

3.15 Anthropogener Klimawandel und beobachtete Verschiebungen von Vegetationszonen

THOMAS HICKLER

Anthropogener Klimawandel und beobachtete Verschiebung von Vegetationszonen: Die globale Verteilung von Vegetationszonen wird überwiegend durch das Klima bestimmt. Mit der Erwärmung insbesondere der letzten Jahrzehnte hat sich vielerorts in der Welt die Waldgrenze weiter nach Norden oder in größere Höhen verschoben, wobei in bspw. den Alpen die Landnutzung oft entscheidender ist als der Klimawandel. Außerdem kann man global vermehrt Anzeichen für ein zumindest teilweise Trocken- und Hitzestress-bedingtes Ansteigen der Baummortalität beobachten, in einigen Fällen das Absterben ganzer Bestände oder der dominanten Baumarten in größeren Regionen. Dies betrifft vor allem das westliche Nordamerika. Bspw. in Süddeutschland und vielen Gegenden der nördlichen Breiten hat der Klimawandel jedoch bisher durchaus positive Effekte auf das Pflanzenwachstum gehabt. In einigen Savannengebieten beobachtet man eine zunehmende Verbuschung, die eventuell maßgeblich durch pflanzenphysiologische Effekte der erhöhten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre verursacht wird und das Ökosystem Savanne mit ihrer besonderen Tier- und Pflanzenwelt bedrohen könnte. Weil Verschiebungen von Vegetationszonen zeitverzögert auftreten, und weil der Klimawandel in der Zukunft wahrscheinlich erheblich stärker wird als bisher, ist jedoch davon auszugehen, dass zukünftige Veränderungen erheblich schwerwiegender ausfallen als bisher beobachtet, mit erheblichen Effekten für die biologische Vielfalt, die in der Regel eng mit einer bestimmten Vegetationszone zusammenhängt.

Anthropogenic climate change and observed vegetation zone shifts: Climate determines the distribution of global vegetation zones. In many areas across the globe, the warming, in particular during the last decades, has resulted in shifts of the tree line northwards and to higher altitudes. However, in the European Alps, for example, changes in land use are often more important for the tree line than climate change. There is also increasing evidence for a global trend towards more drought and heat stress induced tree mortality, in some cases affecting most dominant trees over large areas, in particular in western North America. But, for example, in southern Germany and many areas in the high northern latitudes, climate change had positive effects on vegetation growth. In some savannah areas, an increasing shrub encroachment has been observed, which might be largely driven by plant-physiological effects of an increasing atmospheric concentration of CO₂. This development might generally threaten savannahs and their unique flora and fauna. As vegetation zone shifts occur with a substantial time-delay and because future climate change will probably be larger than during the recent past, much more substantial shifts should be expected in the future, with pronounced effects on biodiversity, which is often strongly linked with certain vegetation zones.

Der Klimawandel führt nicht nur dazu, dass einzelne Arten ihre Areale verschieben (siehe 3.8 - Kap. METZING), sondern es verschieben sich auch ganze Vegetationszonen, wie beispielsweise die Nadelwälder der Taiga. Wenn sich die Vegetationszonen verschieben, bedeutet das, dass viele der Arten, die an einen bestimmten Vegetationstyp gebunden sind, ihr Habitat verlieren oder in andere Klimazonen abwandern müssen. Dementsprechend werden vom Großklima bedingte Vegetationstypen und ihre typische Tierwelt oft als Biom bezeichnet (GEBHARDT et al. 2007), bspw. das Biom der tropischen immergrünen Wälder. Auch eine Vielzahl der für den Menschen wichtigen Ökosystemdienstleistungen verändert sich, wenn sich der Vegetationstyp ändert. Um geeignete Anpassungsstrategien zu entwickeln, ist es deshalb wichtig, Warnsignale in Bezug auf Vegetationszonen zu analysieren und zu verstehen.

