

Bachelorarbeit

Meteorologisches Institut der Universität Hamburg

Verbrannte Fläche und Bodenfeuchte: Globale Analyse von satellitenbasierten Beobachtungsdaten als Grundlage zur Feuermodellentwicklung

Vorgelegt von: Anne Felsberg

30. September 2013

Erstgutachterin: Dr. Silvia Kloster, Max Planck Institut für Meteorologie

Zweitgutachter: Prof. Dr. Martin Claußen, Meteorologisches Institut

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Bedeutung von Vegetationsbränden im Erdsystem	3
1.2	Berücksichtigung von Vegetationsbränden in Klimamodellen	4
1.3	Problemstellung und Zielsetzung	4
2	Datensätze	5
2.1	Verbrannte Fläche	5
2.2	Bodenfeuchte	7
2.2.1	AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer)	7
2.2.2	ECVSM (Essential Climate Variable Soil Moisture)	8
3	Datenanalyse	9
4	Ergebnisse	14
4.1	Vergleich AMSR-E und ECVSM	14
4.2	Korrelation zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche	15
4.3	Korrelation mit Zeitverschiebung zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche	18
5	Fazit	27
6	Literaturverzeichnis	28
7	Anhang	30

Dies ist eine Arbeit zum Thema "Verbrannte Fläche und Bodenfeuchte: Globale Analyse von satellitenbasierten Datensätzen als Grundlage für die Feuermodellentwicklung".

Abstract

Vegetationsbrände treten in unserem Erdsystem immer wieder auf. Sie beeinflussen nicht nur die Pflanzen am Boden, sondern auch Prozesse in der Atmosphäre. Bei den von Feuern emittierten Spurengasen und Aerosolen wird beispielsweise angenommen, dass sie den Klimawandel verstärken. Um den genauen Beitrag von Vegetationsbränden zum Klimawandel abschätzen zu können, ist es von großem Interesse, die Modellierung von Feuern in Klimamodellen zu verbessern. Alle bisherigen Ansätze zur Modellierung von Feuern basieren auf der Bodenfeuchte. In dieser Bachelorarbeit wird daher die Verbindung zwischen Bodenfeuchte-Bedingungen und verbrannter Fläche für die Jahre 2003 bis 2009 anhand von globalen, satellitenbasierten Beobachtungsdaten analysiert. Die Annahme, dass trockene Umgebungsbedingungen in der Regel zu Vegetationsbränden führen, ist für die Tropen zulässig. Vegetationsbrände treten hier alljährlich während der Trockenperiode auf. In der borealen Zone ist Trockenheit zwar eine Voraussetzung für die Entstehung eines Feuers, führt aber nicht zwangsläufig zu einem Vegetationsbrand. Hier kann Feuer demnach nicht mit der Bodenfeuchte als einziger Variablen modelliert werden. In Steppen- und Savannengebieten ist zudem die Bodenfeuchte der vorangegangenen Monate für das Auftreten von Feuer von Bedeutung. Die Feuchtigkeit des Bodens ermöglicht oder limitiert Pflanzenwachstum und bestimmt somit die Menge an später vorhandenem Brennmaterial. Da für diese Analyse zwei verschiedene Bodenfeuchte-Datensätze verwendet wurden, können die Ergebnisse als robust angenommen werden.

Wild fires occur frequently in our ecosystem. Not only do they influence the vegetation on the ground, but processes in the atmosphere as well. Trace gas and aerosol emissions from fires are for example assumed to enhance climate warming. To be able to evaluate the exact contribution of wild fires to climate change, it is of great interest to improve the modelling ability of fires in climate models. The basis of every existing fire modelling approach is soil moisture. In this bachelors thesis, the connection between soil moisture conditions and burned area was analyzed for the years 2003 to 2009 using global satellite data sets. The assumption that dryer conditions mostly result in wild fires is concluded to be true for the tropics. Here, wild fires are annual events during the dry season. In the boreal zone, drought is still a condition, but does not necessarily lead to a wild fire. Fire modelling for this region can therefore not be realized with soil moisture as the only variable. In regions covered by savannas or steppes the soil moisture of the preceding months is also of great importance for fire occurrence. Sufficient soil moisture is necessary for plant growth leading to fuel availability. As two different soil moisture data sets were used for this analysis, the results can be assumed to be robust.

1 Einleitung

In unserem Erdsystem treten Vegetationsbrände auf seit es Pflanzen gibt (Bowman et al., 2009). Sie beeinflussen die Prozesse im globalen Klimasystem, besonders den Kohlenstoffkreislauf, und nehmen Einfluss auf das jetzige und zukünftige Klima. Um verlässliche Vorhersagen über das kommende Klima machen zu können, ist es daher sinnvoll, Vegetationsbrände genauer zu verstehen und sie in Klimamodellen zu berücksichtigen. In dieser Bachelorarbeit wird der Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche anhand von satellitenbasierten globalen Datensätzen beispielhaft für die Jahre 2003 bis 2009 untersucht. Ob die momentan übliche Modellierung der verbrannten Fläche über die Bodenfeuchte gerechtfertigt ist, soll überprüft werden. In den folgenden Abschnitten wird dazu zunächst die Bedeutung von Vegetationsbränden für das Klimasystem näher erläutert und anschließend erklärt, wie Feuer derzeit modelliert wird. Abschließend werden Leitfragen formuliert, die im Verlauf dieser Bachelorarbeit beantwortet werden sollen.

1.1 Bedeutung von Vegetationsbränden im Erdsystem

Vegetationsbrände treten global immer wieder auf, besonders in den Tropen und Subtropen (Harrison et al., 2010). Sie lassen sich unterteilen in kontrollierte und unkontrollierte Brände (Goldammer, 1993). Kontrollierte Brände werden von Menschen für landwirtschaftliche Zwecke oder aus Sicherheitsgründen entfacht. Dabei können unbeabsichtigt unkontrollierte Vegetationsbrände entstehen, die sonst meist von natürlichen Zündquellen wie Blitzen ausgelöst werden (Harrison et al., 2010). Der Einsatz von Feuer in der Landwirtschaft ist heutzutage hauptsächlich in den Tropen im Rahmen des Wanderfeldbaus (slash-and-burn) üblich. Waldgebiete werden dabei gerodet, um Platz für Ackerbau zu schaffen und die Erde mit dem verbrannten Holz zu düngen (Goldammer, 1993).

Feuer haben einen starken Einfluss auf die natürlichen Vorgänge in unserem Erdsystem: Am Boden haben sie durch die nach einem Brand veränderte Zusammensetzung der Pflanzenarten Auswirkungen auf die Energieflüsse und den Wasserkreislauf (Keywood et al., 2013). In der Atmosphäre beeinflussen die Emissionen von Feuern die chemische Zusammensetzung und damit die Strahlungsprozesse sowie die Wolkenbildung (Bowman et al., 2009).

Die an Vegetationsbränden beteiligten Prozesse sind noch nicht vollständig erforscht. Eine Wechselwirkung zwischen Vegetationsbränden und Klimaänderungen ist jedoch zu erkennen. Eine größere Trockenheit hat beispielsweise die Bereitstellung besseren, weil trockeneren Brennmaterials zur Folge und begünstigt Vegetationsbrände (Bowman et al., 2009). Eine erhöhte Feuchtigkeit hätte einen entgegengesetzten Effekt. Zudem können die Anpassung von Pflanzen und Menschen an neue Umweltbedingungen die Länge der Feuersaison und die Stärke der Feuer maßgeblich beeinflussen (Keywood et al., 2013). Wie genau sich jedoch in umgekehrter Weise die Vegetationsbrände auf das Klima auswirken, ist noch nicht eindeutig erforscht. Allgemein wird angenommen, dass die vom Feuer emittierten Treibhausgase die globale Erwärmung verstärken (Keywood et al., 2013). Allerdings ergab eine Studie,

dass boreale Vegetationsbrände über längere Zeiträume eher eine Abkühlung zur Folge haben (Randerson et al., 2006): Brände verringern die Vegetationsdichte, sodass der Boden weniger stark abgeschirmt wird. Im Winter, wenn der Boden mit Schnee bedeckt ist, ist die Oberflächenalbedo im Vergleich zu vor dem Feuer dann deutlich erhöht und es wird mehr Strahlung aus der Atmosphäre hinaus transportiert. Die dadurch hervorgerufene Abkühlung ist in der borealen Zone stärker als die Erwärmung aufgrund der emittierten Treibhausgase.

1.2 Berücksichtigung von Vegetationsbränden in Klimamodellen

Es gibt verschiedene Herangehensweisen, Vegetationsbrände in Klimamodellen zu simulieren. Dabei werden bisher nur auf natürlichem Wege entstandene, ungeplante Brände berücksichtigt. Im Folgenden werden beispielhaft die von Thonicke et al. (2001) und Arora und Boer (2005) entwickelten Ansätze vorgestellt.

Beide Ansätze bestimmen zunächst die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Feuer an einem bestimmten Ort auftreten kann (Kloster et al., 2010). Voraussetzung ist genügend vorhandenes Brennmaterial, das mindestens eine bestimmte Trockenheit, also geringe Pflanzenfeuchte, hat. Die Pflanzenfeuchte wird dabei nicht direkt simuliert. Im Modell verwendet man stattdessen die Bodenfeuchte unter der vereinfachenden Annahme, dass sich diese proportional zur Feuchte der Pflanzen verhält. Zusätzlich muss die Lufttemperatur über dem Nullpunkt liegen. Während Thonicke et al. (2001) die Wahrscheinlichkeit eines Feuerauftretens allein in Abhängigkeit vom Vorhandensein von Brennmaterial und dessen Feuchte beschreiben und eine Zündungsquelle überall und immer als gegeben annehmen, berechnen Arora und Boer (2005) explizit die Wahrscheinlichkeit einer Zündung (Kloster et al., 2010). Diese setzt sich aus den Wahrscheinlichkeiten einer natürlichen und der einer anthropogenen Zündung zusammen, wobei letztere oft als global konstant gesetzt wird. Das Produkt aus den Wahrscheinlichkeiten der Zündung, der genügenden Trockenheit und der Existenz von Brennmaterial ergibt bei Arora und Boer (2005) dann die Gesamtwahrscheinlichkeit eines Feuerausbruchs (Kloster et al., 2010).

Aus den so bestimmten Feuerauftretswahrscheinlichkeiten lässt sich anschließend die verbrannte Fläche abschätzen (Kloster et al., 2010).

1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es den Zusammenhang zwischen der Trockenheit des Bodens (und somit der Pflanzen) und der verbrannten Fläche genauer zu untersuchen. Dabei werden vier Fragen im Vordergrund stehen:

- (1.) In welchen Gebieten kommen Feuer am häufigsten vor und wie sieht dort ein typischer Jahresgang von Bodenfeuchte und Bränden aus?
- (2.) Gibt es einen Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche, der die Herangehensweise, verbrannte Fläche über die Bodenfeuchte zu modellieren, rechtfertigt?

- (3.) Wenn ein Zusammenhang existiert, wie weit in die Zukunft hat die Feuchte Einfluss auf ein etwaiges Feuer und warum?
- (4.) Ist ein festgestellter Zusammenhang unabhängig vom verwendeten Bodenfeuchte-Datensatz und kann er daher als robust angenommen werden?

2 Datensätze

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Bodenfeuchte und der verbrannten Fläche werden globale Datensätze herangezogen. Dabei wird der in allen Datensätzen vorhandene Zeitraum von Januar 2003 bis Dezember 2009 betrachtet. Um die Robustheit der Ergebnisse zu überprüfen werden die Berechnungen zudem mit zwei verschiedene Bodenfeuchte-Datensätzen durchgeführt. Die drei verwendeten Datensätze werden in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

2.1 Verbrannte Fläche

Die verbrannte Fläche ist ein Relativwert und gibt den Flächenanteil einer Gitterzelle an, der durch Feuer verbrannt wurde. Der Datensatz der verbrannten Fläche ist für die Jahre 1997 bis 2009 global mit einer Gitternetzauflösung von $0,5^\circ$ gegeben und wurde von Giglio et al (2010) entwickelt.

Bestimmt wurde die verbrannte Fläche aus Oberflächenreflektivitätsmessungen (500-m-Auflösung), täglichen Messungen aktiver Feuer und einem Datensatz, der die Landbedeckung vierteljährlich angibt (Giglio et al., 2010). Diese Daten wurden - soweit möglich - zu $0,5^\circ$ Gitterauflösung und Monatswerten zusammengefasst (Giglio et al., 2010). Die in einer Gitterzelle über einen Monat verbrannte Fläche wurde also aufsummiert und anschließend in das Verhältnis zur Gesamtfläche der Gitterzelle gesetzt. Für Zeiten, an denen auf diese Weise kein Wert ermittelt werden konnte, bestimmten Giglio et al. (2010) mit den aus anderen Monaten vorhandenen Daten eine lokale Regressionsgleichung. Diese wurde dann für die fehlenden Zeiten zur Berechnung der verbrannten Fläche verwendet.

Wenn für eine Gitterzelle allerdings sehr wenige Daten vorhanden sind, ist diese Methode unzuverlässig. Daher wurden global 14 geographische Regionen mit ähnlichen Umweltbedingungen eingeteilt und für diese Gebiete regionale Regressionsgleichungen bestimmt. Die so erhaltenen Gleichungen wurden an den Gitterzellen mit wenig verwendbaren Daten zur Berechnung der verbrannten Fläche eingesetzt (Giglio et al., 2010). Der Datensatz der verbrannten Fläche ist somit global und enthält für jeden Gitterpunkt in jedem Monat einen Wert. Fehlerquellen in den Berechnungen der verbrannten Fläche können einerseits falsche Klassifikationen in den zugrunde liegenden Datensätzen sein. Andererseits können auch die Regressionsgleichungen Ungenauigkeiten hervorrufen.

Die globale Verteilung der Jahressummen der verbrannten Fläche ist in Abb. 1 im Mittel über die betrachteten sieben Jahre sowie für das Jahr 2005 dargestellt. Abbildung 2 zeigt die Häufigkeit von Monaten mit Vegetationsbränden über den betrachteten Zeitraum.

