

# Mit Vegetation und Böden die kleinen Wasserkreisläufe stärken und das Klima kühlen

von Stefan Schwarzer

## Die UNEP Foresight Briefs

Die Foresight Briefs werden vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen veröffentlicht, um einen Brennpunkt der Umweltveränderung hervorzuheben, ein neues wissenschaftliches Thema vorzustellen oder ein aktuelles Umweltproblem zu diskutieren. Die Öffentlichkeit erhält so die Möglichkeit, sich über die Veränderungen in ihrer Umwelt und die Folgen alltäglicher Entscheidungen zu informieren und über die künftige Ausrichtung der Politik nachzudenken. Die 25. Ausgabe verbessert unser Verständnis der verflochtenen Beziehungen und der daraus resultierenden Energieflüsse zwischen Pflanzen, Böden und Wasser auf dem Boden sowie in und mit der Atmosphäre. Sie erklärt, wie diese dazu beitragen können, den Klimawandel abzuschwächen und gleichzeitig ein widerstandsfähiges Ökosystem zu gestalten.

## Zusammenfassung

Die fortschreitende Zerstörung der Wälder, die Verschlechterung der Böden, der daraus resultierende Verlust der terrestrischen Wasserspeicherung und die Verringerung der Wasser-rückhaltung in der Landschaft stören die Bewegung des Wassers in und durch die Atmosphäre. Diese Störungen führen zu erheblichen Verschiebungen der Niederschlagsverteilungen, die in vielen Gebieten der Welt zu weniger Regenfällen und mehr Dürren, einem Anstieg der regionalen Temperaturen und einer Verschärfung des Klimawandels führen könnten. Diese Veränderungen betreffen das regionale Klima, können sich aber auch auf weit entfernte Regionen auswirken. Das Verständnis der verflochtenen Beziehungen und der daraus resultierenden Energieflüsse zwischen Pflanzen, Böden und Wasser auf dem Boden sowie in der Atmosphäre kann dazu beitragen, den Klimawandel abzuschwächen und widerstandsfähigere Ökosysteme zu schaffen.

## Einführung

Die Vegetation spielt eine wichtige - und oft vernachlässigte - Rolle bei der Regulierung des Klimas. Stellen Sie sich den Unterschied vor, ob Sie an einem heißen Sommernachmittag

auf einem gepflügten und offenem Acker oder in einem dichten Wald stehen. Es liegt auf der Hand, dass die Umwandlung von Wäldern in Ackerland oder städtische Gebiete große Veränderungen mit sich bringt, die das Klima beeinflussen können.

Von der Sonneneinstrahlung, die auf eine dicht bewachsene Fläche trifft, wird nur 1% für die Photosynthese genutzt und 5-10% erwärmen die Luft ("fühlbare Wärme"). Über 70% der Strahlung wird von den Pflanzen für die Transpiration verwendet, bei der flüssiges Wasser in Wasserdampf umgewandelt wird, was einen sehr energieaufwändigen Prozess bedeutet ("latente Wärme") (**Abbildung 1**). Zählt man die nicht bewachsenen und die Wasseroberflächen hinzu, so werden etwa 50% der Sonnenenergie, die den Boden erreicht, für die Verdunstung und Transpiration von Wasser verwendet ("Evapotranspiration")<sup>1-4</sup>. Wenn diese Luftmassen in die Atmosphäre aufsteigen, wird der Wasserdampf schließlich kondensieren und die gleiche Menge an Energie freisetzen,

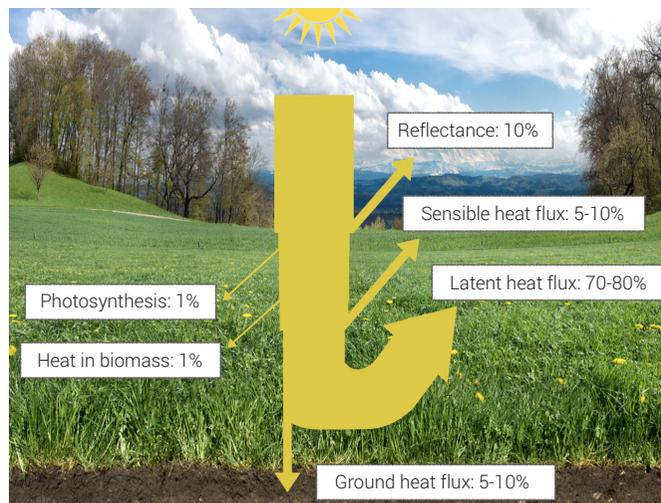


Photo credit: Shutterstock.com

die am Boden verbraucht wurde, wobei ein Teil davon in den Weltraum entweicht. Die neu entstandenen Wolken reflektieren die einfallende Sonnenstrahlung und sind die Quelle für neuen Niederschlag.

## Warum ist dieses Thema wichtig?

Von den etwa 120.000 km<sup>3</sup> Wasser, die jedes Jahr als Niederschlag auf die Landoberfläche fallen, stammen etwa 60% aus dem Meer und 40% vom Land (**Abbildung 2**)<sup>5,6</sup>. 60-80% dieser vom Land stammenden atmosphärischen Feuchtigkeit entsteht durch die Transpiration von Pflanzen<sup>2,7,8</sup>, was zeigt,

