

Die borealen Nadelwälder im Klimawandel

Welche Wechselwirkungen bestehen – welche Entwicklungen sind zu erwarten?

Herbstsemester 2015

Physikprofil des Gymnasiums Grootmoor

Fiona Bartels, Johanna Müller-Horn und Julie Tenten



Quelle: http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Datei:Borealer_Wald.jpg, Letzter Zugriff: 15.05.2016, Urheber: L.B. Brubaker

Inhaltsverzeichnis

1 Thematische Einführung	3
2 Der Klimawandel	4
3 Bedeutung des Waldes für das Klima.....	6
3.1 Die Wälder und der Kohlenstoffkreislauf: Biogeochemische Prozesse	6
3.2 Die Wälder und der Strahlungshaushalt: Biogeophysikalische Prozesse	7
3.3 Die Wälder und der Wasserkreislauf	8
4 Der boreale Nadelwald	10
4.1 Eingrenzung des Gebietes	11
5 Datenauswertung	12
5.1 Niederschlag	12
5.2 Temperatur	13
5.3 Verdunstung.....	14
5.4 Schneebedeckung	14
6 Auswirkungen	16
6.1 Migrations- und Wachstumsrate.....	16
6.2 Waldbrände.....	18
6.3 Vegetationsperiode.....	20
6.4 Schadorganismen.....	21
7 Fazit/ Ausblick	23
8 Quellenverzeichnis.....	25
8.1 Textquellen	25
8.2 Bildquellen	27

1 Thematische Einführung

Wie stark schmelzen die Pole? Wie können wir die CO₂ – Emissionen reduzieren? Wie wird sich das Wetter zukünftig verändern? Dies sind nur einige Fragen von unzähligen, die im Zusammenhang mit dem Thema Klimawandel zurzeit kontrovers diskutiert werden. Selbst die größten Skeptiker, die lange Zeit behaupteten, den Klimawandel gäbe es nicht, müssen nun einsehen: Der Klimawandel ist Realität und noch dazu eines der größten zu bewältigenden Probleme der Menschheit im 21. Jahrhundert.

Auch Politiker sind sich des Ernstes der Lage bewusst. Am 1. Dezember 2015 beginnt die Weltklimakonferenz in Paris, auf der Vertreter von 195 Staaten über Strategien und Maßnahmen beraten, um den Klimawandel zu stoppen. Ziel der Weltgesellschaft ist ein neuer Klimavertrag zur Begrenzung des Ausstoßes von Treibhausgasen, der nach Möglichkeit das stark beworbene „2-Grad-Ziel“ in Reichweite bringen soll.

Darüber, wie wahrscheinlich es ist, dass die Menschheit die Erderwärmung auf nur zwei Grad begrenzen können wird, gehen die Meinungen stark auseinander. „Ich rechne [...] nicht damit, dass die nationalen Klimaschutzbeiträge, die in Paris zusammengetragen werden, alleine schon ausreichen werden, um die Begrenzung auf zwei Grad hinzukriegen“, meint Bundesumweltministerin Barbara Hendricks von der SPD¹. Trotzdem gehe sie optimistisch in die Verhandlungen und glaube daran, dass durch eine Intensivierung der Maßnahmen und den technologischen Fortschritt das „2-Grad-Ziel“ noch erreichbar sei.

Auch im Schulunterricht haben wir, Abiturientinnen des Gymnasiums Grootmoor, uns mit dem Thema Klimawandel auseinandergesetzt und diverse Zukunftsszenarien analysiert und diskutiert. In dieser Seminararbeit, die als Endprodukt der Arbeitsphase entstanden ist, setzen wir uns mit den Folgen des Klimawandels auf die Nadelwälder unserer Erde auseinander. Wir stellen die Rolle des Waldes im Klimageschehen dar, untersuchen, welche Wechselwirkungen zwischen Wald und Klima bestehen und versuchen einzuschätzen, welche Entwicklungen im Zuge des Klimawandels zu erwarten sind.

1

Barbara Hendricks in „Hendricks hält Zwei-Grad-Ziel für machbar“ (2015), http://www.focus.de/finanzen/news/wirtschaftsticker/un-klimagipfel-hendricks-haelt-zwei-grad-ziel-fuer-machbar_id_5050797.html, letzter Zugriff: 25.05.2016

2 Der Klimawandel

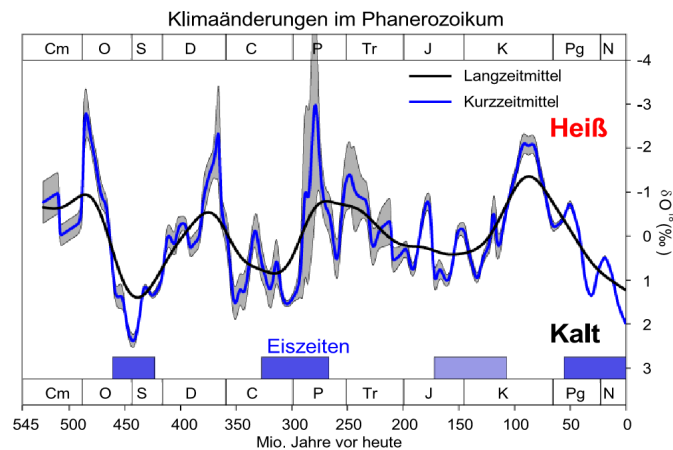


Abb.1 Natürliche Klimaveränderungen in der Erdgeschichte.

„Unter dem Begriff Klimawandel versteht man eine messbare Veränderung des Klimas. Gemessen wird diese anhand der durchschnittlichen Temperatur der Erde, da sich daraus bereits sehr viele Rückschlüsse schließen lassen [...]. Es kann sich beim Klimawandel um eine natürliche Erscheinung handeln, sie muss nicht anthropogen sein.“²

Wie in dem Zitat ausgeführt, kann ein Wandel im Klima, entgegen dem allgemein verbreiteten Glauben, auch ohne anthropogene Einflüsse ausgelöst werden. So kann das Auftreten von Kalt- und Warmzeiten beispielsweise durch Variationen der Erdbahnparameter erklärt werden, die eine Änderung der Sonneneinstrahlung bewirken. Diese Änderungen finden quasi-periodisch mit verschiedenen mittleren Perioden von 19 000 – 100 000 Jahren statt und werden auch als Milankovic-Zyklen bezeichnet. Es wird aufgrund mehrerer historischer Funde und Messungen davon ausgegangen, dass es bereits drei große Eiszeiten auf der Erde gab, sowie eine Vielzahl von Kaltzeiten zwischendurch (siehe Abb.1).

Eine weitere Ursache für die schwankende Durchschnittstemperatur auf der Erde ist der Albedo-Effekt, also der variierende Anteil der Sonneneinstrahlung, den die Erde aufgrund der Beschaffenheit der Erdoberfläche reflektiert. Eine eisbedeckte Oberfläche hat zum Beispiel eine höhere Albedo als eine ohne Eisschicht. Die aktuelle Albedo der Erde liegt ungefähr bei 0.3.

Auch die Menge an Treibhausgasen in der Luft ist ein Faktor, der das Klima beeinflussen

²

Manuel Fuchs in „Klimawandel Definition“ auf <http://www.globalisierung-fakten.de>
<http://www.globalisierung-fakten.de/klimawandel/definition/>, letzter Zugriff : 25.05.2016

und verändern kann. Die von der Erde ausgehende Wärmestrahlung wird durch Treibhausgase absorbiert und wieder abgestrahlt, wodurch sich die Atmosphäre aufheizt. Der Treibhausgasanteil in der Atmosphäre ist natürlichen Schwankungen ausgesetzt. So stieg er in der Vergangenheit teilweise durch Vulkanausbrüche stark an. Es ist also nur natürlich, dass sich das Klima verändert. Normalerweise geschieht dies allerdings über lange Zeitspannen in der Größenordnung von Tausenden und Millionen Jahren (siehe auch Zeitskala Abb. 1).

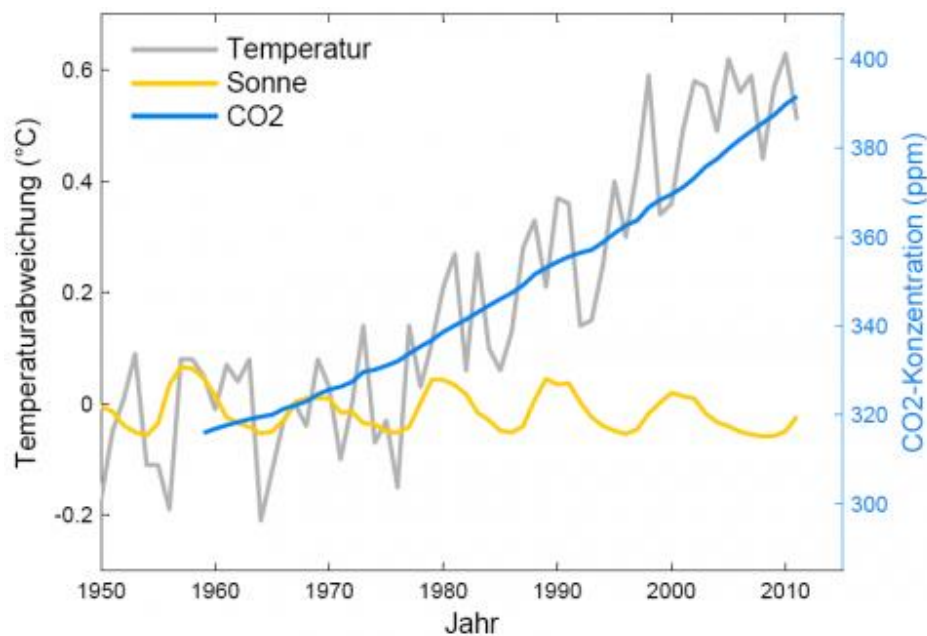


Abb.2 Temperaturabweichung und CO₂-Konzentration seit 1950.