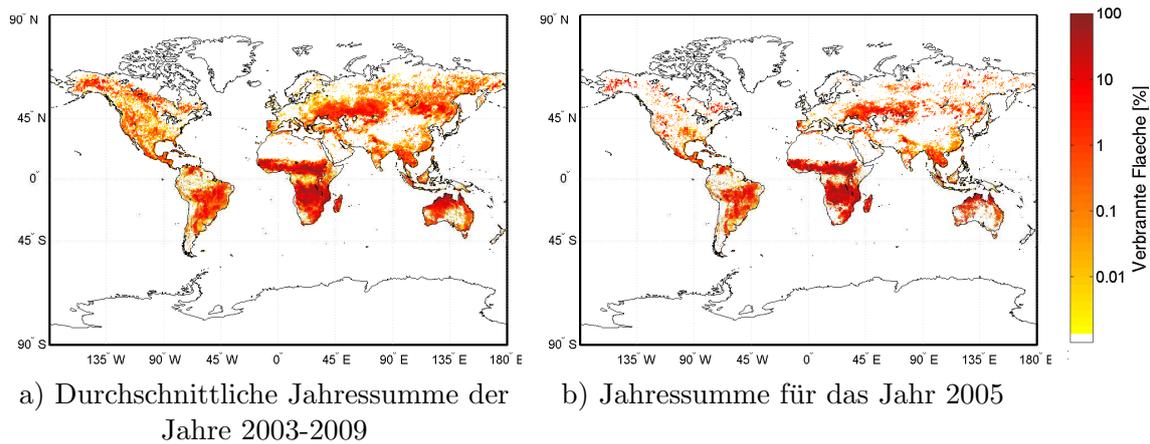


Abbildung 1: Globale Verteilung der verbrannten Fläche. (Weiß: Hier ist die verbrannte Fläche Null.)

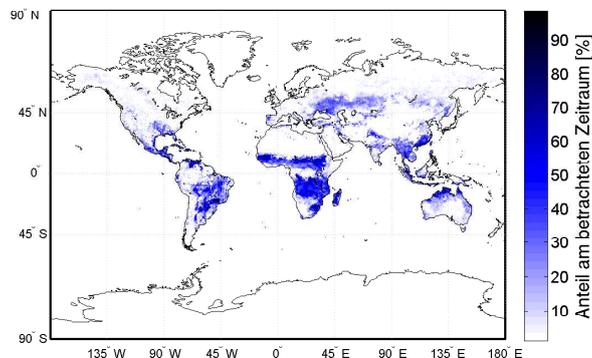


Abbildung 2: Relative Häufigkeit der Monate mit verbrannter Fläche für die Jahre 2003 bis 2009. (0%: Es treten über die betrachteten 7 Jahre keine Brände auf; 100%: Es hat in jedem Monat der betrachteten 7 Jahre gebrannt.)

Die Abbildungen zeigen, dass in den Tropen die größten verbrannten Flächen pro Jahr auftreten. Dort sind auch die meisten Monate mit Bränden zu verzeichnen (siehe Abb. 2). Wüstengebiete, wie beispielsweise die Sahara oder die Mitte Australiens, sowie Gebirgsregionen, wie die Hochebene von Tibet oder die Anden, weisen keine verbrannte Fläche auf: Hier ist kaum Brennmaterial vorhanden und die Pflanzen, die vorhanden sind, stehen so weit auseinander, dass ein flächendeckender Brand nicht möglich ist (Harrison et al., 2010). In der borealen Zone ist die verbrannte Fläche kleiner, allerdings scheinen die Brände dort nicht jährlich im gleichen Ausmaß zustande zu kommen: Im Durchschnitt über die sieben Jahre ist dort mehr verbrannte Fläche pro Jahr aufgetreten als beispielsweise für das Jahr 2005. Nördlich bzw. südlich der Polarkreise treten aufgrund von Eis und damit verbundenen niedrigen Temperaturen sowie eines limitierten Brennmaterial-Vorkommens keine Brände auf.

2.2 Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte wird als Relativwert auf einer Skala zwischen 0 und 1 angegeben. 0 steht dabei für trocken und 1 für gesättigt. Für die Bodenfeuchte werden zwei verschiedene Datensätze verwendet. Beide beinhalten nur Werte über Land. In einigen Regionen sind Satellitenmessungen zudem aufgrund von Schnee, Frost oder dichter Vegetation nicht möglich, da das Messverfahren hier nicht funktioniert (Loew et al., 2013). Die Datensätze sind also quasiglobal.

2.2.1 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer)

Der AMSR-E-Datensatz beruht allein auf den Satellitenmessungen des Advanced Microwave Scanning Radiometers an Bord des Satelliten AQUA von Juni 2002 bis Oktober 2011 (de Jeu et al., 2008). Die von der Erde emittierte, gemessene Strahlung wird in Form der Helligkeitstemperatur angegeben und über ein Strahlungstransfermodell in die Bodenfeuchte umgerechnet (Owe et al., 2008). Dabei wird der Umstand genutzt, dass die gemessene Strahlung nicht allein von der Erdoberfläche, sondern auch von darunter liegenden Schichten emittiert wird. Aufgrund ihrer verschiedenen großen Dielektrizitätskonstanten kann zudem zwischen Erde und Wasser unterschieden werden (de Jeu et al., 2008). Der Satellit scannt die Erde täglich einmal von Süd nach Nord und einmal von Nord nach Süd, es bleiben jedoch aufgrund der Laufbahn Lücken, die nicht erfasst werden können (de Jeu et al., 2008). Eine andere Ursache für Lücken im Datensatz ist die Landbedeckung: Bei Schnee oder Eis wird die solare Strahlung vollständig reflektiert, kann somit nicht in den Boden eindringen und ermöglicht keine Aussage über die Bodenfeuchte. Hinzu kommt, dass eine fast vollständige Reflexion sonst nur in sehr trockenen Regionen wie Wüsten vorkommt und Regionen mit Schnee oder Eis oft fälschlicherweise als sehr trocken deklariert werden. In Gebieten mit dichter Vegetation, wie beispielsweise dem Regenwald, erreicht die solare Strahlung aufgrund der starken Absorption der dunklen Baumkronen den Boden erst gar nicht. Auch hier sind keine Satellitenmessungen der Bodenfeuchte möglich. Die Daten sind ursprünglich in einer $0,25^\circ$ Gitterauflösung gegeben, wurden jedoch hier auf eine $0,5^\circ$ Auflösung und zu Monatsmittelwerten zusammengefasst.

Abbildung 3 zeigt die durchschnittliche mittlere Bodenfeuchte der Jahre 2003-2009 sowie die mittlere Bodenfeuchte des Jahres 2005 für den AMSR-E-Datensatz. Regionen in der Nähe von 45° N, die Indochinesische Halbinsel und das Amazonasgebiet sind sehr feucht. Das Jahr 2005 unterscheidet sich dabei kaum vom Mittel über die betrachteten Jahre, es scheint jedoch in Osteuropa etwas trockener als der Durchschnitt gewesen zu sein. Wüsten wie die Sahara, Zentral-Australien, die Mongolei und die saudiarabische Halbinsel haben im Gegensatz dazu Bodenfeuchten nahe 0. Interessant ist, dass auch für mit Schnee und Eis bedeckte Gebiete, z.B. die westliche Antarktis und die Küstenregionen Grönlands, Bodenfeuchten von 0 angegeben werden. Dies ist wahrscheinlich auf die fast vollkommenen Reflexion der solaren Strahlung zurückzuführen, die auch in Wüsten gegeben ist. Für den Rest

der Antarktis sowie das Innere Grönlands sind wegen der permanenten Schneebedeckung keine Daten vorhanden. Auch für das Amazonasgebiet und das Kongo- becken sind keine Daten gegeben, dies allerdings aufgrund der dichten Vegetation.

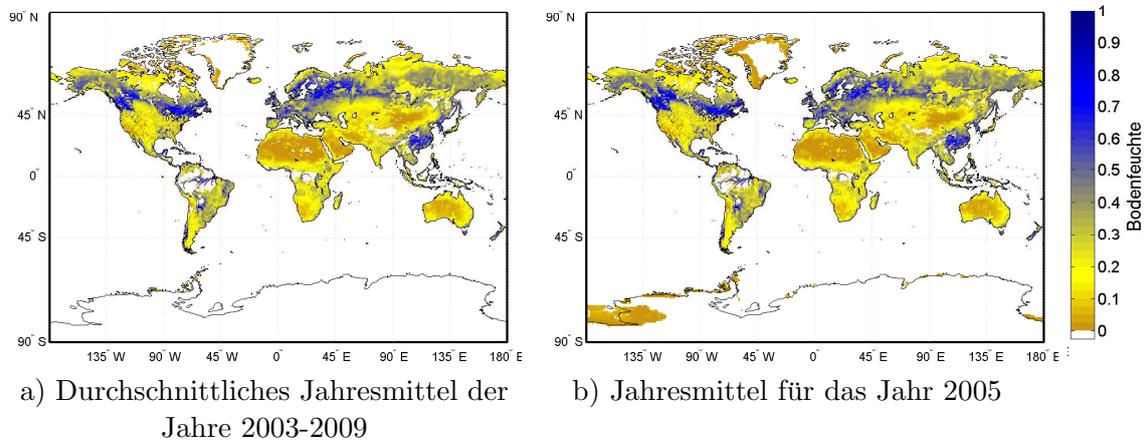


Abbildung 3: Globale Verteilung der Bodenfeuchte im AMSR-E Datensatz. (Weiß: keine Bodenfeuchte-Messungen vorhanden.)

2.2.2 ECVSM (Essential Climate Variable Soil Moisture)

Der Essential Climate Variable Soil Moisture-Datensatz kombiniert Bodenfeuchte-Messungen verschiedener Geräte von verschiedenen Satelliten (u.a. AMSR-E), um einen längeren Zeitraum mit einem konsistenten Datensatz abzudecken (Owe et al., 2008). Die Daten werden mit Hilfe eines Landoberflächenmodells reskaliert und aneinander angepasst. Die verschiedenen Messungen umfassen verschiedene Zeiträume, sodass insgesamt eine Zeitspanne von November 1978 bis Dezember 2010 abgedeckt werden kann (Owe et al., 2008).

Der so erhaltene ECVSM-Datensatz stimmt mit modellierten Bodenfeuchte-Datensätzen und Niederschlagsmessungen am Boden gut überein (Loew et al., 2013). Variabilitäten der Bodenfeuchte über Jahre hinweg hängen nicht nur vom Niederschlag ab. Der ECVSM-Datensatz gibt dennoch sowohl diese als auch Variabilitäten innerhalb eines Jahres gut wieder (Loew et al., 2013). Auch dieser Datensatz ist ursprünglich in einer Gitterauflösung von $0,25^\circ$ gegeben, wird hier aber mit $0,5^\circ$ Auflösung und zu Monatswerten zusammengefasst verwendet.

Abbildung 4 zeigt die durchschnittliche mittlere Bodenfeuchte der Jahre 2003-2009 sowie die mittlere Bodenfeuchte des Jahres 2005 für den ECVSM-Datensatz. Wie bereits beim AMSR-E-Datensatz sind für Permafrost-Regionen, wie die Antarktis oder Grönland, und Regenwaldgebiete keine Daten vorhanden. Hinzu kommen noch das tibetanische Hochplateau und Sibirien. Insgesamt ist zu erkennen, dass Wüstengebiete sehr trocken, Küstengebiete und Europa hingegen feuchter sind. Laut ECVSM-Datensatz gibt es keine Regionen, die im Jahr 2005 eine mittlere Bodenfeuchte über 40 % aufweisen.

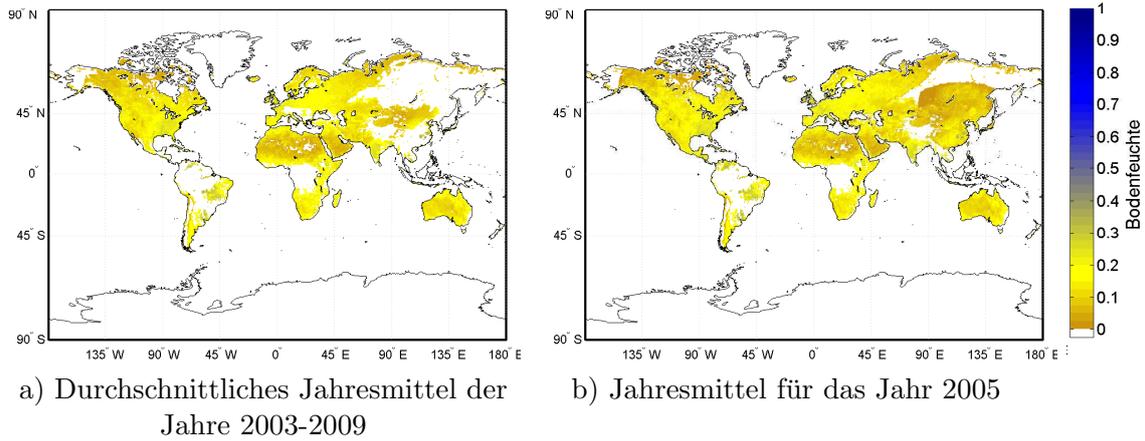
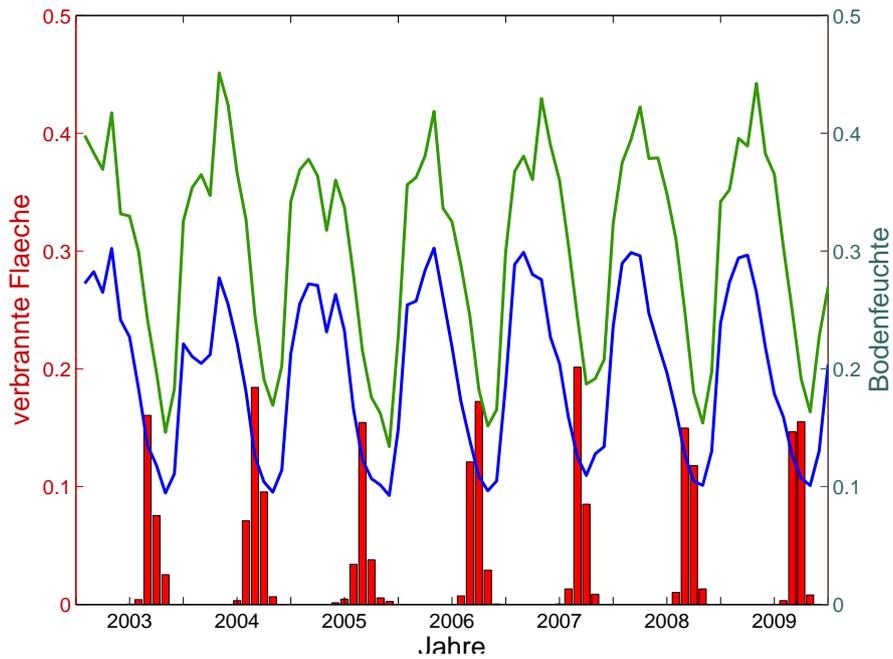


Abbildung 4: Globale Verteilung der Bodenfeuchte im ECVSM Datensatz. (Weiß: keine Bodenfeuchte-Messungen vorhanden.)