Verschiebung der Waldgrenze

Die Waldgrenze im Norden oder in den Bergen ist eine der markantesten Vegetationsgrenzen auf der Erde. Global ist die Waldgrenze mit einer bestimmten mittleren Temperatur oder Temperatursumme der Wachstumsperiode korreliert (PRENTICE et al. 1992, KÖRNER 2012). Weil sich weite Teile, insbesondere der Arktis, stärker er-

wärmt haben als der Rest der Welt, würde man erwarten, dass sich die Waldgrenze verschoben hat. Tatsächlich hat man in den letzten Jahrzehnten vielerorts in der Arktis eine erhöhte Biomasse-Produktivität von Sträuchern und in einigen Fällen auch eine Verschiebung der Waldgrenze nach Norden beobachtet (RICHTER-MENGE et al. 2007). Eine globale Analyse der vorhandenen Studien zu Verschiebungen der Baumgrenze seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts hat ergeben, dass sich Bäume jetzt in 52% der Fälle weiter im Norden oder in höheren Regionen etablieren. Ein Rückzug der Baumgrenze wurde nur in einem Prozent der Fälle berichtet, und vielerorts gab es keinen eindeutigen Trend (HARSCH et al. 2009). Dieses Ergebnis verdeutlicht auch, dass viele Faktoren die Waldgrenze bestimmen, nicht nur die Temperatur. In den Alpen z.B. sind die meisten Waldgrenzen nicht natürlich, sondern überwiegend menschgemacht. Dementsprechend ist hier die Nutzung, bspw. als Weideflächen, oft wichtiger als der Klimawandel (GHRIG-FASEL et al. 2007). In Teilen von Skandinavien, wo die Landnutzung nicht so intensiv ist (überwiegend Beweidung durch Rentiere), haben die Bäume an der Waldgrenze sich mit dem Temperaturanstieg seit Beginn des 20. Jahrhunderts in mehreren Gebieten markant in größere Höhen ausbreitet, um bis zu 200 m (Abb. 3.15-1, KULLMAN 2010).

Paläoökologische Untersuchungen legen ebenfalls nahe, dass die Baumgrenze in Skandinavien in Zeiten wärmeren Klimas, bspw. des mittleren Holozäns vor ca. 6.000 Jahren, erheblich weiter nördlich war als heute (PRENTICE et al. 1996). Simulationen mit Klima- und Vegetationsmodellen für die Zukunft ergeben sehr starke Verschiebungen der Taiga-Tundra Grenze nach Norden und der Waldgrenze in Gebirgsregionen in höhere Lagen (z.B. GONZALEZ et al. 2010). Weil die dunkleren Wälder mehr Strahlung absorbieren als die leichter von Schnee bedeckte Tundra, könnte eine solche Verschiebung der nördlichen Waldgrenze auch einen verstärkenden Effekt auf die globale Erwärmung haben (positive Rückkopplung; BETTS et al. 2000, SETTELE et al. 2014). Eine markante Verschiebung der Waldgrenze würde viele der Tiere und Pflanzen bedrohen, die an ein Leben in der Tundra bzw. oberhalb der Baumgrenze in den Bergen angepasst sind.

Verschiebungen der Grenze zwischen temperaten Laubwäldern und borealen Nadelwäldern

Die nördliche Grenze der temperaten Laubwälder, welche ohne menschlichen Einfluss auch den überwiegenden Teil Zentraleuropas und Deutschlands bedecken würden, ist durch die Länge und Temperatur der Vegetationsperiode sowie durch die minimale Temperatur im Winter (extremer Frost) bedingt. Dementsprechend würde man erwarten, dass die Erwärmung seit Beginn der industriellen Revolution bereits eine Verschiebung der Laubwälder nach Norden und in höhere Lagen auf Kosten der an kältere Bedingungen angepassten Nadelwälder bedingt hat. Allerdings treten solche Veränderungen mit einer starken Verzögerung auf, weil sich die Laubbäume erst in Konkurrenz mit Nadelbäumen durchsetzen müssen. Eine solche Sukzession



Abb. 3.15-1: Ein Beispiel für Veränderungen der Baumgrenze in Schweden. In dieser Landschaft gab es zu Beginn des 20. Jahrhunderts keine Bäume. Die Waldgrenze ist seitdem um 130 m nach oben gewandert. Mt. Lillskarven, 1.020 m über NN. 16 July 2006 (Quelle: KULLMAN 2010) (Mit freundlicher Genehmigung von Leif Kullman).

kann Hunderte von Jahren dauern. Dementsprechend, und weil Förster die Zusammensetzung unserer Wälder maßgeblich bestimmen, hat man eine Verschiebung der temperaten Laubwälder bisher nur vereinzelt beobachtet (z.B. BECKAGE et al. 2008). Temperate Laubwälder waren auch zur Zeit des wärmeren Klimas im mittleren Holozän in Südschweden weiter nach Norden verbreitet als heute (PRENTICE et al. 1996). In der Forstwirtschaft in Deutschland setzt sich allmählich die Einsicht durch, dass die großflächigen, nicht natürlichen Kiefern- und Fichten-Monokulturen hierzulande in Zeiten des Klimawandels nicht mehr zeitgemäß sind (HICKLER et al. 2012a). U. a. hat diese Erkenntnis dazu geführt, dass der Anteil der Laubbäume im deutschen Wald seit 2002 gestiegen ist (Bundeswaldinventur; <https://www.bundeswaldinventur.de/index.php?id=706>). Für die biologische Vielfalt in unseren Wäldern ist diese Entwicklung positiv (HICKLER et al. 2012a).