Besorgniserregend ist, dass sich die weltweite Durchschnittstemperatur im letzten Jahrhundert über das natürliche Maß hinaus gesteigert hat (siehe Abb. 2, graue Linie). Seit dem Einsetzen der Industrialisierung im 19. Jh. stieg die weltweite Durchschnittstemperatur um 0,85 °C. Schuld daran ist wahrscheinlich die erhöhte Konzentration an Treibhausgasen in der Luft. Diese nahm im Zuge der Industrialisierung drastisch zu (siehe Abb. 2, blaue Linie). Der Ausstoß an Treibhausgasen ist vor allem auf die Industrie- und Schwellenländer zurückzuführen. Pro Kopf und pro Jahr gelangen in Deutschland 10,2 Tonnen CO₂ in die Atmosphäre. In den USA liegen die Werte sogar noch um ca. 30 % höher. Es wird prognostiziert, dass die Durchschnittstemperatur allein in diesem Jahrhundert noch um weitere 4 °C steigen wird, wenn keine Einsparungen an Treibhausgasemissionen unternommen werden.³

Welche Entwicklungen für die Zukunft zu erwarten sind, ist unklar. Da die Anzahl an

unbestimmten Variablen sehr hoch und das Klimasystem komplex und schwer zu modellieren ist, gibt es eine Vielzahl an möglichen Szenarien. Für unsere Untersuchungen verwenden wir Daten des RCP4.5 Szenarios (Representative Concentration Pathways).

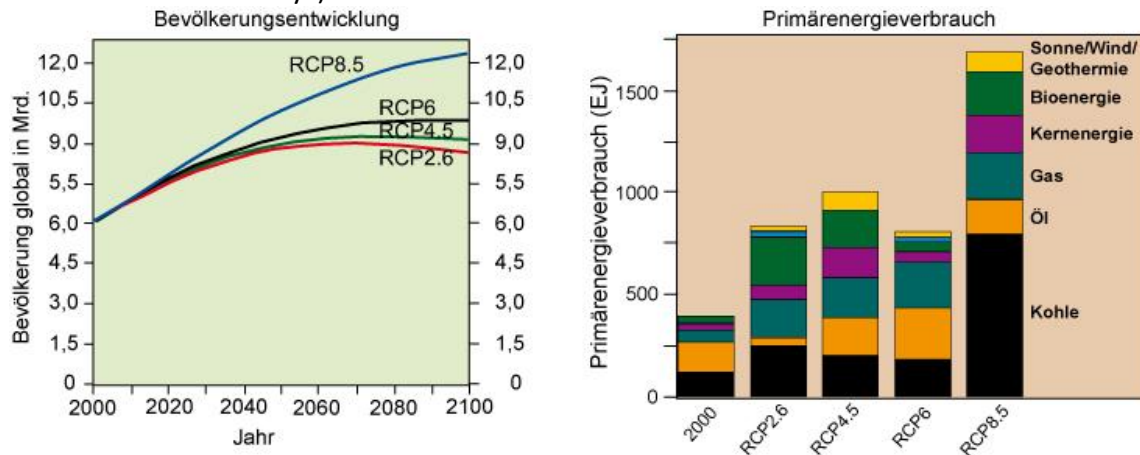


Abb. 3 Bevölkerungsentwicklung und Primärenergieverbrauch bis 2100 gemäß der RCP-Szenarien.

Dieses Szenario geht davon aus, dass bis 2100 mit einem zusätzlichen Strahlungsantrieb von $4,5 \text{ W/m}^2$ zu rechnen ist. Diese Szenario wäre bei einer Treibhausgaskonzentration von 650 ppm in 85 Jahren und einer Weltbevölkerung von knapp über neun Milliarden im Jahr 2100 möglich (siehe Abb. 3, links). Das Szenario wird allgemein als wahrscheinlich angesehen. Je nachdem, ob die Energiewende beziehungsweise das Einsparen von Emissionen gelingen wird, ist das RCP4.5 Szenario mehr oder weniger wahrscheinlich.

3 Bedeutung des Waldes für das Klima

Bevor die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald untersucht werden, ist es wichtig, zunächst die Rolle der Wälder in unserem Klima zu verstehen. Dazu werden im Folgenden die verschiedenen Wechselwirkungen zwischen dem Wald und seiner Umwelt dargestellt.

3.1 Die Wälder und der Kohlenstoffkreislauf: Biogeochemische Prozesse

45 % des Kohlenstoffs auf der Erde sind in Wäldern gespeichert, davon ungefähr die Hälfte (25 %) in den tropischen Wäldern. Die Wälder sind daher ein essentieller Faktor im Kohlenstoffkreislauf und damit im Klimageschehen. Das Kohlenstoffdioxid wird von den Bäumen zum Wachsen benötigt und sie nehmen es über Photosynthese direkt aus der Atmosphäre auf.

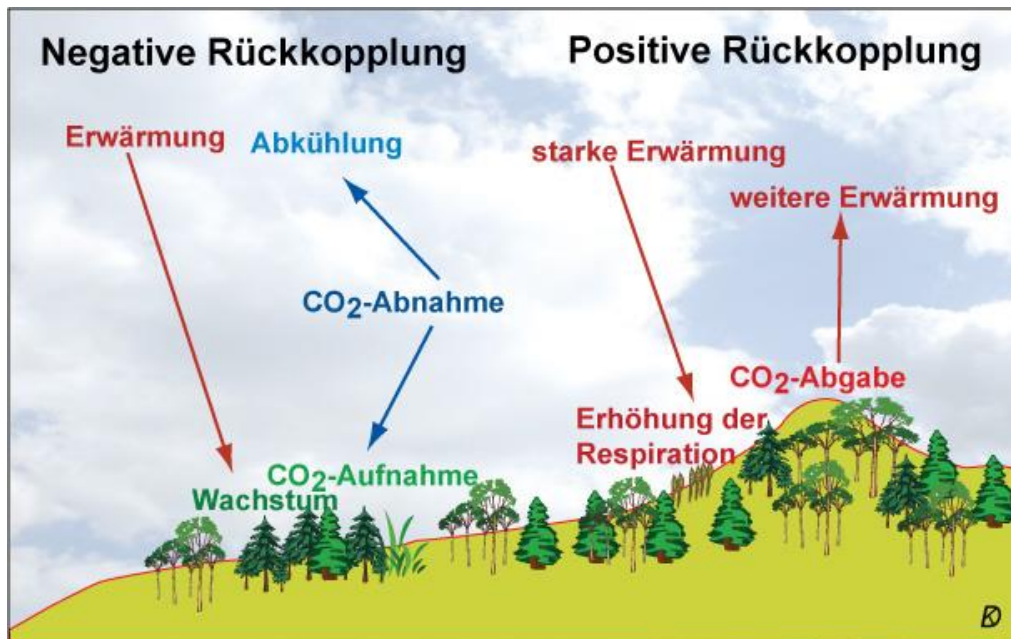


Abb. 4: Rückkopplungsprozesse Vegetation - atmosphärischer CO₂-Gehalt.

Einen Teil des aufgenommenen Kohlenstoffdioxids geben sie über Respiration sofort wieder an die Atmosphäre ab. Dadurch ergibt sich global eine Nettoprimärproduktion von 60 Gigatonnen Kohlenstoff. Zusätzlich wird auch bei der Verrottung von Pflanzenteilen Kohlenstoffdioxid freigesetzt. Hierdurch wird ca. eine Gigatonne Kohlenstoff als schwer abbaubares, organisches Material über längere Zeit im Boden gespeichert. Somit verändern die Bäume aktiv den Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre.

Bei Bäumen, die sich in der Wachstumsphase befinden, stellt das Kohlenstoffdioxid, das abgegeben wird, einen viel geringeren Teil dar, als das, das aufgenommen wird, da Kohlenstoffdioxid in Form von Biomasse gespeichert wird. Durch Abholzung oder bei verrottenden Bäumen ist das Gegenteil der Fall, denn dort geht Biomasse verloren und Kohlenstoffdioxid gelangt in die Atmosphäre.

Die Wälder können den Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre folglich sowohl negativ, als auch positiv beeinflussen. Zum einen kann eine Verstärkung der Biomasseproduktion durch äußere Einflüsse, wie zum Beispiel Regen, den Bedarf an Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre steigern. Dadurch sinkt der Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre und, weil Kohlenstoffdioxid als Treibhausgas wirkt, sinkt auch die atmosphärische Temperatur (siehe Abb.4). Kältere Temperaturen reduzieren allerdings wiederum die Biomasseproduktion, wodurch sich der Kohlenstoffdioxidgehalt und damit die Temperaturen wieder erhöhen.