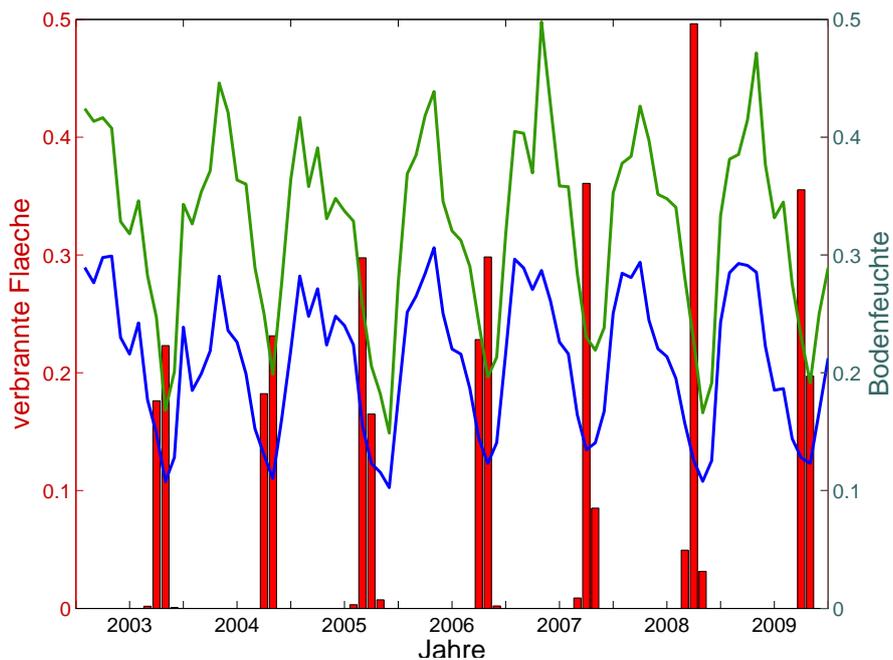
3 Datenanalyse

Die vorgestellten Datensätze decken unterschiedliche Zeiträume ab, überschneiden sich aber von Januar 2003 bis Dezember 2009. Dieser Zeitraum wird daher im Folgenden für die Analyse der Daten herangezogen. Die Gitterauflösung aller drei Datensätze beträgt $0,5^\circ$, was Vergleiche ermöglicht.

Um einen ersten Eindruck eines möglichen Zusammenhangs zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche zu erhalten, wurden zunächst die Jahressgänge beider Größen betrachtet. Die Jahressgänge der betrachteten sieben Jahre sind in Abb. 5 beispielhaft für zwei Gitterpunkte in der Region Südostafrika (nördliches Mosambik) aufgetragen. Eine Periodizität, also ein alljährlich wiederkehrendes Muster ist hier deutlich zu erkennen. Das Ausmaß von verbrannter Fläche und Bodenfeuchte unterscheidet sich jedoch von Jahr zu Jahr und von Region zu Region.



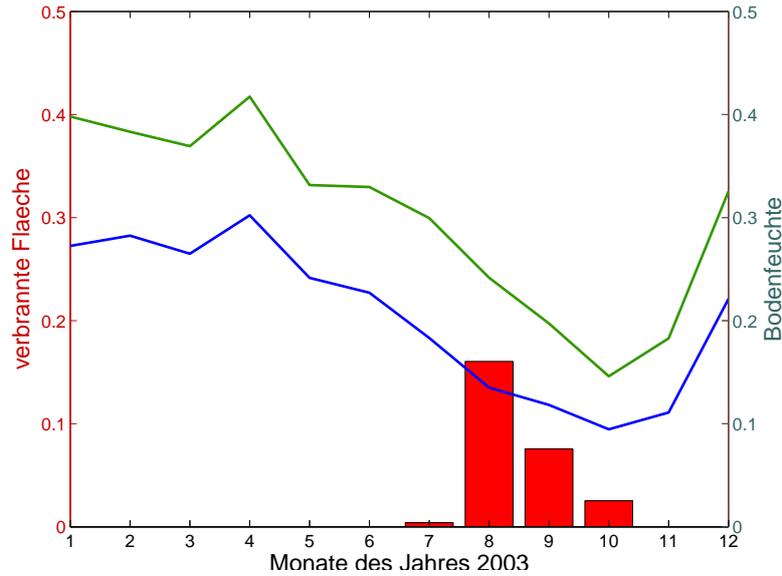
a) 14° S - 38.5° O



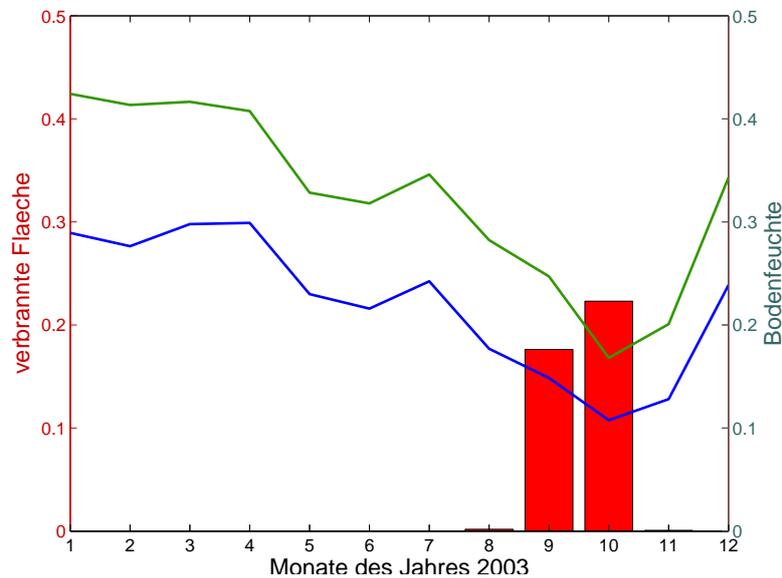
b) 15,5° S - 38.5° O

Abbildung 5: Jahresgang von Bodenfeuchte und verbrannter Fläche in den Jahren 2003-2009 für ausgewählte Gitterpunkte in Mosambik, Südostafrika. (rot: verbrannte Fläche; grün: AMSR-E-Bodenfeuchte-Datensatz; blau: ECVSM-Bodenfeuchte-Datensatz.)

Abbildung 6 zeigt den Jahresgang beispielhaft nur für das Jahr 2003. Die Vegetationsbrände treten in den Monaten August, September und Oktober auf, in denen die Bodenfeuchte ihre minimalen Werte erreicht. Die Bodenfeuchte-Maxima gehen dem Ganzen voraus. Die Grafiken zeigen, dass der ECVSM-Datensatz geringere Bodenfeuchte-Werte angibt als der AMSR-E-Datensatz. Dieses Verhalten ist auch bei der Betrachtung der globalen Verteilung der mittleren Bodenfeuchte (siehe Abb. 3 und 4) zu erkennen. Die Differenz ist je nach Gitterpunkt unterschiedlich groß (siehe Abb. 6), die Jahresgänge verlaufen jedoch weitestgehend parallel.



a) 14° S - 38.5° O



b) 15,5° S - 38.5° O

Abbildung 6: Jahresgang von Bodenfeuchte und verbrannter Fläche im Jahr 2003 für ausgewählte Gitterpunkte in Mosambik, Südafrika. (rot: verbrannte Fläche; grün: AMSR-E-Bodenfeuchte-Datensatz; blau: ECVSM-Bodenfeuchte-Datensatz.)

Die abgebildeten Jahresgänge legen nahe, dass ein Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche existiert. Quantitativ kann dieser Zusammenhang anhand von zeitlichen Korrelationen der beiden Größen untersucht werden. Der Korrelationskoeffizient cor zwischen den Vektoren X und Y kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen und berechnet sich wie folgt:

$$cor(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma(X) \cdot \sigma(Y)} \quad (1)$$

X und Y enthalten die Werte der verbrannten Fläche und Bodenfeuchte an einem Gitterpunkt über den gesamten betrachteten Zeitraum. σ ist die Standardabweichung und cov die Kovarianz. Sie sind folgendermaßen definiert:

$$cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \quad (2)$$

$$\sigma(X) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Ist der Korrelationskoeffizient positiv, so tritt mit einer hohen Bodenfeuchtigkeit auch eine große verbrannte Fläche auf, oder mit geringer Bodenfeuchte eine kleine verbrannte Fläche. Bei negativem Korrelationskoeffizienten ist das Gegenteil der Fall und geringe/hohe Bodenfeuchte und große/kleine verbrannte Fläche treten gleichzeitig auf.

Außerdem soll untersucht werden, ob auch die Umgebungsbedingungen der vorangegangenen Monate Einfluss auf das Ausmaß der späteren verbrannten Fläche haben. Eine Periode höherer Bodenfeuchte könnte beispielsweise eine Voraussetzung für Pflanzenwachstum und somit für die Existenz von Brennmaterial sein. Andererseits würde ein langes Speichern hoher Feuchte das Entstehen eines Feuers möglicherweise verhindern. Dazu werden für jeden Gitterpunkt Korrelationskoeffizienten zwischen Bodenfeuchte-Daten vorangegangener Monate (Y_t) und der aktuellen verbrannten Fläche (X) berechnet. Die Kovarianz verändert sich also zu:

$$cov(X, Y_t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_{i-t} - \bar{y}) \quad (4)$$

t gibt die Zeitverschiebung in Monaten an. Die Korrelationen werden für Zeitverschiebungen von 1 bis 12 Monaten berechnet. Längere Zeitverschiebungen wurden nicht betrachtet, da angenommen wurde, dass die Bodenfeuchte zeitlich nur begrenzten Einfluss auf die verbrannte Fläche haben kann.

Zu beachten ist, dass die aktuelle Bodenfeuchte (Y) durchaus abhängig von der Vorangegangenen (Y_t) ist. Diesen Zusammenhang beschreibt die Autokorrelation. Sie berechnet sich wie folgt:

$$autocor(Y) = cor(Y, Y_t) = \frac{cov(Y, Y_t)}{\sigma(Y)^2} \quad (5)$$

mit

$$\text{cov}(Y, Y_t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (y_{i-t} - \bar{y}) \quad (6)$$

Wurde zudem ein Zusammenhang zwischen aktueller Bodenfeuchte und verbrannter Fläche festgestellt (siehe Gl. 1), ist es möglich, dass mit Zeitverschiebung berechnete Korrelationskoeffizienten verfälscht sind. Denn dann ist sowohl die vorangegangene Bodenfeuchte als auch die verbrannte Fläche von der aktuellen Bodenfeuchte abhängig und ein hoher Korrelationskoeffizient zwischen Ersteren eine mathematische Notwendigkeit.

Um die Korrelationsberechnungen zwischen vorangegangener Bodenfeuchte (Y_t) und aktueller verbrannter Fläche (X) von dem Einfluss der aktuellen Bodenfeuchte (Y) zu befreien, werden partielle Korrelationen berechnet:

$$\text{parcor}(X, Y_t) = \text{cor}(X, Y_t)_{/Y} = \frac{\text{cor}(X, Y_t) - \text{cor}(X, Y) \cdot \text{cor}(Y_t, Y)}{\sqrt{(1 - \text{cor}(X, Y)^2) \cdot (1 - \text{cor}(Y_t, Y)^2)}} \quad (7)$$

Der partielle Korrelationskoeffizient gibt nun die von dem gemeinsamen Faktor unabhängige Korrelation von vorangegangener Bodenfeuchte und verbrannter Fläche an.

Die Datensätze der Bodenfeuchte sind im Gegensatz zu dem der verbrannten Fläche nur quasiglobal. Die Korrelation zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche kann also immer nur für die Gitterzellen und unter Berücksichtigung der Monate berechnet werden, an denen überhaupt Bodenfeuchte-Daten vorliegen. In Abb. 7 ist zu erkennen, dass der ECVSM-Datensatz in Regionen mit starker Eis- oder Pflanzenbedeckung, wie der Antarktis, Grönland und den tropischen Regenwäldern, im Gegensatz zum AMSR-E-Datensatz weniger Messwerte aufweist.

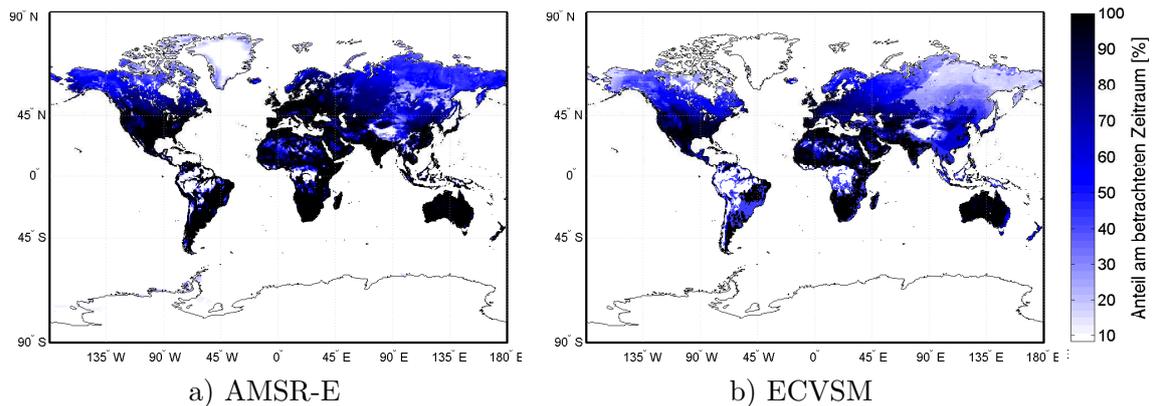


Abbildung 7: Relative Häufigkeit der Anzahl vorhandener Bodenfeuchte-Daten für die Jahre 2003 bis 2009. (0%: Es sind für die betrachteten 7 Jahre keine Daten vorhanden; 100%: Es sind für jeden Monat der betrachteten 7 Jahre Bodenfeuchte-Daten gegeben.)

Für jeden Gitterpunkt wird nun, soweit Daten vorhanden, ein Korrelationskoeffizient berechnet. An Gitterpunkten mit vielen vorhandenen Bodenfeuchte-Daten gehen mehr Werte in die Korrelationsberechnung mit ein. Diese Tatsache muss berücksichtigt werden, da die Vertrauenswürdigkeit des Korrelationskoeffizienten abnimmt, je weniger Daten zu seiner Berechnung herangezogen wurden.

