

4.2 Einfluß von Atmosphäre-Ozean Wechselwirkungen auf Starkniederschläge über Europa

HA THI MINH HO-HAGEMANN & BURKHARDT ROCKEL

Einfluß von Atmosphäre-Ozean Wechselwirkungen auf Starkniederschläge über Europa: Trotz der wichtigen Rolle, die die Ozeane für Wetter und Klima spielen, wurden erst kürzlich gekoppelte regionale Atmosphäre-Ozean-Modelle entwickelt und nur in einigen wenigen Gebieten der Welt angewendet. Hier geben wir einen Überblick über die gekoppelte Atmosphäre-Ozean Modellierung für Europa im Allgemeinen und den Einfluss auf extreme Niederschläge im Besonderen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf zwei Regionen, der Nord- und Ostseeregion sowie der Mittelmeerregion. Die Verdunstung aus diesen Randmeeren ist neben der aus dem Nordatlantik die Hauptquelle für die Bildung starker Regenfälle in Europa.

Influence of Atmospheric Ocean interactions on heavy rainfall over Europe: In spite of the important role of oceans in shaping our climate and weather patterns, coupled regional atmosphere-ocean models have just recently been developed and only over a few areas in the world. Here we present an overview of air-sea coupled modelling for the European area in general and the effect of this coupling on extreme precipitation in particular. We will focus on the North and Baltic Sea region as well as the Mediterranean Sea region. Evaporation from these marginal seas, in addition to the North Atlantic, is the major moisture source for heavy rainfall over Europe.

Hintergrund: In den letzten Jahrzehnten gab es in Europa schwere Überschwemmungen, wie die im Rhein-Maas-Gebiet in den Jahren 1993 und 1995, das Oder-Hochwasser 1997 und die Po-Hochwasser in den Jahren 1994 und 2000 (THIELEN et al. 2009). Historische Hochwasser betrafen die Elbe und die Donau im Jahr 2002. Im Jahr 2005 kam es in mehreren Nebenflüssen des Einzugsgebiets der Donau, insbesondere in der Schweiz, in Österreich und in den südlichen Donauländern (Rumänien und Bulgarien), zu flächendeckenden und wiederholten Überschwemmungen. Im Frühjahr 2006 wurden Rekordhochwasser in Elbe und Donaubecken (ICPDR 2006) gemessen. Nach Schätzungen der Europäischen Umweltagentur forderten Überschwemmungen in Europa allein zwischen 1998 und 2002 etwa 700 Todesopfer, vertrieben vorübergehend etwa eine halbe Million Menschen und führten zu wirtschaftlichen Schäden in Höhe von mindestens 25 Milliarden Euro (EEA 2003). Auch in der jüngsten Vergangenheit gab es in den Sommern 2010, 2013, 2014 und 2016 Hochwasserereignisse in Mitteleuropa, die durch mehrere Tage starken Regens verursacht wurden.

Dieses Kapitel konzentriert sich auf den Einfluss der Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkung auf Starkregenereignisse in Europa simuliert mit gekoppelten regionalen Klimamodellen (AORCM), die für den Nord- und den Ostseeraum (einschließlich eines Teils des Nordatlantiks) sowie für das Mittelmeer entwickelt worden sind.

Atmosphäre-Ozean Wechselwirkung

Die Atmosphäre ändert die Meeresoberflächentemperatur (SST) und die Temperaturschichtung des oberen Ozeans durch Änderung der Wärmeflüsse an der Meeresoberfläche. Der Ozean wiederum beeinflusst über die Verdunstung die Konvektion über dem Land (GAO

& LI 2008). Ein Beispiel für die Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkung ist die »Wind-Evaporation-SST« - Rückkopplung (XIE & PHILANDER 1994). Wenn die Windgeschwindigkeit in einem Gebiet zunimmt, steigt die Verdunstung und der latente Wärmestrom wird erhöht, was zu einer Abkühlung des Ozeans in diesem Gebiet führt. Die kältere Ozeanoberfläche erzeugt einen horizontalen Temperaturgradienten, der wiederum die Windgeschwindigkeit erhöht (Abb. 4.2-1).

