



Welthandel verschärft globale Umweltbedrohungen

Stellen wir uns das vor: Ohne Welthandel mit Dünger und anderen landwirtschaftlichen Hilfsstoffen gäbe es keine industrielle Landwirtschaft. Ohne Welthandel mit Futtermitteln, Fleisch, Palmöl und Tropenhölzern würde der Regenwald nicht mehr grossflächig abgeholzt. Ohne Welthandel mit Metallen und anderen Abbauprodukten würden nicht mehr ganze Fließgewässersysteme vergiftet und zerstört. Ohne Welthandel gäbe es für die natürlichen Lebensräume wie Urwälder, Moore und andere Feuchtgebiete, Savannen etc. viel mehr Raum. Ohne Welthandel und die entsprechenden Transporte könnte man die klimaschädlichen Abgase wesentlich reduzieren.

Diese Vorstellung einer Welt ohne Welthandel ist natürlich eine Utopie. Aber eine Welt, die weniger Welthandel mit umweltproblematischen Gütern kennt, ist durchaus denkbar. Allein in den letzten 30 Jahren ist der Welthandel um das Achtfache gestiegen (Heinimann 2019). Und gemäss Prognosen soll sich der Welthandel bis 2030 fast vervierfachen (Spiegel, nck/AFP 2013). Da fragen wir uns, ob das Wachstum bei allen Gütern in einem solchen Ausmass weitergehen soll oder ob wir den Welthandel nicht in einigen besonders problematischen Bereichen ohne grossen Gemeinwohlverlust reduzieren könnten. Wollen wir aber einen umweltverträglicheren Welthandel, müssen wir zunächst wissen, welche Umweltprobleme durch Produktion und Handel welcher Güter entstehen.

Helen Müri

1945. ist promovierte Biologin mit Arbeitsschwerpunkten in Wildtierökologie, Naturschutz und Umweltbildung. Sie arbeitete im eigenen Ökobüro und war zudem aktiv als Umweltpolitikerin (u.a. SP-Grossrätin Kt. Aargau) und als Vorstandsmitglied verschiedener Umweltorganisationen.

Christoph Lüthy

1950. war selbstständiger Rechtsanwalt und viele Jahre juristischer Mitarbeiter bei der Stiftung Pro Mente Sana, die sich für die Interessen psychisch kranker Menschen einsetzt.

Daniel Haller

1955. war Drittweltladen-Gründer in Hamburg, Erwachsenenbildner im Bereich Bauerngewerkschaften in Bolivien, politisierter Kochbuchautor. Er studierte hispanoamerikanische Literaturwissenschaft und arbeitete dann als Tageszeitungsredaktor in der Schweiz.

Die AutorInnen danken Ueli Kasser für viele wertvolle Informationen



Die Umweltgefahren durch Güter des Welthandels sind weit gefächert und von unterschiedlicher Bedeutung. Die einen wirken rein lokal, andere fallen global ins Gewicht. Wir konzentrieren uns hier auf jene Handelsgüter, welche die grössten globalen Bedrohungen verstärken. Dabei halten wir uns an die neun Bereiche, deren Grenzen im Konzept der planetarischen Belastbarkeit definiert wurden. Überschreiten wir diese Grenzen, bedroht dies die Lebensgrundlagen auf dem ganzen Planeten:

- Klimawandel
- Änderungen der Biosphären-Integrität bzw. der Biodiversität
- stratosphärischer Ozonabbau
- Versauerung der Ozeane
- Veränderung biogeochemischer Stoffflüsse wie bei Phosphor und Stickstoff
- Landnutzungsänderungen
- Süsswasserverbrauch
- atmosphärische Aerosolbelastung (Feinstaub)
- Einführung von neuen Substanzen und gentechnisch veränderten Organismen.

Dieses Konzept wurde von einer renommierten internationalen Wissenschaftsgruppe (Rockström et al 2009) erarbeitet und später (Steffen et al. 2015) weiterentwickelt. Die Autoren postulieren, dass diese neun Bereiche die Stabilität und Widerstandskraft des Erdsystems bestimmen – also die Wechselwirkungen zwischen Land, Ozeanen, Atmosphäre und Lebewesen, die zusammen die Umweltbedingungen ausmachen, auf denen unsere Gesellschaften fussen. Teilweise konnten sie Grenzwerte definieren: Wenn wir diese überschreiten, sind die Folgen irreversibel und untragbar für Mensch und Natur. Auch die UNO hat für die Umwelt Millenniumsziele definiert, die teilweise auf der Situation in den genannten Bereichen basieren und diese betreffen (United Nations 2015).

1 Klimaerwärmung

Beim Klima gelten die planetarischen Belastbarkeitsgrenzen bereits als überschritten. Dies bedeutet, dass wir die Emissionen des CO₂ und anderer klimaschädigender Gase stark reduzieren müssen, wenn wir nicht den gesamten Planeten gefährden wollen.

Fast ein Viertel der weltweiten CO₂-Emissionen entstehen durch die Transporte von Personen und Gütern (Blume 2015). Einen beträchtlichen Teil davon verursacht der Gütertransport. Dazu kommen jene CO₂-Emissionen, die bei der Produktion der gehandelten Güter entste-



hen. Glen P. Peters und seine Forschungsgruppe haben dies anhand von 113 Ländern untersucht (Peters et al 2011): Allein in den Jahren zwischen 1990 und 2008 haben sich die Emissionen aus der Produktion und dem Transport von gehandelten Gütern und Dienstleistungen um beinahe 4 Gigatonnen (4'000'000'000 Tonnen) auf insgesamt 7,8 Gigatonnen (2008) rund verdoppelt. Das entspricht etwa 26 Prozent des gesamten weltweiten CO₂-Ausstosses (vgl. auch den Text »Umweltauswirkungen einiger wichtiger Welthandelsbereiche«). Dazu kommen jene klimaschädigenden Gase, die durch die Umstellung auf intensive Bewirtschaftung des Landes entstehen. Weiter verschärfen viele chemische und biologische Wechselwirkungen die Problematik.

Besonders wichtig sind auch die CO₂-Gehalte der weltweit vorhandenen Wälder, denn grüne Pflanzen können CO₂ binden und daraus, zusammen mit Wasser, Kohlenhydrate herstellen. Die UNO schätzt, dass die Wälder 80 Prozent des über der Erdoberfläche vorhanden CO₂ enthalten und 40 Prozent von jenem, das unter der Erdoberfläche gebunden ist (UNFCCC 2015). Der WWF stellt fest, dass die Wälder »30 Prozent der Landoberfläche (bedecken), sie speichern aber etwa die Hälfte des auf der Erde gebundenen Kohlenstoffs in ihrer Vegetation. Zusammen mit den weiteren Kohlenstoffmengen, die in den Waldböden gespeichert sind, übersteigt dies sogar die Menge an Kohlenstoff in der Atmosphäre. Tropische Regenwälder sind dabei von besonderer Bedeutung. Sie speichern aufgrund des hohen Biomasse-Vorrats 50 Prozent mehr Kohlenstoff als Wälder ausserhalb der Tropen. Rodet man diese Wälder, so setzt dies den Grossteil des Kohlenstoffes als Kohlendioxid (CO₂) frei. Der derzeitige rapide Waldverlust trägt also massgeblich zum Klimawandel bei. Rund 13 Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen stammen aus der Vernichtung von Wäldern« (WWF 2019).

Neben diesen Landnutzungsänderungen ist die Fleisch- und Futterproduktion besonders problematisch bezüglich der klimaschädigenden Gase. Gemäss dem globalen Weltagrarbericht (IAASTD 2008) ist Viehhaltung für 14,5 Prozent der klimagefährdenden Gasemissionen verantwortlich. Andere Quellen sprechen sogar von rund 18 Prozent der CO₂-Äquivalente. Insbesondere entstehen grosse Mengen Methan, das 23 Mal klimaschädlicher als CO₂ ist. 37 Prozent des anthropogenen oder wirtschaftsbedingten Methans entstehen bei der Verdauung von Wiederkäuern (Pro Regenwald e.V. 2019). Insgesamt beträgt der Ausstoss klimagefährdender Gase durch Viehhaltung mehr als jener des gesamten Transportsektors. Betrachtet man allein das CO₂, so ist der Hauptteil der Emissionen den vielfältigen Änderungen der Landnutzung, insbesondere durch Waldrodungen, zuzuordnen. Ein beträchtlicher Teil



davon steht im Zusammenhang mit Exporten, wenn auch mangels quantitativer Unterscheidung zwischen industrieller und ökologischer Fleischproduktion hier keine präzisen Aussagen gemacht werden.

Dem globalen Handel sind also nicht nur die CO₂-Emissionen der Transporte zuzuordnen, sondern auch alle klimaschädigenden Gase, die in der gesamten Wertschöpfungskette sowie aufgrund der dafür herbeigeführten Vegetationsveränderungen entstehen. Dazu kommen die Emissionen infolge des Verbrauchs der fossilen – ebenfalls weltweit gehandelten – Energieträger. Der globale Handel ist also eine zentrale Ursache der Klimaerwärmung.

2 Biodiversität und Änderungen der Biosphären-Integrität

Um zu quantifizieren, wie stark die Biosphäre gestört ist, verwenden WissenschaftlerInnen verschiedene Masse oder Indikatoren, insbesondere die Aussterberate, die Biosphären-Integrität oder das Vorhandensein wichtiger Lebensräume wie etwa natürlicher Wälder. Grosse Bedeutung kommt der Aussterberate zu, also der Anzahl ausstorbender und gefährdeter Arten pro Million vorhandene Arten pro Jahr. So ist von den rund acht Millionen Arten unseres Planeten bereits eine Million gefährdet, und die Gefährdung nimmt weiterhin rasant zu (IPBES 2019). Diese Aussterberaten zeigen, dass die planetarischen Belastbarkeitsgrenzen bereits überschritten sind.

