

Die biophysikalischen Leitplanken für nachhaltige Entwicklung

Wie der Mensch das System Erde verändert

HANNES PETRISCHAK

Das rapide Wachstum der Weltbevölkerung und vor allem das Wirtschaftswachstum mit hohem Ressourcen- und Flächenverbrauch sowie der damit einhergehenden zunehmenden Belastung und Zerstörung der Ökosysteme führen uns aktuell mehr denn je die Begrenztheit unseres Planeten (Abbildung 1) vor Augen. Unsere Konsum- und Produktionsmuster bewirken tagtäglich milliardenfache Eingriffe in das System Erde, und zwar oft an Orten, die von unserem Alltag scheinbar weit entfernt sind. Wir verändern damit unseren Planeten – mit gravierenden Auswirkungen auf die Lebensgrundlagen der heute und in Zukunft lebenden Menschen.

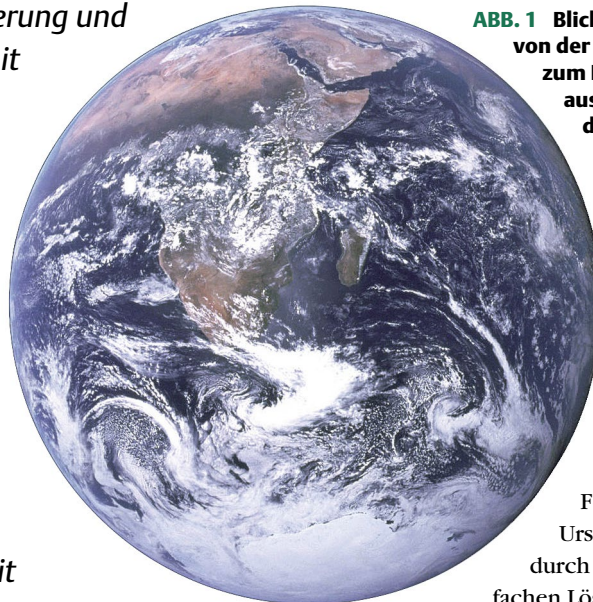


ABB. 1 Blick auf die Erde, aufgenommen von der Apollo-17-Crew auf dem Weg zum Mond am 7.12.1972. Der Blick aus den Apollo-Raumschiffen auf die Erde hat die frühe Umweltbewegung der 1970er Jahre maßgeblich beeinflusst und das Engagement vieler Menschen für den Erhalt der Lebensgrundlagen auf unserem Planeten angetrieben. Foto: NASA.

Die Erde als System

Die starke Vernetzung hat zur Folge, dass es kein einfaches Ursache-Wirkungs-Prinzip gibt. Dadurch entzieht sich das Problem einfachen Lösungen: Wenn man glaubt, den richtigen Hebel gefunden zu haben, treten meist neue, unerwünschte Nebenwirkungen auf. Nachhaltige Entwicklung setzt daher in besonderer Weise vorausschauendes und vernetztes Denken und Handeln voraus. Dabei gilt es, vor allem die folgenden Eigenschaften komplexer Systeme im Blick zu behalten [2]:

- Starke, nicht lineare Interaktionen, die bewirken, dass ein Input nicht immer zu einem proportionalen Output führt: Kleine Ursachen können große Wirkungen erzielen. Im Laufe der Zeit können Stauungen, Sättigungen oder Beschleunigungen auftreten, so dass die Wirkung nicht immer gleich bleibt.
- Positive Rückkopplungen können die Wirkung einer Handlung durch die Rückwirkung, die sie auslöst, weiter steigern.
- Zeitliche und räumliche Verzögerungen sind besonders tückisch, da Folgen unseres Handelns erst spät erkannt werden und Gegenmaßnahmen erst mit starker Verzögerung greifen.
- Bestimmte Prozesse können schlagartig ein verändertes Verhalten des Systems nach sich ziehen, wenn eine gewisse Grenze überschritten wurde. Ein System kann

Wir müssen uns mit den Funktionsweisen des Systems Erde auseinandersetzen, um die Auswirkungen unseres Handelns wirklich einordnen und damit die richtigen Ansatzpunkte für die Transformation in Richtung Nachhaltigkeit finden zu können. Die komplexen Verknüpfungen der Komponenten im System Erde sorgen dafür, dass Eingriffe in das System nicht nur Veränderungen in einem bestimmten Teilaspekt zur Folge haben, sondern dass es immer Wechselwirkungen mit anderen Teilen des Systems gibt: Klimawandel, Verlust biologischer Vielfalt, Wassermangel, Bodendegradation und die Anreicherung von Schadstoffen sind Umweltveränderungen, die sich gegenseitig zum Teil erheblich verstärken, so dass die Gesamtwirkung globaler Umweltveränderungen größer ist als die Summe der Einzelwirkungen [1].

dann zusammenbrechen oder in einen anderen Zustand wechseln und seine ursprünglichen Funktionen nicht mehr aufrechterhalten. Manchmal scheint das System vor Erreichen des Schwellenwerts nicht auf die treibende Kraft zu reagieren, die letztlich zur abrupten Veränderung führt. Dadurch können gravierende, irreversible Veränderungen plötzlich und unvorhergesehen auftreten.

Prototypisches Beispiel eines komplexen Systems ist übrigens die lebende Zelle, in der all diese beschriebenen Effekte in vielfältiger Form auftreten. Die Gefahr bei den hier genannten Prozessen liegt darin, dass das System Erde einen neuen Zustand einnimmt, der auch für menschliche Gesellschaften existenzbedrohend sein kann. Aus einem systemischen Verständnis heraus ergibt sich unmittelbar ein zentraler Grundsatz nachhaltiger Entwicklung, nämlich das Handeln nach dem Vorsorgeprinzip. Zudem können wir nicht davon ausgehen, dass die Menschheit bereits alle wesentlichen Prozesse und Parameter kennt.

