Ulrich Cubasch, Bijan Fallah*

Extrem-Dürreperioden in Asien während der letzten 1.000 Jahre in Proxy-Daten und Modell-Simulationen

1. Einleitung

Extrem-Dürreperioden (engl.: mega droughts) sind Naturereignisse, die Jahre bis Jahrzehnte andauern und in unregelmäßigen Abständen auftreten können (Cook et al. 2010). Einige von ihnen können als Schlüsselereignis für gesellschaftliche Umwälzungsprozesse in Asien angesehen werden, so zum Beispiel trugen welche maßgeblich zum Zusammenbruch der Yuan-Dynastie (Zhang et al. 2008), der Ming-Dynastie (Shen et al. 2007) und des Khmer-Reiches in Kambodscha (Buckley et al. 2010) bei. Als auslösende Faktoren für eine Extrem-Dürre werden Anomalien der Meeresoberflächen-Temperaturen im Indischen und Pazifischen Ozean angesehen (Ropelewski/Halpert 1987; Meehl/Hu 2006; Wahl/Morrill 2010).

Die Dürre-Episoden in Asien stehen immer in Verbindung zu der Monsun-Zirkulation. So führt eine Abnahme oder eine Verlagerung des Monsuns zu Dürreperioden (Shaw/Nguyen 2011).

Für die Analyse von historischen Dürren liegen kaum Messdaten vor, und die zur Verfügung stehenden Proxy-Daten decken nur unzureichend das asiatische Monsun-Gebiet ab. Cook et al. erstellten 2010 den Monsoon Asia Drought Atlas (MADA), in dem, basierend auf Proxy-Daten, eine raumzeitliche Rekonstruktion des Palmer-Trockenheitsindexes (Palmer Drought Severity Index PDSI; Palmer 1965) für das letzte Jahrtausend beschrieben wird. Dieser Index berechnet die Stärke einer Dürreperiode aus dem Niederschlag und der Temperatur (Wells et al. 2004). Er gibt die Abweichung der hydrologischen Bedingungen von einem Gleichgewichtszustand an und stützt sich auf ein einfaches Wasserbilanz-Modell. Mit global gekoppelten Ozean-Atmosphären-Klimamodellen ist es ebenfalls möglich, das Klima der letzten 1.000 Jahre zu rekonstruieren (einen Überblick gibt der letzte IPCC-

_

^{*} Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie

Bericht (Stocker et al. 2013) und aus den so generierten Daten Dürre-Episoden zu berechnen. In der vorliegenden Arbeit werden zwei von diesen sogenannten Millennium-Experimenten in Hinblick auf ihre Fähigkeit, extreme Dürreereignisse zu simulieren, analysiert. Einer Beschreibung der Modelle, der numerischen Experimente und der Analysemethode in Abschnitt 2 folgen eine Darstellung der Ergebnisse der Simulationen (Abschnitt 3), eine Analyse der möglichen Antriebsmechanismen (Abschnitt 4) und eine Zusammenfassung (Abschnitt 5).

2. Modelle, Daten und Methoden

Es werden zwei Millennium-Simulationen gekoppelter Klimamodelle ausgewertet. Zum einen ein Ensemble mit fünf Mitgliedern des ECHAM5/MPIOM Modells des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (Jungclaus et al. 2010) sowie zwei von acht Ensemble-Mitgliedern des GISS-E2-R Modells des NASA Goddard Institute for Space Studies in New York (Schmidt et al. 2014). Diese Modelle wurden mit rekonstruierten Daten für die Treibhausgaskonzentration, solarer Variabilität und Vulkanismus angetrieben (Schmidt et al. 2012). Sie wurden nach den Maßgaben von CMIP5 (Taylor et al. 2012) durchgeführt und wurden im IPCC-Bericht dokumentiert (IPCC, 2013). Die GISS-Experimente weisen Inkonsistenzen aus, so dass nur zwei der acht Ensemble-Mitglieder verwendet werden konnten (Fallah/Cubasch 2015).