Biosphären-Integrität bedeutet viel mehr, als sich durch diese Zahlen ausdrücken lässt. Deshalb untersuchen die WissenschaftlerInnen auch, wie viele der ursprünglich in einer Region vorhandenen Arten noch da leben, und drücken dies im Index der Biodiversitäts-Intaktheit aus (Scholes und Biggs 2005). Diesen Index zu bestimmen, erfordert allerdings sehr differenzierte/aufwändige wissenschaftliche Untersuchungen/Analysen.

Für die Biodiversität sind einige Lebensräume besonders wichtig, insbesondere die tropischen und subtropischen Regenwälder, Feuchtgebiete wie Fließgewässer, Auen, Feuchtwiesen, Moore, Ozeane – unter anderem die Korallenriffe (vgl. Kapitel 7 ›Die Versauerung der Ozeane‹) –, nordische Standorte mit den borealen Wäldern, der Tundra und der Taiga. Vielerorts sind diese Lebensräume nicht zuletzt durch die verschiedenen vom Welthandel verursachten Beeinträchtigungen stark gefährdet. Ihr Zustand gibt daher wichtige Hinweise auf die Biodiversität. Manchmal konzentriert man sich auf die ursprünglichen tropischen Wälder. Obwohl alle tropischen Regenwälder der Erde zusammen nur 7 Prozent der Fläche bedecken, sind darin 90 Prozent der Arten zu finden (Faszination Regenwald 2019a). Einige besonders artenreiche



Regenwaldgebiete gehören zu den 36 Biodiversitäts-Hotspots der Welt. Insgesamt nehmen alle diese Hotspots zusammen zwar nur 2,4 Prozent der Landfläche der Erde ein, doch sie beherbergen eine riesige Artenzahl. Mehr als die Hälfte der Arten dieser Erde – bei den Vogel- und Säugtierarten fast 43 Prozent – leben ausschliesslich in diesen Hotspots (Conservation international 2019). Wichtig für die Biodiversität sind neben der Artenvielfalt auch die genetische Vielfalt, die Vielfalt der Lebensraumtypen mit der mannigfaltigen Ausprägung der verschiedenen Stockwerke des Waldes, vom Boden, über die Kraut- und Sämlingschicht, die Strauchschicht, bis in den mittleren Bereich der Stämme und zur Kronenschicht.

Zu beachten ist, dass es sich bei der Zerstörung der Biodiversität oft um weitgehend irreversible Veränderungen handelt. Dies zeigt sich besonders deutlich bei den verlorenen Arten, die nie mehr zurückgeholt werden können. Auch sind grossräumig abgeholzte tropische Regenwälder kaum mehr wiederherstellbar. Dies hat damit zu tun, dass der Nährstoffkreislauf der Wälder sich in verschiedenen Weltregionen stark unterscheidet: In unbeeinflussten mitteleuropäischen Wäldern besteht ein fast vollständiger Nährstoffkreislauf, in dem die Pflanzen die Nährstoffe in der Streu und im Totholz wieder aufnehmen. Die Verluste im Boden werden ausgeglichen durch den Nachschub aus der Verwitterung von Mineralen in der Erde.

Anders ist dies in den tropischen Regenwäldern, deren Böden aufgrund ihrer chemischen Struktur die Nährstoffe schlecht speichern können und daher meist bis in die Tiefe stark verwittert sind. Nach dem Abholzen bleiben ausgelaugte Böden zurück, und es wird kein Nährstoff nachgeliefert. Entsprechend empfindlich sind die tropischen Böden, wenn man bei industrieller Nutzung ganze Waldstücke rodet und damit einen grossen Teil der Biomasse entnimmt. Da fehlen nachher die Nährstoffe und die Sämlinge. Zudem verändert sich das Mikroklima. So braucht es denn nach den Aussagen des Biologieprofessors Francis Hallé »siebenhundert Jahre ... bis aus einem Stück Brachland wieder ein Urwald wird« (Hallé 2019). Interessanterweise ist hingegen die Regenerierfähigkeit der Regenwälder gross, wenn nur kleine Lücken entstehen, etwa durch Stürme, Hochwasser oder nach kleinräumigem Wanderfeldbau, wie er von indigenen Völkern seit Jahrhunderten praktiziert wird. In diesen Fällen bleibt der im Boden befindliche Baumsamenvorrat erhalten. Der Unterwuchs und danach auch die Baumschicht können sich rasch erholen (Martin, 2015).

Wenn auch frühere Schätzungen der Waldflächen nicht sehr exakt sein mögen (Martin 2015), kann man doch davon ausgehen, dass in den letz-



ten paar Jahrhunderten mehr als die Hälfte der Waldfläche der Welt zerstört wurde (Fenning 2014). »In den ersten zwölf Jahren des neuen Jahrtausends gingen weltweit 229 Millionen Hektar Wald verloren« (Martin 2015, S. 67). Besonders problematisch ist das Abholzen des Primärwaldes. Von den 13,4 Millionen Quadratkilometern Regenwald der Erde werden nach Schätzungen jedes Jahr etwa 60'000 Quadratkilometer zerstört (Faszination Regenwald 2019b), um Tropenholz zu exportieren und Plantagen für Ölpalmen, Zuckerrohr und Soja anzulegen. Weiter zerstören Erdölförderung, Staudämme sowie der Coltanabbau, Gold- und Kupferminen den Regenwald (Rettet den Regenwald 2018). Gerade bei diesen Metallen ist der sogenannte ökologische Rucksack – das heisst die Summe aller Ressourcen, die im Produktionsprozess und bei der Entsorgung eines Produktes benötigt werden – trotz relativ geringer Mengen oft sehr gross (Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt, Energie 2006).

Auch in den nordischen, borealen Wäldern beeinträchtigt die Nutzung von Holzprodukten für den Welthandel die Biodiversität stark. In Russland gab es 2015 nur noch auf 3,2 Prozent der borealen Waldfläche intakte Lebensräume. Die Endverbraucher des dort geschlagenen Bau-, Möbel- und Zelluloseholzes sind vielfach in anderen Ländern zu finden. Die Roh- und Endprodukte wie beispielsweise Papiertaschentücher werden exportiert (Mauthe 2017). Taiga-Urwälder werden auch für die massenhafte Förderung von Erdöl, Erdgas und (Braun)-Kohle – fast immer für den Export – zerstört.

Auch artenärmere boreale Wälder sind wichtig für die Biodiversität. Dort finden sich wichtige Lebensgemeinschaften, die sich – langfristig betrachtet – je nach klimatischen Bedingungen ausdehnen oder zurückziehen. Das kennen wir aus den Eiszeiten, als die Ausbreitung dieses Gürtels wie auch der steppenartigen Permafrostböden über die Jahrtausende hinweg regelmässig pulsierte. Eine Ausdehnung war jeweils nur möglich, wenn auch in Zeiten der Zurückdrängung noch ein Refugium für die entsprechenden Arten vorhanden war.

Zwar werden die ökologischen Zusammenhänge bei einer naturnahen Holznutzung, wie wir sie in unseren schweizerischen Wäldern kennen, teilweise berücksichtigt. Doch die Realität der modernen Holznutzung in Sibirien, Kanada, dem Amazonas, auf Borneo und Neuseeland sieht ganz anders aus. Da wird die gesamte Pflanzendecke grosser Waldstücke mit effizienten Maschinen in kurzer Zeit zerstört. Ein dichtes Netz von Infrastrukturanlagen wie Transportstrassen und Lagerplätzen beeinträchtigen den Boden durch Landverbrauch, Zerschneidung und Verdichtung zusätzlich. Die letzten Urwaldflecken werden dadurch von-



einander getrennt, sodass viele räumlich anspruchsvolle Tierarten, etwa Menschenaffen, auf den fragmentierten Waldstücken kein Auskommen mehr finden. Die Biodiversität in Boden, Stamm- und Kronenschicht wird weitgehend zerstört.

Bezüglich Biodiversität ist auch die Übernutzung und Beeinträchtigung der Meere zu nennen – zu grossen Teilen aufgrund des Welthandels: Wie der jüngste Bericht der Welternährungsorganisation FAO zeigt, sind mittlerweile weltweit 80 Prozent der Bestände überfischt oder bis an die Grenzen ihrer biologischen Kapazität genutzt (Proplanta 2018). Die Beeinträchtigung der Biosphäre durch Meeresverschmutzung – Erdöl, Plastik etc. – ist kaum absehbar (vgl. Kapitel 6 über Mikroplastik).

Problematisch ist zudem die Korallenbleiche: Neben den Regenwäldern gelten die Korallenriffe als die artenreichsten Lebensräume der Welt. Man vermutet, dass hier mehr als ein Viertel aller bekannten Meeresfische vorkommen. Die beiden stärksten Korallenbleichen in den Jahren 1998 und 2002 suchten 50 bis 60 Prozent aller Riffe heim, und rund 5 Prozent sind abgestorben (Australien Government 2006). Dabei spielt der Klimawandel mit der Erwärmung des Wassers eine wichtige Rolle (vgl. Kapitel 7 »Die Versauerung der Ozeane«).

Viele der Produkte, die an der aktuellen Biodiversitätszerstörung besonders beteiligt sind – Holz beziehungsweise Zellulose, Palmöl, industriell gefangene Meeresfische, verschiedene Metalle –, sind grossmehrerheitlich für den Export bestimmt. Auch bei den übrigen für die Biodiversität schädlichen Produkten – Fleisch und Futtermittel ebenso wie Erdöl, Erdgas und Braunkohle – gelangt ein grosser Anteil in den Welthandel. Selbst wenn man die gesamten Beeinträchtigungen, die infolge der Produktion von Exportwaren entstehen, derzeit nicht präzise bestimmen kann, ist davon auszugehen, dass dabei der Welthandel eine entscheidende Rolle spielt.