Planetare Grenzen

Im Jahr 2009 veröffentlichten Johan Rockström und 27 weitere Autoren das Konzept der „*Planetary Boundaries*“ [3]. Dieser Studie liegt die Erkenntnis zugrunde, dass die menschliche Zivilisation sich während der letzten 10.000 Jahre unter relativ stabilen Rahmenbedingungen entwickeln konnte, zumal die anthropogenen Änderungen relativ klein und die Pufferkapazitäten sehr groß waren. Die derzeitigen Aktivitäten der Menschheit beeinflussen das System Erde jedoch so massiv, dass dadurch irreversible und in einigen Fällen sehr plötzliche Veränderungen ausgelöst werden können, die erhebliche Verschlechterungen der (Über-)Lebensbedingungen für große Teile der Menschheit bedeuten würden. Basierend auf den Erkenntnissen der Erdsystemforschung skizziert das Autorenteam neun Bereiche im System Erde, bei denen das Überschreiten bestimmter Schwellenwerte solche gravierenden Veränderungen der Umweltbedingungen nach sich zöge:

- Klimawandel
- Ozeanversauerung
- Ozonabbau in der Stratosphäre
- biogeochemische Stoffflüsse (Stickstoff- und Phosphorkreislauf)
- globaler Süßwasserverbrauch
- Wandel der Landnutzung
- Biodiversitätsverlust
- Aerosolgehalt in der Atmosphäre
- Belastung mit Chemikalien.

Um einen „sicheren Handlungsraum für die Menschheit“ (*safe operating space for humanity*) festzulegen, wurden bestimmte Indikatoren identifiziert, deren Werte sicher unterhalb gefährlicher Schwellenwerte liegen sollten. Solche Indikatoren sind unter anderem der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre (Klimawandel) oder die Aussterberate von

Arten (Biodiversitätsverlust). Die planetaren Grenzen sind zwar auf einzelne Prozesse mit entsprechenden Indikatoren bezogen, aber trotzdem miteinander verbunden: Wenn eine Sicherheitsgrenze überschritten ist, geraten andere Erdsystemprozesse unter verstärkten Druck. So kann die Vernichtung des Amazonas-Regenwaldes die Wasserressourcen in Tibet beeinflussen. Anthropogene Veränderungen in einem Teilsystem haben aufgrund der vielfältigen Wechselbeziehungen (beispielsweise zwischen Biodiversität, Landnutzung und Klimawandel) also sehr oft auch negativen Einfluss auf andere Bereiche. In drei Bereichen wurde bereits die Überschreitung des „sicheren Handlungsraums“ durch die Menschheit festgestellt: Der fortschreitende Klimawandel, die Vernichtung von Biodiversität und der massive Stickstoffeintrag gefährden eindeutig wesentliche Erdsystemfunktionen.

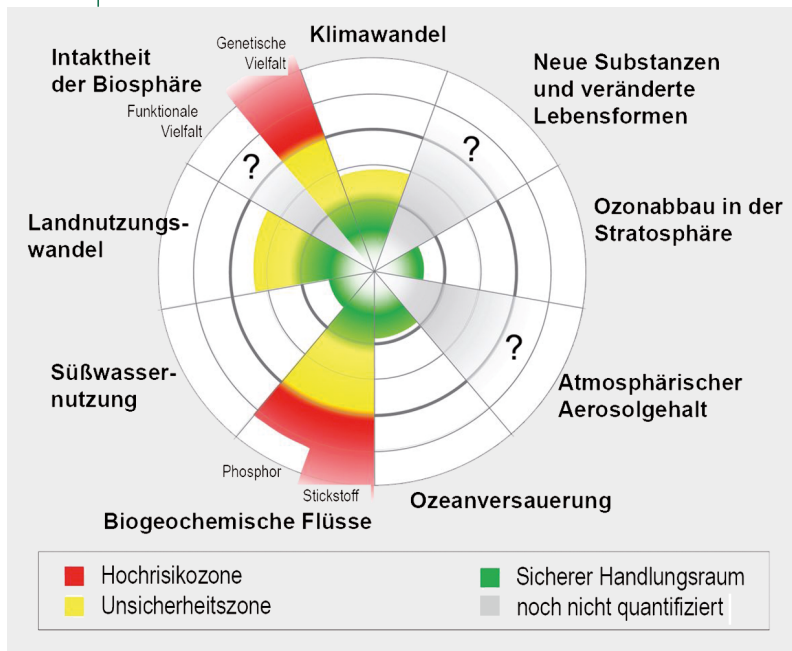
Im Januar 2015 legte ein 18-köpfiges Autorenteam um Will Steffen eine Aktualisierung des Konzepts vor [4]. Die Autoren zeigen hierin auf, dass auch die Summe kleinräumiger Veränderungen (beispielsweise in der Landnutzung) dazu führen kann, dass sich der globale Zustand verändert. Regionale Veränderungen können die Resilienz – gemeint ist hier das Erhalten der seit Jahrtausenden bestehenden lebensfreundlichen Bedingungen für die Menschheit – des Systems Erde im Zusammenspiel mit anderen Prozessen wie dem Klimawandel erheblich schwächen, etwa wenn dadurch CO₂-Senken verloren gehen oder Ökosysteme durch Artenverluste geschwächt werden. Daraus folgt außerdem, dass man bereits unterhalb des globalen Maßstabs Sicherheitsgrenzen definieren muss, die nicht überschritten werden sollten, weil bestimmte Regionen bedeutsam für die Aufrechterhaltung von Erdsystemfunktionen sind. Vorrangig werden genannt:

- die Intaktheit der Biosphäre in großen Land-, Meeres- und Süßwasserökosystemen

IN KÜRZE

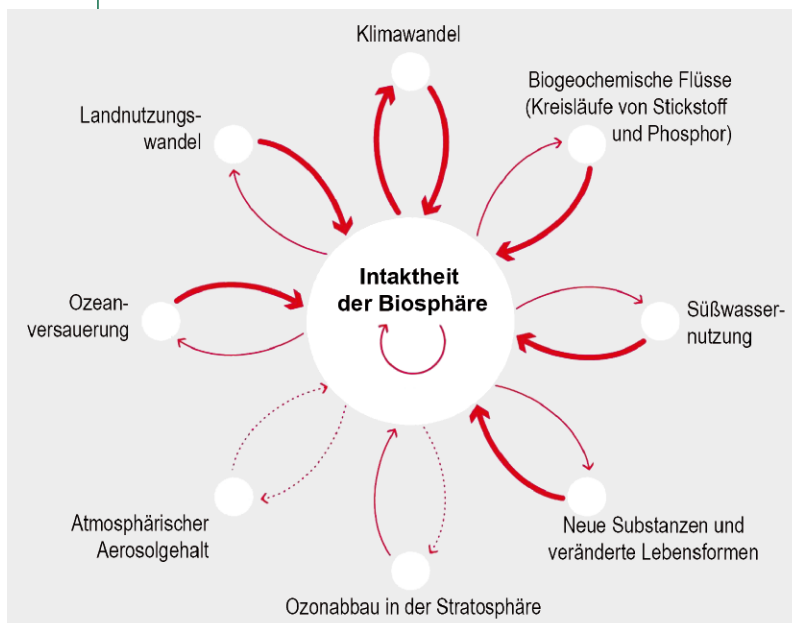
- Die Komplexität des Systems Erde bewirkt, dass durch den Menschen ausgelöste Umweltveränderungen durch zahlreiche Wechselwirkungen, Rückkopplungen, zeitliche Verzögerungen und Schwellenwerte oft **unerwünschte und teilweise nicht vorhersehbare Auswirkungen** haben.
- Das **Konzept der planetaren Grenzen** veranschaulicht, dass die Menschheit durch den Verlust von Biodiversität, den Klimawandel sowie die Umgestaltung der Nährstoffkreisläufe und der Landnutzung einen sicheren Handlungsraum bereits verlassen hat.
- Zahlreiche Kippelemente können bei weiterer Temperaturerhöhung **selbstverstärkende Prozesse auslösen**, die unweigerlich zu einer Forcierung des Klimawandels führen.
- Die gegenwärtige Vernichtung von Arten, Populationen und Lebensräumen verläuft auf dem Pfad des **sechsten Massenaussterbens der Erdgeschichte** und schwächt die Funktionalität der Ökosysteme erheblich.
- Nachhaltige Entwicklung im Sinne der Sicherung der Lebensgrundlagen für die Menschheit bedingt **vorsorgendes und vorausschauendes Denken und Handeln** und ist nur innerhalb der biophysikalischen Leitplanken des Systems Erde möglich.

ABB. 2 | DIE PLANETAREN GRENZEN NACH STEFFEN ET AL. (2015)



Auf den sicheren Handlungsraum (grün, innen) folgen außen die Unsicherheitszone (gelb) und schließlich die Hochrisikozone (rot). Die Sicherheitsgrenze wird durch den dickeren Kreis innen markiert. Grau gekennzeichnet sind diejenigen Prozesse, für die globale Sicherheitsgrenzen noch nicht quantitativ definiert werden können. Abb. aus [4].

ABB. 3 | INTERAKTIONEN ZWISCHEN DER VERÄNDERUNG DER BIOSPHÄRENINTAKTHEIT UND DEN ANDEREN ERDSYSTEMPROZESSEN



In allen Fällen zeigen die Pfeile positive Rückkopplungen an, d. h. jeder Prozess, der aus dem Sicherheitsbereich gelangt, treibt auch andere Prozesse in Richtung Risikobereich. Dicke Pfeile stehen für starke, unmittelbare Effekte, dünne Pfeile für schwächere Wechselwirkungen und gestrichelte Pfeile für schwache oder unsichere und komplexe Effekte. Quelle: [4], Supplementary Materials.

- Veränderungen der Landnutzung in waldreichen Großregionen
- Süßwassernutzung in den Hauptflusssystemen der Erde
- Eingriffe in Phosphor- und Stickstoffkreisläufe insbesondere in den landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten.

Die planetaren Grenzen werden folgendermaßen dargestellt: Sie umschließen den Sicherheitsbereich (*safe operating space*), innerhalb dessen das Risiko für bedrohliche Veränderungen als vertretbar angesehen wird (Abbildung 2). Außerhalb dieser Grenzen folgt ein Unsicherheitsbereich, der durch die Begrenztheit des derzeitigen Wissensstandes und die Unwägbarkeiten der Systemprozesse und ihrer Wechselwirkungen gekennzeichnet ist. In diesem Bereich wächst also das Risiko, dass wichtige Erdsystemfunktionen untergraben werden. Weiter außen liegt die Hochrisikozone, die unverantwortliches Handeln widerspiegelt und bei deren Erreichen mit hoher Wahrscheinlichkeit kritische Schwellenwerte irreversibel überschritten sind. Das Ergebnis zeigt, dass die Menschheit sich in vier Bereichen bereits außerhalb des sicheren Handlungsraums bewegt: Klimawandel und Landnutzung finden in der Unsicherheitszone statt, die Vernichtung von Biodiversität und die Änderung der Stickstoff- und Phosphorkreisläufe bewegen sich deutlich in der Hochrisikozone (Abbildung 2).

Am Beispiel der Ozeanversauerung sei hier die Anwendung von Indikatoren für die Einschätzung der aktuellen Situation der Erdsystemprozesse erläutert: Etwa ein Viertel der anthropogenen CO_2 -Emissionen wird von den Ozeanen aufgenommen und verändert die Chemie des Ozeanwassers. Durch die verstärkte Bildung von Kohlensäure verringert sich der pH-Wert des oberflächennahen Wassers. Die Konzentration freier H^+ -Ionen im oberflächennahen Ozeanwasser ist in den vergangenen 200 Jahren um 30 Prozent gestiegen. In der Folge löst sich Aragonit, Baumaterial für Schalen und Skelette vieler mariner Organismen, zunehmend im Ozeanwasser. Der Aragonit-Sättigungsgrad sollte 80 Prozent gegenüber dem vorindustriellen Wert nicht unterschreiten. Zum Zeitpunkt der Analyse lag er bei 84 Prozent. Bei Einhalten der Sicherheitsgrenze für den Klimawandel (350 ppm CO_2) bliebe die Ozeanversauerung innerhalb des Sicherheitsbereiches. Bei steigenden CO_2 -Konzentrationen gerät die Ozeanversauerung jedoch ebenso wie der Klimawandel schnell deutlich in den Hochrisikobereich. Hier ist anzumerken, dass die atmosphärische CO_2 -Konzentration inzwischen über 410 ppm liegt. Die Folge ist eine erhebliche Verschlechterung der Lebensbedingungen für zahlreiche Meeresorganismen (unter anderem Plankton und Korallen) mit drastischen Auswirkungen auf die Strukturen mariner Ökosysteme. Alle Erdsystemprozesse sind integrierte Teile eines komplexen Systems mit wechselseitigen Beeinflussungen (Abbildung 3). Diese Wechselwirkungen systematisch und quantitativ zu erfassen, entzieht sich weitge-

hend dem aktuellen Forschungsstand, aber das Erdsystem agiert in einem klar definierten Status, innerhalb dessen die Prozesse und ihre Wechselwirkungen verstärkende oder schwächende Rückkopplungen auslösen. Deshalb müssen für eine nachhaltige Entwicklung stets verschiedene interagierende Umweltprozesse gemeinsam betrachtet werden.

