Aus: Lozán, J.L. S.-W. Breckle, H.Graßl & D.Kasang (Hrsg.) (2021): Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung. Mit 351 Abbildungen, 34 Tabellen & 4 Tafeln. 400 Seiten. Wissenschaftliche Auswertungen & GEO Hamburg. ISBN/EAN 978-39820067-58 (Zur Zitierweise - s. letzte Seite des Artikels).

3.11 Greening (mehr Grün) und Browning (mehr Braun), wie sind die Trends?

Siegmar-W. Breckle & José L. Lozán

Seit einigen Jahrzehnten werden Veränderungen der Vegetation auf der Erdoberfläche beobachtet. Es gibt Berichte darüber, dass einige Regionen grüner werden. Als Gründe dafür werden die verlängerte Vegetationszeit, Stickstoffeintrag und CO_2-Düngung u.a. genannt. In anderen Regionen wird die Vegetation dagegen braun möglicherweise als Folge von Wasserstress. In diesem Beitrag wird diese Entwicklung anhand von Beobachtungen aus dem Mediterrangebiet näher eingegangen und mit globalen Ergebnissen anderer Untersuchungen verglichen und bewertet.

Greening (more green) and browning (more brown), what are the trends? *Changes in vegetation on the earth's surface have been observed for the last decades. There are reports that some regions are becoming greener. The reasons given for this are the extended vegetation period, nitrogen input and CO_2 fertilization, among others. In other regions, however, the vegetation may turn brown maybe as a result of water stress. In this article, this development is examined in more detail using case studies from the Mediterranean region and compared and evaluated with global results from several others investigations.*

Enverdeciendo (greening) y Marroneando (Browning), cuales son las tendencias? *Durante las últimas décadas se ha venido observando cambios en la vegetación de la superficie terrestre. Hay informes de que algunas regiones se están volviendo más verdes. Las razones que se dan como explicación a ésto son el período vegetativo de las plantas más extendido, el aporte de nitrógeno y la fertilización del CO2, entre otros. En otras regiones, sin embargo, la vegetación esta volviendose más marrón posiblemente como resultado del estrés hídrico. En este artículo, se examina este desarrollo con más detalle basandose en observaciones de la región mediterránea comparándolas y evaluándolas con resultados globales de muchos otros estudios.*

Auf der Grundlage von Langzeit-Fernerkundungsdaten terrestrischer Ökosysteme lassen sich eine Vielzahl von Veränderungen auf der Erdoberfläche dokumentieren. In letzter Zeit wurde von sog. Globalen Greening-Trends berichtet, also von einem Grünerwerden der Erdoberfläche in manchen Regionen. Umgekehrt hat man auch, aber mit deutlich geringerer Ausdehnung, Browning-Trends ausgemacht. Viele dieser Studien führen das Greening auf eine Vegetationszunahme aufgrund verschiedener Faktoren zurück, wie zum Beispiel Erwärmung oder Landnutzungsänderungen.

Cortes et al. (2021) haben nun jedoch argumentiert, dass die bisher häufig verwendeten Analysemethoden zu viele Regionen mit unsicheren Trends ausgeben. In ihrer Arbeit analysieren Cortes et al. (2021) Vegetationsdaten mit dem Blattflächenindex (LAI), der die von Blättern eingenommene Fläche in einem bestimmten Gebiet misst. Dabei wurden Datensätze von BU AVHRR, Boston University Advanced Very-High-Resolution Radiometer; GIMMS, global inventory modeling and mapping studies; MODIS, moderate resolution imaging spectroradiometer; NOAA CDR, national oceanic and atmospheric administration's climate data record; LTDR, land long term data record, zugrunde gelegt. Mit verfeinerten Methoden und Mehrfachtests wurden weltweit grüner gewordene Regionen erkannt (z.B. in China, Indien, Europa, Sahel, Nordamerika, Brasilien und Sibirien), allerdings sind diese Regionen kleiner und seltener, als die bisherigen Angaben. Auch eine zunehmende saisonale Amplitude im LAI nördlich von 35°N wurde erkannt. Cortes et al. (2021) nutzten bei ihrer Auswertung zusätzliche statistische Analysen, um die Zuverlässigkeit der erkannten Vegetationsbegrünung (Greening) zu erhöhen. Dies ermöglicht einen größeren Konsens darüber, was die Hauptfaktoren für die beobachtete Zunahme der Vegetationsbegrünung (Greening) bzw. des Braunerwerdens (Browning) in anderen Regionen sind.

