

## 2 BIODIVERSITÄT IN DER ERDGESCHICHTE UND ANDERE PRÄGENDE FAKTOREN

Fossilien und »molekulare Uhren« erlauben uns einen Rückblick in die Entwicklung der Biodiversität während der letzten 500 Millionen Jahre. Insgesamt wurden schon fünf große Massenaussterben gezählt. Der sicherlich bekannteste Biodiversitätseinbruch ist das Massenaussterben am Ende der Kreidezeit, welches mit dem Aussterben der Dinosaurier einherging. Die Einschnitte in der Biodiversität, soweit bekannt, wurden damals durch einen Meteoriteneinschlag, eine Eiszeit sowie Vulkaneruptionen u.a. ausgelöst. Derzeit findet wahrscheinlich das sechste große Massenaussterben statt, diesmal aufgrund menschlicher Aktivitäten. Nicht alle beobachtbaren biologischen Veränderungen sind auf Klimaänderungen zurück zu führen. Die wahrscheinlichsten Ursachen für den jüngsten Biodiversitätsverlust sind der global wachsende Ressourcenverbrauch und damit einhergehende Habitat-Zerstörungen und Umweltbelastungen durch Nähr- und Schadstoffe sowie der globale Waren- und Personenverkehr und die dadurch zunehmende Verbreitung invasiver Arten. Die größte Artensterben findet durch die Zerstörung der tropischen Regenwälder statt. Mit der Erwärmung und Veränderung des Wasserkreislaufs (Klimawandel) werden sich diese negativen Faktoren auf die Biodiversität noch verstärken.

### 2.1 Erdgeschichtliche Entwicklung der Biodiversität VOLKER MOSBRUGGER & SYBILLE ROLLER

*Erdgeschichtliche Entwicklung der Biodiversität: Nicht der Klimawandel, sondern der vom Menschen verursachte Verlust von biologischer Vielfalt ist die größte Herausforderung für die Menschheit. Dabei sind Klimawandel und Biodiversitätsverlust unmittelbar gekoppelte Konsequenzen der Tatsache, dass wir die lebenswichtige Ressource Natur viel zu intensiv ausbeuten! Wie dramatisch dieses menschen-gemachte Artensterben ist, zeigt ein Blick auf die erdgeschichtliche Entwicklung der Biodiversität. Über die letzten 500 Millionen Jahre hat die biologische Vielfalt insgesamt zugenommen. Es gab jedoch fünf große Massenaussterben, verursacht etwa durch Vulkanismus oder durch den Impakt von großen Himmelskörpern, die jeweils sehr rasche Klimaveränderungen und dadurch eine drastische Erhöhung der Aussterberaten nach sich zogen. Durch die wachsende Zerstörung von naturnahen Ökosystemen und den anthropogenen Klimawandel steuert der Mensch nun auf ein 6. Massenaussterben zu, das schon heute Auswirkungen auf zumindest 33.000 kommende Generationen hat. Die Erdgeschichte kann uns wichtige »lessons from the past« lehren, nämlich was wir von dem anthropogenen Massenaussterben erwarten müssen.*

*Earth-historical development of biodiversity: It is not climate change but the anthropogenic biodiversity loss that is the greatest challenge to mankind. Thereby, climate change and biodiversity loss are two tightly coupled consequences of the fact that we humans exploit Nature, our vital resource, too intensively. A brief look at the history of biodiversity evolution illustrates how dramatic this man-made biodiversity loss actually is. Over the last 500 million years biodiversity has increased, but this continuous increase was interrupted by five major mass extinctions, caused, for instance, by volcanism or by the impact of a major celestial body which initiated relatively rapid climate change leading to mass extinction. It is obvious that we humans are heading towards a 6th mass extinction, which is caused by our growing destruction of natural ecosystems and by man-made climate change and which already now is impacting the next 33.000 human generations. The earth history can teach us important lessons concerning the future impact of this man-made mass extinction.*

Experten sehen in dem aktuellen, anthropogen verursachten Verlust der biologischen Vielfalt zu Recht die größte globale Herausforderung für die Menschheit, deren Relevanz über die des Klimawandels hinausgeht (STEFFEN et al. 2015): die Aussterberate ist durch den Einfluss des Menschen etwa 100-1000fach höher als normal, rund 30% der von der International Union for the Conservation of Nature untersuchten Arten sind in irgendeiner Weise vom Aussterben bedroht, und vermutlich verlieren wir täglich rund 100 Arten – mit bisher nicht wirklich abschätzbaren Konsequenzen für Ökosystemdienstleistungen und damit für den Menschen (vgl. PEREIRA et al. 2010, CEBALLOS et al. 2015).