Kippelemente

In einem System bezeichnet der Begriff „Kippunkt“ eine kritische Grenze, an der eine kleine Störung den Zustand des Systems gravierend verändern kann. Auch im System Erde gibt es Kippelemente, also wesentliche Komponenten des Systems (Subsysteme von überregionaler Größe), die Kippunkte aufweisen, deren Überschreiten eine qualitative Veränderung nach sich zieht [5]. Dies hat oft Auswirkungen auf das Gesamtsystem bzw. auf die Lebensbedingungen großer Teile der Menschheit. Menschliche Eingriffe in das System können selbstverstärkende Prozesse auslösen, die oft zu einem sprunghaften, unumkehrbaren Überschreiten eines Kippunktes führen. Eine ausführliche Darstellung dieser „Achillesfersen im Erdsystem“ findet sich auf der Internetseite des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) [6].

Schmelzende Eismassen liefern ein Paradebeispiel für einen positiven Rückkopplungseffekt: Das leuchtend weiße Eis hat eine kühlende Rückstrahlwirkung, während die dunkleren Oberflächen des frei werdenden Gesteins oder des Meeres mehr Sonnenwärme aufnehmen und dadurch das weitere Abtauen des Eises beschleunigen. Dieser Me-

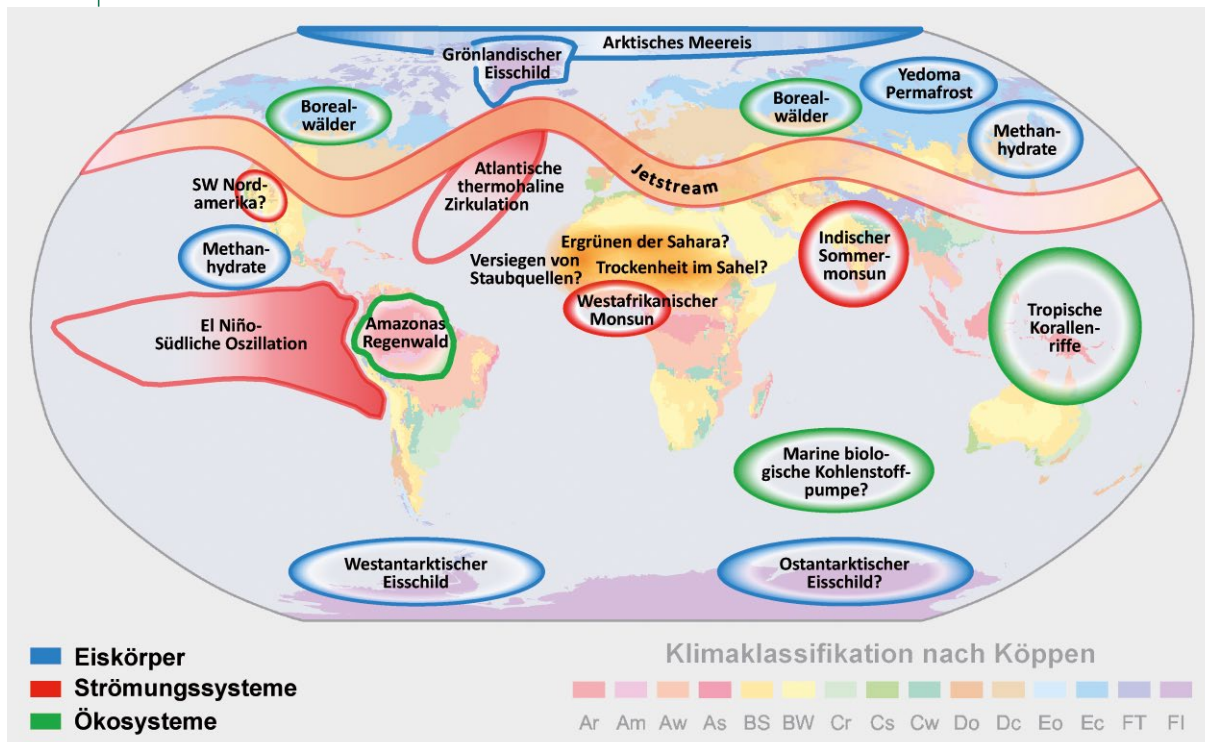
chanismus wird als Eis-Albedo-Rückkopplung beschrieben. Am Beispiel des Verlustes des Grönlandeises lässt sich die Wirkung von Kippelementen verdeutlichen: Der Eisverlust in Grönland hat durch ins Meer fließende Gletscher und verstärktes Abschmelzen im Sommer stark zugenommen. Der stellenweise drei Kilometer starke Eisschild verliert an Höhe, und seine Oberfläche gerät in niedrigere, wärmere Luftschichten. Das verstärkt das Abschmelzen, das letztlich einen Meeresspiegelanstieg von sieben Metern verursachen kann [6]. Zu den wichtigsten Kippelementen im System Erde (Abbildung 4) zählen:

- Schmelzen des arktischen Meereises
- Verlust des Grönlandeises
- Auftauen von Dauerfrostböden (mit Freisetzung von Methan und CO₂)
- Methanausgasung aus den Ozeanen
- Abschwächung der „Atlantischen Thermohalinen Zirkulation“
- Destabilisierung des indischen Monsuns
- Störung des El Niño-Phänomens
- Umwandlung des Amazonas-Regenwaldes
- Abschwächung der marinen Kohlenstoffpumpe
- Zerstörung von Korallenriffen.

Das Anthropozän

Zu Beginn unseres noch jungen Jahrtausends kam ein Begriff in die Welt, der bereits eine beeindruckende Karriere hinter sich hat: Das Anthropozän. Er macht in neuer Dimension sehr nachdenklich über den Einfluss des Menschen auf den Planeten Erde und die damit verbundenen

ABB. 4 | KIPPELEMENTE IM ERDSYSTEM



Die wichtigsten Kippelemente im Erdsystem lassen sich in drei Klassen einteilen: schmelzende Eiskörper, sich verändernde Strömungssysteme von Ozeanen und Atmosphäre und bedrohte, überregional bedeutsame Ökosysteme. Quelle: PIK [6].