Daher wurde für jeden Gitterpunkt zusätzlich der p-Wert des berechneten Korrelationskoeffizienten ausgegeben. Der p-Wert gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Nullhypothese, es gebe keine Korrelation zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche, richtig ist. Je kleiner also der p-Wert, desto wahrscheinlicher ist die Existenz eines wirklichen Zusammenhangs zwischen den beiden Größen. Die berechneten Korrelationen wurden bei p-Werten unterhalb des Schwellwertes $p = 0.05$ als signifikant angenommen. Anschließend wurde der Vorgang für Zeitverschiebungen von 1 bis 12 Monaten wiederholt. Bei der Korrelationsberechnung mit Zeitverschiebung wurden zudem die partiellen Korrelationen berechnet. Auch zu diesen wurde ein p-Wert bestimmt. Die Ergebnisse werden im nächsten Kapitel erläutert.

4 Ergebnisse

Der Zusammenhang zwischen den Datensätzen der Bodenfeuchte und der verbrannten Fläche wurde wie beschrieben für beide Bodenfeuchte-Datensätze untersucht. Dazu wurde zunächst ein Vergleich der beiden Bodenfeuchte-Datensätze angestellt, um mögliche Unterschiede in späteren Ergebnissen einordnen zu können. Anschließend wurden die Korrelationen ohne und mit Zeitverschiebung berechnet und Schlussfolgerungen gezogen.

4.1 Vergleich AMSR-E und ECVSM

Bei Betrachtung von Abb. 3 und 4 fällt auf, dass der AMSR-E-Datensatz insgesamt höhere Bodenfeuchtwerte als der ECVSM-Datensatz angibt. Um beurteilen zu können, ob die Datensätze trotzdem einen ähnlichen zeitlichen Verlauf aufweisen, stellt Abb. 8 die Korrelation der beiden Datensätze dar. Die Datensätze haben südlich von 45°N tendenziell hohe, positive Korrelationskoeffizienten. Dies ist sicherlich auch darauf zurückzuführen, dass die AMSR-E Daten in den ECVSM-Datensatz einfließen. Die Reskalierung und Anpassung an andere Messreihen im ECVSM-Datensatz scheint zu kleineren Bodenfeuchte-Werten zu führen, den zeitlichen Verlauf jedoch zu erhalten.

Nördlich von 45°N nimmt der Betrag der Korrelationskoeffizienten ab und es sind auch negative Werte zu finden. Hier scheinen die beiden Datensätze gebietsweise auch entgegengesetzte Entwicklungen anzugeben. Dass für viele Gebiete keine Korrelation bestimmt werden konnte, kann zwei Ursachen haben: Entweder ist für keinen Monat in den betrachteten sieben Jahren ein Wert aus beiden Datensätzen gegeben, möglicherweise weil für besagte Gitterpunkte generell keine Bodenfeuchte gegeben ist. Oder die Bodenfeuchte ist bei einem oder beiden Datensätzen über den gesamten betrachteten Zeitraum konstant, sodass die Standardabweichung im

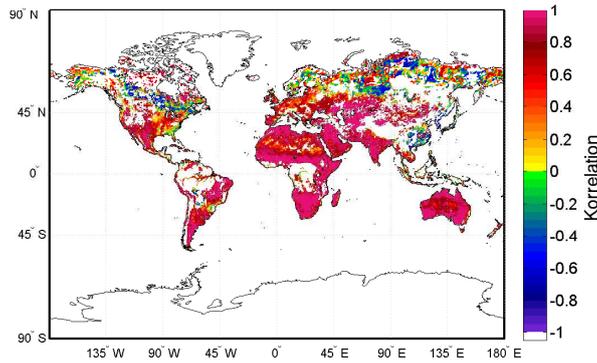


Abbildung 8: Korrelation der monatlich mittleren AMSR-E und ECVSM Bodenfeuchte-Datensätze für den Zeitraum 2003-2009. (Weiß: Hier war die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten nicht möglich.)

Nenner des Korrelationskoeffizienten Null wird (siehe Gl. 1). Letzterer ist in diesem Fall also nicht berechenbar. Auf dieser Grundlage werden nun die berechneten Korrelationskoeffizienten vorgestellt.

4.2 Korrelation zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche

Für die Berechnung der zeitlichen Korrelation zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche wurde Gl. 1 an jedem Gitterpunkt angewendet, an dem Bodenfeuchte-Daten vorhanden waren. Die erhaltenen Korrelationskoeffizienten sind in Abb. 9 dargestellt.

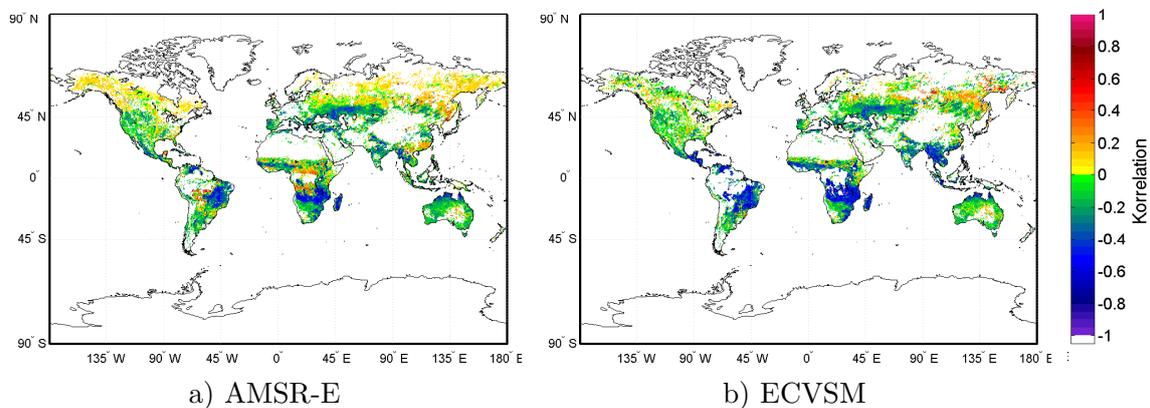


Abbildung 9: Zeitliche Korrelation zwischen verbrannter Fläche und Bodenfeuchte. (Weiß: Hier war die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten nicht möglich.)

Ein erster Blick auf die globale Darstellung der berechneten Korrelationskoeffizienten ergibt, dass diese insgesamt eher negativ sind (siehe Abb. 9). Bei negativer Korrelation tritt eine geringe Bodenfeuchte, also erhöhte Trockenheit, gleichzeitig mit großer verbrannter Fläche auf. Der für die ausgewählten Gitterpunkte in Süd-

ostafrika vermutete Zusammenhang, dass Brände in den trockenen Monaten entstehen, scheint also auch für viele andere Regionen zu gelten. Dieser Zusammenhang soll nun genauer untersucht werden.

Zunächst wird ein Hypothesentest mit oben genannter Nullhypothese angewendet, sodass sich die in Abb. 10 dargestellten p-Werte ergeben.

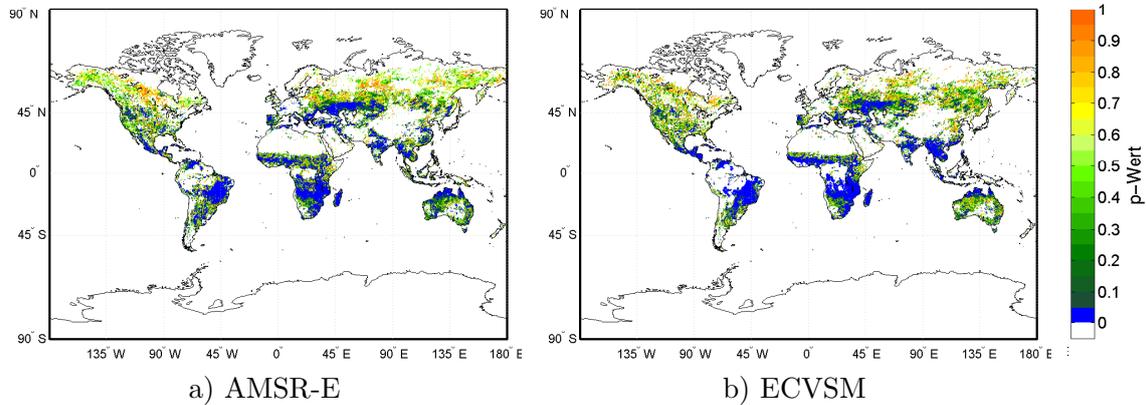


Abbildung 10: p-Werte der berechneten Korrelationen zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche. (Blau: p-Werte < 0,05. Weiß: Hier war die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten nicht möglich.)

Der Signifikanzbereich wurde als $p < 0.05$ definiert. p-Werte dieser Größenordnung treten hauptsächlich in Gebieten auf, in denen viele Bodenfeuchte-Daten vorhanden sind (siehe Abb. 7) und somit viele Wertepaare in die Korrelationsberechnung mit eingehen. In diesen Regionen sind auch die größten verbrannten Flächen zu finden (siehe Abb. 1).

Abbildung 11 zeigt die Korrelationskoeffizienten für die Gitterpunkte, an denen $p < 0.05$ und die berechnete Korrelation somit signifikant ist.

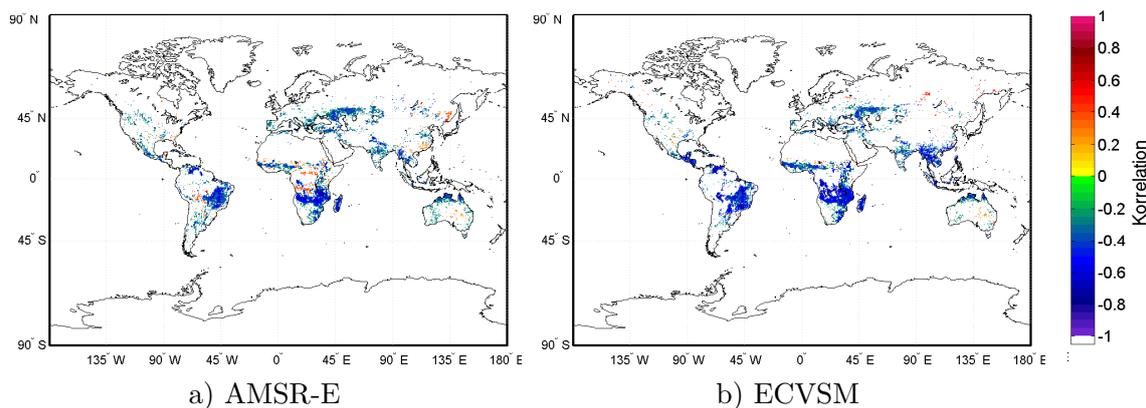


Abbildung 11: Signifikante Korrelationen zwischen verbrannter Fläche und Bodenfeuchte. Als signifikant wurden Korrelationen mit einem p-Wert < 0,05 angenommen. (Weiß: Hier sind mögliche vorhandene Korrelationskoeffizienten nicht signifikant.)

Von den signifikanten Korrelationskoeffizienten sind nur noch sehr wenige positiv. Bei den Korrelationen, die mit dem AMSR-E-Datensatz bestimmt wurden, treten häufiger positive Korrelationskoeffizienten auf als bei denen des ECVSM-Datensatzes. Dies ist auf die grundlegenden Unterschiede der Bodenfeuchte-Datensätze in Bezug auf Größenordnung und Vorhandensein von Daten zurückzuführen (siehe Abb. 8). Die Ergebnisse für verschiedene Regionen sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Übersicht über die berechneten signifikanten Korrelationskoeffizienten

Gebiet		Korrelationskoeffizient		
Name	Besonderheit	AMSR-E	ECVSM	Größenordnung
Südosafrika (10°-20°S)		---	---	-0,6 bis -0,8
Mittelamerika		--	---	
Brasilianisches Bergland	häufiges Vorkommen von	--	---	
Indochinesische Halbinsel	Vegetationsbränden und	--	---	
Madagaskar	großflächig hohe	--	--	-0,4 bis -0,6
äußerster Norden Australiens	Korrelationskoeffizienten	--	--	
Sahelzone		--	--	
Kasachensteppe		--	--	
USA		-	-	-0,2 bis -0,4
Nordargentinien		-	-	
Südafrika	Korrelationskoeffizienten	-	-	
Indien	vereinzelt auf dem Gebiet	-	-	
Südeuropa		-	-	
Australien		-	-	
Südostsibirien		+		0,2
Randgebiete des Kongobeckens		++	--	0,4 bzw. -0,6
boreale Zone gesamt	kaum bis keine signif. Korrelationen	o	o	
Sahara		o	o	
Saudiarabische Halbinsel		o	o	
Hochland von Tibet	kein Vorkommen von	o	o	
Grönland	Vegetationsbränden	o	o	
Antarktis		o	o	
Amazonasgebiet	Regenwald: keine	o	o	
Kongobecken	Bodenfeuchte Messungen vorhanden	o	o	

LEGENDE: - - - sehr stark negativ korreliert; - - stark negativ korreliert; - negativ korreliert; + + + sehr stark positiv korreliert; + + stark positiv korreliert; + positiv korreliert; o keine Korrelation. Betragsmäßig entspricht 1 Zeichen 0-0,3, 2 Zeichen 0,3-0,6 und 3 Zeichen 0,6-0,9.