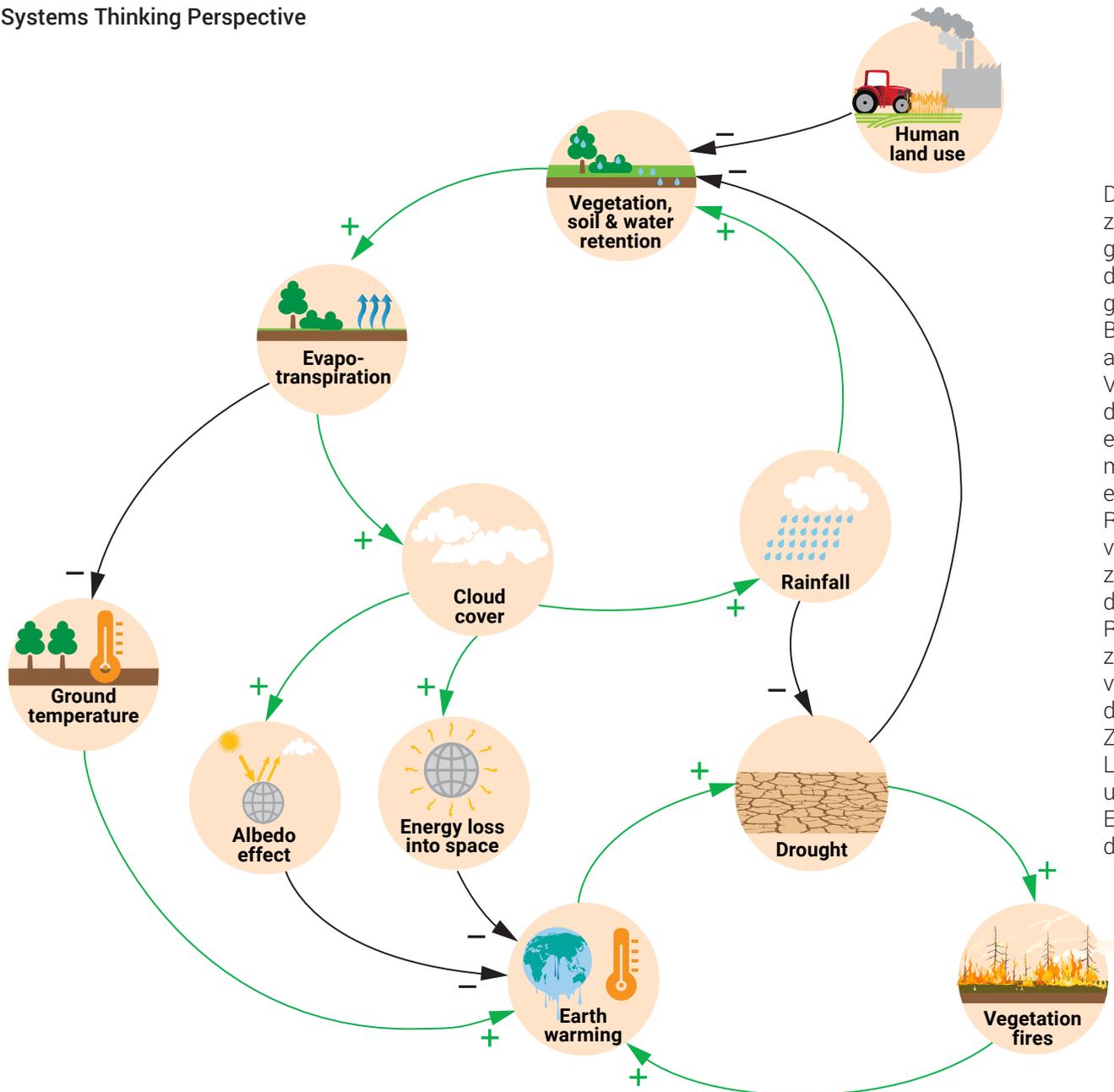


**Abbildung 1:** Verteilung der auf die Vegetation auftreffenden Sonnenenergie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Latente und fühlbare (oder sensible) Wärme sind Arten von Energie, die in der Atmosphäre freigesetzt oder absorbiert werden. Latente Wärme bezieht sich auf Phasenänderungen zwischen Flüssigkeiten, Gasen und Festkörpern. Sensible Wärme bezieht sich auf Temperaturänderungen eines Gases oder Objekts ohne Phasenänderung. (<https://climate.ncsu.edu/edu/Heat>)

<sup>ii</sup> Die kombinierten Prozesse der Verdunstung und der Transpiration des Wassers von der Erdoberfläche in die Atmosphäre.

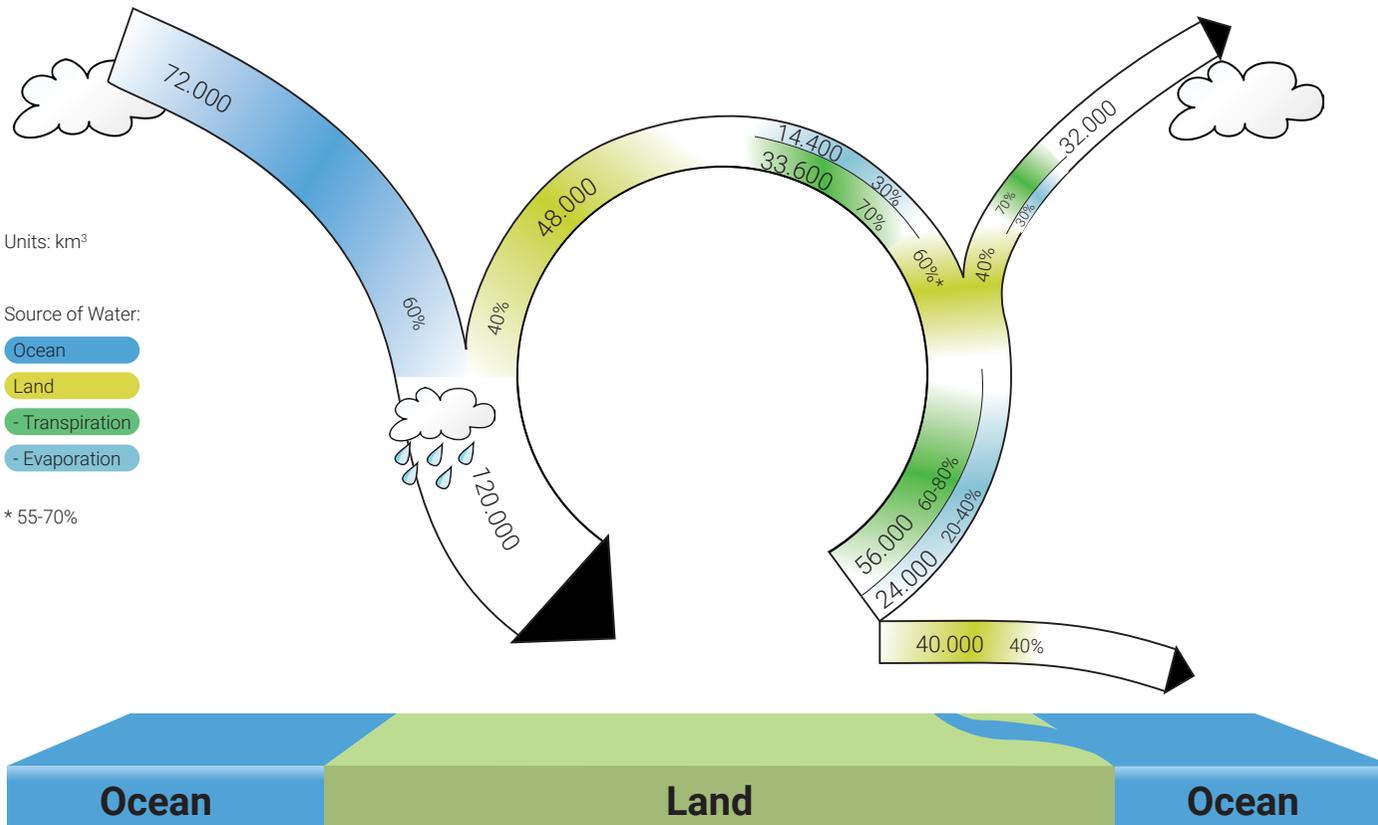
## A Systems Thinking Perspective



Die wichtigsten kausalen Einflüsse in diesem System - die zunehmende Landnutzung durch den Menschen hat zu einer geringeren Vegetationsbedeckung, einer Verschlechterung des Bodens und einer verminderten Wasserrückhaltung geführt, was unmittelbar die Verdunstung verringert und die Bodentemperaturen erhöht, was wiederum Auswirkungen auf den globalen Temperaturanstieg hat. Eine zunehmende Vegetation auf dem Land erhöht die Bodenfruchtbarkeit und die Grundwasserneubildung, was die Evapotranspiration erhöht, was wiederum zu einer stärkeren Bewölkung und mehr Niederschlägen führt. Eine stärkere Bewölkung führt zu einer stärkeren Abkühlung der Atmosphäre durch zusätzliche Reflexion der einfallenden Sonnenstrahlung sowie zu einem verstärkten Energietransfer zurück in den Weltraum, was zusammengenommen regulierende Auswirkungen auf die Erwärmung der Erde hat. Wenn diese ausgleichende Rückkopplung geschwächt wird, führt eine heißere Erde zu mehr Dürren, die durch geringere Niederschläge noch verschlimmert werden, und zu mehr Vegetationsbränden, die wiederum die Erde noch weiter erwärmen. Diese Zyklen lassen sich durch eine Politik umkehren, die eine Landnutzung fördert, die die Vegetationsdecke vergrößert und die Wasserrückhaltung im Boden verbessert. (+) Der Einfluss geht in die gleiche Richtung, (-) der Einfluss geht in die entgegengesetzte Richtung.

welch wichtige Rolle die Vegetation bei der Versorgung des Niederschlagszyklus sowie bei der Übertragung von Energie vom Boden in die obere Atmosphäre spielt.

