



Die Waschküche der Welt

Der Amazonas treibt den globalen Luftkreislauf an, reinigt die Atmosphäre und speichert in großem Stil Wasser. Das sind nur drei Gründe, warum die MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT in MANAUS, mitten im Amazonasgebiet, eine Außenstelle betreibt. Für MEINRAT O. ANDREAE sind das aber auch Gründe, warum alle Staaten der Erde in den Schutz des globalen Dienstleisters Amazonas investieren sollten. Die wirtschaftliche Entwicklung dieser Region müsste das nicht einmal hemmen.

Mine erste Begegnung mit Amazonien – im Jahr 1985 – war der Blick aus dem Fenster eines Forschungsflugzeugs. Ein Blick, der einige Stunden dauerte: Wald, Wolken, Wasser, Wald... Doch der Vergleich mit der Karte zeigte, dass der Flug nur einen kleinen Teil des gewaltigen Ökosystems Amazonas überquerte. Das Amazonasbecken ist 17-mal so groß wie Deutschland; ganz Europa von Polen bis Portugal ließe sich problemlos hineinlegen. Bei dem langen Flug über den tropischen Regenwald drängen sich zwei Gedanken auf. Ein so riesiges Gebiet, das so viel Leben enthält, muss eine Schlüsselrolle im Erdsystem spielen. Und: Das hier ist so gewaltig, das kann der Mensch gar nicht kaputt machen.

Wer aber weiter fliegt, etwa von Manaus nach Südwesten, in Richtung des brasilianischen Bundesstaats Rondônia und dann über die Grenze nach Bolivien, erkennt schnell, dass zumindest der zweite Gedanke falsch war. Denn statt Wald und Wolken zeigen sich dichte Rauchschleier über Weideland und Sojafeldern, wo noch vor wenigen Jahren Tropenwald stand. Seit den 1960er-Jahren wurden rund 16 Prozent des Amazonasgebiets entwaldet, Straßen gebaut, Menschen angesiedelt – mit noch immer steigender Tendenz. Läuft alles so weiter, wird bis zur Mitte dieses Jahrhunderts schätzungsweise

die Hälfte des Walds verschwunden sein. Im Ostteil des Amazonasbeckens ist der Wald bis auf wenige Reservate durch Savannen und landwirtschaftliche Flächen ersetzt worden. Lediglich im äußerst regnerischen und schwer zugänglichen Nordwesten blieben noch wirklich große Waldregionen erhalten. Aber noch mal: Was ist dabei das Problem? Weshalb brauchen wir das Amazonasgebiet?

Der Planet Erde – ein unteilbarer Lebensraum

Um das zu beantworten, verwende ich gern das Bild vom „Raumschiff Erde“. Denn dieses Bild vermittelt die Einsicht, dass die Menschheit auf einem unteilbaren Planeten siedelt und vom ungestörten Funktionieren und Zusammenwirken der Baukomponenten dieses Himmelskörpers abhängt. Der Mensch ist mit allem Leben Teil des Erdsystems. Welche Rolle spielen also die feuchten Tropen im Allgemeinen und der Amazonaswald im Besonderen, als Lebensversorgungssysteme des Raumschiffs Erde? Ich will mich hier auf vier Funktionen konzentrieren: Heizkessel, Wasserwerk, Waschküche und Bibliothek. Es wird sich erweisen, dass alle diese Funktionen eng miteinander verknüpft sind und keine ohne die anderen voll bestehen kann.

FOTO: DEHIS SEA

Das Klimasystem hat vieles mit einer Dampflok gemein. An einer Stelle wird erhitzt, an einer anderen gekühlt – und der so erzeugte Wärmegradient schafft Bewegung. Die Erde wird, vereinfacht gesagt, in den Tropen von der Sonne erhitzt, in den hohen Breiten aber durch Abstrahlung in den Weltraum gekühlt. Die Bewegungen der Atmosphäre und der Ozeane transportieren Wärme und sorgen für eine ausgeglichene Energiebilanz. Und wie bei der Dampflok geschieht die Umwandlung von Wärme in Bewegung wesentlich durch Verdampfen von Wasser und durch Kondensation von Wasserdampf.