Ursache für die meisten Regenfälle in Europa ist das rasche Heranführen warmer und feuchter Luft von den Meeren in sogenannten atmosphärischen Flüssen. LAVERS & VILLARINI (2013) zeigten, dass etwa 80% der Regenfälle in Europa mit diesen Flüssen zusammenhängen. Die vier atmosphärischen Flüsse in Abb. 4.2-2 brachten im Mai 1994, Oktober 1980, März 2002 und Dezember 1989 jeweils starke Regenfälle in verschiedene Gebiete Europas. Bei diesen Ereignissen stammt der größere Teil der Feuchte vom Atlantik und ein geringerer aus dem Mittelmeer (Abb. 4.2-2b und -2c).

In früheren regionalen Atmosphären- oder Ozeanmodellen wurden Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkungen oft vernachlässigt. Für verschiedene Regionen konnte jedoch gezeigt werden, dass Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkungen die räumliche und zeitliche Struktur des regionalen Klimas wesentlich beeinflussen können. Dies gilt sowohl für das aktuelle Klima (ARTALE et al. 2009, NABAT et al. 2015) als auch für zukünftige Szenarien (SOMOT et al. 2008). Diese Wechselwirkungen tragen wesentlich zur Entwicklung des südasiatischen Monsuns bei (z.B. MEEHL 1994). Die Anwendung AORCMs über dem Indischen Ozean (RATNAM et al. 2009) und dem maritimen Kontinent (Indonesien; ALDRIAN et al. 2005) führte zu erheblichen Niederschlagsverbesserungen in den entsprechenden Modellgebieten. Generell kann sich die At-

mosphäre-Ozean-Kopplung nicht nur auf simulierte Temperaturen und Niederschläge über dem Gebiet des gekoppelten Ozeans auswirken, sondern auch im Binnenland (z.B. SOMOT et al. 2008, RATNAM et al. 2009, PHAM et al. 2014, HO-HAGEMANN et al. 2015).

Es wird erwartet, dass durch die Berücksichtigung von Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkungen die Niederschlagssimulationen von regionalen Klimamodellen (RCMs) über Europa, vor allem im Sommer, verbessert werden. Ein zu geringer mittlerer Niederschlag über großen Gebieten in den mittleren Breiten ist ein typisches Problem von vielen atmosphärischen Modellen (VIDALE et al. 2003). Für Mittel- und Osteuropa wiesen mehrere Studien auf eine Unterschätzung des Sommer-niederschlags in vielen RCMs hin (z.B. HAGEMANN et al. 2001, 2004; KOTLARSKI et al. 2014). Diese Unterschätzung ist ein seit langem bekanntes Problem, das für viele RCMs noch immer nicht vollständig verstanden ist. Für Klimaprojektionen kann dieses »Trockenheitsproblem« zu fehlerhaften Signalen des Klimawandels führen, da eine mögliche Konsequenz dieser Unterschätzung eine inkorrekte Analyse von zukünftigen Veränderungen extremer Niederschläge sein kann (HO-HAGEMANN et al. 2017). Es ist anzumerken, dass die RCMs, die in den oben genannten Studien verwendet wurden, im Wesentlichen reine Atmosphärenmodelle waren, so dass Fernwirkungen von Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkungen in diesem spezifischen Kontext vernachlässigt wurden.

Im nächsten Abschnitt werden wir die möglichen Auswirkungen von Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkungen in AORCMs über der Nord-Ostsee-Region und dem Mittelmeer diskutieren.