Bis vor kurzem wurde angenommen, dass der Einfluss des Menschen auf den Wasserdampf in der Atmosphäre im Vergleich zur Verdunstung aus den Ozeanen vernachlässigbar ist. Der Einfluss des Menschen auf den Wasserdampf in der Atmosphäre ist jedoch auf die vom Menschen verursachten Veränderungen der Bodenbedeckung zurückzuführen und nicht nur auf industrielle Emissionen, wie früher behauptet wurde. Diese Veränderungen der Bodenbedeckung haben tatsächlich eine große Auswirkung auf die atmosphärischen



**Abbildung 2:** Globale Wasserströme. Von den 120.000 km<sup>3</sup> Regen, die auf die Kontinente fallen, stammen 72.000 km<sup>3</sup> aus dem Meer und 48.000 km<sup>3</sup> vom Land. Davon kommen 60-80% aus der Transpiration von Pflanzen und 20-40% aus Gewässern und Böden. 32.000 km<sup>3</sup> der Evapotranspiration an Land gehen über die Luftfeuchtigkeit zurück in den Ozean; 40.000 km<sup>3</sup> werden über Flüsse in die Ozeane abgeleitet.<sup>11</sup>

Grafik: Stefan Schwarzer, UN Environment/GRID-Geneva

Wasserdampfzyklen<sup>9-11</sup>.

Seit Beginn der Landwirtschaft ist fast die Hälfte der weltweiten Wälder verloren gegangen (wobei die meisten Abholzungen seit 1950 stattfanden)<sup>12,13</sup> und in viel weniger bewachsene Felder umgewandelt worden. Welche Auswirkungen haben diese gewaltigen, vom Menschen verursachten Veränderungen der Bodenbedeckung auf die Wasser- und Energieflüsse der Erde?

## Hauptkenntnisse

### Bäume als Erzeuger von Wasserdampf

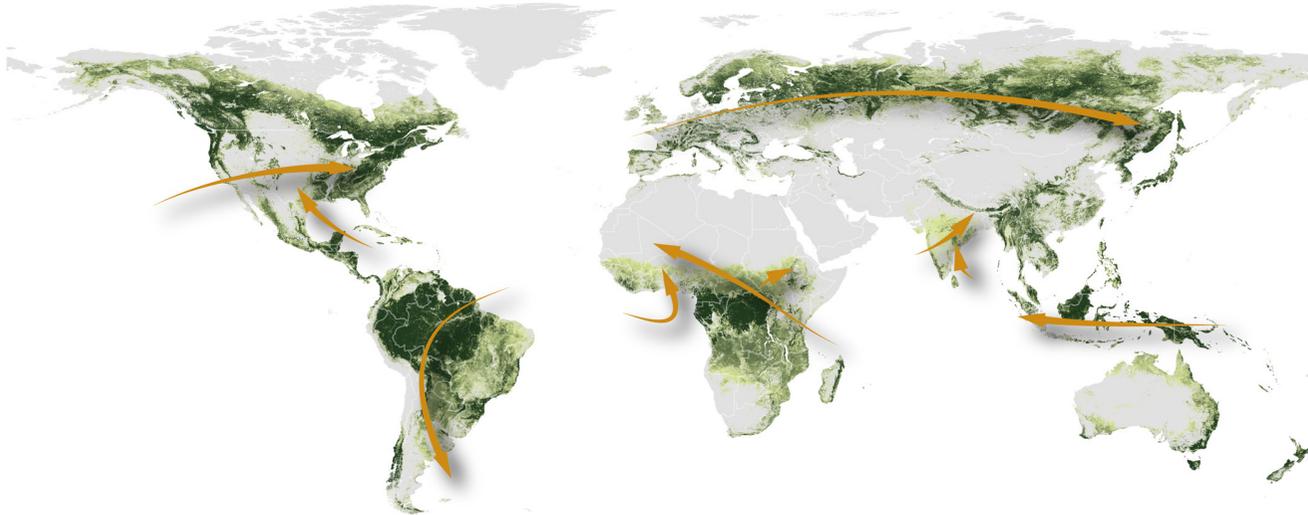
Jeder Baum im Wald ist ein Wasserbrunnen, der mit seinen Wurzeln Wasser aus dem Boden ansaugt, es durch den

Stamm, die Äste und die Blätter pumpt und das Wasser als Wasserdampf durch die Poren in seinem Laub in die Atmosphäre abgibt. An einem normalen sonnigen Tag kann ein einziger Baum mehrere hundert Liter Wasser verdunsten und seine Umgebung mit 70 kWh pro 100 Liter kühlen, was einer Kühlwirkung entspricht, die der von zwei 24 Stunden lang laufenden Klimaanlage entspricht<sup>14,15</sup>. Mit ihren Milliarden von Bäumen erzeugen sie riesige Wasserflüsse in der Luft ("fliegende Flüsse") - Flüsse, die Wolken bilden und Hunderte oder sogar Tausende von Kilometern weit entfernt Niederschläge erzeugen (**Abbildung 3**)<sup>16,17</sup>.

### Evapotranspiration als Quelle des Niederschlags

Weltweit stammen 40-60 % der Niederschläge, die über Land fallen, aus Feuchtigkeit, die durch Evapotranspiration über Land, aus der Richtung des Windes kommend, erzeugt wird, hauptsächlich durch transpirierende Bäume<sup>11,14,18-20</sup>. In einigen Regionen der Welt belüftet sich der Anteil auf 70% der Niederschläge<sup>11</sup>. Diese Wiederverwertung wird mit zunehmender Entfernung zum Landesinneren immer dominanter (**Abbildung 4**).

Tropische immergrüne Laubwälder nehmen nur etwa 10% der Landoberfläche der Erde ein, tragen aber zu 22 % zur globalen Evapotranspiration bei<sup>22</sup>, was ihre Bedeutung für den überregionalen Wasserkreislauf unterstreicht. Die typischen Entfernungen, die die vom Land verdunstete Feuchtigkeit in der Atmosphäre zurücklegt, bevor sie wieder auf das Land fällt, liegen in der Größenordnung von 500-5000 km; die typische Zeitskala reicht von 8-10 Tagen<sup>23,24</sup>. Die vom eurasischen Kontinent verdunstete Feuchtigkeit ist zum Beispiel für 80% der Wasserressourcen Chinas verantwortlich<sup>11</sup>. Die Hauptquelle für die Niederschläge im Kongobecken ist die über Ostafrika verdunstete Feuchtigkeit, während sie ihrerseits eine wichtige Quelle für die Niederschläge in der Sahelzone ist<sup>11</sup>. Der Zustand des westafrikanischen Regenwaldes ist besonders wichtig für den Abfluss des Nils<sup>25</sup>. Dies erklärt, warum selbst in großen Flusseinzugsgebieten wie dem Amazonas, dem Kongo und dem Jangtse die Niederschläge stärker von Landnutzungsänderungen außerhalb als innerhalb des Einzugsgebiets beeinflusst werden. Selbst in einigen Flusseinzugsgebieten, die sich nicht über mehrere Länder erstrecken, wurden die Abflüsse durch die Landnutzung in anderen Ländern erheblich beeinflusst.<sup>26</sup>