Wollen wir diese Herausforderung bewältigen, so müssen wir verstehen, wie sich Biodiversität über die Jahr-

millionen der Erdgeschichte hinweg entwickelt hat, welche Bedeutung ihr im System Erde zukommt und welche Rolle die Biodiversität für uns Menschen spielt. Tatsächlich können wir, wie bei jedem historischen Prozess, die heutige Situation der Biodiversität nur aus ihrer Geschichte heraus verstehen. Auch müssen die aktuellen Eingriffe des Menschen vor dem Hintergrund der natürlichen Dynamik identifiziert und bewertet werden. Zudem eröffnet uns die Erdgeschichte eine Fülle von natürlichen Experimenten, die uns nicht nur helfen, ein umfassendes Verständnis der Rolle der Biodiversität im System Erde (bzw. im System Erde-Mensch) zu entwickeln, sondern auch die Qualität unserer Erdsystem-, Klima- und Vegetationsmodelle zu testen. So bietet die Erdgeschichte noch einen weitgehend ungehobenen Schatz an »lessons from the past«.

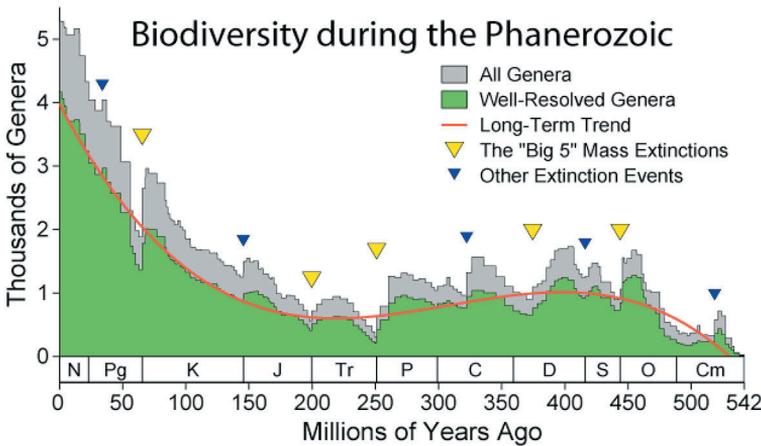
### Geschichte der Biodiversität

Wie sieht nun die Entwicklungsgeschichte der Biodiversität aus? Entstanden ist das Leben auf unserer Erde vor rund 3,5-3,8 Milliarden Jahren, und seit dieser Zeit wuchs die biologische Vielfalt mit nur wenigen Unterbrechungen stetig an. *Abb. 2.1-1* und *2.1-2* geben einen groben Überblick über die heute bekannte Biodiversitätsentwicklung am Beispiel der marinen Invertebraten und der landlebenden Tetrapoden. Sie lassen zwei wesentliche Grundmuster erkennen.

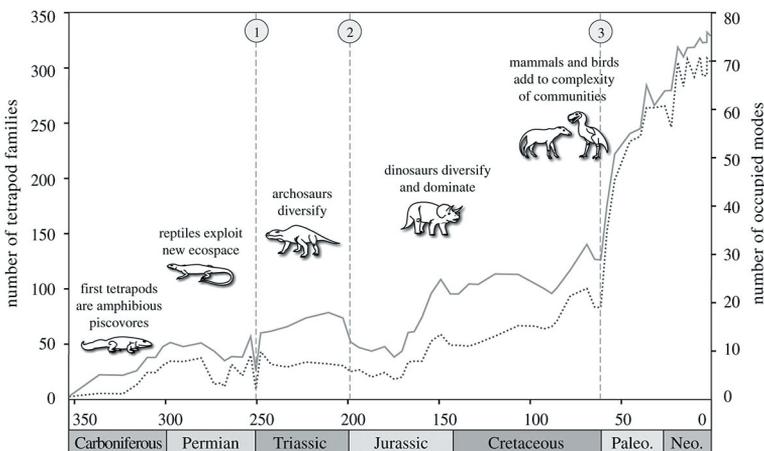
Einerseits ist ein übergeordneter Trend zu einem Anstieg der Biodiversität deutlich, der bis in die Jetztzeit anhält und keinerlei Anzeichen eines »leveling-off« oder eines stabilen Gleichgewichtszustandes erkennen lässt. Dies mag zunächst verwundern, ist aber bei genauerer Betrachtung keinesfalls so erstaunlich. Da zwei zeitgleich lebende Arten nicht die selbe ökologische Nische belegen können, muss jede neu entstehende Art auch eine neue ökologische Nische bilden, auch wenn sie damit eine andere Art verdrängt. Jede Art ist aber nun selbst wieder Gegenstand von ökolo-

