



Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Globale Feuer“ Steuergrößen und Szenarien

vorgelegt von

Dipl. Ing. (FH) Ralf Schüpferling
u1351, UNIGIS MSc Jahrgang 2007

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Petershausen, 30.06.2009



„Die Natur eines Körpers besteht nicht in Schwere, Härte, Farbe oder dergleichen, sondern allein in der Ausdehnung.“

René Descartes, 1644, Die Prinzipien der Philosophie

Kurzfassung

Anhand verschiedener ökologischer Variablen werden Wahrscheinlichkeiten von Feuerereignissen global modelliert. Dabei kommt die frei verfügbare Software MAXENT zum Einsatz, deren Ansatz sich durch das Prinzip der maximalen Entropie auszeichnet. Die Monatswerte der Variablen gehen als Mosaik in die Modellrechnung ein. Dabei wird immer ein Monat ausgelassen, anhand dessen das Ergebnis validiert werden kann. Die Übereinstimmung zwischen modellierten, wahrscheinlichen Feuerereignissen und beobachteten Feuern liegt im Durchschnitt bei 88%.

Das Modell wird auch auf Daten von Klimamodellsimulationen angewendet. Es ergeben sich Wahrscheinlichkeitskarten in monatlicher Auflösung für heute und die Jahre 2020, 2050 und 2080 (bei zwei verschiedenen Emissionsszenarien).

Die Ergebnisse sind Kontinent für Kontinent erläutert.

Schlagwörter: Globale Feuer, Verbreitungsmodellierung, MAXENT, Klimawandel

Abstract

Fire probabilities have been modeled using different ecological variables. Therefore the free software MAXENT, where the principle of maximum entropy is implemented, has been applied. Monthly values of the ecological variables are put as a mosaic to the model calculation. Always one month has been skipped, for that the result could have been verified. The correlation between modeled fire events and observed fires is about 88%.

Data of climate model simulations have also been applied to the model. So, probability maps in monthly resolution have been produced for today and the years 2020, 2050 and 2080 (taken two different emission scenarios).

Results are explained and illustrated continent by continent.

Keywords: Global fire, Burning Biomass, Distribution modeling, Maxent, Climate change.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
1 Einführung.....	1
1.1 Feuer in den Naturwissenschaften.....	2
1.1.1 Feuerökologie	2
1.1.2 Pyrogeographie.....	4
1.2 Das Feuer und der Klimawandel.....	6
1.3 Struktur der Arbeit.....	7
2 Stand der Forschung.....	9
2.1 Globale Steuergrößen und Wahrscheinlichkeiten.....	9
2.2 Kontinental oder regional begrenzte Untersuchungen.....	13
3 Material und Methoden.....	15
3.1 Theorieansatz	15
3.2 Methoden und Werkzeuge.....	17
3.2.1 Methoden zur Datenrecherche und Aufbereitung.....	17
3.2.2 Methoden zur Untersuchung der statistischen Abhängigkeiten innerhalb der Datensätze	18
3.2.3 Methoden zur Modellierung.....	19
3.2.4 Auswahl der bedeutsamsten Steuergrößen	21
3.2.5 Überprüfung der Modellgüte.....	22
3.2.6 Validierung der Modellierungsergebnisse	22
3.2.7 Projektion des Modells auf Klimaszenariodaten	24
3.3 Feuer-Ereignisdaten	24
3.3.1.1 Fernerkundung von Feuer.....	24
3.3.1.2 L3JRC Global Burnt Area Product.....	27
3.4 Daten zu den Steuergrößen.....	29
3.4.1 Daten zur Brennstoffmenge.....	29
3.4.1.1 Nettoprimärproduktion.....	29
3.4.1.2 Vegetationsindex NDVI	30
3.4.1.3 Kohlenstoffmengen.....	30
3.4.1.4 Überblick zu den verwendeten Datensätzen.....	31

3.4.2	Daten zur Trockenheit	32
3.4.2.1	Die Klimatische Wasserbilanz.....	32
3.4.2.2	Ariditätsindex nach deMartonne.....	36
3.4.2.3	Temperatur, Niederschlag und andere Klimavariablen.....	37
3.4.3	Klimaszenario-Daten	39
3.4.3.1	Das HadCM3-Klimamodell	39
3.4.3.2	Emissionszenarien.....	39
3.5	Aufbereitung der verwendeten Daten	41
4	Ergebnisse.....	43
4.1	Statistische Voruntersuchungen	43
4.1.1	Korrelationsmatrix.....	43
4.1.2	Clusteranalyse.....	44
4.2	Die Modellierung mit MAXENT	45
4.2.1	Testdurchläufe.....	45
4.2.1.1	Erster Durchlauf mit allen 12 Variablen.....	46
4.2.1.2	Zweiter Durchlauf mit 8 Variablen	46
4.2.1.3	Dritter Durchlauf mit 5 Variablen	47
4.2.1.4	Vierter Durchlauf mit 3 Variablen.....	48
4.2.2	Modellierungsdurchlauf.....	48
4.3	Validierung.....	52
4.4	Projektion des Models auf Klimaszenarien	55
4.5	Thematische Erläuterung der Ergebnisse.....	57
4.5.1	Nord- und Mittelamerika	57
4.5.2	Südamerika	59
4.5.3	Afrika	60
4.5.4	Australien und Ozeanien.....	61
4.5.5	Asien.....	62
4.5.6	Europa.....	63
5	Diskussion und Ausblick.....	65
6	Zusammenfassung.....	68
7	Literatur und Quellen.....	71
7.1	Literaturverzeichnis	71
7.2	Datenverzeichnis.....	77
7.3	Softwareverzeichnis	78
Anhang	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Globale Landbedeckung.....	5
Abbildung 2: Köppen-Geiger Klimaklassifikation der Erde.....	5
Abbildung 3: Rückkopplung von Vegetationsbränden und Globaler Erwärmung.....	6
Abbildung 4: Struktur der Arbeit.....	7
Abbildung 5: Globale Feuerwahrscheinlichkeiten für heutige Bedingungen.....	10
Abbildung 6: Potentielle Zu- bzw. Abnahme von Feuern für die Zeit 2010-39.....	11
Abbildung 7: Bedeutung von Brennstoffmenge und Brennstofffeuchte.....	16
Abbildung 8: Die komfortable Bedienungsfläche von MAXENT.....	20
Abbildung 9: Mindmap zu den Steuergrößen Biomasse und Trockenheit.....	21
Abbildung 10: Mosaik aus den 12 Monatswerten.....	23
Abbildung 11: Feuerereignisse zwischen 2000 und 2007.....	27
Abbildung 12: Menge an verbrannter Vegetation von 2000 bis 2006.....	28
Abbildung 13: Datensätze zur Biomasse bzw. Brennstoff.....	31
Abbildung 14: Klimatische Wasserbilanz, Niederschlag und Feuern.....	35
Abbildung 15: Aridität, Maximaltemperatur und Feuerereignissen.....	36
Abbildung 16: Zu- bzw. Abnahme anthropogen verursachter Treibhausgase.....	40
Abbildung 17: Dendrogramm zur Clusteranalyse.....	44
Abbildung 18: Jackknife-Tests für den ersten Testdurchlauf mit 12 Variablen.....	46
Abbildung 19: Jackknife-Tests für den ersten Testdurchlauf mit 8 Variablen.....	47
Abbildung 20: Jackknife-Tests für den dritten Testdurchlauf mit 5 Variablen.....	47
Abbildung 21: Jackknife-Tests für den vierten Testdurchlauf mit 3 Variablen.....	48
Abbildung 22: ROC-Kurve vom Modelldurchlauf.....	49
Abbildung 23: Die Responsekurven der wichtigsten Steuergrößen.....	50

Abbildung 24: Globale monatliche Feuerwahrscheinlichkeiten	51
Abbildung 25: Validierung der Modellergebnisse.....	54
Abbildung 26: Veränderungen der Feuerwahrscheinlichkeiten	56
Abbildung 27: Anzahl der Feuermonate für Nord- und Mittelamerika	57
Abbildung 28: Anzahl der Feuermonate in Südamerika	59
Abbildung 29: Anzahl der Feuermonate in Afrika	60
Abbildung 30: Anzahl der Feuermonate in Australien und Ozeanien	61
Abbildung 31: Anzahl der Feuermonate in Asien.....	62
Abbildung 32: Anzahl der Feuermonate in Europa	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ökologische Faktoren für Feuer	3
Tabelle 2.: Die großen Feuerlandschaften der Erde.....	4
Tabelle 3: Globale, frei verfügbare Feuerdatensätze	26
Tabelle 4: Globale Datensätze zum Brennstoff.....	32
Tabelle 5: Einige Empirische Verdunstungsformeln	34
Tabelle 6: Globale Datensätze zu Temperatur und Niederschlag	38
Tabelle 7: Verwendete Steuergrößen (Gesamtübersicht).....	42
Tabelle 8: Korrelationsmatrix zu den Variablen der verwendeten Steuergrößen ..	43
Tabelle 9: Kennwerte zur Interpretation des Modellergebnisses.....	52

Abkürzungsverzeichnis

AUC	Area under the Curve
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
FAO	Food and Agricultural Organization
GAM	Generalized Additive Model
GLM	Generalised Linear Model
IIASA	Globale Klimadaten
IPCC	Intergovernmental panel on climate change
L3JRC	Globaler Feuerdatensatz
MAXENT	Maximum Entropy Model
MODIS	Fernerkundungssensor
ROC	Receiver Operating Characteristic
SPOT	Fernerkundungssensor
SRES	IPCC-Emissionsszenarien (Second Report on Emission Szenarios)
Aridity	Globaler Datensatz zum Ariditätsindex
Carbon	Globaler Datensatz zum Kohlenstoffgehalt der Biosphäre
CWbl	Globaler Datensatz zur berechneten Klimatischen Wasserbilanz
NDVI	Globaler Datensatz zum Normalized Difference Vegetation Index
NPP	Globaler Datensatz zur Nettoprimärproduktion
Prec	Globaler Datensatz zum Niederschlag
TMean	Globaler Datensatz zur durchschnittlichen Temperatur
TMax	Globaler Datensatz zur maximalen Temperatur
TMin	Globaler Datensatz zur minimalen Temperatur
Vapour	Globaler Datensatz zum Wasserdampfgehalt
WetDays	Globaler Datensatz zur Anzahl der nassen Tage
Wbl	Globaler Datensatz zur Klimatischen Wasserbilanz nach Tateishi&Ahn

1 Einführung

Feuer hat einen einzigartigen Einfluss auf die gesamte Geosphäre unseres Planeten. Zugleich ist das Phänomen Feuer sehr eng mit der Entwicklung menschlicher Kulturen verknüpft. Feuer liefert dem Menschen einerseits Licht und vielseitig nutzbare Wärmeenergie.

Andererseits hat das Feuer eine große zerstörerische Kraft: Erst im Februar 2009 führten extrem hohe Temperaturen, starke Winde und sehr geringe Niederschläge zu Australiens größter Naturkatastrophe der jüngeren Geschichte.

Vegetationsbrände tragen ganz beachtlich bei zum Phänomen des Klimawandels. Etwa 40% des globalen Kohlendioxid-Ausstoßes gehen auf Vegetationsbrände zurück. Levine (1996) hat darauf bereits früh hingewiesen.

Allein im Jahr 2000 verbrannten 350 Millionen Hektar Land, überwiegend Wald und Buschland (FAO 2007). Gezielte Brandlegung ist die Hauptursache für das Entstehen von Feuern (Goldammer 2000).

Natürliche Feuer entstehen durch Blitzereignisse oder Vulkanausbrüche. Die nordamerikanischen Prärien könnten durchaus von Wäldern bestockt sein, die Entwicklung wird jedoch durch natürliche Feuer verhindert (Nentwig et al. 2007). Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich nur dort größere und ausdauernde Feuer ausbilden, wo ausreichend Brennstoff zur Verfügung steht und wo die klimatischen Verhältnisse Feuer begünstigen.

Mit der vorliegenden Arbeit werden die ökologischen räumlich wirksamen Rahmenbedingungen, die zu Feuerereignissen führen, aufgezeigt. Es wird ein Modell vorgestellt, das mit Hilfe der wichtigsten Steuergrößen globale Feuerwahrscheinlichkeiten berechnet. Entsprechende Aussagen werden sowohl für aktuelle Verhältnisse als auch für verschiedene Szenarien eines Klimawandels gemacht.

Folgende Ergebnisse werden erwartet:

- Feuerwahrscheinlichkeiten lassen sich ausreichend genau modellieren. Die Wahrscheinlichkeiten sind räumlich breiter gestreut als die beobachteten Ereignisse.

- Die zur Verfügung stehenden Steuergrößen beschreiben die Feuerwahrscheinlichkeiten ausreichend gut. Im Wesentlichen werden Steuergrößen aus den Bereichen Brennstoff (brennbare Biomasse) und klimatische Trockenheit den höchsten Einfluss haben.
- Da die globalen Klimaszenarien von steigenden Durchschnittstemperaturen ausgehen, ist davon auszugehen, dass Feuerwahrscheinlichkeiten zunehmen werden.

Die Arbeit wurde fachlich von Prof. Sebastian Schmidlein von der Vegetationsgeographie, Universität Bonn, betreut. Dabei konnten Vorarbeiten aus Bonn genutzt werden (siehe 3.3.1.2 L3JRC Global Burnt Area Product, Kap. Daten zur Feuerereignisse, Seite 27).

1.1 Feuer in den Naturwissenschaften

Neben der klassischen Forschung zur Brandbekämpfung, -entzündung und -entwicklung etablieren sich neue Forschungsfelder in den Naturwissenschaften. Feuerökologen untersuchen die Wechselwirkungen zwischen Feuer und Landschaft. Geographen beschäftigen sich mit dem räumlichen Auftreten von Feuerereignissen und deren Bedingungen. Vereinzelt wird bereits von der Pyrogeographie als neuer Wissenschaftsdisziplin gesprochen (Krawchuk et al. 2009).

1.1.1 Feuerökologie

Die feuerökologische Forschung hat zum Beginn der 70er Jahre in Nordamerika entwickelt. Daraus begründet sich auch der hohe Kenntnisstand über die Rolle des Feuers in der Ökosystemen der gemäßigten Zone. Seit dem Ende der 80er Jahre wird aber auch den Vegetationsbränden weltweit größeres Interesse entgegengebracht (Goldammer 1993).

Schwerpunkt der feuerökologischen Forschung ist die Interaktion zwischen Feuer und Vegetation. Eine ausreichende Menge an brennbarer Vegetation bzw.

ehemaliger Vegetationsbestandteile ist der wichtigste limitierende Faktor für große Brände.

Als Störungsfaktor hat Feuer in ökosystemaren Prozessen große Bedeutung. Der Wechsel von reichhaltigen Ökosystemen zur verbrannten Erde geschieht unmittelbar. Unzählige Einflussgrößen verändern sich: Die Einstrahlung der Sonne wird nicht mehr abgemildert, die vertikalen Strukturen sind nicht mehr vorhanden, es fehlt Biomasse für die Humusbildung usw.

Dabei ist das Feuer für einige Pflanzengesellschaften förderlich. So genannte Pyrophyten können Feuer ohne Probleme tolerieren und haben durch diese Eigenschaft bedeutende Konkurrenzvorteile gegenüber nicht toleranten Pflanzen. Vertreter der australischen Banksien sind auf Feuerereignisse angewiesen, damit sich ihre hartschalige Früchte öffnen können (Beierkuhnlein 2007). Ähnliche Beispiele gibt es auch aus der Tierwelt: einige Prachkäferarten verfügen über Infrarotsensoren um verkohltes, noch heißes Holz zu finden, in dem Ihre Larven schneller schlüpfen (Nentwig et al. 2007).

Feuer beeinflussen die Heterogenität von Landschaften positiv und spielen in manchen Regionen möglicherweise eine Schlüsselrolle für die genetische Evolution betroffener Arten (Turner et al. 2003).

Die ökologischen Rahmenbedingungen für Feuerereignisse sind vielfältig.

Faktor	Effekt
Brennstoffmenge	Bestimmt die Stärke des Feuers; die horizontale und vertikale Anordnung des Brennstoffs beeinflusst die Art des Feuers (Kronenfeuer, Bodenfeuer...); die chemische Zusammensetzung kann den Brand verstärken (Öl, Harz) oder vermindern (Mineralien)
Klima	Bestimmt die Produktivität der Vegetation und damit die Verfügbarkeit von Brennstoff
Regen und Dürre	Bestimmen die Entzündbarkeit und Ausbreitung eines Feuers
Wind	Erhöht den verfügbaren Sauerstoff, bestimmt die Ausbreitungsrichtung und trägt zur Trocknung der Brennstoffmenge bei
Topographie	Beeinflusst das Lokalklima und die Ausbreitung der Feuer

Tabelle 1: Ökologische Faktoren, die die Feuerereignisse und ihr Verhalten beeinflussen (nach Whelan 2002).

Neben der Brennstoffmenge, ohne die kein Feuer denkbar wäre und dem Klima, welchen zum einem die Trockenheit und zum anderen die Menge des Brennstoffs beeinflusst, bestimmen Regen- bzw. Dürrezeiten die Entzündbarkeit von Feuern (Tabelle 1).

1.1.2 Pyrogeographie

Goldammer (2000) stellt auf Basis von Feuerstatistiken die großen Feuerlandschaften der Erde in einem Überblick vor.

Landschaftsform	Bemerkung
Tropische und subtropische Savannen	Savannen sind die größten, regelmäßig brennenden Vegetationsflächen; brennen alle 1-3 Jahre, Entzündung meist anthropogen verursacht
Tropische Regenwälder	Auf Kahlschlägen immergrüner tropischer Regenwälder werden Reste von Biomasse verbrannt; während extremen Trockenzeiten entstehen häufig unkontrollierte Flächenbrände
Saisonale Wälder der Tropen und Subtropen	Trocken- und Halbtrockenwälder mit leicht brennbarer Streu während der Trockenzeiten.
Mediterrane Feuerlandschaften	Buschländer oder feuerselektierte Eichen- und Kiefernwälder, Brandursache meist Fahrlässigkeit und Brandstiftung
Wälder und Kulturlandschaften der gemäßigten Zone	Feuer wird hier häufig bewusst aus Gründen des Ressourcen- und Naturschutzes eingesetzt
Boreale Nadelwälder (Taiga)	In Sibirien überwiegend als Bodenfeuer, in Nordamerika vorwiegend als Vollfeuer (Boden- und Kronenfeuer).

Tabelle 2.: Die großen Feuerlandschaften der Erde (nach Goldammer 2000).

Demnach sind überwiegend Savannen, Steppen, Buschländer und Wälder von Feuerereignissen betroffen. Die tropischen Regenwälder bilden dabei eine Ausnahme: hier treten Feuerereignisse nur auf, wenn die Waldstruktur durch Kahlschlag oder extreme Trockenzeiten gestört wird.

Abbildung 1 zeigt die räumliche Verteilung wichtiger Landbedeckungstypen, die die verschiedenen Landschaftsformen beinhalten. Die Karte basiert auf dem Global Land Cover 2000, einem klassifizierten Fernerkundungsdatensatz. Die Landnutzungsklassen wurden vereinfachend zusammengefasst. Regionen ohne

Landbedeckung bieten ungünstige Bedingungen für Feuerereignisse. Auf den übrigen Flächen steht genug Brennstoff zur Verfügung.

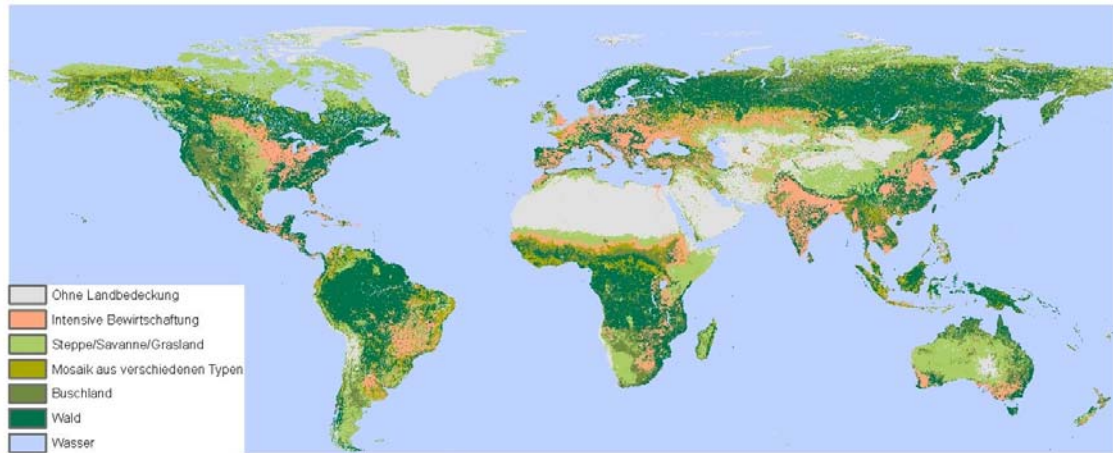
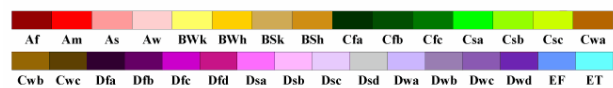


Abbildung 1: Globale Landbedeckung (GLC 2000, vereinfacht klassifiziert)

Die Abbildung 2 zeigt wiederum die klimatischen Eignungen für Feuerereignisse auf. Sehr gut geeignet erscheinen Bereiche mit sommertrockenem Äquatoralklima, trocken-heißem Steppenklima und sommertrockenem warm gemäßigtem Klima. Es stellt sich die Frage, ob Bereiche mit geringerer Eignung Feuer grundsätzlich ausschließen.

World Map of Köppen–Geiger Climate Classification

updated with CRU TS 2.1 temperature and VASCLimO v1.1 precipitation data 1951 to 2000



Main climates

- A: equatorial
- B: arid
- C: warm temperate
- D: snow
- E: polar

Precipitation

- W: desert
- S: steppe
- f: fully humid
- s: summer dry
- w: winter dry
- m: monsoonal

Temperature

- h: hot arid
- k: cold arid
- a: hot summer
- b: warm summer
- c: cool summer
- d: extremely continental
- F: polar frost
- T: polar tundra

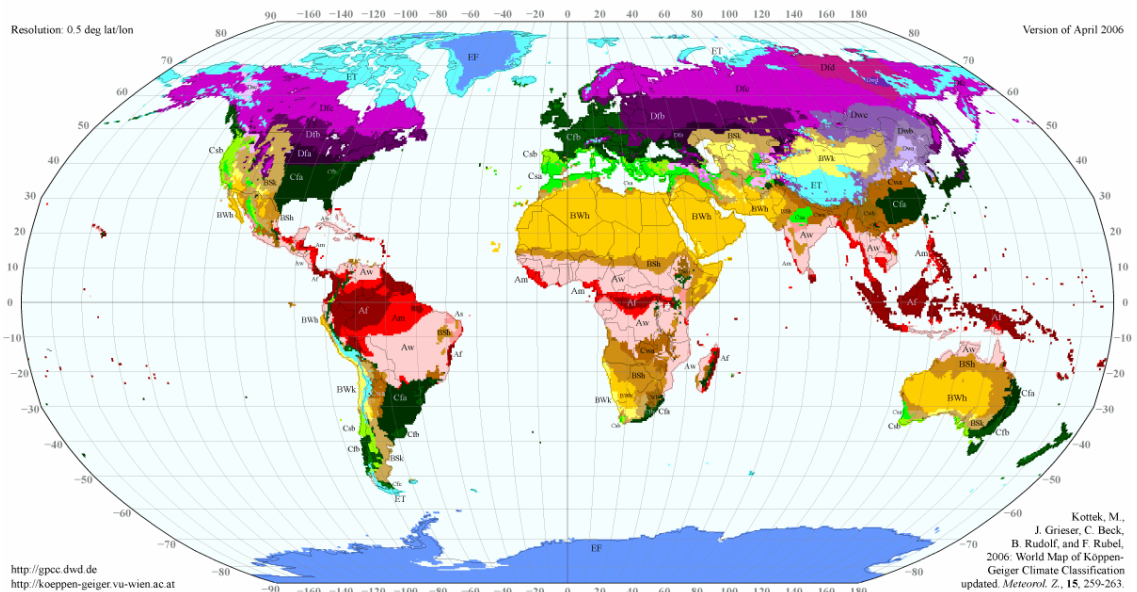


Abbildung 2: Köppen-Geiger Klimaklassifikation der Erde (Abbildung unverändert aus Kottek et al. 2006)

1.2 Das Feuer und der Klimawandel

Die Auswirkungen von Feuer auf das Klimageschehen der Erde sind beeindruckend. Feuer setzt bei der Verbrennung von Biomasse Kohlenstoff und andere Spurengase und Aerosole frei. Bei einem Klima mit höherer klimatischer Variabilität, einer höheren Wahrscheinlichkeit von Extremereignissen und einem globalen Trend der Erwärmung werden sich auch die Feuerregime weltweit ändern.

Untersuchungen zeigen, dass in den letzten 20 Jahren global keine signifikante Zunahme der Feuer zu verzeichnen ist. In den mittleren Breiten und subtropischen Regionen Nordamerikas, Afrikas und Süd-West-Asiens sind dagegen deutliche Zunahmen erkennbar. (Riano et al. 2007).

Im Kyoto-Protokoll von 1997 wird das traditionelle Abbrennen von Grasland als wichtige Emissionsquelle von Treibhausgasen erkannt und das Ziel formuliert, solche Emissionen deutlich zu reduzieren .

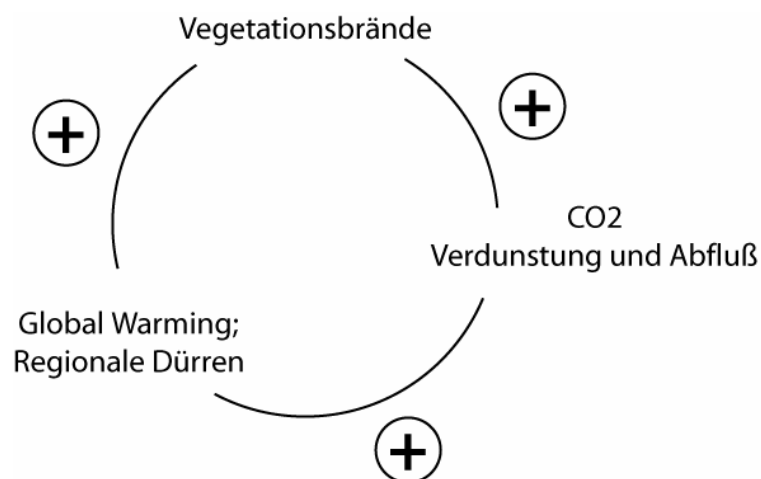


Abbildung 3: Schema zur Rückkopplung von Vegetationsbränden und Globaler Erwärmung

Das Schema in Abbildung 3 zeigt den verstärkenden Treibhauseffekt bei zunehmenden Feuerereignissen: Mehr Brände führen zu einer Zunahme an Treibhausgasen, welche wiederum die Klimaerwärmung fördern. Die Klimaerwärmung wiederum verstärkt den Effekt von regionalen Dürren, welche unter Umständen zu weiteren Feuern führen könnten.

1.3 Struktur der Arbeit

Die Arbeit ist in fünf große Teile gegliedert. Im ersten Teil sind Erläuterungen zum aktuellen Stand der Forschung auf dem Gebiet der Pyrogeographie, in dem Feuerszenarien modelliert werden, abgelegt. Weiterer Forschungsbedarf ist erkennbar. Teil 2 umfasst den methodischen Ansatz dieser Arbeit mit Darstellung verwendeter Daten und Werkzeuge. Im dritten Teil werden die Ergebnisse der umgesetzten Methodik vorgestellt und im vierten Teil analysiert. Mit einer Diskussion und einem Ausblick auf weitere Arbeitsthemen schließt Teil 5 (Abbildung 4).

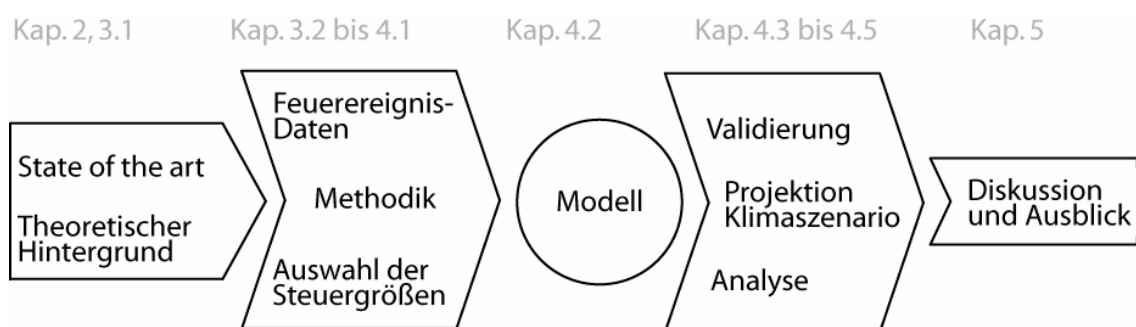


Abbildung 4: Struktur der Arbeit

Es soll ein Einblick in die globale Verteilung von Feuermustern gegeben werden. Schwerpunkt der Arbeit ist es, vermeintliche Prädiktoren auf ihre Bedeutung für die Feuerereignisse zu testen. Dabei steht nicht die Entzündung des Feuers im Vordergrund. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass entzündete Feuer nur bei gegebenen ökologischen Rahmenbedingungen ihre entsprechende Ausbreitung finden. Um Feuerereignisse tatsächlich prognostizieren zu wollen, ist eine Abschätzung ihrer Entzündung notwendig. Hier erfordert es genauere Kenntnis von sozio-ökonomischen Grundlagen und es stellen sich auch eine Reihe zu prüfender Hypothesen. So ist zu vermuten, dass Feuer in reicheren Ländern mit dichter Infrastruktur und einem geringen Anteil an unbewirtschafteten Flächen gut bekämpft wird. Andererseits könnte in solchen Ländern Brandstiftung, etwa um den Kapitalwert von Land zu beeinflussen, eine besondere Rolle spielen. Eine einzelne Variable, wie der Reichtum eines Landes, eignet sich also nicht unmittelbar als Kennwert für eine künstlich herbeigeführte Entzündung von Feuern.