Gerade am Beispiel der Zerstörung der Biodiversität in Waldgebieten lässt sich aufzeigen, dass die hier gewonnenen Welthandelsgüter – von Futtermitteln, Fleisch, Palmöl bis zu Bau- und Papierhölzern – keinen unverzichtbaren Bedarf der Endverbraucher befriedigen. Man könnte ihre Produktion reduzieren oder sie in der Verbrauchsregion selbst herstellen. Vermeiden liesse sich beispielsweise, ähnliche Produkte hin und her zu transportieren: So werden aus der Schweiz – vor allem aus finanziellen Gründen – 20 Prozent des Stammholzes exportiert, ein Drittel davon nach Asien, während Holzprodukte im Wert von 352 Millionen Franken importiert werden. »Wenn die BewohnerInnen dieses Landes langlebige Häuser bauen, ihre Möbel länger behalten und ihren



Papierverbrauch eindämmen würden – der Onlinehandel braucht Unmengen von Karton –, dann wüchse in der Schweiz genug Holz für den hiesigen Verbrauch« (Dyttrich, 2019). Den Fleischkonsum sollten wir in den reichen Ländern ohnehin, auch aus Gesundheitsgründen, stark reduzieren. Beim Palmöl könnte man mindestens auf jenen Teil, der in die Energieerzeugung geht, verzichten. In der EU betrifft dies 61 Prozent des Palmöls: 51 Prozent oder 4,3 Millionen Tonnen gehen in die Produktion von Biodiesel, 10 Prozent werden für Strom- und Wärmeerzeugung genutzt (Rettet den Regenwald 2019). Stattdessen müsste man die Entwicklung von Ersatzprodukten intensiv vorantreiben. Eine ökologisch vertretbare Holznutzung – sowohl für den Holzbau als auch zur Energiegewinnung – wäre mindestens teilweise auch aus einheimischen Wäldern durchaus möglich, wie die Erfahrungen mit naturnahem Waldbau beispielsweise in der Schweiz zeigen. Auch der Verbrauch von Einwegpapier könnte man, unter anderem durch Recycling, weitgehend reduzieren.

3 Veränderung der Landnutzung

»Drei Viertel der Naturräume an Land wurden vom Menschen bereits erheblich verändert, in den Meeren zwei Drittel« (FAZ 2019). Hinsichtlich des Welthandels ist neben der Zerstörung der Waldflächen auch die Umnutzung anderer Lebensräume – beispielsweise traditioneller Subsistenz-Landwirtschaftsgebiete zu intensiv genutzten Weide- und Ackerflächen– von grösster Bedeutung. Der Landverbrauch für die Produktion von Welthandelsgütern ist enorm. Dazu ein paar Beispiele: Im Landwirtschaftsjahr 2018/19 benötigt Soja 128 Millionen Hektar, Baumwolle 25 Millionen Hektar, Kaffee 10,8 Millionen Hektar. Allein für das in Deutschland genutzte Palmöl werden fast 0,4 Millionen Hektar Anbauflächen gebraucht.

Seit einigen Jahren sind die Landnutzungsänderungen auch eine Folge des Landraubs (Land-Grabbing), teils durch neokolonial agierende Staaten, teils durch Konzerne. Während die indigene Bevölkerung, die mit schlimmen sozialen Folgen vertrieben wurde und wird, zum Boden als ihrer Subsistenzgrundlage Sorge getragen hatte, ist dies für die neuen Weltmarktproduzenten nachrangig. Auf den 43 bis zu 200 Mio. ha. Land-Grabbing-Flächen (Brot für alle 2018, Statista 2018) werden fast ausschliesslich Erzeugnisse für den Welthandel angebaut. Ein beträchtlicher Teil des Fleisches und der Futtermittel ist für den Export bestimmt. Auch bei Palmöl, Tee, Kaffee oder Kakao landet fast alles auf dem Weltmarkt.

Die Umwandlung von Regenwäldern in Nutzflächen mit industrieller



Landwirtschaft hat verheerende Folgen für die Bodenfruchtbarkeit, beeinträchtigt und verändert die Fließwassersysteme und reduziert die Biodiversität in grossem Masse. Die intensive Bewirtschaftung führt zur Bodendegradation: Der Einsatz von chemischen Düngern und Schädlingsbekämpfungsmitteln belastet die Gewässer, die Bearbeitung mit Maschinen verdichtet die Böden, und Erosion kann auftreten. Ausserdem entfällt auf diesen Flächen die einst wichtige Rolle der Wälder für das Klima. »Die Erhaltung der Böden der Welt ist essenziell, um die Ziele ›Null Hunger‹, Frieden und Wohlstand zu erreichen«, stellte der FAO-Generaldirektor José Graziano da Silva 2018 fest und ergänzte: Die Bodendegradation »verschlechtert mittlerweile jedes Jahr Flächen in den Grössenordnungen der Schweiz«. Insgesamt waren bereits 1997 15 Prozent der eisfreien Landoberfläche betroffen, eine Fläche grösser als die USA und Mexiko zusammen. Davon war schon damals 1 Prozent vollständig zerstört und nicht mehr revitalisierbar. Heute dürfte es sehr viel mehr sein.

4 Veränderung der Stickstoff- und Phosphorflüsse

Der Mensch hat die Umsatzmengen der beiden wichtigsten Nährstoffe für das Leben, Stickstoff und Phosphor, in den letzten 100 Jahren erheblich beeinflusst. Aus ökologischer Sicht ist die Umwandlung von Stoffkreisläufen in weltweite Stoffflüsse problematisch: In der Natur zirkulieren viele wichtige Nährstoffe der Pflanzen in lokalen und regionalen, kurz- und langfristigen Kreisläufen, und es besteht eine weitgehend ausgewogene Balance zwischen Freisetzung und Bodeneintrag von Stoffen. Diese Gleichgewichte werden jedoch zerstört, wenn man sowohl Düngemittel als auch Agrarprodukte auf andere Kontinente verfrachtet.

Stickstoff

Stickstoff (N) ist als Nährstoff wichtig für die Bildung von Eiweiss in den höheren Organismen. Er kommt in der Luft als Gas und in den Gesteinsformationen gewisser Regionen als Natriumnitrat (Chilesalpeter) vor. Da die Luft zu 80 Prozent aus N_2 besteht, sind die Ressourcen fast unendlich gross und überall auf der Welt vorhanden. Zudem ist viel Stickstoff im Boden gebunden, insbesondere in der Ackerkrume, wo der grösste Teil des Bodenstickstoffs in der Wurzelmasse und in abgestorbenen Pflanzenresten, anderen Humusbestandteilen und Bodenorganismen vorkommt.

Luftstickstoff kann von Pflanzen oder höheren Organismen nicht direkt als Nährstoff verwendet werden. Doch gelangt ein Teil des Stickstoffs durch die sogenannten Knöllchenbakterien der meisten Legumi-



nosen in den Boden. Diese Bakterien leben auf den Wurzeln der Pflanzen und vermögen den Luftstickstoff zu binden und in chemische Verbindungen umzuwandeln, die den Pflanzen als Nährstoff dienen können. Die Familie der Leguminosen umfasst eine breite Palette von Kultur- und Wildpflanzen. Viele Futtermittel wie etwa Soja, Ackererbsen oder Klee, aber auch Wicken, Lupinen oder Erdnüsse gehören dazu.

Man geht davon aus, dass der Mensch etwa gleich viel Stickstoff via Kunstdünger in die Erde bringt wie die angebauten und natürlich vorhandenen Leguminosen (Sutton et al 2013). Dabei wird der planetarische Grenzwert für den Stickstoffeintrag von 62 Millionen Tonnen pro Jahr aktuell bereits deutlich überschritten, sowohl beim Kunstdünger mit 120 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr als auch bei jenem Teil, der davon in die Süssgewässer eingetragen wird.

Beim natürlichen Stickstoffkreislauf wird ein beträchtlicher Teil der im Boden verfügbaren Stickstoffe durch die Pflanzen aufgenommen, dann mit der Pflanzennahrung durch Tiere gefressen, vom Beutetier zum Fressfeind weitergereicht und schliesslich innerhalb relativ kurzer Zeit und nicht allzu weit vom Ursprungsort entfernt als Kot oder Tierkadaver deponiert. Schliesslich kommen Kleinstlebewesen zum Einsatz und lösen die Reste wieder in die für die Pflanzen verfügbaren Grundstoffe auf. Es handelt sich also um einen primär lokalen Kreislauf, bei dem die Stoffe mehr oder weniger an Ort bleiben.

Im Gegensatz dazu sind diese Kreisläufe beim Export und Einsatz von chemischem Dünger durchbrochen und durch weltweite Stoffflüsse ersetzt. Schon im 19. und frühen 20. Jahrhundert war der Chilesalpeter – Natriumnitrat – als Dünger und Sprengstoffzutat ein landwirtschaftlich und militärisch wichtiges Welthandelsgut: Mit grossen Fracht-Segelschiffen, die oft schneller waren als Dampfschiffe, wurde der in der Atacama-Wüste gewonnene Salpeter um das nautisch schwierige Kap Horn herum nach Hamburg und Liverpool verfrachtet. Wegen der Ausbeutungsrechte kam es in den 1870er Jahren zum Salpeterkrieg, in dem Chile vormals zu Peru und Bolivien gehörende Territorien eroberte.