Insgesamt sind die Beträge der signifikanten Korrelationskoeffizienten (besonders der negativen Koeffizienten) sehr groß (siehe Abb. 11 und Tab. 1). In Mittelamerika, dem Brasilianischen Bergland, Afrika zwischen 10° S und 20° S, Afrikas Südküste und der Indochinesischen Halbinsel liegen die Korrelationskoeffizienten bei etwa -0,7. Dies sind Gebiete mit vermehrtem Vorkommen von Vegetationsbränden (siehe Abb. 1). Für Madagaskar, die Sahelzone, die Kasachensteppe sowie den äußersten Norden Australiens liegen sie bei etwa -0,5. Die darüber hinaus vereinzelt auftretenden signifikanten Korrelationskoeffizienten nehmen kleinere Werte von etwa -0,3 an (siehe Tab. 1). Neben der Dominanz negativer Korrelationskoeffizienten treten aber auch positive Koeffizienten auf: Bei den Korrelationen mit dem AMSR-E-Datensatz kommen diese gehäuft in den Randgebieten des Kongobeckens und an der Ostküste Chinas vor. Für den ECVSM-Datensatz sind kaum positive Korrelationskoeffizienten zu erkennen, am auffälligsten in Südsibirien. Die Unterschiede zwischen den Korrelationen mit den beiden Bodenfeuchte-Datensätzen sind auf die negative Korrelation zwischen AMSR-E- und ECVSM-Datensatz in diesen Regionen zurückzuführen (siehe Abb. 8). Eine hohe Bodenfeuchte in einem Datensatz

fällt also mit einer niedrigen Bodenfeuchte im anderen Datensatz zusammen, sodass die Korrelationskoeffizienten mit der verbrannten Fläche unterschiedliche Vorzeichen haben. Die positiven Korrelationskoeffizienten bewegen sich in etwa um die 0,2 bis 0,4. Gebiete, in denen nie Feuer auftreten, wie die Sahara, das Hochland von Tibet, Grönland und die Antarktis, besitzen aus diesem Grund keinen Korrelationskoeffizienten. Sowohl positive als auch negative Korrelationskoeffizienten sind vom Betrag her hinreichend groß, um zu bestätigen, dass ein starker Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche existiert.

Für eine Beurteilung des Ansatzes, die verbrannte Fläche u.a. über die Bodenfeuchte zu modellieren, sind keine komplett globalen Grundlagen gegeben, da die nicht signifikanten Korrelationen ausgeklammert wurden und in Gebieten ohne Feuer oder Bodenfeuchte-Daten die Korrelationskoeffizienten nicht berechenbar sind. Jedoch fällt bei einem Vergleich von Abb. 11 und 1 auf, dass die signifikanten Korrelationen in Gebieten mit (großer) verbrannter Fläche auftreten, also dort, wo ein Zusammenhang überhaupt erst untersucht werden kann. Allerdings sind für die boreale Zone trotz vorhandener verbrannter Fläche kaum signifikante Korrelationen gegeben. Schlussfolgerungen, die aus den Ergebnissen gezogen werden, beziehen sich also zunächst nur auf die Regionen der Tropen und Subtropen. Insgesamt ist die Mehrzahl der signifikanten Korrelationen negativ und auch vom Betrag her größer als die positiven. Ein negativ korrelierter Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Verlauf der Bodenfeuchte und der verbrannten Fläche kann daher für Tropen und Subtropen als allgemeingültig angenommen werden.

Dass eine globale Verallgemeinerung der erhaltenen signifikanten Korrelationen keinen Sinn macht, kann zudem mit einer globalen, örtlichen Korrelation belegt werden: Wenn man für alle Gitterpunkte die mittlere Jahressumme der verbrannten Fläche und die durchschnittliche Jahresmittelbodenfeuchte vergleicht, erhält man zwar signifikante, aber sehr kleine Korrelationskoeffizienten. So ergibt sich für den AMSR-E-Datensatz eine Korrelation von -0,07 und für den ECVSM-Datensatz von 0,16. Sowohl die unterschiedlichen Vorzeichen als auch die Größenordnung belegen, dass global keine allgemeine Aussage über das Verhältnis von Bodenfeuchte zu verbrannter Fläche möglich ist. Große Trockenheit bedeutet demnach nicht zwangsläufig große verbrannte Fläche (besonders in den Wüsten) und hohe durchschnittliche Feuchtigkeit wie in der borealen Zone nicht unbedingt kleine verbrannte Fläche oder umgekehrt.

4.3 Korrelation mit Zeitverschiebung zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche

Die Korrelationen wurden anschließend mit einer Zeitverschiebung berechnet. Das bedeutet, dass Bodenfeuchte-Daten mit der verbrannten Fläche von 1 bis 12 Monaten später verglichen und auf einen möglichen Zusammenhang hin geprüft wurden. Die Vorgehensweise ist analog zu der Korrelationsberechnung ohne Zeitverschiebung: Zusammen mit den Korrelationen wurden die p-Werte berechnet, sodass sich die signifikanten Korrelationen herausfiltern ließen. Im Folgenden werden daher nur die signifikanten Korrelationen betrachtet und dargestellt.

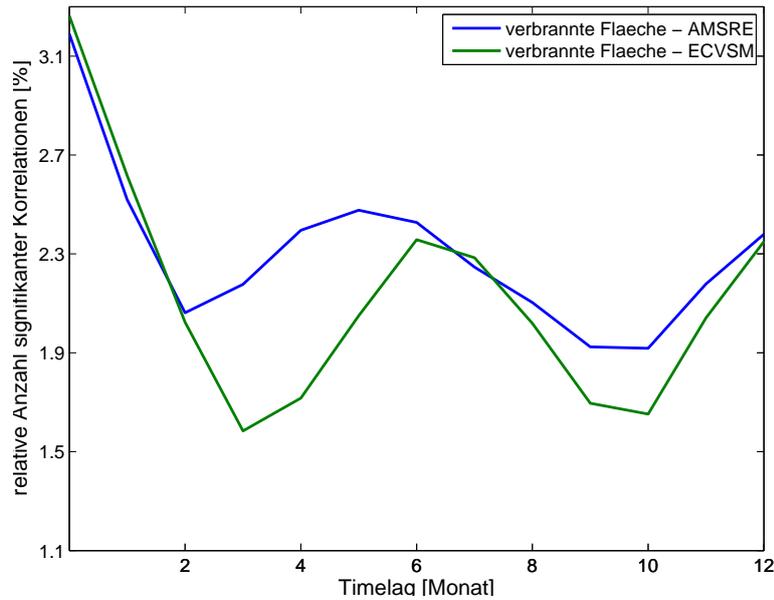
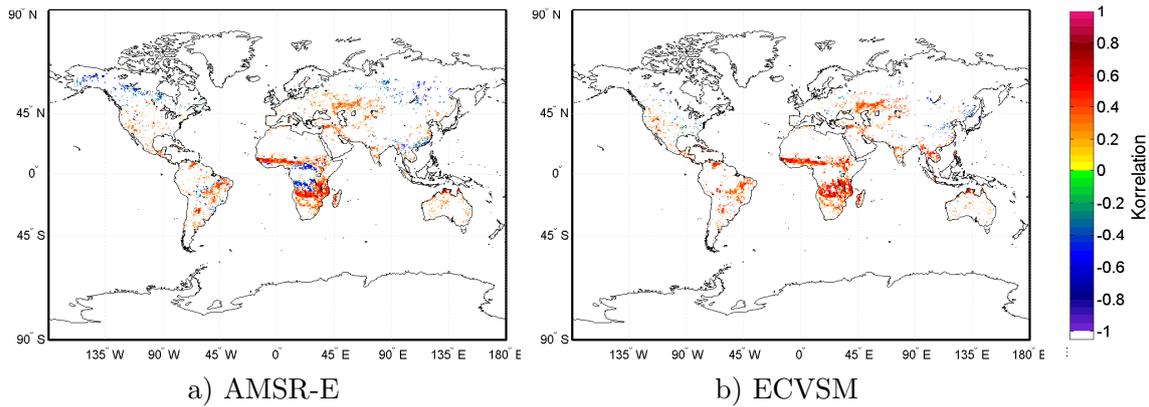
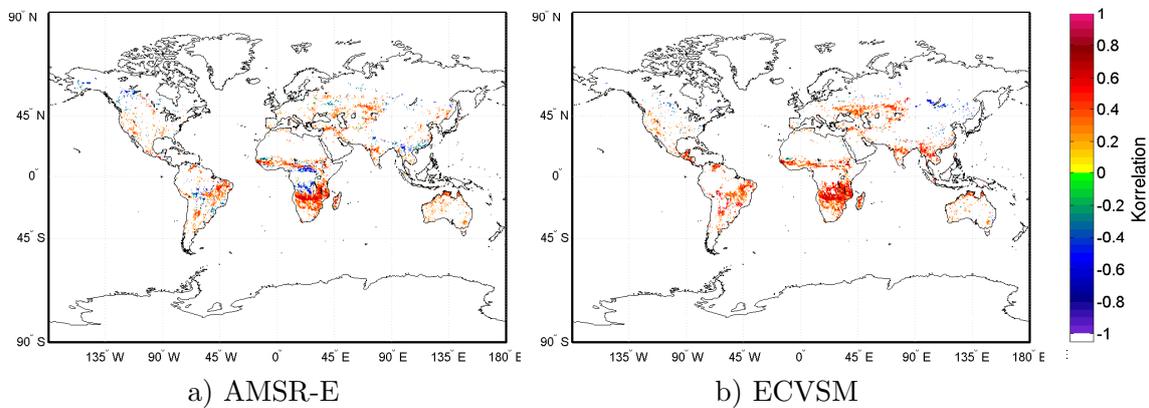


Abbildung 12: Anzahl der Gitterpunkte mit signifikanten Korrelationen zwischen verbrannter Fläche und (vorangegangener) Bodenfeuchte im Verhältnis zu der Gesamtheit aller Gitterpunkte; aufgetragen gegen die Zeitverschiebung in Monaten.

Bei Betrachtung der Anzahl signifikanter Korrelationen in Abhängigkeit von der Zeitverschiebung (Abb. 12) ist erkennbar, dass die Anzahl der signifikanten Korrelationen sich zunächst mit zunehmender Zeitverschiebung verringert. Eine geringere Anzahl an signifikanten Korrelationen bedeutet, dass weniger Gitterpunkte einen etwaigen Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche belegen. Daher wird angenommen, dass bei einer niedrigen Anzahl signifikanter Korrelationen der Einfluss der Bodenfeuchte auf die verbrannte Fläche geringer ist. Mit dieser Annahme ergibt sich nun, dass der Einfluss der Bodenfeuchte zunächst mit jedem vergangenen Monat kleiner wird. Für Zeitverschiebungen ab 2 bzw. 3 Monaten steigt die Anzahl der signifikanten Korrelationen wieder an und erreicht für die Korrelationen mit dem AMSR-E-Datensatz bei 5 Monaten, für jene mit dem ECVSM-Datensatz bei 6 Monaten ein lokales Maximum. Die Bodenfeuchte etwa ein halbes Jahr zuvor hat anscheinend wieder größeren Einfluss auf die verbrannte Fläche. Die Korrelationsverteilungen werden daher im Folgenden für Zeitverschiebungen von 5 und 6 Monaten betrachtet. Abbildung 13 zeigt die signifikanten Korrelationskoeffizienten für diese Zeitverschiebungen. Eine Übersicht über die Ergebnisse ist in Tab. 2 zu finden. Die globalen Verteilungen der signifikanten Korrelationskoeffizienten für die Zeitverschiebungen von 1 bis 4 sowie 7 bis 12 Monaten sind im Anhang abgebildet.



13.1: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 5 Monate vorangegangener Bodenfeuchte. Für diese Zeitverschiebung treten bei den Korrelationen mit dem AMSR-E-Datensatz die meisten signifikanten Korrelationen auf.



13.2: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 6 Monate vorangegangener Bodenfeuchte. Für diese Zeitverschiebung treten bei den Korrelationen mit dem ECVSM-Datensatz die meisten signifikanten Korrelationen auf.

Abbildung 13: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 5 bzw. 6 Monate vorangegangener Bodenfeuchte. Als signifikant wurden Korrelationen mit einem p-Wert $< 0,05$ angenommen. (Weiß: Hier sind mögliche vorhandene Korrelationskoeffizienten nicht signifikant.)

Die globalen Verteilungen ergeben, dass sich auch mit Zeitverschiebung die Gebiete signifikanter Korrelationen weitestgehend mit den Gebieten decken, in denen große Feuer auftreten (siehe Abb. 13 sowie Abb. 16-25 im Anhang). Die Korrelationsberechnungen mit den unterschiedlichen Bodenfeuchte-Datensätzen ergeben teilweise für unterschiedliche Gitterpunkte signifikante Korrelationen und weisen für manche Gebiete verschiedene Werte auf (siehe Tab. 2). So erhält man für die Korrelationen mit dem AMSR-E-Datensatz nördlich und südlich des Kongobeckens, westlich des Brasilianischen Berglandes sowie an der Südostküste Asiens im Gegensatz zu den Korrelationen mit dem ECVSM-Datensatz negative Werte.

Tabelle 2: Übersicht über die berechneten signifikanten Korrelationskoeffizienten der verbrannten Fläche mit 5 und 6 Monaten vorangegangener Bodenfeuchte

a) Zeitverschiebung von 5 Monaten

Gebiet		Korrelationskoeffizient		
Name	Besonderheit	AMSR-E	ECVSM	Größenordnung
Südostafrika (10°-20°S)		++/+++	++/+++	0,5 bis 0,7
Madagaskar	häufiges Vorkommen von Vegetationsbränden und großflächig hohe Korrelationskoeffizienten	++/+++	++/+++	
äußerster Norden Australiens		++/+++	++/+++	
Sahelzone		++/+++	++/+++	
Brasilianisches Bergland		++	++	0,4
Kasachensteppe	++	++		
Indochinesische Halbinsel	Korrelationskoeffizienten vereinzelt auf dem Gebiet	+	++	0,2 bis 0,4
USA		+	+	
Mittelamerika		+	+	
Nordargentinien		+	+	
Südafrika		+	+	
Indien		+	+	
Australien		+	+	
boreale Zone gesamt			--	
westlich des Bras. Berglandes		--		-0,6
Randgebiete des Kongobeckens	Korrelationen mit den Bodenfeuchtedatensätzen haben versch. Vorzeichen	--	++	-0,5 bzw. 0,5
Südostküste Asiens		--	++	
Sahara	kein Vorkommen von Vegetationsbränden	o	o	
Saudiarabische Halbinsel		o	o	
Hochland von Tibet		o	o	
Grönland		o	o	
Antarktis		o	o	
Amazonasgebiet		Regenwald: keine Bodenfeuchte Messungen vorhanden	o	
Kongobecken	o		o	

b) Zeitverschiebung von 6 Monaten

Gebiet		Korrelationskoeffizient				
Name	Besonderheit	AMSR-E	ECVSM	Größenordnung		
Südostafrika (10°-20°S)		++/+++	++/+++	0,5 bis 0,7		
Madagaskar	häufiges Vorkommen von Vegetationsbränden und großflächig hohe Korrelationskoeffizienten	++/+++	++/+++			
äußerster Norden Australiens		++	++	0,5 bis 0,6		
Sahelzone		++	++			
Mittelamerika		++	++	0,4		
Brasilianisches Bergland	+ / ++	+ / ++				
Kasachensteppe	+ / ++	+ / ++	0,2 bis 0,5			
Indochinesische Halbinsel	Korrelationskoeffizienten vereinzelt auf dem Gebiet	+		++		
Indien		+	+	0,2 bis 0,4		
USA		+	+			
Nordargentinien		+	+			
Südafrika		+	+			
Australien		+	+			
Südsibirien/ Grenze Mongolei					--	-0,6
boreale Zone gesamt			--			-0,4
Randgebiete des Kongobeckens	Korrelationen mit den Bodenfeuchtedatensätzen haben versch. Vorzeichen	--	++		0,4 bzw. -0,6	
westlich des Bras. Berglandes		--	++			
Südostküste Asiens		--	++			
Sahara	kein Vorkommen von Vegetationsbränden	o	o			
Saudiarabische Halbinsel		o	o			
Hochland von Tibet		o	o			
Grönland		o	o			
Antarktis		o	o			
Amazonasgebiet		Regenwald: keine Bodenfeuchte Messungen vorhanden	o		o	
Kongobecken	o		o			

LEGENDE: - - - sehr stark negativ korreliert; - - stark negativ korreliert; - negativ korreliert; + + + sehr stark positiv korreliert; + + stark positiv korreliert; + positiv korreliert; o keine Korrelation. Betragsmäßig entspricht 1 Zeichen 0-0,3, 2 Zeichen 0,3-0,6 und 3 Zeichen 0,6-0,9.