Mediterranes Greening

Um die treibenden Faktoren zu erkennen, sind auch kleinräumigere Studien erforderlich. Pausas & Millan (2019) haben für das Mediterrangebiet die Veränderungen der Vegetationsbedeckung herausgearbeitet. Die Region gilt als primärer Hotspot des derzeitigen Klimawandels (Giorgi & Lionello 2008), weil die Erwärmung dieser Region über dem globalen Durchschnitt (ca 1,3 K gegenüber 0,85 K weltweit, Guiot & Cramer 2016) liegt. Pausas & Millan(2019) konzentrieren sich jedoch auf einige lokale treibende Faktoren, die spezifisch für die Region sind.

Die Mediterranregion wurde seit Jahrtausenden intensiv genutzt; es ist die Wiege der westlichen Zivilisation, und seitdem haben viele Kulturen die Region bewohnt, einige mit sehr hoher Bevölkerungsdichte. Die Konsequenz ist, dass mediterrane Landschaften ausgiebig durch Abholzung und Überweidung seit langem verändert und ein Großteil des Landes bewirtschaftet wurden.

Neuere Entwicklungen im späten zwanzigsten Jahrhundert sind tiefgreifende sozioökonomische Veränderungen (aufgrund von Industrialisierung und Tourismus), die viele Menschen dazu gebracht haben, das Land zu verlassen. Hingegen sind jetzt städtische und periurbane Gebiete zunehmend überfüllt. Diese Prozesse bedeuten in vielen mediterranen Landschaften eine abrupte Flächenverkleinerung für Landwirtschaft, Weiden und Holzsammeln, eine schlechte Waldbewirtschaftung und verwilderte Plantagen. Einige Eindrücke der Vergangenheit mit der Landübernutzung sind leicht zu erkennen (*Abb. 3.11-1*).

Die erste und direkte Folge des Landflucht-Prozesses ist ein recht plötzlicher Anstieg von Wildgebieten und Pflanzenbiomasse. Verlassene Felder sind jetzt ein Hauptmerkmal in vielen mediterranen Landschaften. Dies erhöht die Menge und die Geschlossenheit der Vegetation in vielen Regionen. Zudem ist die Beweidung stark zurückgegangen. Außerdem werden Waldplantagen nur noch schlecht oder gar nicht gepflegt, was eine weitere Erhöhung der Biomasse bedingt, aber auch einen größeren Verbund der Landschaften. Ein Vergleich der aktuellen Landschaften mit alten Fotografien (Debussche et al. 1999) und alten Karten (Falcucci et al. 2007) oder Vergleiche aufeinanderfolgender Waldinventuren (Vayreda et al. 2012) zeigen eine deutliche Zunahme von Wildgebieten und der Waldbaumdichte. Auch Fernerkundungsdaten der letzten 15 Jahre deuten auf ein generelles Greening der Region im Vergleich zu globalen Trends an. Der atmosphärische Anstieg von Kohlendioxid (CO_2) kann zum Biomassewachstum beigetragen haben, ist aber kaum der maßgebliche Haupttreiber, da das Ausmaß der Begrünung größer ist als globale Schätzungen angeben. Eine Folge dieser Vegetationszunahme in einem wärmeren Klima ist erhöhter Trockenstress und größere Mortalität der Pflanzen. Das heißt, zusätzlich zur direkten klimabedingten Dürresterblichkeit treten Vegetationsveränderungen auf mit erhöhter Vegetationsdichte und Pflanzenkonkurrenz bei niedrigerer Beweidung und einem steigenden CO_2-Gehalt.

Abb. 3.11-1: *Terrassenförmige Hänge sind ein gemeinsames Merkmal der mediterranen Landschaften und verdeutlichen den starken menschlichen Druck in der Region. Die meisten Terrassen sind heutzutage verlassen außer denen am Fuße der Berge, die noch benutzt werden; die meisten sind von früh aufeinander folgenden Phasen von Buschwerk bewachsen. Das Buschwerk ist leicht brennbar. Das Buschland und die toten Bäume im Vordergrund sind das Ergebnis eines Feuers. Ort: Benicadell (Valencia, Spanien), Foto: J.G. Pausas*

Die Folge der soziologischen Veränderungen ist eine Zunahme der Feuer (durch Fahrlässigkeit und Brandstiftung) und angesichts der großen in der Landschaft verfügbare Brennstoffmenge eine Zunahme der Feuergröße und der Jahresbrandflächen (Pausas 2004, Pausas & Fernández-Muñoz 2012). Dies führt zu einer Zunahme der Feuerfrequenz auf lokaler Ebene. Gleichzeitig mit dieser Zunahme der Brände gab es in den meisten Ländern eine starke Politik der Brandbekämpfung, dies förderte zusätzlich die Ansammlung von brennbarem Material und dementsprechend Großbrände (Piñol et al. 2007). Die veränderte Menge an brennbarem Material und ihre Verteilung ist wahrscheinlich der größte und wichtigste Treiber für abrupte Änderungen des Feuerregimes (Pausas & Fernández-Muñoz 2012, Pausas & Keeley 2014). Brandflächen erholen sich oft rasch und begrünen sich. Nach wenigen Jahren ist dichtes Buschwerk aufgewachsen.

