

1 BIODIVERSITÄT: DEFINITION, BEDEUTUNG UND ÄNDERUNGEN

Biologische Vielfalt, die Biodiversität genannt, ist elementar für das Funktionieren unserer Welt. Biodiversität beschert uns Menschen mannigfaltige Gaben und erschafft soziale und kulturelle Vielfalt. Aber was genau verbirgt sich hinter dem Begriff Biodiversität? Ein weltweites Übereinkommen über die biologische Vielfalt (*Convention on Biological Diversity*) legte im Jahr 1993 fest, dass Biodiversität vier Kategorien umfasst: die genetische Vielfalt, die Artenvielfalt, die Ökosystemvielfalt und Ökosystemleistungen. Biodiversität ist ein hohes Gut, welches der Menschheit direkt oder indirekt in vielfältiger Weise nützt, beispielsweise als Nahrung, Arzneimittel, Rohstoff, Klimaregulator, im Hochwasserschutz oder zur Erholung. Biodiversität ist andererseits auch ein Schutzgut, welches vielfach bedroht ist. Der derzeitige Verlust der Biodiversität ist 100 bis 1.000 Mal höher als im langfristigen geologischen Mittel. Ein weltweiter Zensus der Biodiversität ist in vollem Gange – es werden Arten gezählt, DNA analysiert, Ökosysteme vermessen, Ökosystemdienstleistungen errechnet und Datenbanken gespeist. Dieser Zensus ist ein Wettlauf mit der Zeit, denn Forscher erwarten einen noch weiter stark zunehmenden Verlust der Biodiversität bis zum Ende dieses Jahrhunderts, nicht nur primär durch Übernutzung und voranschreitende Ausbreitung der Landwirtschaft und durch intensive Fischerei, sondern auch aufgrund der Klimaänderung.

1.1 Was versteht man unter Biodiversität und wie wird sie erfasst?

JULIAN GUTT & MARK AULIYA

Was versteht man unter Biodiversität und wie wird sie erfasst? Nach dem internationalen »Übereinkommen über die Biologische Vielfalt« umfasst Biodiversität die Variabilität unter Organismen aus Land-, Meeres- und sonstigen aquatischen Ökosystemen. Sie schließt die Vielfalt innerhalb und zwischen Arten ein, sowie die von Ökosystemen und biologischen Funktionen. Biodiversität wird durch evolutive und ökologische Kräfte angetrieben, einschließlich natürlicher und menschenverursachter Störungen. Eine aktuelle Schätzung ergab eine Anzahl von 8,7 Mio. aller lebenden Arten außer Bakterien und Archaeobakterien. Humanökologisch umfasst Biodiversität alle Bereiche, die dem Menschen in einer gesunden Biosphäre dienlich sind. Sie steht allerdings fast überall auf der Erde unter dem Stress des Klimawandels und anderer anthropogener Einflüsse. Wissenschaftlich wird Biodiversität als Funktion aus der Anzahl von Arten und ihrer zahlenmäßigen Zusammensetzung definiert. Dabei unterscheidet man zwischen Diversitäten auf verschiedenen-großen räumlichen Skalen und dem Beta-Diversitätskonzept, das die räumliche oder zeitliche Heterogenität der Artenzusammensetzung unabhängig von einer Arealgröße widerspiegelt. Biodiversität wird an Hand verschiedenster zahlenmäßiger oder grafischer Methoden analysiert.

For what does biodiversity stand and how is it measured? According to the international »Convention on Biological Diversity« biodiversity comprises the variability among living terrestrial, marine and other aquatic organisms; it includes diversity within and between species, of ecosystems, and of biological functions. Biodiversity is shaped by evolutionary and ecological drivers including natural and anthropogenic disturbances. A recent estimation of all species on earth except bacteria and archaeobacteria is 8.7 millions. In terms of human ecology biodiversity comprises everything that contributes to the human wellbeing in a healthy biosphere. However, biodiversity is almost everywhere on earth under stress due to climate change and other anthropogenic impact. It is scientifically defined as a function of the richness and numerical composition of species. It can be analysed at different spatial scales. The beta-diversity concept describes the spatial or temporal heterogeneity in species composition independently of the size of area. Biodiversity can be analysed by a variety of numerical and graphic analyses.

Was ist Biodiversität und wer kümmert sich international darum?

Biodiversität bedeutet Lebensvielfalt. Fachleute verstehen darunter heute eher ein Wissenschaftskonzept zum Verständnis der Lebenswelt als nur eine Messgröße. Trotzdem ist eine Definition möglich, über die in Politik und Wissenschaft Einigkeit herrscht. Das »Übereinkommen über die Biologische Vielfalt« legt in Artikel 2 fest: »Im Sinne dieses Übereinkommens ... bedeutet biologische Vielfalt die Variabilität unter lebenden Organismen jeglicher Herkunft...; dies umfasst die Vielfalt

innerhalb der Arten und zwischen den Arten und die Vielfalt der Ökosysteme«. Derzeit haben 196 Länder das Übereinkommen unterzeichnet, das auf der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro 1992 verabschiedet wurde. Im April 2012 gründete die internationale Staatengemeinschaft den Weltbiodiversitätsrat (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES*) zur Politikberatung zu Themen der biologischen Vielfalt und Ökosystemleistungen. Er ist mit dem Weltklimarat (IPCC) vergleichbar, der in

seinem fünften Assessment Report bei einer moderaten zusätzlichen atmosphärischen Erwärmung von 1–2 °C eine Bedrohung der globalen Biodiversität mit weitreichenden Folgen für den Menschen vorhersieht (IPCC 2014). Je drei Beispiele aus der nahezu unendlichen Fülle mariner und terrestrischer Biodiversität sind in Abb. 1.1-1 und -2 dargestellt.

Warum ist Biodiversität wichtig?