Der Unterschied in den Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten kann für die beiden letztgenannten Gebiete wieder auf die negative Korrelation zwischen den beiden Bodenfeuchte-Datensätzen in diesen Regionen zurückgeführt werden. Südlich des Kongobeckens sind für die betrachteten Gebiete keine Daten in den ECVSM-Bodenfeuchte-Datensätzen gegeben und eine Aussage über das dortige Verhältnis der Datensätze ist somit nicht möglich. Nördlich des Kongobeckens sind die Bodenfeuchte-Datensätze zwar positiv korreliert, jedoch keine Korrelationen zwischen ECVSM-Bodenfeuchte-Daten und verbrannter Fläche vorhanden. Auch dies macht einen Vergleich der Korrelationen mit den beiden Bodenfeuchte-Datensätzen unmöglich.

Insgesamt ist die Tendenz der berechneten Korrelationskoeffizienten jedoch sehr ähnlich: Für Zeitverschiebungen von 3 bis 8 Monaten sind sie größtenteils positiv (siehe Abb. 13 sowie Abb. 16-25 im Anhang), vorangegangene höhere Bodenfeuchte trifft also häufig mit späterer großer verbrannter Fläche zusammen. Da dieser Zusammenhang für beide Datensätze auf weiten Gebieten gegeben ist, wird angenommen, dass er weitestgehend unabhängig vom verwendeten Bodenfeuchte-Datensatz ist.

Um beurteilen zu können welche Vegetationsart in welcher Region vorkommt und somit die Korrelationen von vorangegangener Bodenfeuchte und verbrannter Fläche im Hinblick auf Pflanzenwachstum analysieren zu können, ist in Abb. 14 die globale Verteilung der Landoberflächentypen dargestellt.

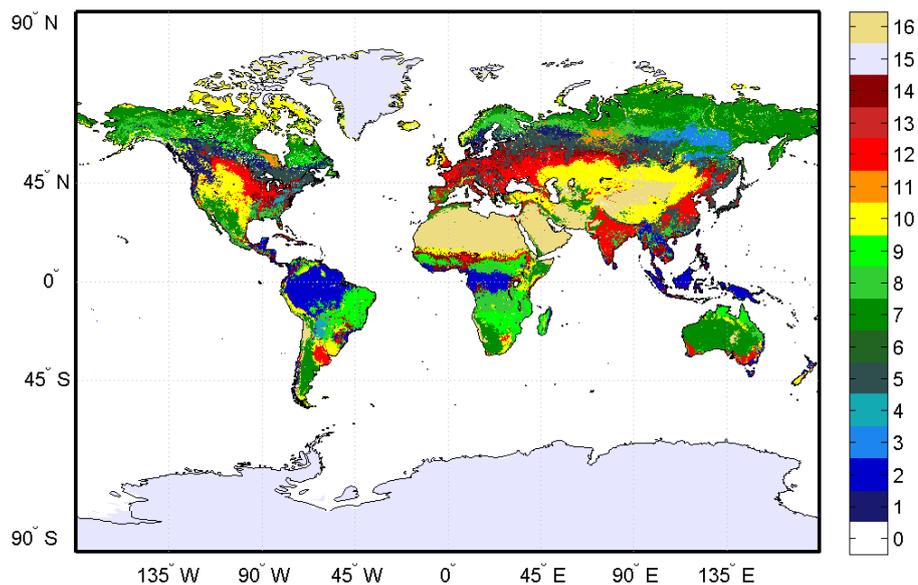


Abbildung 14: Globale Verteilung der Landoberflächentypen im Jahr 2006 (MODIS). (0: Wasser, 1: immergrüner Nadelwald; 2: immergrüner Laubwald; 3: sommergrüner Nadelwald; 4: sommergrüner Laubwald; 5: Mischwald; 6: dichtes Buschland; 7: offenes Buschland; 8: Baumsavanne; 9: Savanne; 10: Steppe / Wiesen; 11: ganzjährige Feuchtgebiete; 12: Acker- / Kulturland; 13: Städte / bebaute Flächen; 14: teils Acker- / Kulturland, teils natürliche Vegetation; 15: Schnee und Eis; 16: (quasi) bewuchsfrei.)

Die signifikanten Korrelationen treten größtenteils in den Tropen auf, ausgenommen sind hierbei die Regenwälder und deren Grenzen. Im dort vorherrschenden, eher trockenen Vegetationstyp Savanne (siehe Abb. 14) reguliert der Regen das Pflanzenwachstum (Wein et al., 1983). Nur bei ausreichendem Regen können Pflanzen wachsen, und diese oder ihr Laub während der 2- bis 8-monatigen Trockenzeit austrocknen und als Brennmaterial für Feuer fungieren (van Wilgen et al., 1990). Die positive Korrelation zwischen vorangegangener Feuchte und verbrannter Fläche ist also plausibel.

Die Trockenzeit und somit auch die Vegetationsbrände sind saisonale Gegebenheiten, die sich alljährlich wiederholen. Voraussetzung dafür ist, dass nach den Bränden wieder genügend Brennmaterial wächst. In den Savannen sind dies ein- und mehrjährige Gräser sowie Bäume und Büsche mit feuerresistenten Kernen, die sich in etwa innerhalb eines halben Feuerintervalls regenerieren (Goldammer, 1993). Außerhalb der Tropen ist die Kasachensteppe das einzige Gebiet mit gehäufte positiver signifikanter Korrelation. Dort herrschen ähnliche Bedingungen wie in der Savanne (siehe Abb.14) und somit auch analog eine Abhängigkeit von der vorangegangenen Bodenfeuchte.

In der borealen Zone sind nur vereinzelt signifikante Korrelationen der verbrannten Fläche mit der vorangegangenen Bodenfeuchte zu erkennen. Dort ist der Niederschlag kein limitierender Faktor für Pflanzenwachstum und somit für die Existenz von Brennmaterial. Vielmehr bedarf es einer vorangegangenen Trockenheit, um aus den vorhandenen Pflanzen geeignetes Brennmaterial zu machen (Wein et al., 1983). Die Trockenheit muss je nach Pflanzentyp unterschiedlich lang sein um das gleiche Maß an Trockenheit hervorzurufen: Büsche und Bäume, die vermehrt in der borealen Zone vorkommen, haben beispielsweise im Vergleich zu Gras eine langsamere Feuchtedynamik (Le Page et al., 2010). Hier muss also eine längere Trockenperiode gegeben sein, in der auch Gewitter mit Blitzen auftreten, damit Vegetationsbrände entstehen können. Die vereinzelt signifikanten Korrelationen mit der Bodenfeuchte 5 bzw. 6 Monate zuvor sind in der borealen Zone weitestgehend negativ. Dies kann entweder ein Anzeichen für langanhaltende Trockenheit sein, die die Brennbarkeit der Pflanzen weiter erhöht und somit eine größere verbrannte Fläche zur Folge hat. Oder dafür, dass vorangegangene hohe Bodenfeuchte sogar ein halbes Jahr später das Entstehen großflächiger Brände verhindert.

Um auszuschließen, dass die betragsmäßig großen berechneten signifikanten Korrelationskoeffizienten mit Zeitverschiebung daraus entstehen, dass sowohl die verbrannte Fläche als auch die vorangegangene Bodenfeuchte einen Zusammenhang mit der aktuellen Bodenfeuchte aufweisen, werden nun, wie erläutert, partielle Korrelationen berechnet (siehe Glg. 7 in Kapitel 3). Die erhaltenen Korrelationskoeffizienten geben nun an, wie stark die vergangene Bodenfeuchte und die aktuelle verbrannte Fläche unter Ausschluss des gemeinsamen Faktors der aktuellen Bodenfeuchte korrelieren. Auch für die partiellen Korrelationen wurde ein Hypothesentest mit der Nullhypothese, dass kein Zusammenhang zwischen vorangegangener Bodenfeuchte und aktueller verbrannter Fläche besteht, durchgeführt. Die Signifikanzschwelle

wurde wieder auf $p < 0,05$ gesetzt. Abbildung 15 zeigt die signifikanten partiellen Korrelationen für die Zeitverschiebungen von 5 und 6 Monaten. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefasst.

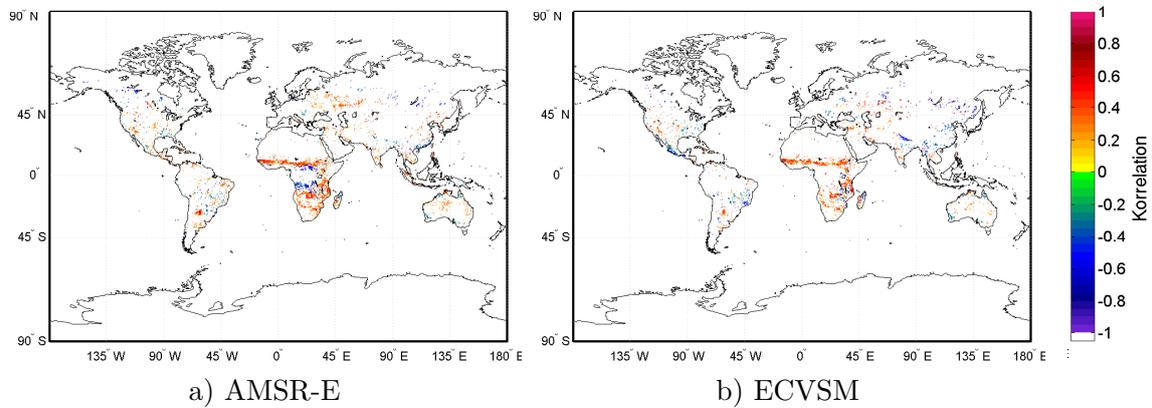


Abbildung 15.1: Signifikante partielle Korrelationen zwischen verbrannter Fläche und 5 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

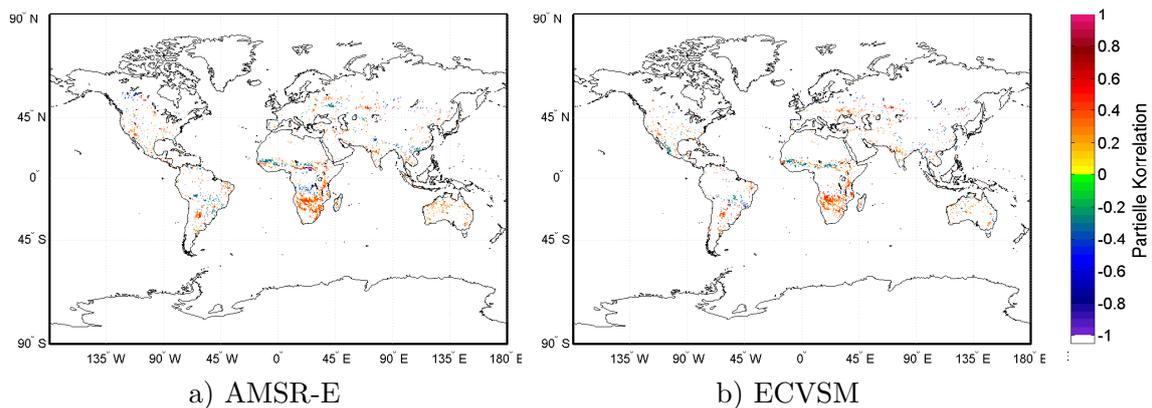


Abbildung 15.2: Signifikante partielle Korrelationen zwischen verbrannter Fläche und 6 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

Abbildung 15: Signifikante partielle Korrelationen zwischen verbrannter Fläche und 5 bzw. 6 Monate vorangegangener Bodenfeuchte. Als signifikant wurden Korrelationen mit einem p -Wert $< 0,05$ angenommen. (Weiß: Hier sind mögliche vorhandene Korrelationskoeffizienten nicht signifikant.)