gischen Interaktionen und bietet damit wieder Raum für die Entwicklung von weiteren neuen Arten mit neuen ökologischen Nischen, usf. Es gibt also zwei permanent parallel ablaufende evolutionäre Prozesse, die miteinander einhergehen: die Arten-Entstehung (Speziation) und das Arten-Aussterben (Extinktion). Ohne externe Störungen führt die Evolution dabei – ähnlich wie auch das wirtschaftliche Marktgeschehen – zu immer weiterer Diversifizierung. Damit wird deutlich, dass normalerweise das »Hintergrundausterben« deutlich langsamer verläuft als die Speziation. Dieses Phänomen des Hintergrundausterbens von Arten ist inzwischen recht gut erforscht, und je nach Organismusgruppe sind die natürlichen Extinktionsraten deutlich unterschiedlich; für Säugetiere und viele marine Invertebraten liegt die Aussterberate zum Beispiel zwischen 0,1 und 1 Aussterbeereignis pro 1.000 Arten und 1.000 Jahren (vgl. *Abb. 2.1-3*).

Andererseits ist aber an den *Abb. 2.1-1* und *2.1-2* erkennbar, dass dieser übergeordnete Trend zu einer Zunahme der Biodiversität immer wieder durch »kurz-



*Abb. 2.1-1: Biodiversitätsentwicklung der marinen wirbellosen Tiergattungen seit dem Kambrium (aus Wikipedia, nach ROHDE & MULLER 2005).*



*Abb. 2.1-2: Entwicklung der Biodiversität der Tetrapoden (Vierfüßler) von ihrem ersten Auftreten im Karbon bis zum Neogen (aus SAHNEY et al. 2010).*

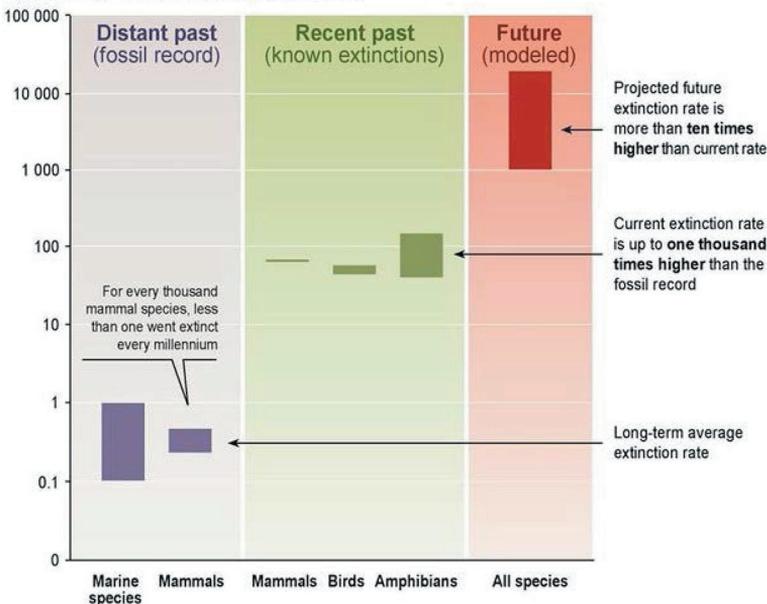
fristige« Störungen unterbrochen wird. Besonders auffällig sind dabei fünf prägnante Störungen, die unter dem Begriff »big five« als in der Erdgeschichte größte globale Massenaussterbe-Ereignisse bekannt sind, während derer in geologisch kurzen Zeiträumen die Aussterberate überproportional hoch war. Tab. 2.1-1 gibt eine Kurzcharakteristik dieser fünf Massenaussterben und nennt jeweils Umfang und Ursachen des Artenverlustes.

Wegen der im marinen Bereich vollständigeren zeitlichen und räumlichen Dokumentation, stammt unser zuverlässigstes Wissen über die Massenaussterben aus den mächtigen Sediment-Ablagerungen der Weltmeere. Während dieser für die Biosphäre katastrophalen Events, die z.T. über mehrere Millionen Jahre andauern, geht die biologische Vielfalt dramatisch zurück, z.T. sterben zwischen 60 und 90% aller bekannten marinen Arten aus. Ein solcher Faunen-Schnitt hat weitreichende Auswirkungen auf die gesamte Geo- und Biosphäre. Besonders auffällig sind die Konsequenzen für die biogeochemischen Stoffkreisläufe. So führt das Massenaussterben zu einer Verringerung der lebenden Biomasse, die sich in einem negativen Ausschlag der  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in z.B. biogenen Karbonaten bemerkbar macht. Diese in den Kalkschalen von verschiedenen Tiergruppen bei deren Wachstum eingebauten Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse werden aufgrund ihrer Abhängigkeit von physikalischen und chemischen Bedingungen gerne als indirekte Paläo-Umweltanzeiger des Kohlenstoffkreislaufes herangezogen (vgl. z.B. Abb.