Das Amazonasbecken verkörpert nun, neben dem Kongo und dem Meereskontinent um Indonesien, einen der Heizkessel, die der Atmosphäre Dampf und Energie zuführen. Wenn warme Luft und Wasserdampf aufsteigen und sich dabei abkühlen, entstehen Wolken, die dann weiteren Auftrieb erzeugen. Dieser Auftrieb rund um den Tropengürtel treibt die großräumige Zirkulation der Atmosphäre an. Und dadurch entsteht all das, was weltweit unter Wetter und Klima spürbar wird.

Ersetzen wir den Tropenwald durch Gras- oder gar Ödland, so ändert sich die Energiebilanz. Denn Gras oder nackter Boden erscheinen heller als Regenwald und absorbieren deshalb weniger Sonnenwärme – so wie sich auch ein helles Auto weniger erwärmt als ein dunkles. Zudem verdunstet die verringerte Vegetation auch weniger Wasser, und deshalb muss mehr von der absorbierten Sonnenenergie als heiße Luft statt als Wasserdampf abgeführt werden. Diesen Unterschied kennt jeder, der schon einmal in einem Entwaldungsgebiet gearbeitet hat. Im Regenwald ist es feuchter, aber bei Weitem nicht so heiß wie auf dem benachbarten Weideland.

Ohne Wald wird Wasser knapp

Entwaldung ändert also das regionale Klima – es wird eher heiß und trocken statt feucht und, nun ja, relativ kühl. Aufgrund der veränderten Energiebilanz führt eine großskalige Erwärmung aber auch zu globalen Störungen des Energiehaushalts der Atmosphäre, deren Auswirkungen wir in ihrer ganzen Konsequenz noch nicht wirklich verstehen: Sie vorherzusagen ist deshalb so schwierig, weil Temperatur, Niederschlag, Vegetationsbedeckung, Strahlungshaushalt und Wasserkreislauf eng miteinander verflochten und die vielfältigen Rückkopplungen innerhalb dieses Wirkungsgefüges noch sehr unzureichend erforscht sind.

Wenden wir uns der zweiten Funktion zu, dem Wasserwerk. Wie eben beschrieben, beruht die Dampfkesselfunktion der Tropen darauf, dass Wasser verdunstet und,

wie in der Dampflok, bei seiner Kondensation wieder Energie freigibt. Das kondensierte Wasser selbst fällt dann als Regen. Jedes Wassermolekül, das vom Atlantik her in das Amazonasbecken getragen wird, durchläuft diesen Kreislauf etwa fünfmal, ehe es das Becken wieder verlässt. Deshalb verweilt es auch eine relativ lange Zeit im Regenwaldsystem und steht immer wieder für die Lebensprozesse der Pflanzen zur Verfügung. Der Regenwald verfügt also im gewissen Sinn über die Fähigkeit, seine eigene Wasserversorgung zu optimieren. Da Wasserverfügbarkeit und pflanzliche Photosynthese eng aneinander gekoppelt sind, vermag dieses System außerdem große Mengen an Kohlenstoff aus der Atmosphäre aufzunehmen und zu speichern. Gegenwärtig stecken in der lebenden oberirdischen Biomasse ungefähr 93 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, etwa ein Fünftel der weltweiten Landbiosphäre.

Entfernen wir, zumindest in Gedanken, größere Teile des Waldes, so ändern sich alle Komponenten des Wasserkreislaufs: Die Verdampfung verringert sich, das Wasser fließt rascher über die Flüsse ab, und damit verbleibt weniger Wasser im System. Andererseits ändert sich die Dynamik der atmosphärischen Konvektion, also des vertikalen, durch Wärme getriebenen Aufstiegs von Luft und Wasserdampf, der für die Bildung von Wolken und Niederschlag verantwortlich ist. Globale Klimamodelle sagen vorher, dass eine totale Entwaldung des Amazonas eine Reduktion des regionalen Niederschlags um etwa ein Viertel zur Folge hätte. Leider sind diese Modelle aber für konkrete Voraussagen wenig brauchbar: Sie sind zu grob skaliert, um eine realitätsnahe partielle Entwaldung und die Rückkopplungen zwischen Vegetation und Wasserkreislauf adäquat zu berücksichtigen.