Um die Jahrhundertwende diskutierte man dann die sich abzeichnende Natriumnitrat-Knappheit als Ursache möglicher Hungersnöte (Crookes 1917). Deshalb forschte man mit Hochdruck an Verfahren, um Stickstoff aus der Luft zu gewinnen. Mit der Erfindung des Haber-Bosch-Verfahrens wurde dies im grossindustriellen Massstab möglich – allerdings muss dafür hinreichend billige Energie zur Verfügung stehen (Soentgen 2015). Die Düngerproduktion aus der Luft hat zu einer unübersichtlichen Situation geführt. Welche Anteile der Produktion dem



Welthandel zuzuschreiben sind, lässt sich kaum schlüssig beantworten. Sicher aber ist: Heute findet der Stickstofffluss im Rahmen der Agrochemie auch ohne Chilesalpeter weltweit statt.

Stoffe aus erhöhten Düngereinträgen gelangen schliesslich in die Böden, das Wasser und in die Luft, teilweise in anderen Weltregionen. Dabei werden sie zum Teil auch chemisch verändert. So entsteht das Lachgas (N_2O) durch eine chemische Umwandlung im Süss- und Meerwasser sowie in der Tierhaltung durch Faulprozesse. N_2O ist 28 Mal treibhauswirksamer als die gleiche Menge CO_2 . Ammoniak (NH_3) bildet sich im Boden, in Gewässern und vor allem auch in der Tierhaltung bei Sauerstoffdefizit. Es ist stark toxisch, wird in der Luft schnell ausgewaschen und wandelt sich in Stickstoffoxid (NO_x) um.

Neben der Düngung spielen auch diese Stickoxid-Emissionen im globalen N-Kreislauf eine grosse Rolle. Sie entstehen bei jeder Art von Verbrennung, unabhängig vom Treib- oder Brennstoff. Die entsprechenden NO_x -Luftschadstoffe gelangen in den Boden und in die Biosphäre. Man schätzt, dass der Stofffluss aus allen Verbrennungen etwa halb so gross ist wie der Stickstoff, der global durch Kunstdünger in den Boden gelangt. Das NO_x reagiert zudem zusammen mit intensivem Licht und den Kohlenwasserstoffen zum bodennahen Ozon, einem starken Gift und Treibhausgas. Es wird nach weiteren chemischen Reaktionen aus der Luft ausgewaschen und trägt wesentlich zur Boden- und Gewässerbelastung bei.

Phosphor

Phosphor (P) spielt für den biochemischen Stoffwechsel und die Erbsubstanz in Organismen eine grosse Rolle. Es gibt davon keine gasförmigen Verbindungen in der Luft, man kann Phosphor nur durch Tagbau in den Minen gewinnen. Dabei ist weltweit relativ wenig Gestein mit hohem Phosphatgehalt vorhanden. Der Zusammenhang zwischen Nährstoffkreisläufen und Welthandel ist also im Gegensatz zum Stickstoff beim Phosphor vergleichsweise einfach. P-Dünger wird weltweit gehandelt, da Rohphosphat zu 88 Prozent des Weltbedarfs in nur 5 Ländern abgebaut wird, 75 Prozent alleine in Marokko (Steingobe 2013) beziehungsweise der Westsahara.

Bei den Welthandelsgütern P-Dünger und Rohphosphat zeichnet sich bereits Knappheit ab. So warnt die Vereinigung Schweizerischer Nachrichtenoffiziere: »Der Phosphatbedarf der Welt wird zukünftig die Nachrichten dominieren wie Erdöl heute. (...) Um das Jahr 2050 werden vermutlich nur noch Marokko und China über bedeutende Phosphatreserven verfügen und mit einem Anteil von 90 Prozent die weltweite



Phosphatförderung dominieren« (Hauenstein 2014, 304). 2008 habe es bereits eine Phosphatkrise gegeben, berichten die Nachrichtenoffiziere, in der China Ausfuhrzölle verhängt hatte, und der Preis für Diammoniumphosphat von 44 auf 430 Dollar pro Tonne gestiegen war. »Dieser Preisanstieg von 800 Prozent führte in Indien, welches mit einem Anteil von 27 Prozent an den globalen Importen grösster Nachfrager im Welt-handel ist, zu Demonstrationen von Bauern, die den Dünger nicht mehr bezahlen konnten, wobei zwei Personen getötet wurden« (Hauenstein 2014, 304). In der Schweiz reagiert man auf den sich abzeichnenden Phosphormangel, indem man beispielsweise in der Deponie Elbisgraben in Liestal (BL) die Schlacke aus der Klärschlammverbrennung separat lagert und an Verfahren forscht, wie man dereinst den darin enthaltenen Phosphor zurückgewinnen könnte.

Etwa zwei Drittel des weltweiten Phosphatabbaus wird heute für P-Kunstdünger verwendet. Der Rest wird zum Beispiel zu Reinigungsmitteln und Lebensmittelzusatzstoffen verarbeitet. Auf gedüngten Böden werden viele Pflanzenarten verdrängt – insbesondere Magerwiesenpflanzen, die darauf spezialisiert sind, mit limitierten Mengen Nährstoffen auszukommen. Die überdüngten Böden sind eine Folge der Hohertragslandwirtschaft, in der die Nährstoffe der Pflanze leicht löslich zur Verfügung stehen müssen. Die Pflanzen nehmen die bereitgestellten Mengen aber nur zum Teil auf. Der Rest wird ausgewaschen und landet im Grundwasser oder in den Gewässern. Chemische Phosphorverbindungen aus Reinigungsmitteln und Nahrungsindustrie gelangen zusätzlich via Abwasser in die Gewässer. In überdüngten (eutrophierten) Gewässern kommt es dann zum einseitigen und schnellen Wachstum beispielsweise von Algen. Wenn diese im Herbst absterben, kommt es wiederum unter anderem zu einer hohen Sauerstoffzehrung. Die Veränderung der Nährstoffe im Boden und in der Folge auch in den Gewässern führt daher zu sehr weitreichenden Veränderungen, oft zur Verarmung der Biodiversität, beispielsweise durch Fischsterben und den Verlust weiterer Gewässertiere.

Beim Phosphor haben die Autoren der planetarischen Belastungsgrenzen einen globalem und einen regionalen Grenzwert festgelegt. Auch wenn sich je nach Methode unterschiedliche Werte ergeben, ist doch davon auszugehen, dass beide Werte bereits deutlich überschritten sind (Steffen et al. 2015).

Weitere Stoffflüsse

Bisher konzentrieren sich Untersuchungen zu den planetarischen Grenzen bei den biochemischen Stoffflüssen auf Stickstoff und Phosphor.



Doch auch verschiedene andere chemische Elemente spielen eine wichtige Rolle, wie beispielsweise Silizium, das in der Elektronik grosse Bedeutung hat, oder das für die Gesundheit von Tier und Mensch wichtige Selen. Die Veränderungen dieser Kreisläufe und Stoffflüsse durch den Welthandel verstehen die WissenschaftlerInnen zwar noch nicht in allen Details, aber sie haben zweifellos eine Bedeutung für die Funktionsfähigkeit der globalen Ökosysteme. Sie wirken sich auf wichtige andere Bereiche negativ aus, insbesondere auf die Biodiversität, die globale Verteilung der Vegetationstypen, die Gewässer, die Luft und auf das Weltklima.

Massnahmen zur Reduktion globaler Stoffflüsse

Bei Stickstoff und Phosphor sind einige Massnahmen zur Reduktion der Stoffflüsse bekannt:

- Bei den verkehrsbedingten Stickoxidemissionen zum Beispiel kann die Entwicklung von Motoren, die weniger Kraftstoff benötigen, zu einer globalen Reduktion führen.
- Das Herausfiltrieren des Phosphats aus Kläranlagen, wie es in der Schweiz flächendeckend gemacht wird, kommt im Ausland nur selten vor. Diese Art von Recycling könnte wesentlich zur Entschärfung der Gewässersituation beitragen und die Primärressourcen von Phosphor schonen. Ein grosser Teil des Phosphors aus der Landwirtschaft wird jedoch diffus in die Umwelt eingetragen und kann nicht durch Kläranlagen zurückgehalten werden.
- Wenn wir unsere Ernährung nicht in Richtung reduzierter Fleischkonsum, weniger Food Waste etc. verändern und die Bevölkerung weiterhin wächst, wird die Nachfrage nach Nahrungsmitteln noch zunehmen. Soll die Landwirtschaft diese Nachfrage durch weitere Intensivierung decken, liefe dies den Bemühungen um eine Reduktion des Nährstoffeintrags in die Umwelt entgegen. Der Bedarf an Dünger lässt sich jedoch durch eine Änderung der Agrarmethoden bei gleichbleibender Produktion drastisch senken, etwa durch biologische Landwirtschaft. Diese deckt ihren Nährstoffbedarf mittels Kompostwirtschaft und organischem Hofdünger zu mehr als 90 Prozent durch betriebsinterne Kreisläufe, kommt also ohne leichtlösliche Kunstdünger aus. Allerdings sind die Erträge pro Fläche in der biologischen Landwirtschaft der gemässigten Zonen kurzfristig betrachtet etwas niedriger als in der industriellen Landwirtschaft. Die global organisierte intensive Landwirtschaft mit viel Dünger- und Pestizideinsatz führt langfristig jedoch zu immer grösseren Bodenzerstörungen, wodurch die weltweiten Ertragsmöglichkeiten stark sinken.



5 Beeinträchtigung des Süsswassers

Verschiedene Aktivitäten des Menschen beeinträchtigen das Süsswasser je nach Weltregion in unterschiedlicher Weise: Vergiftung, Nährstoffeintrag, Verseuchung mit Krankheitskeimen, Veränderung ganzer Fließgewässersysteme durch Minen oder Staudämme, übermässige Wasserentnahme, Austrocknung grosser Seen, Absenkung des Grundwasserspiegels sowie Wüstenausdehnung und Beeinträchtigung des globalen Wasserkreislaufs und damit des Klimas. Vielerorts haben diese Auswirkungen ein dramatisches Ausmass angenommen. Zudem hängt der Wasserhaushalt der Erde eng mit den ökologischen Funktionen der Wälder zusammen. Diese sind unverzichtbar für die Verdunstung und die Wasserkreisläufe. Die in das Kronendach einstrahlende Sonnenenergie wird in Wasserdampf umgewandelt, was die Atmosphäre kühlt. Daher funktionieren grosse Waldflächen wie »riesige Klimaanlage« (WWF 2019).