Der PDSI wird aus den simulierten Sommer (JJA)-Niederschlagsdaten berechnet. Nach den Erkenntnissen von Cook et al. (2010) repräsentiert das Muster der ersten empirischen Orthogonalfunktion (EOF1) des PDSI einen anhaltend schwachen Sommermonsun. Infolge dessen erhalten wir aus dem zeitlichen Ablauf der EOF1 eine Information über schwache und starke Monsunjahre.

Die Modelldaten werden mit dem MADA verglichen. Dieser Datensatz wurde aus 327 Baumring-Chronologien rekonstruiert (Cook et al. 2010). Der zeitliche Verlauf der EOF1 der MADA zeigt uns analog zu der Modellrekonstruktion starke und schwache Modelljahre an.

Eine Analyse der maximalen Kovarianz (maximum covariance analysis) wird eingesetzt, um die Beziehung zwischen verschiedenen Klimadaten zu identifizieren (Bretherton et al. 1992). Dai (2013) setzt diese Methode ein, um einen Zusammenhang zwischen globalen Meeresoberflächentemperatur-Anomalien und dem PDSI zu isolieren. Der Hauptmode der Meeresoberflächentemperatur-Anomalie für die Sommermonate (JJA) zeigt ein ENSO-ähnliches Muster.

Die Analyse wird auf den Zeitraum 1300 bis 1860 beschränkt, um anthropogene Einflüsse auszuschließen. Mehr Details über die Analysemethode und Daten finden sich in Fallah und Cubasch (2015).

3. Simulationen der Asiatischen Dürren

Abbildung 1 zeigt das Muster für die Asiatische Dürre für die beiden Modellexperimente und MADA (Cook et al. 2010; Dai 2011; Li et al. 2013). Alle drei Bilder zeigen ein ähnliches Muster: bei aktivem Monsun ist der Indische Subkontinent feucht, Zentralasien dagegen trocken. Bei schwachem Monsun ist Zentralasien feucht, der Indische Subkontinent jedoch trocken.

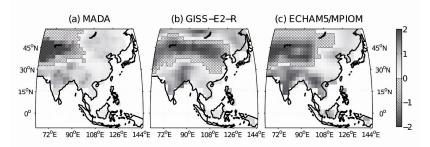


Abb. 1: Die Hauptmuster für einen Ausfall des Monsuns. Die erste EOF des Palmer-Dürre-Indexes für die Baumringrekonstruktion MADA (a), für das Modellexperiment GISS-E2-R (b) und für das Modellexperiment ECHAM5/MPIOM (c). Negative Werte werden durch Kreuzchen angezeigt. (nach Fallah/Cubasch 2015)

Die Muster aller drei PDSI-Rekonstruktionen sind signifikant miteinander korreliert. Die zeitliche Entwicklung der ersten Hauptkomponente (EOF1) des PDSIs wird in Abbildung 2 gezeigt. Zur Verdeutlichung sind diejenigen Zeitabschnitte, in denen die Modellzeitserien und die Baumring-Rekonstruktion dasselbe Vorzeichen aufweist, besonders gekennzeichnet. Während der kleinen Eiszeit (LIA ca. 1500 bis 1750) gab es mehr aktive Phasen des Monsuns sowohl in beiden Modellsimulationen als auch in der Rekonstruktion. Fünf der extremen Dürreperioden, die in der MADA auftreten (siehe Cook et al. 2010; Buckley et al. 2010), werden für eine nähere Analyse ausgewählt:

 Die Dürre in der Mitte des 14. Jahrhunderts, die mit dem Zusammenfall des Khmer-Reiches in Kambodscha in Verbindung gebracht wird (1351–1368);

- 2. die extreme Dürre Ende des 16. Jahrhunderts (1560–1587);
- 3. die Dürre Ende des 17. Jahrhunderts (1682–1699);
- 4. die "Strange Parallels"-Dürre (1756-1768) und
- 5. die Ostindische Dürre (1790–1796).