Zum anderen kann es auch zu einer positiven Rückkopplung kommen. Denn eine extreme Erwärmung führt dazu, dass die Respiration sich erhöht, die Wälder also mehr Kohlenstoffdioxid abgeben als sie aufnehmen. Die resultierende weitere Erwärmung verstärkt diesen Effekt.

3.2 Die Wälder und der Strahlungshaushalt: Biogeophysikalische Prozesse

Die Prozesse und Beziehungen zwischen der Vegetation und der Atmosphäre fasst man, in Abgrenzung zu den biogeochemischen Wechselwirkungen (siehe Kap. 3.1) unter den sogenannten biogeophysikalischen Wechselwirkungen zusammen.

Zentraler Untersuchungsgegenstand bei letzterem ist der Strahlungshaushalt und der Wasserkreislauf (siehe auch Kap. 3.3).

Allgemein ist mit dem Strahlungshaushalt der Erde die Energiebilanz gemeint, die man erhält, wenn man Ein- und Abstrahlung auf der Erde gegeneinander aufwiegt. Da die eintreffende solare Strahlung nahezu konstant ist, spielt für den Strahlungshaushalt die Abstrahlung die zentrale Rolle.

Die eintreffende Strahlung wird zu ca. 30 % direkt von der Erde reflektiert, das heißt die Gesamtalbedo der Erde beträgt 0,3. Waldflächen beeinflussen die Albedo und somit auch den Strahlungshaushalt: Wälder haben eine deutlich niedrigere Albedo als zum Beispiel Eis- (ca. 90 %) und Wüstenoberflächen (ca. 30 %)⁴. Aufgrund ihrer dunklen Oberflächen und der unregelmäßigen, komplizierten Oberflächenstruktur absorbieren sie einen Großteil der einfallenden Strahlung. Die Albedo der borealen Wälder liegt mit ca. 5 – 12 % sogar noch unter dem Wert für Laubwälder (15 – 20 %), ist also extrem gering.

Die niedrige Albedo löst einen Rückkopplungsprozess aus: Die absorbierte Strahlung wird von den Bäumen teilweise als Wärmestrahlung wieder abgegeben und erwärmt so die bodennahe Luftschicht. Dies fördert wiederum das Pflanzenwachstum, die Albedo-Vegetation-Rückkopplung wirkt folglich positiv.

In borealen Wäldern tritt dieser Effekt verstärkt auf. Die Erwärmung der Umgebung hat dort ein Abschmelzen des Schnees zur Folge. Die dadurch schneefreie Zone ermöglicht zusätzliches Pflanzenwachstum und senkt die Albedo des Gebietes.

Da die Albedo-Vegetation-Rückkopplung die Atmosphäre erwärmt, wirkt sie entgegen den biogeochemischen Prozessen, bei denen durch die Aufnahme von CO₂ durch die Wälder die Atmosphäre gekühlt wird.

Es ist ortsabhängig, welche Prozesse überwiegen: Tropische Wälder wachsen ganzjährig und haben eine sehr hohe CO₂-Aufnahmekapazität. Im Gegensatz dazu produzieren die borealen Wälder aufgrund der kurzen Sommerphasen nur wenig Biomasse. Deshalb überwiegt hier meist der erwärmend-wirkende Albedo-Vegetation-Rückkopplungsprozess.

4

Anonymous: Albedo. *Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.*

<http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/albedo/241>, letzter Zugriff: 25.05.2016

3.3 Die Wälder und der Wasserkreislauf

Unsere Erde ist zu ca. 71 % mit Wasser bedeckt⁵. Dieses Wasser ist zum größten Teil Meerwasser. Ein weiterer Teil des Wassers auf der Erde ist in Form von Eis und Schnee oder als Grundwasser im Boden zu finden. Aber auch in der Vegetation, vor allem in Wäldern, wird Wasser gespeichert.

Das Regenwasser wird zum Teil von den Blättern aufgenommen, der Rest fällt zu Boden und wird vom Boden gespeichert. Durch die Transpiration, also die Abgabe von Wasser durch Stomata (Spaltöffnungen in den Blättern der Bäume⁶)⁷, geben die Bäume Teile des Wassers wieder an ihre Umwelt ab. Durch die Verdunstung des austretenden Wassers kommt es besonders im Sommer und Herbst zu einer Abkühlung der umgebenden Luftmassen. Im Winter sind die Verdunstung und somit auch der Effekt sehr gering.

Die Stomata verlangsamen beziehungsweise verzögern den Verdunstungsprozess. Der Verdunstungsprozess ohne Bäume würde zwar zeitweise stärker ausfallen, die Bäume sorgen allerdings für eine stetigere Abkühlung.

5

Susanne Bickel: Die Verteilung des Wassers auf der Erde http://www3.hhu.de/biodidaktik/WasserSek_I/wo_findet_man_wasser/dateien/wasser_auf_der_erde.html, letzter Zugriff: 25.05.2016

6

Anonymus: Stoma (Botanik). https://de.wikipedia.org/wiki/Stoma_%28Botanik%29, letzter Zugriff: 25.05.2016

7

Dieter Kasang (2009): Verdunstung. <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Verdunstung>, letzter Zugriff: 25.05.2016

4 Der boreale Nadelwald



Abb. 5: Geographische Lage der borealen Wälder.

Die borealen Nadelwälder sind sowohl in Nordamerika (Alaska, Kanada), als auch in Europa (Skandinavien, nordwestliches Russland) und Eurasien (Sibirien, Mongolei, nördliches Japan) verbreitet.

Damit bildet die „Taiga“, wie die boreale Nadelwaldzone ebenfalls genannt wird, nicht nur die „größten zusammenhängenden Wälder“⁸, die insgesamt 1,4 Milliarden Hektar Land umfassen, sie ist auch die nördlichste Waldzone der Erde. Innerhalb der entsprechenden Klimazone auf der Südhalbkugel konnten sich die borealen Nadelwälder aufgrund mangelnder Landmasse nicht ausbreiten.

Im borealen Nadelwald sind 208 Milliarden Tonnen Kohlenstoff gespeichert sowie große Teile des irdischen Süßwassers. Viele Landvögel, Säugetiere wie Rehe, Elche und Waldbären sowie Insekten, u.a. Schmetterlinge, Bienen und Käfer, sind in den borealen Nadelwäldern beheimatet. Die Artenvielfalt der Flora in der borealen Zone ist verglichen mit der Biodiversität südlicherer Misch- bzw. Tropenwälder sehr gering. Die Vegetation wird von den immergrünen Baumarten Kiefer, Fichte, Tanne und Lärche dominiert. Weichlaubholzer wie Birken und Pappeln wachsen vereinzelt und an geschützten Lagen. Charakteristisch ist außerdem die bodennahe Vegetationsdecke, bestehend aus Zwergsträuchern, Moosen und Flechten.

Das sogenannte kaltgemäßigte boreale Klima zeichnet sich durch kurze verhältnismäßig kühle Sommer- und lange Winterperioden aus.

Mit fünf bis sieben Monaten Schneebedeckung verkürzt sich die Vegetationsperiode in der Region auf ca. 90 – 180 Tage. Dazu kommen eine geringe Sonneneinstrahlung und aufgrund der meist kontinentalen Lage eher niedrige Niederschlagswerte (zwischen 150 – 500 mm pro Jahr).

Der Dauerfrostboden führt häufig zu Überschwemmungen, da die im Sommer entstehenden Schmelzwässer nicht in den Boden eindringen können.

8

Unbekannt: Borealer Nadelwald. <http://www.pflanzenforschung.de/de/themen/lexikon/borealer-nadelwald-10052>, letzter Zugriff: 25.05.2016

Natürliche Brände sind in der borealen Nadelwaldzone ein wichtiger Bestandteil zum Weiterbestehen des Waldes. Die durch Blitzschläge ausgelösten Feuer legen die Mineralböden frei, wodurch die Nährstoffe, die durch den Dauerfrostboden und die Nadeln der Bäume für die Pflanzen unzugänglich waren, freigesetzt werden. Durch den Klimawandel nehmen die Brände allerdings gefährlich zu.

4.1 Eingrenzung des Gebietes

Die Zone der borealen Nadelwälder umfasst, wie beschrieben, ein enorm weitläufiges Gebiet und erstreckt sich über große Teile der nördlichen Hemisphäre. Bei den folgenden Untersuchungen soll das Gebiet, der Überschaubarkeit wegen, eingegrenzt werden; analysiert werden im Folgenden deshalb die Auswirkungen des Klimawandels auf die borealen Wälder am Beispiel Kanadas.

Der boreale Nadelwald in Kanada hat eine Fläche von 5.740.000 km² und macht damit 60 % der gesamten Landfläche aus. Die Forstwirtschaft sichert 600.000 Menschen aus Kanada den Lebensunterhalt und machte 2012 24 Milliarden Dollar des BIPs aus.

Zum Schutz des borealen Nadelwaldes wurde 2010 ein Abkommen von 21 Forstunternehmen und neun Umweltschutzorganisationen unterzeichnet, das „Canadian Boreal Forest Agreement“.