Insbesondere die Fichte, welche natürlicherweise in Deutschland nur in Höhenlagen über ca. 800 m dominant ist (GEBHARDT et al. 2007), könnte bei einer starken Klimaerwärmung zum Hochrisikobaum werden. Fichten leiden besonders stark unter Sommer-trockenheit, und die dominierenden Monokulturen sind anfällig für Stürme. Außerdem könnten ihr auch zunehmend milde, atlantische Winter zu schaffen machen, da die Fichte eine eher kontinentale Baumart ist (HICKLER et al. 2012a), und milde Winter begünstigen Borkenkäfer, welche Fichtenbestände großflächig zerstören können (siehe Kap. 3.14 - KRENGEL & SEIDEL). Ein Massenbefall kann insbesondere in Verbindung mit Sturmschäden auftreten, weil die umgefallenen bzw. abgestorbenen Bäume ideale Brutstätten für Borkenkäfer darstellen. Deswegen sind Förster nach Sturmschäden bemüht, das Totholz möglichst schnell aus dem Wald zu holen. Wenn das nicht passiert, wie Mitte der 1980er und Anfang der 1990er Jahre im Nationalpark Bayerischer Wald, kann es zu einem großflächigen Befall und zum Absterben ganzer Bestände kommen (Abb. 3.15-2). Wenn wenig genutzte, eher natürliche Bergwälder mit hoher Habitatkontinuität betroffen sind, führt das auch zu einer Gefährdung der an diese Wälder gebundenen Arten. Fichtenwälder der Hochlagen in Deutschland beherbergen bspw. eine spezialisierte Käferfauna, mit einigen auch weltweit sehr seltenen Arten (HICKLER et al. 2012a).

In Deutschland stellt der Waldumbau hin zu mehr Laubbäumen jedoch eine erhebliche Herausforderung dar. Einerseits führen die hohen Wilddichten in unseren Wäldern dazu, dass eine gute Verjüngung von Laubbäumen manchmal nur mit teuren Zäunen zu erreichen ist. Fichte und Kiefer werden erheblich weniger verbissen als die meisten Laubbäume. Andererseits fragt die Hol-

zindustrie vor allem Nadelholz nach, weil dieses in den Sägewerken besser verarbeitet werden kann, insbesondere, wenn lange Balken für die Bauindustrie benötigt werden. Als Alternative für die Fichte wird zurzeit vor allem die aus dem westlichen Nordamerika stammende Douglasie eingesetzt (HICKLER et al. 2012a). Sie trägt Trockenheit erheblich besser. Die heimische Tanne wäre auch besser als die Fichte an den erwartenden Klimawandel angepasst; sie leidet allerdings besonders stark am Verbiss durch das Wild (TINNER et al. 2016).

In den Rocky Mountains und angrenzenden Regionen kam es um die Jahrtausendwende zu viel verheerenden Waldschäden durch Borkenkäfer. Zwischen 1997 und 2010 hat eine Epidemie des »mountain pine beetles« (*Dendroctonus ponderosae*) zu einem massiven von Satelliten klar zu erkennenden Absterben oder starken Schäden der dominanten Kiefern auf einer Fläche von einer Millionen ha geführt. Man nimmt an,



Abb. 3.15-2: In den Hochlagen des Nationalparks Bayerischer Wald, wie hier am Rachel, hat in naturnahen Nadelwäldern eine Borkenkäfergradation um die Jahrtausendwende zu einem flächigen Absterben der montanen Fichtenpopulation geführt. Foto: C. Beierkuhnlein (Quelle: HICKLER et al. 2012a).

dass die Bäume durch Trockenheit geschwächt wurden und gleichzeitig milde Winter das Überleben und die Entwicklung der Käfer begünstigt haben. Ähnliche Epidemien gab es zwar auch in den 1930ern, aber die Trockenperiode war kürzer als die jetzige. Bei der derzeitigen Klimaentwicklung ist nicht anzunehmen, dass sich die Situation entscheidend verbessern wird (WEED et al. 2013). Entsprechend befürchtet man in Kanada, dass die Wälder dort in Zukunft trotz generell günstigeren Klimas aufgrund von mehr Schädlingsbefall und häufigeren Feuern eventuell nicht mehr Biomasse und Kohlenstoff speichern werden als heute (KURZ et al. 2008).