Einflüsse der Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkung

Nord- Ostseegebiet

Es gibt mehrere AORCMs für die Ostsee- und die Nordseeregion (DÖSCHER et al. 2002, DIETERICH et al. 2013,

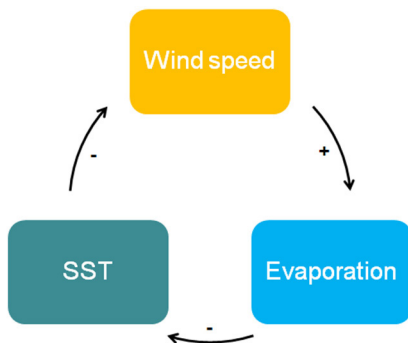


Abb 4.2-1: Zusammenhang von Änderungen in Windgeschwindigkeit, Verdunstung und Meeresoberflächentemperatur.

HO-HAGEMANN et al. 2015, 2017, PHAM et al. 2014, WANG et al. 2015, GRÖGER et al. 2015). WANG et al. (2015) zeigten, dass das regionale gekoppelte Modellsystem NEMO-Nordic-RCA4 besser als die ungekoppelte Variante über der Ostsee abschneidet, wobei sie dabei speziell die Kopplungs-Wirkung auf SST und Niederschlag untersuchten. GRÖGER et al. (2015) verglichen das NEMO-Nordic-RCA4-Modellsystem mit eigenständigen Versionen des Ozeans und der Atmosphäre, und folgerten, dass der Mehrwert der interaktiven Atmosphäre-Ozean-Kopplung im Wesentlichen zwei Gründe hat. (1) Die Beseitigung jeglicher Randbedingungen an der Grenzfläche zwischen Atmosphäre und Ozean. (2) Die bessere Reaktion auf Störungen in der Ozean-Atmosphäre-Wärmebilanz. Gerade letzteres sollte in Szenarienrechnungen zur Klimaerwärmung so genau wie möglich dargestellt werden.

HO-HAGEMANN et al. (2015) wiesen darauf hin, dass die Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkung im gekoppelten Modellsystem COSTRICE die großräumige Feuchtekonvergenz in der Grenzschicht verbessert. Dadurch reduzierte sich die Unterschätzung des simulierten Starkregens während des Oderhochwasserereignisses in Zentraleuropa gegenüber Rechnungen mit dem ungekoppelten Atmosphärenmodell COSMO-CLM (kurz CCLM) wesentlich (siehe Abb. 4.2-3, auch HO-HAGEMANN et al. 2015 sowie Abb. 2 a-c). Die Studie ergab, dass nicht nur die großräumige Feuchtekonvergenz aus dem Mittelmeer, sondern auch die Feuchte aus dem Nordatlantik, welche über die Nordsee nach Mitteleuropa gelangte, während der zweiten Phase des Oderhochwasserereignisses im Juli 1997 zu starken Regenfällen über Mitteleuropa geführt hat. In den ungekoppelten CCLM-Rechnungen führte hierbei eine zu geringe großräumige Feuchtekonvergenz von den Ozeanen zu einer großen Unterschätzung des Niederschlages über Zentraleuropa.

In einer neueren Studie identifizierten HO-HAGEMANN et al. (2017) eine zu schwache großräumige Feuchtekonvergenz aus benachbarten Meeren als möglichen Grund für das Trockenheitsproblem (s.o.) von regionalen Atmosphärenmodellen über Mitteleuropa. Anhand von Ergebnissen aus Rechnungen von mehreren AORCMs untersuchten sie, ob die Kopplung eines Atmosphärenmodells mit einem Ozeanmodell, das die Nord- und Ostsee abdeckt, zu einer verbesserten Simulation der Feuchtekonvergenz und einer anschließenden Reduktion der Unterschätzung des Niederschlages führen kann. Hierbei wurde das Auftreten von starkem Sommerregen, der Extremereignisse in Mitteleuropa verursachte, unter bestimmten Wetterbedingungen analysiert. Die Niederschlagseigenschaften einer bestimmten Region über Land werden durch die Zufuhr von Luftfeuchtigkeit aus verschiedenen Quellregionen bestimmt (z.B. VAN DER ENT et al. 2010,