Die Mittelmeerküste war einst voll bewachsen und reich an Sümpfen und Lagunen, die zum lokalen Wasserkreislauf beitrugen. Die Meeresbrise bereicherte mit dem verdunsteten Wasser die umgebenden Höhen, wenn Sie sich ins Landesinnere über den Küstengebirgen typischerweise verdichtete und zur Wolkenbildung kondensierte. Die reichhaltigen flüchtigen organischen Verbindungen von mediterranen Pflanzen werden emittiert und fördern die Keimbildung von Wolken (Kirkby et al. 2016).

Die Wasserdampfkondensation ist verantwortlich für konvektive Schauer über den Bergen rund um das Mittelmeer (Bolle 2003). Die Austrocknung der Sümpfe (begonnen von den Römern zur Vorbeugung gegen Malaria), die Abholzungen für die Landwirtschaft, und in jüngerer Zeit die explosive Urbanisierung der Küsten und der Tourismus haben die ursprünglichen Ökosysteme drastisch reduziert und damit indirekt das Verdunstungswasser, das der Meeresbrise zur Verfügung steht. Diese Landnutzungsänderungen haben auch die Bodenerwärmung erhöht (durch den städtischen Wärmeinseleffekt). Die Folgen sind die Zerstörung verschiedener Ökosysteme, ihre Veränderungen in der Artenzusammensetzung, ein Absinken des Grundwasserspiegels, Veränderungen der Albedo; zudem befindet sich bei einer wärmeren und trockeneren Luftbrise das Kondensationsniveau in größerer Höhe, dadurch entwickeln sich Stürme seltener (Millán 2014). Für die letz-

ten Jahrzehnte gibt es Hinweise auf einen Rückgang der sommerlichen (konvektiv-orografischen) Niederschläge und eine Zunahme der herbstlichen (oft sintflutartigen) Regen (Pausas 2004, Millán et al. 2005).

Diese Entwicklung hängt weniger von der globalen Erwärmung ab, sondern wird durch lokale Landnutzungsänderungen verschlimmert. Auch führt dies zu einer Zunahme trockener Stürme, die eine zusätzliche Ursache für Waldbrände sein können. Photooxidantien (Ozon) und Aerosole, zusammen mit der erhöhten spätsommerlichen Meeres-Temperatur führen zu häufigeren, sintflutartigen Herbstregen in der Region (Pastor et al. 2015) und zu Überschwemmungen in anderen Teilen der Einzugsgebiete und weiterer angrenzender Gebiete.

Die Aufgabe der Landnutzung puffert bis zu einem gewissen Grad die Folgen der globalen Erwärmung ab. Daher ist auch die gesellschaftliche Wahrnehmung der Auswirkungen der Erwärmung in den mediterranen Regionen bislang begrenzt. Dürrebedingte Entlaubungs- und Mortalitätsereignisse können auftreten (Lloret et al. 2016), phänologische Veränderungen sind spürbar (bei Nutzpflanzen und Wildtieren; z.B. Gordo & Sanz 2005) und Bodenerosion wird beobachtet. Allerdings ist derzeit Greening noch der dominierende Trend, dies trägt auch zu geringeren Bodenverlusten bei (Keesstra 2007).

Mit zunehmender Häufigkeit von Dürren könnte sich das Gleichgewicht ändern und Browning könnte überhand nehmen und das Greening wieder ausgleichen. Wie weit der Wendepunkt erreicht ist und wann die Wasserverfügbarkeit begrenzt ist, ist derzeit offen. Kommt es zu einem weiteren Greening und könnte das Landmanagement das Erreichen dieses Ziels verzögern? Wo liegt die Schwelle?

Die dringende Notwendigkeit zur Lösung solcher Fragen ist inzwischen bekannt, ebenso eine globale Politik zur Reduzierung von Emissionen; angesichts der Bedeutung der Feinskala der Prozesse, sind gezielt auch lokale Maßnahmen wichtig; sie werden wahrscheinlich von lokalen Agenturen bislang unterschätzt.

Eine Politik kleiner und kontrollierter Feuer wäre wünschenswert, um letztlich Großbrände zu minimieren und damit ein nachhaltigeres Feuerregime zu schaffen. Dies kann durch die Einführung von vorgeschriebenen gezielten Brandeingriffen, die derzeit in vielen Ländern verboten sind, erreicht werden. Brände geringer Intensität können große Feuer mit hoher Intensität verhindern.