Tabelle 3: Übersicht über die berechneten signifikanten partiellen Korrelationskoeffizienten der verbrannten Fläche mit 5 und 6 Monaten vorangegangener Bodenfeuchte

a) Zeitverschiebung von 5 Monaten

Gebiet		Korrelationskoeffizient		
Name	Besonderheit	AMSR-E	ECVSM	Größenordnung
Sahelzone	häufiges Vorkommen von Vegetationsbränden	++	++	0,3 bis 0,6
Kasachensteppe		++	++	
Nordargentinien		++	++	
Südafrika (10°-20°S)		++	++/-	0,4 bis 0,6 bzw. -0,3
äußerster Norden Australiens		++	+/-	0,2 bis 0,3 bzw. -0,2
Indien	Korrelationskoeffizienten vereinzelt auf dem Gebiet	+/-	+/-	-0,3 bzw. 0,3
Madagaskar		+/-	+/-	
USA		+/-	+/-	
Indochinesische Halbinsel		+/-	+/-	
Australien		+/-	+/-	
Südafrika		+/-	+/-	-0,4 bzw. 0,3
Mittelamerika		+	--	
Brasilianisches Bergland		+/-	--	
boreale Zone gesamt		+/-	+/-	
Randgebiete des Kongobeckens		--	--	
Südsibirien/ Grenze Mongolei	--	--	-0,4 bis -0,7	
Südostküste Asiens	--	-	-0,2 bis -0,4	
Sahara	kein Vorkommen von Vegetationsbränden	o	o	
Saudiarabische Halbinsel		o	o	
Hochland von Tibet		o	o	
Grönland		o	o	
Antarktis		o	o	
Amazonasgebiet	Regenwald: keine Bodenfeuchte Messungen vorhanden	o	o	
Kongobecken		o	o	

b) Zeitverschiebung von 6 Monaten

Gebiet		Korrelationskoeffizient		
Name	Besonderheit	AMSR-E	ECVSM	Größenordnung
Südafrika (10°-20°S)	häufiges Vorkommen von Vegetationsbränden	++	++	0,3 bis 0,5
Südafrika		++	++	
Kasachensteppe		++	++	
Nordargentinien		++	++	
äußerster Norden Australiens		+	+	0,3
Indien	Korrelationskoeffizienten vereinzelt auf dem Gebiet	+	+	-0,25 bzw. 0,4
Australien		+	+	
Madagaskar		++/-	++/-	
USA		+	+/-	
Sahelzone		+/-	+/-	
Indochinesische Halbinsel		+/-	+/-	
Mittelamerika		+/-	+/-	
Brasilianisches Bergland		+/-	-	
boreale Zone gesamt		++/-	++/-	
Randgebiete des Kongobeckens		--	-	-0,4 bis -0,6
Südostküste Asiens	-	-	-0,3 bis -0,4	
Sahara	kein Vorkommen von Vegetationsbränden	o	o	
Saudiarabische Halbinsel		o	o	
Hochland von Tibet		o	o	
Grönland		o	o	
Antarktis		o	o	
Amazonasgebiet	Regenwald: keine Bodenfeuchte Messungen vorhanden	o	o	
Kongobecken		o	o	

LEGENDE: - - - sehr stark negativ korreliert; - - stark negativ korreliert; - negativ korreliert; + + + sehr stark positiv korreliert; + + stark positiv korreliert; + positiv korreliert; o keine Korrelation. Betragsmäßig entspricht 1 Zeichen 0-0,3, 2 Zeichen 0,3-0,6 und 3 Zeichen 0,6-0,9.

Mit einer Zeitverschiebung von 5 Monaten ergeben sich mit beiden Bodenfeuchte-Datensätzen in den gleichen Gebieten positive Korrelationen (siehe Abb. 15.1 sowie Tab. 3a). Mit dem ECVSM-Datensatz sind diese jedoch vom Betrag her etwas niedriger. Für die Sahelzone, Südafrika, die Kasachensteppe sowie einen kleinen Fleck in Nordwestargentinien wurden Korrelationskoeffizienten von etwa 0,3 bis 0,6 berechnet. In besagtem Gebiet in Argentinien herrscht der Vegetationstyp Steppe vor, während die Umgebung von Wald und Acker-/Weideland geprägt ist (siehe Abb. 16). Im äußersten Nordwestzipfel Australiens sind Korrelationskoeffizienten mit dem AMSR-E-Datensatz von 0,4 gegeben, die allerdings bei der Korrelation mit dem ECVSM-Datensatz von negativen Korrelationskoeffizienten der Größenordnung -0,3 begleitet werden. In den Randgebieten des Kongobeckens, der Südostküste Asiens und Südsibirien wurden mit beiden Bodenfeuchte-Datensätze negative Korrelationskoeffizienten der Größenordnung -0,7 bis -0,3 berechnet. In den restlichen Gebieten ist für die signifikante Korrelationskoeffizienten keine Tendenz bezüglich eines Vorzeichens zu erkennen. Sie treten nur vereinzelt auf und nehmen sowohl positive als auch negative Werte von etwa 0,3 an. Hier ist also kein eindeutiger Zusammenhang festzustellen.

Auch bei den Korrelationen mit einer Zeitverschiebung von 6 Monaten ergeben sich für Südafrika, die Kasachensteppe und Nordargentinien hohe positive Korrelationskoeffizienten von etwa 0,3 bis 0,5 (siehe Abb. 15.2 und Tab. 3b). Während dies auch für Südafrika zutrifft, sind die positiven Korrelationskoeffizienten in der Sahelzone nun kleiner und es treten vermehrt negative Werte auf. Die Gebiete, an denen für eine Zeitverschiebung von 5 Monaten negative Korrelationskoeffizienten bestimmt wurden, weisen auch für die Zeitverschiebung von 6 Monaten negative Werte von -0,3 bis -0,6 auf. In den restlichen Gebieten sind die Beträge der Korrelationskoeffizienten wieder nur vereinzelt größer als 0,3. Positive Werte sind jedoch häufiger zu finden als bei einer Zeitverschiebung von 5 Monaten.

Unter Ausschluss der Abhängigkeit der vergangenen Bodenfeuchte und der verbrannten Fläche von der aktuellen Bodenfeuchte lassen sich für eingegrenzte Gebiete also durchaus Schlüsse ziehen: In Steppen- oder Savannengebieten wie Südafrika, Südafrika, der Sahelzone, der Kasachensteppe, Nordargentinien oder dem äußersten Norden Australiens hat die vorangegangene Bodenfeuchte Einfluss auf die Größe der verbrannten Fläche. Die Annahmen, dass bei diesem Vegetationstyp vorangegangener Niederschlag Pflanzenwachstum limitiert oder fördert und somit Einfluss auf die verbrannte Fläche hat, wird also als wahr angenommen. In baumbestandenen Regionen, wie den Randgebieten des Kongobeckens, der Südostküste Asiens oder Südsibirien, fällt vorangegangene hohe Bodenfeuchte mit kleiner verbrannter Fläche zusammen und umgekehrt. Die Pflanzenarten können Feuchtigkeit länger speichern bzw. müssen durch vorangegangene Trockenheit erst in brauchbares Brennmaterial verwandelt werden.

5 Fazit

Vegetationsbrände treten am häufigsten in den Tropen auf, sind jedoch auch in kleinerem Maße und unregelmäßigeren Zeitabständen in der borealen Zone zu finden. In den Tropen sind die Feuer alljährliche Ereignisse und treten gegen Ende der Trockenzeit auf. Ein Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche wird daher angenommen.

Zur Untersuchung des vermuteten Zusammenhangs wurden globale, satellitenbasierte Datensätze der verbrannten Fläche und Bodenfeuchte herangezogen. Für die Jahre 2003 bis 2009 wurden zeitliche Korrelationen zwischen der verbrannten Fläche und zwei verschiedenen Bodenfeuchte-Datensätzen berechnet. Anschließend wurde ein Zusammenhang zwischen verbrannter Fläche und vorangegangener Bodenfeuchte anhand von Korrelationsberechnungen mit Zeitverschiebung analysiert.

Für die Gebiete in den Tropen und Subtropen, in denen Feuer vorkommt, konnte ein Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und verbrannter Fläche belegt werden: Der zeitliche Verlauf von Bodenfeuchte und verbrannte Fläche korreliert für viele Gebiete negativ. Geringe Bodenfeuchte und große verbrannte Fläche fallen also tatsächlich zusammen. Die Herangehensweise, bei der Modellierung verbrannter Fläche in globalen Feuermodeellen die herrschende Bodenfeuchte als einen wesentlichen Faktor mit einzubeziehen, scheint für diese Gebiete gerechtfertigt. In der borealen Zone konnten keine signifikanten zeitlichen Korrelationen festgestellt werden. Zwar treten Feuer grundsätzlich während der trockeneren Jahreszeiten auf, Trockenheit führt jedoch nicht zwangsläufig zu einem Vegetationsbrand. Gründe hierfür könnten das verstärkte Eingreifen des Menschen in Form von Vorsichtsmaßnahmen oder Löscheinsätzen sein sowie das seltenere Auftreten von Blitzen, die als Zündquelle fungieren können. Zudem muss berücksichtigt werden, dass Bäume und Büsche eine langsamere Feuchtedynamik als beispielsweise Gräser haben. Die verbrannte Fläche kann in der borealen Zone daher nicht alleine über die Bodenfeuchte berechnet werden.

In Savannen- und Steppengebieten hat auch die Bodenfeuchte vergangener Monate, besonders 5 und 6 Monate zuvor, Einfluss auf die spätere verbrannte Fläche. Dort ergeben sich positive Korrelationskoeffizienten. Vorangegangener Niederschlag ist hier notwendig, damit Pflanzen und somit späteres Brennmaterial überhaupt erst wachsen können. In baumbestanden Gebieten wurden negative Korrelationskoeffizienten berechnet. Hier verhindert eine vorangegangene hohe Feuchte große Flächebrände, da die Pflanzen hier das Wasser besonders gut zu speichern scheinen. Vorangegangene Trockenheit trocknet die Pflanzen aus und stellt somit Brennmaterial für mögliche Feuer her. Dies ist ein Aspekt, der in zukünftigen Modellansätzen noch berücksichtigt werden könnte.

Durch die Berücksichtigung zweier verschiedener Bodenfeuchte-Datensätze sind die Ergebnisse dieser Arbeit insgesamt als robust anzunehmen.

6 Literaturverzeichnis

- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R. S., Doyle, J. C., Harrison, S. P., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A., Kull, C. A., Marson, J. B., Moritz, M. A., Prentice, I. C., Roos, C. I., Scott, A. C., Swetnam, T. W., van der Werf, G. R., Pyne, S. J. (2009): Fire in the Earth System, *Science* 324,481, DOI: 10.1126/science.1163886.
- de Jeu, R. A. M., Wagner, W., Holmes, T. R. H., Dolman, A. J., van de Giesen, N. C., Friesen, J. (2008): Global Soil Moisture Patterns Observed by Space Borne Microwave Radiometers and Scatterometers, *Surv Geophys*, 29:399-420, DOI: 10.1007/s10712-008-9044-0.
- Giglio, L. Randerson, J. T., van der Werf, G. R., Kasibhatla, P. S., Collatz, G. J., Morton, D. C., DeFries, R. S. (2010): Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products, *Biogeosciences*, 7, 1171-1186.
- Goldammer, Johann Georg (1993): Feuer in Waldökosystemen der Tropen und Subtropen. Basel; Boston;Berlin: Birkhäuser.
- Harrison S. P., Marlon, J. R., Bartlein, P. J. (2010): Fire in the Earth System, In *Changing Climates, Earth Systems and Society International Year of Planet Earth*, pp 21-48. Springer Publisher
- Keywood, M., Kanakidou, M., Stohl, A., Dentener, F. Grassi, G. Meyer, C. P., Torseth, K., Edwards, D. Thompson, A. M., Lohmann, U., Burrows, J. (2013): Fire in the Air: Biomass Burning Impacts in a Changing Climate, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43:1, 40-83.
- Kloster, S., Mahowald, N. M., Randerson, J. T., Thornton, P. E., Hoffman, F. M., Levis, S., Lawrence, P. J., Feddema, J. J., Oleson, K. W., Lawrence, D. M. (2010): Fire dynamics during the 20th century simulated by the Community Land Model, *Biogeosciences*, 7, 1877-1902.
- Le Page, Y., Oom, D., Silva, J. M. N., Jönsson, P., Pereira, J. M. C. (2010): Seasonality of vegetation fires as modified by human action: observing the deviation from eco-climatic fire regimes, *Global Ecology and Biogeography*, Blackwell Publishing Ltd, DOI:10.1111/j.1466-8238.2010.00525.x.
- Loew, A., Stacke, T., Dorigo, W., de Jeu, R., Hagemann, S. (2013): Potential and limitations of multidecadal satellite moisture observations for climate model evaluation studies, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10, 3541-3594.
- Owe, M., de Jeu, R., Holmes, T. (2008): Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture, *Journal of Geophysical Research*, 113, F01002, doi:10.1029/2007JF000769.

- Randerson, J. T., Liu, H., Flanner, M. G., Chambers, S. D., Jin, Y., Hess, P. G., Pfister, G., Mack, M. C., Treseder, K. K., Welp, L. R., Chapin, F. S., Harden, J. W., Goulden, M. L., Lyons, E., Neff, J. C., Schuur, E. A. G., Zender, C. S. (2006): The Impact of Boreal Forest Fire on Climate Warming, *Science*, 314, pp. 1130-1132, DOI: 10.1126/science.1132075.
- van Wilgen, B. W., Everson, C. S., Trollope, W. S. W.(1990): Fire Management in Southern Africa: Some Examples of Current Objectives, Practices, and Problems, *Fire in the Tropical Biota - Ecosystem Processes and Global Challenges*, 11, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Wein, R. W., MacLean, D. A. (1983): The Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosystems, *SCOPE 18*, Published by John Wiley & Sons Ltd.
- MODIS Landoberflächentyp:
These data are distributed by the Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), located at the U.S. Geological Survey (USGS) Earth Resources Observation and Science (EROS) Center (lpdaac.usgs.gov), distributed in netCDF format by the Integrated Climate Data Center (ICDC, <http://icdc.zmaw.de>) University of Hamburg, Hamburg, Germany.

7 Anhang

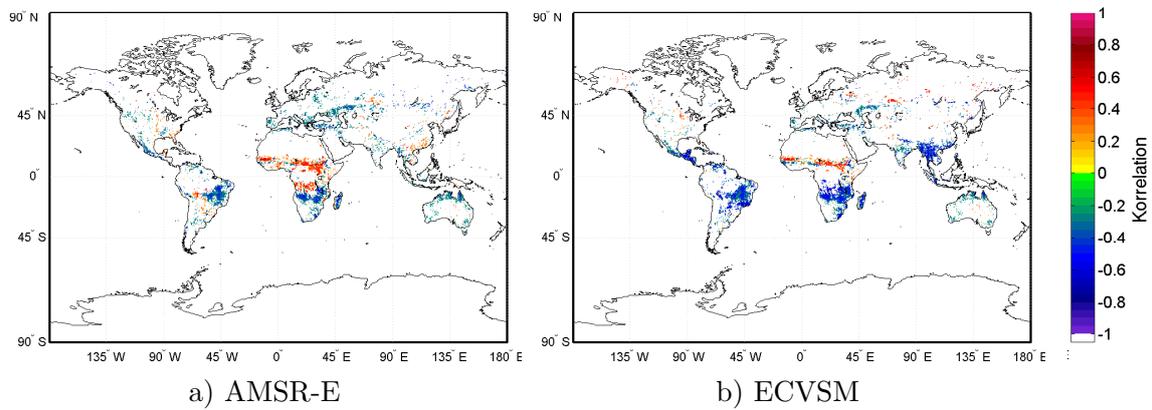


Abbildung 16: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 1 Monat vorangegangener Bodenfeuchte.