Vorliegende Arbeit hat die Wirkungsgefüge ökologischer Steuergrößen auf global bedeutsame Feuerereignisse zum Thema. Die Ergebnisse ermöglichen ihre Anwendung auf die Szenarien der Klimaänderung. Damit weitet sich der Interessentenkreis von Feuerökologen und Pyrogeographen auf Klimafolgenforscher, Rückversicherer, global tätige Nichtregierungsorganisationen und Politiker.

2 Stand der Forschung

An dieser Stelle sind Ergebnisse aus Arbeiten zusammengefasst, die den Zusammenhang zwischen Steuergrößen bzw. ökologischen Variablen und Feuerereignissen zum Thema haben und weiterhin Aussagen zu einer Verbreitung der Feuer machen, die sich aufgrund der Steuergrößen ergibt.

Die Ergebnisse der vorgestellten Arbeiten dienen den theoretischen Unterbau der Thesis zu stützen.

Keine der Arbeiten hatte zum Ziel, den Einfluss von Steuergrößen auf Feuer für eine globale Modellierung in monatlicher Auflösung zu verwenden.

2.1 Globale Steuergrößen und Wahrscheinlichkeiten

Krawchuk et al. (2009) präsentieren Steuergrößen und deren statistischen Zusammenhang zu den momentan beobachteten Feuerereignissen. Die statistischen Modelle werden weiterhin benutzt um mittels Klimaszenarien die zukünftige Verbreitung der Feuer aufzuzeigen. Die Arbeit ist der inhaltlichen Fragestellung dieser Thesis somit sehr ähnlich, versucht aber auf anderen Wegen Antworten zu finden.

Es werden multivariate Generalized Additive Models (GAMs) eingesetzt, um die Feuerereignisse aus dem World Fire Atlas (siehe 3.3.1.1, Seite 24) mit Klimawerten, der Netto-Primärproduktion, Blitzereignissen und dem menschlichen Einfluss zu charakterisieren. Der menschliche Einfluss wird durch Daten zur Bevölkerungsdichte, Landnutzung und Infrastruktur ausgedrückt und liegt als Human Footprint Dataset vor. Klimawerte werden in Form von bioklimatischen Variablen verwendet, die als Jahresdurchschnittswerte verschiedene ökologische Eigenschaften der Erdteile repräsentieren. Es wird auch

ein Ansatz versucht, bei dem die Netto-Primärproduktion, die für die Brennstoffmenge steht, ausgenommen ist. Mit diesem zweiten Ansatz kann das Modell in die Zukunft projiziert werden. Dabei fließen die Ergebnisse der Klimasimulation des Geophysical Laboratory Climate Model (GFDL CM2.1) für die Szenarien A2 (hohe Emissionen) und B1 (niedrigere Emissionen) ein. Die Szenariodaten werden mit einer räumlichen Auflösung von 2° verwendet, alle anderen Daten liegen in einem 100km-Raster vor.

Es zeigt sich, dass neben der Netto-Primärproduktion folgende 3 Klimavariablen den höchsten Einfluss auf die Feuerereignisse haben:

- die Mitteltemperatur des wärmsten Monats
- der Jahresniederschlag und
- die Mitteltemperatur des nassesten Monats

Bei einer globalen Betrachtung hat der menschliche Einfluss nur eine geringe Bedeutung für die Verbreitung der Feuerereignisse. Die Modellergebnisse liegen in Form von Wahrscheinlichkeitskarten (Abbildung 5) vor und werden in der Diskussion dieser Thesis vergleichend herangezogen.

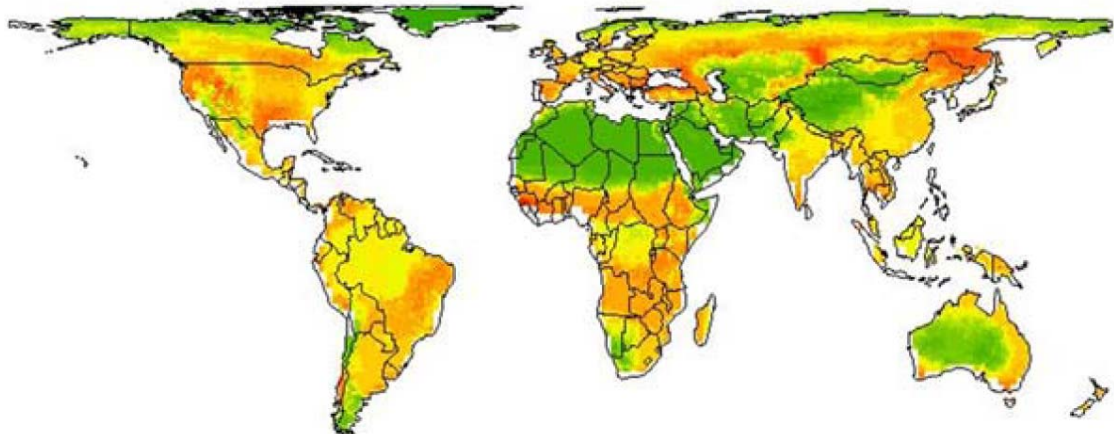


Abbildung 5: Globale Feuerwahrscheinlichkeiten für heutige Bedingungen (aus Krawchuk et al. 2009)

Die projizierten Klimaszenariomodelle unterstützen die landläufige Meinung, dass bei einer Klimaerwärmung generell auch mit häufigeren Feuern zu rechnen ist, nicht. Da das Auftreten der Feuer durch das Zusammenspiel von Temperatur und Niederschlag beeinflusst wird, ist in nicht wenigen Teilen der Erde sogar mit einer

Abnahme der Feuerwahrscheinlichkeit zu rechnen (Abbildung 6). Diese Einschätzung treffen auch Flannigan et al. (1998) für die circumborealen Wälder. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass die Zusammenhänge so komplex sind, dass tatsächliche Vorhersagen nur bedingt möglich sind.

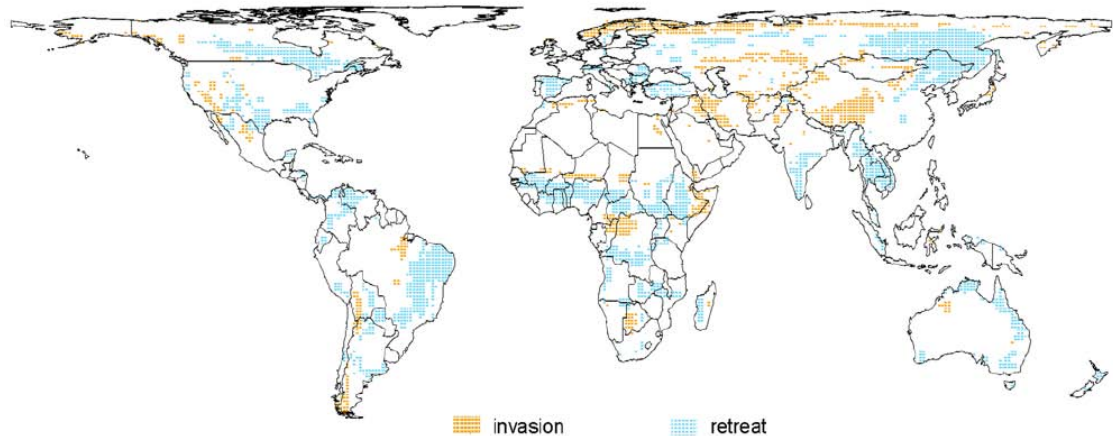


Abbildung 6: Potentielle Zu- bzw. Abnahme von Feuern für die Zeit 2010-39 unter den Bedingungen des A2-Emissionsszenario (aus Krawchuk et al. 2009).

Aus dem Laboratory of Geo-Information Science and Remote Sensing der Universität Wageningen, Niederlande wird von einem Vorhaben berichtet, in dem Feuerereignisse auf globaler Ebene vorhergesagt werden sollen (Xiaoyu 2008). Die Korrelation zwischen den Daten des Global Burnt Surface Product GBS (vgl. Tabelle 3, Seite 26) und verschiedenen Umweltvariablen sollte statistisch untersucht werden. Es wurde erwartet, dass die Feuerereignisse eine unimodale Beziehung zu den Niederschlagswerten haben und dass die Temperaturwerte, die Werte des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Bodenwerte und die Geländehöhe mit den Feuerereignissen positiv korrelieren. Erste Ergebnisse zeigen, dass dies nur bei den mittleren Jahrestemperaturen und beim jährlichen NDVI der Fall ist.

Daten des Advanced Very High Resolution Radiometers (AVHRR) von 1992/93 wurden von Dwyer et al. (2000) verwendet, um einen direkten Zusammenhang zwischen Feuer, Vegetation und Klima festzustellen. Die Feuerdaten wurden in 5 Klassen mit ähnlichen zeitlichen und räumlichen Feuerdaten eingeteilt. Die Klimadaten wurden dem IIASA-Datensatz entnommen (vgl. Tabelle 6, Seite 38). Da Vegetation als potentieller Brennstoff bei niedrigen Temperaturen nur langsam

wächst bzw. unter 0°C das Wachstum völlig unterbleibt, wurde eine Biotemperatur als Trockenheitsindex verwendet. Bei einer Biotemperatur von 19°C scheint sich global die Anzahl der Feuer deutlich zu erhöhen. Neben Biotemperatur und jährlichen Niederschlag, der bei den höchsten Feuerwerten um 1100 mm liegt, ging die Verdunstung in die Arbeit ein. Die Verdunstung wurde als potentielle Evapotranspiration nach Thornthwaite (vergleiche Tabelle 5, Seite 34) berechnet. Aus dem Defizit zwischen Niederschlag und Verdunstung konnte auch die Wasserbilanz hinzugenommen werden. Die Zahl der Feuer ist bei einer Wasserbilanz zwischen -800 und 200mm am höchsten. Die Vegetationsbedeckung selber wurde aus dem Global Land Cover Map (IGBP-DIS) abgeleitet. Es stellt sich heraus, dass sich das Feuerregime unter wechselnden Klimabedingungen ändert. Diese Tatsache sollte in den globalen Klimamodellen unbedingt berücksichtigt werden.

Neben einer umfangreichen Charakterisierung der Feuervorkommen versuchen die Untersuchungen von Chuvieco et al. (2008) den Einfluss des Menschen auf die Verbreitung von Feuerereignissen zu quantifizieren. Auf mehr als 30% der Landfläche brennt es signifikant häufig. Die extensivsten Feuer mit hoher Dichte, geringer Dauer und hoher Variabilität finden sich in borealen und tropischen, nassen und trockenen Gegenden. Zwischen Bevölkerungsverteilung und Feuern scheinen einige enge Zusammenhänge zu bestehen: in ärmeren Ländern treten eher Feuer mit hoher jährlicher Variabilität und geringer saisonaler Dauer auf; dagegen tendiert das Feuer in reicheren Ländern dazu, regelmäßiger aufzutreten und länger zu brennen. Es wird darauf hingewiesen, dass, um die Vorkommen von Feuern grundlegend zu verstehen, nicht auf genaue Kenntnis des sozioökonomischen Einflusses verzichtet werden darf.

Neben diesen Untersuchungen der statistischen Zusammenhänge zwischen Feuern und ihren Prädiktoren, gibt es die Möglichkeit, die Verbreitung von Feuern mit dynamischen globalen Vegetationsmodellen (DGVM) zu simulieren. Diese Simulationen liefern jedoch keine eindeutigen Hinweise auf die Bedeutung

2 Stand der Forschung

verschiedener Steuergrößen und werden daher hier nur kurz erwähnt: Thonicke et al. (2001) entwickelten ein Feuermodell (Glob-FIRM), das mit dem Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model (LPJ-DGVM) gekoppelt wurde. Die Ergebnisse decken sich nur für einen Teil der Regionen mit den tatsächlich beobachteten Feuerdaten. Scholze et al. (2006) gehen nach der Anwendung verschiedener Klimaszenarien in ihren Simulationen davon aus, dass es in Amazonien, dem hohen Norden und einigen semiariden Regionen häufiger brennen wird.

2.2 Kontinental oder regional begrenzte Untersuchungen

Auf regionaler Ebene sind ebenfalls einige Zusammenhänge zwischen Feuerereignissen und ökologischen oder anthropogenen Einflussfaktoren untersucht und erkannt worden. Die Ergebnisse lassen sich jedoch nicht immer auf die globale Ebene anwenden.

So entstehen die großen Brände in den Santa Monica Mountains im südlichen Kalifornien, wenn trockene Vegetationsbestände und bestimmte Windereignisse zusammenfallen (Dennison et al. 2008). Für die borealen Wälder Nord-Amerikas stellten sich die Juli-Temperaturen mit der Brennstoff-Feuchte für Juni bis August als wichtige Einflussgrößen heraus. (Balshi et al. 2009). Diese statistisch fundierten Erkenntnisse wurden auf Klimaszenarien projiziert. Ausgehend von dem Jahrzehnt 1991-2000 könnten sich die verbrannten Flächen 2041-2050 verdoppelt, bis zum Ende des 21. Jahrhunderts sogar verdreifacht haben.

Defrenne&Arino (2005) ernteten vielversprechende Ergebnisse bei dem Versuch, Feuerdaten des World Fire Atlases (ATSR-2 und AATSR-Daten) mit verschiedenen Umweltvariablen zu vergleichen. Die Vegetationstypen stammen aus dem

GLC2000-Datensatz (s.a. Abbildung 1, Seite 5). Die meteorologischen Daten wurden vom European Center for Medium range Weather Forecasting (ECMWF) mit einer Auflösung von 2.5 ° Grad zur Verfügung gestellt (ERA-40 Datensatz). Es zeigte sich, dass Feuer bei einem bestimmten Vegetationstyp und eher in trockenen Zonen bei einer bestimmten Menge von Niederschlägen eintritt. Die Untersuchung konzentrierte sich auf das Amazonasgebiet, West-Afrika und Sibirien.

Ziel der Arbeit von Di Bella et al. (2006) war es, die Effekte und Wechselwirkungen zwischen natürlichen und antropogenen Faktoren (Klima, Landbedeckung, Landnutzung) und Feuerereignissen für Süd-Amerika zu quantifizieren. Das Wasserdefizit, das aus den klimatischen Variablen abgeleitet wurde, hat die höchste Korrelation mit den Feuerereignissen, wobei ein enger Zusammenhang zu Landnutzung besteht. In Gebieten, in denen wenig Landwirtschaft betrieben wird, brennt es bei hohem Wasserdefizit häufiger. Wird das Land intensiver bewirtschaftet, schwindet dieser Zusammenhang zunehmend.

Bedeutsame Steuergrößen werden schon seit längerer Zeit für die Berechnung von regionalen Waldbrandindices verwendet. So zeigten Pitman et al. (2007) für Australien, dass bei Anwendung des McArthur forest danger index (FDI) mit Klimaszenario- aufgrund steigender Temperaturen und sinkender relativer Feuchte das Feuerrisiko Daten in Zukunft klar ansteigen wird.

3 Material und Methoden

3.1 Theorieansatz

Der Theorieansatz lehnt sich am Emerging Conceptual Model für größere, wenig häufig auftretende Wildfeuer ab, das von Meyn et al. (2007) nach einer umfangreichen Literaturstudie entwickelt wurde. Das Model definiert 3 Systemtypen, die sich wie folgt charakterisieren lassen:

- Reich an Biomasse, zeitweise trocken

Ökosysteme, in denen eher die Feuchte als die Brennstoffmenge das Vorkommen von Feuern limitiert. Hierzu zählen auch die feuchten Tropen, wenn sie durch Klimaanomalien wie El Nino oder Fragmentierungen durch Störungen wie Rodung, Windwurf, Insektenbefall oder Frost längeren oder extremeren Dürreperioden ausgesetzt sind.

- Arm an Biomasse, wenigstens vorübergehend trocken

Systeme, in denen eher die Brennstoffmenge als die Feuchte das Vorkommen von Feuern limitiert. Die Limitierung der Biomasse kann durch geringe Primärproduktion, kontrollierte Brandlegung oder intensive Nutzung bedingt sein.

- Arm an Biomasse, überwiegend trocken

Systeme, in denen sowohl die Brennstoffmenge als auch die Feuchte das Vorkommen von Feuern limitiert.

Abbildung 7 verdeutlicht den Zusammenhang und die Charakterisierung der 3 Typen. Ökosysteme, die reich an Biomasse, aber niemals trocken sind, sind nicht als feuerbeeinflusst einzustufen, ebenso wie Systeme, die zwar ständig trocken sind, aber kaum Biomasse enthalten.

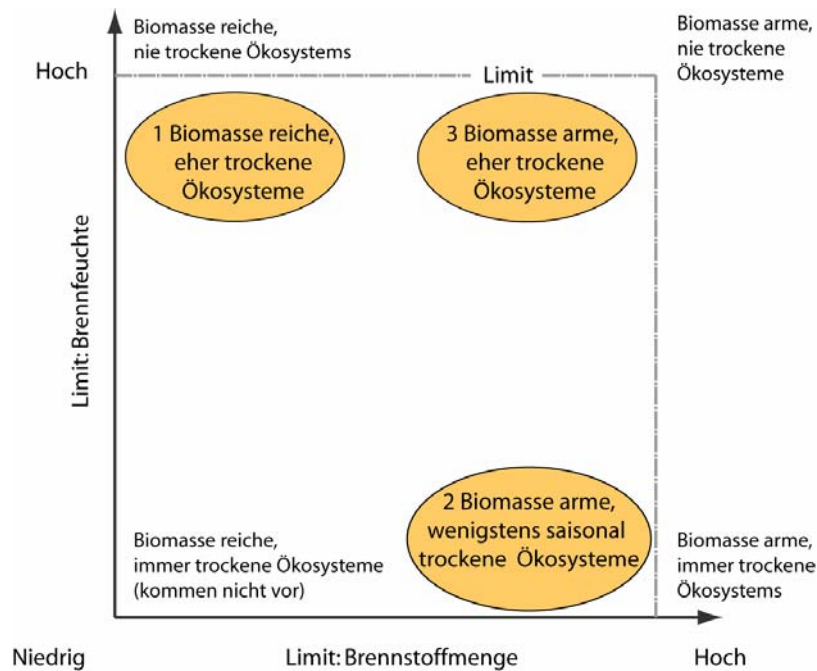


Abbildung 7: Schema zur relativen Bedeutung von Brennstoffmenge und Brennstofffeuchte in Feuerlandschaften (nach Meyn et al. 2007).

Die Modellvorstellung lässt den Schluss zu, dass die Verbreitung größerer Wildfeuer durch 2 Klassen von Steuergrößen modelliert werden können: Brennstoffmenge (Biomasse) und Brennstoff-Feuchte (bzw. Trockenheit). Eine differenzierte Modellierung aller drei Systemtypen ist ein komplexeres Unternehmen, das den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte, hat aber analytische Vorteile – die Wechselwirkungen und Szenarien wären intensiver untersuchbar.

Meyn et al. (2007) weisen auf folgendes Problem hin: je nach räumlicher Auflösung könnten lokale Konditionen die regionalen Aussagen verfälschen. In Gegenden mit hoher Bandbreite an klimatischen Gegebenheiten, wie es etwa in mediterranen Gebieten der Fall ist, können unterschiedlich aufgelöste Betrachtungen zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Anthropogene Aktivitäten spielen, neben dem sie Brennstoffmenge und Trockenheit beeinflussen, eine wesentliche Rolle bei der Entzündung und Bekämpfung von Feuern. Dieses Aus- oder Nichtauslösen von Feuern wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt.

Hier ergibt sich folgender Weg:

- Sammlung, Aufbereitung und ggf. Berechnung von globalen Datensätzen, die die Menge und Feuchte von Feuer-Brennstoff möglichst gut abbilden bzw. quantifizieren
- Untersuchung der statistischen Abhängigkeiten innerhalb der Datensätze
- Erste Modellierung von Feuerwahrscheinlichkeiten (erste Erkenntnisse über die Bedeutung der einfließenden Daten)
- Auswahl repräsentativster Daten
- Zweite Modellierung von Feuerwahrscheinlichkeiten, ggf. Wiederholung mit einer veränderten Auswahl wenn die Bedeutung der Daten für das Model als zu gering angesehen wird
- Abschließende Modellierung mit den bedeutendsten Daten
- Prüfung der Modellierungsgüte
- Validierung der Modellierungsergebnisse
- Projektion des Models auf Klimaszenariodaten

3.2 Methoden und Werkzeuge

3.2.1 Methoden zur Datenrecherche und Aufbereitung

Relevante Datensätze wurden per Internetrecherche und Literaturlauswertungen ermittelt. Die Aufbereitung der Daten erfolgte mit Geographischen Informationssystemen. Die Vielfalt an Datenformaten machte den Einsatz verschiedener Softwarelösungen notwendig.

Dabei war die Umprojektion der Daten von einem Koordinatensystem in ein anderes kein Problem, da alle verwendeten Daten im World Geodetic System WGS 1984 vorlagen. Vielmehr war häufiger ein Resampling notwendig. Die Generalauflösung von 0.5° entspricht zwar den meisten vorliegenden Daten (und wurde deshalb auch so gewählt), einige Daten waren jedoch höher aufgelöst und

mussten an die Generalauflösung angepasst werden. Als Interpolationsmethode wurde Nearest Neighbor gewählt. Ein solches Downsampling stellt einen klaren Informationsverlust dar, der auch mit einer anderen Interpolationsmethode kaum geschmälert werden kann.

Abschließend wurden die Daten mittels eines vorgebereiteten Standardrasters ausmaskiert.

Da häufig nicht auf den ersten Blick zu erkennen war, in welchem Format, in welcher Auflösung und Qualität die Daten verfügbar waren, zeigte sich, dass dieser Arbeitsschritt weitaus zeitintensiver war als zuvor geplant.

3.2.2 Methoden zur Untersuchung der statistischen Abhängigkeiten innerhalb der Datensätze

Die recherchierten Steuergrößen wurden einer statistischen Analyse unterzogen, um ihre statistischen Beziehungen zu klären und um begleitende Informationen während einer Reduktion der Variablen zu liefern.

Dazu steht zunächst die Berechnung und Auswertung von Korrelationsmatrizen zur Verfügung. Korrelationen zeigen die Stärke der Beziehungszusammenhänge zwischen den Variablen auf. Sie geben allerdings keine Auskunft darüber, in wie weit sich die Variablen voneinander abhängig sind (Backhaus et al. 2003).

Die Ähnlichkeit kann mit dem Proximitätsmaß im Rahmen einer hierarchischen Clusteranalyse analysiert werden. Dabei werden die Variablen zu möglichst ähnlichen Gruppen bzw. Clustern zusammengefasst. Innerhalb der Clusteranalyse sind zusammenfassende Verfahren von unterteilenden Verfahren unterscheidbar. Bei dem zusammenfassenden Single-Linkage-Verfahren werden die Variablen so gruppiert, dass deren Ähnlichkeitsdistanzen innerhalb der Gruppen möglichst klein sind (auch „Nearest-Neighbour-Verfahren“). Durch die vielen kleinen Gruppen, die in der Regel bei diesem Verfahren entstehen, lassen sich „Ausreißer“ oft gut identifizieren. Die Gruppen und möglichen Ausreißer bieten sich als Entscheidungsgrundlage für die Reduzierung der Variablen an.

Warum sollten die Prädiktorvariablen im Rahmen einer Verbreitungsmodellierung reduziert werden? Reineking&Schröder (2004) sehen im Wesentlichen zwei Gründe:

- wenn einer großen Zahl von Prädiktorvariablen nicht genug Nachweise zum Vorkommen oder Nicht-vorkommen gegenüberstehen, kann es zu einer Überanpassung („Overfitting“) des Modells kommen. Überangepasste Modelle gelten als unzuverlässig
- je mehr Variablen in ein Modell einfließen, desto schwieriger ist es, die Bedeutung der Variablen zu interpretieren

Dem Problem einer räumlichen Autokorrelation wird bei einer räumlichen Entfernung der Punkte zueinander von ca. 55 km eine untergeordnete Bedeutung beigemessen.

3.2.3 Methoden zur Modellierung

Die Liste der verfügbaren Modelansätze ist lang, insbesondere wenn man Modelansätze zulässt, die ursprünglich für die Verbreitungsmodellierung von Tier- oder Pflanzenarten entwickelt wurden. Eine gute Übersicht dazu bieten Guisan& Thuiller (2005) und Elith et al. (2006). Letztere unterscheidet grob 2 Gruppen von Modellen:

- Modelle, die nur Daten zum Vorkommen einer Art nutzen. Daraus werden die Orte abgeleitet, deren Umweltbedingungen ähnlich denen der Vorkommen sind (Bsp. BIOCLIM, DOMAIN, LIVES)
- Modelle, die den statistischen Zusammenhang zwischen dem Auftreten einer Art und den Umweltvariablen berechnen und mit solchen Ergebnissen ähnliche Orte suchen. Dazu gehören auch die häufiger verwendeten Generalised Linear Models (GLMs) und Generalised Additive Models (GAMs). Daneben bietet MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines) einen ähnlichen Ansatz, wohingegen MAXENT (Maximum Entropy Models) und BRT (Boosted Regression Trees) aus dem Gebiet des maschinellen Lernens kommen.

3 Material und Methoden

Das Maximum-entropy (MAXENT) Modeling erzeugt ein stochastisches Modell, um das Verhalten eines an sich zufälligen Prozesses vorherzusagen. Die Entropie ist hier ein Maß für die Fülle an möglichen Zuweisungen. Nach dem Prinzip der maximalen Entropie sollten keine unbegründeten Annahmen in die räumliche Verteilung der Wahrscheinlichkeiten aufgenommen werden. Es wird modelliert, was bekannt ist, ansonsten werden nicht spezifizierte Ereignisse als gleich wahrscheinlich angesehen. Für eine MAXENT-Modellierung sind also positive Beispiele, von denen gelernt wird, notwendig. In der ökologischen Forschung entsprechen Präsenz-Daten solchen positiven Beispielen (Phillips et al. 2004). Im Gegensatz zu GAMs oder GLMs sind keine Absenzdaten notwendig.

Elith et al. (2006) und Phillips et al. (2006) bescheinigen MAXENT sehr gute Modellierungserfolge. Auch (Niederberger 21.04.2008) konnte bei der Bearbeitung seiner Master Thesis auf brauchbare Ergebnisse mit MAXENT zurückblicken.

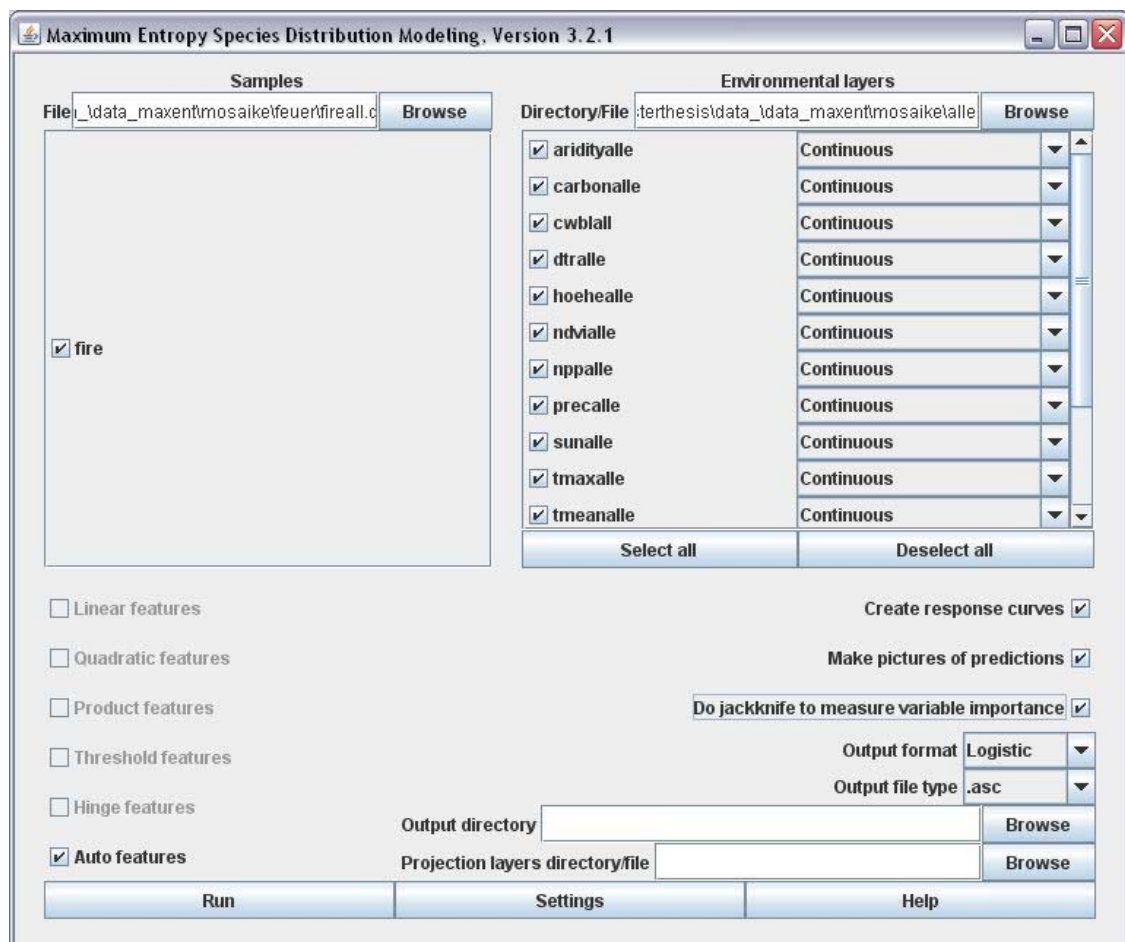


Abbildung 8: Die komfortable Bedienungsfläche von MAXENT, Version 3.2.1

Die Modellierungsmethode ist in einer frei verfügbaren Software (Abbildung 8) komfortabel aufbereitet, bietet neben der eigentliche Modellierung gut zugängliche Analysetools und erlaubt auch die Projektion des Modells auf andere Gebiete oder andere Verhältnisse im gleichen Gebiet. So sind etwa Prognosen zum Vorkommen einer Art für die nächsten Jahrzehnte möglich, wenn die Prognosen an simulierte Umweltsituationen geknüpft sind..