Folgen, wird von Vertretern unterschiedlicher Wissenschaftsdisziplinen äußerst kontrovers diskutiert und ist dabei auch zum Leitthema ganzer Tagungen und sogar großer Kunstprojekte geworden. Das Anthropozän umschreibt eine neue erdgeschichtliche Epoche, das Zeitalter des Menschen. Bislang wird die gegenwärtige Epoche – die rund 12.000 Jahre seit dem Ende der jüngsten Eiszeit – als Holozän bezeichnet. Aus der Erkenntnis heraus, dass mittlerweile der Mensch die stärkste gestaltende Kraft im System Erde ist, verhalf der niederländische Meteorologe und Chemie-Nobelpreisträger Paul J. Crutzen dem Konzept des „Anthropozän“ zum Durchbruch. Crutzen zählt in seiner sehr häufig zitierten kurzen Vorstellung des Anthropozänkonzepts aus dem Jahr 2002 eine Auswahl von Belegen für die gravierenden Veränderungen des Systems Erde durch den Menschen auf [7], unter anderem:

- 30–50 Prozent der Landfläche sind von der Menschheit umgestaltet worden.
- Die tropischen Regenwälder und mit ihnen unzählige Arten werden rasant vernichtet, was zum Anstieg des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre beiträgt.
- Flusssysteme werden unter anderem durch Staudämme umgestaltet, und mehr als die Hälfte des verfügbaren Süßwassers wird genutzt.
- Durch Düngemittel wird in der Landwirtschaft mehr Stickstoff eingebracht, als natürlicherweise in allen terrestrischen Ökosystemen fixiert wird.
- Die Verbrennung von fossilen Energieträgern und die Landwirtschaft haben zu einer gravierenden Zunahme der Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre geführt: Der Kohlendioxidgehalt ist (zum Zeitpunkt der Veröffentlichung) um 30 Prozent und der Methangehalt um mehr als 100 Prozent gestiegen. Damit sind alle Werte der letzten 400.000 Jahre nachweislich übertroffen, und die Konzentrationen steigen weiter an.

Die Umgestaltung der Landfläche der Erde, die Veränderung der Atmosphäre und die Eingriffe in die Ozeane beschleunigen sich mit der wachsenden Zahl der Menschen und mit der wachsenden Ressourcenintensität ihres Lebensstils. Seit dem Ende des 18. Jahrhunderts lässt sich in der Luft, die im polaren Eis eingeschlossen ist, ein globaler Anstieg der Treibhausgase belegen. So könnte man diesen Zeitpunkt als Beginn des Anthropozäns festlegen. Waters et al. (2016) stellen eine Reihe von Belegen dafür zusammen, dass die Menschheit mit zunehmender Geschwindigkeit die Erde verändert, und zwar mit signifikanten Auswirkungen auf langfristige geologische Prozesse [8]. Entscheidend für die Beurteilung, ob eine neue geologische Epoche nach dem Holozän begonnen hat, ist die stratigraphische Nachweisbarkeit in Sedimenten und im Eis mit deutlichen Unterschieden zum Holozän. Zu den anthropogenen Ablagerungen zählen „Technofossilien“ wie elementares Aluminium, Beton oder Plastik. Weltweit sind außerdem verschiedenartige Kohlenstoffpartikel (Flug-

asche) als Folgeprodukte der Verbrennung fossiler Energieträger verteilt. Außerdem sind starke anthropogene Sedimentflüsse zu registrieren, etwa durch Erosion in Folge von Entwaldung. Geochemisch ist die Anreicherung polyaromatischer Kohlenwasserstoffe (z. B. PCB) und von Pestizidrückständen belegbar, aber auch von Industriemetallen und Seltenen Erden. Auch die Verdoppelung des Eintrags von Stickstoff und Phosphor im zurückliegenden Jahrhundert lässt sich in Seesedimenten und im grönländischen Eis nachweisen. Die Atomwaffentests in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts haben ebenfalls ihre Spuren (Radionuklide) hinterlassen. Die Erderwärmung in Höhe von knapp 1 °C seit 1900 überschreitet die Bandbreite des Holozäns während der letzten 14.000 Jahre; ähnlich verhält es sich mit dem Anstieg des Meeresspiegels um durchschnittlich rund 3,2 mm pro Jahr. Seit dem Jahr 1500 liegen die Aussterberaten von Arten deutlich über den natürlichen „Hintergrundraten“, ab dem 19. Jahrhundert stiegen sie weiter deutlich an; außerdem ist der weltweite Austausch von Arten durch entsprechende biologische Invasionen und die Nutztierhaltung ohne Vorbild in der Erdgeschichte. Waters et al. (2016) verzeichnen unübersehbare geologische Auswirkungen der menschlichen Einflüsse in vielen Bereichen seit Mitte des 20. Jahrhunderts. Sie lassen hier mit der „Großen Beschleunigung“ das eigentliche Anthropozän beginnen, allerdings mit Vorläufern in der Ausbreitung von Landwirtschaft und Entwaldungen, dem Austausch von Arten seit der Entdeckung Amerikas und der Industriellen Revolution seit etwa 1800.

Die Große Beschleunigung

Die „Große Beschleunigung“ setzte unmittelbar nach dem Zweiten Weltkrieg etwa um das Jahr 1950 herum ein [9]. Statistiken zu den unterschiedlichsten Themenfeldern belegen eindrucksvoll die rapide Vervielfachung der wirtschaftlichen Aktivitäten und des Konsums – zum Beispiel steigen der Papierverbrauch, der internationale Tourismus oder der Wasserverbrauch seither exponentiell an, zunächst ganz wesentlich getrieben durch die wirtschaftlichen Aktivitäten in den westlichen Industrieländern. Parallel dazu lassen sich die Veränderungen im System Erde belegen. So zeigen die Konzentrationen der Treibhausgase CO₂, Lachgas und Methan, die Überfischung der Meere oder der Verlust tropischer Wälder ähnliche „Wachstumsraten“.