Darüber hinaus ist die Einführung von Weidetieren (z.B. Förderung der Weidewirtschaft) und kontrollierte Beweidung oder Wiederverwilderung natürlicher Pflanzenfresser möglicherweise hilfreich, solange sie mit Vorsicht eingeführt wird (z.B. Vermeidung von Überweidung, insbesondere in Umgebungen nach einem Brand). Andere Bewirtschaftungsoptionen, wie zum Beispiel Durchforstung, können auch an strategischen Punkten hilfreich sein, um die Wahrscheinlichkeit von Feuern zu verringern.

Eine angemessene Stadtplanung ist ebenfalls wichtig, weil halbstädtische Gebiete die Hauptquellen für Feuer sein können. In vielen mediterranen Ökosystemen ist Feuer eine Katastrophe nur dort, wo menschliche Infrastrukturen zu finden sind. Viele mediterrane Pflanzenarten sind gut an Brände angepasst, auch an Hochintensitäts-Brände (Keeley et al. 2012). Das heißt, die Schnittstelle zwischen Wildnis und Stadt kann ökologisch durch nachhaltige Brandregime mögliche soziale Katastrophen abmildern. Daher sollte die Zersiedelung in ihrer Ausdehnung klar begrenzt werden (z.B. durch abschreckende Besteuerung).

Kurzfristig setzen Feuer große Mengen an CO_2 frei. Längerfristig ist jedoch die Regeneration (und vor allem das Wiederaustreiben) eines Sekundärwalds, der schnell große Mengen an Kohlenstoff bindet, zu berücksichtigen. Daher können nach Feuern viele Gebüsch- und Waldgesellschaften zu Kohlenstoffsenken werden. Außerdem ist Holzkohle ein widerstandsfähiger Kohlenstoff und positiver Beitrag im Boden. Brände können letztlich sogar den Kohlenstoff Speicher erhöhen (Santín et al. 2015). Inwieweit ein vorgeschriebenes Feuer-Management in der Lage ist, die Quelle-Senke-Balance zu optimieren, bleibt offen, sollte aber eingehend studiert werden. Die Dominanz von Arten mit hoher Austriebskapazität nach einem Brand (oft mit großen unterirdischen Organen, wie Lignotuber; Pausas et al. 2018) machen das Studium dieser Balance in Mittelmeerökosysteme besonders geeignet.

Neben der kontrollierten Feuerbekämpfung muss die Dürre der Küstenregionen abgemildert werden. Dies könnte durch massive Begrünung des Tieflandes um die Küste, einschließlich der degradierter Wildgebiete (Begrünung mit einheimischen Pflanzen) erfolgen, ebenso auch durch Begrünung semiurbaner und urbaner Bereiche. Dazu gehört auch die Förderung von Alleen, die Schaffung großer städtischer und halbstädtischer Gärten und Parks und die Erhaltung und Vergrößerung aller einheimischen Vegetation entlang der Küste. Der Wasserkreislauf stromaufwärts würde durch die Verdunstung dieser Vegetation (einheimisch, städtisch und halbstädtisch) profitieren (Ellison et al. 2012).

Diese Aktionen hätten auch einen sozialen Nutzen, der weit über die Aktivierung des Wasserkreislaufs (Willis & Petrokofsky 2017) hinausgeht. Höchste Priorität müsste die Erhaltung, die Wiederherstellung und Erweiterung von Küstensümpfen und Feuchtgebieten sein, weil sie sehr wichtige Wassereinträge in das

System, zusätzlich zu den Hotspots der Biodiversität und Kohlenstoffsenken (Howard et al. 2017) erbringen.

Nebelkollektoren, die in den Küstengebirgen installiert werden könnten, würden die Gewinnung von Wasser aus der Meeresbrise (Nebel, Wolken) erleichtern (Kaseke et al. 2017, Kim et al. 2017). Es könnte für die Landwirtschaft zur Bewässerung verwendet werden, bei gleichzeitiger Wassereinsparung und Reaktivierung des lokalen und regionalen Wasserkreislaufs.

Solche Mechanismen, die im kleinen Maßstab wirken und zusammen mit globalen Treibern (CO_2-Anreicherung und Klimaerwärmung) interagieren, haben Auswirkungen auf die aktuellen Vegetationsveränderungen im Mittelmeergebiet. Jedes Modell, das die Zukunft der Vegetation und des Klimas vorhersagen soll, muss diese lokalen Mechanismen einbeziehen. Werden diese nicht in einem angemessenen Maßstab berücksichtigt, wird man wahrscheinlich auch nicht zu schlüssigen Vorhersagen (Tierney et al. 2017) kommen. Viele lokale Richtlinien und Management-Maßnahmen können einen Beitrag zur Reduzierung des globalen Wandels bewirken.