**Abbildung 3:** Fliegende Flüsse transportieren Wasserdampf über weite, von Wäldern bedeckte Strecken, die eine wesentliche Rolle bei der Entstehung dieses Dampfes spielen; sie wirken wie eine riesige Wasserpumpe, indem sie Milliarden von Litern Wasser in Form von Feuchtigkeit aufnehmen und wieder abgeben. Grafik: Stefan Schwarzer, UN Environment/GRID-Geneva

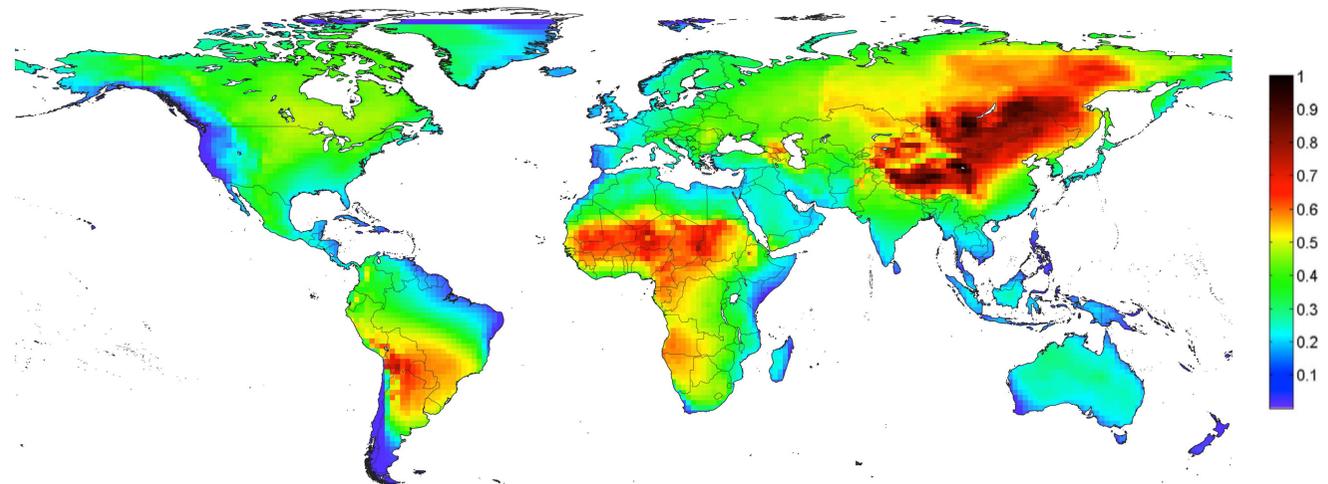
### Landnutzungsänderungen und veränderte Wärmeströme

Modelle zeigen, dass lokale Veränderungen von Wäldern oder Grasland zu Ackerland die jährliche terrestrische Evapotranspiration um 30-40% reduzierten<sup>27</sup>. Auf globaler Ebene verringerte die Veränderung der Bodenbedeckung zwischen 1950 und 2000 die jährliche terrestrische Evapotranspiration um 4-5% oder 3.000-3.500 km<sup>3</sup> und erhöhte den Oberflächenwasserabfluss um 6,8%<sup>27,28</sup>. Andererseits haben Wissenschaftler herausgefunden, dass eine verstärkte Vegetation eine kühlende Wirkung hat, die auf eine erhöhte Effizienz bei der vertikalen Bewegung von Wärme und Wasserdampf zwischen der Landoberfläche und der Atmosphäre zurückzuführen ist<sup>29</sup>.

### Veränderungen der atmosphärischen Muster aufgrund von Abholzungen

Satellitenbeobachtungen deuten darauf hin, dass Wälder einen großen Einfluss auf die Wolkenbildung haben, und zwar nicht nur in den Tropen, sondern auch in den gemäßigten Breiten: Das Verschwinden von Wäldern kann zu einem erheblichen Rückgang der lokalen Wolkenbedeckung und damit der Niederschläge führen<sup>30</sup>. Modellrechnungen haben gezeigt, dass die großflächige globale Entwaldung zwischen

1700 und 1850 zu einem Rückgang der Monsunregenfälle über dem indischen Subkontinent und dem südöstlichen China und einer damit verbundenen Abschwächung der



**Abbildung 4:** Durchschnittliches kontinentales Niederschlagsrecyclingverhältnis (1999-2008). Je höher die Zahl ist, desto mehr Niederschlag stammt aus der Landverdunstung.<sup>11,21</sup>

asiatischen Sommermonsun-Zirkulation geführt hat<sup>31</sup>. In den Tropen hat sich die tiefe Kumuluskonvektion infolge von Landschaftsveränderungen (vor allem durch die Umwandlung von Wald in Ackerland) erheblich verändert. Dies wirkt sich nicht nur auf den lokalen Niederschlag aus, sondern hat auch Auswirkungen über große Entfernungen durch Prozesse, die als Fernwirkungen (oder "Telekonnektionen") bekannt sind. Diese können Folgen in höheren Breitengraden haben, was das Wetter in diesen Regionen erheblich verändert<sup>10,25,32,33</sup>. Selbst relativ kleine Störungen der Landbedeckung in den Tropen können zu Auswirkungen in höheren Breitengraden führen<sup>34,35</sup>, wie zum Beispiel die Verbindungen zwischen dem Amazonas und dem Nordwesten der USA<sup>36</sup>. Das Verschwinden von Wäldern kann auch zu geringeren Niederschlägen und längeren Trockenzeiten führen, wie z. B. aus Rondônia in Brasilien<sup>37</sup> oder Borneo berichtet wird, wo festgestellt wurde, dass in den Wassereinzugsgebieten mit dem größten Waldverlust die Niederschläge um 15% zurückgegangen sind<sup>38</sup>. In Indien gingen die Muster der abnehmenden Niederschläge während des indischen Monsuns mit der Veränderung der Waldbedeckung einher, was auf die verringerte Evapotranspiration und den anschließenden Rückgang der recycelten Niederschlagskomponente zurückzuführen ist<sup>39</sup>. Dies verdeutlicht die großen Muster der Wasserdampf- und Niederschlagsströme.