Für Pflanzen wie für Menschen kommt es auch nicht allein darauf an, wie viel es regnet, sondern wie viel von den Niederschlägen zur Verfügung bleibt. Läuft Wasser auf vegetationsarmen Böden schnell ab oder verdunstet es umgehend aufgrund eines wärmeren Klimas, kann sogar bei erhöhtem Niederschlag die Wasserverfügbarkeit sinken. Das wiederum verringert die Fruchtbarkeit und im Extremfall kippt regional die Wald- in eine Steppenvegetation. Diese Entwicklung begünstigen noch Feuer, die einen Teufelskreis schließen: In Jahren geringeren Niederschlags – etwa während eines El Niño – werden Teile des Tropenwalds leichter entzündbar. Kommt es dann aufgrund erhöhter menschlicher Aktivitäten öfter zu Bränden, breiten sich die Feuer im Wald aus.

Dabei stirbt der Wald zunächst nicht, doch wird er geöffnet und kann dadurch weniger Wasser zurückhalten. Beim nächsten Zyklus ist er trockener und noch anfälliger für einen Waldbrand. Nach zwei oder drei solcher

Zyklen ist der Wald zerstört, wandelt sich in eine Savannenlandschaft um und kann sich langfristig kaum regenerieren. Schon eine leichte Landnutzung durch Straßen oder selektive Holzwirtschaft kann so im Zusammenwirken mit Feuer und Klimazyklen zur Entwaldung führen.

Aus chemischer Sicht bilden die Tropen so etwas wie die Waschküche der Atmosphäre. Mensch und Natur pumpen Tag für Tag gewaltige Mengen an Stoffen in die irdische Lufthülle. Die Nutzung fossiler Brennstoffe in Kraftwerken und Automobilen setzt Milliarden Tonnen von Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid (CO_2) frei, dazu Millionen Tonnen von Stickoxiden (NO_x). Die Emissionen natürlicher Kohlenwasserstoffe, die insbesondere von Pflanzen stammen, liegen ebenfalls in der Größenordnung von mehreren Milliarden Tonnen pro Jahr. Würden diese Substanzen nicht ständig wieder aus der Atmosphäre entfernt, wären wir in kurzer Zeit von einer erstickenenden Wolke aus Spurengasen umgeben.

Die meisten dieser Gase sind schlecht wasserlöslich und werden deshalb kaum vom Regen ausgewaschen. Die Selbstreinigung der Atmosphäre erfordert also chemische Reaktionen, um die Spurenstoffe in wasserlösliche Form zu bringen. Diese Reaktionsketten beginnen normalerweise mit einem ersten Oxidationsgeschritt, bei dem das Spurengas von einem reaktionsfreudigen Molekül wie Ozon (O_3) oder dem Hydroxylradikal (OH) angegriffen wird. Um diese Waschmittel der Atmosphäre zu erzeugen, sind UV-Strahlung und Wasserdampf erforderlich – und beides ist in den Tropen in reichlichem Maße verfügbar. Darum überrascht es nicht, dass der Großteil der Entsorgung der Atmosphäre in den Tropen stattfindet. Lange Zeit galt, dass diese Oxidationsreaktionen hauptsächlich in der mittleren Troposphäre ablaufen, da sie von den Kohlenwasserstoffen aus dem Regenwald unterdrückt würden. Doch jüngste Messungen des Max-Planck-Instituts für Chemie deuten darauf hin, dass chemische Kettenreaktionen direkt über dem Regenwald das „Waschmittel“ OH regenerieren und zu einer effektiven Selbstreinigung der Atmosphäre beitragen.

Stört der Mensch den atmosphärischen Reinigungsmechanismus, etwa durch zusätzliche Emissionen von Stickoxiden aus Industrialisierung und Brandrodung, so kann sich die Waschküche in eine Hexenküche verwandeln: Es entsteht photochemischer Smog mit hohen Konzentrationen von Ozon und anderen Luftschadstoffen sowie großen Mengen von Feinstaub-Aerosolen – die wiederum die Bildung von Wolken und Niederschlag beeinflussen und damit den Wasserkreislauf verändern. Jenes atmosphärische Spurengas allerdings, das derzeit die