Die Anerkennung von Biodiversität als wichtiges Gut für die Menschheit geht auf die Anstrengungen des Zoologen Edward O. Wilson zurück. In den späten 1980er Jahren rückte er die *biodiversity crisis* in das Bewusstsein der Öffentlichkeit (WILSON 1992). Damit war das rasante menschenverursachte Artensterben gemeint, vor allem in den Tropenwäldern. Diese Entwicklung geht mit erheblichem Stellenabbau von Wissenschaftlern an Museen einher, die mit ihrer Arbeit einen Beitrag gegen das Artensterben leisten könnten. Mittlerweile besteht kein Zweifel darüber, dass Biodiversität durch menschenverursachte Einwirkungen verändert, überwiegend auch dezimiert wird, beim Klimawandel z.B. durch Meereisrückgang und Ausbleichen von Korallenriffen, bei der Umweltverschmutzung durch sauren Regen, bei der Land- und Meeresnutzung durch Landwirtschaft und Überfischung sowie fortschreitende Urbanisierung. Es herrscht Einigkeit auch darüber, dass eine gesunde Umwelt mit ihrer Lebensvielfalt für das Wohlergehen der Menschen elementar ist. Schließlich ist 2004 die kenianische Umweltaktivistin, Wissenschaftlerin und Frauenrechtlerin Wangari Maathai mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichnet worden. Der damalige Chef des Nobelkomitees, Ole Danbolöt Mjøs, stellte in seiner Laudatio fest: »Frieden auf Erden hängt von unserer Fähigkeit zur Bewahrung einer lebendigen Umwelt ab«. Konkret kann der Mensch von einer naturnahen Biodiversität in folgenden Bereichen profitieren: Ernährung und Nutzung biologischer Rohstoffe sowie genetischer Informationen, z.B. als Blaupause für pharmazeutische Produkte, Ökosystemdienstleistungen, wie Sauerstoffproduktion, Kohlendioxid-Aufnahme und Grundwasserreinigung, Bionik und Erhalt gesunder Lebensräume für die menschliche Erholung. Hinzu kommen ethische Gründe.

Beweise für ein alleine durch den derzeitigen Klimawandel verursachtes Artensterben fehlen noch (IUCN 2016). Fakt ist aber, dass sich Verbreitungsmuster sowie die mengenmäßige Zusammensetzung bestimmter Arten durch den Klimawandel bereits merklich verschoben haben. Riffbildende tropische Korallen und ihre reichhaltige Begleitfauna sind in besonderem Maße betroffen, aber auch die Vegetation in Bergökosystemen. Aktuelle Studien zufolge werden neben

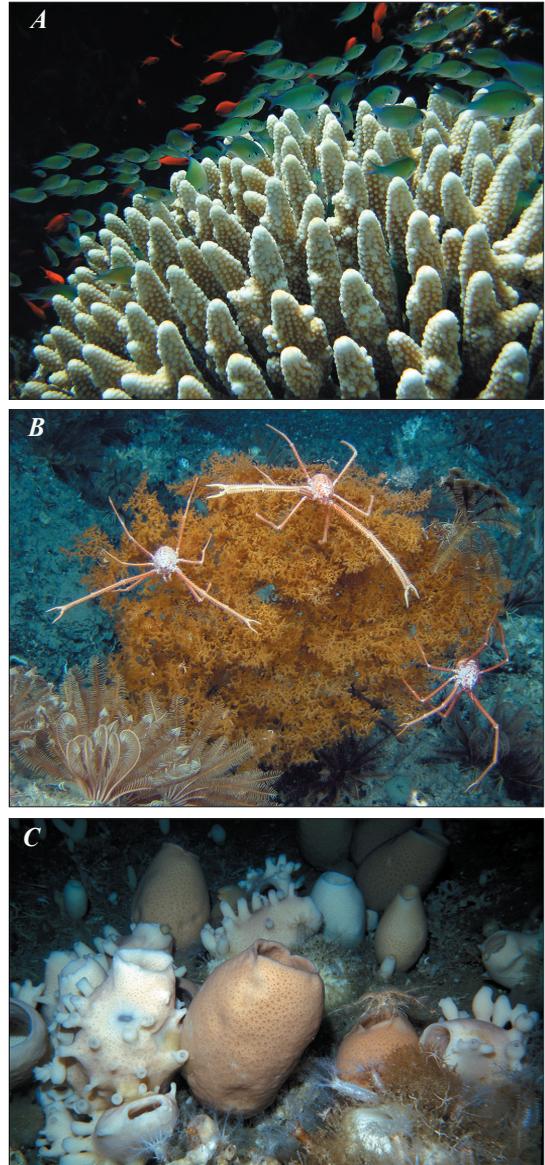


Abb. 1.1-1: Beispiele für marine Biodiversität. **a:** Niedrige Geweihkoralle (*Acropora humilis*) mit Grünem Schwalbenschwänzchen (Riffbarsch, *Chromis viridis*) und Juwelen-Fahnenbarsch (rot, *Pseudanthias squamipinnis*). Rotes Meer, Golf von Akaba, Dahab, Ägypten, Blue Hole. © Pavel Bečka, AG Biodiversität und Evolution der Tiere, Institut für Biologie und Umweltwissenschaften, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. **b:** Eine Dörnchenkoralle (*Anthipataria*) wird von Furchenkrebse (Decapoda, *Chirostylidae*) besiedelt. Unten links: Haarsterne (*Crioidea*). Kaltwasserkorallenriff, Nordostatlantik, westlich von Irland, Wassertiefe ca. 900 m. ©IFREMER. **c:** Glaskschwämme (*Hexactinellida*, Gattung *Rossella*) formen lokal für viele andere Tiere ein für den Schelf des Südlichen Ozeans typisches Mikrohabitat. Südöstliches Weddellmeer, Wassertiefe ca. 280 m. © Julian Gutt, AWI.

dem Klimawandel die Übernutzung von Arten, gefolgt von der Ausbreitung von Landwirtschaft, zu den größten »Killern« terrestrischer und die Fischerei mariner Biodiversität gezählt (MAXWELL et al. 2016, KNAPP et al. 2017). Der Mensch kann Diversität aber auch erhöhen, z.B. kleinräumig von Vögeln in Streuobstwiesen und möglicherweise großflächig in Kulturlandschaften.



Abb. 1.1-2: Beispiele für terrestrische Biodiversität. © Mark Auliya, UFZ. **a:** Tropische Tieflandvegetation auf Karsthügeln in Malaysia nahe Kuala Lumpur mit umgestürztem Baum. Im Vordergrund ein Moosfarn (*Selaginella* sp.), im Hintergrund links eine Rattan- oder Rotangpalme, das »Gestänge« sind Luftwurzeln einer Würgefäule (*Ficus* sp.). **b:** Auch Wüsten haben eine manchmal eine beachtliche Biodiversität, hier repräsentiert durch eine Hornvipere (*Cerastes cerastes*). Negev-Wüste, Israel. **c:** Wildblumenwiese in Texas, U.S.A.

