to the convention on biological diversity. Text and annex. In: The Nagoya Protocol on access and benefit sharing of genetic resources.
- CBD (2022a): Ecosystem Approach. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Online verfügbar unter <https://www.cbd.int/ecosystem/>, zuletzt aktualisiert am 05.05.2022, zuletzt geprüft am 05.05.2022.
- CBD (2022b): Marine and Coastal Biodiversity. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Online verfügbar unter <https://www.cbd.int/marine/>, zuletzt aktualisiert am 05.05.2022, zuletzt geprüft am 05.05.2022.
- Crop Trust (2019): Breathing New Life into the Global Crop Conservation Strategies - Crop Trust. Online verfügbar unter <https://www.croptrust.org/science-blog/breathing-new-life-into-the-global-crop-conservation-strategies/>, zuletzt aktualisiert am 29.03.2022, zuletzt geprüft am 03.05.2022.
- Crop Trust (2021): Svalbard Global Seed Vault - Crop Trust. Online verfügbar unter <https://www.croptrust.org/our-work/svalbard-global-seed-vault/>, zuletzt aktualisiert am 23.08.2021, zuletzt geprüft am 04.05.2022.
- Gilbert, Jack A.; O'Dor, Ronald; King, Nicholas; Vogel, Timothy M. (2011): The importance of metagenomic surveys to microbial ecology: or why Darwin would have been a metagenomic scientist. In: Microb Informatics Exp 1 (1), S. 5. <https://doi.org/10.1186/2042-5783-1-5>.
- Glowka, Lyle (1995): The Deepest of Ironies: Genetic Resources, Marine Scientific Research and the International Deep Sea-bed Area. 9/4/95: IUCN paper.
- Gunderson, Lance H. (2000): Ecological Resilience—In Theory and Application. In: Annu. Rev. Ecol. Syst. 31 (1), S. 425–439. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425>.
- Hammond, Andrew; Pollegioni, Paola; Persampieri, Tania; North, Ace; Minuz, Roxana; Trusso, Alessandro et al (2021): Gene-drive suppression of mosquito populations in large cages as

- a bridge between lab and field. In: *Nat Commun* 12 (1), S. 4589. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24790-6>.
- Heinrich, Michael; Scotti, Francesca; Andrade-Cetto, Adolfo; Berger-Gonzalez, Monica; Echeverría, Javier; Friso, Fabio et al (2020): Access and Benefit Sharing Under the Nagoya Protocol-Quo Vadis? Six Latin American Case Studies Assessing Opportunities and Risk. In: *Frontiers in pharmacology* 11, S. 765. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00765>.
- Husemann, Martin (2019): Insektensterben – Fakten, Ursachen und Lösungsansätze. In: *Lynx*, Bd. 2019, S. 5–9. Online verfügbar unter https://www.fs-hamburg.org/wp-content/uploads/PDF/LynxDruck_2019.pdf.
- Imran, Muhammad (2020): Neonicotinoid Insecticides: A Threat to Pollinators. Unter Mitarbeit von R. P. Soundararajan und Chitra Narayanasamy (Ed). In: *Trends in Integrated Insect Pest Management*, Bd. 2020. Online verfügbar unter <https://www.intechopen.com/chapters/70695>.
- IPBES (2018): The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia. Unter Mitarbeit von Rounsevell, M., Fischer, M., Torre-Marín Rando, A. and Mader, A. (eds.). Hrsg. v. secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Zenodo. Bonn, Germany. Online verfügbar unter https://ipbes.net/sites/default/files/2018_eca_full_report_book_v5_pages_0.pdf.
- IPBES (2019a): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
- IPBES (2019b): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Unter Mitarbeit von S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio, H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (Hrsg.). Hrsg. v. IPBES secretariat, Bonn, Germany.
- IPBES (2020): Workshop Report on Biodiversity and Pandemics of the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). Unter Mitarbeit von Daszak, P., Amuasi, J., das Neves, C. G., Hayman, D., Kuiken, T., Roche, B., Zambrana-Torrel, C., Buss, P., Dundarova, H., Feferholtz, Y., Foldvari, G., Igbinosa, E., Junglen, S., Liu, Q., Suzan, G., Uhart, M., Wannous, C., Woolaston, K., Mosig Reidl, P., O'Brien, K., Pascual, U., Stoett, P., Li, H., Ngo, H. T. Hrsg. v. IPBES secretariat. Bonn, Germany. Online verfügbar unter <https://zenodo.org/record/4311798#.YnPA8jVCSUK>.
- Jones, Nicola (2011): Human influence comes of age. In: *Nature* 473 (7346), S. 133. <https://doi.org/10.1038/473133a>.
- Klein, Alexandra-Maria; Vaissière, Bernard E.; Cane, James H.; Steffan-Dewenter, Ingolf; Cunningham, Saul A.; Kremen, Claire; Tscharntke, Teja (2007): Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. In: *Proceedings. Biological sciences* 274 (1608), S. 303–313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>.