3.2.4 Auswahl der bedeutsamsten Steuergrößen

Aus dem Theorieansatz (3.1) ergeben sich zwei Gruppen von Steuergrößen: Größen zur Biomasse und Größen zu Trockenheit. Zu beiden Größen existiert kein global gültiger Datensatz. Daher war es notwendig, sich den Größen über dritte Variablen so gut wie möglich zu nähern. Diese dritten Variablen wurden auf Grundlage des Theorieansatzes, also quasi wissenschaftsbasiert, ausgewählt und in einer Mindmap (Abbildung 9) zusammengetragen.

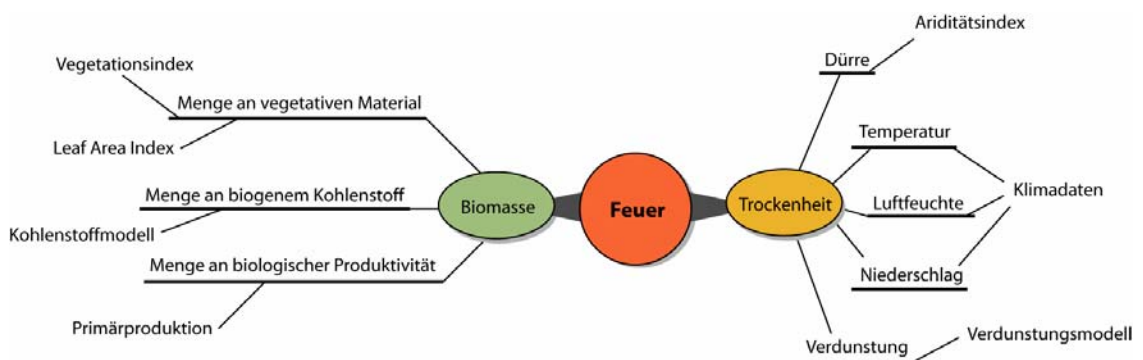


Abbildung 9: Mindmap zu den Variablen der Steuergrößen Biomasse und Trockenheit

Die bedeutsamsten Steuergrößen werden zunächst auf Basis einer Korrelations- und Clusteranalyse untersucht, insbesondere, um Multikollinearität festzustellen. Anschließend wird ein Berechnungsdurchlauf mit MAXENT durchgeführt und die Jackknife-Tests ausgewertet. Diese Tests geben den Einfluss der jeweiligen Steuergrößen wieder (vorausgesetzt es liegt keine Multikollinearität vor). Nach weiteren Modelldurchläufen und Tests bleiben letztendlich die einflussreichsten Variablen übrig (schrittweise Auswahl).

3.2.5 Überprüfung der Modellgüte

MAXENT selbst liefert einen wichtigen Anhaltspunkt für die Modellgüte.

Der AUC (Area Under the Curve)-Wert liefert einen Hinweis für die Prognosegenauigkeit. Vorausgehend wird die ROC (Receiver Operating Characteristic)-Kurve berechnet. Hier werden die Anteile von Vorkommen mit einer kleineren als der berechneten Vorkommenswahrscheinlichkeit (Nichtvorkommen) gegenüber den als wahrscheinlich klassifizierten Vorkommen gegeneinander aufgetragen. Rein zufällige Modelle würden eine linear ansteigende Diagonale produzieren. Modelle, die bessere als zufällige Ergebnisse liefern, müssten oberhalb dieser Zufallsdiagonalen verlaufen. Der AUC-Wert misst die Fläche unterhalb der Kurve. (aus Phillips et al. 2006). Als bester Wert kann 1 erreicht werden, dann würden sich Vorkommen und Nichtvorkommen perfekt trennen.

Der AUC-Wert kann wie folgt eingeordnet werden (nach Hosmer&Lemeshow 2000):

- $AUC = 0.5$: keine Trennung möglich (= rein zufällige Berechnung)
- $0.7 \leq AUC < 0.8$ Akzeptable Trennung
- $0.8 \leq AUC < 0.9$ Exzellente Trennung
- $AUC \geq 0.9$ Außergewöhnliche Trennung

Diese Einteilung dient nur als grobe Orientierung. Er kann zu Fehlinterpretationen führen, wenn das Untersuchungsgebiet eine Ausdehnung hat, die weit über das mögliche Vorkommen einer Art hinausreicht. In solchen Fällen sind die Nichtvorkommen unter Umständen in ihrer Qualität überrepräsentiert und beeinflussen den AUC-Wert positiv. Außerdem liefert der Wert keine Informationen zur räumlichen Lageverteilung der Fehler (Lobo 2008).

3.2.6 Validierung der Modellierungsergebnisse

Die Validierung zeigt die Modellbewertung auf Grundlage von Stichproben, die für den Modellierungsdurchlauf nicht verwendet wurden, auf.

(Schröder&Reineking 2004) unterscheiden zwischen externen und internen Validierungsverfahren. Die internen Verfahren werden mit Testdaten durchgeführt, die aus dem Trainingsdatensatz herausgenommen werden. Bei den externen Verfahren werden Testdaten verwendet, die unabhängig von den Trainingsdaten sind, also etwa Daten aus anderen Regionen oder anderen Jahren. Hier werden Datensätze aus jeweils einem Monat zurückgehalten, anhand derer die Anwendung des Modells überprüft werden kann.

Dafür wurden die 12 Monatswerte der Umgebungsvariablen (Steuergrößen) und der Feuerereignisse mosaikiert und zwar immer so, dass jeweils 1 Monat ausgelassen wurde (Abbildung 10). Es ergeben sich 12 unterschiedliche Mosaik.



Abbildung 10: Mosaik aus den 12 Monatswerten der Feuerereignisdaten (Präsenzdaten). Ein Monat wird für die Validierung jeweils herausgenommen.

Das Modell wurde auf die jeweils fehlenden Daten projiziert und das Ergebnis mit den beobachteten Ereignissen verglichen. Dabei ergaben sich übereinstimmende, positiv modellierte Ereignisse und nicht übereinstimmende, negative Ereignisse. Negative und positive Ereignisse wurden einander gegenübergestellt.

3.2.7 Projektion des Modells auf Klimaszenariodaten

Für einen reduzierten Variablen-Satz stehen die Daten auch für die Klimaszenarien zur Verfügung (siehe 3.4.3, Seite 39). Damit kann das Modell, basierend auf den gegenwärtigen bzw. historischen Beobachtungen auf die Zukunft projiziert werden. Auch wenn solche Projektionen kritisch zu betrachten und mit großer Unsicherheit zu interpretieren sind, wurden sie im Rahmen dieser Arbeit versucht. Wichtigster Kritikpunkt ist, dass die statistischen Zusammenhänge, die sich auf gegenwärtige Beobachtungen stützen, in der Zukunft möglicherweise nicht mehr stimmen, bzw. ökologisch nicht mehr haltbar sind (Dormann 2007), (Davis et al. 1998).

3.3 Feuer-Ereignisdaten

Es existieren verschiedene Quellen um Feuerereignisse räumlich zu erfassen: Datenbanken zu beobachteten Ereignissen, dendrologische Datensätze und Fernerkundungsdaten (Morgan et al. 2001).

3.3.1.1 Fernerkundung von Feuer

Feuer strahlt Wärme und Licht aus - damit lässt es sich mit den Mitteln der Fernerkundung räumlich gut dokumentieren. Fernerkundungsdaten haben den Vorteil, dass ihre Qualität bezüglich räumlicher und zeitlicher Auflösung genau bestimmbar ist. Der Nachteil besteht allerdings darin, dass nicht einfach unterschieden werden kann, ob es sich bei den Feuern, um Vegetationsbrände, Vulkanausbrüche oder andere Emissionsereignisse handelt. Andererseits kann vermutet werden, dass etwa Bodenfeuer unter Baumkronen nur unzureichend erfasst sind.

In den letzten 25 Jahren sind einige globale Datenprodukte entwickelt worden, die der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen (Tabelle 3). Riano et al. (2007) geben einen guten Überblick über die Entwicklung der Fernerkundungsarbeiten zur Feuerdetektion.

3 Material und Methoden

Die Qualität der Datensätze ist ohne Validierung bzw. Kalibrierung mittels hoch auflösender Daten nicht einzuschätzen. Ein Vergleich zwischen World Fire Atlas, GBA2000- und GLOBSCAR-Datensatz zeigt signifikante Unterschiede. Der World Fire Atlas verzeichnet für das Jahr 2000 nur $8.7 \cdot 10^4$ km² aktiv brennende Flächen, wohingegen der GLOBSCAR-Datensatz $2.0 \cdot 10^6$ km² und der GBA2000-Datensatz sogar $3.5 \cdot 10^6$ km² verbrannte Flächen beinhaltet. Die Unsicherheit der Datenlage beeinflusst maßgeblich die Einschätzung von deren Einfluss auf den CO₂-Gehalt in der Atmosphäre (Boschetti et al. 2004).

Trotzdem bietet die Fernerkundung die einzige Möglichkeit um die räumliche Verbreitung von Feuerereignissen zu erfassen (Levine 1996).

Global Burnt Surfaces (GBS 1982-1999)
Abgeleitet aus dem NOAA-AVHRR GAC 8 km Datensatz, als Ergebnis aus der Analyse des langjährigen Datensatzes liegen globale Karten zur Feuerwahrscheinlichkeit für die vier Jahreszeiten vor (Carmona-Moreno et al. 2005). <i>http://www.tem.jrc.it/Disturbance_by_fire/products/fire_occurrence/global_prob_82-99.htm (letzter Zugriff 23.03.2009)</i>
ATSR World Fire Atlas (WFA 1995- heute)
Entwickelt (bis Ende 2002) aus den Daten des zweiten Along-Track Scanning Radiometer (ATSR-2) und seit 2003 aus den Daten des Advanced ATSR (AATSR), monatliche Daten in 1km räumlicher Auflösung. Der Sensor erkennt aktive Feuer in der Nacht (Le Page et al. 2008). <i>http://dup.esrin.esa.it/ionia/wfa/index.asp (letzter Zugriff 23.03.09)</i>
GLOBSCAR 2000
Monatliche Daten für das Jahr 2000, abgeleitet aus dem ATSR-2, bei einer räumlichen Auflösung von 1km. Aufgezeichnet werden die verbrannten Flächen (Simon et al. 2004). <i>http://www.geosuccess.net (letzter Zugriff 23.03.09)</i>
Global Burnt Area 2000 (GBA 2000)
Monatliche Daten für das Jahr 2000, abgeleitet aus dem SPOT Vegetation Earth Observation System, 1km Auflösung (Tansey et al. 2004) <i>http://www.tem.jrc.it/Disturbance_by_fire/products/burnt_areas/global2000/gba2000_data.htm (letzter Zugriff 23.03.09)</i>

Global Burnt Areas (L3JRC 2000-2007)
Datensatz mit hoher räumlicher (1km) und zeitlicher (Tägliche Intervalle) Auflösung aus dem SPOT VEGETATION Earth Observation System (Tansey et al.) <i>http://www-tem.jrc.it/Disturbance_by_fire/products/burnt_areas/GlobalBurntAreas2000-2007.htm</i> (letzter Zugriff 23.03.09)
MODIS Collection 5 Burned Area Product
Monatliche Daten in 500m Auflösung seit 2001 mit Angaben zur zeitlichen Einordnung der Feuerereignisse (Roy et al. 2008), Grundlage: NASA Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Die Daten sind verfügbar unter <i>http://modis-fire.umd.edu/data.asp</i> (letzter Zugriff 23.03.09)

Tabelle 3: Globale, frei verfügbare Feuerdatensätze

Die MODIS Datenreihe stellt mit der Collection 5-Prozessierung hohe Erwartungen an die Datenqualität, da der Sensor auch speziell für die Erkennung von Feuern ausgerichtet ist. Der Erkennungsalgorithmus versucht Kohle- und Aschemuster und einen zeitlich raschen Wechsel in der Landnutzung aufzuspüren.

Giglio et al. (2006) beschreibt die Vorteile des Datensatzes, unter anderem kann die saisonale Länge der Feuer und erstmals die Strahlungsstärke (Fire Radiative Power FRP) abgeleitet werden. Jedoch ist auch hier die Frage nach einer umfassenden Validierung offen, so dass weiterhin nur von provisorischen Daten gesprochen wird (Roy et al. 2008). Möglicherweise bringt eine Datenreihe mit Collection 6-Prozessierung neue Erkenntnisse.

Boschetti et al. (2008) untersuchten die Qualität der MODIS-Daten anhand der großen Brände in Griechenland im Sommer 2007. Die Daten stimmten mit den Angaben, die der European Forest Fires Information Service (EFFIS) zur Verfügung stellt, gut überein. Bei den EFFIS-Angaben handelt es sich um meteorologische Meldungen und visuell interpretierte Satellitendaten.

3.3.1.2 L3JRC Global Burnt Area Product

Für diese Arbeit wurde das L3JRC Global Burnt Area Product (Abbildung 11) verwendet.

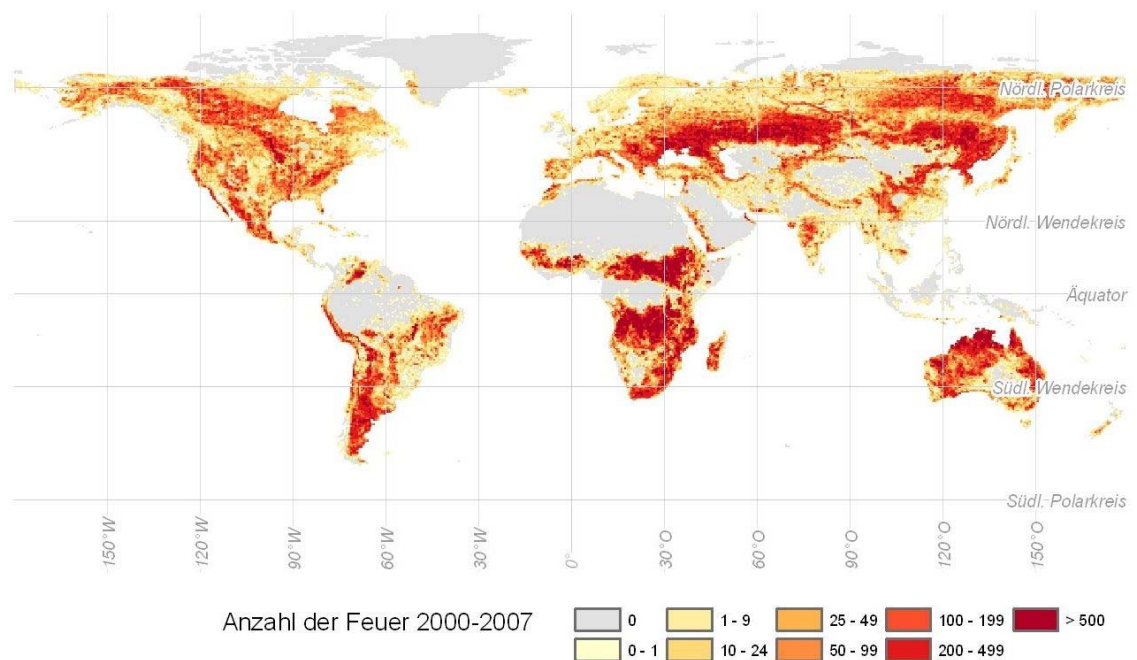


Abbildung 11: Feuerereignisse zwischen 2000 und 2007 auf Basis des L3JRC Global Burnt Area Product (Anzahl pro 0.5 ° Rasterzelle)

Die Bezeichnung L3JRC deutet auf das Konsortium beteiligter Institute hin (University of Leicester (UK), Université Catholique de Louvain (BE), Instituto de Investigação Científica Tropical, Lisbon (PT), Joint Research Centre of the European Commission (EU)).

Der Datensatz wurde aus atmosphärisch korrigierten Bildern des SPOT VEGETATION Sensor abgeleitet (Tansey et al.). Dafür wurde eine modifizierte Version des Algorithmus verwendet, der für das GBA 2000-Projekt entwickelt wurde (zum GBA Produkt siehe Tabelle 3, Seite 26).

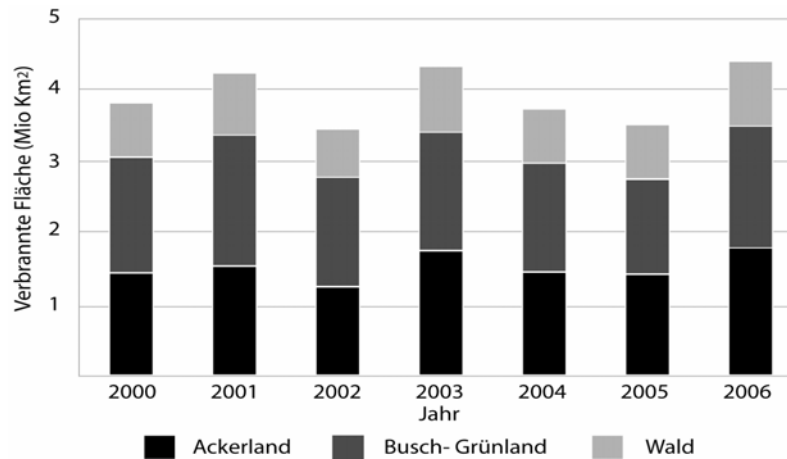


Abbildung 12: Menge an verbrannter Vegetation von 2000 bis 2006 nach L3JRC-Datensatz (Abbildung aus Tansey et al., leicht verändert)

In einer Vorprozessierung wurden Wolken und Schneebedeckungen ausmaskiert. Der eigentliche Erkennungsalgorithmus nutzt die zeitlich variablen Informationen aus dem nahen Infrarot-Kanal. Mittels eines globalen Landbedeckungslayer (GLC2000) konnten einige Fehlinterpretationen während der Postprozessierung extrahiert werden, so dass sich eine plausible Statistik über drei verschiedene Landbedeckungsgruppen ergibt (Abbildung 12).

Die L3JRC-Daten sind anhand von 72 Landsat TM-Szenen validiert worden. Zwar ist der Vergleich mit Landsat-Daten aufgrund der sehr unterschiedlichen Bodenauflösung schwierig, es deutet sich jedoch an, dass Feuer in bestimmten Vegetationstypen etwas unterrepräsentiert ist.

Die Daten für das Global Burnt Area Product wurden 2007/2008 an der Universität Bonn unter Prof. Schmidlein (Vegetationsgeographie) für ein konstruiertes 0.5 Grad-Raster aufbreitet. Die Arbeitsschritte waren:

- Download der täglichen und hoch aufgelösten Feuerereignisdaten von der TEM (Terrestrial Ecosystem Monitoring in EU) – Internetseite (http://www-tem.jrc.it/Disturbance_by_fire/products/burnt_areas/GlobalBurntAreas2000-2007.htm).
- Konstruktion einer Basisgeometrie mit 0.5°-Rasterpolygonen, die mindestens zu 33% Landanteil haben (Standardraster)

- Auszählen der Feuerereignisse in den einzelnen 0.5°-Polygonen für das monatliche Mittel. Es ergaben sich ASCII-Rasterdaten, die für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurden.

Es ergibt sich somit ein sehr umfangreicher Präsenzdatensatz, dessen Inhalte jedoch nicht alle Feuerereignisse, sondern eben nur Ereignisse aus den Jahren 2000 bis 2007 umfassen.

3.4 Daten zu den Steuergrößen

Brennstoffmenge und Brennstofffeuchte, bzw. -trockenheit gelten als wichtigste Steuergrößen für das Auftreten von Feuern. Für beide Steuergrößen sind keine globalen Datensätze vorhanden. So müssen andere Datensätze herangezogen werden, die die beiden Faktoren möglichst gut charakterisieren.

3.4.1 Daten zur Brennstoffmenge

Hier interessiert die Menge an brennbarem Material. Dieser Menge kann man sich nur über verschiedener Variablen annähern.

3.4.1.1 Nettoprimärproduktion

Die *Nettoprimärproduktion* (Netto Primary Production, NPP) ist ein Maß für die Produktion von Biomasse durch die Primärproduzenten (Pflanzen, Blaualgen, autotrophe Bakterien). Sie ergibt sich aus der Differenz von Nettophotosynthese und der Atmung der autotrophen Gesamtpflanze (Schulze et al. 2002). Der Begriff „Biomasse“ ist insofern etwas irreführend als dass er die Masse aller Lebewesen, der abgestorbenen Organismen und der organischen Stoffwechselprodukte und nicht nur die Masse an potentiell brennbarem Material enthält. Der Begriff wird dennoch verwendet, um die Abgrenzung zu nicht biogenem brennbarem Material deutlich zu machen.

Der GloPEM-Datensatz (Global Production Efficiency Model) beinhaltet den NPP für die Jahre 1981 bis 2000 10-Tages-Daten in 8 km Auflösung. Die Daten sind aus Bildern des Advanced High Resolution Radiometer (AVHRR)-Scanner abgeleitet. Das sind zum einen die Strahlungsmengen, die für die Photosynthese relevant sind, also auch die ökologischen Variablen, die die Verwendung der Strahlungsmenge beeinflussen (Prince & Goward 1995).

Die Daten für das Jahr 2000 wurden für monatliche Daten summiert und auf 0.5° resampelt (Nearest Neighbor).

3.4.1.2 Vegetationsindex NDVI

Ein häufig verwendeter Kennwert für vegetatives Material ist der *Normalized Difference Vegetation Index NDVI*. Er wird aus den roten und infraroten Farbkanälen von Fernerkundungsdaten gewonnen. Der Zahlenwert ist umso höher, je vitaler und wüchsiger die Vegetation ist. Er ist hoch korreliert mit dem Bestand an photosynthetisch aktiver Biomasse bzw. der Chlorophyllmenge und der entsprechend absorbierten Strahlung (Tucker et al. 2005). Der Index neigt allerdings dazu, den Anteil der Vegetationsbedeckung am Beginn und zu Ende der Vegetationsperiode falsch darzustellen (de Lange 2002).

Der GIMMS-Datensatz (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) stellt globale Daten für die Zeitspanne Juli 1981 bis Dezember 2004 zur Verfügung. Die Daten sind wie für die NPP (s.o.) aus Bildern des AVHRR abgeleitet. Der Datensatz ist so kalibriert, dass Werte um 0 keine oder nur sehr geringe Vegetationsbedeckung und Werte über 0.7 sehr dichte Vegetationsbedeckung bedeuten (Tucker et al. 2005).

Für diese Arbeit wurden die Monatsmittel verwendet und auf 0.5° resampelt.

3.4.1.3 Kohlenstoffmengen

Eine weitere Möglichkeit, um Hinweise auf die Brennstoffmenge zu erhalten bietet ein globaler Datensatz zum Kohlenstoffgehalt der Biomasse für das Jahr 2000 (Reusch & Gibbs 2008): die IPCC Tier1 Global Biomass Carbon Map 2000. Der Datensatz ist aus dem Landbedeckungslayer Global Land Cover 2000 (GLC 2000, vgl. Abbildung 1, Seite 5), globalen ökologischen Zonen (einem Datensatz der FAO),

und aus Daten zu natürlichen ungestörten Wäldern über eine Reihe von Klassifizierungsregeln abgeleitet.

Die Daten liegen im ARC/INFO GRID für eine Auflösung von 10 Gradminuten vor und wurden für diese Arbeit auf 0.5° resampelt.

3.4.1.4 Überblick zu den verwendeten Datensätzen

Eine visuelle Überprüfung der drei Datensätze (NDIV und NPP, jeweils mit Monatswerten, Carbon) deutet auf hohe Korrelation hin (vgl. Abbildung 13). Für

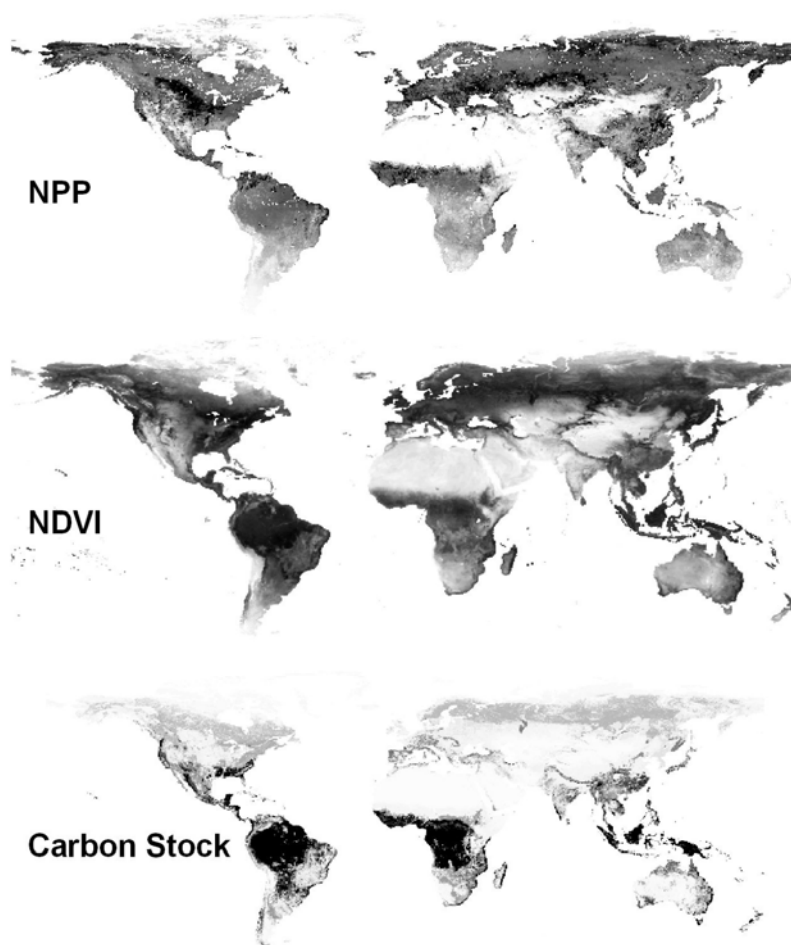


Abbildung 13: Verfügbare Datensätze zur Biomasse bzw. Brennstoff (NPP und NDVI mit Juli-Werten dargestellt).

die Vorkommensmodellierung sollte der Datensatz ausgewählt werden, der mit den Feuerereignissen am besten korreliert (siehe 4.1 Statistische Voruntersuchung, Seite 43). Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die beschriebenen und verwendeten Datensätze.

Datensatz	Beschreibung
Global Production Efficiency Model (GloPEM) Nettoprimärproduktion http://glcf.umiacs.umd.edu/data/glopem/	Verfügbar für die Jahre 1981-2000 in 10-Tagesperioden oder als jeweiliges jährliches Mittel; abgeleitet aus AVHRR Pathfinder Satellitendaten; 8km Auflösung
GIMMS NOAA/NASA Pathfinder NDVI Vegetationsindex http://eos-webster.sr.unh.edu/data_guides/ndvi_dg.jsp	Monatliche Durchschnittswerte (repräsentativ für die Jahre 1981-1994); 0.5 Grad Auflösung
IPCC Tier1 Global Biomass Carbon Map 2000 Kohlenstoffmenge der Vegetation http://cdiac.ornl.gov/epubs/ndp/global_carbon/carbon_documentation.html	Aus Landbedeckungsdaten abgeleitete Karte der vegetativen Kohlenstoffvorräte für das Jahr 2000, in 1km und größeren Auflösungen verfügbar.