Oft ist eine solche Entwicklung aber auch nicht wünschenswert, z.B. wenn natürliche Massenvorkommen von Sardinen durch Überfischung kollabieren und so ein ausgewogeneres Dominanzmuster entsteht. Eutrophierung ursprünglich nährstoffarmer Biotope kann zwar theoretisch die Diversität erhöhen, führt aber zugleich oft zum Verlust angepasster Spezialisten und zur Dominanz opportunistischer Organismen. Durch Pipelines, Windmühlen-Fundamente oder im Meer versenkte Auto-, Panzer- und Schiffswracks können als künstliche Substrate zusätzliche Arten anlocken. So verbessern sich die Bedingungen für Hobbyangler und Fischzucht im Freiland (*Aqua-Farming*), das natürliche Ökosystem wird so aber nachhaltig gestört. Es gibt auch menschenverursachte Artenbildung. Ob der derzeitige Klimawandel aber dazu schon beiträgt, ist nicht nachgewiesen.

Vor dem Hintergrund der gesellschaftlichen Relevanz sollte berücksichtigt werden, dass Biodiversität zunächst wertfrei ist. Auch Lebensräume mit geringer Artenvielfalt, z.B. in Wüsten, Höhlen, nährstoffarmen Biotopen wie Hochmooren oder mit massenhaftem Vorkommen nur weniger Arten, können ganz speziell angepasste und sonst seltene Arten beherbergen und somit für Forschung und Menschheit wertvoll sein.

Wie lässt sich Biodiversität wissenschaftlich definieren?

Eine moderne wissenschaftliche Definition von Biodiversität, die auf ähnliche Vorläufer zurückgeht, ist die von HUBBELL (2001). Er betrachtet sie als »*synonym mit Artenreichtum und relativer Artenhäufigkeit in Raum und Zeit. Artenreichtum ist einfach die Gesamtartenzahl in einem definierten Raum zu einer gegebenen Zeit, relative Artenhäufigkeit bezieht sich auf ihre große Häufigkeit oder Seltenheit*«. Mittlerweile sind sich Biodiversitätsforscher einig, dass es neben dieser auch eine funktionelle Lebensvielfalt gibt. Dabei stehen dann die Vielfalt biologischer Prozesse und deren Raten im Vordergrund, wie z.B. die Produktion von Biomasse und Nahrung für andere Arten, Wegfraß, CO₂-Aufnahme, Verbrauch und Recycling von Nährstoffen sowie Beteiligung an Symbiosen. Die genetische Diversität kann sich in einer physiologischen Diversität niederschlagen, die sich auf die Vielfalt biochemischer Vorgänge in Zellen, Organen und Organismen und deren Zusammenwirken bezieht.

Bei dem stetigen Bemühen von Wissenschaftlern, biologische Informationen quantifizieren zu wollen, soll nicht vergessen werden, dass es auch eine Lebensvielfalt gibt, die sich nicht leicht in Zahlen fassen lässt, z.B. von Vogel- oder Walstimmen, Farben und deren Muster, Formen, Verhalten, Sinnesleistungen, intellektuellen Fähigkeiten sowie Empfindungen. Die Komple-

xität, die sich insbesondere aus der Zuordnung solcher Merkmale zu Millionen von teilweise miteinander vergesellschafteten Arten ergibt, wird wohl kaum von irgendeinem anderen System auf der Erde übertroffen. Eine Schlüsselrolle für die Nutzung entsprechenden Wissens spielen Datenbanken, in denen Informationen insbesondere zum Erbgut abgelegt sind, und Museen, in denen echte konservierte Organismen in wissenschaftlichen Sammlungen aufbewahrt werden.

Welche Parameter werden für eine Biodiversitätsanalyse gebraucht?

Trotz ihrer Komplexität kann Biodiversität bei Einhaltung von allgemeingültigen Definitionen analysiert und berechnet werden und liefert reproduzierbare Ergebnisse. Moderne molekularbiologische Methoden zum Entschlüsseln von Artbildungsprozessen und Verwandtschaftsbeziehungen einschließlich bisher verborgener »kryptischer« Arten entwickeln sich ständig weiter. Die Auswahl der dafür geeigneten Erbgut-Sequenzen muss der jeweiligen Fragestellung Rechnung tragen. Das Zählen von Individuen zur Bestimmung der Artenvielfalt ist viel einfacher. Es muss allerdings darauf geachtet werden, dass das Vorkommen von Organismen in einer Probe Rückschlüsse auf ihre Häufigkeit in der Natur zulässt und sich nicht durch die Sammelmethode evtl. von Probe zu Probe oder von Art zu Art deutlich unterscheidet. Letzteres kann z.B. bei Fischen der Fall sein, die unterschiedlich gut vor einem nahenden Netz flüchten. Schwierigkeiten mit Zählungen ergeben sich auch, wenn Arten Kolonien bilden, z.B. Korallen, oder bei Organisationsformen, die keine eindeutigen Individuen haben, z.B. bei Pilzen oder Ausläufer-bildenden Pflanzen. Von entscheidender Bedeutung bei der Erfassung der Artendiversität ist auch ein Beprobungsdesign, das für definierte Ökosysteme, Habitate oder Areale repräsentative Ergebnisse erbringen soll. Dies kann aus ineinander verschachtelten Sechsecken oder Kreisen bestehen, um verschiedene räumliche Skalen abzudecken. Die zweite Variable neben der Häufigkeit ist die Artenzahl, deren Bestimmung immer wieder eine Herausforderung darstellt. Entscheidend für gute Biodiversitätsanalysen ist, dass biologisch definierte Arten bekannt sind. Sowohl mit traditionellen als auch mit modernen Methoden gelingt ein 100%iger Nachweis nur selten. Dann muss mit einer Hilfseinheit, den *operational taxonomic units* (OTU), gearbeitet werden, die überwiegend für Mikroorganismen verwendet werden. Die Erfassung der Vielfalt von Habitaten oder ganzer Ökosysteme setzt eine mittel- bis großräumige Kartierung und eine sinnvolle Klassifizierung von Lebensgemeinschaften voraus. Methoden der Landschaftsökologie, wie z.B. Fernerkundungsverfahren mittels

Satelliten oder Unterwasserrobotern, können dabei die »Architektur« von Ökosystemen anhand der Fleckenhaftigkeit von Artenassoziationen erfassen.

Wieviele Arten leben auf der Erde?