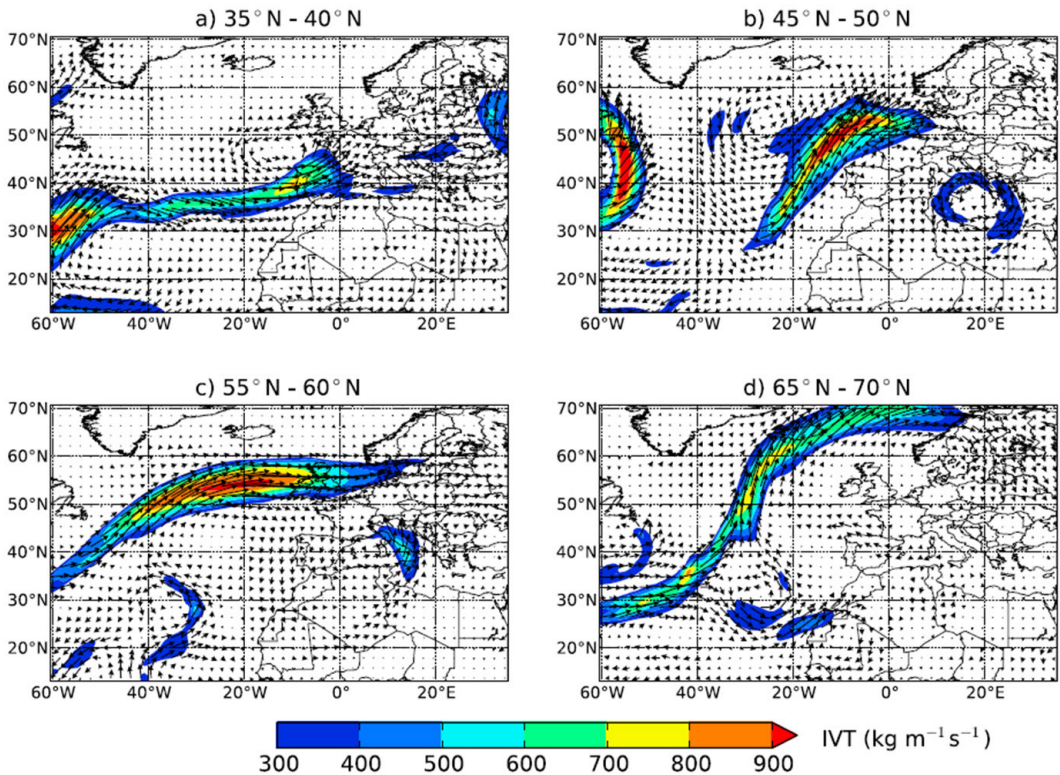


Abb 4.2-2: Vertikal integrierter Wasserdampftransport von atmosphärischen Flüssen abgeleitet für verschiedene Breitenbänder (a) 35°N-40°N (um 1800 UTC am 20. Mai 1994), (b) 45°N-50°N (um 0000 UTC am 27. Oktober 1980), (c) 55°N-60°N (um 0000 UTC am 6. März 2002), und (d) 65°N-70°N (am 1800 UTC am 1. Dezember 1989). Einheiten sind in $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ (Quelle: LAVERS & VILLIRINI 2013)