Ein Mass für diese Beeinträchtigungen zu finden, ist für die Wissenschaft nicht einfach. Als besonders wichtig wird heute die Frage beurteilt, wie viel Wasser in einem Flusssystem verbleiben muss, um die Funktionsfähigkeit des gesamten damit verbundenen Ökosystems zu erhalten (Steffen et al. 2015).

Hinsichtlich des Welthandels ist bedeutend, wie viel Wasser für die Produktion der Handelsgüter benötigt wird (vgl. Artikel »Welthandel verbraucht viel Wasser« in diesem Band). Dies bezeichnet man als »virtuelles Wasser«. Ein Beispiel dafür ist die Baumwolle, wo man für die Produktion von 1 Kilogramm durchschnittlich rund 11'000 Liter Wasser benötigt (Mekonnen und Hoekstra 2010).

Die beiden Wissenschaftler Hoekstra und Mekonnen (2012) haben den Wasser-Fussabdruck, also den direkten und indirekten Wasserverbrauch der Menschheit analysiert. Gemäss dieser Untersuchung betrug der globale jährliche Wasser-Fussabdruck zwischen 1996 und 2004 gut 9 Giga-Kubikmeter (9 Mia. m³) pro Jahr. Der Ackerbau trug insgesamt 92 Prozent zum Wasser-Fussabdruck bei. 19 Prozent des globalen Wasser-Fussabdrucks sind gemäss dieser Studie verbunden mit der Produktion von Gütern für den Export, insbesondere Getreide und Fleisch, ferner Ölsaaten inklusive Baumwolle, Sojabohne, Ölpalme, Sonnenblumen, Raps etc. Davon wird ein beträchtlicher Teil als Tierfutter und immer mehr auch als Energiepflanzen genutzt. Viel Wasser wird zudem beim Abbau von Metallen, insbesondere Gold, Kupfer, Eisen und Stahl, Aluminium, Uran, Lithium, Coltan und seltene Erden, oder bei der Produktion von Baustoffen verbraucht und verschmutzt.

Unter dem externen Wasserfussabdruck versteht man das Wasser, das direkt oder indirekt aus einem anderen Land stammt. Er beträgt für al-



le Nationen zusammen etwa 22 Prozent des totalen Wasserfussabdrucks. Aus vielen detaillierten Angaben von Hoekstra und Mekonnen kann man schätzen, dass der Welthandel (Trink)-Wasserknappheit und -beeinträchtigung in der Grössenordnung von weit mehr als einem Fünftel auslöst. Zudem wird die Verfügbarkeit von Süsswasser stark eingeschränkt durch die Wüstenbildung, die wiederum vom Klimawandel mitverursacht wird. Wo – wie im Himalaya, den Anden oder in den Alpen – die Gletscher schmelzen, fehlt irgendwann das daraus stammende Trinkwasser und das Wasser für die Bewässerung der Felder. Ganze Regionen werden so unbewohnbar. Das ist in gewissen Gebieten des Himalaya bereits heute der Fall.

6 Chemikalien und gentechnisch veränderte Organismen (Novel entities)

Im Konzept der planetarischen Belastungsgrenzen versteht man unter dem Begriff ›Novel entities‹ neue Substanzen, neue Formen von Substanzen und gentechnisch manipulierte Organismen, wenn diese drei Bedingungen erfüllen: Sie sind nicht oder kaum abbaubar (also persistent), gelangen weitverbreitet in die Umwelt und weisen ein Schädigungspotenzial auf (Hewitt und Sturges 2013). Dabei ist diese Schädigung nicht immer direkt, sondern kann sich indirekt oder erst nach sehr langer Zeit auf Organismen auswirken. So sind zum Beispiel die Stoffe, welche die Ozonschicht abbauen, für Organismen absolut harmlos. Sie haben aber durch die Zerstörung von stratosphärischem Ozon – Stichwort: Ozonloch – indirekt negative Auswirkungen auf den Menschen und die Biosphäre.

Der weltweite Chemikalienmarkt ist gross und wächst. Etwa 100'000 verschiedene Chemikalien sind im Umlauf und werden kommerziell genutzt. Die meisten sind vor allem hinsichtlich ihrer längerfristigen Gefährlichkeit zu wenig geprüft worden. 3000 bis 4000 Chemikalien, sogenannte HPV (High Production Volumes), werden in Jahresmengen von über 500 Tonnen produziert. Der Markt ist riesig: In den USA werden jeden Tag 30 Millionen Tonnen Chemikalien importiert oder produziert (Rom 2012). Zu den Umweltbelastungen durch die Produktion kommen die Probleme der Nanopartikel und der Mikroplastikabfälle, die ebenfalls chemische Erzeugnisse darstellen. Die wenigsten Substanzen gelangen direkt und bestimmungsgemäss in die Umwelt wie beispielsweise die Pestizide oder die Haushaltreinigungsmittel. Viele Chemikalien werden in halb geschlossenen Systemen verwendet, zum Beispiel als Elektrolyt in einer Batterie, als Zusatz (Additiv) in Kunststoffen oder als Entfettungsmittel in einer Metallreinigungsanlage. Die akut



gefährlichen oder explosiven Chemikalien werden in der Regel in geschlossenen Systemen verwendet, etwa bei der Herstellung von Vitaminen, Farbstoffen oder Arzneimitteln. Die Palette der chemischen Industrieprodukte ist breit: Neben den Chemikalien gehören Pharmaka, Düngemittel, Pestizide, kosmetische Produkte, Plastik etc. dazu.

Jede einzelne Chemikalie erfordert eine Menge von Labor- und Tierversuchen für eine differenzierte Risikoabschätzung je nach Gebrauchsmuster. Dies wird in der westlichen Welt für neue Chemikalien aufgrund neuer Zulassungsbestimmungen verlangt. Weit problematischer ist jedoch, was in Ländern geschieht, die keine umfangreichen Zulassungsbestimmungen kennen. Ebenso problematisch ist, was in Bezug auf die rund 100'000 Chemikalien geschieht, die bei Inkrafttreten der Zulassungsbestimmungen in den 1970er und 1980er Jahren bereits im Gebrauch waren und somit nicht einer umfassenden Risikoabschätzung unterzogen wurden. Bei den Umweltproblemen stehen die Zerstörung und Schädigung von Lebewesen zur Diskussion, beispielsweise indem sich die Chemikalien im Blut und Gewebe von Tieren und Menschen anreichern, Krebs erregen, den Hormonhaushalt verändern, das Immunsystem, Nerven, Leber und Nieren schädigen oder das Erbgut beeinträchtigen.

Bei der Produktion von Chemikalien und Pharmaprodukten entstehen grosse Probleme für Wasser, Luft, Lebensraum und Biodiversität sowie für die Arbeitenden (u.a. resistente Keime, vgl. Artikel ›Gefährlicher Pharma-Welthandel‹ in diesem Band). Abfall – insbesondere auch bei Kunststoffen und Medikamenten – stellt generell ein grosses Problem dar, unter anderem in Böden und Gewässern. Die Produktion und der Transport sind bei Chemikalien zudem mit grossen Störfallrisiken verbunden.

Kunststoffe lösen sich in der Umwelt praktisch nicht auf und landen als Mikroplastik im Boden, selbst in abgelegenen Feuchtgebieten, in Gewässern und vor allem im Meer: Wissenschaftliche Schätzungen gehen davon aus, dass 6 bis 10 Prozent der weltweiten Kunststoffproduktion schliesslich in den Weltmeeren landen. Die Kunststoffadditive wie etwa die Weichmacher werden mit der Zeit aus der Kunststoffmatrix herausgelöst, da sie nicht chemisch an die Polymere gebunden sind.

Gentechnisch veränderten Organismen sind als völlig neuartige Entitäten – Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere – besonders problematisch, wenn man sie in die Umwelt einbringt, wo sie sich unkontrolliert vermehren können. Die durch sie bedingten Schäden können erst sehr langfristig auftreten. Es ist deshalb noch nicht möglich, diese Schäden präzise abzuschätzen.



Ein grosser Teil der Chemieproduktion ist für den Welthandel bestimmt. Dies gilt besonders für die Schweiz. Zudem ist Erdöl der wichtigste Grundstoff für Kunststoffe aller Art. Auch viele verarbeitete Plastik-Endprodukte werden im Welthandel vertrieben. Nicht selten transportiert man sie mehrmals für verschiedene Produktionsschritte rund um die Welt.

Obwohl chemische Stoffe aus der Chemie und neue gentechnisch veränderte Organismen sehr häufig sind und gehandelt werden und obwohl die dadurch verursachten Umweltschäden von Bedeutung sind, ist es nicht möglich, diese Belastungen genau zu beziffern. Es fehlt ein allgemein akzeptiertes Mass oder ein Indikator dafür, an dem man die heutige Belastung messen und einen planetarischen Grenzwert ableiten könnte.