Tabelle 4: Globale Datensätze, die Hinweise auf die Menge an brennbaren Material geben

3.4.2 Daten zur Trockenheit

Die Begriffe Trockenheit (Aridität) und Feuchte (Humidität) sind in einer Vielzahl von klimatologischen Größen beschrieben worden (pluviometrischer Index, Regenfaktor, xerothermischer Index, Trockengrenzformel, Palmer Drought Index usw.), die regional/kontinental auch ihre Gültigkeit haben. Eine umfassende, global gültige Systematik, die auch alle tatsächlichen und möglichen Übergänge zwischen den beiden Klimagegensätzen berücksichtigt, ist jedoch noch nicht einvernehmlich gefunden (Blüthgen et al. 1980).

3.4.2.1 Die Klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz stellt eine Möglichkeit dar, sich den Trocken- bzw. Feuchteverhältnissen zu nähern. Die Wasserbilanz ist die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung.

$$KWB = \text{Niederschlag} - \text{potentielle Evapotranspiration [mm/Zeit]}$$

Bei einem Wasserdefizit ist die Wasserbilanz negativ (Häckel 2008).

Auch Ariditätsindizes drücken das Verhältnis von Niederschlag zu Verdunstung aus und sind ebenso verwendbar. Je mehr Wasser verdunstet, desto trockener sind die Verhältnisse in Relation zum verfügbaren Niederschlag.

Die rechnerische Bestimmung der Verdunstungsrate ist nicht grundlegend gelöst und auf eine globale Betrachtung nur sehr grob anwendbar. Grund dafür ist, dass die Verdunstung über Landflächen ein sehr komplexer Vorgang ist, der nur unter eingeschränkten Randbedingungen gemessen oder rechnerisch geschätzt werden kann (Blüthgen et al. 1980). Ein globaler Raster-Datensatz tatsächlich gemessener Verdunstungswerte ist nicht bekannt. Grundvoraussetzung für die Berechnung der Evapotranspiration ist mindestens das Vorhandensein von

- Wasser (ohne Wasser keine Verdunstung) in geeigneter Form (flüssig oder fest),
- Energie (Strahlung oder Wärmeverrat aus Luft, Boden oder Gewässern)
- Sättigungsdefizit der Luft, die den verdunstenden Wasserdampf aufnehmen muss

Entsprechend gehen in die bekannteste Näherungsformel von Penman die Strahlungsbilanz der Sonne und das Sättigungsdefizit der Luft ein (Häckel 2008).

Neben dieser theoretisch fundierten Formel, die einen relativ großen Datenpool voraussetzt, gibt es eine Reihe von empirischen Formeln, die mit weniger Messdaten auskommen (Tabelle 5, Seite 34).

Die beiden ersten Formeln haben den Nachteil, dass die Luftfeuchte nicht berücksichtigt wird. Beispielsweise sind die Luftfeuchten unter mitteleuropäischen Bedingungen in der zweiten Jahreshälfte normalerweise deutlich höher als in der ersten Hälfte. Dadurch kann weniger Wasser in der Luft aufgenommen und die Verdunstungsraten sind niedriger (Schrödter 1985).

Für die Haude-Formel liegen meines Wissens keine global gültigen Proportionalitätsfaktoren vor.

Das Verfahren von Turc ist für eine einfache globale Anwendung ebenfalls ungeeignet, da der direkte Zusammenhang zwischen Nettostrahlung und potentieller Verdunstung auf Landflächen nicht realistisch ist (Baumgartner, Liebscher 1996).

Formel	Eingabeparameter
Penman	Strahlungsbilanz, Sättigungsdampfdruck und -defizit, Bodenwärmestrom, Windgeschwindigkeit, Bewuchshöhe, spezifische Verdunstungswärme
Thornthwaite	Mitteltemperatur (Messdaten); astronomisch mögliche Sonnenscheindauer (Tageslänge), empirischer Koeffizient
Blaney-Cridde	Mitteltemperatur (Messdaten); empirischer Koeffizient; Tageslänge
Haude	Sättigungsdefizit oder relative Feuchte (Messdaten); Proportionalitätsfaktor (Schätzwert)
Turc	Solarstrahlung, Temperatur, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer (Messdaten); pot. Tageslänge
Priestley-Taylor	Solarstrahlung, Sättigungsdefizit (Messdaten); Konstante (Schätzwert)

Tabelle 5: Einige Empirische Verdunstungsformeln und deren erforderliche Eingabeparameter, nach Dyck&Peschke (1995) und Schrödter (1985)

Tateishi&Ahn (1996) haben die Priestley-Taylor-Formel (Priestley&Taylor 1972) angewendet und stellen einen globalen Datensatz zur Evapotranspiration zur Verfügung. Mit der Priestley-Taylor Formel ist die herkömmliche und sehr theoretische Penman-Formel soweit modifiziert, dass eine Berechnung der Evapotranspiration mit wenigen Eingangsgrößen möglich ist. In die Berechnung gehen allerdings Daten ein, die aus unterschiedlichen Jahrzehnten stammen und unterschiedliche räumliche Auflösung haben.

Henning&Henning (1984) haben die Landverdunstung und die klimatologische Wasserbilanz für alle Kontinente berechnet und dargestellt. Die Karten sind meinem Wissen nach jedoch digital nicht verfügbar.

Willmott&Rowe (1985) benutzten eine modifizierte Version der Thornthwaite-Formel, mit der es möglich ist, die potentielle Evapotranspiration nur mit monatlichen Niederschlags- und Temperaturwerten rechnerisch zu schätzen. Für die Berechnung steht der AET Calculator 1.0 zur freien Verfügung (<http://geography.uoregon.edu/gavin/software.html>), der neben den beiden Klimawerten, die aus den Breitengraden abgeleitete Tageslänge berechnet und implementiert. Da die Niederschlags- und Temperaturwerte zur Verfügung stehen, wurde dieser Weg versucht. Aus der resultierenden Verdunstung lässt sich die

3 Material und Methoden

klimate Wasserbilanz ableiten, die als Steuergröße neben der Wasserbilanz von Tateishi&Ahn (1996) in die Modellierung mit einging.

Der visuelle Eindruck (Abbildung 14) lässt die Vermutung zu, dass Niederschlag und die offensichtlich stark korrelierende klimatische Wasserbilanz einen durchaus hohen limitierenden Einfluss auf die Feuerereignisse haben.

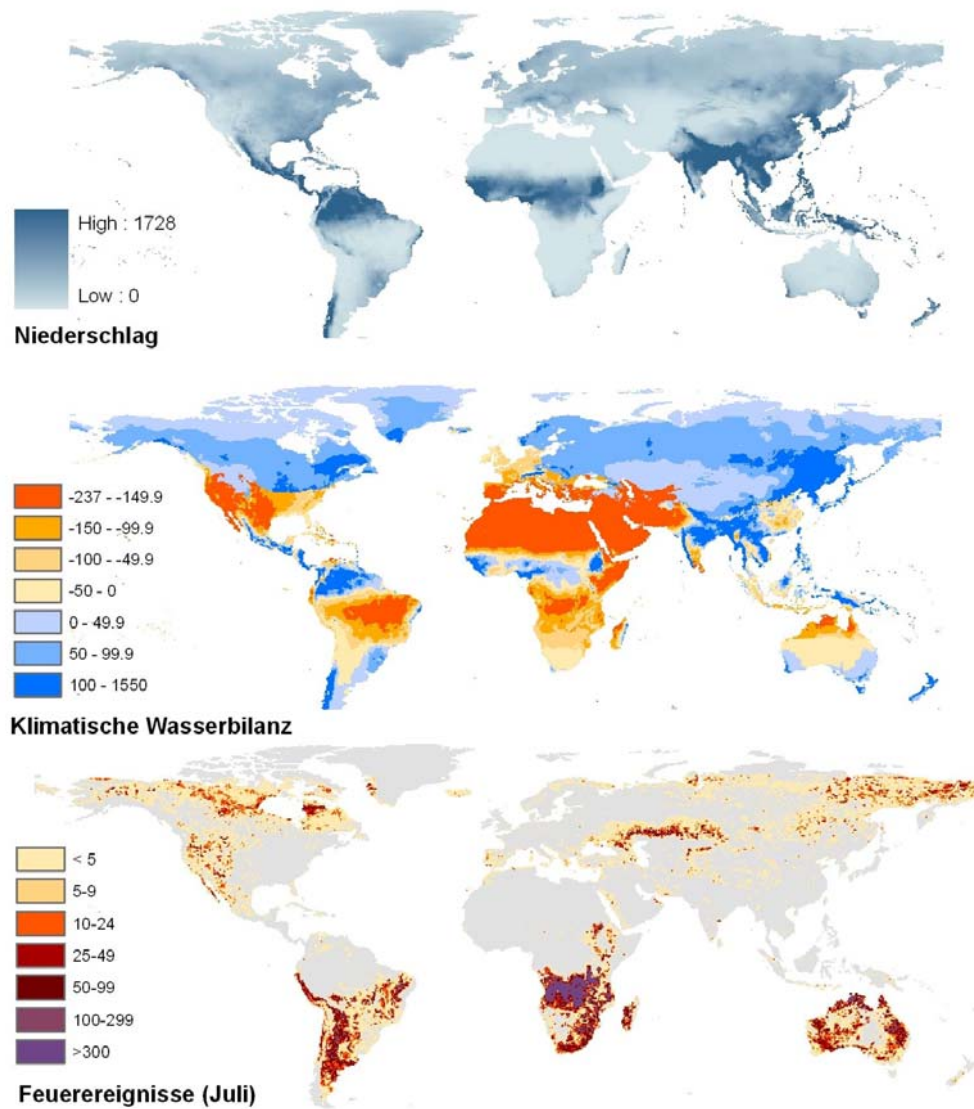


Abbildung 14: Die klimatische Wasserbilanz gegenüber Niederschlag und Feuerereignissen (Juli-Werte)

3.4.2.2 Ariditätsindex nach deMartonne

Der einfachste Ansatz zur Annäherung an die Verdunstung steckt in der Formel von deMartonne (Grieser et al. 2006). Hier wird die Verdunstung der Temperatur, addiert um den Wert 10, gleichgesetzt.

$$i = N [mm] / T [^{\circ}C] + 10$$

Für Regionen mit Temperaturen unter $-9.9^{\circ}C$ wird keine Verdunstung angenommen, so dass sich keine Werte kleiner oder gleich 0 ergeben. Dieser

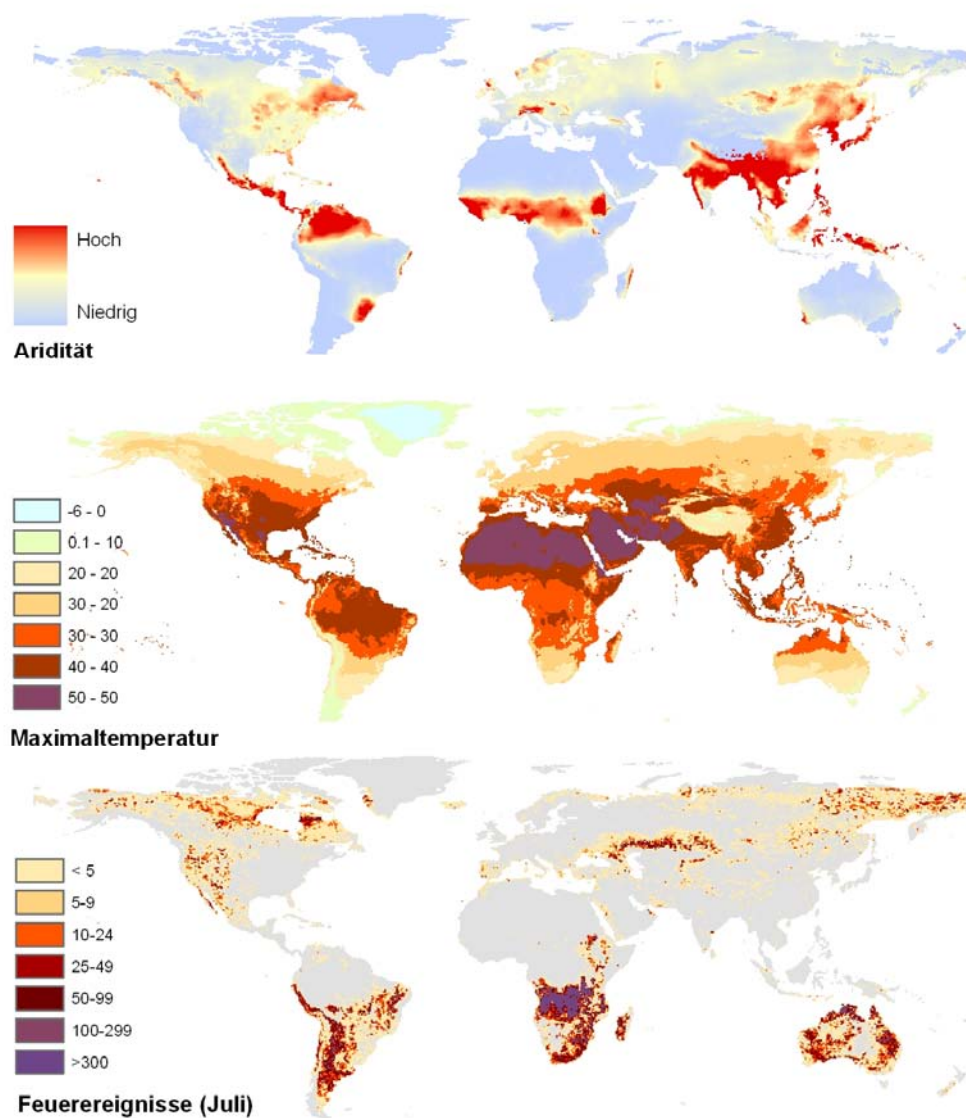


Abbildung 15: Die Aridität gegenüber Maximaltemperatur und Feuerereignissen (Juli-Werte)

einfache Ansatz bietet die Möglichkeit mittels verfügbaren Temperatur- und Niederschlagsmittelwerten den Index für unterschiedliche Zeiträume und auch für Klimaszenarios zu berechnen. Die Ergebnisse dürfen jedoch nur als sehr grobe Annäherung verstanden werden. Da der Ansatz relativ leicht und schnell realisierbar ist, wurde er verfolgt und das Ergebnis als Steuergröße mit in die Modellierung aufgenommen.

3.4.2.3 Temperatur, Niederschlag und andere Klimavariablen

Nach dem die klimatische Wasserbilanz bzw. die Verdunstung und der einfache Ariditätsindex nach deMartonne kritische Größen sind, da ihre Berechnungen für globale Ausdehnungen nur als grobe Schätzungen anzusehen sind, werden die wichtigsten Klimavariablen ebenfalls als Steuergrößen aufgenommen.

Globale Klimadaten in raumbezogener Form sind für verschiedene Zeiträume verfügbar. Tabelle 6 stellt 3 bekannte Klimadatensätze zusammen, von denen die ersten Beiden aufbereitet wurden. Der Datensatz von Cramer&Leemans fiel aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Dimension aus der weiteren Betrachtung heraus.

Der Worldclim-Datensatz beinhaltet Temperatur- Niederschlagswerte und die Meereshöhe in verschiedenen Auflösungen. Aus diesen Werten sind bioklimatische Variablen abgeleitet (Werte des wärmsten Monats, des nassesten Monats u.a.), die ebenfalls frei verfügbar sind. Die bioklimatischen Variablen sind nur als Jahresmittel berechnet, Temperatur und Niederschlag liegen als Monatsmittel vor. Grundlage des Datensatzes sind Messungen von bis zu 47554 Wetterstationen aus 30-50 Jahren. Die Werte wurden mit dem Thin-Plate Smoothing Spline-Algorithmus verrechnet, dabei gingen Längengrad, Breitengrad und Meereshöhe als unabhängige Variablen mit ein. Zielauflösung waren 30 Bogensekunden. Meereshöhe und Klimawerte wurden anschließend auf 10 Minuten aggregiert. Dabei zeigt sich eine enorme Varianz innerhalb der Rasterzellen (Hijmans et al. 2005). Für diese Arbeit mussten die Daten auf 30 Minuten resampelt werden. Dabei ist von weiterem Informationsverlust auszugehen.

Datensatz	Auflösung	Quellen
Worldclim 1.4 (Niederschlag und Temperatur) <i>http://www.worldclim.org/</i>	Bis 30 Bogensekunden (ca. 1km); Monatliche Minima und Maxima für 1950-2000	Daten von über 24.000 Wetterstationen, SRTM Höhenmodell (Hijmans et al. 2005)
CRU TS 2.1 (9 verschiedene Klimawerte) <i>http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/ grid/CRU_TS_2_1.html</i>	0.5 Bogengrad (ca. 55 km); Monatliche Mittel für verschiedene Zeiträume	Daten von Wetterstationen, Höhenmodell und verschiedene Klimavariablen (Sonneneinstrahlung, Wind) (Mitchell&Philip 2005)
Cramer & Leemans (IIASA) 2.1 (Niederschlag, Temperatur, Bewölkung, Sonnenstunden) <i>http://www.daac.ornl.gov</i>	0.5 Bogengrad (ca. 55 km); Monatliche Mittel für 1930- 1960	Daten von über 2500 Wetterstationen, Höhenmodell (Leemans&Cramer 1991)

Tabelle 6: Einige globale Datensätze zu Temperatur und Niederschlag und ihre räumliche und zeitliche Auflösung

Der CRU TS 2.1-Datensatz (CRU steht für Climatic Research Unit, einem Institut der Universität von East Anglia, Norwich, UK; TS steht für time-series) besteht aus mehreren Klimavariablen: Anteil der Bewölkung, Temperatur (Maximal-, Minimal- und Durchschnittswerte, außerdem die Temperaturspanne), Anzahl der Frosttage, Niederschlag, Dampfdruck und Anzahl der nassen Tage. Der Datensatz wurde gegenüber dem Vorgängerprodukt (CRU TS 1.0) mit einem verfeinerten Verfahren interpoliert. Für die Erstellung des Vorgängerprodukts wurde dasselbe Verfahren wie bei der Erstellung des Worldclim-Datensatzes verwendet, allerdings gingen weitaus weniger Stationsdaten ein.

Ein Vergleich zwischen den Klimavariablen zwischen CRU TS 1.0 und Worldclim 1.4 zeigt, angesichts der unterschiedlich hohen räumlichen Auflösung eine insgesamt akzeptable Übereinstimmung (New et al. 2002). Der extremste Unterschied liegt in Grönland, wo generell wenige Wetterstationen abrufbar sind. Mit dieser Problematik ist bei der Erstellung der beiden Datensätze unterschiedlich umgegangen worden (Hijmans et al. 2005).

Generell ist die Qualität der beiden Datensätze schwer vergleichbar. So wurden aus Worldclim maximale und minimale Temperaturwerte und der Niederschlag

herangezogen. Aus dem CRU TS 2.1-Datensatz boten sich die Verwendung der Variablen Mitteltemperatur, des Dampfdrucks und die Anzahl der nassen Tage für diese Arbeit an. Die letzten beiden Variablen wurden nicht aus Messwerten interpoliert, sondern aus den Temperaturwerten abgeleitet. Der Dampfdruck ist übrigens als Maß für den Wasserdampfgehalt der Luft ein häufig verwendetes Feuchtemaß (Häckel 2008).

3.4.3 Klimaszenario-Daten

Der Worldclim-Datensatz beinhaltet auch aufbereitete Klimavariablen für die beiden Emissionsszenarien SRES A2 und B2. Es stehen der minimale und der maximale Temperaturwert und der Niederschlagswert, jeweils als monatliche Mittel für 3 Zeiträume zur Verfügung. Die Ergebnisse aus 3 verschiedenen Klimamodellen wurden aufbereitet. Hier werden die Daten des HadCM3-Modells verwendet.

3.4.3.1 Das HadCM3-Klimamodell

Dieses Klimamodell wurde am Met Office Hadley Center (Bracknell, UK) für den dritten IPCC-Report entwickelt. Die Berechnungen erfolgten aufgrund der Partikel- und Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre, wie sie sich natürlicherweise verändern (Beispielsweise durch Vulkanausbrüche) und aufgrund bestimmter Annahmen anthropogen bedingt zu- oder abnehmen. Die Ergebnisse haben eine räumliche Auflösung von $2.5^{\circ} \times 3.75^{\circ}$.

An das HadCM3-Klimamodell sind noch keine dynamischen Vegetationsmodelle gekoppelt.

Nähere Informationen zum Modell liefert Pope et al. (2000).

Für die Interpretation der Szenarien sollte bewusst sein, dass die unterschiedlichen Klimamodelle unterschiedliche Ergebnisse liefern.

3.4.3.2 Emissionszenarien

Die Annahmen zur Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen sind in verschiedene Szenarien kategorisiert. Für diese Arbeit wurden Daten für 2

gegensätzliche Szenarien verwendet, die im dritten IPCC-Bericht (Watson&Albritton 2001) so beschrieben werden:

- Szenario A2 geht von einer heterogenen Entwicklung der Welt aus, d.h. das Bevölkerungswachstum und die wirtschaftliche Entwicklung sind in den Regionen in der Welt sehr unterschiedlich. Die Einkommensentwicklungen und technologische Fortschritte gehen weit auseinander. Man schätzt, dass bei einem solchen Szenario am meisten Treibhausgase emittiert werden. Es wird davon ausgegangen, dass bei diesem Verlauf die Temperaturen weltweit durchschnittlich um 2.0-5.4°C ansteigen werden (Solomon 2007).
- Szenario B2 beschreibt eine globale Entwicklung, die von einem Streben nach wirtschaftlicher, sozialer und umweltgerechter Nachhaltigkeit auf regionaler Ebene charakterisiert ist. Bei einem solchen Szenario könnten die Temperaturen um 1.4-3.8°C steigen (Solomon 2007).

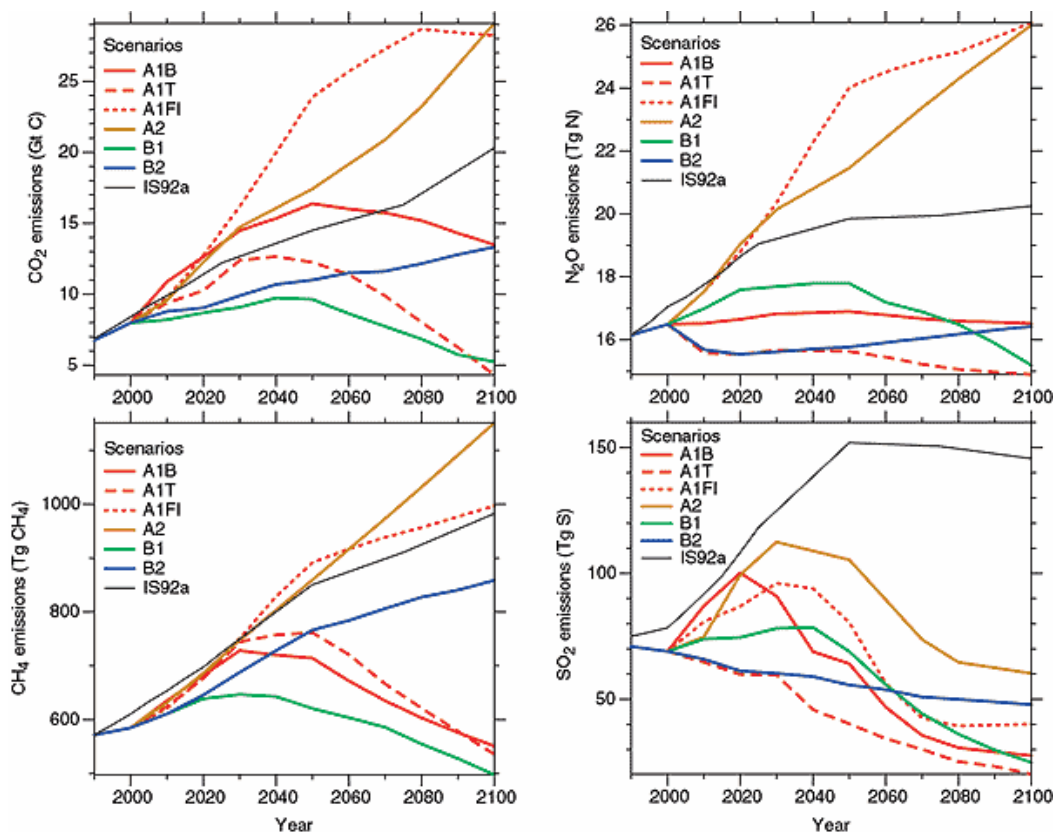


Abbildung 16: Zu- bzw. Abnahme anthropogen verursachter Treibhausgase bei verschiedenen Verlaufszenarien (aus Watson&Albritton 2001)

Die unterschiedlichen Emissionsschätzungen für die häufigsten Szenarien zeigt Abbildung 16.

3.5 Aufbereitung der verwendeten Daten

Die verwendeten Daten mussten für ihre Verwendung in der Modellierungssoftware MAXENT aufbereitet werden. MAXENT stellt folgende Anforderungen:

- Sample-Daten in einem comma-limited Textfile mit dem Header „species,longitude, latitude“: Die erste Spalte ermöglicht die Eingabe mehrerer verschiedener Artengruppen, in der zweiten Spalte muss der Rechtswert stehen (nicht zwangsläufig in geographischen Koordinaten) und in der dritten Spalte der Hochwert.
- Prädiktoren im ESRI ASCII-Format: Alle Eingangsdaten müssen dieselbe räumliche Ausdehnung haben und jede Rasterzelle muss gleich groß sein. Neben kontinuierlichen, sind auch kategorische Daten verwendbar. Die Kategorien müssen allerdings numerisch ausgedrückt sein. (Phillips 2009)

Die Feuerdaten waren als ASCII-Daten in einer räumlichen Auflösung von 0.5° aufbereitet, wurden mosaikiert, als Punkt-Shapefiles konvertiert, die Koordinaten in die Attributtabelle berechnet und die DBF-Tabelle anschliessend als CSV-Textfile exportiert und mit einem Texteditor angepasst.

Die anderen Daten zu den Steuergrößen durchliefen folgenden Prozess:

- Import oder Konvertierung der Daten ins ESRI Grid-Format
- Maskierung der Daten auf Basis der Feuer-Rasterdaten, um eine gemeinsame räumliche Ausdehnung zu garantieren.
- Resampling der Daten auf 0.5°, wenn es erforderlich war (im Nearest neighbor-Verfahren, beim Resampling wird für die neue Zelle der nächstliegende Wert der alten Ausgangszelle verwendet).
- Export der Daten als ESRI ASCII Raster

3 Material und Methoden

- Mosaikierung der ASCII-Daten. Für diesen Arbeitsschritt hat mir Prof. Schmidlein ein Skript für die Software R (The R project for statistical computing, <http://www.r-project.org>) zur Verfügung gestellt. Damit konnte der Arbeitsschritt halbautomatisiert ablaufen.

Die Schritte 2-4 konnten mit Python-Skripten in ArcGIS halbautomatisiert werden. Der erste Schritt war für die meisten Variablen problemlos in ArcGIS durchführbar, nur für den Import der Generic Raster-Daten wurde die frei verfügbare Software DIVA-GIS 5.4 (<http://www.diva-gis.org/>) eingesetzt.

In Tabelle 7 sind die verwendeten Variablen zu den Steuergrößen zusammengestellt.

Kürzel	Variable	Ausgangsdatensatz
CARBON	Kohlenstoffgehalt [t C / ha]	ESRI Grid, 10' WGS 1984
NDVI	Vegetationsindex	GeoTiff, 8km WGS 1984
NPP	Nettoprimärproduktion [g C/m ²]	GeoTiff, 8km WGS 1984
TMean	Durchschnittstemperatur [°C]	NetCDF, 0.5° WGS 1984
TMax	Maximale Temperatur [°C * 10]	ESRI Grid, 10' WGS 1984
TMin	Minimale Temperatur [°C * 10]	ESRI Grid, 10' WGS 1984
Vapour	Wasserdampfgehalt [hPa]	NetCDF, 0.5° WGS 1984
Wetdays	Anzahl der nassen Tage (Tage>25mm/Tag) [Tage]	NetCDF, 0.5° WGS 1984
Prec	Niederschlag (Precipitation) [mm]	ESRI Grid, 10' WGS 1984
Aridity	Ariditätsindex nach deMartonne [mm/°C]	Berechnet
Wbl	Klimatische Wasserbilanz (Tateishi&Ahn) [mm/Monat]	GeoTIFF, 0.5° WGS 1984
Cwbl	Klimatische Wasserbilanz (berechnet mit AET Calculator)	Berechnet
Tmax, Prec	Variablen für die Klimaszenarien 2020, 2050 und 2080	Generic Grid (BIL)

Tabelle 7: Verwendete Steuergrößen

4 Ergebnisse

4.1 Statistische Voruntersuchungen

4.1.1 Korrelationsmatrix

Eine Korrelationsmatrix verschafft Einblick in die statistischen Zusammenhänge zwischen den Steuergrößen.