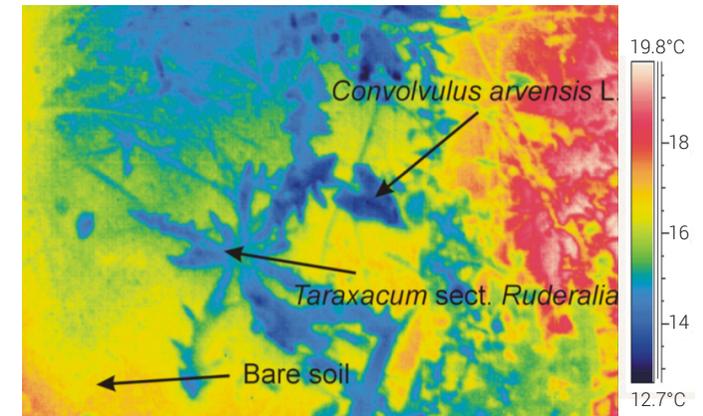
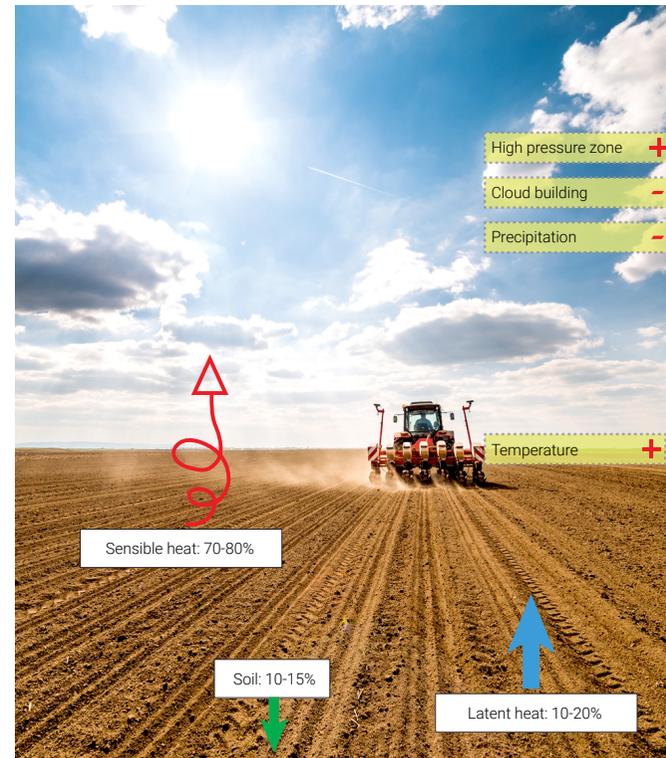
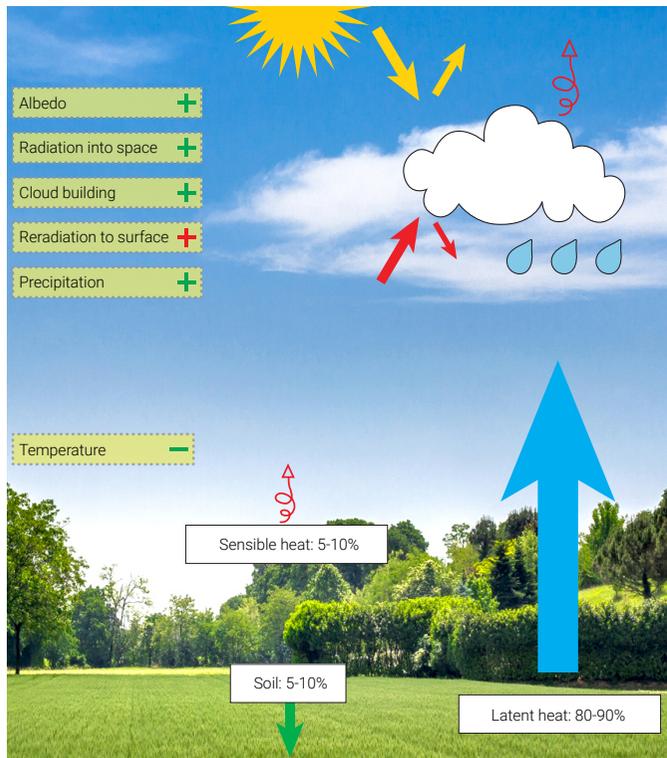
### Rückstrahlung von nacktem Boden

Normalerweise werden mehr als 50% der Sonnenstrahlung, die auf die Erdoberfläche trifft, durch Evapotranspiration in latente Wärme umgewandelt, die wiederum in die Atmosphäre gelangt, den Niederschlagskreislauf speist und teilweise in den Weltraum zurückstrahlt.

Auf kahlen Flächen, z. B. brachliegenden Feldern, trockenen Wiesen (im Sommer und nach der Heuernte) sowie auf Beton- oder Asphaltflächen, absorbiert der Boden mehr einfallende Sonnenstrahlung, heizt sich auf, erzeugt fühlbare Wärme und gibt Wärmeenergie, die proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur ist (Stefan-Boltzmann-Gesetz), an die Atmosphäre ab (**Abbildung 5, Abbildung 6**).

Die Unterschiede der Oberflächentemperatur zwischen diesen kahlen Flächen und den bewaldeten Gebieten können an einem mitteleuropäischen Beispiel an Sommernachmittagen bis zu 20°C betragen (**Abbildung 7**)<sup>40</sup>. Auf der indonesischen Insel Sumatra wurden Temperaturunterschiede zwischen bewaldeten und kahlgeschlagenen Flächen von bis zu 10°C festgestellt, was sich wiederum durch den Verdunstungskühleffekt der Wälder erklären lässt, der den durch die dunkleren Waldflächen erzeugten Albedo-Wärmeeffekt überwiegt<sup>41</sup>.

Dies unterstreicht die Tatsache, dass lokale biophysikalische Prozesse, die durch Waldverluste ausgelöst werden, die Sommertemperaturen in allen Regionen der Welt effektiv



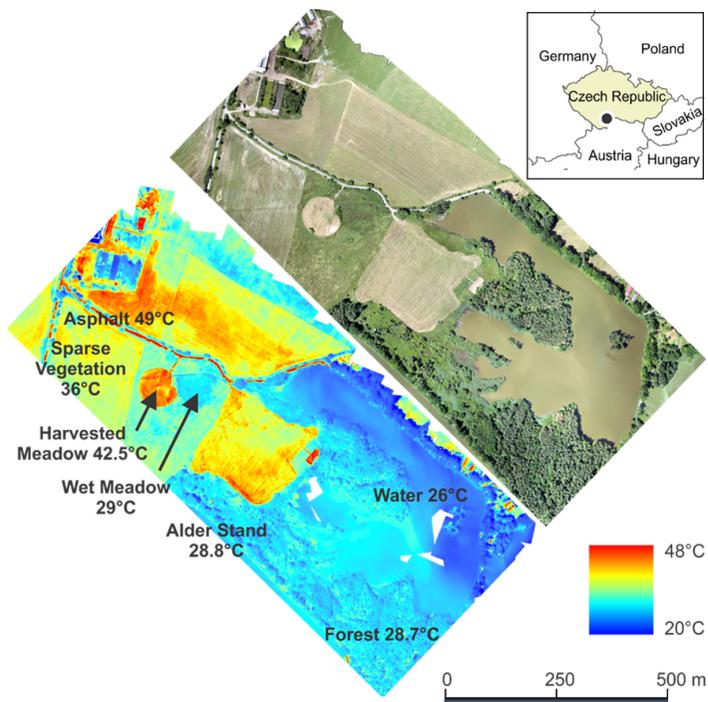
**Abbildung 6:** Derselbe Bereich mit spärlicher Vegetation, fotografiert im Infrarotspektrum und im sichtbaren Spektrum. Die kahle Oberfläche des Bodens ist sichtbar wärmer als die Oberfläche der durch Transpiration abgekühlten Blätter.<sup>9</sup>

erhöhen können<sup>42</sup>.