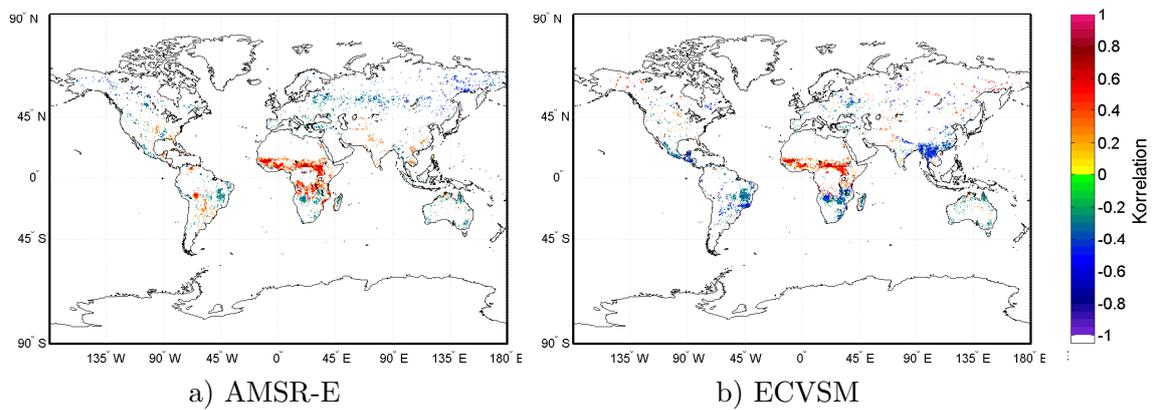


Abbildung 17: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 2 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

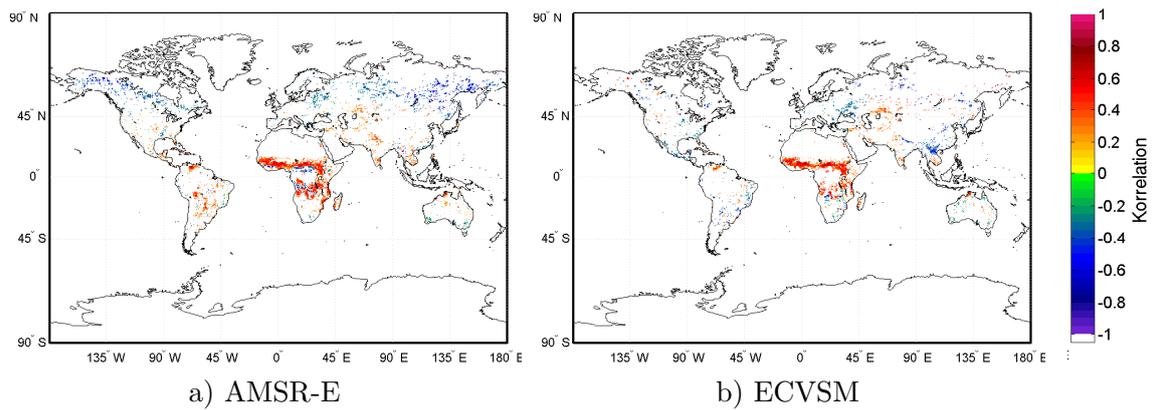


Abbildung 18: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 3 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

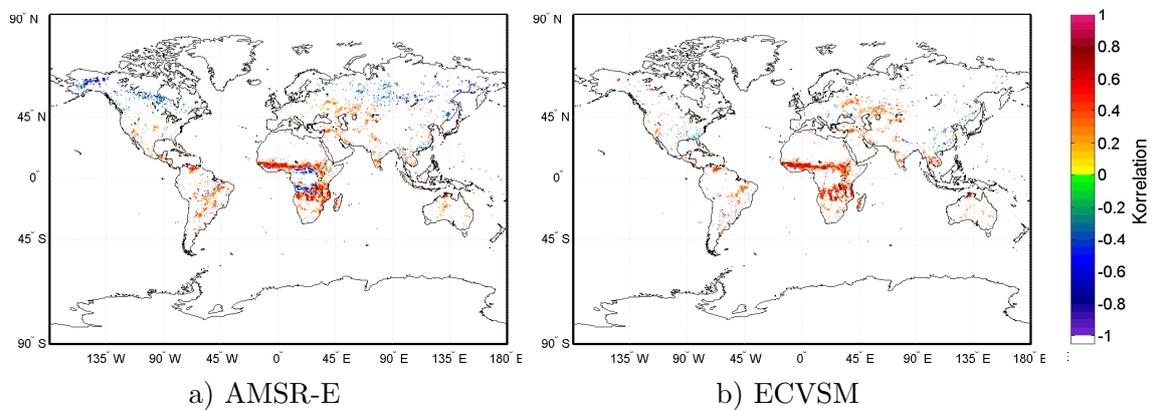


Abbildung 19: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 4 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

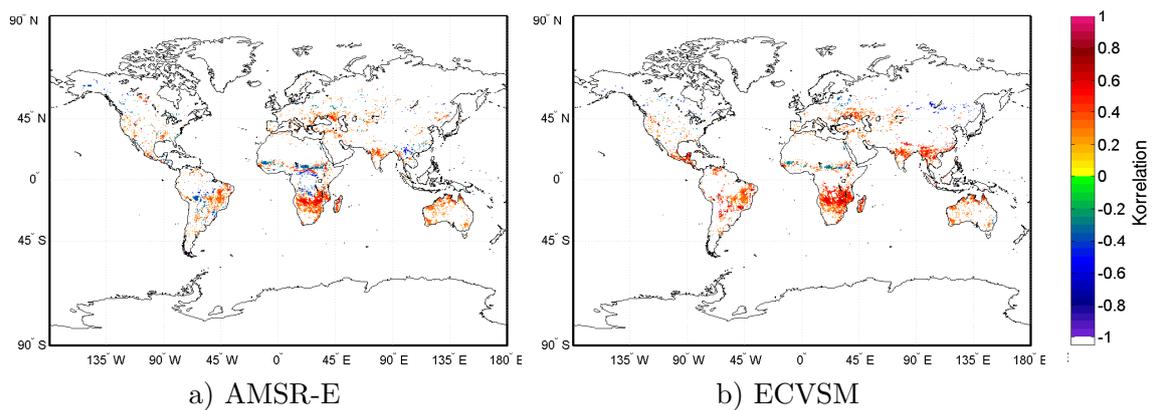


Abbildung 20: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 7 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

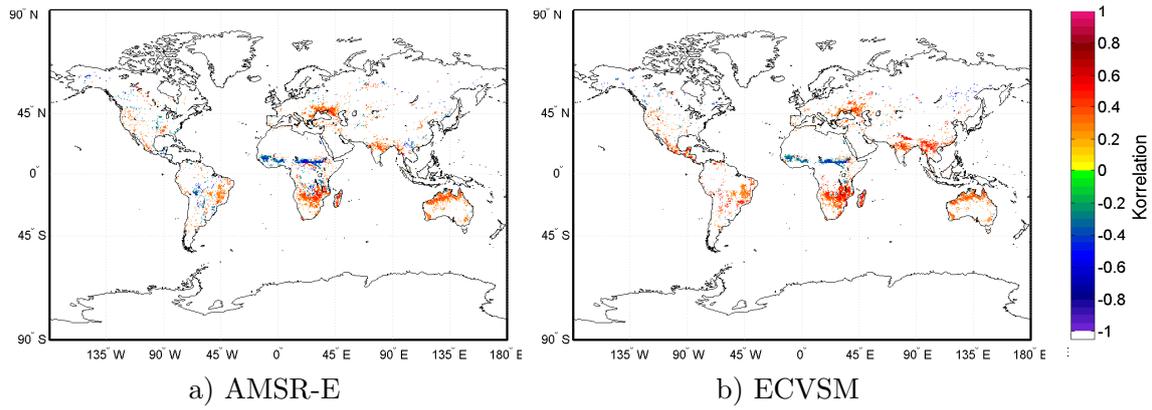


Abbildung 21: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 8 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

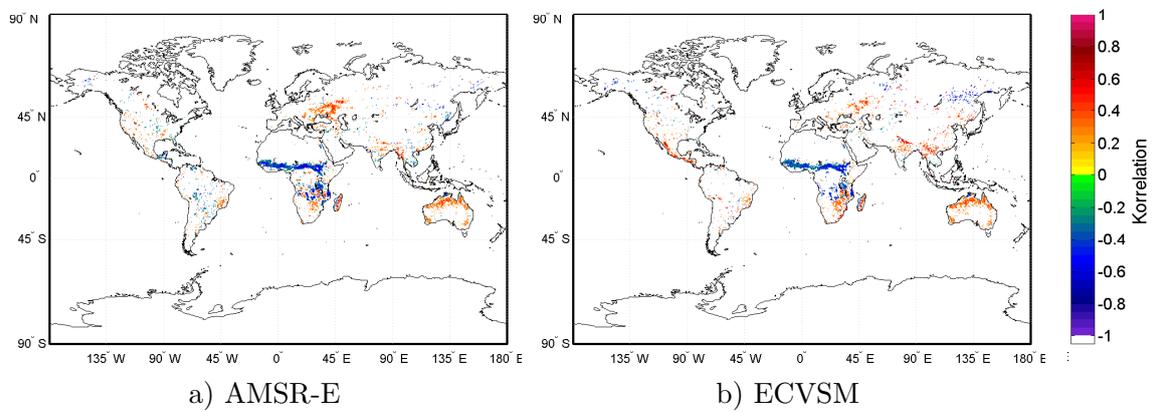


Abbildung 22: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 9 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

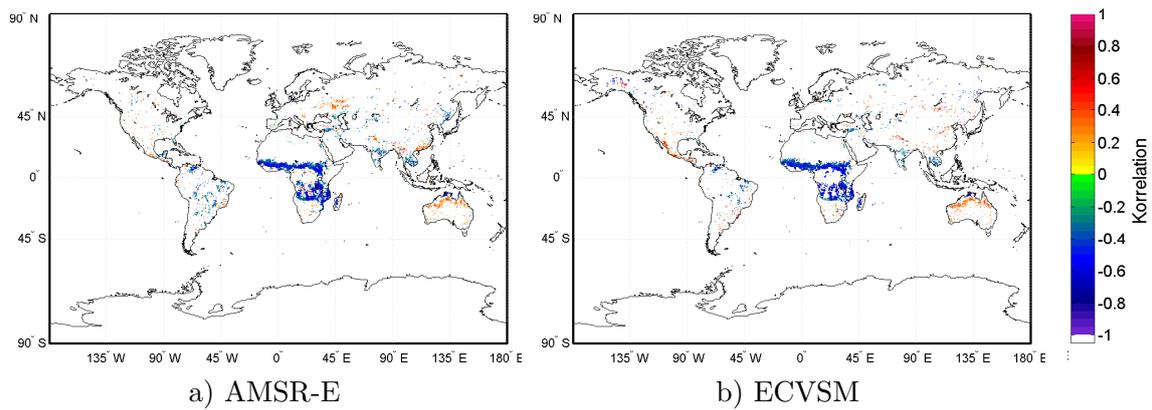


Abbildung 23: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 10 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

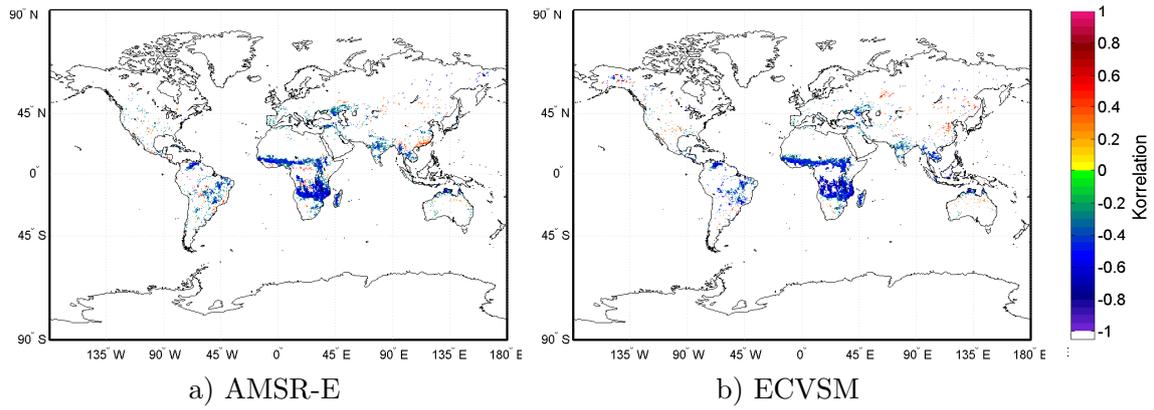


Abbildung 24: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 11 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

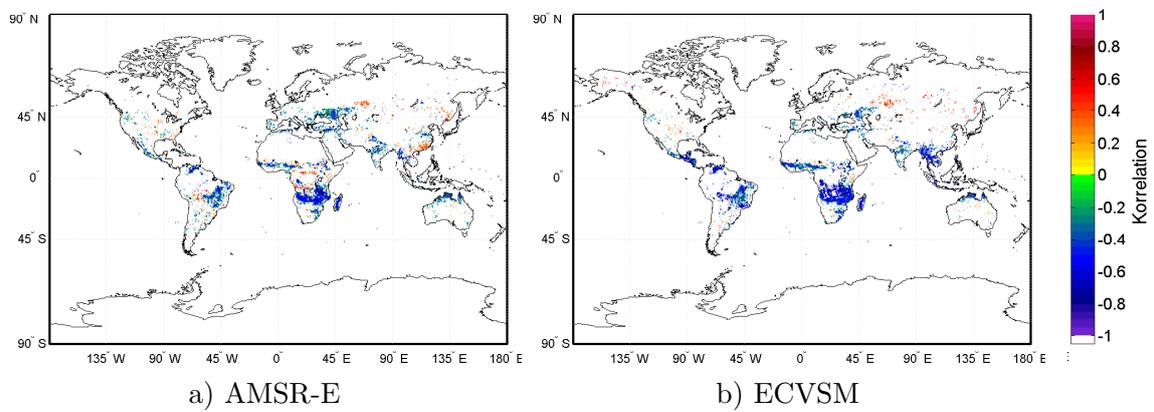


Abbildung 25: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen verbrannter Fläche und 12 Monate vorangegangener Bodenfeuchte.

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel - insbesondere keine im Quellenverzeichnis nicht genannten Internet-Quellen - benutzt habe, die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe und die eingereichte schriftliche Fassung der auf dem elektronischen Speichermedium entspricht.

Hamburg, den 30. September 2013