Mikroverunreinigungen durch Pharmazeutika

Wie komplex die chemischen Stoffe ins Ökogeüge eingreifen, zeigt sich unter anderem an den sogenannten Mikroverunreinigungen. Derzeit diskutiert man rund 600 relevante Spurenstoffe, darunter viele pharmazeutisch wirksame Substanzen, aber auch Stoffe aus der Körperpflege, Abbauprodukte aus der Industrie oder von Pflanzenschutzmitteln, also Substanzen, die im Welthandel grosse Bedeutung haben. Wie der Name sagt, handelt es sich um Spuren im Bereich von Nanogramm pro Liter (ein Nanogramm = ein Milliardstel Gramm). Während man bei Kosmetika oder Pestiziden auf viele Stoffe verzichten könnte, ist dies bei Medikamenten kaum vertretbar. Beispielsweise wird Ibuprofen, das als fieber- und entzündungssenkender Wirkstoff unter anderem in ›Algifor‹ oder ›Saridon‹ in niedrigen Dosen rezeptfrei erhältlich ist, weltweit nur in sechs Fabriken produziert, findet sich aber in Konzentrationen von wenigen bis zu einigen Tausend Nanogramm/Liter in Flüssen aller Kontinente von Brasilien über die USA, Deutschland und Italien bis hin zu Südkorea. In der Schweiz hat man in Flusswasserkraftwerken, die in der Nähe von Flüssen liegen, unterhalb von Kläranlagen in rund 50 Proben zehn verschiedene Wirkstoffe über der Nachweisgrenze gefunden, die meisten im Bereich von 20 Nanogramm, zwei davon in einer Konzentration von über 100 Nanogramm pro Liter (Handke 2007). Vier Wirkstoffe waren Antibiotika.

Die Pharmazeutika gelangen über die körperlichen Ausscheidungen in die Abwässer, passieren teilweise die Kläranlagen und sind weitgehend nicht abbaubar. Ihre Wirkung in der Umwelt ist zwar nicht akut toxisch, aber doch deutlich: Von Betablockern und Antiepileptika weiss man, dass sie Organe von Fischen schädigen können. Östrogene aus An-



tibabypillen können sich auf die Fruchtbarkeit der Männchen auswirken oder das Immunsystem bei Vögeln beeinträchtigen. Sie verändern so oder so die Biosphären-Integrität, niemand weiss genau wie und in welchem Masse. Diese subtilen, schwierig festzustellenden Wirkungen werden staatlich nicht reguliert: Bei der Zulassung von Pharmazeutika ist Ökotoxikologie kein Thema. Die Pharma-Industrie hat festgestellt, dass besser abbaubare Wirkstoffe teilweise deutlich weniger gut wirken (vfa 2019).

Um die Spurenstoffe zu reduzieren, hilft bisher nur eine zusätzliche, jedoch bereits erprobte Reinigungsstufe in Kläranlagen. Wenn man in der Schweiz lediglich 100 von 700 Kläranlagen mit einer solchen Technologie ausrüsten würde, fielen Investitionen von 1 Milliarde Franken an. Für Länder, in denen es selbst für Grossstädte kaum Kläranlagen gibt, zeichnet sich bisher keine Lösung ab. Vielmehr stösst man bei Mikroverunreinigungen in Gewässern überall an Grenzen: bei der chemischen-Analytik, bei der Wirkungsforschung, bei der Regulierungsfrage und bei den technischen Lösungen.

7 Die Versauerung der Ozeane

Man rechnet damit, dass die Pflanzen etwa ein Viertel des vom Menschen in die Atmosphäre emittierten CO₂ assimilieren. Der Rest verbleibt in der Atmosphäre und trägt einerseits zum Treibhauseffekt bei (Gattuso und Hansson 2011) oder wird von den Ozeanen aufgenommen: Durch den Kontakt von Meerwasser mit CO₂ aus der Luft entsteht Kohlensäure. Dieser chemische Prozess ist komplex und hängt von der Temperatur, vom Druck, von der chemischen Qualität des Wassers und von der Konzentration des CO₂ in der Luft ab. Vereinfachend kann man sagen: Nimmt die CO₂-Konzentration in der Luft zu, steigt auch der Säuregrad im Meerwasser (Weis 2014).

Spezialisten haben diesen Effekt anhand von Messungen und Modellen bis in die Eiszeiten zurückverfolgt. Sie kommen zum Schluss, dass in den letzten 2 Millionen Jahren der PH-Wert der Ozeane noch nie ein so tiefes Niveau erreicht hat wie heute, das Meerwasser also noch nie so sauer war. Verantwortlich dafür ist der CO₂-Anstieg in der Luft. Es handelt sich erdgeschichtlich gesehen um die grösste Veränderung in so kurzer Zeit (Gattuso und Hansson 2011).

Die Prognosen, wie sich die Versauerung der Ozeane entwickeln und wie sich diese Entwicklung auf die Biologie der Meere auswirken wird, sind ausserordentlich komplex und mit vielen Unsicherheiten belastet. Der Versauerungseffekt überlagert sich mit der Erhöhung der Temperatur der Weltmeere, mit der Veränderung der Chemie des Meereswassers



infolge der Abschmelzung des Polareises und der Eiskecke in der Antarktis sowie durch andere Belastungen wie Ölverschmutzung, Nährstoffeinträge, Chemikalien oder Abfälle, die über die Abwässer in die Weltmeere gelangen. Zudem hängt die Veränderung von der geographischen Lage der Meere ab.

Diesbezüglich haben wir beträchtliche wissenschaftliche Erkenntnisse, denn ForscherInnen haben Studien von 22 verschiedenen Orten in den Weltmeeren zusammengefasst (Eisler 2012): Ein- und niederzellige Lebewesen können sich teilweise recht gut an die Veränderungen anpassen. Doch bei den höheren Organismen rechnet man mit einschneidenden und irreversiblen Veränderungen. Ein Rückgang der Krusten- und Schalentiere, deren Wachstum direkt vom Kalkhaushalt (Karbonat) abhängt, sowie die Zerstörung der Korallenriffe sind bereits im Gange. Betroffen sind damit auch alle Fressfeinde, die sich von diesen Organismen ernähren. In Laborstudien hat man die vielfältigen Wirkungen eines reduzierten Säurebindungsvermögens (Alkalinität) untersucht. Sie reichen von verminderter Fruchtbarkeit bei wirbellosen Tieren bis zur erhöhten Aufnahme von Schwermetallen durch Algen. Generell wird sich die Primärproduktion von Biomasse in den Ozeanen erhöhen, was das Ökosystem weitreichend und oft negativ verändern wird.

Der planetarische Belastungsgrenzwert ist im Grunde genommen unmittelbar an denjenigen der Klimaerwärmung respektive des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre gebunden. Man hat trotzdem einen eigenen Grenzwert für die Ozeanversauerung eingeführt. Er orientiert sich am Karbonatgehalt des Wassers als Grundlage für das Wachstum aller kalkhaltigen Organismen. Der Grenzwert soll 80 Prozent des vorindustriellen Sättigungswertes von Karbonat im Durchschnitt des Meeresswassers nicht unterschreiten. Mit 84 Prozent wurde 2015 dieser Grenzwert noch nicht ganz erreicht (Steffen et al 2015).

Der Welthandel trägt in gleichem Masse zur Versauerung der Ozeane bei wie zum Klimawandel, da die beiden Bereiche eng aneinandergeliegt sind. Alle anderen Belastungsarten der Ozeane sind durch das Konzept der planetarischen Belastungsgrenzen nicht abgedeckt. Dabei wird vor allem die Ölverschmutzung der Ozeane durch Lecks, Unfälle und Reinigungsarbeiten vom Welthandel verursacht.

8 Luftverschmutzung durch Aerosole

Unter den Aerosolen verstehen die Meteorologen feste und flüssige Schwebeteilchen in der Luft, die nicht aus Wasser bestehen. Aerosole sind nur in sehr grossen Konzentrationen sichtbar. Das Auftreten und die Konzentration sind sehr variabel. Die Aerosole verweilen meistens



nur Tage bis Wochen in der Atmosphäre. Ihre einzelnen Teilchen sind unvorstellbar klein. Der Durchmesser typischer Schwebeteilchen liegt im Bereich Mikrometer (μm bzw. ein Millionstel Meter) bis hin zu einigen Nanometern (nm bzw. ein Milliardstel Meter). Gemäss Messungen aus Deutschland fanden sich im Jahresdurchschnitt zu Beginn der 1990er Jahre Werte um 50 Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), während heute deutlich tiefere Jahresmittelwerte zwischen 15 und 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen werden, im ländlichen Raum weniger (Deutsches Umweltbundesamt 2018). Die Konzentration ist mindestens ebenso entscheidend für die Auswirkungen wie die Grössenverteilung der Partikel, die chemische Zusammensetzung und die Oberflächenstruktur der Teilchen.

Man unterscheidet zwischen den natürlichen und den vom Menschen verursachten Aerosolen (Boucher 2015). Der Feinstaub aus Dieselabgasen ist beispielsweise vom Menschen verursacht, der Saharastaub, der bei gewissen Wetterlagen in weite Gebiete Europas vordringt, ist ein Beispiel für natürliche Aerosole. Diese entstehen durch den Wind über Ozeanen und Wüsten. Die natürlichen »Stoffflüsse« gelten als 10 bis 100 Mal grösser als die vom Menschen verursachten Emissionen aus der Industrie oder durch Verbrennung von Holz und fossilen Brennstoffen. Aufgrund dieser Bedeutung der fossilen Brennstoffe ergibt sich auch ein Zusammenhang mit dem Welthandel, der jedoch kaum zu quantifizieren ist.

Eine Rolle spielen auch die sekundären Aerosole, die durch Kondensation gewisser Gase aus der Luft entstehen. Sie können aus dem Stoffwechsel der Biosphäre oder aus dem Auswurf von Vulkanen stammen. Zu den »künstlichen« Sekundäraerosolen gehören etwa Ammoniak, Schwefeldioxid und Stickoxide aus Brenn- und Treibstoffen sowie die flüchtigen Kohlenwasserstoffe aus Industrie, Verkehr und Verbrennung (Boucher 2015). Sie sind grundsätzlich gasförmig, kondensieren jedoch bei hohem Druck und tiefen Temperaturen zu festen Stoffen.