Die historische Entwaldung hat in der Tat den latenten Wärmefluss an Land verringert und die fühlbare Wärme am Boden erhöht<sup>43-47</sup>. Die Entwaldung hat in den zehn Jahren von 2003 bis 2013 zu einer erheblichen Erwärmung geführt, und zwar um bis zu 0,28°C im Durchschnitt der tropischen Regionen und um bis zu 0,32°C in den südlichen gemäßigten Regionen<sup>48</sup>. Bei der derzeitigen Abholzungsrate könnte der Verlust der Tropenwälder die globalen Temperaturen bis zum Jahr 2100 um 1,5°C erhöhen, wobei andere vom Menschen

**Abbildung 5:** Die Evapotranspiration senkt die Bodentemperatur und erhöht die Wolkenalbedo, die Abstrahlung in den Weltraum während des Kondensationsprozesses, die Wolkenbildung und damit den Niederschlag. Das Entfernen der Vegetation erhöht die Temperatur am Boden, strahlt mit steigender Bodentemperatur exponentiell zunehmende Wärmeenergie ab, schafft Hochdruckgebiete, die den Durchgang von Tiefdruck- (und damit feuchten) Luftmassen behindern, verringert das Wolkenbildungspotenzial und damit die Niederschläge.

Grafik: Stefan Schwarzer, UN Environment/GRID-Geneva



**Figure 7:** Oberflächentemperaturverteilung in einer gemischten Landschaft.<sup>14,40</sup>

verursachte Temperaturanstiege nicht berücksichtigt werden<sup>49</sup>.

Zwischen 1950 und 2000 stieg die Oberflächentemperatur aufgrund von Veränderungen der Bodenbedeckung weltweit um  $0,3^{\circ}\text{C}$  an<sup>27</sup>. Störungen in der Oberflächenenergiebilanz, die durch Vegetationsveränderungen zwischen 2000 und 2015 hervorgerufen wurden, haben zu einem durchschnittlichen Anstieg der lokalen Oberflächentemperatur um  $0,23^{\circ}\text{C}$  geführt, wo diese Vegetationsveränderungen stattfanden<sup>50</sup>. Die durchschnittliche Erwärmung aufgrund von Landbedeckungsänderungen könnte 18-40% des derzeitigen globalen Erwärmungstrends erklären, und zwar durch die Verringerung der Evapotranspiration und trotz der Zunahme der Oberflächenalbedo<sup>42,51,52</sup>.

### Biogene Aerosole für die Wolkenbildung

Neben der Bedeutung der Wälder für die Energieströme

und die Niederschlagsbildung scheinen große Wälder auch biogeochemische Reaktoren zu sein, in denen die Biosphäre und die Photochemie der Atmosphäre Kerne für die Wolken- und Niederschlagsbildung erzeugen und so den Wasserkreislauf aufrechterhalten<sup>53</sup>. Bäume produzieren flüchtige organische Verbindungen und setzen Mikroorganismen - Bakterien und Pilzsporen, Pollen und andere biologische Abfälle - frei, die auf den Blättern leben und während und nach Regenfällen in Waldökosystemen in die Luft gelangen<sup>54-57</sup>. In der Atmosphäre bilden sie einen wichtigen Teil der Wolkenkondensation und der Eiskerne, was sich wiederum auf die Wolkenbildung und den Niederschlag auswirkt<sup>53,54,57-59</sup>. Die biogenen Aerosole können außerdem dazu beitragen, die Gefriertemperatur zu erhöhen, indem sie Eiskerne bilden. Ohne dieses Phänomen würde das Gefrieren erst bei einer Wolkentemperatur von  $-15^{\circ}\text{C}$  oder kälter eintreten; mit Hilfe dieser Eiskerne kann der Prozess bei Temperaturen nahe  $0^{\circ}\text{C}$  erreicht werden, was eine effiziente Wolkenbildung ermöglicht und die Bildung von Regen leichter und lokaler macht<sup>59-62</sup>.

### Ozeane, ein Puffer in zwei Richtungen

Ein Drittel der anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen und mehr als 90% der zusätzlichen anthropogenen Wärme, die in



Photo credit: Shutterstock.com



Photo credit: Shutterstock.com

die Atmosphäre abgegeben wurde, sind von den Ozeanen absorbiert und gepuffert worden. Wenn wir über den globalen Temperaturanstieg sprechen, sollten wir uns bewusst sein, dass wir nur  $\sim 10\%$  des Gesamteffekts sehen.<sup>63,64</sup>

Die Pufferung von  $\text{CO}_2$  durch die Ozeane funktioniert auch in umgekehrte Richtung: Wenn wir der Atmosphäre  $\text{CO}_2$  entziehen, um die atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen zu senken, werden die Ozeane aufgrund des neu entstandenen Gasdruckunterschieds wieder  $\text{CO}_2$  emittieren und versuchen, ein  $\text{CO}_2$ -Konzentrationsgleichgewicht zwischen der Atmosphäre und dem Ozean wiederherzustellen. Daher wird es in kürzeren Zeiträumen kaum zu einem raschen Rückgang des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre kommen, selbst wenn es uns gelingt, a) die  $\text{CO}_2$ -Emissionen zu stoppen und b) natürliche oder technische Lösungen zur  $\text{CO}_2$ -Bindung zu entwickeln.

### Was sind die Auswirkungen auf die Politik?

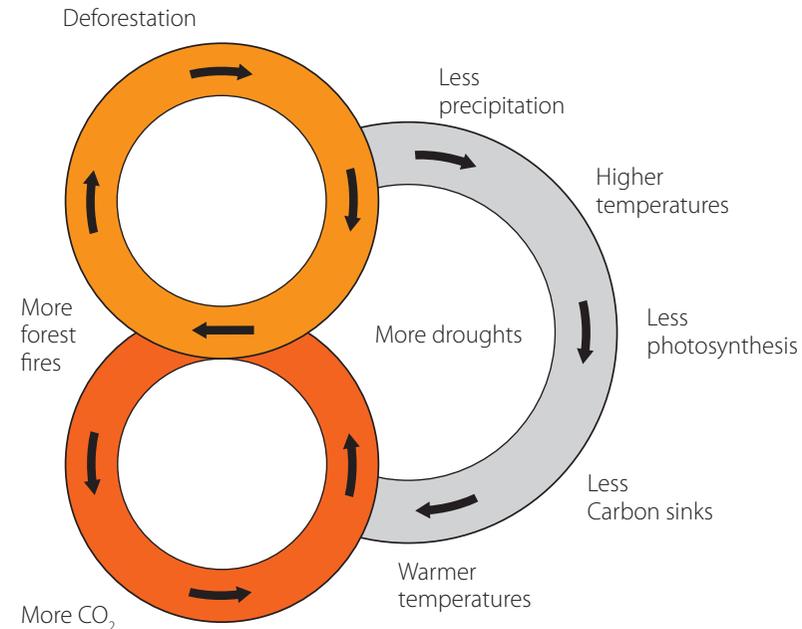
Vegetation, fruchtbare Böden und Wasserrückhalt müssen als Hauptregulatoren des Wasser-, Energie- und Kohlenstoffkreislaufs anerkannt werden. Einige der politischen Implikationen sind im Folgenden aufgeführt:

- Wir müssen uns der positiven Rückkopplungsschleifen bewusst sein: Wie bereits erläutert, werden durch die Abholzung von Wäldern die Landflächen und das Klima trockener und wärmer. Dies führt zu Bedingungen, die das Risiko von Wald- und Vegetationsbränden erhöhen, die wiederum CO<sub>2</sub> freisetzen und zu weiterer Abholzung führen, wodurch ein Teufelskreis entsteht<sup>68,69</sup>. Klimawandel, Entwaldung, Trockenheit und Waldbrände bilden einen dreifachen Kreislauf sich verstärkender Rückkopplungen (**Abbildung 8**).
- Angesichts der Fernwirkungen großer Waldökosysteme sollten diese als globale Güter betrachtet werden. Der im Rahmen der UNFCCC entwickelte REDD+-Mechanismus könnte beispielsweise ein Modell für die Anerkennung und Finanzierung der von diesen Wäldern erbrachten internationalen Wasser- und Energiedienstleistungen darstellen.
- Besonders wichtige und sensible Waldgebiete sollten geschützt und entsprechend bewirtschaftet werden.
- Es ist von größter Bedeutung, die Entwaldung zu stoppen und die Wiederaufforstung weltweit zu verstärken.
- Die landwirtschaftlichen Praktiken sollten sich auf Bodenbildung, ganzjährige Bodenbedeckung mit Pflanzen und Einsatz von Agroforstmethoden konzentrieren .