Beide Modelle simulieren mindestens vier von den fünf Haupt-Dürreperioden. Die GISS-Simulationen "übersehen" die zweite Dürre, die MPI-Simulation die vierte. Eine nähere Analyse macht deutlich, dass die Modelle diese Dürren durchaus regional simulieren. Die Analysemethode fehlinterpretiert jedoch durch die Reduktion auf großflächige Muster das kleinskalige Auftreten von Dürren in einigen Regionen als Ausfall (für mehr Details siehe Fallah/Cubasch 2015).

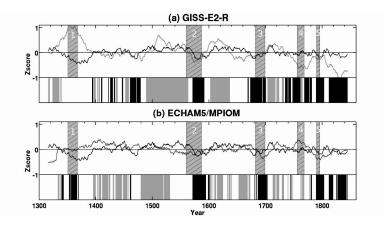


Abb. 2: Die zeitliche Entwicklung des Monsunhauptmusters für den MADA (durchgezogene Linie), GISS-E2-R (graue Linie) und ECHAM5/MPIOM (gepunktete Linie), geglättet mit einem 31-jährigen gleitenden Mittel. Die Zeiten, in denen die Modelle und MADA gleichzeitig eine Trockenheit rekonstruieren, werden durch schwarze Balken angegeben, die gleichzeitig rekonstruierten feuchten Episoden durch graue Balken. Die fünf im Text angegebenen Extremdürren werden durch die schraffierten Balken angezeigt (nach Fallah/Cubasch 2015).

4. Antriebsmechanismen der Dürreperioden

Um den Zusammenhang zwischen Pazifischer Meeresoberflächentemperatur und den Dürren zu analysieren, wurde eine MCA (maximum covariance analysis) zwischen dem PDSI der Simulationen und der Pazifischen Meeresoberflächentemperatur durchgeführt. Es werden nur die beiden ersten Hauptkomponenten betrachtet. Fallah und Cubasch (2015) beweisen, dass sie den Hauptanteil des Signales in sich vereinigen. Die Abbildungen a-c zeigen, dass ein El-Niño ähnliches Muster der Meeresoberflächen-Temperaturanomalie im zentralen tropischen Pazifik und Indischen Ozean mit einer Dürre über Asien einhergeht. Dieses Phänomen wurde von Krishan et al. (2009) ausführlich beschrieben. Vulkanismus kann als weiterer Einflussfaktor angesehen werden, da er die Pazifische Meeresoberflächentemperatur und damit indirekt auch die Ausbildung von Dürreereignissen beeinflusst.

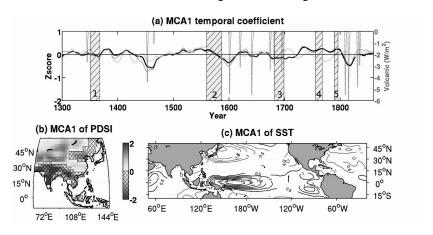


Abb. 3: Für das GISS-E2-R Modell: a) die zeitliche Entwicklung der MCA (maximum covariance analysis) für die Meeresoberflächentemperatur-Anomalie (gestrichelte schwarze Linie) und für den PDSI (durchgezogene graue Linie). Der Vulkanismus (Strahlungsdämpfung in W/m²) wird durch die unterbrochene Linie angezeigt, El-Niño-Ereignisse durch gepunktete Linie. b) das MCA-Muster für den PDSI und c) das MCA-Muster für die Meeresoberflächentemperatur-Anomalie (nach Fallah/Cubasch 2015)

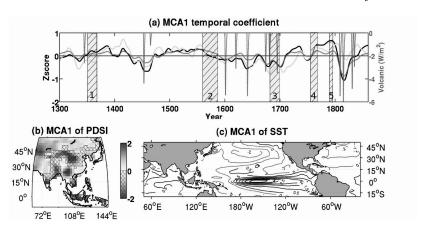


Abb. 4: Für das ECHAM5/MPIOM-Modell: a) die zeitliche Entwicklung der MCA (maximum covariance analysis) für die Meeresober-flächentemperatur-Anomalie (gestrichelte schwarze Linie) und für den PDSI (durchgezogene graue Linie). Der Vulkanismus (Strahlungsdämpfung in W/m²) wird durch die unterbrochene Linie angezeigt, El-Niño-Ereignisse durch gepunktete Linie. b) das MCA-Muster für den PDSI und c) das MCA-Muster für die Meeresober-flächentemperatur-Anomalie (nach Fallah/Cubasch 2015)