Die Aerosole befinden sich vorwiegend in den untersten 5 Kilometern der Atmosphäre und bestimmen das Klima massgebend. Unter anderem beeinflussen sie die Wolkenbildung, die Sonneneinstrahlung und die gesamte Luftzirkulation. Sie absorbieren das sichtbare Sonnenlicht und reflektieren es ins All zurück. Dies kühlt die Erdoberfläche, indem weniger Strahlung durch die Atmosphäre dringt. Durch die Absorption von Sonnenlicht verändern sich das Temperaturprofil der Atmosphäre, die relative Luftfeuchtigkeit und in der Folge die Wolkenbildung. Aerosole führen zu Wolken mit kleineren Wassertröpfchen. Das wiederum hat eine abkühlende Wirkung auf die Atmosphäre, da die Wolken mehr Sonnenlicht in die höheren Sphären reflektieren. Aerosole können aber



auch zu grösseren und dichteren Wolken mit Regen führen und die Bildung von Eispartikelwolken fördern. Werden Aerosole jedoch auf Schnee und Eis ausgewaschen und abgelagert, wird die Reflektion dieser Oberflächen reduziert, was einen erderwärmenden Effekt hat. Sie stehen auch in komplexer Wechselwirkung mit der pflanzlichen Oberfläche. Die Wechselwirkungen von Aerosolen mit der Atmosphäre sind ausserordentlich komplex. Empirisch ist jedoch erwiesen, dass vulkanische Aktivitäten, oberirdische Atombombentests oder grosse Waldbrände zu einer Absenkung der Erdtemperatur führen. Aus Gesundheitsgründen erwünschte sinkende Aerosolkonzentrationen in tieferen Schichten dürften hingegen die Erwärmung fördern. Trotz dieser entgegengesetzten Wirkungen geht man aber insgesamt davon aus, dass Aerosole eine kühlende Wirkung haben.

Der vom Menschen verursachte Feinstaub (PM) in Ballungsgebieten von Industrie und Verkehr zählt zu den gefährlichsten Luftschadstoffen für die Gesundheit, da die Staubteilchen vielfältige schädliche Wirkungen in den Atemwegen und im ganzen Blutkreislauf entfalten. Zahlreiche epidemiologische Studien in den USA haben ein erhöhtes Risiko von Herz-Kreislauf- und Atemweges-Erkrankungen sowie Lungenkrebs nachgewiesen (Rom 2012). Die WHO spricht für das Jahr 2016 von weltweit 4,2 Millionen vorzeitigen Todesfällen aufgrund der schlechten Luftqualität (WHO 2018). Feinstaub ist einer der wichtigsten Faktoren dieser Mortalität. Während in den USA und Teilen von Europa die Abgas- und Industrienormen zu einer deutlichen Verbesserung der Luft in Ballungsräumen geführt haben, ist die Situation vor allem in asiatischen Städten desaströs. Besonders gesundheitsschädigend sind sehr kleine Aerosole, da sie tiefer in die Lunge eindringen können.

Das Konzept der planetarischen Belastungsgrenzen operiert lediglich mit einem lokalen Wert der Trübungtiefe (AOD oder AOT), der nicht zu überschreiten ist. Er wurde aus einer Studie in Indien abgeleitet, wo erhöhte Aerosolwerte zur Unterdrückung des Monsuns und demzufolge zu mehr Trockenheit führen. Es handelt sich nach Angaben der Autoren um einen sehr unsicheren Wert (Steffen et al 2015). Anders als klimawirksame Gase, stellen Aerosole ein kleinräumig und relativ kurzfristig auftretendes Phänomen dar. Dieses lässt sich mit technischen Massnahmen und Normen politisch effizient bekämpfen – vorausgesetzt, es bestehen Rechtsstaaten, die entsprechende Gesetze durchsetzen können. Allerdings wird die in Zukunft erwartete Senkung der Aerosole in Asien zu einer Klimaerwärmung führen.



9 Ozonabbau in der Stratosphäre (Ozonloch)

Die Ozonschicht in der Stratosphäre, in etwa 15 bis 50 Kilometer Höhe, bildete sich während vieler Millionen Jahre. Das Ozon ist eine Art Supersauerstoff (O_3) und entsteht chemisch bei harter UV-Bestrahlung aus dem Kosmos aus Sauerstoff. Es ist eine Art Sonnenbrille der Erde, eine etwa 30 Kilometer dicke Schicht, welche die UV-Strahlen zum grossen Teil herausfiltert. Chemisch ist es dasselbe Ozon, das aus Sonnenlicht, Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen vor allem an heissen Tagen am Rande von Ballungszentren bodennah in der Troposphäre gebildet wird und sich negativ auf die Atemwege auswirkt. Die Bedeutung des stratosphärischen Ozons für das Leben auf der Erde wurde im 19. Jahrhundert entdeckt. Die Ozonschicht filtert die ultravioletten Strahlen der Sonne. Diese schädigen unter anderem die Vegetation und die Haut des Menschen, indem sie beispielsweise Krebs verursachen.

Mitte der 1970er Jahre haben zwei amerikanische Wissenschaftler die Hypothese aufgestellt, dass die in den Spraydosen verwendeten Gase die Ozonschicht in der Stratosphäre schädigten. Diese Hypothese entstand am Schreibtisch ohne jegliche Messung. Sie postulierten, dass diese Gase ausserordentlich stabil seien und durch die Troposphäre diffundierten, dann in der Stratosphäre durch UV-Licht zersetzt würden und Chlor freisetzen. Dieses Chlor (und das verwandte Brom) seien für die Zerstörung der Ozonschicht verantwortlich, wodurch mehr UV-Strahlen die Erde erreichten. 1985 stellten britische Wissenschaftler dann anhand von Messungen fest, dass dieser Mechanismus die Ozonschicht innerhalb von kürzester Zeit um 30 bis 40 Prozent abbaute. Das wirkte sich hauptsächlich auf der Südhalbkugel der Erde aus, wo man zum Beispiel in Australien die Bademode auf den UV-Schutz der Haut ausrichten musste. Auf der Nordhalbkugel wurde die zusätzliche UV-Strahlung wiederum durch die Luftverschmutzung (vgl. Aerosole) in der Troposphäre, also der untersten Schicht der Atmosphäre, absorbiert.

Komplizierte, chemisch-physikalische Prozesse führen dazu, dass die sogenannten Ozonlöcher jeweils im Winter über der Arktis respektive Antarktis entstehen. Es handelt sich im Grunde genommen nicht um Löcher, sondern um abnehmende Konzentrationen von Ozon in der untersten Schicht der über der Troposphäre liegenden Stratosphäre (Hewitt und Sturges 2013). Die wichtigsten, für den Abbau der Ozonschicht verantwortlichen Stoffgruppen wurden rasch identifiziert: Es handelt sich um die flüchtigen voll- und teilhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW). Sie wurden im Rahmen des Montrealer Protokolls (1987) und den folgenden internationalen Vereinbarungen wesentlich eingeschränkt oder verboten. In der Folge wurden sie durch an-



dere Substanzen ersetzt. Einige Alternativen zu den FCKW-basierten Treibgasen sind allerdings auch nicht unproblematisch, da sie den Treibhauseffekt fördern können.

Die FCKW wurden als Spraydosentreibgase, als Kühlmittel in Kühlschränken und Klimaanlage, als Wärmeträgerflüssigkeit in Wärmepumpen, als Treibgase in Kunststoffschäumen, als Mittel für die chemische Reinigung und Entfettung in der Industrie und als Feuerlöschflüssigkeiten verwendet. Es sind weltweit gehandelte Chemikalien. Die natürlichen teilhalogenierten Kohlenwasserstoffe, die hauptsächlich im Meer gebildet werden, spielen beim Ozonabbau eine marginale Rolle (Seinfeld und Pandis 2016). Die Probleme sind fast ausschliesslich vom Menschen verursacht. 2010 ist auch die Produktion der vollhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe auf der Welt – offenbar ausser in China (natureschutz.ch 2019) – eingestellt worden. Die Produktion und der Verbrauch teilhalogenerter Fluorkohlenwasserstoffe sind in Europa und in den USA schon seit längerem verboten. Im Jahr 2040 soll die weltweite Produktion ganz eingestellt werden (Abbasi und Abbasi 2017). Die teilhalogenierten Gase haben eine deutlich geringere Wirkung als die vollhalogenierten.

Heute stellt man sich vor allem die Frage, ob und wann die stratosphärische Ozonschicht wieder vollständig hergestellt sein wird. Die Wirkung des Montrealer Protokolls wurde bereits festgestellt. Die Konzentration von Stoffen, die die Ozonschicht abbauen, nimmt ab und die Konzentration des Ozons in der Stratosphäre zu. Auch auf der Messstation in Arosa, die bereits 1927 mit der Beobachtung der Ozonschicht begann, hat man festgestellt, dass sich die heikle Ozonschicht erholen könnte (Stahellin et al 2017). Eine Trendwende ist also geschafft, und man ist versucht zu sagen, der Schutz der Ozonschicht sei eine Erfolgsgeschichte internationaler Umweltschutzabkommen. Es bleiben allerdings doch einige Fragen offen. Vor allem sind die Interaktionen zwischen Ozonschicht und Erderwärmung noch nicht hinreichend geklärt. Eine Erwärmung der Troposphäre könnte einen Einfluss auf die Stratosphäre haben – mit unvorhersehbaren Risiken für das Leben auf dem Globus.

Literatur

Die AutorInnen danken Ueli Kasser für viele wertvolle Hinweise.

Abbasi, S.A.; Abbasi, T.: Ozone Hole – Past, Presence, Future. Springer Briefs in Environmental Science, New York, 2017.

Australian Government, Great Barrier Reef Authority: Coral Bleaching and the Great Barrier Reef. <http://elibrary.gbrmpa.gov.au/jspui/bitstream/11017/691/1/coral-bleaching-and-the-GBR.pdf>.