Verschiebungen der Vegetationszonen in trockenen Regionen

In Regionen, wo die Wasserverfügbarkeit das Pflanzenwachstum primär begrenzt, spielen Veränderungen der Temperatur eine untergeordnete Rolle. Die Dynamik ist hier oft ungleich komplexer, u.a. weil Feuer eine sehr wichtige Rolle spielen. Hierzulande vergisst man oft, dass die meisten Ökosysteme dieser Welt (inklusive der borealen Wälder im Norden) regelmäßig brennen (GIGLIO et al. 2013) und viele Arten daran angepasst bzw. sogar darauf angewiesen sind.

Verbuschung von Savannen durch eine erhöhte CO₂ Konzentration in der Atmosphäre?

Savannen haben sich erst im Miozän, vor 10 bis 15 Mio. Jahren, weltweit stark ausgebreitet, weil die CO₂ Konzentration gesunken ist und das Klima saisonaler wurde. Mit der Öffnung der vormals überwiegend bewaldeten Landschaften entstand auch die für die heutigen Savannen typische Tierwelt, mit großen grasfressenden Tieren, die in einigen Fällen in beeindruckenden großen Herden durch die Landschaft ziehen. Die Krautschicht in Savannen wird von Gräsern mit sogenannter C₄-Fo-

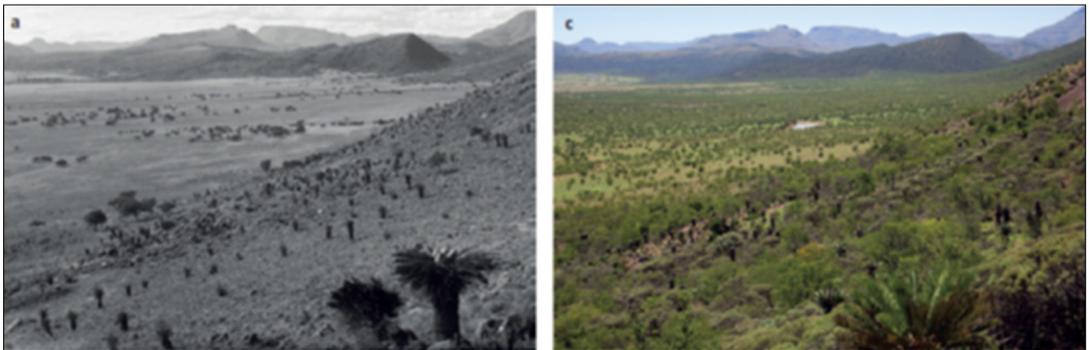


Abb. 3.15-3: Anstieg der Baumbedeckung in der Nähe von Queenstown, östliche Kapregion, Südafrika zwischen 1925 (CO₂ Konzentration der Atmosphäre 0,0305%; Foto: I.B. Pole-Evans, Nationales Südafrikanisches Botanisches Institut) und 2011 (CO₂ Konzentration der Atmosphäre 0,0395%; Foto: J. Puttick, Einheit für Pflanzennaturschutz, Universität Cape Town). Oft kann eine solche Entwicklung nicht durch Veränderungen des Klimas oder der Landnutzung erklärt werden (Quelle: BOND & MIDGLEY 2012) (Mit freundlicher Genehmigung von Guy Midgley und Phil. Transact of the Royal Society).

tosynthese dominiert. Diese Form der Fotosynthese ist eine Anpassung an niedrige CO_2 Konzentrationen in der Atmosphäre und Wassermangel (NABORS 2007) und hat im Miozän in den Tropen auf die Ausbreitung von Grasländern und Savannen auf Kosten des vorher vorherrschenden Waldes begünstigt (EDWARDS et al. 2010). Dass die Öffnung der Landschaft nicht überall gleichzeitig geschah, verdeutlicht jedoch auch, dass die fallende CO_2 Konzentration nur einer von mehreren für diese Entwicklung maßgeblichen Faktoren war (EDWARDS et al. 2010). Zunehmende Trockenperioden und Feuer haben ebenfalls eine wichtige Rolle gespielt (SCHEITER et al. 2012).