größten Sorgen bereitet – nämlich Kohlendioxid – kann mit keinem Atmosphärenwaschmittel entsorgt werden. Was von diesem Gas nicht im Ozean gelöst oder in der Landbiosphäre gebunden wird, muss in der Atmosphäre bleiben,

die den Planeten wie eine wärmende Decke umhüllt. Ein wirksamer Klimaschutz setzt deshalb den Schutz der Landbiosphäre voraus, in der etwa dreifach mehr Kohlenstoff gespeichert ist, als die Atmosphäre enthält. Doch statt diesen Speicher zu pflegen, wird an ihm Raubbau betrieben: Die Entwaldung trägt derzeit etwa ein Fünftel zum globalen Kohlenstoffeintrag in die Atmosphäre bei – wovon etwa die Hälfte auf Südamerika und dort vor allem auf das Amazonasbecken entfällt.

Es gilt die Vielfalt zu bewahren

Hier wäre also ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz zu erreichen. Andererseits, falls nicht rasch genug gehandelt wird, könnte die Eigendynamik des Systems uns das Heft aus der Hand reißen: Manche gekoppelte Klima-Vegetations-Modelle sagen vorher, dass die globale Erwärmung das Ökosystem des Regenwalds destabilisiert und es zu einem Umkippen in Richtung Savanne treiben kann. Das dabei freigesetzte Kohlendioxid führt dann zu weiterer Erwärmung.

Zuletzt zur Funktion als Bibliothek: Jeder Hektar Regenwald birgt um die hundert Baumarten! Insgesamt sollen in Amazonien etwa 6000 Baumarten geben – im Vergleich zu etwa 50 in Europa. Im Amazonasbecken wurden etwa 2500 Arten von Vögeln und Säugetieren sowie viele zehntausend Pflanzenarten wissenschaftlich beschrieben. Die Anzahl der wirbellosen Tiere geht in die Hunderttausende, die der Insektenarten in die Millionen. Insgesamt leben etwa 17 Prozent aller Organismenarten der Erde in Amazonien. Davon sind die allermeisten noch nicht wissenschaftlich beschrieben und werden es vielleicht niemals werden. Die Vielfalt der Arten im Amazonasbecken steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Vielfalt an Lebensräumen und ist daher von jeder Form der Nutzung bedroht, die mit der Zerstörung von Habitaten einhergeht, also insbesondere mit Rodung und Entwaldung. Die genetischen Informationen, die in diesen Ökosystemen und ihrer Biodiversität gespeichert sind, lassen sich kaum ermessen und können von großer wirtschaftlicher Bedeutung sein.

Das Leben der Pflanzen besteht in einem immerwährenden Abwehrkampf gegen Fresser und Krankheitserreger. Da sie weder davonlaufen noch zurückbeiben können, haben Pflanzen die chemische Kriegsführung



perfektioniert und ein gewaltiges Arsenal an Verteidigungsstoffen entwickelt, die auch der Mensch als Heilmittel einsetzen kann: Eine Vielzahl unserer Arzneien basiert auf Pflanzenstoffen und noch sehr viel mehr dürften in den Pflanzen des Amazonasgebiets verborgen sein. Nicht ohne Grund fürchten die Länder des Amazonasbeckens die „Biopiraterie“, das heißt das unerlaubte Prospektieren und den Diebstahl genetischer Schätze.

Aus ethischer Perspektive erscheint mir die Brandrodung in Amazonien wie Brandstiftung in einer Bibliothek voller Unikate: Einmal verbrannt, gehen die endemischen Arten Amazoniens für immer verloren – verbrannte Blätter, herausgerissen aus dem Buch der Evolution.

Für die Welt stellt Amazonien also eine Vielzahl an *ecosystem goods and services* zur Verfügung; es wirkt als eine Art globaler Dienstleister an der Regulierung des Klimasystems und des Wasserkreislaufs mit, trägt zur Reinhaltung der Atmosphäre bei, speichert Kohlenstoff und birgt ein riesiges Archiv an genetischer Information. So weit der Blick von außen. Für die Menschen des Amazonasgebiets sieht die Sache etwas anders aus. Sie erwarten von der Region dasselbe wie wir von unserem Land – sie soll ihnen als Wirtschaftsgrundlage und für ihre Ernährung dienen. Allein im brasilianischen Amazonasbecken wuchs die Bevölkerung von etwa fünf Millionen im Jahr 1960 auf heute mehr als 20 Millionen. Die meisten dieser Menschen sind arm und leben von weniger, als wir es uns vorstellen können. Und hier liegt die eigentliche Herausforderung für die Zukunft Amazoniens: Wie lassen sich die ökonomischen Interessen der Bewohner Amazoniens befriedigen und gleichzeitig die globalen Dienstleistungen im Sinne der *ecosystem goods and services* bewahren?