	ARIDITY	CARBON	CWBL	NDVI	NPP	PREC	TMAX	TMEAN	TMIN	VAPOUR	WBL	WETDY
ARIDI	1	0.54	0.33	0.61	0.50	0.91	0.40	0.43	0.47	0.68	0.45	0.57
CARB	0.54	1	0.07	0.53	0.35	0.54	0.32	0.34	0.35	0.58	0.25	0.35
CWBL	0.33	0.07	1	0.22	0.03	0.47	-	-	-	-	0.72	0.63
NDVI	0.61	0.53	0.22	1	0.66	0.56	0.49	0.51	0.53	0.61	0.26	0.42
NPP	0.50	0.35	0.03	0.66	1	0.40	0.46	0.47	0.48	0.57	0.09	0.24
PREC	0.91	0.54	0.47	0.56	0.40	1	0.28	0.32	0.37	0.61	0.59	0.71
TMAX	0.40	0.32	-	0.49	0.46	0.28	1	0.99	0.98	0.77	-	-
TMEA	0.43	0.34	-	0.51	0.47	0.32	0.99	1	0.99	0.80	-	-
TMIN	0.47	0.35	-	0.53	0.48	0.37	0.98	0.99	1	0.82	-	0.01
VAPO	0.68	0.58	-	0.61	0.57	0.61	0.77	0.80	0.82	1	0.05	0.25
WBL	0.45	0.25	0.72	0.26	0.09	0.59	-	-	-	0.05	1	0.63
WETD	0.57	0.35	0.63	0.42	0.24	0.71	-	-	0.01	0.25	0.63	1

Tabelle 8: Korrelationsmatrix zu den Variablen der verwendeten Steuergrößen

Grau hervorgehoben sind die Zellen mit hoher Korrelation. Wenig verwunderlich ist, dass die 3 Temperaturgrößen T_{min}, T_{max} und T_{mean} einen sehr hohen Zusammenhang haben, gleiches gilt für die Beziehung des Niederschlags zur Anzahl der nassen Tage. Erstaunlicher ist, dass die klimatische Wasserbilanz von Tateishi&Ahn (1996) mit der berechneten Bilanz nicht allzu hoch korreliert. Der Verdunstungswert, der in die Bilanz einfließt, wurde bei den beiden Datensätze

nach einem sehr unterschiedlichen Ansatz erzeugt. Eine höhere Korrelation war dennoch zu vermuten. Die hohe Korrelation zwischen Aridität und Niederschlag ist wiederum einfach zu erklären, da der Niederschlag eine direkte Berechnungsgröße für die Aridität ist.

Die Bemessungsgrößen für die Menge an brennbaren Material (Carbon, NDVI, NPP) sind nicht hoch korreliert. So dass zu vermuten ist, dass eine Einteilung der Steuergrößen in die 3 Klassen Brennstoffmenge, Trockenheit und Feuchte nicht einfach möglich ist

4.1.2 Clusteranalyse

Nähere Auskunft zu einer möglichen Einteilung der Steuergrößen liefert die Clusteranalyse. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** stellt die Ergebnisse der Clusteranalyse als Dendrogramm dar.

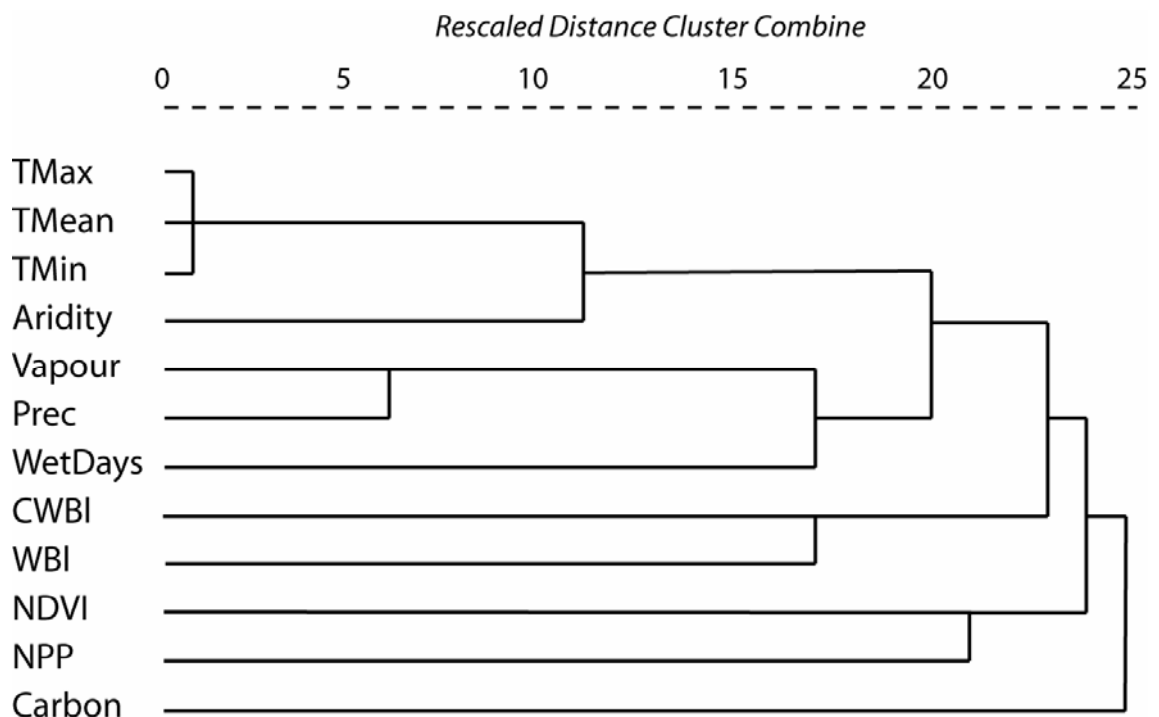


Abbildung 17: Dendrogramm zur Clusteranalyse der ökologischen Steuergrößen

Damit ergeben sich folgende Klassen:

- Klasse „Kohlenstoff“: mit einer einzigen Variable (Carbon)
- Klasse „Bioproduktion“: mit zwei Variablen (NDVI und NPP)

- Klasse „Wasserbilanz“: mit zwei Variablen (CWBL, WBL)
- Klasse „Feuchte“: mit drei Variablen (ARIDITY, PREC, WETDAYS)
- Klasse „Trockenheit“: mit vier Variablen (TMAX, TMEAN, TMIN und VAPOUR)

Dabei sind sich die Variablen zur Trockenheit denen zur Feuchte verwandtschaftlich näher als zu denen der Wasserbilanz.

Diese erste, einfache statistische Voruntersuchung lässt einerseits die Vermutung zu, dass statistische Abhängigkeiten zwischen den Variablen bestehen und andererseits drei bis fünf Variablen ausreichen könnten, um Wahrscheinlichkeiten für Feuerereignisse ausreichend genau abzuschätzen. Um weitere, eindeutige Hinweise zur Bedeutung der einzelnen Variable zu bekommen, wären intensivere statistische Methoden notwendig. Der Jackknife-Test innerhalb von MAXENT liefert hier allerdings ersetzende Informationen.

4.2 Die Modellierung mit MAXENT

Die Modellierung in MAXENT verfolgt 3 Ziele: Herausstellen der bedeutendsten Steuergrößen, Modellierung von Feuer-Wahrscheinlichkeiten und Validierung des Modells. Um die bedeutendsten Steuergrößen herauszustellen, waren 4 Durchläufe notwendig, während derer die Variablenzahl jeweils reduziert wurde. Da es nicht die Absicht war, während dieser ersten 4 Durchläufe benutzbare Modelle zu erzeugen, kann auch von Testdurchläufen gesprochen werden.

4.2.1 Testdurchläufe

Innerhalb der Testdurchläufe wurden ein Mosaik aller 12 Monate verwendet, ohne jeweils einen Monat zur Validierung heraus zu lassen. In das Modell gingen also die Feuerereignisse aller 12 Monate als Samples und alle 12 Prädiktorvariablen aller 12 Monate als Environmental Layers ein.

4.2.1.1 Erster Durchlauf mit allen 12 Variablen

Der erste Durchlauf lieferte Ergebnisse mit einem vermeintlich schlechten AUC-Wert von 0.672. Auch wenn dieser Wert mit Vorsicht zu interpretieren ist (3.2.6), darf hier von einem wenig zufrieden stellendem Ergebnis gesprochen werden. Die Vermutung liegt nahe, dass sich einige der Variablen in ihrer Wirkungsweise negativ beeinflussen.

Die Ergebnis-Ausgabe von MAXENT beinhaltet eine heuristische Schätzung des relativen Beitrags von den einzelnen Steuergrößen zum Modellergebnis. Carbon, Niederschlag und Dampfdruck waren demnach die einflussreichsten Variablen, was auch das Ergebnis des Jackknife-Tests belegt (Abbildung 18). Carbon hatte sogar eine besonders hohe Bedeutung.

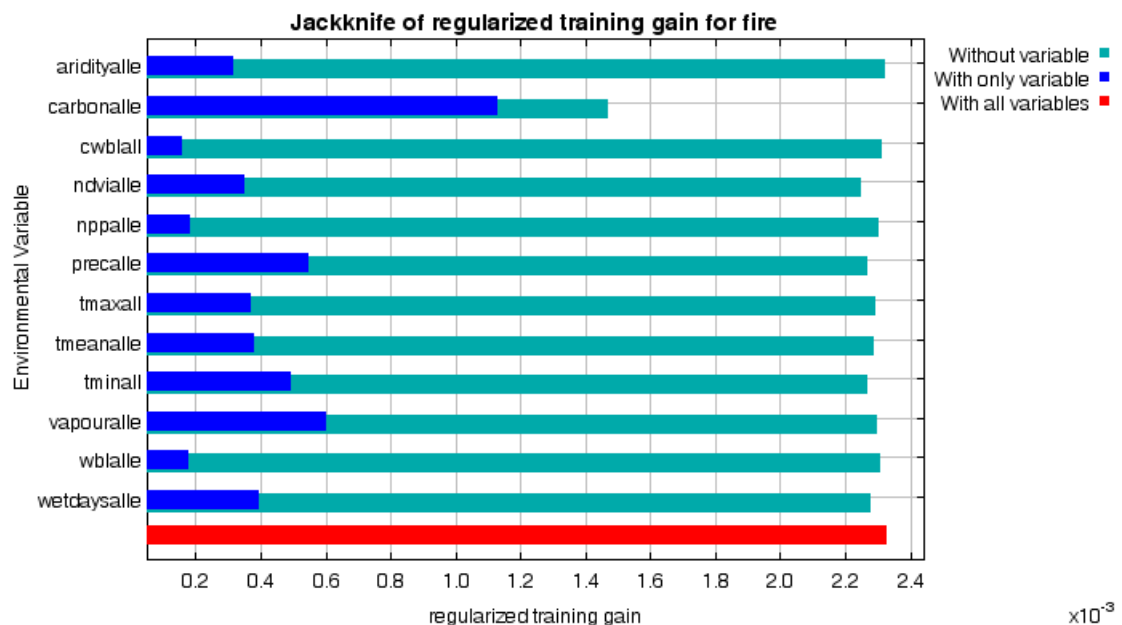


Abbildung 18: Ergebnisse des Jackknife-Tests für den ersten Testdurchlauf mit 12 Variablen

Interessant ist auch der geringe Einfluss der Variablen zur klimatischen Wasserbilanz und zu Aridität. Es war zu vermuten, dass diese Steuergrößen eine sehr große Bedeutung für die Feuerereignisse haben müssten.

4.2.1.2 Zweiter Durchlauf mit 8 Variablen

In einem zweiten Durchlauf wurden 3 Variablen entfernt, um die Entwicklung der Modellgüte studieren zu können. Die Wahl der zu entfernenden Variablen fiel auf WBI (klimatische Wasserbilanz von Tateishi&Ahn), NPP (Nettoprimärproduktion),

Aridity und TMean (Durchschnittstemperatur). Es wurden bewusst aus allen Klassen Variablen ausgesucht, um die Einflussmöglichkeiten der Klassen nicht zu schmälern. Dabei wurden immer jeweils die Variablen ausgesucht, die am wenigsten zum Modellergebnis beigetragen hatten.

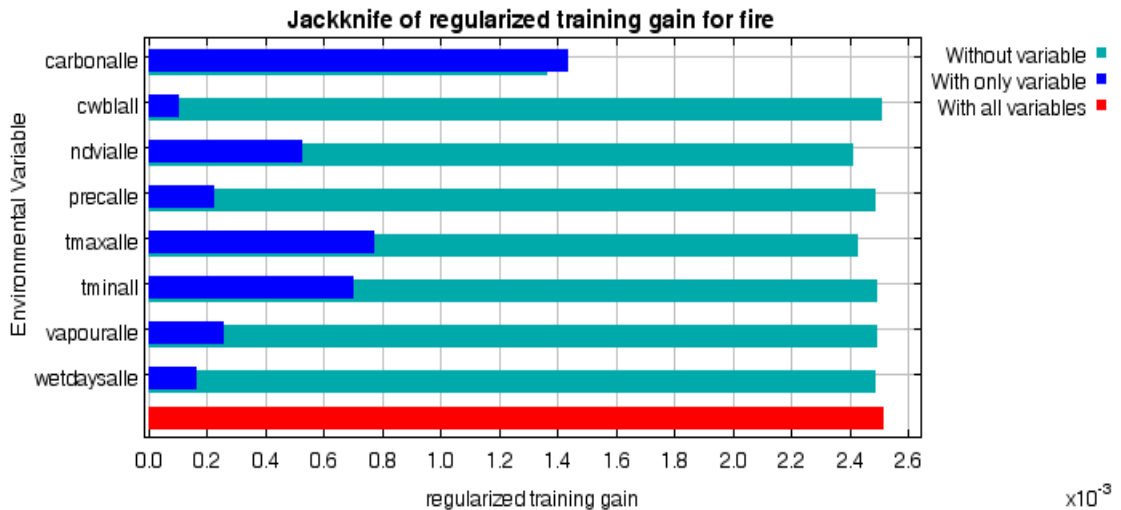


Abbildung 19: Ergebnisse des Jackknife-Tests für den ersten Testdurchlauf mit 8 Variablen

Der AUC-Wert stieg bei der Berechnung auf 0.708, was theoretisch einer akzeptablen Modellgüte entspricht.

4.2.1.3 Dritter Durchlauf mit 5 Variablen

Im Dritten Durchlauf wurden eine Variablen aus der feuchte relevanten und zwei Variablen aus der temperaturabhängigen Steuergröße-Klassen extrahiert:

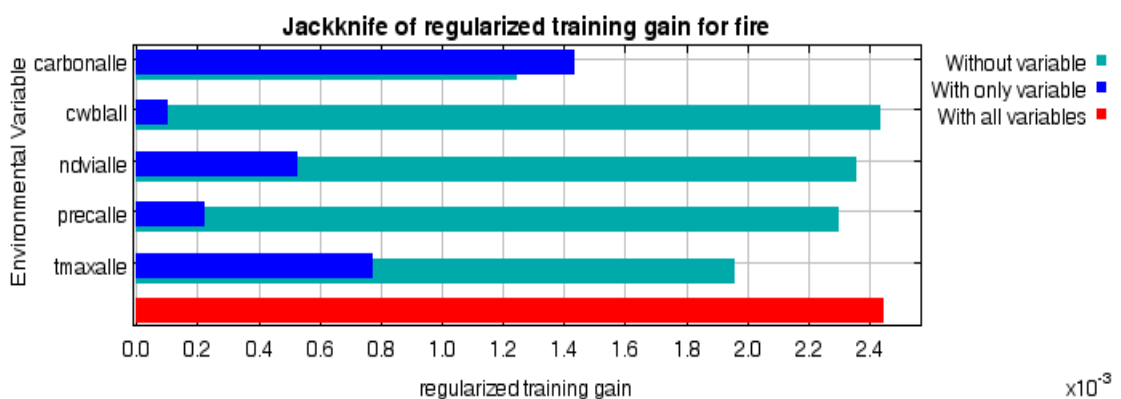


Abbildung 20: Ergebnisse des Jackknife-Tests für den dritten Testdurchlauf mit 5 Variablen

die WetDays, die Minimaltemperatur und der Dampfdruck. So verblieb je eine Variable aus jeder größeren Klasse im Modellprozess. Die Modellgüte lag bei 0.702, lag somit im Bereich der vorhergehenden Modellierung.

4.2.1.4 Vierter Durchlauf mit 3 Variablen

Im letzten Durchlauf wurden nur mehr 3 Variablen verwendet: Tmax (Maximaltemperatur), der Niederschlag (prec) und Carbon. Tmax und Prec hatten die höchste Bedeutung innerhalb der Klassen Trocken/Feucht, Carbon war bei allen Testdurchläufen die Variable mit der höchsten Bedeutung. Der AUC-Wert stieg nun auf 0.731.

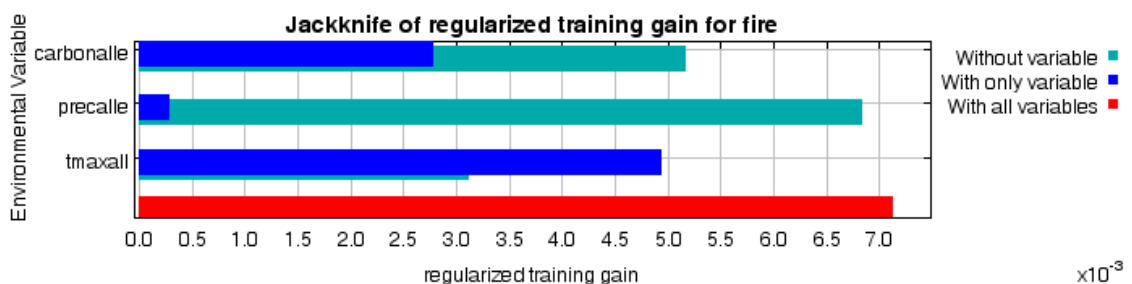


Abbildung 21: Ergebnisse des Jackknife-Tests für den vierten Testdurchlauf mit 3 Variablen

4.2.2 Modellierungsdurchlauf

Wie die Ergebnisse aus den Testdurchläufen zeigen (4.2.1) erreicht eine Modellierung der Feuerwahrscheinlichkeiten mit den drei Variablen Maximaltemperatur (Tmax), Niederschlag (Prec) und Kohlenstoffgehalt (Carbon) einer ausreichend guten Modellgüte.

Der Modellierungsdurchlauf wurde mit den drei Variablen 12 Mal durchgeführt, mit dem jeweiligen Unterschied, dass immer ein Monat komplett ausgelassen wurde. Das entstandene Modell wurde auf die Prädiktoren des jeweils fehlenden Monats angewendet um das Ergebnis mit den zurückgehaltenen Feuerdaten zu vergleichen.

Die ROC-Kurve lässt Rückschlüsse auf die Modellgüte zu:

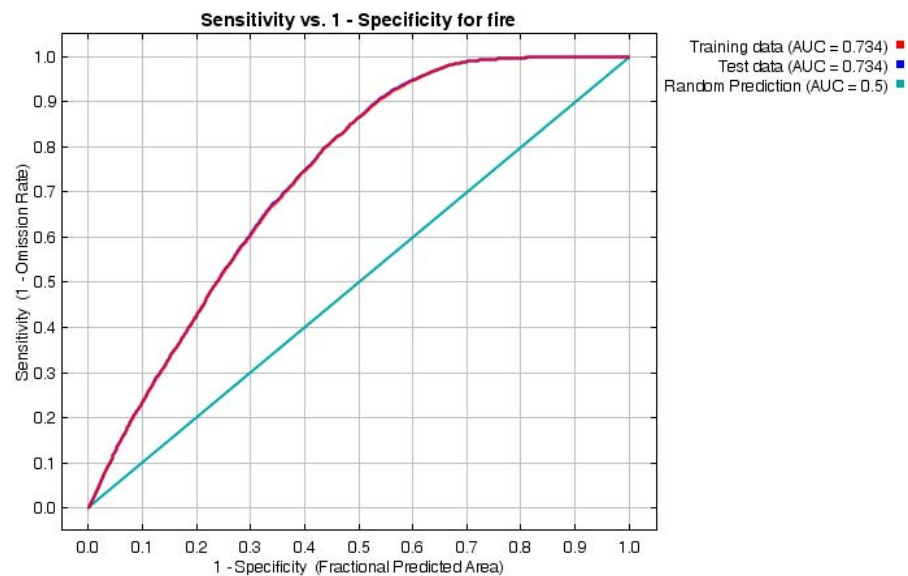


Abbildung 22: ROC-Kurve vom Modelldurchlauf mit fehlenden Juli-Daten.

Für die ROC-Kurve wird die Sensivität gegenüber dem Term „1-Spezifität“ aufgetragen. Mit Sensivität wird der Anteil der korrekten Vorkommensprognosen, mit Spezifität der Anteil der falschen Nichtvorkommensprognosen bezeichnet. Die Fläche unterhalb der ROC-Kurve gibt einen Hinweis auf die Modellgüte.

MAXENT gibt außerdem die Response-Kurven aus. Die bedeuten den Effekt der einzelnen Steuergröße auf das Feuergeschehen:

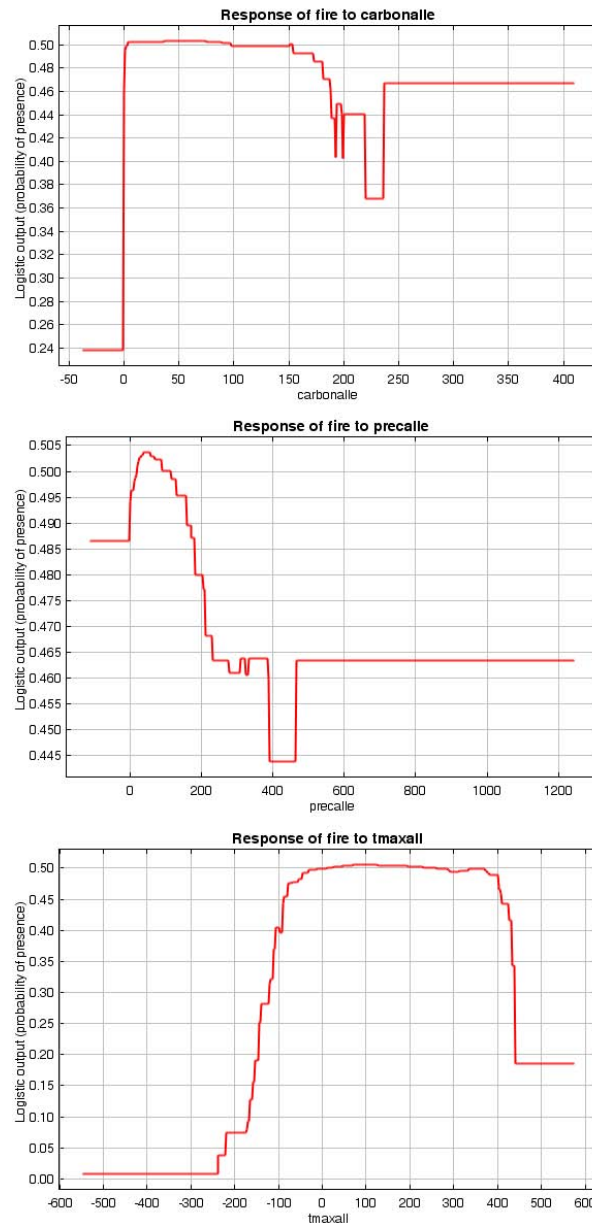


Abbildung 23: Die Responsekurven der wichtigsten ökologischen Steuergrößen Kohlenstoffvorrat (oben), Niederschlag (Mitte) und maximale Temperatur (unten)

Der Kohlenstoffvorrat hat eine über den gesamten Wertebereich hohe Bedeutung für das Modell. Nur im mittleren Bereich zwischen 200 und 250 t Kohlenstoff/ha ist die Bedeutung etwas geringer. Hier schlägt die maximale Temperatur höher durch, die schon bei Werten ab -10° Bedeutung gewinnt, die sie erst bei Werten ab $+40^{\circ}$ wieder verliert. Der Niederschlag ist vor allem im niedrigeren Wertebereich zwischen 0 und 100 mm einflussreich.

Als Schwellenwert der Vorkommenswahrscheinlichkeit wird von MAXENT 0.52 (für den Fall dass 10% der Trainingsdaten falsch zugeordnet werden) ausgegeben,

d.h. ab einem Wert von 0.52 sind Feuerereignisse aufgrund ihrer ökologischen Prädiktoren wahrscheinlich.

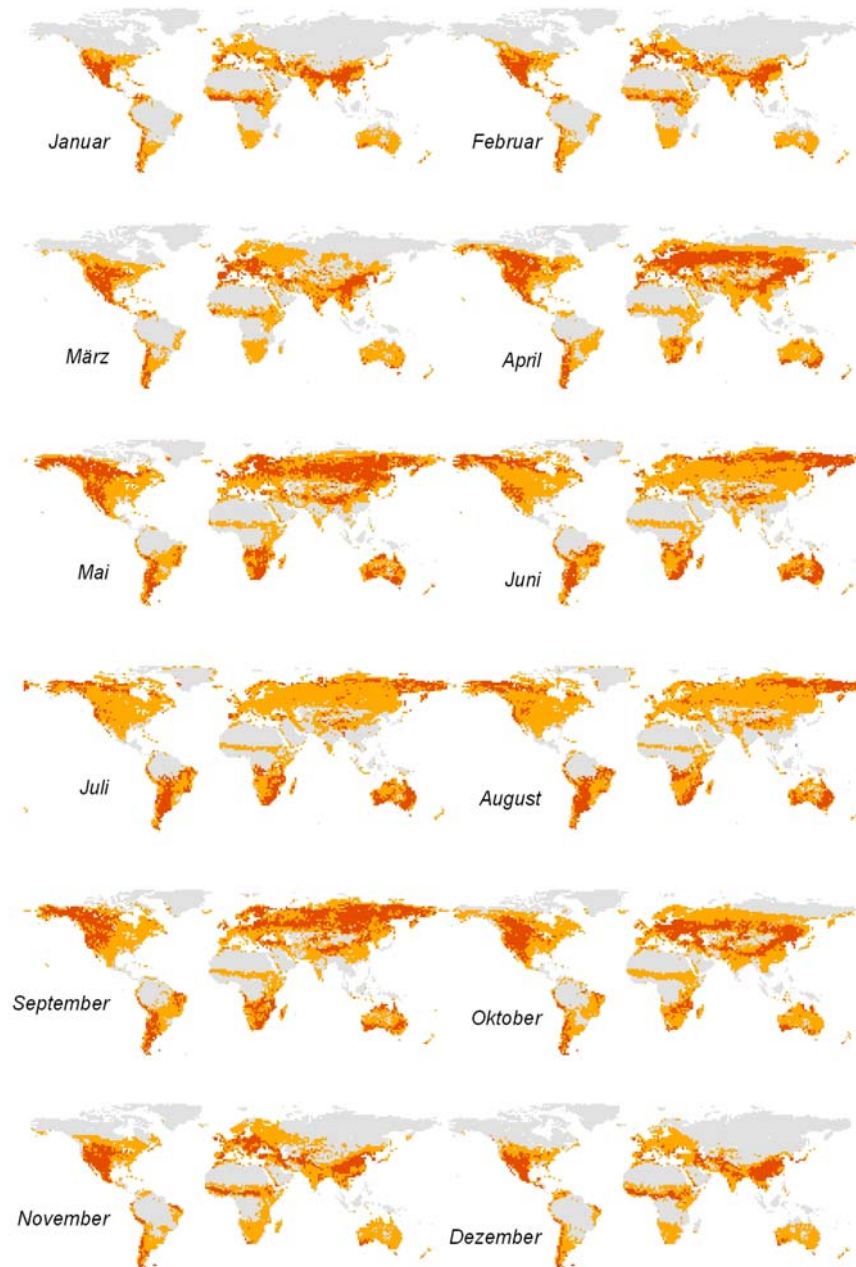


Abbildung 24: Globale monatliche Feuerwahrscheinlichkeiten (orange: wahrscheinlich, rot: hoch wahrscheinlich)

In Abbildung 24 ist das Monatsmosaik für die einzelnen Monate dargestellt. Schwellenwerte über 0.53 sind als hochwahrscheinlich klassifiziert.

4.3 Validierung

Die Validierung ergibt sich aus der Methodik: Ein Mosaik aus den Daten zu den 12 Monaten wurde in die Modellierung geschickt, wobei jeweils die Daten eines Monats heraus genommen wurden. Es haben sich somit 12 Modellierungsdurchläufe ergeben. Innerhalb der Durchläufe wurde das Modellergebnis auf die herausgenommenen Prädiktordaten angewendet.

Monate	AUC-Wert	Feuerereignisse (Betroffene Rasterzellen lt. Ereignisdaten)	Anteil der Ereignisse, mit einer räumlichen Distanz zum Modellereignis > 1°	Übereinstimmung zwischen Modell und Ereignis (Positivwerte)
Januar	0.723	11480	29.92%	86.03%
Februar	0.722	14483	32.74%	85.98%
März	0.727	17305	33.83%	86.38%
April	0.730	21707	30.16%	92.74%
Mai	0.733	27188	24.42%	94.51%
Juni	0.734	26812	27.32%	95.17%
Juli	0.734	23358	24.18%	92.67%
August	0.736	28406	33.36%	89.77%
September	0.732	30121	23.69%	94.37%
Oktober	0.737	29798	58.29%	82.20%
November	0.731	20931	45.17%	81.90%
Dezember	0.724	16072	47.20%	80.67%

Tabelle 9: Kennwerte zur Interpretation des Modellergebnisses

Die Übereinstimmungen zwischen dem modellierten Ergebnis und dem beobachteten Feuerereignissen scheint saisonal variabel: in einigen Monaten mit vielen betroffenen Rasterzellen (beispielsweise Mai, Juni, September) ist die Übereinstimmung besonders hoch (um 95%) und in einigen Monaten mit weniger betroffenen Zellen (beispielsweise Dezember, Januar, Februar) ist die

Übereinstimmung geringer (80.7-86%). Ein hoher linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ereignissen und der Übereinstimmung besteht allerdings nicht (Pearson-Korrelationskoeffizient 0.49).