2.1-4). Nach jedem der Massenaussterbe-Ereignisse erholt sich dieses Isotopensignal und auch die Biodiversität aber schließlich wieder, letztere erreicht graduell ansteigend nach etlichen Millionen Jahren wieder die ursprüngliche Höhe, um anschließend deutlich darüber hinaus zu wachsen. Beachtenswert bei diesem »Rebound«-Prozeß ist, dass mit dem Verschwinden der »alten« Arten zahlreiche ökologische Nischen frei werden und so die Entwicklung neuer Arten und Baupläne in womöglich neue Richtungen erleichtert wird.

Verursacht werden die Massenaussterben typischerweise durch die globalen Klimaveränderungen, die entweder von endogenen geologischen Prozessen (meist Plattentektonik und Vulkanismus) oder aber von Impaktereignissen (i.e. Auftreffen von großen Himmelskörpern auf die Erde) ausgelöst werden (vgl. Tab. 2.1-1). So hat etwa die vulkanische Förderung der flächendeckenden Plateaubasalte an der Perm-Trias-Grenze zu drastischen Anstiegen der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen und damit zu einer raschen Erwärmung geführt. Wie durch eindeutige Indizien belegt, verursachte der Impakt eines mehrere Kilometer großen Himmelskörpers, der vor etwa 65 Mio. Jahren auf der Yucatan-Halbinsel eingeschlagen ist, das globale Aussterbeereignis, dem nicht nur die Dinosaurier zum Opfer gefallen sind, sondern mit ihnen alle größeren terrestrischen Arten und ebenfalls viele marine Spezies. Vermutlich war dies ebenfalls bedingt durch einen rasch folgenden Klimawandel nach dem Auswurf von riesigen Mengen Staub in die Atmosphäre.

Extinctions per thousand species per millennium



Source: Millennium Ecosystem Assessment

Abb. 2.1-3: Aussterberate für den Fossilbeleg (»Hintergrundausterben«) im Vergleich zur Aussterberate in jüngerer Zeit und projiziert für die Zukunft (Millennium Ecosystem Assessment 2005).

**Tab. 2.1-1:** Die fünf größten Massenaussterbeereignisse und ihre vermuteten Ursachen (Barnosky et al. 2011). Viele der Befunde befinden sich weiterhin in der Diskussion. Nach BURGESS et al. 2014 erfolgte zum Beispiel das Massenaussterben am Ende des Perm innerhalb von 61.000 +/- 48.000 Jahren.

Massenaussterbeereignisse	Vermutete Ursachen
Am Ende des Ordovizium: der Event endete vor rund 443 Mio. Jahren; innerhalb von 3,3 bis 1,9 Mio. Jahren erfolgte der Verlust von 57 % der Gattungen und ca. 86 % der Arten.	Beginn abwechselnder Kalt- und Warmzeiten; wiederholt marine Transgressionen und Regressionen. Tektonische Hebung und Verwitterung der Appalachen mit Auswirkung auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und der Meere. Speicherung von Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ).
Am Ende des Devon: der Event endete vor rund 359 Mio. Jahren; innerhalb von 29 bis 2 Mio. Jahren erfolgte der Verlust von 35 % der Gattungen und ca. 75 % der Arten.	Erdabkühlung (gefollt von Erderwärmung), möglicherweise in Verbindung mit der Diversifizierung der Landpflanzen, dies einhergehend mit Verwitterung, Bodenbildung und einer weltweiten Absenkung von CO <sub>2</sub> . Belegt ist ein weitverbreiteter Sauerstoffmangel im Tiefenwasser und die Verbreitung von sauerstoffarmem Wasser durch Transgressionen. Zeitpunkt und Auswirkungen eines möglichen Meteoriten-Impacts sind umstritten.
Am Ende des Perm: der Event endete vor rund 251 Mio. Jahren; innerhalb von 2,8 Mio. bis 160.000 Jahren erfolgte ein Verlust von 56 % der Gattungen und ca. 96 % der Arten.	Vulkanismus in Sibirien. Erderwärmung. Verbreitung sauerstoffarmen Tiefseewassers. Erhöhte Konzentrationen von Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S) und CO <sub>2</sub> im Meerwasser wie an Land. Versauerung der Meere. Nachweis Meteoriten bleibt umstritten.
Am Ende der Trias: der Event endete vor rund 200 Mio. Jahren; innerhalb von 8,3 Mio. bis 600.000 Jahren erfolgte ein Verlust von 47 % der Gattungen und ca. 80 % der Arten.	Aktivität der Zentralatlantischen Magmenprovinz ( <i>Central Atlantic Magmatic Province</i> , kurz <i>CAMP</i> ) führte vermutlich zu einer höheren CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Atmosphäre. Infolgedessen Erderwärmung und Biokalifizierungskrise (Behinderung der biologischen Kalkschalenbildung) in den Weltmeeren.
Am Ende der Kreide: der Event endete vor rund 65 Mio. Jahren; innerhalb von 8,3 Mio. bis 600.000 Jahren Verlust von 40 % der Gattungen und geschätzt 76 % der Arten.	Ein Meteoriteneinschlag auf der Halbinsel Yukatan löst eine globale Katastrophe aus, gefollt von einer rapiden Klima-Abkühlung. Bereits vor diesem Ereignis könnten Flora und Fauna aus verschiedenen Gründen unter Druck geraten sein: durch Förderung der vulkanösen Deccan-Trapp Basalte bei gleichzeitiger Erderwärmung; Veränderung der Biogeografie durch tektonische Anhebung und beschleunigter Erosion – dies könnte zu Nährstoffeintrag in die Ozeane und zu sauerstoffarmen Phasen beigetragen haben. CO <sub>2</sub> -Spitze kurz vor Einsetzen des Aussterbeereignisses, Abfall während des Aussterbeereignisses.