5 Datenauswertung

Für unsere Datenauswertung werden Klimadaten des Hamburger Bildungsservers mit Panoply visualisiert und analysiert. Die Klimadaten wurden innerhalb des CORDEX Projekts erstellt. Das verwendete regionale Modell ist das HIRHAM, welches mit einer horizontalen Auflösung von 44 km x 44 km arbeitet. Die Daten beziehen sich auf das Szenario RCP 4.5 (siehe Kapitel 2) und stellen die mögliche Klimaveränderung in Nordamerika in ca. 100 Jahren dar.

Das Zentrum des betrachteten Ausschnitts der Karten liegt bei 50°N und -100° O. Das dargestellte Gebiet erstreckt sich über den gesamten amerikanischen Kontinent.

5.1 Niederschlag

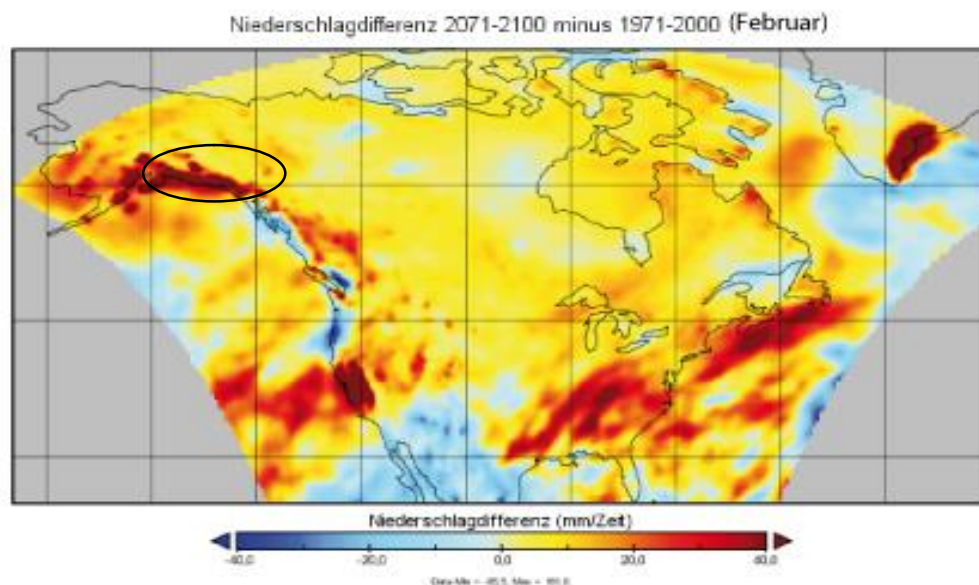


Abbildung 6: Niederschlagsdifferenz 2071-2100 minus 1971-2000 Februar nach RCP4.5.

Abgebildet ist die Niederschlagsdifferenz zwischen den Februarmittelwerten von 2071-2100 und den Februarmittelwerten von 1971-2000. Gelb und rot eingefärbte Bereiche markieren eine Zunahme des Niederschlags, blaue eine Abnahme. Im gesamten nordamerikanischen Kontinent, mit Ausnahmen an der Pazifikküste und über Mexiko, ist tendenziell eine Zunahme des Niederschlags zu beobachten. Allerdings gibt es regionale Unterschiede, was das Ausmaß der Zunahme betrifft. Besonders an der Atlantikküste und den Gebirgszügen im Osten steigen die Niederschlagswerte. Die Zunahme beträgt in diesen Gebieten ca. 30 – 40 mm/ Monat. In der Region des borealen Nadelwaldes nimmt der Niederschlag insgesamt leicht zu (10 – 20 mm/ Monat). Allerdings ist anzunehmen, dass sich die Zunahme nicht gleichmäßig vollzieht. Stattdessen werden sich im Zuge des Klimawandels Extremwetterereignisse häufen. Das bedeutet, dass sich Starkregenfälle

mit Dürrephasen abwechseln könnten.

5.2 Temperatur

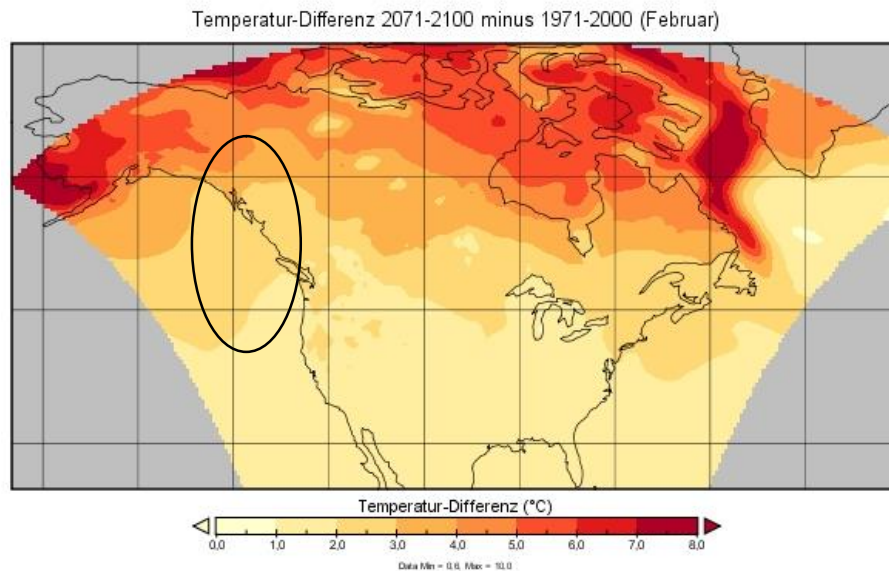


Abbildung 7: Temperaturdifferenz 2071-2100 minus 1971-2000 für Februar nach RCP4.5.

Die Temperaturdifferenz zwischen den Jahren 2071-2100 und 1971-2000 (hier beispielhaft im Februar aufgezeichnet) beträgt in Kanada zwischen 3 und 7 °C. (UN-Weltklimarat IPCC prognostiziert 4-10 Grad). Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Temperatur im Norden stärker erhöht als im Süden. Nur über den Rocky Mountains und dem MacKenzie Gebirge im Westen Kanadas ist die Temperaturerhöhung weiter nach Norden verschoben (siehe eingekreiste Region).

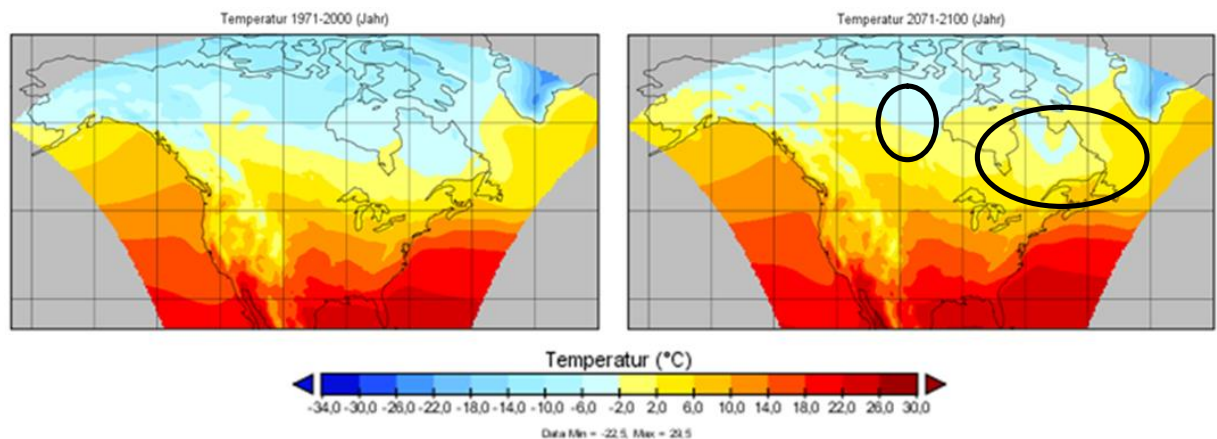


Abbildung 8: Jahresdurchschnittstemperatur für 1971 – 2000 (links) und für 2071 – 2100 nach RCO4.5 (rechts.)

Verglichen wird die Jahresdurchschnittstemperatur in den Jahren 1971 – 2000 mit der Prognose der Jahre 2071-2100. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperaturgrenzen sich nach Norden verschieben. Der Bereich in dem es im Jahresdurchschnitt kälter als -2°C ist verkleinert sich deutlich.