Auch wenn es attraktiv ist, Artenzahlen für die gesamte Erde zu präsentieren, ist deren Abschätzung nur bedingt möglich. MORA et al. (2011) gingen für ihre Berechnung von einer quantitativ vorhersagbaren Zuordnung aller Arten zu höheren systematischen Gruppen aus. Auf dieser Grundlage, in Kombination mit den 1,2 Mio. bekannten Arten, kamen sie auf eine Gesamtzahl aller auf der Erde vorkommenden Arten von $8,7 \pm 1,3$ Mio. (ohne Bakterien und Archaeobakterien), von denen ungefähr 25% marin sind. Es gibt auch Spekulationen über bis zu 100 Mio. Arten jeweils an Land und im Meer (APPELTANS et al. 2012). Die artenreichsten Lebensräume sind dabei in den Ozeanen die Tiefsee mit angrenzenden Kontinentalhängen und die tropischen Korallenriffe. An Land sind es die tropischen Regenwälder. Im Meer gelten Schnecken und Fadenwürmer (APPELTANS et al. 2012), an Land Käfer (STORK et al. 2015), Blütenpflanzen und Schlauchpilze (HAWKSWORTH 2001; JOPPA et al. 2010) als artenreichste Vielzeller. Hinzu kommen die in ihrer Artenzahl noch viel schwerer abzuschätzenden vielleicht 10^7 bis 10^{30} Bakterien (SCHLOSS & HANDELSMAN 2004).

Wie wird Biodiversität erfasst und gemessen?

Im Meer werden Schleppnetze zur Erfassung von Biodiversität eingesetzt, die allerdings verschiedene Lebensformen unterschiedlich gut erfassen. Mikroorganismen im Wasser fängt man mit Schöpfnern. Kleinere Sedimentbewohner, wie Bakterien, Fadenwürmer oder Kleinkrebse, werden mit Greifern oder Stechrohren erbeutet; sie lassen sich dann aus dem Schlamm herausfiltern. Taucher zählen Meeresbodenbewohnern entlang von Linien oder auf definierten Flächen, ähnlich wie Vegetationskundler an Land. Zählungen von Robben und Walen erfolgen auf Streifen, wobei mit abnehmender Entfernung von der Mittellinie von einer verringerten Erkennbarkeit ausgegangen wird. Neuerdings verwendet man dafür neben Flugzeugen und Helikoptern auch Drohnen. Ähnliche umweltschonende Zählungen von Meeresbodenbewohnern erfolgen durch bildgebende Methoden, für die autonome oder ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge als Plattform dienen. Sie werden insbesondere dann eingesetzt, wenn räumliche Muster eine Rolle spielen, auf Hartböden, wo andere Geräte nicht »funktionieren«, und wenn am Meeresboden verankerte große Tiere, z.B. Korallenkolonien oder Schwämme, häufig sind.

Auch die Methoden zur Erfassung der Vielfalt ter-

restrischer Organismen sind an die Lebensweise der Arten in ihrem angestammten Lebensraum angepasst (SOUTHWOOD & HENDERSON 2000). Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Methoden für Wirbellose und Wirbeltiere in Süßwasser- und Trockenhabitaten, weiterhin gibt es spezielle Methoden für fliegende und nicht fliegende Organismen. Dabei sollte die Biodiversitätserfassung für den jeweiligen Lebensraum schonend erfolgen; in der Vergangenheit war dies häufig nicht der Fall, z.B. beim »fogging« von Baumkronen mit Abgas-Insektiziden oder dem Einsatz der Elektrofischerei im Süßwasser. Nicht-invasive Methoden und aktive Erfassungsmethoden eignen sich vor allem für rufende Wirbeltiere, z.B. Froschlurche, Vögel oder lautrufende Säuger, wie Affen oder Paarhufer. Indirekte Nachweise zum Vorkommen von Wirbeltieren liefern Federn, Exkreme, Trittsuren, Stimmen sowie Fraßspuren oder Brutstätten (Bauten, Nisthöhlen). Für die aktive Erfassung Wirbelloser und Wirbeltiere gibt es eine Vielzahl von Fallentypen, bei denen z.B. Pheromone, Köder oder Licht als Lockmittel dienen. Für pflanzensoziologische Erfassungen wählt man unterschiedlich große Aufnahmeflächen aus, z.B. bei Salzwiesen bis zu 5 m², Wiesen bis zu 25 m² und Wäldern bis zu 500 m². Die zu bestimmenden Pflanzen werden auch fotografiert und herbarisiert; zusätzlich werden vegetationsökologische Daten aufgenommen.

Die Erfassung von Biodiversität unterliegt einem Grundproblem, das übrigens alle statistischen Verfahren in der Biologie haben. Linnés Merksatz »*Natura non facit saltus*« (die Natur macht keine Sprünge) bezog sich zwar ursprünglich auf evolutive Entwicklungen, kann aber ebenso gut auf räumliche Verteilungen übertragen werden. Das Problem fehlender Abgrenzungen lässt sich mit Detaildefinitionen lösen, z.B. kann festgelegt werden, was in ein zu analysierendes System einbezogen werden soll, bzw. auf welche Organismengruppen oder welches Areal sich die Erfassung beziehen soll. Dann müssen Standardisierungen vorgenommen werden, die eine Vergleichbarkeit zwischen Datensätzen ermöglicht. Die Berechnung einzelner Biodiversitätswerte ohne Vergleichsmöglichkeiten wäre nämlich nur von geringer Aussagekraft.

Eine besondere Herausforderung bei einer Biodiversitätsanalyse ist die oft unüberschbare Datenfülle, die sich aus der zahlenmäßigen Zusammensetzung vieler Arten ergibt. Auch hierfür gibt es Lösungen, an deren Anfang die Frage steht, wo der Fokus der Untersuchung liegen soll. Man kann die gesamte Biodiversitäts-Information in einer einzigen Zahl vereinigen. Sie errechnet sich als Funktion der Artenzahl und zahlenmäßigen Verteilung der Individuen auf die Arten (Äquität, Evenness oder *Equitability*). Verschiedene solcher

Indizes können entlang eines Gradienten angeordnet werden, an dessen einem Ende die reine Artenzahl, in der Mitte eine etwa gleichgewichtete Repräsentanz von Artenzahl und zahlenmäßiger Zusammensetzung und am anderen Ende nur die Äquität liegen.