## Klimawandel und Biodiversität

Die Geschichte der Biodiversität lehrt also, wie eng Klima und Biodiversität mit einander verbunden sind. Und dies gilt nicht nur für die Massenaussterbe-Ereignisse, sondern ganz grundsätzlich: Je weniger extrem ein Lebensraum ist, desto mehr Arten kann er beherbergen. So ist – global gesehen - für die meisten (nicht für alle) Organismengruppen die Artenvielfalt in den Tropen besonders hoch und nimmt zu den Polen hin ab (s. *Abb. 1.5-4* in Kap. 1.5 - BARTHOLOTT & RAFIQPOOR).

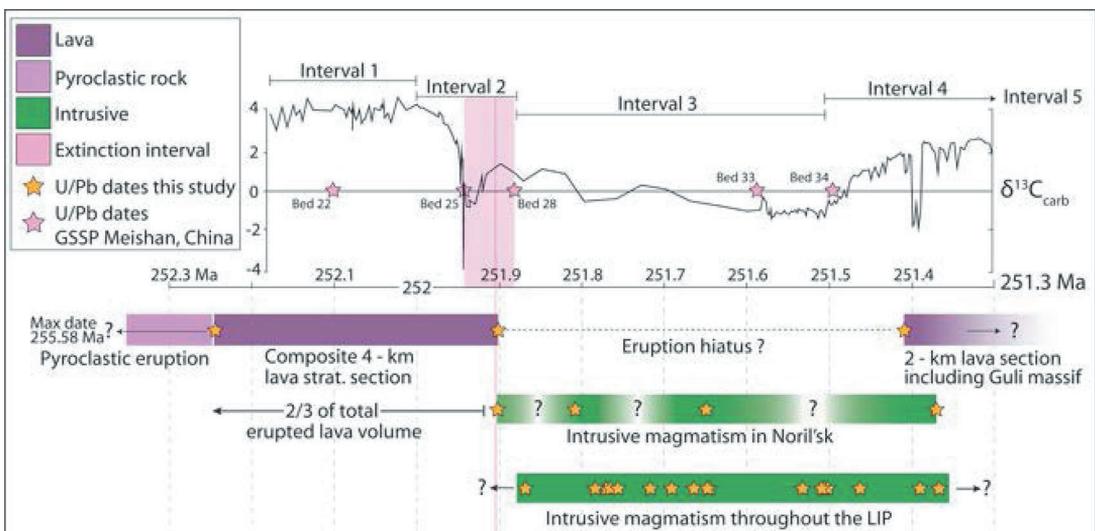
Umgekehrt ist leicht einsehbar, dass jede sehr schnelle Klimaveränderung, der Organismen ggf. nicht schnell genug durch Migration oder Adaptation folgen können, zu Aussterbeereignissen führt. Besonders betroffen sind dabei die polaren Breiten. Denn typischerweise macht sich ein globaler Klimawandel in den hohen Breiten immer stärker bemerkbar als in den Tropen: Die Tropen bleiben über die Erdgeschichte mehr oder weniger immer die Tropen mit tropisch warmen Verhältnissen; eine Ausnahme bilden nur die »Snow Ball Earth«-Zustände mit Vereisungen bis in die Äquatorregion hinein, die es vielleicht verschiedentlich in den Zeiten vor 650 Mio. Jahren gegeben hat. Demgegenüber erweisen sich die Polarregionen als sehr viel variabler: sie können sowohl extrem kalt und vereist sein, wie es heute der Fall ist, oder aber auch warmgemäßigt und eisfrei, wie es für viele Phasen der Erdgeschichte kennzeichnend ist.