5.3 Verdunstung

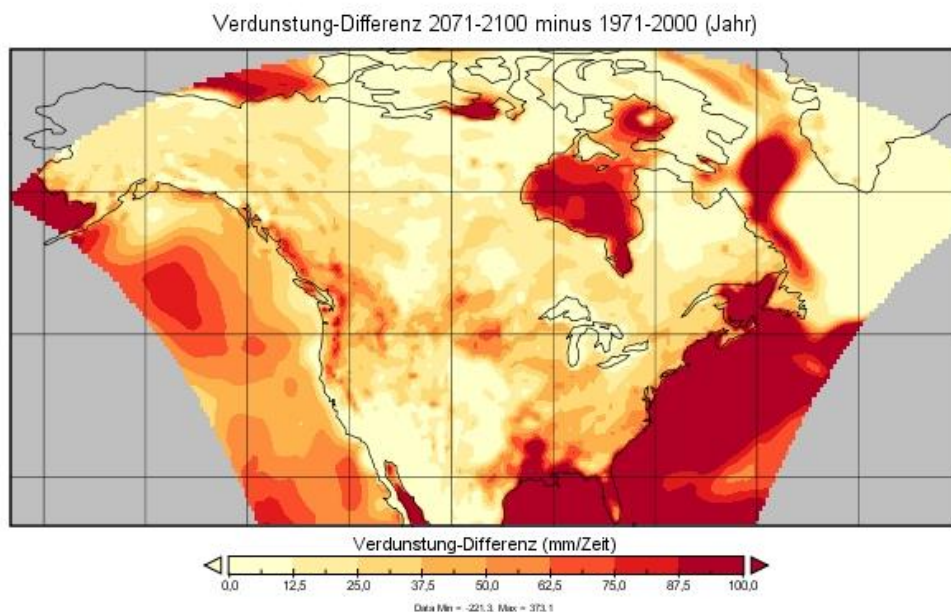


Abbildung 9: Verdunstungsdifferenz 2071 – 2100 minus 1971 – 2000 im Jahresmittel nach RCP4.5.

Die Verdunstungsdifferenz zwischen den Jahren 2071 – 2100 und 1971 – 2000 über das ganze Jahr beträgt in Kanada zwischen 0 und 25 mm/Jahr. Über dem Wasser ist allerdings eine Verdunstungsdifferenz von bis zu 100 mm/Jahr zu erkennen. Die

Verdunstung nimmt also über dem gesamten nordamerikanischen Kontinent leicht zu. Das liegt u.a. daran, dass bei höheren Temperaturen auch mehr Wasser verdunsten kann. Außerdem schmelzen Permafrostböden auf, da sich die Temperaturgrenze nach Norden verschiebt, was auch eine erhöhte Verdunstung zur Folge hat. Auch die verstärkten Niederschläge könnten ein Grund für zunehmende Verdunstung sein.

5.4. Schneebedeckung

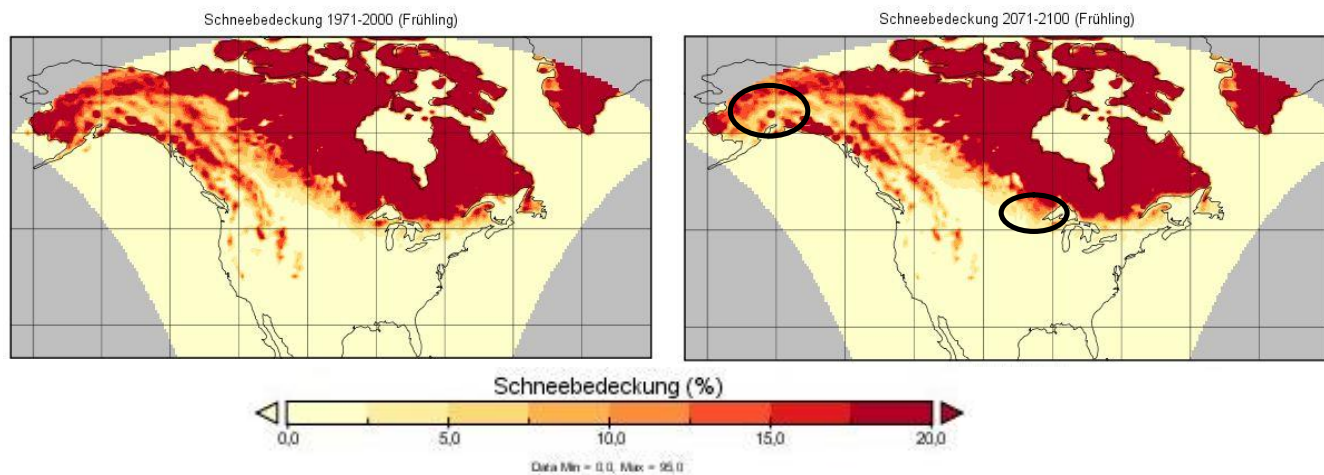


Abbildung 10: Schneebedeckung im Frühling 1971 – 2000 (links) und im Frühling 2071 – 2100 nach RCP4.5 (rechts).

Verglichen wird die Schneebedeckung in den Jahren 1971 – 2000 mit der Prognose für die Jahre 2071-2100 im Frühling. Veränderungen sind vor allem in den schwarz gekennzeichneten Gebieten zu erkennen. Insgesamt verändert sich die Schneebedeckung nicht sehr stark, doch bei genauem Hinsehen fällt auf, dass sich die Grenze der zwanzigprozentigen Schneebedeckung in Richtung Nord-Osten verlagert. *Anmerkung:* Zwar ist eine leichte Abnahme der Schneebedeckung zu erkennen, wir gehen aber davon aus, dass die Abnahme noch deutlich stärker ausfallen wird. Denn durch den starken Temperaturanstieg müsste sich die Schneeschmelze im Frühling eigentlich deutlich verfrühen und verstärken. Ein Indiz dafür ist auch, dass die Anzahl der Frosttage im Westen Kanadas in den letzten 50 Jahren um rund 40 % abgenommen hat. Wenn die Permafrostregionen schrumpfen, so wird auch die Schneebedeckung zurückgehen.

6 Auswirkungen

Alle Lebewesen leben in einem Lebensraum, an den sie sich angepasst haben; aber was passiert, wenn sich der Lebensraum beziehungsweise die Vegetationszone durch den Klimawandel innerhalb relativ kurzer Zeitskalen, wie in Kapitel 5 beschrieben, verändern?

6.1 Migrations- und Wachstumsrate



Abb. 11: Borealer Nadelwald in Kanada.

Da auch Wälder in ihren Klimahüllen beziehungsweise „Wohlfühlbereichen“ leben, können sich ganze Waldgebiete aufgrund einer Veränderung der Umwelt verlagern. Die konkrete Veränderung der Waldausbreitung hängt jedoch von den spezifischen Umwelteinflüssen sowie den anthropogenen Veränderungen im Gebiet ab und lässt sich somit nicht exakt voraussagen. Allerdings ist klar, dass die räumliche Ausbreitung von Wäldern deutlich langsamer geschieht als bei anderen Vegetationen, da Bäume eine Wachstumsdauer von mehreren Jahrzehnten haben⁹. Die Verlagerung der Wälder geschieht also verzögert zur Entwicklung äußerer Faktoren, durch die sie hervorgerufen wird.

In der Datenauswertung ist sehr deutlich zu erkennen, dass sich die Temperaturgrenzen in den nächsten Jahrzehnten nach Norden verschieben werden (siehe Abb. 8). Das würde aufgrund der verschobenen Klimahüllen auch zu einer Migration der Wälder führen.

9

Dieter Kasang;(2008): Wälder im Klimawandel.
http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/W%C3%A4lder_im_Klimawandel#W.C3.A4lder_und_Wasserkreislauf, letzter Zugriff: 25.05.2016

Um den vorausgesagten Klimaveränderungen der nächsten Jahrzehnte zu folgen, müssten sich die Wälder um 500 – 600 km pro Jahrhundert bewegen, was allerdings unrealistisch erscheint, da die prognostizierte Ausbreitungsgeschwindigkeit bei 0 – 50 km pro Jahrhundert liegt. Diese geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit kommt vor allem durch die umfangreiche menschliche Umgestaltung der Natur zustande, da den Wäldern zahlreiche Hindernisse gestellt werden, die die Migration erschweren.

Eine Folge davon, dass die Migration der Wälder zeitversetzt zum Klimawandel stattfindet, ist, dass die Bäume unangepasst wachsen und deren Anzahl folglich stagniert. Es kann sogar zu einem Verschwinden der Wälder führen. Hinzu kommt, dass verschiedene Baumarten sich unterschiedlich schnell ausbreiten und die Klimaerwärmung somit auf eine komplett neue Zusammensetzung von Baumarten in Wäldern hinauslaufen könnte.