## Schlussfolgerung

Es ist wichtig zu verstehen, dass die Kohlenstoff-, Wasser- und Energiekreisläufe auf dem Land eng miteinander verbunden sind. Die Wiederherstellung der atmosphärischen und terrestrischen Feuchtigkeitskreisläufe in der Vegetation, den Böden und der Atmosphäre ist von größter Bedeutung für die Kühlung des Planeten und die Sicherung der Niederschlagsmuster auf der ganzen Welt. Die Austrocknung der terrestrischen Landschaft ist der Preis des Scheiterns. Der Stopp der Entwaldung, die verstärkte Wiederaufforstung und die Einführung agroforstwirtschaftlicher Praktiken sind unabdingbar, wenn wir eine Klimakatastrophe erfolgreich vermeiden wollen. Ein systemischer Ansatz ist erforderlich, um die zugrunde liegenden Muster der Regenbildung zu verstehen und zu nutzen. Um Gebiete wie die Sahelzone wieder mit Regen

iii Agroforstwirtschaft ist die Integration von Bäumen oder Sträuchern in landwirtschaftliche Flächen oder Weideland.



**Abbildung 8:** Da Waldbrände, Entwaldung, Dürre und Klimawandel miteinander verknüpft sind, kann die Isolierung eines einzelnen Prozesses die Komplexität des zusammenhängenden Ganzen nicht beschreiben.<sup>65-67</sup>

zu versorgen, müssen nicht nur Bäume in der Region gepflanzt werden, sondern es müssen auch Wälder an der Küste (wieder) aufgebaut werden, um die feuchte Luft vom Ozean ins Land zu ziehen<sup>70</sup>.

Gleichzeitig stellt die Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit, der Wasserrückhaltung und des Bodenschutzes durch die Praktiken der regenerativen Bio-Bewegung (siehe UNEP Foresight Briefs 010 und 013), wie z. B. die ganzjährige Vegetationsbedeckung durch Zwischenfrüchte und Untersaaten oder die Einführung von Agroforstwirtschaft, einen weiteren wichtigen Ansatz zur Versorgung der Wasser- und Energiekreisläufe dar. Wege zum Aufbau zusätzlicher organischer Bodensubstanz zu finden, ist einer der Schlüssel zum Erfolg für große Teile der Welt, die derzeit bewirtschaftet werden.

Generell brauchen wir einen Paradigmenwechsel, der die hydrologischen und klimakühlenden Wirkungen der Vegetation im Allgemeinen und der Wälder im Besonderen neben ihrem

Kohlenstoffbindungspotenzial wertschätzt. Die Auswirkungen der Vegetationsbedeckung auf das Klima auf lokaler, regionaler und kontinentaler Ebene bieten Vorteile, die stärker anerkannt werden müssen<sup>14,32,71</sup>.



Photo credit: Shutterstock.com

## Acknowledgements

## Authors

Stefan Schwarzer, UN Environment/GRID-Geneva and University of Geneva

## Reviewers

### External

David Ellison, University of Bern

Prof. Douglas Sheil, Wageningen University

Lera Miles, UN Environment Programme World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC)

Eleanor Milne, Colorado State University

### UNEP Reviewers

Angeline Djampou, Barnabas Dickson , Gabriel Labbate, Jane Muriithi, Kaisa Uusimaa, Magda Biesiada , Pascal Peduzzi, Rachel Kosse, Samuel Opiyo , Tim Christophersen, Virginia Gitari, Ying Wang

## UNEP Foresight Briefs Team

Alexandre Caldas, Sandor Frigyi, Audrey Ringler, Esther Katu, Erick Litswa, Pascil Muchesia

Inspired by a talk by Walter Jehne

## Disclaimer

The designations employed and the presentations do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNEP or cooperating agencies concerning the legal status of any country, territory, city, or area of its authorities, or of the delineation of its frontiers or boundaries.

© Maps, photos, and illustrations as specified.

## Contact

info@aufbauende-landwirtschaft.de; unep-foresight@un.org

## Bibliografie

- Pokorný, J. et al. Solar energy dissipation and temperature control by water and plants. *International Journal of Water* 5, 311 (2010).
- Jasechko, S. et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496, 347–350 (2013).
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. & Kiehl, J. Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90, 311–324 (2009).
- Wang, K. & Dickinson, R. E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability: GLOBAL TERRESTRIAL EVAPOTRANSPIRATION. *Reviews of Geophysics* 50, (2012).
- Ellison, D., Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. & van Noordwijk, M. Upwind forests: managing moisture recycling for nature-based resilience. *Unasylva* 70, 13 (2019).
- Schneider, U. et al. Evaluating the Hydrological Cycle over Land Using the Newly-Corrected Precipitation Climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). *Atmosphere* 8, 52 (2017).
- Schlesinger, W. H. & Jasechko, S. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* 189–190, 115–117 (2014).
- Wei, Z. et al. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration: Revisiting Global ET Partitioning. *Geophysical Research Letters* 44, 2792–2801 (2017).
- Kravčik, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kováč, M. & Tóth, E. Water for the Recovery of the Climate - A New Water Paradigm. 94 (2007).
- Mahmood, R. et al. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate: LAND COVER CHANGES AND THEIR BIOGEOGRAPHICAL EFFECTS ON CLIMATE. *International Journal of Climatology* 34, 929–953 (2014).
- van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaeffli, B. & Steele-Dunne, S. C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research* 46, (2010).
- Crowther, T. W. et al. Mapping tree density at a global scale. *Nature* 525, 201–205 (2015).
- FAO. *State of the world's forests 2012*. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012).
- Ellison, D. et al. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43, 51–61 (2017).
- Pokorný, J. What can a tree do? (2012).
- Weng, W., Luedeke, M. K. B., Zemp, D. C., Lakes, T. & Kropp, J. P. Aerial and surface rivers: downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 911–927 (2018).
- Nobre, A. D. The Future Climate of Amazonia. 42 (2014).
- Eltahir, E. A. B. & Bras, R. L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120, 861–880 (1994).
- Keys, P. W., Wang-Erlandsson, L. & Gordon, L. J. Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service. *PLOS ONE* 11, e0151993 (2016).
- Staal, A. et al. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change* 8, 539–543 (2018).
- van der Ent, R. J. A new view on the hydrological cycle over continents. (2014).
- Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J. & Savenije, H. H. G. Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 1: Temporal characteristics over land. *Earth System Dynamics* 5, 441–469 (2014).
- van der Ent, R. J. & Savenije, H. H. G. Length and time scales of atmospheric moisture recycling. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 1853–1863 (2011).
- van der Ent, R. J. & Tuinenburg, O. A. The residence time of water in the atmosphere revisited. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 779–790 (2017).
- Gebrehiwot, S. G. et al. The Nile Basin waters and the West African rainforest: Rethinking the boundaries. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6, e1317 (2019).
- Wang-Erlandsson, L. et al. Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 4311–4328 (2018).
- Sterling, S. M., Ducharme, A. & Polcher, J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change* 3, 385–390 (2013).
- Gordon, L. J. et al. Human modification of global water vapor flows from the land surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 7612–7617 (2005).
- Chen, C. et al. Biophysical impacts of Earth greening largely controlled by aerodynamic resistance. *Sci. Adv.* 6, eabb1981 (2020).
- Teuling, A. J. et al. Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. *Nature Communications* 8, (2017).
- Takata, K., Saito, K. & Yasunari, T. Changes in the Asian monsoon climate during 1700–1850 induced by preindustrial cultivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 9586–9589 (2009).
- Pielke, R. A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. *Reviews of Geophysics* 39, 151–177 (2001).
- Sheil, D. & Muriyaro, D. How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis. *BioScience* 59, 341–347 (2009).
- Chase, T. N., Pielke Sr., R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. R. & Running, S. W. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dynamics* 16, 93–105 (2000).
- Chase, T. N., Pielke, R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. R. & Running, S. W. Sensitivity of a general circulation model to global changes in leaf area index. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101, 7393–7408 (1996).
- Medvigy, D., Walko, R. L., Otte, M. J. & Avissar, R. Simulated Changes in Northwest U.S. Climate in Response to Amazon Deforestation\*. *Journal of Climate* 26, 9115–9136 (2013).