Wenn es besonders auf die Lebensvielfalt ankommt, wie sie die Evolution für große Gebiete hervorgebracht hat, kann u.U. die reine Artenzahl als Näherungswert für Biodiversität dienen. Es ist dann zu empfehlen, einen Wert für ein ganzes Gebiet zu ermitteln und nicht nur die Artenzahl in den Proben zu berücksichtigen. Dafür gibt es zwei Verfahren. Bei der ersten ist die zu schätzende Artenzahl eine Funktion der seltenen Arten in einer Probe. Bei einer Probe mit vielen seltenen Arten wird davon ausgegangen, dass es im gesamten Ökosystem noch viel mehr solcher seltenen Arten gibt und die Artenzahl in der Probe deutlich unterschätzt ist. Umgekehrt kann man annehmen, dass bei wenigen seltenen Arten in einer Probe die erfasste Artenzahl der des gesamten Ökosystems relativ nahe kommt. Das zweite Verfahren setzt voraus, dass es eine rechnerische Beziehung zwischen Arealgröße und der darauf vorkommenden Artenzahl gibt. Zwei entscheidende Rahmenbedingungen liegen der Anwendbarkeit dieser Arten-Areal-Beziehung zugrunde: (1) Die *species-accumulation curve* muss einer Sättigungsfunktion mit abnehmender Zahl hinzukommender Arten bei zunehmender Arealgröße entsprechen, und (2) es muss angenommen werden, dass sich der Verlauf dieser Funktion in dem Bereich, in den hineinextrapoliert werden soll, nicht verändert.

Bei ökologischen Ansätzen, z.B. Biodiversität als Frühwarnsystem zu nutzen, kann die Äquität wichtiger als die reine Artenzahl sein. Es wird dann angenommen, dass sich z.B. bei anhaltendem Klimawandel zunächst nur die Äquität verschiebt, bevor später Arten regional aussterben oder hinzukommen. Indizes, die Biodiversität als Funktion der Artenzahl und zahlenmäßigen Zusammensetzung der Arten darstellen (*Abb. 1.1-3*), gibt es viele. Am bekanntesten ist der aus der Informationslehre stammende SHANNON-WIENER-Index, der von SHANNON & WEAVER (1949) publiziert wurde, während N. WIENER die Rechenmethode entwickelte. Andere Indizes, die eher die Artenzahl oder die Äquität mathematisch betonen und sich auf die zahlenmäßige Zusammensetzung einzelner Arten oder auf die Häufigkeit aller Arten beziehen, sind die von MARGALEF, HILL, BRILLOUIN, WHITTAKER, FISCHER & SIMPSON (MAGURRAN 1988). Äquität wird nach PIELOU berechnet, indem der SHANNON-WIENER-Index durch den Logarithmus der Artenzahl dividiert wird und damit das Ergebnis unabhängig von der Artenzahl wird. Ein Maß, das auch die Verwandtschaftsbeziehungen der Arten unterei-

einander berücksichtigt, ist die *taxonomic distinctness*. Dabei ergibt sich für Artenzusammensetzungen aus nur einer systematischen Einheit, z.B. Schnecken, ein niedrigerer Wert als für ebenso viele Arten, die nicht so eng miteinander verwandt sind. Außer Modulen zur Software R liefern das PRIMER und das SPADE Programm nützliche Instrumente zum Berechnen nicht nur von Biodiversitätswerten.

Mehr Information bleibt erhalten, wenn Biodiversität in Form einer Kurve dargestellt wird. Der Vorteil solcher kumulativen Dominanzplots ist, dass alle Primärdaten direkt oder indirekt erhalten bleiben. Besonders gute Vergleichsmöglichkeiten liefert die *Rarefaction*-Methode. Wenn von nur einer Probe die

zahlenmäßige Zusammensetzung der Arten bekannt ist, kann diese mit anderen verglichen werden, auch wenn von denen nur die Artenzahl und deren Gesamthäufigkeit vorliegt. Es werden nämlich für alle Proben die zu erwarteten Artenzahlen bei einer festzulegenden Individuenzahl berechnet. Die Probe mit höherer berechneter Artenzahl bei gleicher Individuenzahl hat dann die höhere Biodiversität. Kurven werden dabei erstellt, indem die berechneten Artenzahlen für jede einzelne Individuenzahl aneinandergesetzt werden. Diese Methode eignet sich nur, wenn die zu vergleichenden Datensätze auch ähnliche Dominanzmuster haben.

Eine fundamentale Größe bei der Diversitätsanalyse ist die ökologische Organisationseinheit, z.B. Mikro-