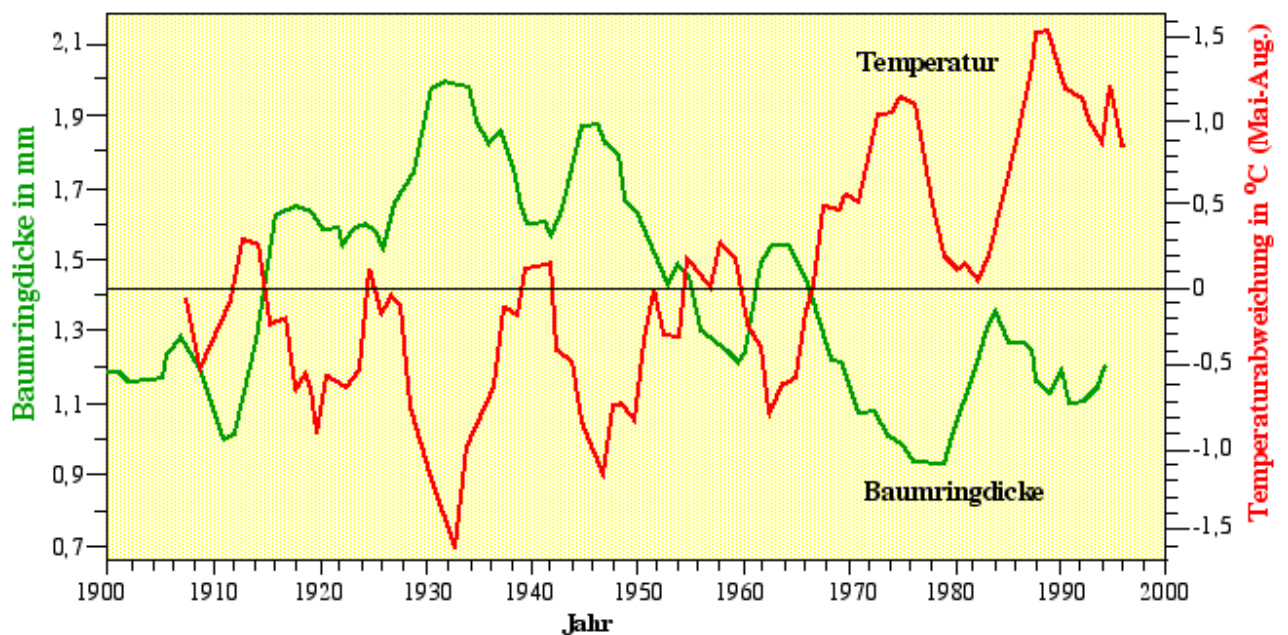


Abb. 12: Sommertemperaturen 1906-1998 (Abweichungen vom Mittel des dargestellten Zeitraums) und das jährliche Wachstum der Baumringe der Weißfichte im zentralen Alaska (Fairbanks)

Das wärmere Klima und die höhere CO₂-Konzentration scheinen allgemein ein stärkeres Wachstum von Bäumen hervorzurufen; doch in den borealen Nadelwäldern ist dies nicht der Fall. Ein Indikator für dieses verminderte Baumwachstum ist die Dicke der Jahresringe (siehe Abb. 12): Während die Temperatur seit 1930 deutlich stieg, sank die Baumringdicke, also die Wachstumsrate, kontinuierlich. Durch die temperaturbedingte Trockenheit wird das Wachstum der Bäume in den nördlichen Breiten eingeschränkt. Außerdem wachsen durch das wärmere Klima vermehrt Strauchpflanzen, die eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit haben. Das führt dazu, dass die Bäume mit den Strauchpflanzen in Konkurrenz um das noch vorhandene Wasser und die im Boden enthaltenen Mineralien treten.

Folglich ist eine Temperaturzunahme für die Migrations- und Wachstumsrate der Wälder in Kanada höchst kritisch und stellt eine große Gefahr für das Fortbestehen der Baumbestände dar.

6.2 Waldbrände

Waldbrände hat es in der borealen Klimazone von Natur aus schon immer gegeben, genauso wie die von den Menschen verursachten Waldbrände. Diesen wurde lange Zeit aber kaum Beachtung geschenkt. Umso erschreckender waren die Ergebnisse einer eingehenden Satellitenbeobachtung dieser Gebiete seit den 1970er Jahren. Es wurde festgestellt, dass die Waldbrände in der borealen Klimazone in den letzten Jahren erheblich zugenommen haben.

In Kanada brennen pro Jahr durchschnittlich 8000 Feuer auf 2 Millionen Hektar Wald, in Russland sind es sogar 9 Millionen Hektar.

Besonders gefährlich sind die Torfbrände. Denn nicht nur Bäume und Sträucher sind von den Waldbränden betroffen, sondern auch die Moor- und Torfgebiete der borealen Klimazone. Die Torfbrände verlagern sich unter die Wälder und können so mehrere Monate andauern und sogar den Winter über weiterbrennen.

Die Ursache für das immer häufigere Entstehen von Waldbränden ist, neben menschenverursachten Waldbränden, der Klimawandel. Dieser schafft, durch die Erwärmung (siehe Abb. 7/8), erleichterte Bedingungen für das Entstehen von Waldbränden, denn u.a. nehmen Trockenperioden deutlich zu. Stationäre Hochdrucklagen verhindern dann vor allem im Sommer, dass feuchte Meeresluft in das Land eindringen kann.

27 Millionen Tonnen Kohlenstoff werden mittlerweile, in Form von Kohlenstoffdioxid oder Kohlenmonoxid und Methan, in Kanada durch Wald-, bzw. Torfbrände oder die Verrottung von durch Feuer zerstörte Pflanzen pro Jahr freigesetzt. Die höchsten Werte liegen sogar bei über 100 Millionen Tonnen Kohlenstoff pro Jahr. Diese Werte sind vergleichbar mit den Emissionen Kanadas durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Die erhöhte Freisetzung von Kohlenstoff verstärkt den Klimawandel und damit die Erwärmung der Atmosphäre zusätzlich - ein nicht endender Teufelskreis (siehe auch Kapitel 3.1).

Des Weiteren erwartet man allgemein eine drastische Erhöhung der Schneeschmelze durch den Klimawandel (im Winter um 20 %; im Herbst um 40 %). Die Schneedecke im Frühjahr in den letzten 75 – 80 Jahren hat bereits um 13 % abgenommen. In dem von uns verwendeten Modell lässt sich auch eine Verringerung der Schneebedeckung erkennen, diese fällt allerdings nicht so drastisch aus (siehe Abb. 10).

Als Konsequenz ergibt sich, dass die Bäume und Sträucher durch den Wassermangel, der durch das frühere Abfließen des Wassers entsteht, während der Waldbrandsaison trockener sind und das Feuer sich deshalb schneller ausbreiten kann.

Hinzu kommt das vermehrte Vorkommen von Blitzeinschlägen, wodurch die Verbreitung von Waldbränden erleichtert wird. Diese sind auf die durch den Klimawandel, häufiger entstehende Extremwetterlagen zurückzuführen. Aufgrund letzterer erhöht sich kurzfristig die Verdunstung und damit auch der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre. Somit wird die Entstehung von Blitzen wahrscheinlicher.

Insgesamt hat der boreale Nadelwald allerdings eine geringere Verdunstungsrate (siehe Abb. 9).

In Kanada sollen die durch Blitze verursachten Waldbrände um ca. 80 % zunehmen, die durch den Menschen direkt verursachten um 50 %. Dadurch vergrößern sich die Waldbrandgebiete bis zum Ende dieses Jahrhunderts voraussichtlich um 75 – 118 %, vorausgesetzt die Brandsaison verlängert sich nicht und die Blitze nehmen nicht zu.

Waldbrände haben sowohl für die Natur als auch für die ansässige Bevölkerung fatale Konsequenzen. Zehntausende Menschen mussten bereits aufgrund der Verbreitung der Waldbrände in die Wohngebiete ihr Zuhause verlassen. So musste im Juli 2015 in Alberta ein Teil vom Jasper Nationalpark gesperrt werden, was dazu führte, dass 13000 Menschen evakuiert werden mussten. In Saskatchewan sind inzwischen schon 4750 Quadratkilometer Buschwald abgebrannt.

Die borealen Ebenen von Alberta und Saskatchewan werden auch in Zukunft am stärksten betroffen sein: In diesen Gebieten werden die Tage mit den größten absoluten Zunahmen von Waldbränden pro Jahr erwartet, die sich insgesamt bis 2050 je nach Region um 35 – 400 % erhöhen können.

6.3 Vegetationsperiode

Die Vegetationsperiode ist eine wichtige Kenngröße für die Pflanzen eines Waldes. Sie beschreibt die Zeit im Jahr, während der die Temperaturen hoch genug für Pflanzenwachstum sind. Ihr Beginn fällt auf den Zeitpunkt im Jahr, zu dem die Temperatur erstmals für mehr als eine Woche bei über 5 °C liegt. Sie endet, wenn die Temperatur für über eine Woche unter die 5 °C-Grenze fällt.

Wie bereits beschrieben (siehe Kapitel 4) ist die Vegetationsperiode in den borealen Nadelwäldern sehr kurz. Mit dem beschriebenen Temperaturanstieg (siehe Abb. 7/ 8) wird auch eine Verlängerung der Vegetationsperiode einhergehen. Die zeitliche Auflösung des Modells genügt nicht, um einen Wert für die genaue Änderung zu bestimmen, da die zu erwartende Änderung im Rahmen einiger Tage und nicht Monate liegt. Als Vergleichswert kann aber der deutsche Wald angeführt werden, für den sich die Vegetationsperiode von 1951 bis 2000 bereits um 2,3 Tage verlängert hat und für den eine zusätzliche Verlängerung von ca. 4 Tagen innerhalb der nächsten Jahre prognostiziert wird. In Kanada ist noch eine größere Änderung wahrscheinlich, da auch der vorausgesagte Temperaturanstieg dort drastischer ausfällt (Deutschland ca. 2 °C).