Alle sozialen und wirtschaftlichen Prozesse sind mit anderen Teilen des Erdsystems wie dem Klima und den Ozeanen gekoppelt. Insofern kann man im globalen Maßstab durchaus von einem sozial-ökologisch-geophysikalischen System sprechen. Die Konsequenz daraus lautet, dass sich im globalen Maßstab die sozialen und ökonomischen Prozesse – die sich unter anderem im globalisierten Handel, in der Finanzwelt und in der weltweiten Kommunikation manifestieren – signifikant auf andere Teile des Systems wie die Atmosphäre und die Biosphäre auswirken. Daraus lässt sich unmittelbar die Erkenntnis ableiten,

dass die Lebensgrundlagen für zukünftige Generationen auf der Erde nur erhalten bleiben können, wenn die Menschheit sich aktiv und verantwortungsbewusst dafür einsetzt [9].

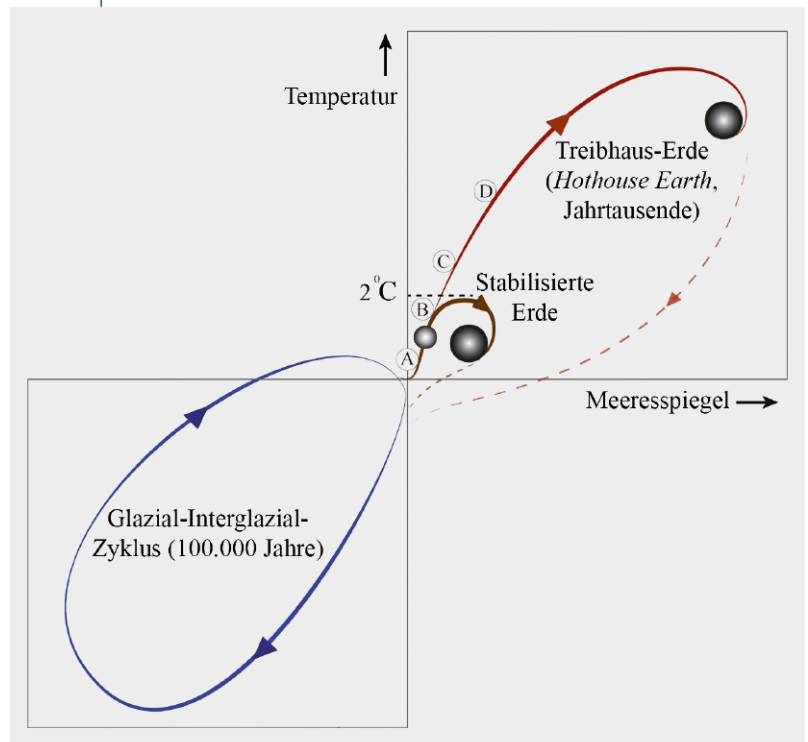
Negative Megatrends: Klimawandel und Biodiversitätsverluste

Es ist von größter Bedeutung, dass die globale Erwärmung gestoppt wird, weil sie – bezogen auf die Zeiträume, die für die Zukunft der nachfolgenden Generationen von Bedeutung sind – irreversibel ist. Für mindestens 1.000 Jahre bleibt eine einmal erreichte Temperaturerhöhung nahezu unverändert bestehen, selbst wenn keine weiteren CO₂-Emissionen mehr erfolgen [10].

Ein in ferne Zukunft reichender Prozess, der durch den Temperaturanstieg ausgelöst wird, ist die Erhöhung des Meeresspiegels. Die Ergebnisse der Berechnungen verschiedener Wissenschaftlerteams ergeben, dass ein Meeresspiegelanstieg von deutlich über einem Meter bis zum Jahr 2100 wahrscheinlich ist. Mit diesem Wert kalkulieren inzwischen Küstenschützer. Danach wird sich der Anstieg jedoch unausweichlich fortsetzen, denn die Wärme dringt nur sehr langsam von der Oberfläche der Ozeane in die Tiefsee vor. Die dadurch bedingte Ausdehnung des Meerwassers ist neben dem Abschmelzen des Festlandeises ein wesentlicher Faktor zur Erhöhung des Meeresspiegels [11].

Im Jahr 2018 sorgte mitten im außergewöhnlich heißen mitteleuropäischen Sommer eine Publikation zum Risiko einer nahenden „Heißzeit“ für die Erde für große öffentliche Aufmerksamkeit [12]. Darin wird beschrieben, dass die Erde sich bezogen auf die Temperatur im Holozän eigentlich am oberen Rand eines geschlossenen Zyklus befindet (Punkt A in Abbildung 5), der den regelmäßigen Wechsel von Eiszeiten und Zwischeneiszeiten beschreibt und sich jeweils über 100.000 Jahre erstreckt. Im Anthropozän verlässt die Erde nun sehr zügig den Temperaturrahmen, innerhalb dessen dieser Zyklus abläuft, und bewegt sich auf neue, deutlich heißere klimatische Bedingungen mit einer völlig veränderten Biosphäre zu. Mit der aktuellen Temperaturerhöhung von rund 1 Grad nähern wir uns den wärmsten Verhältnissen, die jemals in den Zwischeneiszeiten der vergangenen 1,2 Millionen Jahre erreicht wurden. Da auf dem weiteren Pfad gleichzeitig zahlreiche biogeophysikalische Rückkopplungsprozesse greifen, die durch die menschengemachte Veränderung der Biosphäre noch verstärkt werden, ist zu befürchten, dass ab einem bestimmten Punkt diese Rückkopplungen zu einem dominierenden Faktor werden und die Erde beschleunigt in eine Jahrtausende währende „Heißzeit“ („Hothouse Earth“) treiben (Abbildung 5). Der Schwellenwert für eine solche Entwicklung wird bei einer Temperaturerhöhung von 2 Grad Celsius (möglicherweise auch schon darunter!) angenommen. Treiber dieser Entwicklung sind die bereits beschriebenen Kippelemente, die durch den Temperaturanstieg aktiviert werden können,

ABB. 5 | MÖGLICHE ZUKUNFTSPFADE DES IRDISCHEN KLIMAS



Links unten ist der typische Zyklus von Eiszeiten und Zwischeneiszeiten skizziert. Die x-Achse liegt auf Höhe der vorindustriellen globalen Durchschnittstemperatur, die kleine Kugel repräsentiert die aktuelle Position der Erde auf ihrem Pfad in eine Heißzeit – oder die Stabilisierung durch umsichtiges Handeln der Menschheit bei Nicht-Überschreiten kritischer Schwellenwerte (Kippunkte). Abb. aus [12].

was zu weiterer Erwärmung führen und dominoartig weitere Kippelemente aktivieren kann („Tipping Cascades“). Die Autoren setzen dieser Entwicklung die wünschenswertere Zukunft einer stabilisierten Erde entgegen, in der die Menschheit sich als integraler Bestandteil des Erdsystems begreift und stabilisierenden Einfluss auf das Klimageschehen nimmt – Reduktion von Treibhausgasemissionen, Schutz und Förderung biologischer Kohlestoffsinken, technologische und gesellschaftliche Innovationen, Anpassungen an den nicht mehr vermeidbaren Klimawandel sind Stichworte [12].