Durch den Anstieg der CO_2 Konzentration geht der Vorteil der Savannengräser mit C_4 -Fotosynthese zurzeit wieder zunehmend verloren. Gleichzeitig beobachtet man in vielen Savannen und Trockengebieten der Welt eine zunehmende Verbuschung (BOND & MIDGLEY 2012, MIDGLEY & BOND 2015, *Abb. 3.15-3*), welche zu einem Verlust an biologischer Vielfalt und einer geringen Wertigkeit von Savannen als Weideland führen kann (siehe Kap. 3.18 - DREBER & BLAUM).

Diese Verbuschung könnte ein Warnsignal für einen zunehmenden Verlust der heutigen Savannen und ihrer beeindruckenden Fauna in der Zukunft sein (HIGGINS & SCHEITER 2012). Allerdings ist die Bedeutung des CO_2 -Effektes umstritten, und Veränderungen der Landnutzung, insbesondere der Beweidung, spielen sicher auch eine wichtige Rolle. Das Zusammenspiel aller dieser Faktoren ist zurzeit nicht hinreichend geklärt (siehe Kap. 3.18 - DREBER & BLAUM).

Anzeichen vermehrten Baumsterbens durch Klimawandel

In über hundert Beständen bzw. Regionen verteilt über die ganz Welt hat man in den letzten Jahrzehnten einen Anstieg der Absterberate von Bäumen beobachtet, welchen man auf mehr Hitze- und Trockenstress zurückführt (ALLEN et al. 2010, SETTELE et al. 2014). In einigen Fällen sind ganze Bestände oder Regionen betroffen, sodass es sogar fragwürdig ist, ob die Waldbedeckung überhaupt erhalten werden kann und Verschiebungen von Vegetationszonen auftreten könnten (*Abb. 3.15-4*). Es ist jedoch schwierig, die Gründe in allen Fällen immer