Blume J. (2015): Verkehr verursacht fast ein Viertel der weltweiten CO₂-Emissionen.



- www.heise.de/tp/features/Verkehr-verursacht-fast-ein-Viertel-der-weltweiten-CO2-Emissionen-3376825.html. Abgerufen 19.5.19.
- Boucher O.: Atmospheric Aerosols – Properties and Climate Impact. Springer Netherlands, 2015.
- Brot für alle (2018): Land-Grabbing. <https://brotfueralle.ch/thema/land-grabbing/1-2-18>.
- Bundesverband Boden: Tropische Böden. www.bodenwelten.de/content/tropische-boeden, 26.4.19.
- Conservation international: Targeted investment in nature's most important places. www.conservation.org/priorities/biodiversity-hotspots, 24.4.19.
- Crookes, Sir W.: The Wheat Problem. Longmans, Green and Co., London, New York, Bombay and Calcutta, 1917. Zitiert in <https://de.wikipedia.org/wiki/Haber-Bosch-Verfahren>.
- Da Silva, J. G.: Healthy soils are essential to achieve Zero Hunger, peace and prosperity. www.fao.org/news/story/en/item/1148732/icode/, 15.8.18.
- Deutsches Bundesumweltamt: Feinstaubkonzentrationen in Deutschland. www.umwelt.bundesamt.de/daten/luft/feinstaub-belastung#textpart-1, 12.9.2018.
- Dytrich, B.: Hier fällen statt anderswo plündern. WOZ Nr. 15, 11.4.19.
- Eisler R.: Oceanic Acidification – A comprehensive Overview. CRC Press New York, 2012.
- Faszination Regenwald (2019a): Die Vielfalt in tropischen Regenwäldern. www.faszination-regenwald.de/info-center/vielfalt/index.htm, 24.4.19.
- Faszination Regenwald (2019b): Wie viel Regenwald geht verloren? www.faszination-regenwald.de/info-center/zerstoerung/flaechenverluste.htm, 19.5.19.
- FAZ: Eine Million Tier- und Pflanzenarten vom Aussterben bedroht. www.faz.net/aktuell/wissen/erde-klima/artensterben-wissenschaftler-des-ipbes-schlagen-alarm-16173097.html, 6.5.19.
- Fenning, T.: Introduction. In: Fenning, T. (Ed.): Challenges and Opportunities for the World's Forests in the 21th Century. Springer Science + Business Media, Dordrecht, 2014.
- Gattuso, J.-P.; Hansson L.: Ocean Acidification. Oxford University Press, Oxford, 2011.
- Hallé, F.: Über das Geheimnis der Bäume und eine Reise in die Tiefen des tropischen Regenwaldes. Pressemitteilung des Helmholtzzentrums für Umweltforschung UFZ, 23. Januar 2019. www.ufz.de/index.php?de=36336&webc_pm=3/2019.
- Handke, I.; McARDell, C.; Singer, H.P.; Brennwald M.: Arzneimittel und Pestizide im Grundwasser. Sonderdruck Nr. 1501 aus gwa 3/2007, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich.
- Hauenstein, P. Vereinigung Schweizer Nachrichtensoffiziere: Rohstoffe. Der Phosphatbedarf der Welt wird zukünftig die Nachrichten dominieren wie Erdöl heute. www.swissint.ch/?p=304, 7.4.2014.
- Heinimann, A. in: Tagesgespräch, Radio SRF 1, 6.5.19.
- Hewitt, C.N.; Sturges, W. T. (2013): Global Atmospheric Chemical Change. Elsevier Applied Science, Essex, 2013.
- Hoekstra, A.Y.; Mekonnen, M.M.: The water footprint of humanity. 3232–3237. PNAS, February 28, 2012, vol. 109, no.9. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1109936109.
- IAASTD International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (Weltagrarrat): Weltagrarratbericht. Meat and Animal Feed. www.globalagriculture.org/report-topics/meat-and-animal-feed.html, 15.8.18.
- Martin, C.: Endspiel. Wie wir das Schicksal der tropischen Regenwälder noch wenden können. Oekom Verlag, München, 2015.
- Mauthe, M., Greenpeace international: Eye on the taiga, 2017. www.greenpeace.org/international/publication/7355/eye-on-the-taiga.
- Mekonnen, M. M.; Hoekstra, A. Y.: The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Hydrology and Earth System Science, 15/2011, 1577–1600. www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/1577/2011/ doi:10.5194/hess-15-1577-2011.
- Naturschutz.ch, Redaktion: Woher kommen die verbotenen FCKW-Emissionen? <http://naturschutz.ch/news/woher-kommen-die-verbotenen-fckw-emissionen/133439>, 2019.
- Peters, G.P.; Minx, J.C.; Weber, C. L.; Edenhofer, O.: Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. PNAS, May 24, 2011, vol. 108, no. 21, 8903–8908, 8904. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1006388108.
- Proplanta: Übernutzung gefährdet die biologische Vielfalt der Meere. www.proplanta.de/Agr



- ar-Nachrichten/Umwelt/BfN-Uebernutzung-gefaehrdet-die-biologische-Vielfalt-der-Meere_article1236880504.html, 15.8.18.
- Pro Regenwald e.V.: Fleisch ist ein Stück Lebenskraft. www.pro-regenwald.de/hg_fleisch, 19.5.19
- Rettet den Regenwald: www.regenwald.org, 2018, 2019
- Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, A.; Folke, C.; Nykvist, B.; Sörlin, S.; Constanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Walker, B.: A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 2009:472–475.
- Rom, W. N.: Environmental Policy and Public Health – Air pollution, Global Climate Change and Wilderness. Jon Wiley and Sons Inc., San Francisco, 2012. [www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- Scholes, R.J.; Biggs, R.: A biodiversity intactness index. *Nature* 434(7029):45–9 April 2005. DOI: 10.1038/nature03289.
- Seinfeld, J. H.; Pandis, S.N.: Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change. John Wiley and Sons, New Jersey, Canada, 2016.
- Soentgen, G.E.: Stickstoff – ein Element schreibt Weltgeschichte. Oekom Verlag, München, 2015.
- Spiegel, nck/AFP: Welthandel wird sich laut Studie bis 2030 vervierfachen. www.spiegel.de/wirtschaft/welthandel-wird-sich-laut-studie-bis-2030-vervierfachen-a-926608.html, 8.10.2013.
- Staehelin, J.; Viatta, P.; Stübi, R.; Tummon, F.; Pete, T.: Stratospheric ozone measurements at Arosa (Switzerland): history and scientific relevance. *Atmospheric Chemistry and Physics* 18(9). Statista 2018. www.atmos-chem-phys.net/18/6567/2018/.
- Steffen, W.; Richardson, K.; Rockström, J.; Cornell, S.; Fetzer, I.; Bennett, E.M.; Biggs, R.; Carpenter, S. R.; de Vries, W.; de Wit, C. A.; Folke, C.; Gerten, D.; Heinke, J.; Mace, G. M.; Persson, L. M.; Ramanathan, V.; Reyers, B.; Sörlin, S.: Planetary Boundaries. Guiding human development on a changing planet. *Science* 13 Feb 2015, Vol. 347, Issue 6223, 1259855. Science (Express, online). DOI: 10.1126/science.1259855. www.pik-potsdam.de/aktuelle_s/pressemitteilungen/vier-von-neun-planetaren-grenzen201d-bereits-ueberschritten.
- Steingobe, B.: Ressource Phosphat langfristig nutzen. Departement für Nutzpflanzenwissenschaften, Würzburg (D), April 2013.
- Sutton, M. A.; Bleeker, A.; Howard, C. M.; Bekunda, M.; Grizzetti, B.; de Vries, W.; van Grinsven, H. J. M.; Abrol, Y. P.; Adhya, T. K.; Billen, G.; Davidson, E. A.; Datta, A.; Diaz, R.; Erisman, J. W.; Liu, X. J.; Oenema, O.; Palm, C.; Raghuram, N.; Reis, S.; Scholz, R. W.; Sims, T.; Westhoek, H.; Zhang F. S. L.: Our Nutrient World – The challenge to produce more food and energy with less pollution. Global nitrogen and phosphorous pollution. Centre of Ecology and Hydrology(CEH), Edinburgh, 2013.
- UNFCC, UNO: Submission from Parties on Proposed Forest Reference Emission Levels and/or Forest Reference Levels for the Implementation of the Activities Referred to in Decision. 1/CP.16, paragraph 70. <http://unfccc.int/methods/redd/items/8414.php>, 13 Jan. 2015.
- United Nations: The Millennium Development Goals Report 2015, New York, 2015. Goal 7: Ensure Environmental sustainability. [www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG Prozent202015 Prozent20rev Prozent20 Prozent28July Prozent201 Prozent29.pdf](http://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%20Prozent202015%20Prozent20rev%20Prozent20Prozent28July%20Prozent201%20Prozent29.pdf).
- VFA: Die forschenden Pharma-Unternehmen. Gewässerschutz, Berlin, 18.3.2019. www.vfa.de/de/wirtschaft-politik/arzneistoffe-im-wasser.html.
- Weis, J. S. (2014): Marine Pollution – What everyone needs to know. Oxford University Press, Oxford, 2014.
- WHO: Ambient (outdoor) air quality and health, 2018. [www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, Globale Umweltveränderungen (2019): Welt im Wandel. <https://www.wbgu.de/de/>, 19.5.2019.
- Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt, Energie (Hrsg.): Fair Future. Begrenzte Ressourcen und globale Gerechtigkeit. C. H. Beck München, 2006.
- WWF Deutschland: Wälder und Klimaschutz. www.wwf.de/themen-projekte/waelder/wald-und-klima, 17.4.2019.