5. Diskussion und Zusammenfassung

Extreme Dürreperioden in Asien während des letzten Millenniums werden mit Hilfe von Ensemble-Simulation zweier Klimamodelle und mittels Proxy-Daten basierend auf Baumringen rekonstruiert. Es treten sechs herausragende mehrjährige Dürrephasen auf, die in historischen Überlieferungen beschrieben wurden und die mit einschneidenden sozialen Veränderungen in Verbindung gebracht werden können.

Um diese Dürren zu identifizieren, wurde eine Hauptkomponenten-Analyse des Palmer-Trockenheitsindexes (PDSI) durchgeführt. Die Modelle sind in den meisten Fällen in der Lage, die in der Baumring-Rekonstruktion auftretenden Dürre-Episoden zu simulieren. Dies ermöglicht es, mittels der Klimamodelle alle relevanten physikalischen Felder im Ozean und in der Atmosphäre berechnen, um daraus die Mechanismen für die Dürren näher zu erforschen. Die Analyse zeigt, dass die Dürren mit El-Niño ähnlichen Verhältnissen im zentralen äquatorialen Pazifik korreliert sind. Auch Vulkanismus spielt eine Rolle.

Literatur

- Buckley, B. M.; Palakit, K.; Duangsathaporn, K.; Sanguantham, P.; Prasomsin, P.: Decadal scale droughts over northwestern Thailand over the past 448 years: links to the tropical Pacific and Indian Ocean sectors, Clim. Dyn., 29 (1), 63–71, doi:10.1007/s00382-007-0225-1, 2007
- Cook, E. R.; Anchukaitis, K. J.; Buckley, B. M.; D'Arrigo, R. D.; Jacoby, G. C.; Wright, W. E.: Asian Monsoon Failure and Megadrought During the Last Millennium, Science, 328 (5977), 486–489, doi: rm10.1126/science.1185188, 2010
- Dai, A.: Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008, J. of Geophys. Res.-Atmos., 116, doi:10.1029/2010JD015541, 2011
- Dai, A.: Increasing drought under global warming in observations and models, Nature, Clim. Change, 3 (1), 52–58, doi:10.1038/NCLIMATE1633, 2013
- Fallah, B.; Cubasch, U.: A comparison of model simulations of Asian megadroughts during the past millennium with proxy reconstructions, Climate of the Past, 11, 253–263, doi: 10.5194/cp-11-253-2015, 2015
- Jungclaus, J. H.; Lorenz, S. J.; Timmreck, C.; Reick, C. H.; Brovkin, V.; Six, K.; Segschneider, J.; Giorgetta, M. A.; Crowley, T. J.; Pongratz, J.; Krivova, N. A.; Vieira, L. E.; Solanki, S. K.; Klocke, D.; Botzet, M.; Esch, M.; Gayler, V.; Haak, H.; Raddatz, T. J.; Roeckner, E.; Schnur, R.; Widmann, H.; Claussen, M.; Stevens, B.; Marotzke, J.: Climate and carboncycle variability over the last millennium, Clim. of the Past 6(5), 723–737, doi: 10.5194/cp-6-723-2010, 2010
- Krishnan, R.; Kumar, V.; Sugi, M.; Yoshimura, J.: Internal Feedbacks from Monsoon–Midlatitude Interactions during Droughts in the Indian Summer Monsoon, J. Atmos. Sci., 66, 553–578, 2009
- Li, J.; Xie, S.-P.; Cook, E. R.; Morales, M. S.; Christie, D. A.; Johnson, N. C.; Chen, F.; D'Arrigo, R.; Fowler, A. M.; Gou, X.; Fang, K.: El Niño modulations over the past seven centuries, Nature, Clim. Change, 3 (9), 822–826, doi:10.1038/NCLIMATE1936, 2013
- Meehl, G. A.; Hu, A.: Megadroughts in the Indian monsoon region and southwest North America and a mechanism for associated multidecadal Pacific sea surface temperature anomalies, J. of Clim., 19, 1605–1623, 2006
- Palmer, W.: Meteorological drought, Research paper, US Department of Commerce Weather Bureau, (45), 1965
- Ropelewski, C. F.; Halpert, M. S.: Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation, Amer. Meteor. Soc., 115 (8), 1606–1626, doi: 10.1175/1520-0493(1987)115<606:GARSPP>2.0.CO;2, 1987
- Schmidt, G. A.; Jungclaus, J. H.; Ammann, C. M.; Bard, E.; Braconnot, P.; Crowley, T. J.; Delaygue, G.; Joos, F.; Krivova, N. A.; Muscheler, R.; Otto-Bliesner, B. L.; Pongratz, J.; Shindell, D. T.; Solanki, S. K.; Steinhilber, F.; Vieira, L. E. A.: Climate forcing reconstructions for use in PMIP simulations of the Last Millennium (v1.1), Geosci. Mod. Dev., 5 (1), 185–191, doi:10.5194/gmd-5-185-2012, 2012
- Schmidt, G. A.; Kelley, M.; Nazarenko, L.; Ruedy, R.; Russell, G. L.; Aleinov, I.; Bauer, M.; Bauer, S. E.; Bhat, M. K.; Bleck, R.; Canuto, V.; Chen, Y.-H.; Cheng, Y.; Clune, T. L.; Del Genio, A.; de Fainchtein, R.; Faluvegi, G.; Hansen, J. E.; Healy, R. J.; Kiang, N.Y.; Koch, D.; Lacis, A. A.; LeGrande, A. N.; Lerner, J.; Lo, K. K.; Matthews, E. E.; Menon,