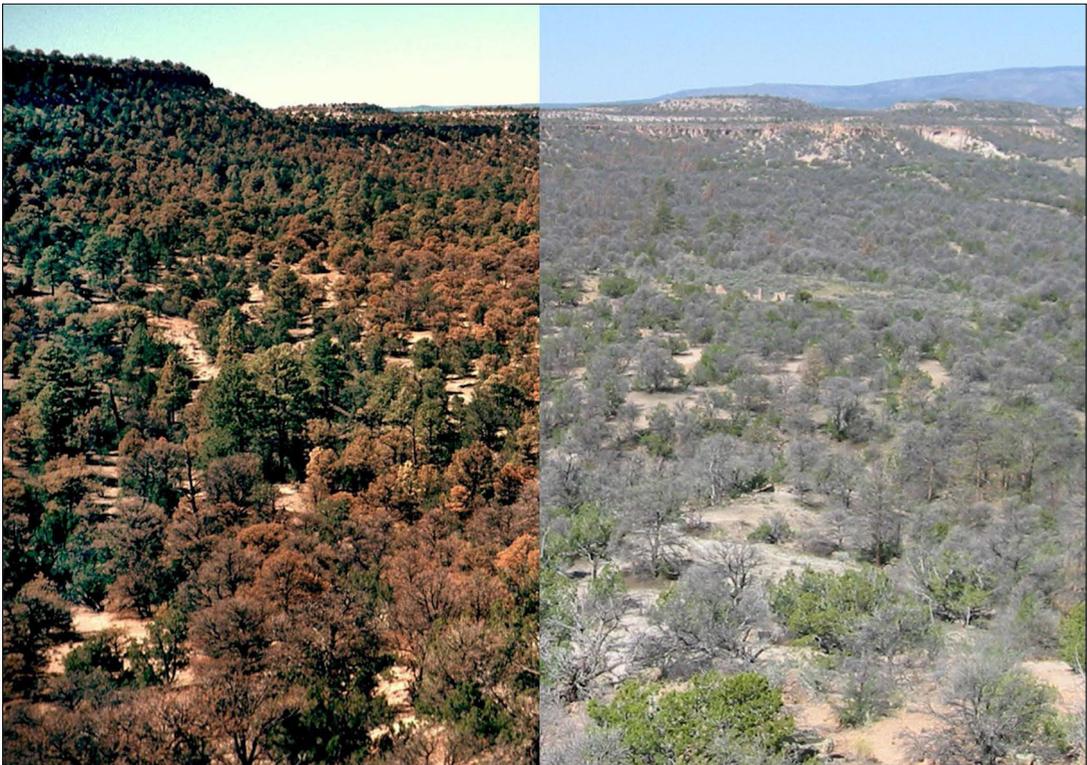


Abb. 3.15-4: Massives Absterben des Staatsbaumes des US-Bundesstaates New Mexico, eine Kiefer (*Pinus edulis*), in den Jemez Mountains in der Nähe von Los Alamos durch extreme Trockenheit. Die Kiefern sind eigentlich immergrün und haben im Herbst rot-braune Nadeln (2002, *links*). Im Mai des Jahres 2004 (*rechts*) haben die toten Kiefern ihre Nadeln verloren, sodass man die grauen Stämme sieht. Foto: Craig D. Allen, U.S. Geological Survey. Eine Fläche von 12.000 km^2 ist betroffen (BRECHEARS et al. 2005) (Foto mit freundlicher Genehmigung von Craig D. Allen).

eindeutig zu benennen, auch wenn man in den genannten Fällen den Klimawandel als wichtigsten Faktor vermutet (SETTELE et al. 2014, STEINKAMP & HICKLER 2015).

Allerdings hat der Klimawandel für Wälder vielerorts bisher auch positive Effekte gehabt. Fichten- und Buchenbestände in Süddeutschland bspw. wachsen heute erheblich besser als vor 50 bis 60 Jahren, was man überwiegend auf eine längere und wärmere Vegetationsperiode, sowie eine steigende Stickstoff-Deposition aus der Luft zurückführt (PRETZSCH et al. 2014). In gemäßigten und kalten Regionen führt eine Erwärmung, sofern sie nicht mit reduzierter Wasserverfügbarkeit einhergeht, in der Regel zu einer erhöhten pflanzlichen Produktivität (HÖLZEL et al. 2016). Dementsprechend beobachtet man von Satelliten eine Ergrünung der nördlichen Breiten weltweit, wobei es jedoch auch große regionale Unterschiede gibt und in einigen Gebieten das Pflanzenwachstum offenbar trotz Klimawandel sogar abgenommen hat (LUCHT et al. 2002, RICHTER-MENGE et al. 2007). Die Gründe für diese Variation sind nicht ganz verstanden. Variationen im Temperaturanstieg, Trockenstress und Feuer spielen wahrscheinlich eine wichtige Rolle.

In Deutschland könnte die Hitzewelle von 2003 auch ein Warnsignal gewesen sein. Damals gab es starke Schäden an allen Hauptbaumarten (MAKKONEN-SPIECKER 2005), und ein solcher Sommer könnte in einigen Jahrzehnten zum Normalfall werden (STOTT et al. 2004). Großflächiges Waldsterben gab es jedoch damals nicht, u.a. weil Bäume vereinzelte Trockenjahre oft noch ganz gut überstehen können, indem sie Kohlenstoff-Reserven aus den vorherigen Jahren nutzen. Wenn solche Ereignisse jedoch mehrmals hintereinander auftreten sollten, sind stärkere Schäden zu erwarten. Projektionen mit Klimaszenarien deuten darauf hin, dass in Europa einige Regionen im Mittelmeergebiet, wo heute noch Wald wachsen kann, in Zukunft zu trocken für Wald werden könnten (HICKLER et al. 2012b).

Fazit

Vegetationszonen haben angefangen, sich aufgrund des Klimawandels zu verschieben. In der Zukunft erwarten uns jedoch erheblich größere Veränderungen, weil die Verschiebungen zeitverzögert auftreten, und weil der erwartete Klimawandel erheblich größer ist als die Veränderungen des letzten Jahrhunderts. Die gesamte Spannbreite der Klimaprojektionen vom FN Weltklimarat beinhaltet zwar auch Erwärmungsszenarien von unter einem weiteren Grad bis zum Ende dieses Jahrhunderts. Die der geringen Erwärmung zugrunde liegenden Emissionsszenarien (Abnahme der globalen Emissionen ab 2020 und substanzielle Entfernung von