Zwar mutet eine Verlängerung von einigen Tagen nicht besonders drastisch an, deren Auswirkungen können jedoch umfangreich ausfallen und sind vom jetzigen Standpunkt nur schwer zu kalkulieren. Es besteht u.a. eine leicht erhöhte Gefahr von Spätfrost für die Bäume (siehe Kapitel 4) und ihre Anfälligkeit für Schädlinge wird steigen. Generell wirkt sich eine längere Vegetationsperiode aber positiv auf Wald und Klima aus. Denn eine längere Wachstumsphase geht einher mit einer höheren Biomasseproduktion und damit auch einem gesteigerten CO₂-Verbrauch. Dieser Rückkopplungsprozess wirkt also abschwächend.

6.4 Schadorganismen

Schadorganismen sind definiert als Lebewesen, die durch eine extreme Vermehrung eine Gefahr für ein Ökosystem darstellen. Dazu zählen im Fall des borealen Waldes vor allem Insekten- und Pilzarten.

Nicht nur die Flora der borealen Zone wird sich verändern. Auch die Fauna sieht sich dem Klimawandel ausgesetzt. Im Fall von Schädlingen sind verschiedene Entwicklungstendenzen zu erwarten:

Zum einen werden sich die Ausbreitungsgebiete der Schädlinge verlagern. Der Temperaturanstieg (siehe Abb. 7/ 8) ermöglicht es südlicher beheimateten Organismen, sich auch in nördlicheren Gebieten anzusiedeln. Dies ist besonders für Kanada eine Gefahr, da hier der Temperaturanstieg verhältnismäßig hoch ist. Dadurch liegt die Ausbreitungsgeschwindigkeit weit über den durchschnittlichen 27 km pro Jahr¹⁰. Z.B. wird sich „die Nordgrenze des Verbreitungsgebietes des amerikanischen Tannentriebwicklers [...] wahrscheinlich deutlich polwärts verschieben“¹¹.

Zum anderen haben die längeren Vegetationsperioden (siehe Kapitel 6.3) die Konsequenz, dass sich die beheimateten schädlichen Organismen stärker fortpflanzen können. Der Borkenkäfer, bspw. hat durch höhere Temperaturen eine kürzere Puppenruhe und somit eine begünstigte Reproduktionsrate. Die katastrophalen Folgen, die eine solche Ausbreitung haben kann, können am Beispiel des Bergkiefernkäfers, einer Unterart des Borkenkäfers, verdeutlicht werden.

Der Bergkiefernkäfer, *Dendroctonus ponderosae*, ist braun und etwa reiskorngroß. Er breitet sich momentan rasant im Westen Kanadas, in der Provinz British Columbia, aus. Indem er ihren Wasser- und Nährstoffzufluss stoppt, tötet er die Bäume. Mit ca. sieben Millionen Hektar Land ist die befallene Fläche bereits in etwa so groß wie die Fläche Österreichs und ein Ende der Ausbreitung ist vorerst nicht zu erwarten. 40 % der Kiefern in British Columbia sind schon von dem Käfer befallen und innerhalb der nächsten Jahre soll dieser Wert auf 80 % steigen.¹² Denn wo die ehemals harten Winter die Käfer zu großen Teilen erfrieren ließen, sorgt der Klimawandel und die dadurch erhöhten Temperaturen (siehe Abb.7/8) nun für ein leichteres Überleben der Schädlinge.

Das Risiko einer fortlaufenden Ausbreitung ist auch deshalb hoch, da es der Art durch weitere Zunahme der globalen Temperaturen gelingen könnte, die geographische

10

Dpa, n-tv (2013): Pflanzenschädlinge breiten sich weltweit aus, <http://www.n-tv.de/wissen/Pflanzenschaedlinge-breiten-sich-weltweit-aus-article11279546.html>, letzter Zugriff: 25.05.2016

11

stellv. Dieter Kasang (2008): Insektenbefall von Wäldern (einfach) [http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Insektenbefall_von_Waeldern_\(einfach\)](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Insektenbefall_von_Waeldern_(einfach)), letzter Zugriff: 25.05.2016

12

Jens Tönnesmann (2006): Kampf zwischen Käfer und Baum, http://www.deutschlandfunk.de/kampf-zwischen-kaefer-und-baum.697.de.html?dram:article_id=74377, letzter Zugriff: 25.05.2016

Barriere der Rocky Mountains zu überqueren. Dadurch würden auch die riesigen Strauchkiefernwälder der Provinz Alberta gefährdet werden.

Dazu kommt, dass die Bäume durch wärmere und dürrereichere Sommer anfälliger für Schädlinge werden. Weitere Faktoren, die die Anfälligkeit steigern, sind Stürme und andere Extremwetterereignisse, die den Baum zusätzlich schwächen.

Problematisch ist, dass die Schädlinge den Kohlenstoffkreislauf und die Evaporationsrate des Waldes beeinflussen. Denn zum einen werden die toten Bäume zersetzt und setzen so große Mengen an Kohlenstoff frei. Außerdem werden zum Schutz gesunder Bestände vielerorts Präventivrodungen unternommen. Die Forscher um Werner Kurz vom Pacific Forestry Center präsentieren in der Zeitschrift „Nature“ (Bd. 452, S. 987) Studien, denen zufolge bis 2020 durch die vom Bergkiefernkäfer befallenen Gebiete ca. 270 Megatonnen Kohlenstoff freigesetzt werden sollen¹³. Das entspricht der Menge, die Kanada im Rahmen des Kioto-Protokolls bis 2012 einsparen wollte. Zum anderen sei die Verdunstung zur Sommerzeit um ca. 19 % gefallen, berichten die Wissenschaftler um die Physikerin Holly Maness von der kanadischen Universität Toronto in Ontario. Da Verdunstung einen abkühlenden Effekt hat, trägt abnehmende Verdunstung zur Temperaturzunahme bei. Der Käfer beeinflusst also indirekt das Klima.

Das Beispiel des Bergkiefernkäfers ist nur eines von vielen und momentan ist es für die Forscher unmöglich abzusehen, wie genau die Schädlinge auf den Klimawandel reagieren werden. Fest steht jedoch, dass die Gefahr, die von ihnen ausgeht, auf keinen Fall unterschätzt werden darf. Denn die Zerstörung der Wälder hätte fatale Folgen für Klima und Mensch, weswegen größtmögliche Anstrengungen unternommen werden sollten, um genau dem entgegenzuwirken.

7 Fazit/ Ausblick

Die Arbeit hat verdeutlicht, dass die borealen Wälder eine bedeutende Rolle in unserem Klimasystem einnehmen. U.a. durch die Speicherung von CO₂ durch Photosynthese (siehe Kapitel 3.1) und die hohe Verdunstungsrate (siehe Kapitel 3.3) wirken sie kühlend auf das Klima ein. Die Verringerung des Albedoeffektes (siehe Kapitel 3.2) hingegen hat einen erwärmenden Effekt auf das Klima. Generell überwiegen aber die kühlenden Komponenten.

Wie bereits dargestellt, ist es unmöglich detaillierte Aussagen über die Veränderung der Wälder aufgrund des Klimawandels zu treffen. Zum einen ist die Entwicklung der anthropogen bedingten Einflussfaktoren, wie der Entwicklung der Bevölkerung und dem Ausstoß von Treibhausgasen, ungewiss. Zum anderen gelingt es Forschern bisher noch nicht umfassend genug, das Klimasystem in seiner Komplexität zu erfassen und zu modellieren.

Einige Veränderungen im Klima dürfen aber als sehr wahrscheinlich angenommen werden. Dazu gehören u.a ein deutlicher Temperaturanstieg und eine erhöhte Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre.

Dadurch ergeben sich diverse Konsequenzen für die Nadelwälder Kanadas und verschiedene Rückkopplungsprozesse werden in der borealen Zone in Gang gesetzt.

Einige dieser Rückkopplungsprozesse könnten sich positiv auf die Wälder auswirken:

So kann sich durch die Erwärmung bedingte, längere Vegetationsperiode die Biomasseproduktion der Wälder erhöhen (siehe Kapitel 6.3).

Ein Rückkopplungsprozess, der ebenfalls das Pflanzenwachstum anregt, ist die Albedo-Vegetation-Rückkopplung. Die Wälder absorbieren den Großteil der Sonneneinstrahlung, erwärmen den Boden und schaffen so bessere Bedingungen für die Biomasseproduktion. Durch die Erwärmung schmilzt zusätzlich der Schnee, die Albedo verringert sich und der freigewordene Boden bietet Platz für Pflanzenwachstum (siehe Kapitel 3.2).

Andere Rückkopplungsprozesse gefährden die Wälder allerdings stark:

Zum einen ist die Migration der Wälder durch die sich verschiebenden Temperaturgrenzen ein großes Problem. Die Migration erfolgt zeitversetzt zum Klimawandel, wodurch die Bäume unangepasst wachsen und das Bestehen der Wälder gefährdet wird (siehe Kapitel 6.1).

Zum anderen führt der Klimawandel zu einer Erhöhung des Risikos für Waldbrände. Durch die Erwärmung nehmen die Trockenperioden zu und schaffen erleichterte Bedingungen für das Entstehen der Brände (siehe Kapitel 6.2).

Zuletzt birgt der Klimawandel eine steigende Wahrscheinlichkeit für die Gefährdung von Wäldern durch Schadorganismen. Diese siedeln sich durch die nördliche Verschiebung der Temperaturgrenzen vermehrt in das Gebiet des borealen Nadelwaldes an und können sich durch höhere Temperaturen stärker fortpflanzen (siehe Kapitel 6.4).