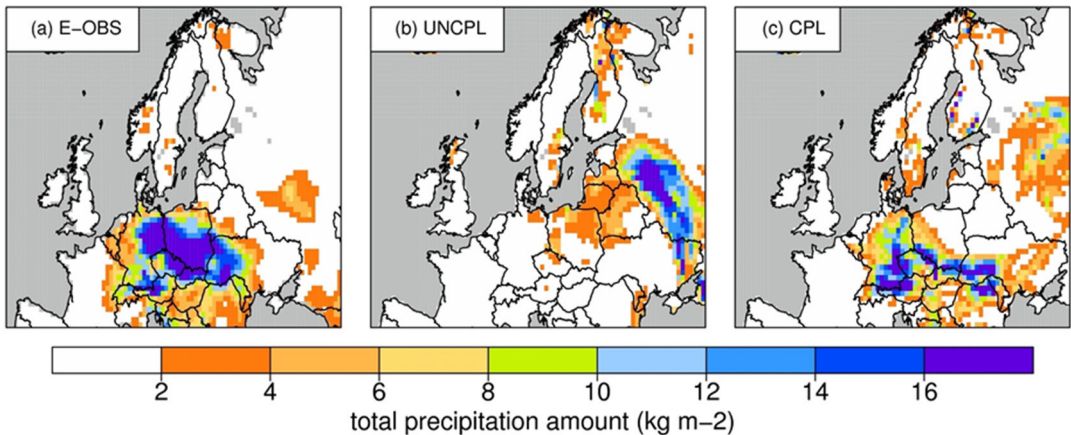


Abb 4.2-3: Mittlerer Niederschlag (mm/Tag) aus E-OBS-Daten und simuliert durch das atmosphärische Modell COSMO-CLM und das gekoppelte Modell COSTRICE gemittelt über die Zeit vom 18. bis 20. Juli 1997 (die Phase 2 des Oder-Hochwasserereignisses) (Quelle: Ho-HAGEMANN et al. 2015).

GIMENO et al. 2010). Größere Niederschlagsmengen werden beobachtet, wenn die atmosphärische Zirkulation eine bessere Verbindung zur Quelle begünstigt. Die Autoren gehen davon aus, dass der Kopplungseffekt von Nord- und Ostsee auf den Niederschlag über Mitteleuropa wesentlich ist, wenn ein bestimmtes Wettermuster vorherrscht, in dem der Feuchtefluss vom Meer zum Land fortbesteht. HO-HAGEMANN et al. (2017) analysierten die Güte der verschiedenen RCM-Simulationen für verschiedene Kategorien von Wetterregimen (JAMES 2007). Sie zeigten, dass insbesondere bei nordwestlichen Wetterlagen, wenn die Luftströmung vom Nordatlantik die Nordsee passiert, das AORCM COSTRICE extreme Niederschlagsereignisse generell besser simulieren kann als das ungekoppelte Atmosphärenmodell CCLM. Wenn die Oberflächentemperatur über Mitteleuropa höher war als die SST in der Nordsee, nahm die Windstärke vom Ozean zum Land in einigen Fällen zu, weil der Wind von kalten Oberflächen zu warmen Oberflächen konvergiert und vertikalen Aufwind begünstigt. Der stärkere Wind über der Nordsee erzeugte dann einen größeren latenten Wärmefluss vom Ozean in die Atmosphäre und verstärkte das Tief über Mitteleuropa und der Nordsee. Beides vergrößerte die Konvergenz der Feuchte von der Nordsee nach Mitteleuropa. Folglich fiel in den Simulationen mit COSTRICE eine größere Menge an Niederschlag über Mitteleuropa als bei denen mit dem ungekoppelten CCLM. Dieser größere Niederschlag kühlte die Oberflächentemperatur über Mitteleuropa ab, was den fühlbaren Wärmestrom verringerte und eine kühlere Lufttemperatur in 2 m Höhe erzeugte. Die niedrigere Oberflächentemperatur über Mitteleuropa bewirkte auch eine geringere

Verdunstung und damit einen geringeren latenten Wärmefluss. Dem folgte mitunter eine Erhöhung des latenten Wärmeflusses wegen der erhöhten Verdunstung über den nach dem Niederschlag feuchten Erdboden. Abb. 4.2-4 fasst diese Wechselwirkungen zusammen und basiert teilweise auf einer Studie von BENDER et al. (1993). Da nicht alle untersuchten AORCM diesen Effekt zeigten, wiesen HO-HAGEMANN et al. (2017) daraufhin, dass die Atmosphäre-Ozean-Kopplung vermutlich nur dann einen positiven Effekt hat, wenn das ungekoppelte Atmosphärenmodell die Sommerniederschläge über Mitteleuropa aufgrund zu schwacher großräumiger Feuchtekonvergenz nur unzureichend wiedergeben kann.