CO₂ aus der Atmosphäre ab ca. 2070, IPCC 2013) erscheinen jedoch zurzeit nicht realistisch. Dementsprechend erscheint eine mindestens doppelt so starke Erwärmung wie im letzten Jahrhundert realistischer, bei weiter starkem Anstieg der Emissionen mit einem nicht unerheblichen Risiko, dass die Erde sich 4-6 Grad im globalen Mittel bis Ende des Jahrhunderts erwärmen wird (IPCC 2013). Dies würde zu massiven Verschiebungen der globalen Vegetationszonen führen (GERTEN 2014), und damit zu einer Bedrohung vieler insbesondere hoch spezialisierter Arten mit geringen Ausbreitungspotenzial, sowie kalteadaptierter Arten, insbesondere in Gebirgsregionen, wo die Möglichkeiten zur Migration sehr begrenzt sind (SETTELE et al. 2014). Unsere Möglichkeiten, die Folgen der Klimaveränderung vorauszusagen, sind jedoch begrenzt. Eine Verschiebung der Waldgrenze in vielen Regionen ist relativ sicher. In Bezug auf andere Veränderungen, wie bspw. das Verbuschen von Savannen oder die Resilienz von Wäldern, sind die Projektionen jedoch sehr unsicher, u.a. weil nicht sicher ist, wie sich die Niederschlagsmuster in bestimmten Regionen verändern werden und weil das Verständnis der entscheidenden Prozesse oft noch nicht hinreichend ist. Für ein besseres Verständnis der Prozesse ist eine genaue Analyse der bisherigen Warnsignale unabdingbar.

Danksagung

Ich danke Mirjam Pfeiffer und Ricarda Prinz für kritisches Gegenlesen und Kommentare.

Literatur

- ALLEN, C. D., A. K. MACALADY, H. CHENCHOUNI, D. BACHELET et al. (2010): A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests, *For. Ecol. Manage.*, 259(4), 660-684, 2010.
- BECKAGE, B., B. OSBORNE, D. G. GAVIN, C. PUCKO et al. (2008): A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the Green Mountains of Vermont, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA (PNAS)*, 105, 4197-4202, doi:10.1073/pnas.0708921105, 2008.
- BETTS, R. A. (2000): Offset of potential carbon sink from forestation by decreases in surface albedo, *Nature* 408, 187-190, 2000.
- BOND, W. J. & G. F. MIDGLEY (2012): Carbon dioxide and the uneasy interactions of trees and savannah grasses. *Phil. Transact. of the Royal Society B-Biological Sciences* 367:601-612. doi:10.1098/rstb.2011.0182.
- BRESHEARS, D. D., N. S. COBB, P. M. RICH, K. P. PRICE et al. (2005): Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA (PNAS)*, 102, 15144-15148, doi:10.1073/pnas.0505734102, 2005.
- EDWARDS, E. J., C. P. OSBORNE, C. A. E. STROMBERG, S. A. SMITH et al. (2010): The Origins of C₄ Grasslands: Integrating Evolutionary and Ecosystem Science, *Science*, 328, 587-591, doi:10.1126/science.1177216, 2010.
- GEBHARDT H., R. GLASER, U. RADTHKE & P. REUBER (2007): *Geographie - Physische Geographie und Humangeographie*, Elsevier, 2007.
- GEHRIG-FASEL, J., GUIAN A. & N. E. ZIMMERMANN (2007): Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment?, *J. Veg. Sci.*, 18, 571-582, 2007.
- GERTEN, D. (2014): Klimawandel und Verschiebung der Vegetationszonen. In: LOZÁN, J. L., GRASSL, H., KARBE, L. & G. JENDRITZKY (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen,*