Greening und Browning weltweit

Nach der Betrachtung der Verhältnisse im Mittelmeergebiet kann man die anderen Regionen, in denen greening und browning bedeutsam sind, vergleichen.

Wie schon ausgeführt, kann das globale Greening überschätzt werden (*Abb. 3.11-2*), wenn man einseitig testet (Cortes et al. 2021). Nach Anwendung von Korrekturen durch Mehrfachtests stellt man ein Greening von 15,3% der terrestrischen Landoberfläche fest, im Gegensatz zu 35,2% ohne Korrektur. In ähnlicher Weise kann das Greening bei den einzelnen Kontinenten (*Abb. 3.11-2b*) ein Mehrfaches größer sein, wenn keine Korrektur für mehrere Tests durchgeführt wird. Vor allem in Australien (26,1% reduziert auf 1%) und Südamerika (26,7% auf 5,2% reduziert) beobachtet man eine starke Verringerung des abgesicherten Greenings. Die Diskrepanz in der Höhe der Überschätzung nach Kontinenten kann besser verstanden werden mit Blick auf die Klimazonen und den Landnutzungstyp. Dies zeigt, dass das unsichere Greening in nicht-holziger Vegetation doppelt so häufig auftritt wie bei Wald-Vegetation (*Abb. 3.11-2c*), während es für Ackerland sehr wenig unsicheres Greening gibt. Dies steht im Einklang mit früheren Studien, die ein deutliches Greening von Ackerland beobachtet haben (De Jong et al. 2011). Piao et al. (2020) beobachteten auch ein starkes Greening in bewaldeten Regionen und Biomen mit geringem menschlichen Fußabdruck, was mit dem Großteil des bestätigten Greening übereinstimmt, das man in gemäßigten und kontinentalen Klimazonen feststellen kann. Besonders groß ist die Überschätzung bei nicht-holziger Vegetation innerhalb tropischer und trockener Klimazonen (*Abb. 3.11-2c*). In tropischen Regionen wird eine große Unsicherheit durch die Sättigung des LAI in dichter Vegetation verursacht, zusätzlich zu Wolken- und Aerosolverunreinigungen, während Unsicherheiten im semiariden Klima und spärlicher Vegetation auf die Empfindlichkeit der Vegetationsindizes gegenüber Bodenänderungen zurückzuführen sein könnten (Piao et al. 2020).

Die Verwendung des Mittelwerts oder des Medians zur Aggregation der Jahreswerte kann die Ergebnisse deutlich beeinflussen. Sowohl der Mittelwert als auch der Median erkennen ähnliche Greening-Bereiche, ein Browning wird jedoch nur bei Verwendung des Medians erkannt (*Abb. 3.11-3*). Während der Mittelwert

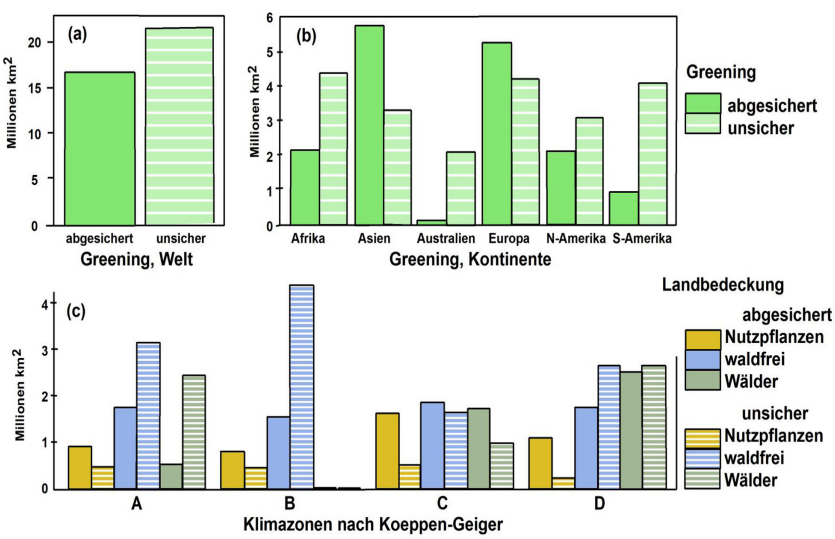

Abb. 3.11-2: *Globales Greening, in Mio. km². Klimazonen im Vergleich zum Landbedeckungstyp nach (a) Gesamtlandfläche, (b) Kontinenten und (c) Koeppen-Geiger (KG). Dunkle Farbe zeigt (bei a und b) ein Greening an, das auch nach der Korrektur für den Mehrfachhypothesentest (α = 0,10) verbleibt, während hellere Farbgebung eine unsichere Greening-Region anzeigt, d.h. es ist ein zusätzliches Greening, das nur erkannt wird, wenn keine Mehrfachtestkorrektur durchgeführt wird. Die Köppen & Geiger-Klimazonen sind: A, tropisch; B, trocken; C, gemäßigt; und D, kontinental. (Cortes et al. 2021. Creative Commons. CC licenses BY.*