Insgesamt kann bei einer durchschnittlichen Übereinstimmung von 88.5% von einem guten Modellergebnis gesprochen werden. Abbildung 25 zeigt die räumliche Verteilung der positiven und negativen Übereinstimmungen.

Es verwundert der Anteil der entfernteren Beobachtungen zum jeweils nächst gelegenen Modellergebnis. Hier besteht ein linearer Zusammenhang (Pearson-Korrelationskoeffizient 0.85): wenn der Anteil der entfernteren Falschwerte sinkt, steigt die Übereinstimmung zwischen Modellberechnung und Ereignisdaten. Das lässt die Vermutung zu, dass das Modell etwas zu verklumpenden Wahrscheinlichkeitsaussagen neigt bzw. räumlich isoliertere Wertebereiche weniger Bedeutung für die Modellierung erlangen. Diese Beobachtung ist jedoch nur eine Vermutung und soll beispielhaft darauf hindeuten, dass mit leicht modifizierten Modellierungseinstellungen noch bessere Ergebnisse möglich sein könnten.

Eine weitere Möglichkeit zur Validierung ergäbe sich aus dem Vergleich der Resultate mit Resultaten anderer Forschungsgruppen: Die resultierenden Wahrscheinlichkeitskarten sind allerdings mit den Ergebnissen von Krawchuk et al. (2009), die der Thesis am nächsten liegen kaum vergleichbar, da sie dort nur in einer jährlichen und hier in einer monatlichen Auflösung vorliegen.

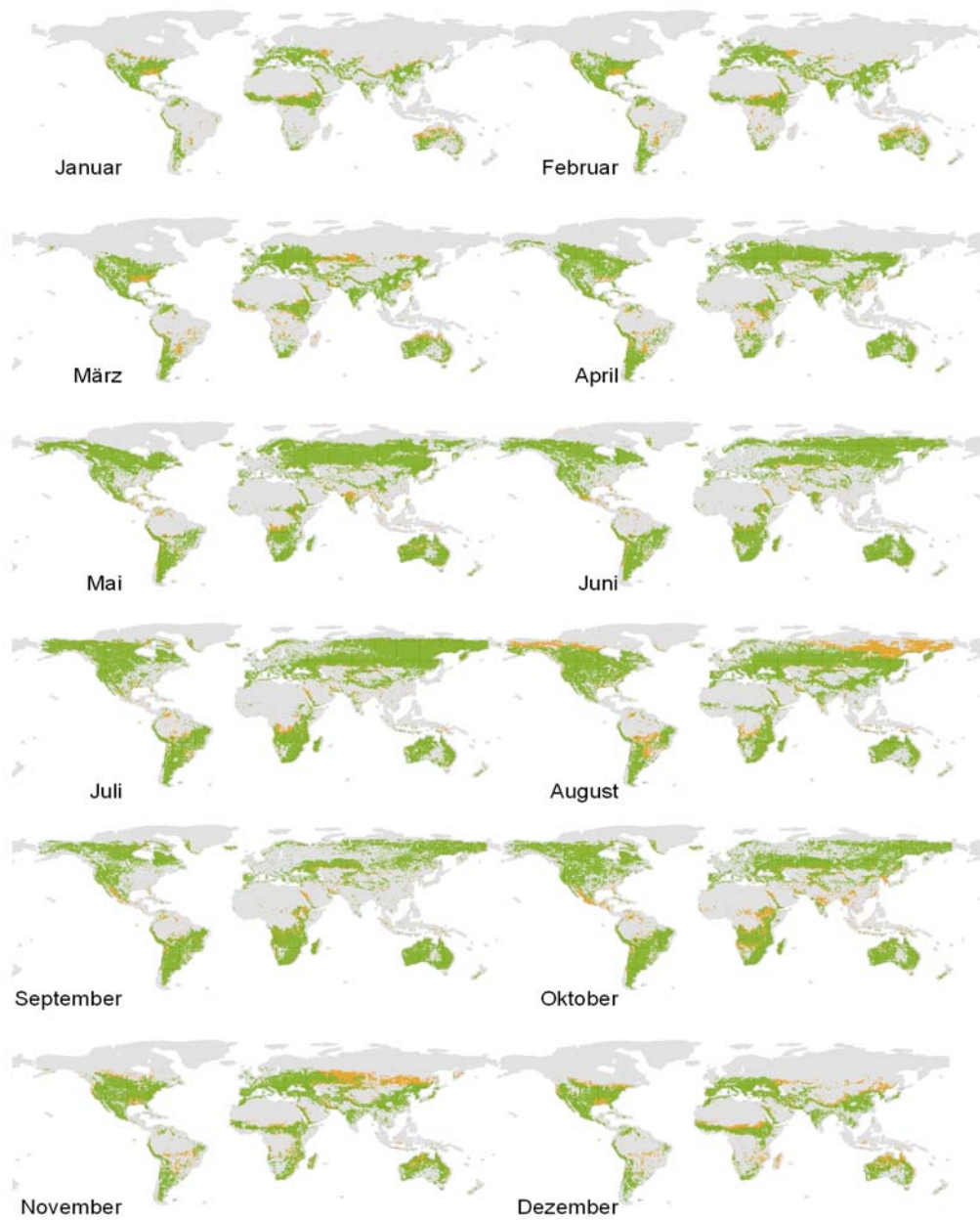


Abbildung 25: Validierung der Modellergebnisse, positiv validierte Ereignisse sind grün, negativ validierte Ereignisse orange dargestellt

4.4 Projektion des Modells auf Klimaszenarien

Das Modell kann in MAXENT einfach auf veränderte oder auch räumlich neue Bedingungen projiziert werden. Die Projektion auf die veränderten Umweltbedingungen ist bereits während des normalen Modelldurchlaufs möglich. Einzige Bedingung ist, dass für die Projektion die gleichen Umweltvariablen zur Verfügung stehen wie für die Modellausgangssituation.

Um Aussagen zum Feuerregime in 10, 40 und 70 Jahren zu bekommen, wurde das Modell, das sich aus den Variablen Maximaltemperatur, Niederschlag und Carbon ergeben hat, auf die Szenariodaten der SRES-Szenarien A2 und B2 jeweils für die Jahre 2020, 2050 und 2080 angewendet.

Die Szenarien für das Jahr 2080 zeigt Abbildung 26, die Karten zu den übrigen Szenarien finden sich im Anhang.

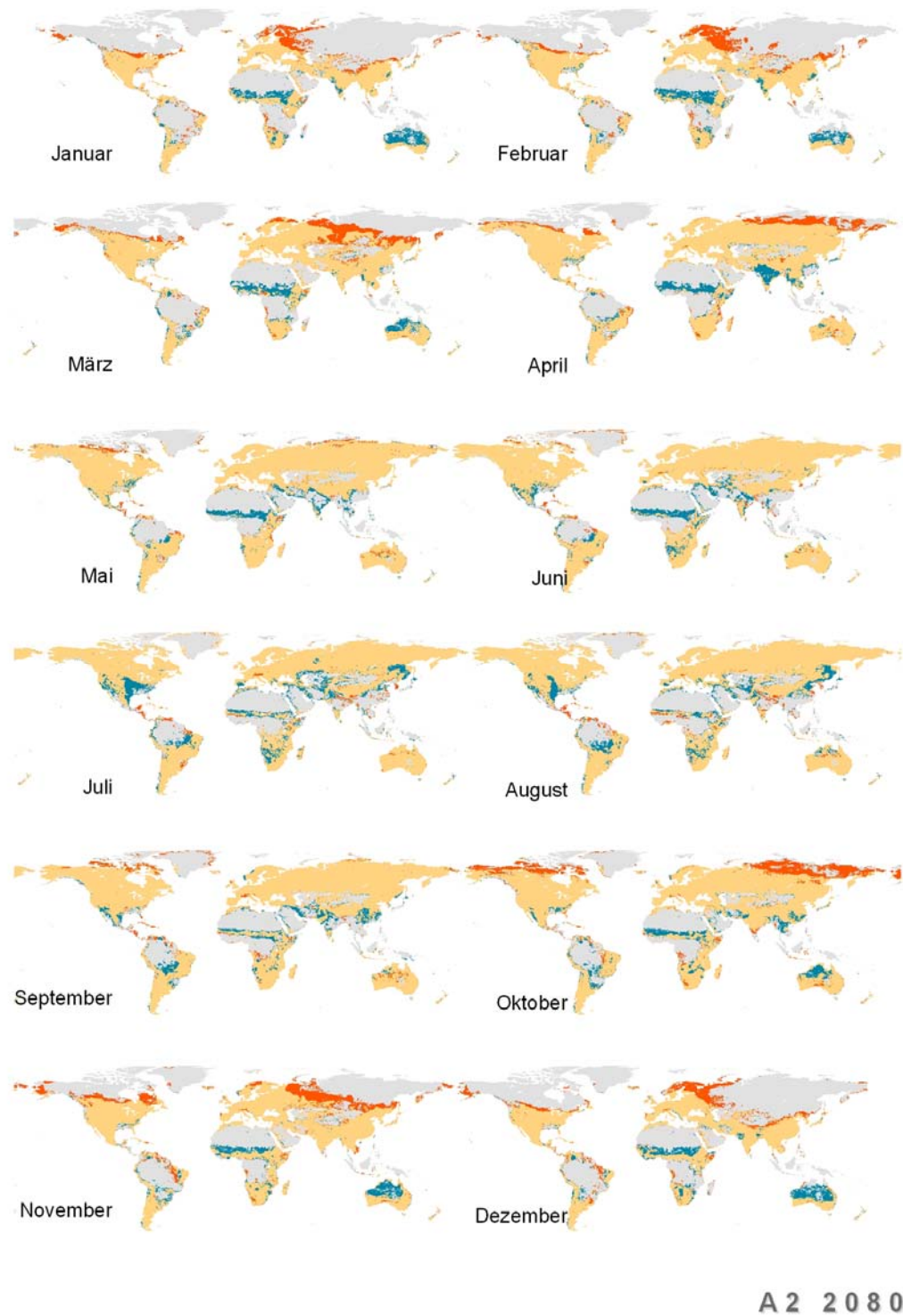


Abbildung 26: Veränderungen der Feuerwahrscheinlichkeiten bei dem Klimaszenario A2 für die Monate des Jahres 2080 (blau: Abnahme, rot: Zunahme gegenüber heute)

Die Ergebnisse der Projektion fließen in die thematischen Erläuterungen ein.

4.5 Thematische Erläuterung der Ergebnisse

Die Erläuterungen erfolgen Kontinent für Kontinent. Vorauszusetzen ist, dass die modellierten Feuerwahrscheinlichkeiten allein Hinweise auf begünstigende oder verhindernde Verhältnisse für das Ausbrechen größerer Feuer liefern.

Sie sind mit Feuerprognosen oder -vorhersagen in keinem Falle gleichzusetzen.

Als Abbildung 27 findet sich eine globale Gesamtkarte zur Anzahl der Feuermonate.

4.5.1 Nord- und Mittelamerika

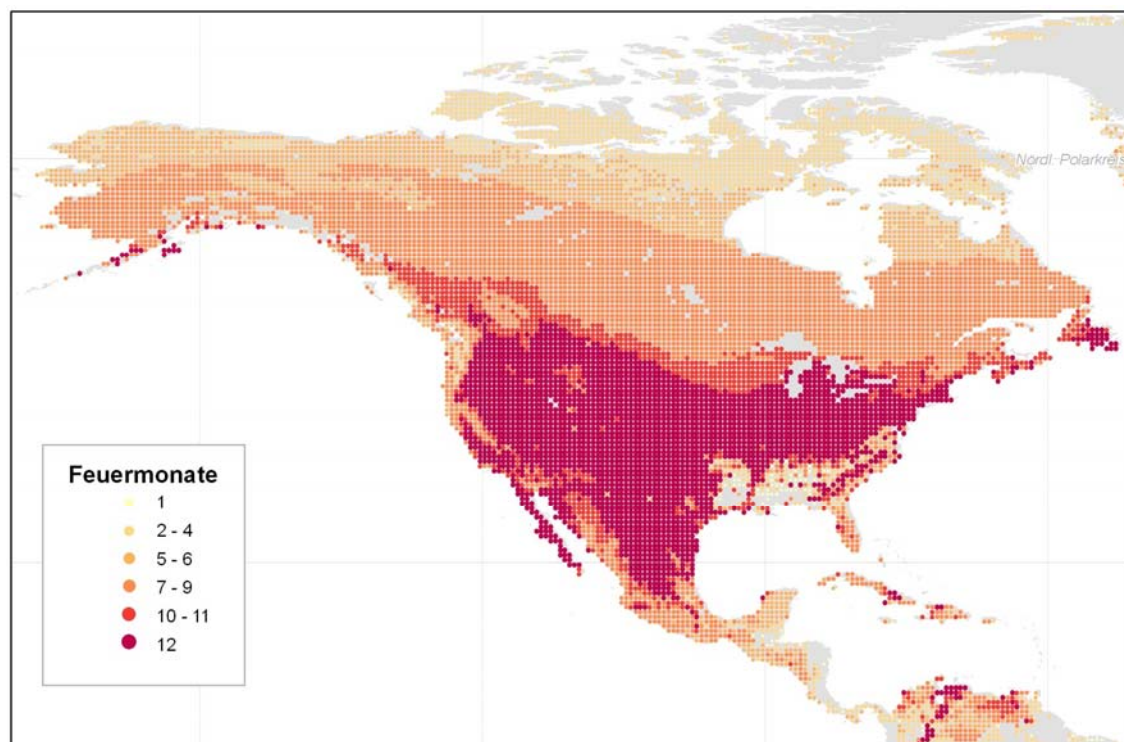


Abbildung 27: Anzahl der Feuermonate für Nord- und Mittelamerika

Permanente Feuerwahrscheinlichkeiten lassen sich für Nordamerika für den Bereich der Great Plains, des zentralen Tieflands und für Kalifornien zuordnen. Die westlichen Kordilleren unterbrechen die Feuerwahrscheinlichkeiten vor allem an

besonders hoch gelegenen, kälteren Stellen. Erstaunlich sind vereinzelte Regionen mit permanenter Feuerwahrscheinlichkeit in den nördlichen Breiten auf Neufundland und den Aleuten.

Dabei übersteigen die Wahrscheinlichkeiten die 60°-Breite erst im März/April und bleiben dort bis Oktober/November. In den Monaten Dezember bis Februar werden sie durch Temperaturen unter 0°C limitiert.

Im Zuge eines Klimawandels könnte sich die nördliche Ausbreitungsgrenze weiter nach Norden verschieben.

In Mittelamerika kommt es nur auf den großen Antillen (Kuba und Haiti) zu vereinzelt permanenten Feuerwahrscheinlichkeiten. Im übrigen Mittelamerika limitiert die Brennstoffmenge häufigere Wahrscheinlichkeiten.

In Mittelamerika kann, bei dem derzeit kalkulierten Klimaszenario, in Zukunft insbesondere in Mexiko von häufigeren Bränden ausgegangen werden.

4.5.2 Südamerika

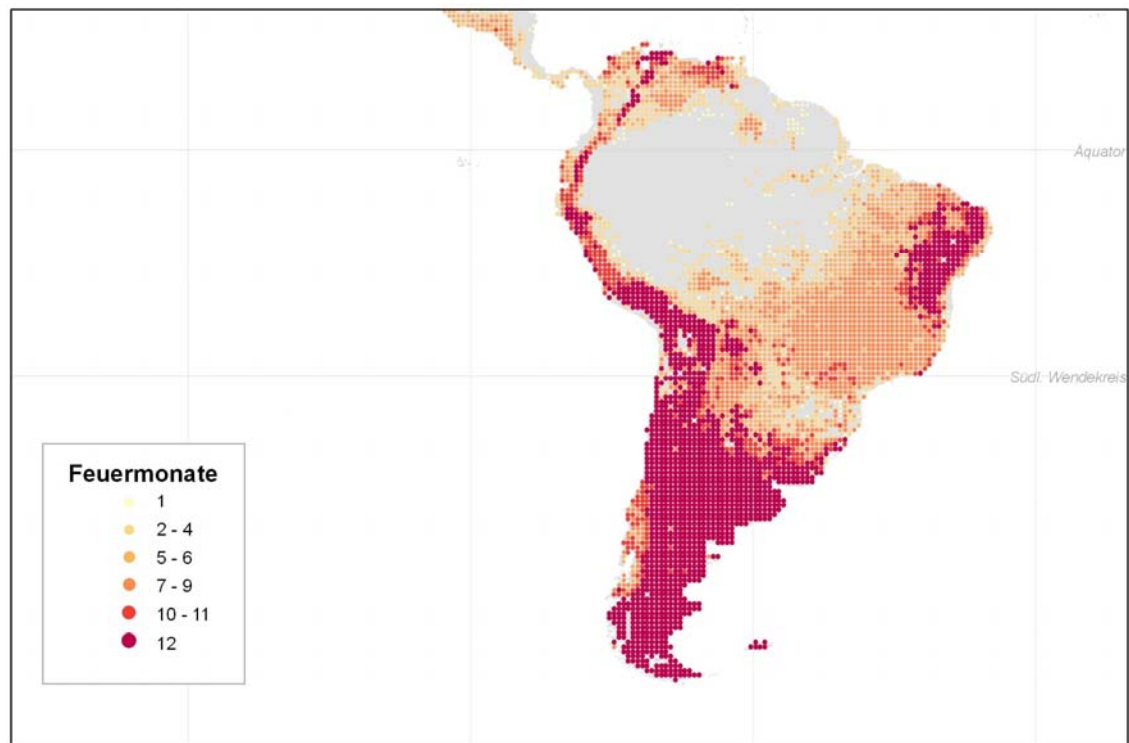


Abbildung 28: Anzahl der Feuermonate in Südamerika

Im Amazonas-Becken sind die Niederschläge zu hoch, um auch nur vereinzelte Feuerereignisse wahrscheinlich zu machen. Ebenso verhält es sich, wenn auch nicht über das gesamte Jahr gleich, im Bereich des Brasilianischen Schilfs. Zu hohe Biomassegehalte scheinen die Feuerzahlen zu reduzieren, was möglicherweise an der zwangsläufig komplexeren horizontalen Strukturierung der Biomassemengen liegt, die einer Feuerentzündung entgegen wirken. Die Pampa und die unteren Lagen der Anden dagegen bieten vielerorts sehr gute Bedingungen für Feuerereignisse über das gesamte Jahr.

Wenn auch in den Monaten Juni-August die Feuerwahrscheinlichkeit in der Pampa ausgeprägter ist als in anderen Monaten, ist eine Saisonalität wenig ausgeprägt.

Ein Zukunftsszenario für Südamerika hängt unter anderem stark von der Entwicklung der tropischen Regenwälder ab. Ausgehend von den klimatischen Bedingungen könnte es im zentralen Bereich des Kontinents aufgrund steigender Niederschläge zu reduzierten Feuerwahrscheinlichkeiten kommen.

4.5.3 Afrika

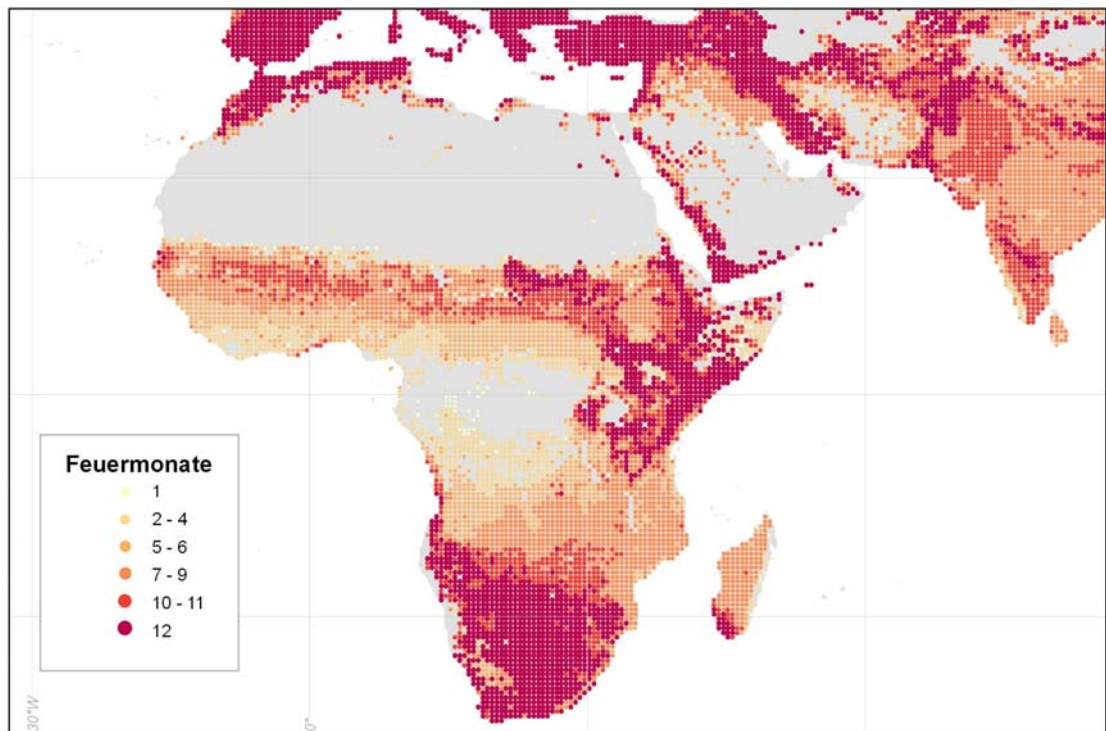


Abbildung 29: Anzahl der Feuermonate in Afrika

Die nahezu Biomasse-lose Sahara und das feuchte Kongobecken reduzieren die Feuerwahrscheinlichkeit über das gesamte Jahr auf ein Minimum. Im Kongobecken kommen noch sehr hohe Biomassemengen hinzu, die, wie bereits für Südamerika erläutert, aufgrund ihrer komplexen Struktur Feuern entgegen wirken können.

Rund um den Großen Grabenbruch und in den trockenen Kalahari-Steppen ist aufgrund der äquatorialen Lage jedoch von ganzjähriger Feuerwahrscheinlichkeit auszugehen (ausgenommen die Bereiche um die großen Seen).

Aufgrund steigender Niederschläge in der Sahelzone werden hier, basierend auf aktuellen Klimaszenarien, Feuer weniger wahrscheinlich.

4.5.4 Australien und Ozeanien

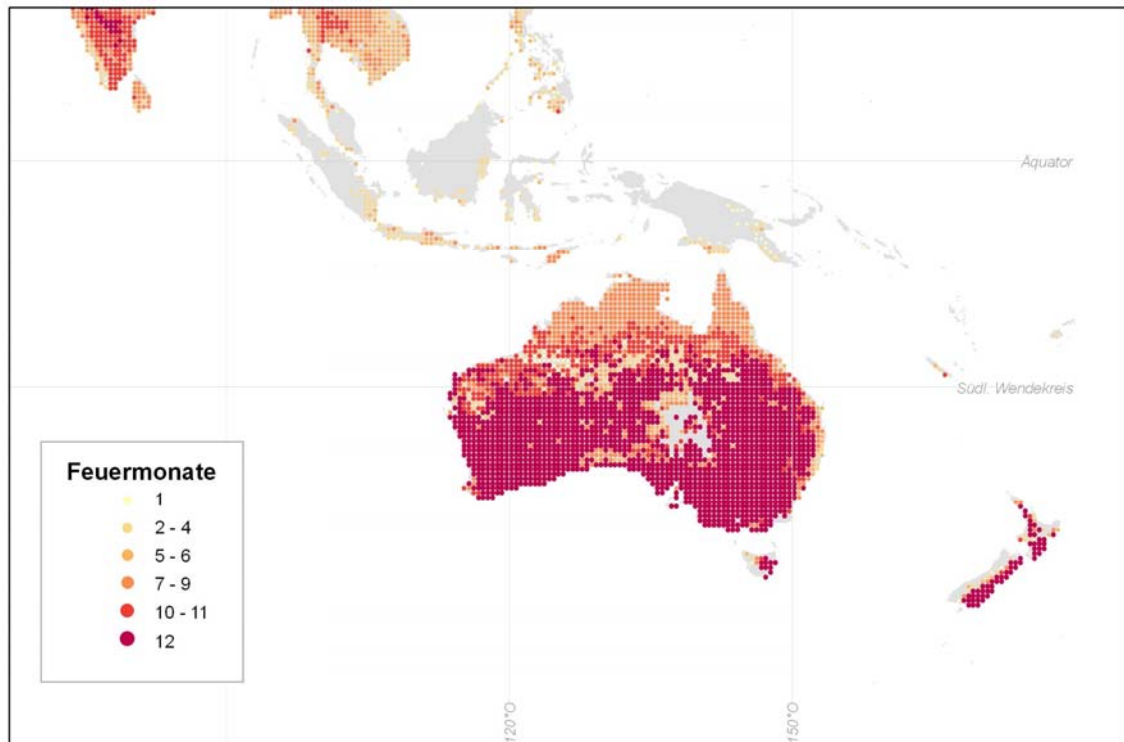


Abbildung 30: Anzahl der Feuermonate in Australien und Ozeanien

Feuer sind auf dem australischen Kontinent beinahe das gesamte Jahr über wahrscheinlich. Allein im Simpson Desert ist die Menge an Biomasse limitierend. Im nördlichen Bereich des Landes treten Feuer eher in den Monaten April bis September auf und fehlen von Dezember bis Februar. In Neuseeland scheinen Feuer in den landwirtschaftlich geprägten Teil weitaus wahrscheinlicher als im übrigen Teil des Landes, das überwiegend feuerfrei zu sein scheint.

Für den Norden Australiens könnte der Klimawandel höhere Niederschläge und damit verbunden weniger Feuer bringen.

Auf Java, Borneo, Neuguinea und anderen ozeanischen Inseln sind nur vereinzelt Feuerwahrscheinlichkeiten über mehrere Monate modelliert. Das könnte zum einen an den hohen Niederschlägen liegen, zum anderen an den bereits für Südamerika und Afrika diskutierten sehr hohen Biomassegehalten.

Die zukünftige Verbreitung von Feuern ist für Ozeanien stark abhängig von der Zukunft der Biomassestrukturen. Reduzieren sich die Bestände auf ein normal hohes Niveau sind höhere Brandzahlen vorstellbar. Allein aufgrund der

klimatischen Veränderungen ist derzeit noch nicht von höheren Feuerzahlen auszugehen.

4.5.5 Asien

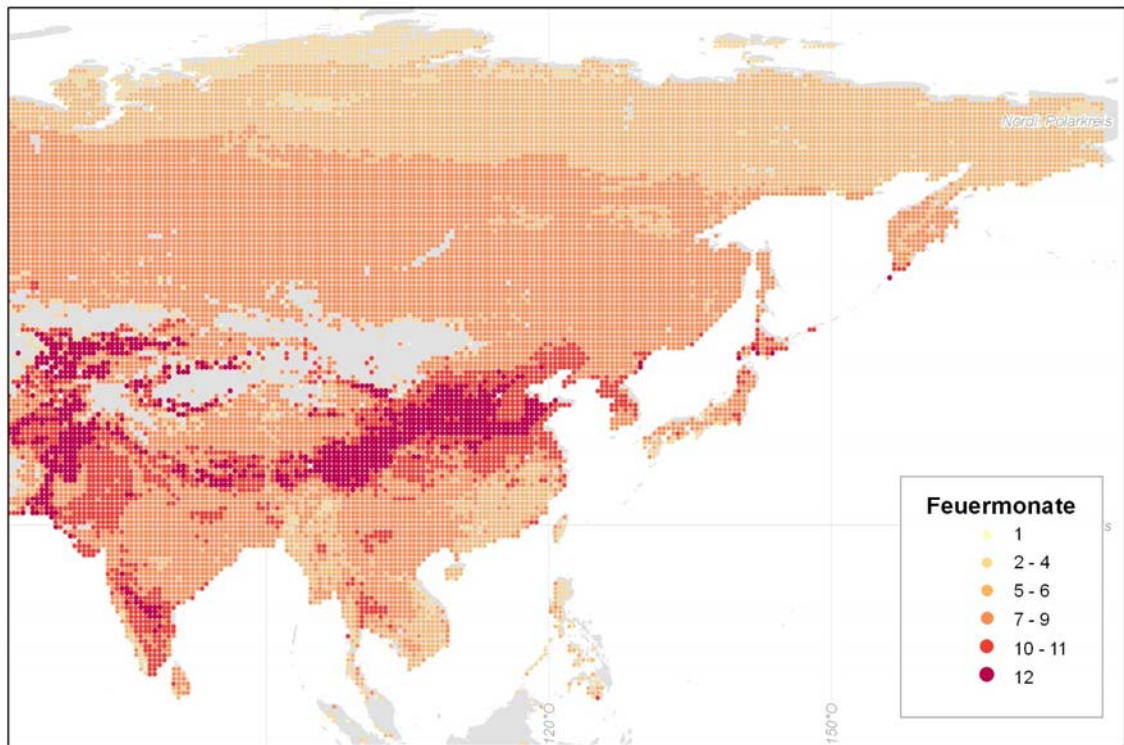


Abbildung 31: Anzahl der Feuermonate in Asien

Aufgrund der klimatischen Bedingungen und der wenigen Biomasse bleiben das tibetische Hochland, Himalaya, Karakorum und Hindukush feuerfrei. Im Sibirischen Tiefland sind Feuerereignisse auf die Monate April bis November saisonal begrenzt. Ganzjährliche Wahrscheinlichkeiten treten im Übergang zur arabischen Platte, in Zentralindien und in der chinesischen Tiefebene auf. Hier wird das Feuer von längeren Trockenzeiten begünstigt.