- Krüß, Andreas; Nigmann, Ursula; Sukopp, Ulrich (2019): Rückgang der Insektenvielfalt – Fakten, Folgen und Handlungserfordernisse. In: *Biol. Unserer Zeit* 49 (5), S. 315–316. <https://doi.org/10.1002/biuz.201970507>.
- Marselle, Melissa R.; Bowler, Diana E.; Watzema, Jan; Eichenberg, David; Kirsten, Toralf; Bonn, Aletta (2020): Urban street tree biodiversity and antidepressant prescriptions. In: *Scientific reports* 10 (1), S. 22445. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79924-5>.
- Mathur, Sunil; Hoskins, Clare (2017): Drug development: Lessons from nature. In: *Biomedical reports* 6 (6), S. 612–614. <https://doi.org/10.3892/br.2017.909>.
- Nayfach, Stephen; Roux, Simon; Seshadri, Rekha; Udway, Daniel; Varghese, Neha; Schulz, Frederik et al (2021): A genomic catalog of Earth's microbiomes. In: *Nature biotechnology* 39 (4), S. 499–509. <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0718-6>.
- Persson, Linn; Carney Almroth, Bethanie M.; Collins, Christopher D.; Cornell, Sarah; Wit, Cynthia A. de; Diamond, Miriam L. et al (2022): Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. In: *Environmental science & technology* 56 (3), S. 1510–1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>.
- Pörtner, H. O.; Scholes, R. J.; Agard, J.; Archer, E.; Arneth, A.; Bai, X. et al (2021): IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change. Hrsg. v. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) and Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Online verfügbar unter <https://research-repository.uwa.edu.au/en/publications/ipbes-ipcc-co-sponsored-workshop-report-on-biodiversity-and-clima>.
- Richerzhagen, Carmen; Rodriguez de Francisco, Jean Carlo (2020): Herausforderungen des globalen Biodiversitätsschutzes. In: *Aus Politik und Zeitgeschichte*, 11/2020, S. 4–10. Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/305899/natur-und-artenschutz/>.
- Ries, Melanie; Reinhardt, Timm; Nigmann, Ursula; Balzer, Sandra (2019): Analyse der bundesweiten Roten Listen zum Rückgang der Insekten in Deutschland - Analysis of the German Red Lists to determine the decline of insect species. In: *Natur und Landschaft* 97 (6/7), S. 236–244. <https://doi.org/10.17433/6.2019.50153697.236-244>.
- Sabine, C. L.; Feely, R. A.; Gruber, N.; Key, R. M.; Lee, K.; Bullister, J. L. et al (2004): The oceanic sink for anthropogenic CO₂. In: *Science* 305 (5682), S. 367–371. <https://doi.org/10.1126/science.1097403>.
- Schmitz, Stefan; Barrios, Rodrigo; Dempewolf, Hannes; Guarino, Luigi; Lusty, Charlotte; Muir, Janet (2021): Crop Diversity, its Conservation and Use for Better Food Systems. The Crop Trust Perspective. <https://doi.org/10.48565/scfss2021-j983>.
- Stadlmann, Doris; Adelman, Wolfram (2019): Insektensterben: Dramatische Ergebnisse erfordern schnelles Handeln. Ein Tagungsrückblick. In: *Anliegen Natur* 2019 (41:1). Online verfügbar unter https://www.zobodat.at/pdf/AnliegenNatur_41_1_2019_0017-0024.pdf.

- Steffen, Will; Richardson, Katherine; Rockström, Johan; Cornell, Sarah E.; Fetzer, Ingo; Bennett, Elena M. et al. (2015): Sustainability. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. In: *Science* (New York, N.Y.) 347 (6223), S. 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>.
- Subbaraman, Nidhi (2011): Science snipes at Oxitec transgenic-mosquito trial. In: *Nature biotechnology* 29 (1), S. 9–11. <https://doi.org/10.1038/nbt0111-9a>.
- UNDP / UNEP / World Bank / WRI (2000): *World resources 2000-2001. People and ecosystems : the fraying web of life*. Unter Mitarbeit von C. Rosen, WRI, UNDP, UNEP and World Bank (Ed). Amsterdam, New York: Elsevier Science. Online verfügbar unter <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=230839>.
- WWF/IUCN (2001): *The status of natural resources on the high-seas*. Gland, Switzerland. Online verfügbar unter <https://www.unclosuk.org/sites/unclosuk/files/documents/HIGH-SEAS.PDF>.
- Zaller, J. G. (2020): Insektensterben – inwiefern sind Pestizide dafür verantwortlich. In: *Entomologica Austriaca* (27), S. 285–295. Online verfügbar unter https://www.zobodat.at/pdf/entau_0027_0285-0295.pdf.



Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de> veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.