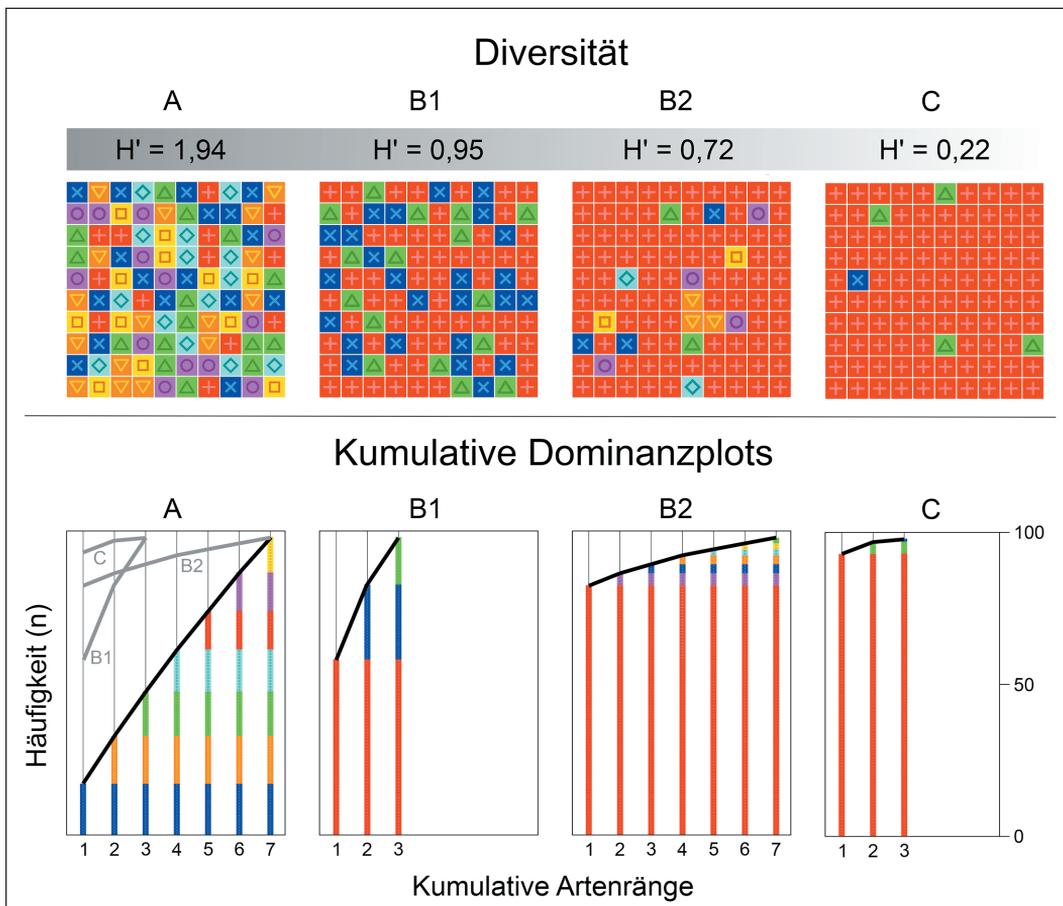


Abb. 1.1-3: Vier Biodiversitätsmuster bei denen einzelnen Individuen (=Kästchen) verschiedenen Arten (=Farben bzw. Symbolen) angehören. Die äußeren Muster zeigen eine hohe bzw. niedrige Lebensvielfalt, was die Werte für den SHANNON-WIENER-Index (H' mit $\log e$) bestätigen. Die beiden mittleren Muster haben trotz großer Unterschiede in Artenzahl (Farbigkeit) und Äquität (Gleichmäßigkeit) ähnlich hohe Shannon-Wiener-Biodiversitätswerte. Unten sind die Biodiversitäten als kumulative Dominanzplots dargestellt. Auf der x-Achse beginnt die Rangfolge links mit der häufigsten Art (1), der zweite Wert bezieht sich auf die Häufigkeit der erst- plus zweithäufigsten Art (2) usw. bis ganz rechts der Wert für alle Arten aufgetragen ist. Die kumulativen Dominanzplots sind die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Häufigkeitswerten. Um die vier Beispiele vergleichen zu können, sind in die linke Grafik (A) die anderen Plots (B1, B2, C) in Grau eingefügt. Wenn eine Kurve über einer anderen liegt, wie z.B. C oder B1 über A, zeigt die untere ein ausgewogeneres Dominanzmuster mit höherer Diversität an. Wenn sich zwei Kurven schneiden ist eine vergleichende Schlussfolgerung nicht möglich.

habitat, Habitat, Lebensgemeinschaft oder Ökosystem, die oft an die zu betrachtenden räumlichen Skalen gekoppelt ist. Trotz des Problems undeutlicher Abgrenzungen, muss eine solche Klassifizierung erfolgen, um nicht Unvergleichbares miteinander zu vergleichen. Auf kleine räumliche Ausdehnung bezieht sich die lokale oder Alpha-Diversität. Als regionale oder Gamma-Diversität bezeichnet man die Artenvielfalt von Lebensgemeinschaften oder Ökosystemen (Abb. 1.1-4). Epsilon-Diversität wird für große Gebiete wie Konti-

nente oder Ozeane berechnet (GRAY 2001). Bei der Beta-Diversität handelt es sich um ein anderes Konzept. Damit ist ein *species turnover* oder Artenwechsel gemeint, der eine homogene bzw. heterogene räumliche Verteilung der Arten unabhängig von der Arealgröße beschreibt. So kann z.B. getestet werden, ob im Meer ein von natürlichen Umweltstörungen geprägtes Schelf-Ökosystem heterogener als ein als stabiler angesehenes Tiefseesystem ist. Weil sowohl bei einer rechnerischen als auch einer grafischen Analyse von Beta-Diversität