*Abb. 2.1-5* zeigt die globale Klimaentwicklung der letzten rund 500 Mio. Jahre und macht deutlich, dass die »Greenhouse-Welt« mit eisfreien Polregionen sich im immer wiederkehrenden Wechsel mit dem heute

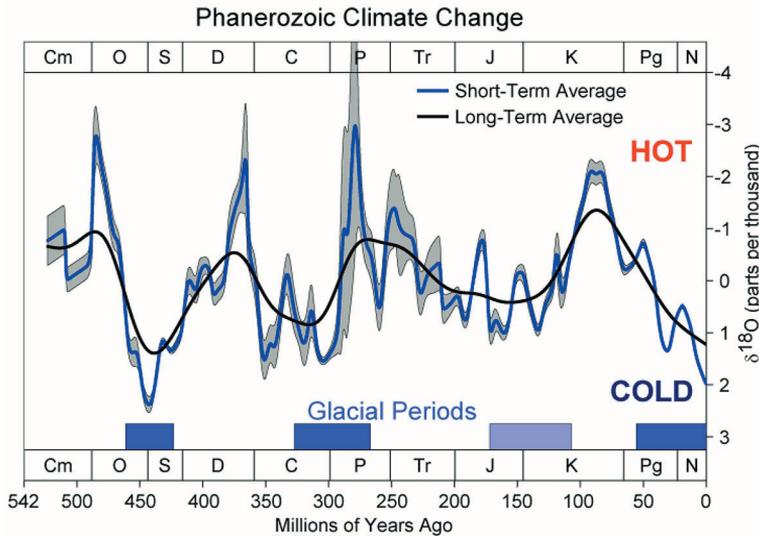
herrschenden Zustand der bipolaren Vereisung (Icehouse-Welt) befindet; dabei ist die Icehouse-Welt erdgeschichtlich betrachtet eher die Ausnahme. Auch wird im Vergleich mit *Abb. 2.1-1* und *Tab. 2.1-1* erkennbar, dass Massenaussterben sowohl in der Greenhouse- als auch in der Icehouse-Welt vorkommen. Dies ist ein weiterer Beleg dafür, dass Massenaussterben nicht vom absoluten Klimazustand abhängig sind, sondern von raschen Klimaveränderungen, wie Erwärmungen oder Abkühlungen.

Hingewiesen sei an dieser Stelle auch auf die Tatsache, dass in den meisten erdgeschichtlich dokumentierten Massenaussterbe-Ereignissen die einmal initiierten Veränderungen der Biosphäre über Rückkopplungsmechanismen im Gesamtsystem zu Verstärkungen oder Abschwächungen von Klimaveränderungen führen können. So hat eine globale Erwärmung in einer Icehouse-Welt ein weiteres Vordringen von Wäldern in die polare Zone zur Folge, was wiederum die Klimaerwärmung verstärkt, weil die ausgedehnten Wälder in den polaren Breiten die Albedo (die Rückstrahlung der eingestrahnten Sonnenenergie) verringern. Umgekehrt erzeugt eine Abkühlung in einer Greenhouse-Welt einen Rückgang der polaren Bewaldung und damit eine Erhöhung der Albedo, wodurch die Abkühlung weiter verstärkt wird.

Und auf einen weiteren Effekt sei noch hingewiesen. Aus vielen Untersuchungen weiss man, dass es eine sogenannte »Species-Area-Relationship« gibt: je größer ein Lebensraum ist, desto mehr Arten kann er beherbergen – und umgekehrt. Wird also durch eine Klimaveränderung ein Lebensraum nicht nur latitu-



**Abb. 2.1-4:** Rückgang des  $\delta^{13}\text{C}$ -Wertes in unmittelbarer Verbindung mit dem Massenaussterben an der Perm-Trias-Grenze. Nach etwa 1 Million Jahre hat der  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert annähernd wieder den Ausgangswert erreicht (BURGESS & BOWRING 2015).



**Abb. 2.1-5:** Globale Klimaentwicklung ab 500 Millionen Jahre vor heute (abgeleitet anhand der Sauerstoffisotopenverhältnisse in biogenen Karbonaten; VEIZER et al. 1999, updated 2004 online).

dinal verschoben, sondern auch in seiner Fläche signifikant vergrößert oder verkleinert, so hat dies entsprechende Auswirkungen auf die Biodiversität dieses Lebensraumes.

### Lessons from the Past

Bereits dieser sehr kurze Exkurs in die erdgeschichtliche Entwicklung der Biodiversität erlaubt eine ganze Reihe von »Lessons from the Past«:

1. Es gibt keinen Gleichgewichtszustand der Erde, die Erde ist einem permanenten Wandel unterworfen. Die immer wieder benutzte Formulierung, »der Mensch stört das Gleichgewicht der Natur« ist wissenschaftlich falsch; wohl aber greift der Mensch heute maßgeblich in die Entwicklung des Systems Erde ein.
2. Wandel von Biodiversität und Klimawandel sind unmittelbar verknüpft: Natürliche oder anthropogene Veränderungen des Klimas führen notwendigerweise zu Biodiversitätswandel; umgekehrt ziehen natürliche (z.B. durch Evolution oder plattentektonische Bewegungen) oder anthropogene Veränderungen der Biodiversität bzw. Vegetation Klimaveränderungen nach sich. Heute sind Landnutzungsänderungen und Klimawandel die wichtigsten Treiber des anthropogenen Biodiversitätsverlusts.
3. Massenaussterben sind immer mit raschem Klimawandel verknüpft: Entscheidend ist also nicht so sehr die Erwärmung oder Abkühlung, sondern deren relative Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit des heutigen Klimawandels (knapp 1°C/100 Jahre) ist im erdgeschichtlichen Vergleich besonders hoch und wird allenfalls durch die sogenannten Heinrich-Events im Pleistozän erreicht. So ist unzweifelhaft, dass wir uns derzeit mit raschen Schritten auf ein 6. Massenaussterben zu bewegen (BARNOSKY et al. 2011, CEBALLOS et al. 2015).
4. Massenaussterben haben weitreichende Konsequenzen für die globalen biogeochemischen Kreisläufe, deren Tragweite und Umfang wir bisher aber noch nicht verstehen. Gesichert sind die Einflüsse auf den Kohlenstoffkreislauf, mit einer deutlichen negativen Exkursion des <sup>13</sup>C-Isotopensignals in Karbonaten. Vermutlich führt eine geringere Biodiversität auch zu einer geringeren Resilienz und Stabilität des Erd- und Klimasystems gegenüber externen (natürlichen oder anthropogenen) Veränderungen.
5. Das System Erde funktioniert gleichwohl auch sehr gut mit einer deutlich geringeren Biodiversität als heute. Dies belegen sowohl die früheren erdgeschichtlichen Zustände (etwa des Paläozoikums und Mesozoikums) mit global noch deutlich geringerer Biodiversität als heute, als auch die kurzen Phasen der Massenaussterben. Der aktuelle anthropogene Biodiversitätsverlust ist also keine Katastrophe für die Erdgeschichte, wohl aber für den Menschen.
6. Der »Footprint« eines Massenaussterbens ist sehr langandauernd. Nach einem Massenaussterben mit entsprechender Auswirkung auf den Kohlenstoffkreislauf dauert es rund 1-2 Mio. Jahre, bis sich der Kohlenstoffkreislauf wieder erholt hat und rund 3-5 Mio. Jahre, bis sich die ursprüngliche Biodiversität wieder eingestellt hat. Damit wird auch deutlich, dass im Normalfall die Biodiversität bezogen auf die biogeochemischen Kreisläufe eine gewisse Redundanz aufweist: denn in der Erholungsphase wird der ursprüngliche Kohlenstoffkreislauf schon viel früher und bei einer viel geringeren Biodiversität erreicht.
7. Die Erdgeschichte zeigt uns ferner, dass sich die Biosphäre in einer Greenhouse-Welt mit hohen pCO<sub>2</sub>-Werten, selbst von deutlich über 1.000 ppm (heute haben wir 400 ppm), sehr gut entwickeln kann. Damit wird deutlich, dass auch bei dem aktuellen an-

thropogenen Klimawandel nicht der Endzustand das eigentliche Problem darstellt, sondern der Übergang!

8. Unsere Klimamodelle sind bisher noch nicht gut genug, um alle erdgeschichtlich auftretenden Klimasituationen angemessen abzubilden. So belegen etwa Fossilien, dass im Eozän, vor rund 50 Mio. Jahren, die Arktis bis in Breiten von 80 °N nicht nur eisfrei, sondern auch subtropisch-warm war, so dass Krokodile dort leben konnten. Derartige Klimasituationen mit warmen polaren Zonen lassen sich bisher mit den aktuellen Klimamodellen selbst mit sehr hohen atmosphärischen Kohlendioxid-Konzentrationen nicht adäquat abbilden: offenbar sind unsere Klimamodelle sehr gut geeignet, die jetzige Klimasituation und davon leicht abweichende Verhältnisse zu simulieren, versagen aber noch bei deutlich unterschiedlichen Klimaverhältnissen.

### Schlussfolgerungen

Die erdgeschichtliche Betrachtung der Biodiversitätsentwicklung und der Vergleich mit dem aktuellen Biodiversitätsverlust zeigt uns deutlich, dass wir uns heute mit raschen Schritten auf ein 6. Massenaussterben zubewegen, wobei Landnutzungsänderungen und Klimawandel die wichtigsten anthropogenen Ursachen dafür darstellen. Was uns konkret in Zukunft erwartet als Folge dieses fortschreitenden Artenverlustes, ist noch nicht klar, doch soviel ist sicher: für das System Erde und die Biosphäre wird auch dieses Massenaussterben keine apokalyptische Katastrophe sein, doch werden wir Menschen als die Verursacher besonders negativ betroffen sein. Schon heute verlieren wir durch den Biodiversitätsverlust jährlich Ökosystemdienstleistungen von 3-4 Billionen US-Dollar (COSTANZA et al. 2014). Und der Fußabdruck dieses anthropogenen Massenaussterbens reicht mindestens 1 Mio. Jahre in die Zukunft – wir haben also bereits jetzt die Zukunft von 33.000 künftigen Generationen negativ beeinflusst! Höchste Zeit also, hier entschieden aktiv zu werden. Was ist also zu tun?