Niemand kann genau sagen, wie viele Arten wir zurzeit verlieren – geschätzt werden bis zu 150 pro Tag. Das im Jahr 2019 erschienene „Globale Assessment“ des Weltbiodiversitätsrats IPBES stellt fest, dass innerhalb der kommenden Jahrzehnte 25 Prozent der Spezies in den analysierten Tier- und Pflanzengruppen, insgesamt etwa eine Million Arten, unmittelbar vom Aussterben bedroht sind [13]. Um die globalen Ausmaße des Artenschwunds zu gewichten, wird zum Vergleich oft die natürliche Aussterberate herangezogen. Das Ergebnis ist davon abhängig, von wie vielen existierenden Arten und von welcher Zahl an aussterbenden Arten man ausgeht. Die aktuelle Aussterberate übertrifft die natürliche Rate mindestens um den



ABB. 6 Der Riesenalk (*Pinguinus impennis*), ein 85 cm großer, flugunfähiger Seevogel, war einst im Nordatlantik weit verbreitet. Schon seit Mitte des 19. Jahrhunderts ist er ausgerottet – und heute nur noch im Museum zu betrachten, wie hier im Landesmuseum Hannover. Foto: H. Petrischak.

Faktor 100 bis 1.000 [14]. Damit verbunden ist die Einschätzung vieler Wissenschaftler, dass wir kurz vor oder bereits in dem sechsten großen Massenaussterben der Erdgeschichte stehen. Die fünf bisherigen Massenaussterben ereigneten sich am Ende der Erdzeitalter Ordovizium, Devon, Perm, Trias und Kreide, zuletzt also am Übergang der Kreide zum Tertiär vor rund 65 Millionen Jahren. Gewaltige Meteoriteneinschläge und gravierende Veränderungen des Klimas waren jeweils die Ursachen. Die Definition für ein Massenaussterben lautet, dass mindestens 75 Prozent aller Arten innerhalb von höchstens zwei Millionen Jahren aussterben. Dieser Wert ist zwar bei den bis jetzt untersuchten Tiergruppen noch nicht erreicht. Das kann aber in wenigen Jahrhunderten bereits der Fall sein, denn die Aussterberate ist heute bereits höher als bei den fünf erdgeschichtlichen Ereignissen [15].

Aussterbeereignisse sind irreversibel (Abbildung 6). Die menschlichen Eingriffe entscheiden aber nicht nur über die Existenz einzelner Arten, sondern sind für die Zukunft des Lebens auf dem Planeten viel umfassender: Die Voraussetzungen für die weitere biologische Evolution auf der Erde werden massiv verändert. Weil nicht nur Arten, sondern darüber hinaus in großem Umfang Populationen mit ihren entsprechenden Genpools aussterben und großflächige Lebensräume (Regenwälder, Korallenriffe, Feuchtgebiete) verloren gehen, werden Evolutionszentren wie die Tropen möglicherweise nicht mehr dieselbe Rolle wie nach früheren Massenaussterben übernehmen können. Bleibt der Einfluss des Menschen auch über geologisch längere Zeiträume bestehen, wären beispielsweise Artbildungsprozesse bei größeren Säugetieren gar nicht mehr vorstellbar. Außerdem werden nur solche Arten stark gefördert, die sich an vom Menschen geprägte Lebensräume anpassen können. Eine erwartbare Erholung und Reorganisation der Lebensvielfalt hat nach früheren

Massenaussterben meist rund fünf Millionen Jahre in Anspruch genommen [16]. Auf der Analyse von Populations-trends auf regionaler und globaler Ebene beruht der Living Planet Index (LPI). In die Untersuchungen im Living Planet Report 2020 des WWF sind Berechnungen aus 20.811 Populationstrends von 4.392 Wirbeltierarten ein-geflossen. Ergebnis: Von 1970 bis 2016 zeigt der globale LPI einen kontinuierlichen Rückgang um 68 Prozent, in Süßwassersystemen sogar um 84 Prozent [17].

Veränderung der Stoffkreisläufe: Beispiel Stickstoff

Durch menschliche Aktivitäten werden die globalen Stoffkreisläufe in jüngster Zeit gravierend verändert. Besonders massiv ist dies beim Stickstoff der Fall. Die menschlichen Eingriffe in den Stickstoffkreislauf sind vielfältig, unter anderem sind folgende Faktoren von besonderer Bedeutung:

- Vor allem bei der Verbrennung fossiler Energieträger in Kraftwerken und Motoren entstehen als Nebenprodukte Stickoxide (hauptsächlich aus dem Luftstickstoff).
- Mit der Entwicklung des Haber-Bosch-Verfahrens zu Beginn des 20. Jahrhunderts konnte Stickstoff großtechnisch auf chemischem Wege fixiert werden. Damit konnten nun große Mengen an Kunstdünger hergestellt werden, was die landwirtschaftliche Produktion auf den zuvor stark ausgelaugten Böden erheblich erleichtert und der „Grünen Revolution“ mit ihren ertragreichen Getreidesorten den Weg geebnet hat.
- Auch das großflächige Anpflanzen von Nutzpflanzen wie Sojabohnen, die als Leguminosen eine effiziente Symbiose mit N-fixierenden Bakterien eingehen, trägt zur Stickstofffixierung in großem Maßstab bei.