ein Greening in 16,6 Mio. km² (273.247 Rasterzellen) der Landoberfläche und kein Browning erkennt, ergibt sich durch den Median ein Greening auf 15,8 Mio. km² (258.385 Rasterzellen) und eine Bräunung in 1,1 Mio. km² (26.241 Rasterzellen) der Landoberfläche. Bei Verwendung des Jahresmedians ergeben sich zwei Browning Flächen: eine in Sibirien und eine in Kanada. Frühere Studien haben auf eine Umkehr oder einen Stillstand des Greening in hohen Breiten hingewiesen (Gonsamo et al. 2019) und argumentiert, dass ein erhöhtes Pflanzenwachstum im Frühjahr und ein früherer Beginn der Vegetationsperiode zu einem verringerten Sommerwachstum und einem verringerten Spitzenwert des saisonalen maximalen Pflanzenwachstums führt. Hier sind noch weitere Studien hochaufgelöster Fernerkundung und besserer Auswertung erforderlich.

Bei der Auswertung gibt es eine Verschiebung von den meisten Gitterzellen, die ein Browning beim 0,10-Quantil anzeigen, zu den meisten Gitterzellen, die ein Greening beim 0,90-Quantil anzeigen (*Abb. 3.11-3*). Der Großteil der Verteilung verschiebt sich von Browning zu Greening, was auf eine Zunahme der saisonalen Amplitude rund um den Globus hinweist. Regionen mit einem signifikanten Anstieg der saisonalen Amplitude von LAI wurden auch zuvor beobachtet; sie könnten auf Trends bei der Entwaldung, Düngung und Auswirkungen des Klimawandels und/oder Änderungen in der Bewirtschaftung zurückzuführen sein (Kraemer et al. 2020). Die Vegetationsperiode in den höheren Breiten expandiert (Ziska et al. 2011). Dies kann zu den Browning-Trends bei den Quantilen 0,10, 0,25 und 0,50 in den nördlichen Breiten führen, da jedes Jahr niedrigere LAI-Werte festgestellt werden. Zuvor fehlten diese Werte (in den Datensätzen als NA gekennzeichnet) und trugen nicht zum Jahresaggregat bei.

Im Gegensatz zum Median erkennt der Mittelwert bei der Analyse der Jahrestrends keine Bräunung. Dies kann durch die Zunahme der Spitzensommervegetation erklärt werden, die im Gegensatz zur längeren Vegetationsperiode die Greening-Trends in den eurasischen borealen Wäldern vorantreibt (Gao et al. 2020). Der Mittelwert wird von diesen Sommerspitzen stärker beeinflusst als der Median und erkennt daher kein Browning. Ein starker Anstieg der jahreszeitlichen CO_2-Amplitude (mindestens 50%) wurde auch in allen Breitengraden nördlich des 45°N beobachtet, eine geringere Ausdehnung (26%) zwischen 35°N und 45°N (Graven et al. 2013). Es wird argumentiert, dass dieser Anstieg dadurch verursacht werden kann, dass die Ökosysteme stärker wachsen und schrumpfen als zuvor. Diese ökologischen Veränderungen werden durch die zuvor auf der Nordhalbkugel beobachteten zunehmenden und abnehmenden Vegetationstrends bestätigt (Myneni et al. 1997), die durch die strengen