Die klimatischen Veränderungen könnten in Zukunft die nördliche Verbreitungsgrenze in den Wintermonaten Oktober bis April deutlich nach Norden verschieben und die Anzahl der Feuermonate steigen lassen.

4.5.6 Europa

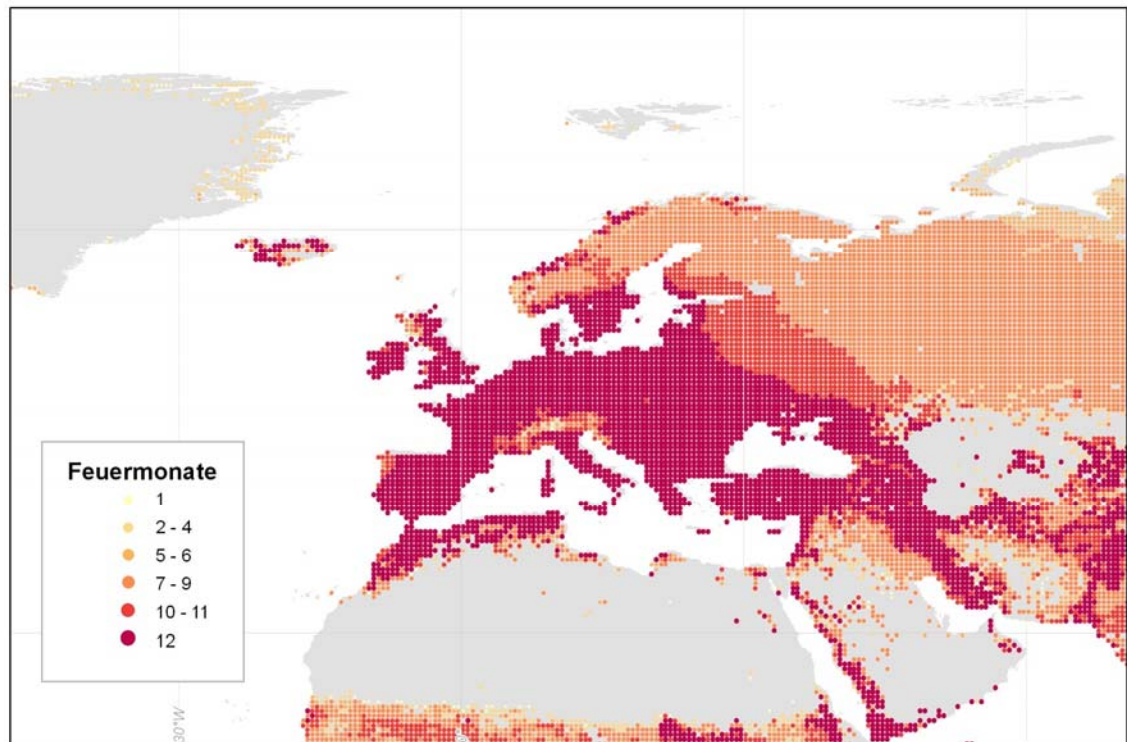


Abbildung 32: Anzahl der Feuermonate in Europa

Mittel- und Südeuropa zeichnen sich aufgrund günstiger Biomassegehalte und Klimabedingungen ganzjährig durch hohe Feuerwahrscheinlichkeiten ab. Unterbrochen wird das Bild nur durch den Alpenbogen und das regenreiche Galizien. Skandinavien und der östliche Teil Osteuropas bleiben dabei in den Monaten Dezember bis Februar nahezu feuerfrei.

Auf Grundlage der Veränderungen im Zuge eines Klimawandels könnte sich die östliche und nördliche Verbreitungsgrenze noch weiter nach Norden und Osten verschieben. Außerdem ist davon auszugehen, dass die Bedingungen in den Alpen und auch in Galizien trockener werden, was die Verbreitung weiterer Feuer begünstigen würde.

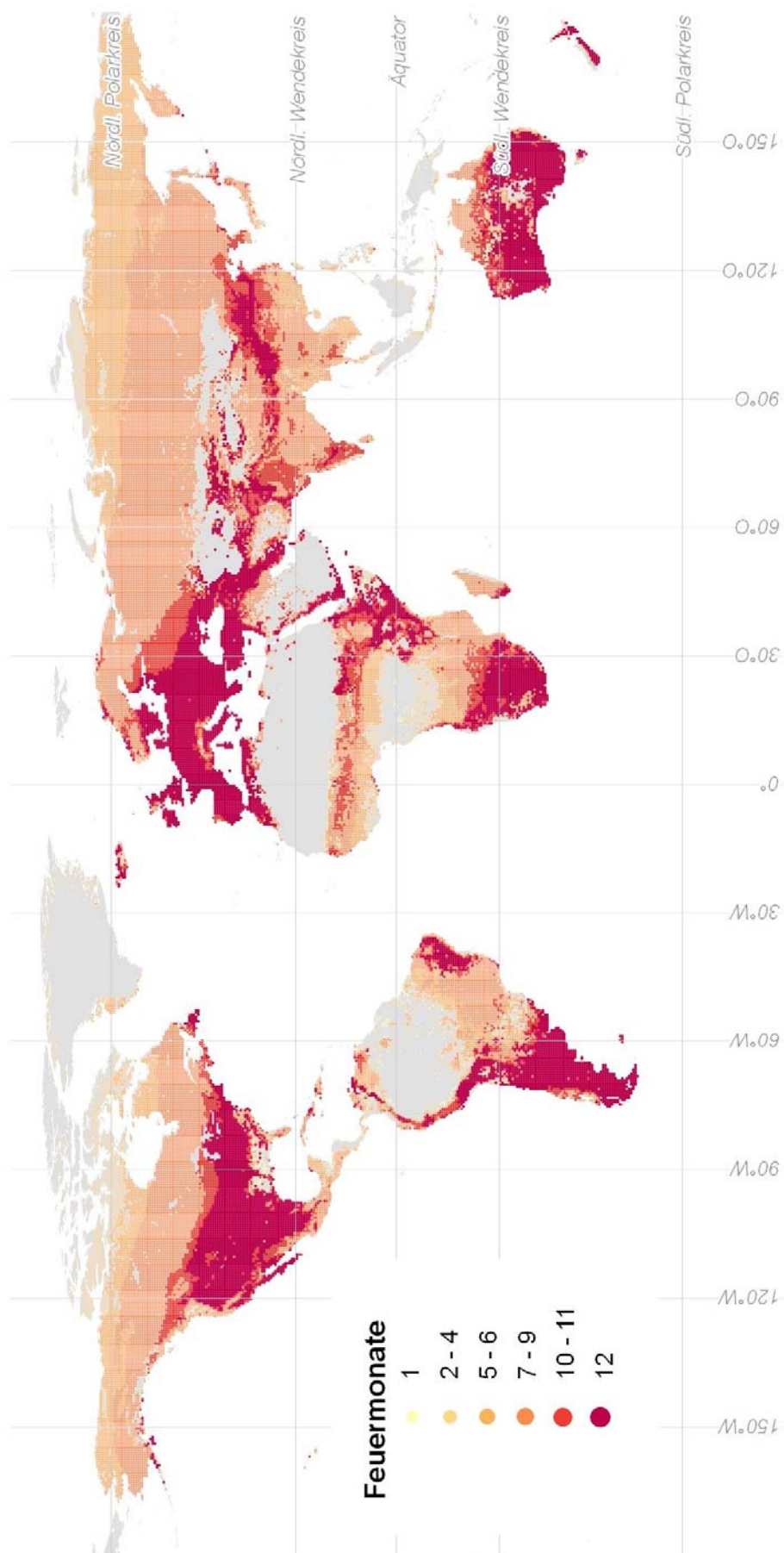


Abbildung 27: Globale Karte zur Anzahl der Feuermonate

5 Diskussion und Ausblick

Die Arbeit brachte plausible, nachvollziehbare und prüfbar gute Ergebnisse hervor. Dabei gibt es zu den einzelnen Arbeitsschritten einige Anmerkungen, auch sind Verbesserungen denkbar. Wenn solche Verbesserungen angemerkt werden können, sind sie in der Arbeit insbesondere aus Zeit limitierenden Gründen nicht angewendet worden.

Die Ergebnisse wurden mit einem Modellansatz erzielt, andere Modellansätze sind gleichfalls denkbar. Möglich wäre ein Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Ansätze. Der verwendete Ansatz lässt in seiner Durchführung einigen Spielraum zu: Es wäre zu prüfen, ob innerhalb dieses Spielraums unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden können.

Maßgeblich am Modellierungserfolg sind Ereignis- und Prädiktorvariablen (Samples und Environmental data). Beide Datensatzgruppen können verbessert werden:

Die Feuerereignisdaten entstammen keiner beobachteten Daten, sondern sind aus Fernerkundungsdaten extrahiert. Die Daten sind, ebenso wie andere Feuerdatensätze, gegen andere Fernerkundungsdaten, aber nur vereinzelt gegen reale Beobachtungen geprüft. Es konnte bislang weder sichergestellt werden, ob global tatsächlich alle Feuer erfasst wurden, noch konnte geklärt werden, ob es sich bei den Feuer allein um Vegetationsbrände handelt. Die MODIS Feuerdaten (Kap. 3.3.1.1), an deren Erkennungsalgorithmus und Aufzeichnung weiter gearbeitet wird, könnten hier neue Qualitäten hervorbringen.

Die Entzündung der Feuer ist global sehr variabel in ihrer Entstehungsart. Um sich einer realen Feuerprognose weiter zu nähern, müsste versucht werden, die Entstehungsarten in das Modell aufzunehmen. Es ist davon auszugehen, dass die Entstehungsarten nicht nur von Land zu Land, sondern auch innerhalb einzelner Länder variieren. Dabei sind sie von verschiedenen Faktoren abhängig, die sich durchaus auch gegenseitig ausschließen können. So kann eine geringe Besiedlung

ein Indiz für geringe Brandlegung sein, kann aber ebenso gut auf unreglementierte Brandbekämpfung hinweisen.

Letztendlich konnten die klimatischen Bedingungen mit den einfachen Parametern Temperatur und Niederschlag am besten charakterisiert werden. Die Versuche, die klimatischen Bedingungen durch klimatische Wasserbilanzen oder Trockenheitsindizes auszudrücken, sind jedoch weiterhin ausbaufähig. Dabei kommt der Berechnung der Verdunstungsraten eine besondere Rolle zu. Möglicherweise kann die Verdunstung nicht global, sondern etwa aufgrund kontinentaler bzw. ozeanischer Einflüsse (Luftfeuchte, Wind) nur auf regionaler Ebene berechnet und dann erst zu einem globalen Ergebnis zusammengefasst werden.

Der Brennstoff ist möglicherweise auch auf der globalen Ebene bezüglich seiner Brennbarkeit quantifizierbar.

Der zeitlichen Variabilität wird möglicherweise in der hier verfolgten monatlichen Auflösung nicht genug entsprochen. Eine höhere zeitliche Auflösung erfordert allerdings, ebenso wie eine höhere räumliche Auflösung, Rechnerkapazitäten, die über die Möglichkeiten eines Standard-PC hinausgehen.

Der Ausblick in die Zukunft der Feuerereignisse (Kap. 4.4) ist abhängig von den Ergebnissen der Klimamodellrechnungen. Globale Klimamodelle sind stark vereinfachte Abbilder der Realität und unterliegen großen Unsicherheiten. Volz (2005) etwa sieht einen erheblichen Mangel in der Modellierung, weil das windabhängige Wärmeabstrahlungsvermögen der Ozeane nicht berücksichtigt ist. Es hält es daher nicht für möglich, dass mit den hier verwendeten Klimamodellen der anthropogene vom natürlichen Einfluss unterschieden werden kann. Eine intensive Diskussion über die Verlässlichkeit von Klimamodellsimulationen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Fakt ist, dass die Richtigkeit der simulierten Ergebnisse erst zum Zeitpunkt ihres Eintretens überprüft werden kann.

Eine interessante methodische und zukunftsweisende Alternative ist die Kopplung von verbesserten globalen Klimamodellsimulationen mit Vegetationsmodellen und Feuermodellen. Zwar weisen diese Modelle den Einfluss der ökologischen

Steuergrößen nicht nach, dürften aber weitaus genauere Szenarien errechnen, als sie im Rahmen dieser Arbeit möglich waren.

Die Anfangsschwierigkeiten bei der Arbeit bestanden in der zeitaufwendigen Recherche, der qualitativen Beurteilung und der rechnerischen Aufbereitung von Daten zu den ökologischen Steuergrößen. Diese Schwierigkeiten wirken als gedankliches Initial zur Entwicklung eines Metadatenportals für globale Datensätze.

6 Zusammenfassung

Globale Feuerereignisse haben einen beachtlichen Einfluss auf Landbedeckung und Kohlendioxid-Emissionsraten. In der vorliegenden Arbeit wurden ökologische Steuergrößen vorgestellt und ihre Wirkung auf die Feuer untersucht.

Die einflussreichsten Steuergrößen konnten mit den Ereignisdaten in einem Modell verwendet werden um a) Feuerwahrscheinlichkeiten zu berechnen und um b) Ergebnisse aus Klimamodellrechnungen aufzugreifen, mit den Zukunftsszenarien für Feuerereignisse modelliert werden konnten.

Krawchuk et al. (2009) stellten ein multivariates Generalized Additive Model vor, in dem mit Daten zu Feuerereignissen (World Fire Atlas), Klima, zu menschlichen und natürlichen Einflüssen und zur Netto-Primärproduktion globale Feuerwahrscheinlichkeiten berechnet werden konnten. Das Modell erlaubt die Anwendung auf Klimamodellergebnisse, so dass auch Ergebnisse für verschiedene Klimaszenarien vorgestellt werden konnten.

Vorliegende Arbeit unterscheidet sich im Modellansatz und in den verwendeten Daten:

Die ökologischen Steuergrößen wurden aufgrund eines wissensbasierten Ansatzes vorausgewählt um die theoretische Plausibilität zu wahren. Es gelangten nur solche Daten zur Prüfung, die dem Ansatz entsprachen. Tabelle 7 gibt einen Überblick zu den verwendeten Variablen. Die Mehrzahl der Variablen konnten frei über das Internet bezogen werden. Die klimatische Wasserbilanz wurde mit den verfügbaren Daten eigens berechnet. Hier ergaben sich zeitlich aufwendige Arbeitsschritte in der Datenaufbereitung, die aber letztendlich mit Hilfe von Phyton-Skripten überwiegend automatisiert werden konnten.

Als Modellierungswerkzeug kam die frei verfügbare Software MAXENT zum Einsatz, dem einige Autoren sehr gute Ergebnisse in der Verbreitungsmodellierung bescheinigen. Die Software ist mit einer komfortablen Bedienoberfläche ausgestattet und liefert bei guter Performance Wahrscheinlichkeitskarten und statistische Analysewerte.

Die statistischen Untersuchungen und Jackknife-Tests während erster Testdurchläufe mit MAXENT ergaben, dass sich die Zahl der Variablen von ursprünglich 12 auf drei Variablen reduzieren lassen. Es verblieben die Variablen maximale Temperatur, Kohlenstoffgehalt der Biomasse und der Niederschlag.

Die monatlichen Werte der Daten wurden mosaikiert (vergleiche Abbildung 10). Mit den Mosaiken der drei Variablen und der Feuerereignisdaten konnte die Modellierung durchgeführt werden: Dabei gab es 12 Durchläufe, in jedem Durchlauf wurde ein Monat aus dem Mosaik herausgenommen. Das Modellergebnis dieses einen Monats konnte dann anhand der beobachteten Ereignisdaten validiert werden: Die Übereinstimmungen lagen bei durchschnittlich 88.5%. Der AUC-Wert als Maß der Modellgüte lag mit 0.73 in einem akzeptablen Bereich.

Das Modell konnte innerhalb des Modellierungsvorgangs in MAXENT auf die Daten der Klimaszenarien A2 (Temperaturanstieg 2-5.4°) und B2 (Temperaturanstieg 1.4-3.8°) angewendet werden.

Die Ergebnisse wurden Kontinent für Kontinent interpretiert:

Für Nordamerika (Abbildung 27) können permanente Feuerwahrscheinlichkeiten für den Bereich der Great Plains, eines Teils des zentralen Tieflands und Kalifornien ausgewiesen werden. Erstaunlicherweise sind auch Teile der Aleuten und Neufundlands nicht davon ausgeschlossen. Im Zuge einer Klimaerwärmung kann es zu einer Verschiebung der nördlichen Ausbreitungsgrenze weiter nach Norden kommen.

In Mittelamerika sind die Feuer mit Ausnahme der Großen Antillen und kleinerer Bereiche aufgrund der mangelnden Brennstoffmenge limitiert.

In Südamerika (Abbildung 28) fehlen Feuerwahrscheinlichkeiten im Bereich des Amazonas-Beckens. Hier werden Feuer von hohen Niederschlägen limitiert. Außerdem scheinen solche Limits auch bei sehr hohen Mengen an Biomasse aufzutreten, wie es die Responsekurven aus der Modellierungsstatistik (Abbildung 23) andeuten. Dieser Effekt mag aber weniger an der Menge an Brennstoff selbst liegen, sondern vielmehr an der komplexen horizontalen Struktur der Regenwälder, in denen diese Biomassen vorkommen. Solche Schichten verhindern

eine Austrocknung des Bodenbereichs, an dem die Feuerentzündung in der Regel stattfindet.

Einen ähnlichen Effekt findet man auch in Afrika (Kongobecken) und Südostasien.

Afrika (Abbildung 29) hat außerdem mit der Sahara eine feuerlose Region aufzuweisen, die klar von fehlendem Brennstoff charakterisiert ist. Interessant ist, dass sich in der Sahelzone Afrikas die Feuerwahrscheinlichkeiten im Zuge des Klimawandels reduzieren könnten (wenn man allein die Wirkungsweise der ökologischen Steuergrößen betrachtet).

In Australien (Abbildung 30) sind Feuer fast das ganze Jahr über mit kleineren Ausnahmen wahrscheinlich. Auch hier könnten steigende Niederschläge im Zuge eines Klimawandels die Feuerereignisse reduzieren.

Mehrmonatige Feuerwahrscheinlichkeiten beschränken sich in Asien (Abbildung 31) auf die chinesische Tiefebene, Teile der arabischen Platte und Indiens. Im Norden des Kontinents zeigt sich ein ähnlicher Effekt wie in Nordamerika: die Verbreitungsgrenze verschiebt sich weiter nach Norden.

Europa (Abbildung 32) verfügt im mittleren und südlichen Bereich über günstige Bedingungen für Feuerwahrscheinlichkeiten.

Trotz der guten Validierung der Modellierungsergebnisse zeigen sich eine Reihe von Verbesserungsmöglichkeiten: Die Qualität der eingehenden Variablen könnte verbessert werden, etwa indem gekoppelte Vegetations- bzw. Kohlenstoffmodelle Verwendung finden würden. Die Daten könnten, bei leistungsfähigerer Rechnerkapazität, auch in höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung Verwendung finden. Und man darf gespannt sein, was verbesserte Klimamodellsimulationen an integrierbaren Ergebnisdaten liefern.

7 Literatur und Quellen

7.1 Literaturverzeichnis

- Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Wulff, Plinke; Weiber, Rolf (2003): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 10. Aufl. Berlin; Heidelberg; NewYork; Tokyo: Springer.
- Balshi, Michael S.; McGuire, A. David; Duffy, Paul; Flannigan, M. D.; Walsh, John; Melillo, Jerry (2009): Assessing the response of area burned to changing climate in western boreal North America using a Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) approach. *Global Change Biology*, 15, S. 578–600.
- Baumgartner, Albert; Liebscher, Hans-Jürgen (1996): Allgemeine Hydrologie - quantitative Hydrologie. Mit 126 Tabellen. 2. Aufl. Berlin: Borntraeger.
- Beierkuhnlein, Carl (2007): Biogeographie. Die räumliche Organisation des Lebens in einer sich verändernden Welt ; 23 Tabellen. Stuttgart: Ulmer (UTB Biologie, Geowissenschaften, 8341).
- Blüthgen, Joachim; Weischet, Wolfgang; Schmithüsen, Josef; Obst, Erich (1980): Allgemeine Klimageographie. 3., neubearb. Aufl. Berlin: de Gruyter.
- Boschetti, Luigi; Eva, H. D.; Brivio, Pietro Allesandro; Gregoire, Jean-Marie (2004): Lessons to be learned from the comparison of three satellite-derived biomass burning products. *Geophysical Research Letters*, 31.
- Boschetti, Luigi; Roy, David; Barbosa, Paulo; Boca, Roberto; Justice, Christopher (2008): A MODIS assesment of the summer 2007 extent burned in Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 8, S. 2433–2436.
- Carmona-Moreno, Cesar; Belward, Alan; Malingreau, Jean-Paul; Hartley, Andrew; Carcia-Alegre, Maria; Antonovskiy, Mikhail et al. (2005): Characterizing interannual variations in global fire calendar using data from Earth observing satellites. *Global Change Biology*, 11, S. 1537–1555.
- Chuvieco, Emilio; Giglio, Louis; Justice, Christopher (2008): Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global Change Biology*, 14, S. 1488–1502.
- Davis, Andrew J.; Jenkinson, Linda S.; Lawton, John H.; Shorrocks, Bryan; Wood, Simon (1998): Making mistakes when predicting shifts in species range in response to global warming. *Nature*, 391, S. 783–786.
- Defrenne, Diane; Arino, Olivier (2005): Cross-Correlation between World Fire Atlas and environmental classifications. In: Lacoste, H. (Hg.): Proceedings of the MERIS and (A)ATSR workshop at ESRIN. Frascati, Italy .

- Dennison, Philip E.; Moritz, Max; Taylor, Robert S. (2008): Evaluating predictive models of critical live fuel moisture in the Santa Monica Mountains, California. *International Journal of Wildland Fire*, 17, S. 18–27.
- Di Bella, C. M.; Jobbagy, E. G.; Paruelo, J. M.; Pinnock, S. (2006): Continental fire density patterns in South America. *Global Ecology & Biogeography*, 15, S. 192–199.
- Dormann, Carsten F. (2007): Promising the future? Global change projections of species distributions. *Basic and Applied Ecology*, 8, S. 387–397.
- Dwyer, Edward; Gregoire, Jean-Marie; Pereira, Jose (2000): Climate and Vegetation as Driving Factors in Global Fire Activity. In: Innes, John L. (Hg.): *Biomass burning and its inter-relationships with the climate system*. Dordrecht, London: Kluwer Academic, S. 171–191.
- Dyck, Siegfried; Peschke, Gerd (1995): *Grundlagen der Hydrologie*. 3., stark bearb. Aufl. Berlin: Verl. für Bauwesen.
- Elith, Jane; Graham, Catherine H.; Anderson, Robert P.; Dudik, Miroslav; Ferrier, Simon; Guisan, Antoine et al. (2006): Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, S. 129–151.
- FAO (2007): *Fire management global assessment 2006. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*. Rome (FAO Forestry Paper, 151).
- Flannigan, M. D.; Bergeron, Y.; Engelmark, O.; Wotton, B. M. (1998): Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming. *Journal of Vegetation Science*, 9, S. 469–476.
- Giglio, Louis; Csiszar, Ivan; Justice, Christopher (2006): Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. *Journal of Geophysical Research*, 111.
- Goldammer, J. G. (1993): *Feuer in Waldökosystemen der Tropen und Subtropen*. Basel-Boston: Birkhäuser-Verlag.
- Goldammer, J. G. (2000): *Global Fire - A message from the global fire monitoring center*. Herausgegeben von ISDR Secretary. *International Strategy for Disaster Reduction*. Online verfügbar unter www.unisdr.org/eng/public_aware/world_camp/2000/PDF/Articulo_1_Goldammer_eng.pdf, zuletzt aktualisiert am 21.03.2009.
- Grieser, Jürgen; Gommès, René; Cofield, Stephen; Bernardi, Michele (2006): Data sources for FAO worldmaps of Köppen climatologies and climatic net primary production. FAO. Online verfügbar unter http://www.fao.org/nr/climpag/globgrids/kc_commondata_en.asp, zuletzt geprüft am 25.03.2009.
- Guisan, Antoine; Thuiller, Wilfried (2005): Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, S. 993–1009.
- Häckel, Hans (2008): *Meteorologie*. 29 Tabellen. 6., korr. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB Geowissenschaften, Agrarwissenschaften, 1338).

- Henning, Ingrid; Henning, Dieter (1984): Die klimatologische Wasserbilanz der Kontinente. Ein Beitrag zur Hydroklimatologie. Paderborn: Schöningh (Münstersche Geographische Arbeiten, 19).
- Hijmans, Robert J.; Cameron, Susan E.; Parra, Juan L.; Jones, Peter G.; Jarvis, Andy (2005): Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, S. 1965–1978.
- Hosmer, David W; Lemeshow, Stanley (2000): *Applied logistic regression*. 2. Aufl. New York: John Wiley and Sons.
- Kottek, Markus; Grieser, Jürgen; Beck, Christoph; Rudolf, Bruno; Rubel, Franz (2006): World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, H3, S. 259–263.
- Krawchuk, M.; Moritz, Max; Parisien, Marc-Andre; Van Dorn, Jeff; Hayhoe, Katharine (2009): Global Pyrogeography. the Current and Future Distribution of Wildfire. *Plus One*, 4, 4. Online verfügbar unter <http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0005102>, zuletzt geprüft am 4/15/2009.
- Lange, Norbert de (2002): *Geoinformatik in Theorie und Praxis*. Berlin: Springer.
- Le Page, Y.; Pereira, Jose; Trigo, R.; da Camara, C.; Oom, D.; Mota, B. (2008): Global fire activity patterns (1996-2006) and climatic influence: an analysis using the World Fire Atlas. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, S. 1911–1924.
- Leemans, Rik; Cramer, Wolfgang (1991): The IIASA Database for mean monthly values of temperature, precipitation, and cloudiness on a global terrestrial grid. Laxenburg, Austria (RR-91-18).
- Levine, Joel S. (1996): Introduction. In: Levine, Joel S. (Hg.): *Biomass Burning and Global Change*. 2 Bände: The MIT Press, Bd. 1.
- Lobo, Jorge M. (2008): AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology & Biogeography*, 17, S. 145–151.
- Meyn, Andrea; White, Peter S.; Buhk, Constanze; Jentsch, Anke (2007): Environmental drivers of large, infrequent wildfires: the emerging conceptual model. *Progress in Physical Geography*, 31, 3, S. 287–312. Online verfügbar unter <http://ppg.sagepub.com/cgi/reprint/31/3/287>, zuletzt geprüft am 8/27/2008.
- Mitchell, Timothy D.; Philip, D. Jones (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25, S. 693–712.
- Morgan, Penelope; Hardy, Colin C.; Swetnam, Thomas W.; Rollings, Matthew G.; Long, Donald G. (2001): Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns. *International Journal of Wildland Fire*, 10, 329–342.
- Nentwig, Wolfgang; Bacher, Sven; Brandl, Roland (2007): *Ökologie kompakt*. Berlin: Spektrum Akad. Verl.
- New, Mark; Lister, David; Hulme, Mike; Makin, Ian (2002): A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*, 21, S. 1–25.

- Niederberger, Beat (21.04.2008): Habitatmodellierung der endemischen Landschneckenart *Trochulus biconicus*. Masterarbeit. Betreut von Josef Strobl und Ariel Bergamini. Salzburg. Paris Lodron-Universität Salzburg, Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS). Online verfügbar unter <http://www.condesys.com/publications/1279.pdf>, zuletzt geprüft am 31.12.2008.
- Phillips, Steven J. (2009): A brief tutorial on Maxent. Herausgegeben von AT&T Research. Online verfügbar unter <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>, zuletzt aktualisiert am 5/31/2009, zuletzt geprüft am 28.03.2009.
- Phillips, Steven J.; Anderson, Robert P.; Schapire, Robert E. (2006): Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, S. 231–259.
- Phillips, Steven J.; Dudik, Miroslav; Schapire, Robert E. (2004): A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. In: Greiner, Russell (Hg.): *Proceedings of the 21th International Conference on Machine Learning*. [July 4 - 8, 2004, Banff, Alberta, Canada]. Banff, Alberta, Canada .
- Pitman, A. J.; Narisma, G. T.; McAneney, J. (2007): The impact of climate change on the risk of forest and grassland fires in Australia. *Climatic Change*, 84, S. 383–401.
- Pope, V.; Gallani, M. L.; Rowntree, P. R.; Stratton, R. A. (2000): The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Climate Dynamics*, 16, S. 123–146.
- Priestley, C. H. B.; Taylor, R. J. (1972): On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 2, S. 81–92.
- Prince, S. D.; Goward, S. J. (1995): Global primary production: a remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 22, S. 316–336.
- Reineking, Björn; Schröder, Boris (2004): Variablenselektion. In: Dormann, Carsten F.; Blaschke, Thomas; Lausch, Angela; Schröder, Boris; Söndgerath, Dagmar (Hg.): *Habitatmodelle. Methodik, Anwendung, Nutzen*. Tagungsband zum Workshop 8.-10.10.2003. Leibzig-Halle (UFZ-Bericht, Nr.9/2004).
- Reusch, Aaron; Gibbs, Holly K. (2008): New IPCC Tier-1 Global Biomass Carbon Map For the Year 2000. Available online from the Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory. Online verfügbar unter <http://cdiac.ornl.gov/>, zuletzt geprüft am 5/29/2009.
- Riano, D.; Ruiz, J. A. Moreno; Isidoros, D.; Ustin, S. L. (2007): Global spatial patterns and temporal trends of burned area between 1981 and 2000 using NOAA-NASA Pathfinder. *Global Change Biology*, 13, S. 40–50.
- Roy, David; Boschetti, Luigi; Justice, Christopher; Ju, J. (2008): The collection 5 MODIS burned area product - Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sensing of Environment*, 112, S. 3690–3707.