Das hat neben den Vorteilen für die Produktion von Nahrungsmitteln auch unerwünschte Folgen:

- Stickoxide sind an der Bildung von gesundheitsschädlichem Ozon in der unteren Atmosphäre beteiligt und verursachen sauren Regen.
- Ein großer Teil des chemisch oder biologisch fixierten Stickstoffs wird aus den Böden ausgewaschen und führt zur Eutrophierung von Seen, Flüssen und Küstengewässern.
- Ein Teil des Stickstoffs findet seinen Weg im Lachgas (N_2O) zurück in die Atmosphäre – ein hoch wirksames Treibhausgas, das zudem in der Stratosphäre an der Zerstörung von Ozon beteiligt ist.
- Vor allem in unseren Breiten hat eine massive Überdüngung zum Rückgang artenreicher Lebensräume geführt. Der Überschuss an Stickstoff beträgt im deutschlandweiten Durchschnitt aktuell rund 90 Kilogramm pro Hektar und Jahr.

Die Dimensionen der Veränderungen im Stickstoffkreislauf werden durch entsprechende Zahlen aus dem 2005 erschienenen Millennium Ecosystem Assessment deutlich:

Vorindustriell betrug der globale Stickstofffluss aus der Atmosphäre in Land- und Wasserökosysteme 90–140 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr, was durch einen entsprechenden Rückfluss aufgrund der Denitrifizierung ausgeglichen wurde. Diesem Wert fügen wir jährlich rund 210 Millionen Tonnen Stickstoff hinzu, davon allein 120 Millionen Tonnen durch Kunstdünger und den Anbau von Pflanzen, die durch Symbiose mit N-fixierenden Bakterien effizient Luftstickstoff festlegen [18].

Zusammenfassung

Alle Erkenntnisse über das System Erde zeigen deutlich auf, dass die Menschheit so massiv in die Prozesse des Systems eingreift, dass sich die Rahmenbedingungen für die Zukunft – allerdings schon heute spürbar – deutlich verschlechtern. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Konzepte weisen übereinstimmend in die gleiche Richtung: Mehrere Sicherheitsgrenzen sind überschritten. Stoffkreisläufe werden im globalen Maßstab umgestaltet. Die Menschheit ist mit sich weiter beschleunigender Wirkung zur stärksten gestaltenden Kraft auf der Erde geworden. Mit dem Klimawandel und der Vernichtung von Biodiversität sind irreversible Prozesse eingeleitet, und die Funktionalität von Ökosystemen wird zunehmend eingeschränkt. Eine nachhaltige Entwicklung, die nicht zuletzt die Lebensgrundlagen der Menschheit sicherstellt, ist jedoch nur innerhalb der biophysikalischen Grenzen des Systems Erde denkbar. Unsere Konsum- und Produktionsmuster müssen sich in allererster Linie an diesen Grenzen orientieren, um nachhaltig zu sein.

Summary

The biophysical guardrails for sustainable development: How human activities change the Earth system

All scientific findings about the Earth system show clearly that humanity intervenes so massively in Earth system processes that the conditions for future generations – but already noticeable today – will deteriorate significantly. The results of different concepts point in the same direction consistently: Several planetary boundaries have been exceeded, biochemical cycles are being reshaped on a global scale, humanity has even become the most powerful formative force on earth, irreversible processes like climate change and loss of biodiversity are accelerating, the functionality of ecosystems is decreasing. Sustainable development, which ensures the safe and comfortable existence of human societies on Earth, is conceivable only within the biophysical boundaries of the Earth system. Our consumption and production patterns must first and foremost be oriented towards these boundaries in order to be sustainable.

Schlagworte:

System Erde, Planetare Grenzen, Kippelemente, Anthropozän, Stoffkreisläufe, Große Beschleunigung, Nachhaltigkeit.

Literatur

- [1] WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen), Hauptgutachten: Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation, 2011.
- [2] J. Jäger, Was verträgt unsere Erde noch? Wege in die Nachhaltigkeit. S. Fischer, Frankfurt/Main, 2007.
- [3] J. Rockström et al., A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461, 472–475.
- [4] W. Steffen et al., Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- [5] T.M. Lenton et al., Tipping elements in the Earth's climate system. *PNAS*, 2008, 105, 1786–1793.
- [6] PIK (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung), Kippelemente – Achillesfersen im Erdsystem. www.pik-potsdam.de/services/infoteh/kippelemente
- [7] P. J. Crutzen, P. J., Geology of mankind, *Nature*, 2002, 415, 23.
- [8] C. N. Waters et al., The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 2016, 351, <https://doi.org/10.1126/science.aad2622>
- [9] W. Steffen et al., The Anthropocene: From global change to planetary stewardship. *Ambio*, 2011, 0044–7447, <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0185-x>
- [10] S. Solomon et al., Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *PNAS*, 2009, 106, 1704–1709.
- [11] P. Horton et al., Estimating global mean sea-level rise and its uncertainties by 2100 and 2300 from an expert survey. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2020, 3, <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0121-5>
- [12] W. Steffen et al., Trajectories in the Earth System in the Anthropocene. *PNAS*, 2018, 115, 8252–8259.
- [13] IPBES, Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. 2019.
- [14] S. L. Pimm et al., The future of biodiversity. *Science*, 1995, 269, 347–350.
- [15] A. D. Barnosky et al., Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 2011, 471, 51–57.
- [16] N. Myers, A.H. Knoll, The biotic crisis and the future of evolution. *PNAS*, 2001, 98, 5389–5392.
- [17] WWF, Living Planet Report 2020.
- [18] Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and human well-being. Volume 1: Current state and trends. Island Press, Washington, Covelo, London, 2005.

Der Autor



Hannes Petrischak studierte Biologie in Kiel. Von 2006 bis 2016 war er im Saarland für die Bildungsinitiative „Mut zur Nachhaltigkeit“ tätig, ab 2010 als Geschäftsführer der Stiftung Forum für Verantwortung. Seit 2016 leitet er den Geschäftsbereich Naturschutz der Heinz Sielmann Stiftung. Am Umwelt-Campus Birkenfeld (Hochschule Trier) ist er Dozent im berufs begleitenden Masterstudiengang „Sustainable Change – Vom Wissen zum Handeln“.

Korrespondenz:

Dr. Hannes Petrischak
Heinz Sielmann Stiftung
Dyrotzer Ring 4
14641 Wustermark/Elstal
E-Mail: hannes.petrischak@sielmann-stiftung.de