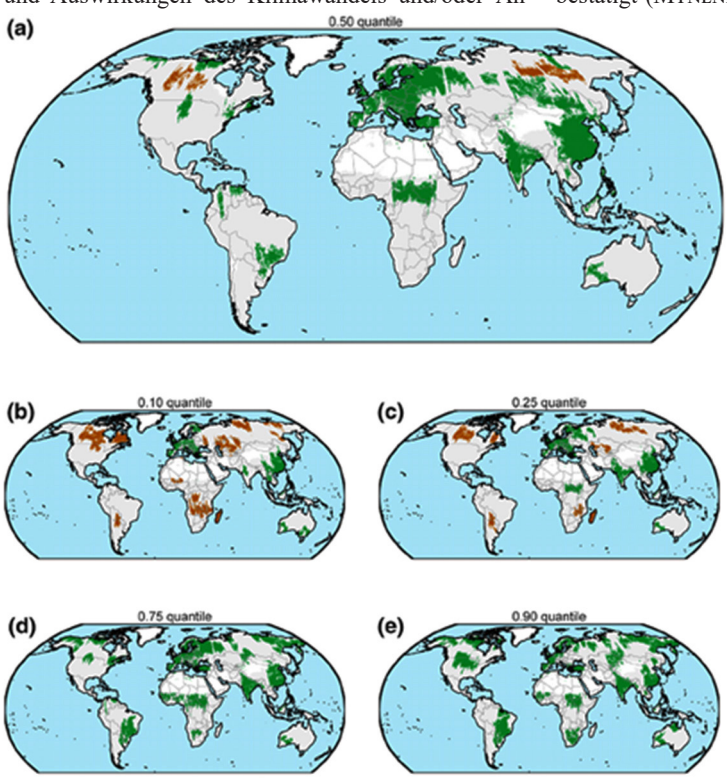

Abb. 3.11-3 *Signifikante LAI-Trends im BU AVHRR LAI-Datensatz, nach Korrektur für das Testen mehrerer Hypothesen unter Verwendung des (a) 0,50-Quantils (Median) und der jährlichen (b) 0,10, (c) 0,25, (d) 0,75 und (e) 0,90 Quantile. Grün (braun) zeigt einen signifikant steigenden (fallenden) Trend bei α = 0,10 an. Gitterzellen ohne statistische Signifikanz sind grau dargestellt. Kein Hypothesentest ist für Rasterzellen in Weiß (unfruchtbares Land) durchgeführt. Blau steht für Wasser. LAI = Blattflächenindex (Cortes et al. 2021, Creative Commons. CC BY)*

Signifikanztests untermauert werden. Darüber hinaus konzentrieren sich die Regionen, in denen eine Zunahme der saisonalen Amplitude des LAI festzustellen ist, auch nördlich des 35°N. Bei Betrachtung einer vergleichbaren Zeitspanne (2000–2018) gibt es diese Konsistenz nicht mehr. Nur wenige Regionen werden von mehr als einem Datenprodukt erfasst, z.B. wird das Greening im Südosten Chinas nur von BU AVHRR LAI und BU MODIS C6 und das Greening im Norden Kanadas nur von BU MODIS C6 und SPOT/PROBA V erfasst. In allen anderen Datensätzen erkennt der LTDR Browning-Umfärbung im Amazonaswald, Zentralafrika, Madagaskar und Indien. Diese Ergebnisse können durch mehrere Effekte verursacht werden. Wenn beispielsweise die Zeitspanne verkürzt wird, kann es sein, dass es nicht mehr genügend Beweise gibt, um viele Greening-Trends zu erkennen.

Alle Datensätze, die bis 1981 zurückreichen, BU AVHRR LAI, NOAA CDR und LTDR, stimmen über die Greenings-Regionen in Europa, China, Indien, Nordamerika, Brasilien, den Sahel und Sibirien überein.

Literatur

BOLLE, H.-J. (2003): Climate, climate variability, and impacts in the Mediterranean area: An overview. P. 5–86. In: Bolle, H.-J. (ed.) Mediterranean Climate: Variability and Trends. Springer/Berlin.

CORTES, J., M. D. MASHECHA, M. REICHSTEIN et al. (2021): Where are global vegetation greening and browning trends significant? Geophysical Research letters 48, e2020GL091496.

DEBUSSCHE, M., J. LEPART & A. DERVIEUX (1999): Mediterranean landscape changes: Evidence from old postcards. Global Ecology and Biogeography Letters 8: 3–15.

DE JONG, R., S. DE BRUIN, A. DE WIT et al. (2011): Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. Remote Sensing of Environment, 115: 692–702.

ELLISON, D., M. N. FUTTER, K. BISHOP (2012): On the forest cover–water yield debate: From demand- to supply-side thinking. Global Change Biology 18: 806–820.

FALCUCCI, A., L. MAIORANO & L. BOITANI (2007): Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation. Landscape Ecology 22: 617–631.

GAO, X., S. LIANG & J. SAUER (2020): Greening hiatus in Eurasian boreal forests since 1997 caused by a wetting and cooling summer climate. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 125: e2020JG005662.

GIORGI, F. & P. LIONELLO (2008): Climate change projections for the Mediterranean region. Global and Planetary Change 63: 90–104.

GONSAMO, A., M. T. TER-MIKAELIAN, J. M. CHEN & J. CHEN (2019): Does earlier and increased spring plant growth lead to reduced summer soil moisture and plant growth on landscapes typical of tundra-taiga interface? Remote Sensing, 11: 1989.

GORDO, O. & J. J. SANZ (2005): Phenology and climate change: A long-term study in a Mediterranean locality. Oecologia 146: 484–495.