- S.; Miller, R. L.; Oinas, V.; Oloso, A. O.; Perlwitz, J. P.; Puma, M. J.; Putman, W. M.; Rind, D.; Romanou, A.; Sato, M.; Shindell, D. T.; Sun, S.; Syed, R. A.; Tausnev, N.; Tsigaridis, K.; Unger, N.; Voulgarakis, A.; Yao, M.-S.; Zhang, J.: Configuration and assessment of the GISS ModelE2 contributions to the CMIP5 archive. J. Adv. Model. Earth Syst., 6, 141–184, doi:10.1002/2013MS000265, 2014
- Shaw, R.; Nguyen, H.: Droughts in Asian Monsoon Region (Community, Environment and Disaster Risk Management, Volume 8). Emerald Group Publishing Limited, UK, 2011
- Shen, C. W.-C.; Wang, Z. Hao; Gong, W.: Exceptional drought events over eastern China during the last five centuries, Climate Change, 85 (3-4), 453-471, doi:10.1007/s10584-007-9283-y, 2007
- Stocker, T.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P. (2013): IPCC 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Technical report, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013
- Wahl, E. R.; Morrill, C.: CLIMATE CHANGE Toward Understanding and Predicting Monsoon Patterns, Science, 328 (5977), 437–438, doi:10.1126/science.1188926, 2010
- Wells, N.; Goddard, S.; Hayes, M.: A self-calibrating Palmer Drought Severity Index, J. of Clim., 17 (12), 2335–2351, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2, 2004
- Zhang, P.; Cheng, H.; Edwards, R. L.; Chen, F.; Wang, Y.; Yang, X.; Liu, J.; Tan, M.; Wang, X.; Liu, J.; An, C.; Dai, Z.; Zhou, J.; Zhang, D.; Jia, J.; Jin, L.; Johnson, K. R.: A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1810-Year Chinese Cave Record, Science, 322 (5903), 940–942, doi:science.1163965, 2008

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes CADY (Central Asian Climate Dynamics), das vom Ministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde, ermittelt.