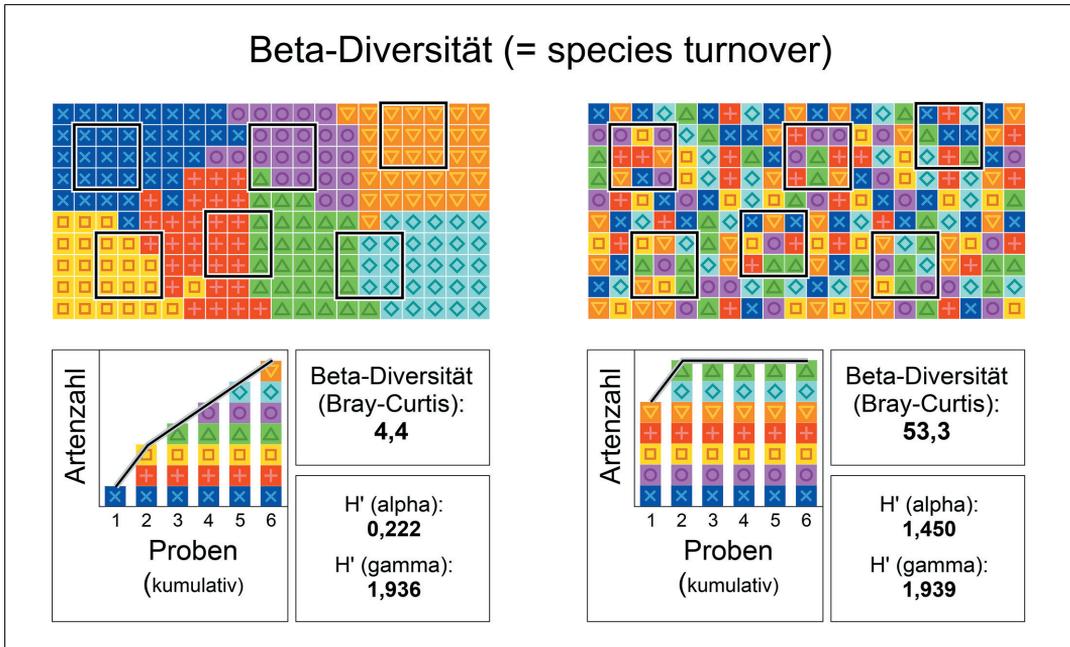


Abb. 1.1-4: Verschiedene Beta-Diversitätsmuster (**oben**) können rechnerisch und grafisch miteinander verglichen werden. Rechnerisch werden Ähnlichkeiten in der Alpha-Diversität (innerhalb der schwarz-weiße Rahmen) von allen Probenpaarungen mit Hilfe des BRAY-CURTIS-Index berechnet und gemittelt. Die größeren BRAY-CURTIS-Ähnlichkeiten des rechten Musters zeigen eine geringere räumliche Heterogenität, bzw. einen niedrigeren species turnover und damit eine geringere Beta-Diversität an. Bei der alternativen grafischen Methode werden auf der y-Achse die Artenzahlen für kumulativ aufzusummierende Proben (x-Achse) aufgetragen (siehe Balkendiagramme). Der erste Punkt für die Proben (1) repräsentiert die lokale Skala mit der Artenzahl für eine einzige Probe, gefolgt von Artenzahlen für Probenpaare (2), Proben-Drillinge (3) usw. (4–6). Der letzte Punkt (6) ist die für das gesamte Probenmaterial berechnete Gamma-Diversität. An Stelle der einfachen Artenzahlen, können in einer anspruchsvollen Analyse auch Diversitäten aufgetragen werde. An Stelle der einzelnen Werte können auch Mittelwerte verwendet werden. Weil für den letzten Wert (6) die Daten für alle Proben aufsummiert werden, kann für ihn zunächst keine Standardabweichung berechnet werden und es gibt keine Vergleichsmöglichkeiten. Dies ist allerdings mit Hilfe statistischer »Tricks«, des Jack-Knife-Verfahrens oder der Bootstrap-Technik, möglich. Wenn man die einzelnen Datenpunkte verbindet, ergibt sich die schwarz-graue Kurve, deren Steigung die Beta-Diversität ist. Sie ist steil, wenn mit jeder zusätzlich aufsummierten Probe (auf der x-Achse von links nach rechts) stetig neue Arten (auf der y-Achse) hinzukommen. Dann ist die Heterogenität im Sinne eines species turnover und damit die Beta-Diversität groß (**links**). Bildlich ausgedrückt bedeutet dies, dass sich die Fauna oder Flora merklich ändert, wenn man einen Spaziergang durch eine Landschaft oder einen Tauchgang in einem Korallenriff macht. Wenn der Spaziergang in einer Landschaft mit gleichmäßiger räumlicher Verteilung der Arten stattfindet, ist die Kurve flach (**rechts**) und damit die Beta-Diversität niedrig. Bei einer vereinfachten Analyse wird die Differenz aus Gamma- und Alpha-Diversität aus dem linken bzw. rechten Ende der Kurve, berechnet. Ist diese Differenz gering, kann die Kurve auch keine große Steigung haben und die Beta-Diversität ist gering. Ist die Differenz groß, so muss eine steilere Steigung vorliegen und damit ist die Beta-Diversität hoch. Die zwei Beispiel-Muster sind absichtlich so zusammengestellt, dass sich deutliche Unterschiede in der Beta-Diversität ergeben, während sich die aus allen Kästchen berechneten Gamma-Diversitäten (SHANNON-WIENER-Index, H' mit $\log e$) nur sehr wenig, die Alpha-Diversitäten (nur in den schwarz-weißen Rahmen) aber ebenfalls deutlich unterscheiden.

auch Alpha- und Gamma-Diversitäten eine Rolle spielen, enthält das Beta-Diversitätskonzept eine besonders große Informationsfülle.

Eine andere Betrachtungsweise von Lebensvielfalt, allerdings mit eingeschränkter Interpretationsmöglichkeit, bietet die Metagenomik. Dabei wird mit molekularbiologischen Methoden die DNA einer unbekannt großen Lebensgemeinschaft auf ihre Vielfalt hin untersucht. Diese Methode eignet sich für das schnelle Aufspüren von Reaktionen eines Teilökosystems auf Umweltveränderungen, z.B. den Klimawandel. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass viele wissenschaftlich noch unbekannt Arten mitberücksichtigt werden. Mit diesem metagenomischen Ansatz lässt sich Biodiversität im eigentlichen Sinn allerdings nur dann berechnen, wenn die Ergebnisse mit Hilfe von genetischen Informationen zu einzelnen Arten in Datenbanken abgeglichen werden können.

Soll nicht nur eine Kartierung von Diversitätsmustern an Hand des Vorkommens einzelner Arten, sondern auch eine Analyse der treibenden Kräfte erfolgen, können Diversitätsentwicklungen modelliert werden. In räumlich expliziten zellenbasierten Verfahren ist es insbesondere im Zusammenhang mit dem Klimawandel eine besondere Herausforderung, für viele Modelarten nicht nur deren Umwelt zu simulieren, sondern auch Informationen zu deren Populationsdynamik, so z.B. auch zur Reproduktion, Wachstum, Mortalität und Ausbreitungspotential (*dispersal*) zu berücksichtigen. So können Zukunftsszenarien für die Entwicklung von Biodiversität auf allen räumlichen und zeitlichen Skalen entwickelt werden.

»Treibende Kräfte« für Biodiversität - Biodiversität als »Treibende Kraft«

Die Biodiversität eines Lebensraumes umfasst grundsätzlich die Arten, die durch Artbildungsprozesse innerhalb der Evolution über Jahrmillionen hervorgebracht wurden. Damit sind die in der Evolution wirksamen Kräfte gleichzeitig auch als »Treiber« für eine großräumige Diversität zu sehen. Hierzu zählen sowohl langfristige Umweltstabilität also auch großräumige Ereignisse, wie der Wechsel von Eis- zu Warmzeiten oder geotektonische Veränderungen, wie die Entstehung einer Landverbindung zwischen Nord- und Südamerika. Bei langfristiger Umweltstabilität geht man davon aus, dass es zahlreiche Möglichkeiten für eine Artenaufspaltung sowohl bei räumlich koexistierenden Organismen als auch durch Isolierung von Populationen gibt. Bei ständig schwankenden Umweltbedingungen hingegen, muss die Evolution stets der Umweltveränderung »hinterherlaufen«, insbesondere wenn die innerartliche Diversität niedrig ist und damit der sogenannte Genpool

keine Pufferkapazität hat. So kann sich aus einer Art zwar eine neue entwickeln, aber es entstehen keine zusätzlichen Arten.