- Scholze, Marko; Knorr, Wolfgang; Arnell, Nigel W.; Prentice, I. Colin (2006): A climate-change risk analysis for world ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America PNAS*, 35, 103, S. 13116–13120.
- Schröder, Boris; Reineking, Björn (2004): Validierung von Habitatmodellen. In: Dormann, Carsten F.; Blaschke, Thomas; Lausch, Angela; Schröder, Boris; Söndgerath, Dagmar (Hg.): *Habitatmodelle. Methodik, Anwendung, Nutzen. Tagungsband zum Workshop 8.-10.10.2003. Leibzig-Halle (UFZ-Bericht, Nr.9/2004)*.
- Schrödter, Harald (1985): *Verdunstung. Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden*. Berlin; Heidelberg; NewYork; Tokyo: Springer.
- Schulze, Ernst-Detlef; Beck, Erwin; Müller-Hohenstein, Klaus (2002): *Pflanzenökologie*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Simon, M.; Plummer, Stephen; Fierens, F.; Hoelzemann, J. J.; Arino, Olivier (2004): Burnt area detection at global scale using ATSR-2. The GLOBSCAR products and their qualification. *Journal of Geophysical Research*, 109.
- Solomon, Susan (2007): *Climate change 2007. The physical science basis* contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Tansey, Kevin; Gregoire, Jean-Marie; Binaghi, Elisabetta; Boschetti, Luigi; Brivio, Pietro Allesandro; Ershov, Dimitry et al. (2004): A global inventory of burned areas at 1 km resolution for the year 2000 derived from spot vegetation data. *Climatic Change*, 67, S. 345–377.
- Tansey, Kevin; Gregoire, Jean-Marie; Pereira, Jose; Defourny, Pierre; Leigh, Roland; Pekel, Jean-Francois et al.: L3JRC - A global, multi-year (2000-2007) burnt area product (1 km resolution and daily time steps). In: *Remote Sensing and Photogrammetry Society (Hg.): Proceedings of the 2007 Annual Conference of the Remote Sensing & Photogrammetry Society (RSPSoc2007)*. Newcastle upon Tyne, 11-14 september 2007 .
- Tateishi, R.; Ahn, C. H. (1996): Mapping evapotranspiration and water balance for global land surfaces. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 51, S. 209–215.
- Thonicke, Kirsten; Venevsky, Sergey; Sitch, Stephan; Cramer, Wolfgang (2001): The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model. *Global Ecology & Biogeography*, 10, S. 661–677.
- Tucker, C. J.; Pinzon, J. E.; Brown, E.; Slayback, D.; Pak, E. W.; Mahoney, R. et al. (2005): An Extended AVHRR 8-km NDVI Data Set Compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data. *International Journal of Remote Sensing*, 20, S. 4485–5598.
- Turner, Monica G.; Romme, William H.; Tinker, Daniel B. (2003): Surprises and lessons from the 1988 Yellowstone fires. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1, 7, S. 351–358.

- United Nations (1998): Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change.
- Volz (2005): Klimamodellierung - Unsicherheiten bei Prozessbeschreibung und Eingabedaten. In: Hagedorn, Horst (Hg.): Klimawandel im 20. und 21. Jahrhundert. Welche Rolle spielen Kohlendioxid, Wasser und Treibhausgase wirklich? ; Rundgespräch am 17. Mai 2004 in München. München: Pfeil, S. 93.
- Watson, R. T.; Albritton, Daniel L. (2001): Climate change 2001. Synthesis report. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Whelan, Robert J. (2002): The ecology of fire. Reprint. Cambridge: Cambridge Univ. Press (Cambridge studies in ecology).
- Willmott, Cort J.; Rowe, Clinton M. (1985): Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. *Journal of Climatology*, 8, S. 589–606.
- Xiaoyu, Guan (2008): Predicting fire at global scale: Preliminary steps for a Spatialtemporal Analysis of Global Fire Time Series. Herausgegeben von Laboratory of Geo-Information Science and Remote Sensing. Wageningen University. Online verfügbar unter http://www.grs.wur.nl/UK/newsagenda/archive/agenda/2008/PREDICTING_FIRE_AT_GLOBAL_SCALE_.htm, zuletzt aktualisiert am 31.12.2008.

7.2 Datenverzeichnis

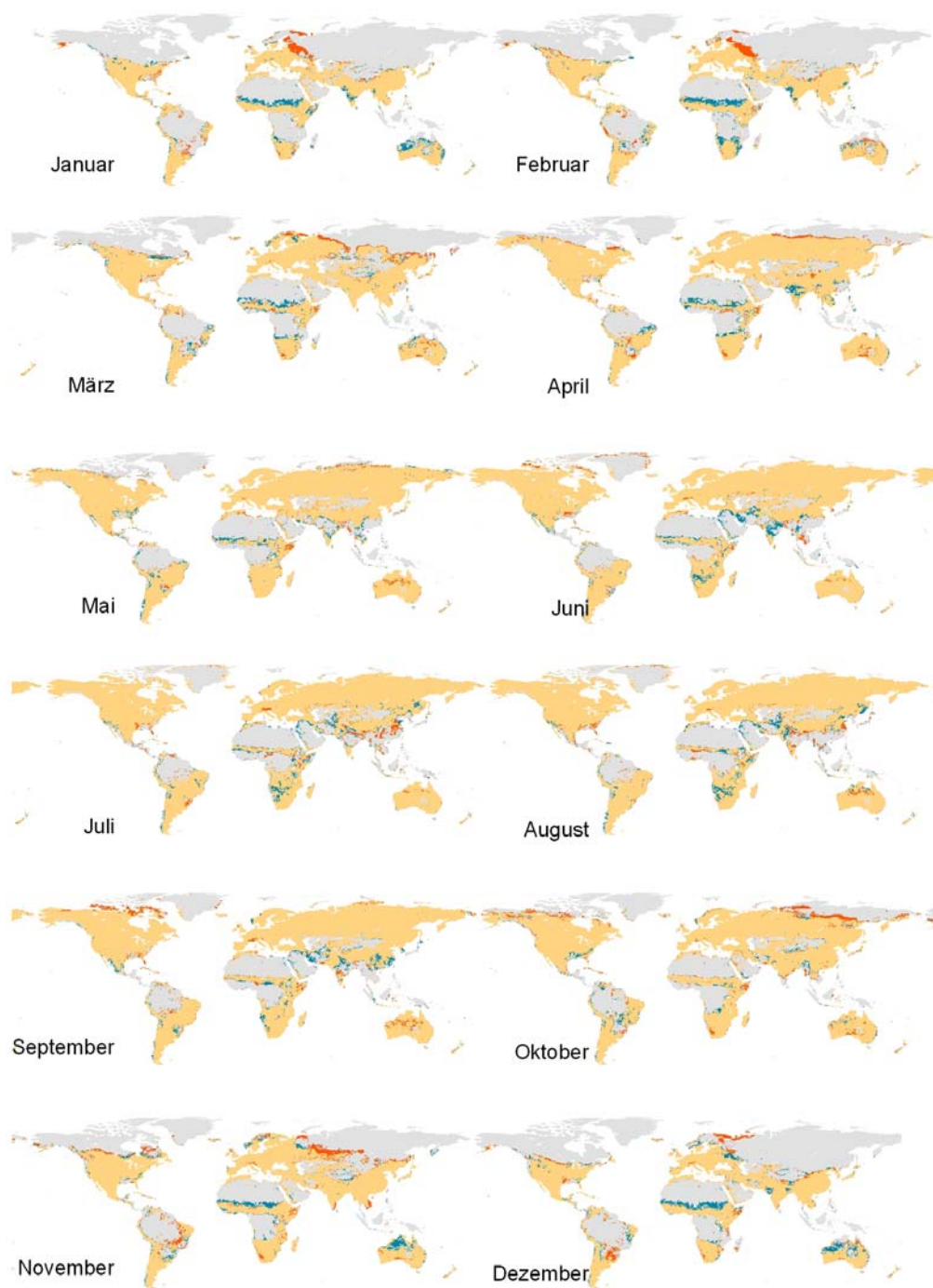
- CRU TS 2.1 Climate Data
http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_2.10/
- GIMMS: NOAA/NASA Pathfinder NDVI Vegetationsindex
<ftp://ftp.glcf.umiacs.umd.edu/glcf/GIMMS/Geographic/>
- GLC 2000: Global Land Cover 2000
<http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php>
- GloPEM: Global Production Efficiency Model
ftp://ftp.glcf.umiacs.umd.edu/glcf/GLOPEM/10_Day/
- IPCC Tier1 Global Biomass Carbon Map 2000
http://cdiac.ornl.gov/ftp/global_carbon/datasets.zip
- L3JRC: Global Burnt Areas 2000-2007
http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/burnt_areas_L3JRC/GlobalBurntAreas2000-2007.php
- Worldclim 1.4
<http://www.worldclim.org/download.htm>

7.3 Softwareverzeichnis

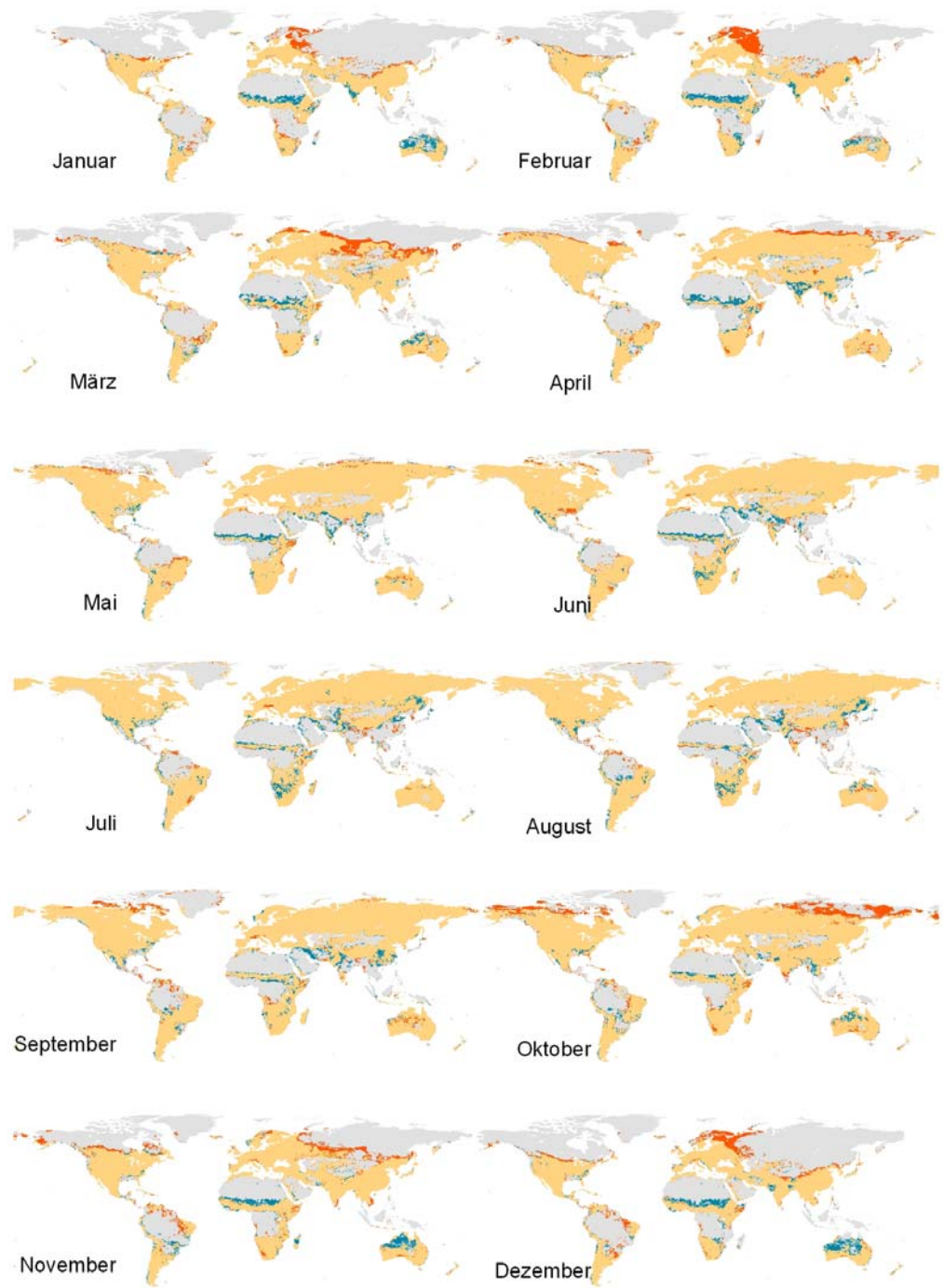
- Adobe Illustrator CS (<http://www.adobe.com/de/products/illustrator>)
- AET Calculator (<http://geography.uoregon.edu/gavin/software.html>)
- ArcGIS ArcView 9.2 (<http://www.esri.com>)
- Citavi (<http://www.citavi.com/>)
- DIVA-GIS 5.4 (<http://www.diva-gis.org/>)
- Microsoft Word 2003 (<http://office.microsoft.com/de-de/default.aspx>)
- R The R project for statistical computing (<http://www.r-project.org>)

Anhang

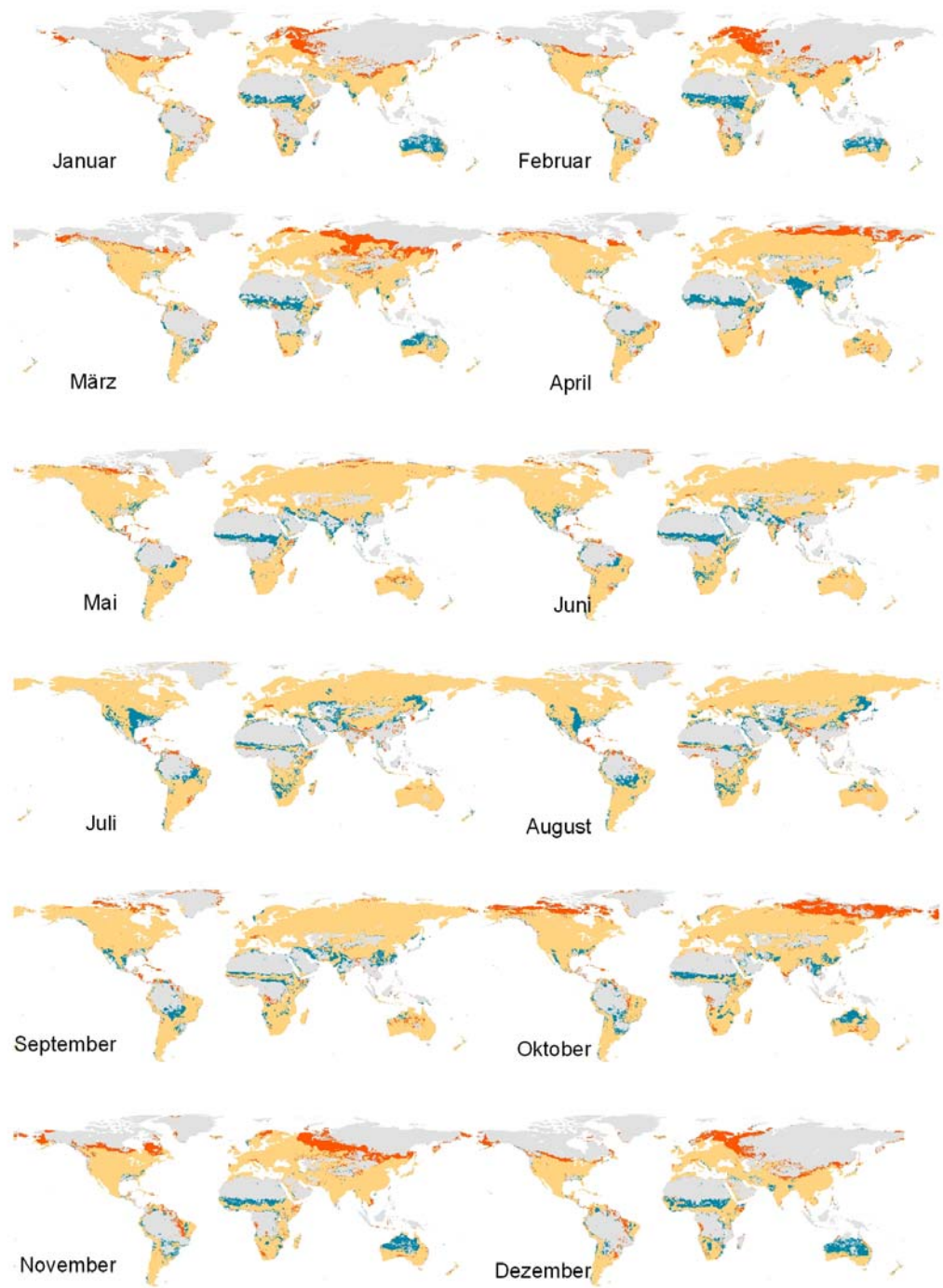
Feuerwahrscheinlichkeitskarten zu den SRES-Szenarien A2 und B2 für die Monate der Jahre 2020, 2050 und 2080



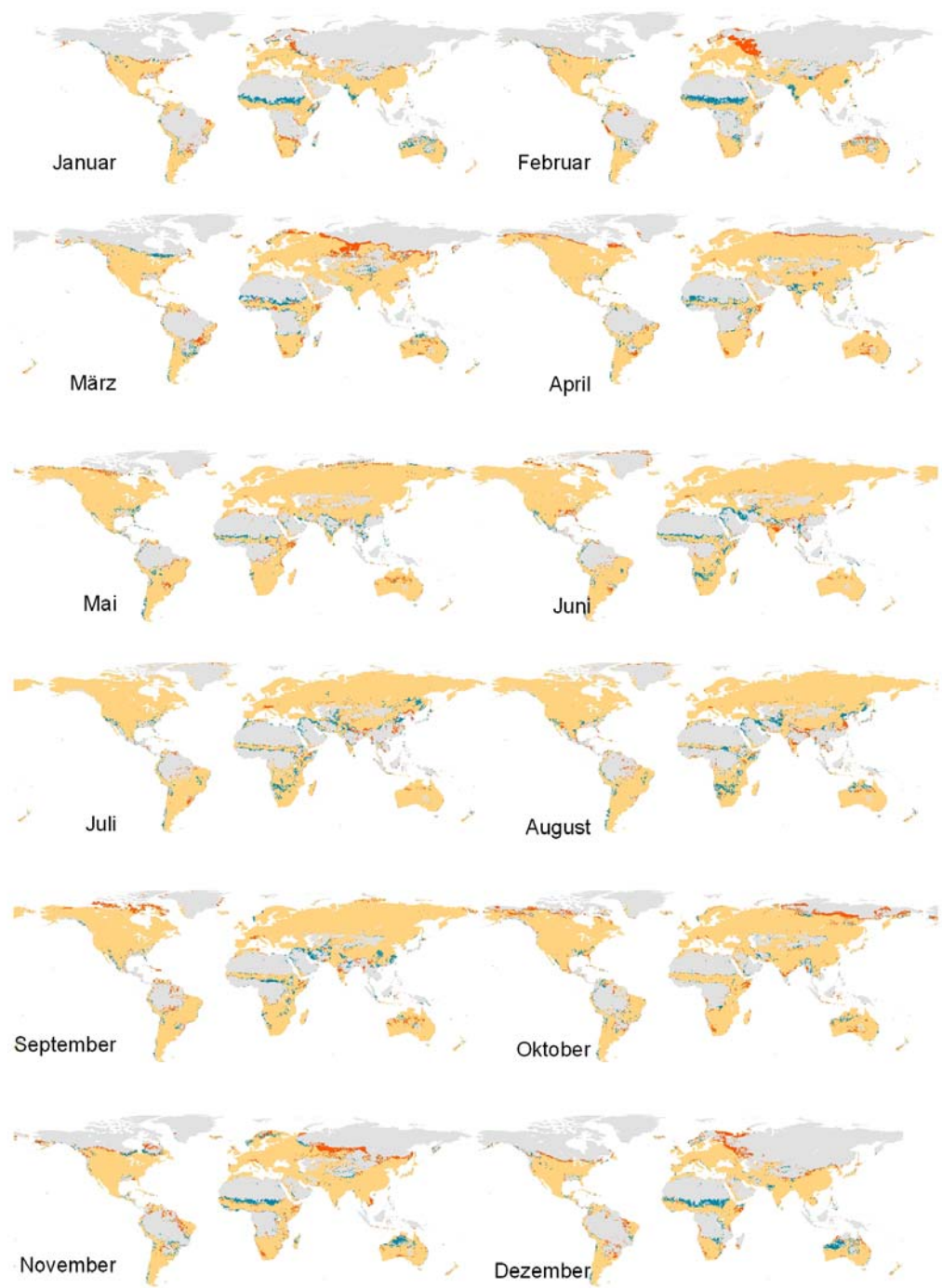
A2 2020



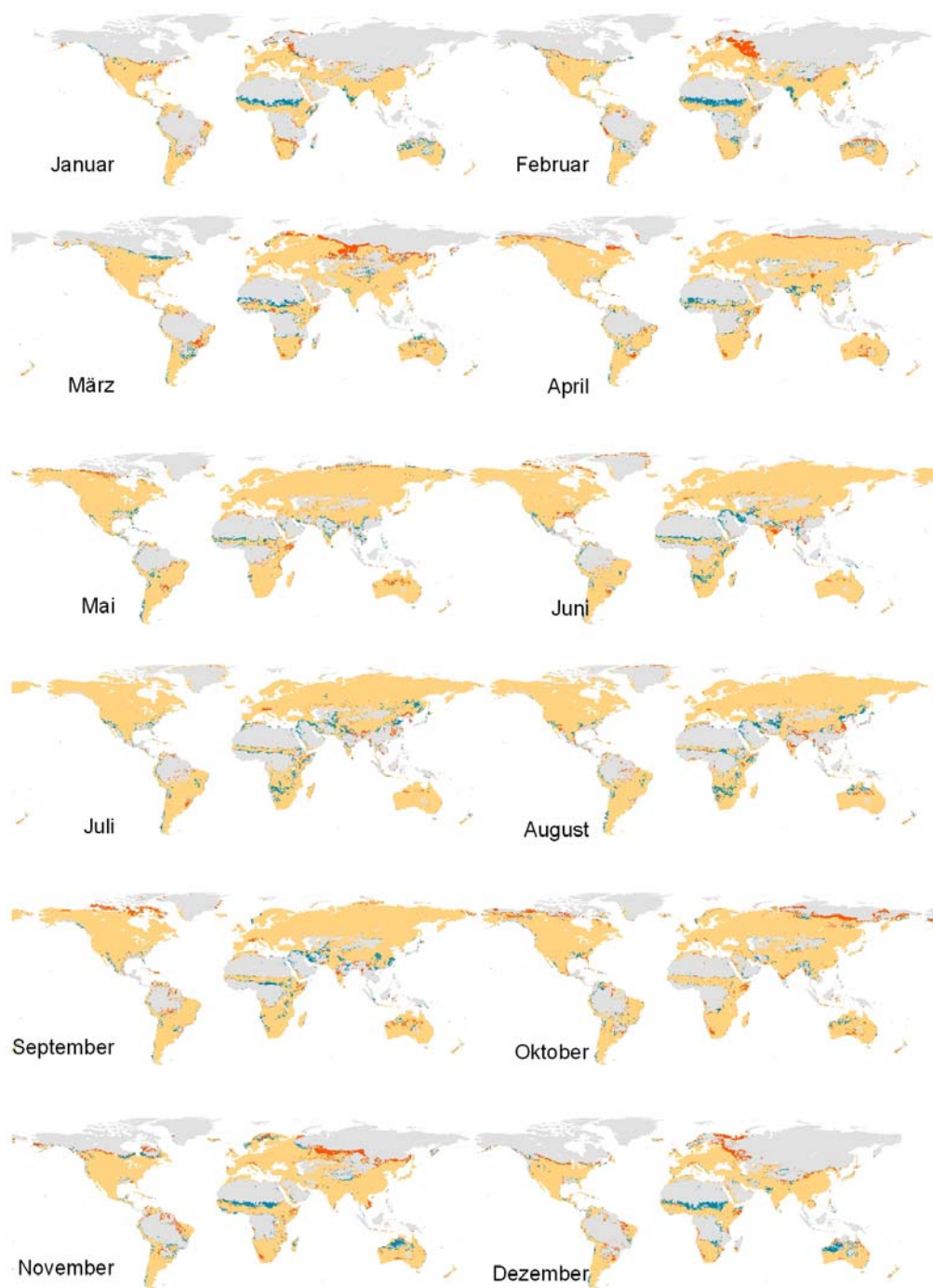
A2 2050



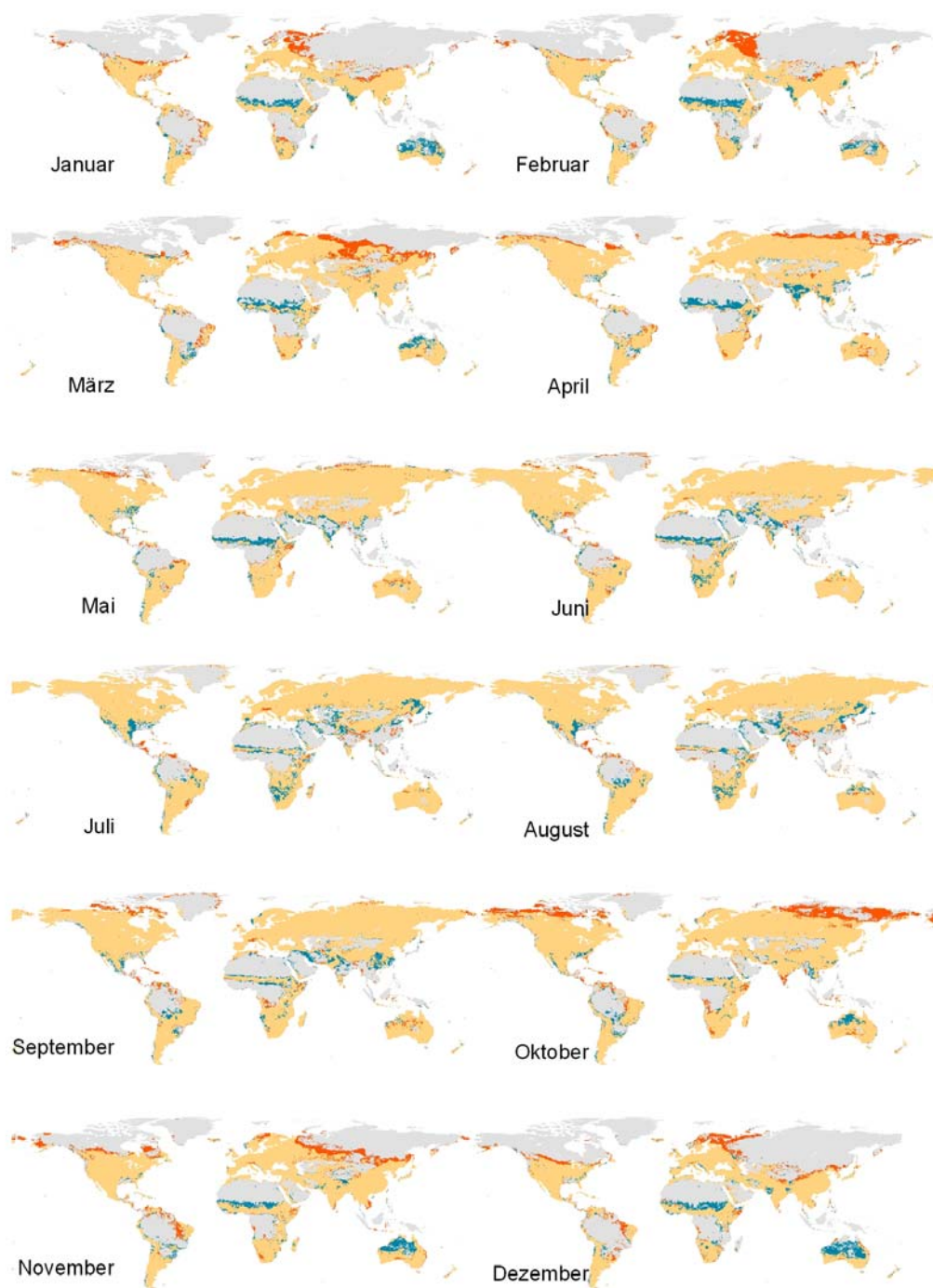
A2 2080



B 2 2020



B2 2050



B 2 2 0 8 0