Wir müssen umdenken: Anthropogener Klimawandel und Biodiversitätsverlust dürfen nicht mehr als zwei getrennte Probleme betrachtet und dem ersten darf keine höhere Priorität als dem zweiten eingeräumt werden. Klimawandel und Biodiversitätsverlust sind zwei gekoppelte Konsequenzen der Tatsache, dass wir zu viel der lebenswichtigsten Ressource Natur verbrauchen! Die wichtigste Maßnahme ist daher ohne Zweifel der Erhalt und Schutz der tropischen Regenwälder. Deren Abholzung zerstört nicht nur einen der artenreichsten Lebensräume dieser Erde, sondern trägt auch erheblich zur Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei. Denn die Verbrennung

von Biomasse macht rund ein Fünftel der globalen anthropogenen Kohlendioxid-Emissionen aus! Grundsätzlich muss die heute noch existierende »naturnahe Natur« soweit als irgend möglich erhalten und nachhaltig genutzt werden, dies gilt für die Meere und Riffe ebenso wie für die vielfältigen Landökosysteme. Vor diesem Hintergrund ist die Verlangsamung des anthropogenen Klimawandels, wie in dem Pariser Abkommen von 2015 von der Staatengemeinschaft vereinbart, eine weitere zentrale wichtige Herausforderung im Sinne des »ökologischen Imperativs« von Hans Jonas: »Handle so, daß die Wirkungen deiner Handlungen verträglich sind mit der Permanenz echten menschlichen Lebens auf Erden.«

### Literatur

- BARNOSKY, A. D., N. MATZKE, S. TOMIYA, G. O. U. WOGAN et al. (2011): Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, Vol. 471: 51-57.
- BURGESS, S. D. & S. A. BOWRING (2015): High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during and after Earth's most severe extinction. *Science Advances* 28 Aug 2015, Vol. 1, no. 7, e1500470, DOI: 10.1126/sciadv.1500470.
- BURGESS, S. D., S. A. BOWRING & S.-Z. SHEN (2014): High-precision timeline for Earth's most severe extinction. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, Vol. 111, pp. 3316-3321.
- CEBALLOS, G., P. R. EHRLICH, A. D. BARNOSKY, A. GARCÍA et al. (2015): Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances* 19 June 2015, Vol. 1, e1400253.
- COSTANZA, R., R. DE GROOT, P. SUTTON, S. VAN DER PLOEG et al. (2014): Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, Vol. 26: 152-158.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, D.C., World Resources Institute.
- MUTKE, J. & W. BARTHLOTT (2005): Patterns of vascular plant diversity at continental to global scales. *Biologische Skripten*, Vol. 55: 521-531.
- PEREIRA, H. M., P. W. LEADLEY, V. PROENÇA, R. ALKEMADE et al. (2010): Scenarios for Global Biodiversity in the 21st Century. *Science*, Vol. 330, pp. 1496.
- ROHDE, R. A. & R. A. MULLER (2005): Cycles in fossil diversity. *Nature*, Vol. 434: 208-210.
- SAHNEY, S., J. M. BENTON & P. A. FERRY (2010): Links between global taxonomic diversity, ecological diversity and the expansion of vertebrates on land. *Biology letters*, Vol. 6: 544-547.
- SEPKOSKY, J. J. Jr. (1984): A Kinetic Model of Phanerozoic Taxonomic Diversity. III. Post-Paleozoic Families and Mass Extinctions. *Paleobiology*, Vol. 10, No. 2: 246-267.
- STEFFEN, W., K. RICHARDSON, J. ROCKSTRÖM, S. CORNELL et al. (2015): Planetary boundary conditions: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*, Vol. 347, p. 736.
- VEIZER, J., D. ALAB, K. AZMYB, P. BRUCKSCHENA et al. (1999): <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, <sup>δ</sup><sup>13</sup>C and <sup>δ</sup><sup>18</sup>O evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, Vol. 161:59-88.

### Kontakt:

Prof. Dr. Volker Mosbrugger  
 Dr. Sybille Roller  
 Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung  
 Frankfurt am Main  
 volker.mosbrugger@senckenberg.de

Mosbrugger V. & S. Roller (2016): Erdgeschichtliche Entwicklung der Biodiversität. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, R. Müller & E. Rachor (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*. pp. 61-67. Online: [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de). doi:10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.10.