- Coe, M. T. et al. The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future. *Tropical Conservation Science* 10, 194008291772067 (2017).
- McAlpine, C. A. et al. Forest loss and Borneo's climate. *Environmental Research Letters* 13, 044009 (2018).
- Paul, S. et al. Weakening of Indian Summer Monsoon Rainfall due to Changes in Land Use Land Cover. *Scientific Reports* 6, (2016).
- Hesslerová, P., Pokorný, J., Brom, J. & Rejšková – Procházková, A. Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate. *Ecological Engineering* 54, 145–154 (2013).
- Sabajo, C. R. et al. Expansion of oil palm and other cash crops causes an increase of the land surface temperature in the Jambi province in Indonesia. *Biogeosciences* 14, 4619–4635 (2017).
- Alkama, R. & Cescaati, A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science* 351, 600–604 (2016).
- Bounoua, L., Defries, R., Collatz, G. J., Sellers, P. & Khan, H. Effects of Land Cover Conversion on Surface Climate. 36 (2002).
- Brovkin, V. et al. Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity. *Climate Dynamics* 26, 587–600 (2006).
- Pitman, A. J. et al. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. *Geophysical Research Letters* 36, (2009).
- Pongratz, J., Reick, C. H., Raddatz, T. & Claussen, M. Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change: CLIMATE EFFECTS OF HISTORICAL LAND COVER CHANGE. *Geophysical Research Letters* 37, (2010).
- Zhao, M., Pitman, A. J. & Chase, T. The impact of land cover change on the atmospheric circulation. *Climate Dynamics* 17, 467–477 (2001).
- Li, Y. et al. Potential and Actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature: IMPACTS OF FOREST CHANGE ON TEMPERATURE. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121, 14,372–14,386 (2016).
- Mahowald, N. M., Ward, D. S., Doney, S. C., Hess, P. G. & Randerson, J. T. Are the impacts of land use on warming underestimated in climate policy? *Environmental Research Letters* 12, 094016 (2017).
- Duveller, G., Hooker, J. & Cescaati, A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications* 9, (2018).
- Ban-Weiss, G. A., Bala, G., Cao, L., Pongratz, J. & Caldeira, K. Climate forcing and response to idealized changes in surface latent and sensible heat. *Environmental Research Letters* 6, (2011).
- Woloszyn, M. & Harris, N. Tropical Forests and Climate Change: The Latest Science. *World Resources Institute* 14 (2018).
- Poschl, U. et al. Rainforest Aerosols as Biogenic Nuclei of Clouds and Precipitation in the Amazon. *Science* 329, 1513–1516 (2010).
- Bigg, E. K., Soubeyrand, S. & Morris, C. E. Persistent after-effects of heavy rain on concentrations of ice nuclei and rainfall suggest a biological cause. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 2313–2326 (2015).
- Bowers, R. M. et al. Characterization of Airborne Microbial Communities at a High-Elevation Site and Their Potential To Act as Atmospheric Ice Nuclei. *Applied and Environmental Microbiology* 75, 5121–5130 (2009).
- Conen, F., Eckhardt, S., Gundersen, H., Stohl, A. & Yttri, K. E. Rainfall drives atmospheric ice-nucleating particles in the coastal climate of southern Norway. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, 11065–11073 (2017).
- Jeong, Y. S., Ge, Z. & Buie, C. R. Bioaerosol generation by raindrops on soil. *Nature Communications* 8, (2017).
- Després, Viviane R. et al. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 64, 15598 (2012).
- Morris, C. E. et al. Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere. *Global Change Biology* 20, 341–351 (2014).
- Christner, B. C., Morris, C. E., Foreman, C. M., Cai, R. & Sands, D. C. Ubiquity of Biological Ice Nucleators in Snowfall. *Science* 319, 1214–1214 (2008).
- Lazaridis, M. Bacteria as Cloud Condensation Nuclei (CCN) in the Atmosphere. *Atmosphere* 10, 786 (2019).
- Morris, C. E., Soubeyrand, S., Bigg, E. K., Creamean, J. M. & Sands, D. C. Mapping Rainfall Feedback to Reveal the Potential Sensitivity of Precipitation to Biological Aerosols. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, 1109–1118 (2017).
- Cheng, L. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences* 37, 137–142 (2020).
- Pförtner, H.-O. et al. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for Policymakers. (2019).
- Hasler, N., Werth, D. & Avissar, R. Effects of Tropical Deforestation on Global Hydroclimate: A Multimodel Ensemble Analysis. *Journal of Climate* 22, 1124–1141 (2009).
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N. & Dolman, A. J. Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics: CLIMATE CONTROLS ON FIRES. *Global Biogeochem. Cycles* 22, n/a/n/a (2008).
- Zhao, M. & Running, S. W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science* 329, 940–943 (2010).
- Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Cambridge University Press, 2012). doi:10.1017/CBO9781139177245.
- International Union of Forest Research Organizations. Global Fire Challenges in a Warming World. (2018).
- Ellison, D. & Speranza, C. I. From blue to green water and back again: Promoting tree, shrub and forest-based landscape resilience in the Sahel. *Science of The Total Environment* 739, 140002 (2020).
- Lemondant, L., Gentine, P., Swann, A. S., Cook, B. I. & Scheff, J. Critical impact of vegetation physiology on the continental hydrologic cycle in response to increasing CO<sub>2</sub>. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, 4093–4098 (2018).



To view current and previous issues online and download UNEP Foresight Briefs, go to  
<https://wesr.unep.org/foresight>