GRAVEN, H. D., R. F. KEELING, S. C. PIPER et al. (2013): Enhanced seasonal exchange of CO_2 by northern ecosystems since 1960. Science, 341: 1085–1089.

GUIOT, J. & W. CRAMER (2016): Climate change: The 2015 Paris Agreement thresholds and Mediterranean basin ecosystems. Science 354: 465–468.

HOWARD, J., A. SUTTON-GRIER, D. HERR et al. (2017): Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. Frontiers in Ecology and the Environment 15: 42–50.

KASEKE, K. F., L. WANG & M. K. SEELY (2017): Nonrainfall water origins and formation mechanisms. Science Advances 3: e1603131.

KEELEY, J. E., W. J. BOND, R. A. BRADSTOCK et al. (2012): Fire in Mediterranean Ecosystems: Ecology, Evolution, and Management. Cambridge University Press.

KEESSTRA, S. D. (2007): Impact of natural reforestation on floodplain sedimentation in the Dragonja basin, SW Slovenia. Earth Surface Processes and Landforms 32: 49–65.

KIM, H., S. YANG, S. R. RAO et al. (2017): Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight. Science 356: 430–434.

KIRKBY, J. et al. (2016): Ion-induced nucleation of pure biogenic particles. Nature 533: 521–526.

KRAEMER, G., G. CAMPS-VALLS, M. REICHSTEIN & M. D. MAHECHA (2020): Summarizing the state of the terrestrial biosphere in few dimensions. Biogeosciences, 17: 2397–2424.

LLORET, F., E. G. RIVA, I. M. PÉREZ-RAMOS et al. (2016): Climatic events inducing die-off in Mediterranean shrublands: Are species' responses related to their functional traits? Oecologia 180: 961–973.

MILLÁN, M. M. (2014): Extreme hydrometeorological events and climate change predictions in Europe. Journal of Hydrology 518: 206–224.

MILLÁN, M.M., ESTRELA, M.J., SANZ, M.J. et al. 2005: Climatic feedbacks and desertification: The Mediterranean model. Journal of Climate 18: 684–701

MYNENI, R. B., C. D. KEELING, C. J. TUCKER et al. (1997): Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature 386: 698–702.

PASTOR, F., J. A. VALIENTE & M. J. ESTRELA (2015): Sea surface temperature and torrential rains in the Valencia region: Modelling the role of recharge areas. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 15: 1677–1693.

PAUSAS, J. G. (2004): Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). Climatic Change 63: 337–350.

PAUSAS, J. G. & S. FERNÁNDEZ-MUÑOZ (2012): Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: From fuel-limited to drought-driven fire regime. Climatic Change 110: 215–226.

PAUSAS, J. G. & J. E. KEELEY (2014): Abrupt climate-independent fire regime changes. Ecosystems 17: 1109–1120.

PAUSAS, J. G. & M. M. MILLAN (2019): Greening and browning in a climate change hotspot: the Mediterranean basin. BioScience 69: 143-151

PIAO, S., X. WANG, T. PARK et al. (2020): Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. Nature Reviews Earth & Environment 1: 14–27.

PIÑOL, J., M. CASTELLNOU, K. J. BEVEN (2007): Conditioning uncertainty in ecological models: Assessing the impact of fire management strategies. Ecological Modelling 207: 34–44.

SANTÍN, C., S. H. DOERR, C. M. PRESTON & G. GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ (2015): Pyrogenic organic matter production from wildfires: A missing sink in the global carbon cycle. Global Change Biology 21: 1621–1633.

TIERNEY, J. E., F. S. R. PAUSATA & P. B. DE MENOCAL (2017): Rainfall regimes of the Green Sahara. Science Advances 3: e1601503.

VAYREDA, J., J. MARTINEZ-VILALTA, M. GRACIA & J. RETANA (2012): Recent climate changes interact with stand structure and management to determine changes in tree carbon stocks in Spanish forests. Global Change Biology 18: 1028–1041.

WILLIS, K. J. & G. PETROKOFSKY (2017): The natural capital of city trees. Science 356: 374–376.

ZISKA, L., K. KNOWLTON, C. ROGERS et al. (2011): Recent warming by latitude associated with increased length of ragweed pollen season in central North America. Proceedings of the National Academy of Sciences 108: 4248–4251.

Kontakt:

Prof. i. R. Dr. Siegmar-W. Breckle
Ökologie, Bielefeld
sbreckle@gmx.de

Dr. José L. Lozán
Wissenschaftliche Auswertungen
JL-Lozán@t-online.de

Breckle, S.-W. & J. L. Lozán (2021): Greening (mehr Grün) und Browning (mehr Braun), wie sind die Trends? In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl & D. Kasang (Hrsg.). Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung. S. 162-167. Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO, Hamburg. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.22