- Tiere und Menschen. 2. Auflage. Elektron. Veröffent. (Kap. 2.8) - www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de.
- GIGLIO, L., RANDERSON J. T. & G. R. VAN DER WERF (2013): Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *J. Geophys. Res.: Biogeosci.*, 118, 317-328, doi:10.1002/jgrg.20042, 2013.
- GONZALEZ, P., R. P. NEILSON, J. M. LENIHAN & R. J. DRAPEK (2010): Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecol. Biogeogr.*, 19, 755-768, doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x, 2010.
- HARSCH, M. A., P. E. HULME, M. S. MCGLONE & R. P. DUNCAN (2009): Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *IAWA*, 12, 1040-1049, 2009.
- HICKLER, T., A. BOLTE, B. HARTHARD, C. BEIERKUHNELEIN et al. (2012a): Folgen des Klimawandels für die Biodiversität in Wald und Forst. In: Mosbrugger V., G. Brasseur, M. Schaller & B. Stribny B (eds). *Klimawandel und Biodiversität – Folgen für Deutschland*, WBG, Darmstadt, Germany, 2012.
- HICKLER, T., K. VOHLAND, J. FEEHAN, P. A. MILLER et al. (2012b): Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. *Global Ecol. Biogeogr.*, 21,50-63, doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00613.x, 2012.
- HIGGINS, S. I. & S. SCHEITER (2012): Atmospheric CO₂ forces abrupt vegetation shifts locally, but not globally. *Nature*, 488(7410), 209-212, 2012.
- HÖLZEL, N., T. HICKLER, L. KUTZBACH, H. JOOSTEN et al. (2016): *Environmental Impacts - Terrestrial Ecosystems*, North Sea Region Climate Change Assessment, Springer International Publishing, pp 341-372, 2016.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. In: STOCKER, T. F., D. QIN, G-K. PLATTNER, M. TIGNOR et al. (eds.) - *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324, 2013.
- KÖRNER, C. (2012): *Alpine treelines*. Springer, Basel.
- KULLMAN, L. (2010): One Century of Treeline Change and Stability - Experiences from the Swedish Scandes. *Landsc. Online*, 17,1-31, 2010.
- KURZ, W. A., G. STINSON, G. J. RAMPLEY, C. C. DYMOND et al. (2008): Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA (PNAS)*, 105,1551-1555, 2008.
- LUCHT, W., I. C. PRENTICE, R. B. MYNENI, S. SITCH et al. (2002): Climatic Control of the High-Latitude Vegetation Greening Trend and Pinatubo Effect, *Science*, 296,1687-1689, 2002.
- MAKKONEN-SPIECKER, M. (2005): Trockenheit ist nicht gleich Trockenheit. *AFZ-Der Wald*, 164-167, 2005.
- MIDGLEY, G. F. & W. J. BOND (2015): Future of African terrestrial biodiversity and ecosystems under anthropogenic climate change. *Nat. Clim. Chang.*, 5,823-829, doi:10.1038/nclimate2753, 2015.
- NABORS, M. W. (2007): *Botanik*. Pearson Studium Deutschland GmbH, München, 2007.
- PRENTICE, C., W. CRAMER, S. HARRISON, R. LEEMANS, et al. (1992): A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *J. Biogeogr.*, 19,117-134, 1992.
- PRENTICE, I. C., J. GUIOT, B. HUNTLEY, D. JOLLY et al. (1996): Reconstructing biomes from palaeoecological data: a general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. *Clim. Dyn.*, 12,185-194, 1996.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, G. SCHÜTZE, E. UHL et al. (2014): Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nat Commun* 5. doi:10.1038/ncomms5967, 2014.
- RICHTER-MENGE, J., J. OVERLAND, E. HANNA, M. J. J. E. LOONEN et al. (2007): *Arctic Report Card 2007*. In: NOAA (ed), 2007.
- SCHEITER, S., S. I. HIGGINS, C. P. OSBORNE, C. BRADSHAW et al. (2012): Fire and fire-adapted vegetation promoted C₄ expansion in the late Miocene. *New Phytol.*, 195,653-666, doi:10.1111/j.1469-8137.2012.04202.x, 2012.
- SETTELE, J., R. SCHOLES, R. BETTS, S. BUNN et al. (2014): Terrestrial and inland water systems. In: FIELD, C. B., V. R. BARROS, D. J. DOKKEN, K. J. MACH et al. (eds) - *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 271-359, 2014.
- STEINKAMP, J. & T. HICKLER (2015): Is drought-induced forest dieback globally increasing? *J. Ecol.*, 103, 31-43, doi:10.1111/1365-2745.12335, 2015.
- STOTT, P. A., STONE, D. A. & M. R. ALLEN (2004): Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432,610-614, 2004.
- TINNER, W., M. CONEDERA, H. BUGMANN, D. COLOMBAROLI et al. (2016): Europäische Wälder unter wärmeren Klimabedingungen. *AFZ-Der Wald online early*, 2016.
- WEED, A. S., AYRES, M. P. & J. A. HICKE (2013): Consequences of climate change for biotic disturbances in North American forests. *Ecol. Monogr.*, 83,441-470, doi:10.1890/13-0160.1, 2013.

Kontakt:

Prof. Dr. Thomas Hickler
 Senckenberg Biodiversität und Klima Forschungszentrum
 (BiK-F) und Institut für Physische Geographie
 Goethe-Universität, Frankfurt am Main.
 thomas.hickler@senckenberg.de

Hickler, Th. (2016): *Anthropogener Klimawandel und beobachtete Verschiebung von Vegetationszonen*. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, R. Müller & E. Racher (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*. pp. 190-195. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.31.