Was ist uns Amazonien wert?

Der klassische Ansatz zur Landnutzung in Amazonien wird in brasilianischen Bundesstaaten wie Mato Grosso am Südrand des Beckens verfolgt: massive Entwaldung und extensive Weide- und Landwirtschaft, in jüngster Zeit auch vermehrt intensiver Anbau, insbesondere von Sojabohnen. Das zerstört zum einen den Tropenwald und seine Ressourcen, zum andern dient es der Produktion von Massengütern mit relativ geringer Wertschöpfung – die zudem überwiegend der reichen Klasse nützt. Eine Alternative kommt jetzt vom Staat Amazonas, gelegen im Zentrum des Amazonasbeckens, der voller Widersprüche steckt: Er weist das höchste Wirtschaftswachstum Brasili-

ens auf (fast 14 Prozent im Jahr 2004), zugleich aber die geringste Entwaldung von nur zwei Prozent.

Amazonas ist ein gewaltiger Flächenstaat, in dem städtische Bevölkerungsformen dominieren und dessen wirtschaftliche Produktion fast ausschließlich aus einer Stadt stammt, aus Manaus. Gerade darin sieht die Regierung von Amazonas unter dem Gouverneur Eduardo Braga eine Chance: Sie schlägt vor, die Entwicklung von Manaus als Hightech-Zentrum weiterzuführen und hier Güter mit hohem Mehrwert und relativ geringem Ressourceneinsatz zu produzieren, gleichzeitig aber das Hinterland bei niedriger Bevölkerungsdichte sehr schonend und nachhaltig zu nutzen. Eine zentrale Rolle sollen dabei der Schutz der Urbevölkerung des Amazonas sowie die Erhaltung der Natur und damit der *ecosystem goods and services* spielen.

Der Minister für Umwelt und nachhaltige Entwicklung von Amazonas, Virgilio Viana, präsentierte diese Vision anlässlich eines Besuchs von Bundespräsident Horst Köhler in Manaus, bei dem auch die Vertreter der Max-Planck-Gesellschaft anwesend waren. Und er kam dabei auch auf eine nahe liegende und berechtigte Frage zu sprechen: Wenn Amazonas der Welt die Dienstleistungen seines Waldes zur Verfügung stellt – was und wie will die Welt dafür bezahlen? Noch fehlen wirtschaftliche, politische und juristische Modelle für ein solches Geschäft. Was ist uns Amazonien wert? Bestimmt allerhand, sonst würden wir uns diese Gedanken nicht machen. Aber wie viel wären wir bereit zu bezahlen? Wo ist der Markt, auf dem diese Dienstleistungen gehandelt werden könnten? Kohlenstoffkredite unter Klimaschutzverträgen bieten dafür ein Beispiel, wenn auch ein nicht unbedingt überzeugendes.

Der Amazonas fasziniert als wissenschaftliche wie als politische Herausforderung. Er lehrt uns, wie eng die Komponenten des Erdsystems miteinander verwoben sind, wie sich Biosphäre, Klima, Kohlenstoff- und Wasserkreislauf wechselseitig beeinflussen. Das waren die Fragen, die uns zuerst dorthin führten. Zugleich macht der Amazonas deutlich, wie sehr der Mensch auf ein intaktes Erdsystem angewiesen ist – und wie leicht dies zerstört werden kann. Und daraus erwächst eine große Herausforderung an Human- und Naturwissenschaften: Sie müssen gemeinsam Konzepte entwickeln, die eine nachhaltige Entwicklung dieser Region ermöglichen und sichern.

Meinrat O. Andreae leitet als Direktor am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz die Abteilung für Biogeochemie und erforscht unter anderem das Zusammenspiel von Biosphäre und Atmosphäre.