Welche der Prozesse überwiegen werden ist unklar. Persönlich schätzen wir das Risiko eines Verlustes an Waldbeständen aber als sehr hoch ein. Angesichts der bedeutenden Rolle der Wälder, u.a. als CO₂-Senke, sollten deswegen unbedingt Schutzmaßnahmen für die Wälder in die Wege geleitet werden. Zusätzlich zu Vereinbarungen, die hoffentlich auf der Klimakonferenz in Paris beschlossen werden, ist es notwendig, Veränderungen in den Wäldern genauestens zu beobachten und, falls möglich, zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen. Dazu können z.B. Schädlingsbekämpfung und Brandschutz gehören. Die Regierungen müssen konsequent in den Umweltschutz investieren, um das 2-Grad-Ziel in Reichweite zu bringen.

8 Quellenverzeichnis

8.1 Textquellen

- Anonymus; 2015
„Der boreale Nadelwald“
https://de.wikipedia.org/wiki/Borealer_Nadelwald, letzter Zugriff: 30.10.15
- Anonymus
„Borealer Nadelwald“
<http://www.pflanzenforschung.de/de/themen/lexikon/borealer-nadelwald-10052>, letzter Zugriff: 30.10.15
- Anonymous; 2014
„Albedo“
<http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/albedo/241>, letzter Zugriff: 30.10.15
- Anonymus; 2015
„Stoma (Botanik)“
https://de.wikipedia.org/wiki/Stoma_%28Botanik%29, letzter Zugriff: 29.10.15
- Bickel, Susanne; 2010
„Die Verteilung des Wassers auf der Erde“
http://www3.hhu.de/biodidaktik/WasserSek_I/wo_findet_man_wasser/dateien/wasser_auf_der_erde.html, letzter Zugriff: 29.10.15
- Bubenzer, Olaf + Radtke, Ulrich; 2007
„Natürliche Klimaveränderungen im Laufe der Erdgeschichte“
edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/17/PDF/17.pdf, letzter Zugriff: 27.11.15
- Braune, Gerd; 2015
„Waldbrände zerstören immer mehr Regionen“
<http://www.tagesspiegel.de/weltspiegel/kanada-waldbraende-zerstoeren-immer-mehr-regionen/12049732.html>, letzter Zugriff: 25.10.15
- Christensen, Ole Bøssing et al, 2007, Technical report 06-17: The HIRHAM Regional Climate Model, Danish Climate Centre, Copenhagen & Alfred Wegener Institute Foundation for Polar and Marine Research, Potsdam
<http://www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/TR/tr06-17.pdf>, letzter Zugriff 10.01.2016

- CORDEX, IPOC Director, Norrköping, Schweden
<http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr> ,letzter Zugriff 10.01.2016
- Deutsche Presse-Agentur GmbH; 2012
„Käfer heizen Kanada auf“
<http://www.handelsblatt.com/technik/energie-umwelt/waldschaedling-kaefer-heizen-kanada-auf/7437522.html>, letzter Zugriff: 27.11.15
- Deutsche Presse-Agentur GmbH; 2013
„Schädlinge breiten sich weltweit aus“
<http://www.n-tv.de/wissen/Pflanzenschaedlinge-breiten-sich-weltweit-aus-article11279546.html>, letzter Zugriff: 27.11.15
- Fuchs, Manuel
„Klimawandel Definition“
<http://www.globalisierung-fakten.de/klimawandel/definition/>, letzter Zugriff: 25.10.15
- Heise, Susanne; 2006
„Vegetationszonen: Die Zone der Borealen Nadelwälder“
http://www2.klett.de/sixcms/list.php?page=infothek_artikel&extra=TERRA-Online&artikel_id=108227&inhalt=klett71prod_1.c.203001.de, letzter Zugriff: 30.10.15
- Kasang, Dieter;
„Wälder und Klima“
<http://bildungsserver.hamburg.de/natuerliche-oekosysteme-nav/3874590/waelder-und-klima/>, letzter Zugriff: 01.11.15
- Kasang, Dieter; 2007
„Biosphäre im Klimasystem“
http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Biosph%C3%A4re_im_Klimasystem#Biogeochemische_R.C3.BCckkopplungsprozesse, letzter Zugriff: 25.10.15
- Kasang, Dieter; 2013
„Insektenbefall von Wäldern (einfach)“
[http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Insektenbefall_von_Waeldern_\(einfach\)](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Insektenbefall_von_Waeldern_(einfach)), letzter Zugriff: 27.11.15
- Kasang, Dieter; 2013
„Verdunstung“
<http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Verdunstung>, letzter Zugriff: 29.10.15
- Kasang, Dieter; 2014
„Deforestation (hohe Breiten)“
http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Deforestation_%28hohe_Breiten%29, letzter Zugriff: 29.10.15
- Kasang, Dieter; 2014
„Wälder im Klimawandel“
http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/W%C3%A4lder_im_Klimawandel letzter Zugriff: 29.10.15

- Kasang, Dieter; 2015
„RCP-Szenarien“
<http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/RCP-Szenarien>, letzter Zugriff: 27.11.15
- Kasang, Dieter; 2015
„Waldbrände in hohen Breiten“
http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Waldbr%C3%A4nde_in_hohen_Breiten, letzter Zugriff: 25.10.15
- Pauli, Michael; 2014
„Erwärmung im Akkord“
<https://www.greenpeace.de/themen/klimawandel>, letzter Zugriff: 27.11.15
- Resolute Forest Products
„Fakten über den borealen Nadelwald“
<http://www.borealerwald.de/bigger-table-2/>, letzter Zugriff: 30.10.15
- Robert-Bosch-Stiftung; 2007
„Auswirkungen des Klimawandels auf den deutschen Wald“
<http://bildungserver.hamburg.de/contentblob/3074492/data/2007-oekosystem-wald.pdf>, letzter Zugriff: 18.11.15
- „Temperaturdaten Nordamerika“
<http://bildungserver.hamburg.de/00-nordamerika/>, letzter Zugriff 18.11.15
- Tönnemann, Jens; 2006
„Kampf zwischen Käfer und Baum“
http://www.deutschlandfunk.de/kampf-zwischen-kaefer-und-baum.697.de.html?dram:article_id=74377, letzter Zugriff: 27.11.15
- Wandtner, Reinhardt; 2008
„Borkenkäfer sabotieren den Klimaschutz“
<http://www.faz.net/aktuell/wissen/klima/klimaforschung-borkenkaefer-sabotieren-den-klimaschutz-1539596.html>, letzter Zugriff: 27.11.15

8.2 Bildquellen

- **Abb. 1** Natürliche Klimaveränderungen in der Erdgeschichte. Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phanerozoic_Climate_Change_%28de%29.png, letzter Zugriff: 27.11.2015. Urheber: Dieses Bild wurde von [Robert A. Rohde](#) vorbereitet mit Hilfe öffentlich zugänglicher Daten und von [Jo](#) übersetzt. (2008) Lizenz: CC BY-SA
- **Abb. 2** Temperaturabweichung und CO₂-Konzentration seit 1950.
Quelle: http://www.scilogs.de/wblogs/gallery/16/world_climate_widget_korrekt.png, letzter Zugriff: 28.11.2015, Lizenz: CC BY-ND
Urheber: Prof. Stefan Rahmstorf
- **Abb. 3** Bevölkerungsentwicklung und Primärenergieverbrauch bis 2100 gemäß der RCP-Szenarien.
Quelle:

- http://klimawiki.org/klimawandel/index.php/Datei:RCP_Bev_Pv.jpg, Letzter Zugriff: 27.11.2015, Urheber: Dieter Kasang nach Van Vuuren, D.P., et al. (2011)
- **Abb. 4** Rückkopplungsprozesse Vegetation - atmosphärischer CO₂-Gehalt.
Quelle:
http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Datei:Rueckkopplung_CO2.jpg,
Letzter Zugriff: 25.10.2015, Urheber: Dieter Kasang (2008)
 - **Abb. 5** Geographische Lage der borealen Wälder. Letzter Zugriff: 25.10.2015
Quelle: <http://klimawiki.org/klimawandel/index.php/Datei:Taiga - Geographie.png> ,
Autor: [peupleloup](#), Lizenz: CC BY-SA
 - **Abb. 6 - 10** Klimakarten
Daten aus: <http://bildungserver.hamburg.de/00-nordamerika/>, letzter Zugriff: 18.11.15,
Programm: http://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/download_win.html, letzter Zugriff: 04.11.15
 - **Abb. 11** Borealer Nadelwald in Kanada. Quelle: Letzter Zugriff: 29.10.2015
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Taiga_Landscape_in_Canada.jpg
Urheber: [peupleloup](#), Lizenz: CC BY-SA
 - **Abb. 12** Temperaturabweichungen Sommer von 1906 – 1998 und die Entwicklung der Baumringdicke der Weißfichte im zentralen Alaska im borealen Nadelwald, 2008
<http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Datei:BaumwachstumVerringerung.gif>, letzter Zugriff: 29.10.15.
Urheber: Dieter Kasang nach Barber, V.A., G.P. Juday and B.P. Finney (2000):
Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress, Nature 405, 668-673