Die Entstehung von Arten wird grundsätzlich als Folge ihrer unterschiedlichen ökologischen Anpassung an die Umwelt verstanden. Bei ausbleibendem Erfolg können Arten durch solche Prozesse auch aussterben. Oft sind ökologische Veränderungen aber reversibel oder es kommt bei eingeschränkten Selbstheilungskräften von Ökosystemen (Resilienz) zu dauerhafter Verschiebung in der Biodiversität, einschließlich ihrer Funktion. Als ökologische treibende Kräfte wirken unter den physikalischen Faktoren ebenso natürliche klimatische Veränderungen, z.B. das Klimaphänomen ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*) im südlichen Pazifik wie der anthropogene Klimawandel. Hinzu kommen natürliche oder weitere von Menschen mitverursachte Störungen, wie z.B. Waldbrände, Vulkanausbrüche, Wirbelstürme oder Eisbergstrandungen. Biologische treibende Kräfte sind Wechselwirkungen, wie z.B. Räuber-Beute-Beziehungen sowie das Ausbreitungspotential (*dispersal*) von Populationen nach erfolgreicher Vermehrung. Auf dem Konzept einer Arten-Areal-Beziehung baut die *Island-Biogeography-Theory* von MACARTHUR & WILSON (1967) auf. Sie hat teilweise bereits den Charakter einer Neutraltheorie (HUBBELL 2001), weil in diesem Konzept die Fähigkeiten von Organismen auf eine Insel ein- und auszuwandern bei allen Arten gleich ist. Sie ist aber keine pure Neutraltheorie, weil sich die Artenzahlen als Funktion der Größe einer Insel und ihrer Nähe zur nächsten Landmasse berechnen lassen, und der Treiber nicht ausschließlich die Unvorhersagbarkeit ist. Eine bedingte Anwendbarkeit der Neutraltheorie auf existierende Ökosysteme gibt es bei der Wiederbesiedlung von Lichtungen in Waldgebieten und am Meeresboden des Südlichen Ozeans nach Eisbergstrandungen. Grundsätzlich wird ein solcher zeitlicher Wechsel in der Besiedlung durch das *patch-dynamics* Konzept beschrieben.

Die Rolle von Biodiversität als Mediator für Ökosystemfunktionen ist noch weitgehend unerforscht. Ein menschenverursachter Biodiversitätsschwund liefert, wenn überhaupt, nur vorübergehend oder in Ausnahmefällen eine Verbesserung von Ökosystemdienstleistungen, z.B. die Aufnahme des Klimagases Kohlendioxid aus der Atmosphäre. Überwiegend wird von einer Verschlechterung ausgegangen, z.B. für die Fischproduktion und deren ökologischer Grundlage oder die Filtrierkapazitäten von Wirbellosen im Meer. Die Gefahren einer solchen Entwicklung sind schädliche Algenblüten, Fischsterben, Sauerstoffarmut und Einschleppung exotischer Arten (WORM et al. 2006).

Es gibt allerdings auch Hinweise, dass eine natürliche hohe Biodiversität weder eine besonders hohe, noch niedrige Ökosystemstabilität sicherstellt. Vielmehr scheint es in einem intakten Lebensraum eher auf starke oder systemrelevante interspezifische Wechselwirkungen anzukommen. Einem aus ethischen oder sozialökonomischen Gründen anzustrebendem Gleichgewicht zwischen intakter Umwelt, Ökonomie und gesunder Menschheit läuft eine Diversitätsminderung oder ein Artensterben durch fortgesetzten Klimawandel und andere anthropogene Einflüsse fast immer entgegen.

Literatur

- APPELTANS, W., S. T. AHYONG, G. ANDERSON, M. V. ANGEL et al. (2012): The magnitude of global marine species diversity. *Curr. Biol.*, 22, 2189-2202, doi:10.1016/j.cub.2012.09.036. Insgesamt ca. 120 Autoren!
- GRAY, J. S. (2001): The measurement of marine species diversity, with an application to the benthic fauna of the Norwegian continental shelf. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 250, 23-49.
- HAWKSWORTH, D. L. (2001): The magnitude of fungal diversity: the 1.5 million species estimate revisited. *Mycological Research*, 105, 422-432. doi:10.1017/S0953756201004725.
- HUBBELL, S. P. (2001): The unified theory of biodiversity and biogeography. Princeton University Press, Princeton; 392 S. ISBN: 9780691021287.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: FIELD, C. B., V. R. BARROS, D. J. DOKKEN, K. J. MACH et al. (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 S. ISBN 978-1-107-64165-5.
- IUCN (2016): The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2015-4. <<http://www.iucnredlist.org>>. Downloaded on 2 February 2016.
- JOPPA, L. N., D. L. ROBERTS & S. L. PIMM (2010): How many species of flowering plants are there? *Proc. Roy. Soc. B*, 278(1705), 554-559, doi:10.1098/rspb.2010.1004.
- KNAPP, S., O. SCHWEIGER, A. KRABERG, H. ASMUS et al. (2017): Do drivers of biodiversity change differ in importance across marine and terrestrial systems - or is it just different research communities' perspectives? *Science of the Total Environment*. 574, 191-203. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.002.
- MACARTHUR, R. & E. O. WILSON (1967): *The Theory of Island Biogeography*. Princeton University Press; 224 S., ISBN 978-0-6910-8836-5.
- MAGURRAN, A. E. (1988): *Ecological diversity and its measurement*. Croom Helm, London; 179 S., ISBN 0-7099-3539-0.
- MAXWELL, S. L., R. A. FULLER, T. M. BROOKS & J. E. M. WATSON (2016): Biodiversity: The ravages of guns, nets and bulldozers. *Nature*, 536, 143-144. http://www.nature.com/polopoly_fs/1.203811/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/536143a.pdf.
- MORA, C., D. P. TITTENSOR, S. ADL, A. G. B. SIMPSON et al. (2011): How many species are there on earth and in the ocean? *PLoS Biology* 9(8), e1001127, doi:10.1371/journal.pbio.1001127.
- SCHLOSS, P. D. & J. HANDELSMAN (2004): Status of the microbial census. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, 68(4), 686-691, doi:10.1128/MMBR.68.4.686-691.2004.
- SHANNON, C. & E. WEAVER (1949): *The mathematical theory of communication*. University Illinois Press, Chicago; 111 S.
- SOUTHWOOD, T. R. E. & P. A. HENDERSON (2000): *Ecological Methods*, 3rd. Ed., Blackwell Science, 575 S.
- STORK, N. E., J. MCBROOM, C. GELY & A. J. HAMILTON (2015): New approaches narrow global species estimates for beetles, insects, and terrestrial arthropods. *PNAS*, 112 (24): 7519-7523, doi:10.1073/pnas.1502408112.
- WILSON, E. O. (1992): *Ende der biologischen Vielfalt? Unter Mitarbeit von F.M. Peter, übersetzt von B. Dittami et al.* Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg; 557 S. ISBN 3-89330-661-7.
- WORM, B., E. B. BARBIER, N. BEAUMONT, J. E. DUFFY et al. (2006): Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science*, 314, 787-790.

Kontakt:

Prof. Dr. Julian Gutt

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven
julian.gutt@awi.de

Dr. Mark Auliya

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH, Leipzig
mark.auliya@ufz.de

Gutt, J. & M. Auliya (2016): Was versteht man unter Biodiversität und wie wird sie erfasst? In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, R. Müller & E. Rachor (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*. pp. 17-25. Online: www.klimawarnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.03.