Vb-Zyklonen

Aber nicht nur die großräumige Feuchtekonvergenz von Nordsee und Nordatlantik, sondern auch die von anderen umliegenden Ozeanen, wie zum Beispiel vom Mittelmeer, spielt eine wichtige Rolle bei der Erzeugung sommerlicher Extremniederschläge über Mitteleuropa. Mehrere Studien hoben die Bedeutung der sogenannten Vb-Zyklonbahn (Abb. 4.2-5a) für Starkniederschlagsereignisse über Mitteleuropa (z.B. MUSKULUS & JACOB 2005) hervor. Die als »Vb« bekannte Zugbahn wurde von VAN BEBBER (1891) definiert, der ein grundlegendes Schema von typischen Zugstraßen der barometrischen Minima (Tiefdrucktrajektorien) entwickelte, das er in fünf Gruppen einteilte. Die Vb-Zugbahn ist eine Subkategorie der fünften Gruppe und wurde mit dieser Notation in das System der Großwetterlagen integriert. Die Vb-Zyklonen entstehen entweder im Golf von Biskaya, im Balearenmeer oder im Ligurischen Meer,

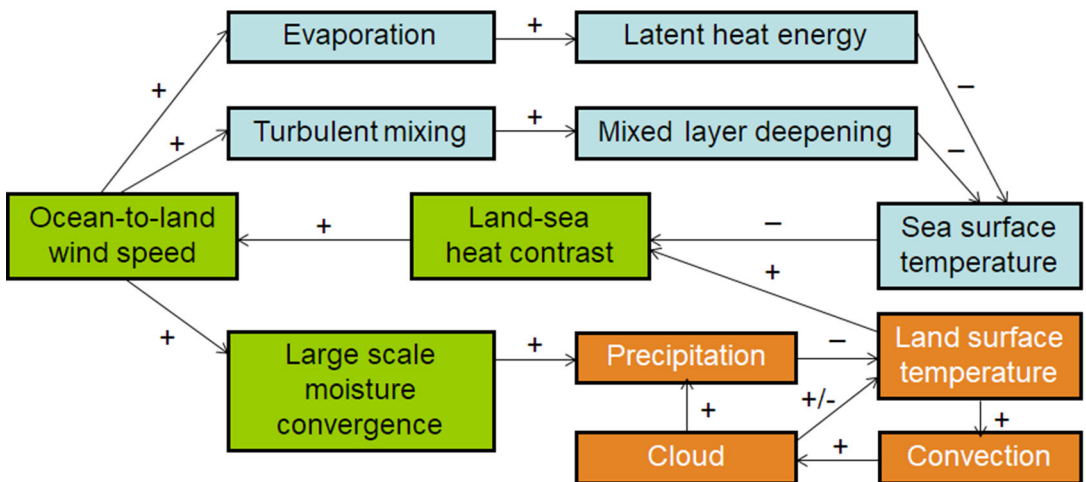


Abb 4.2-4: Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkungs- und Interaktionsdiagramm. Für jeden Pfeil zeigt der Anfangsstatus an, dass die Quellenmenge ansteigt, und das Vorzeichen (- oder +) zeigt die Änderungstendenz der Zielmenge an. Farben bezeichnen die Gruppe der Veränderungen oder Zustände über Meer (blau), Land (braun) und die Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkungen (grün) (Quelle: HO-HAGEMANN et al. 2017).

wo die Feuchte aufgenommen wird. Die Zyklone zieht dann nach Osten über Italien und die Adria, bevor sie nach Norden zum Schwarzen Meer oder nach Sankt Petersburg abbiegt (MESSMER et al. 2005). TRIGO et al. (1999) erstellten eine Zyklonen-Klimatologie für die Mittelmeerregion und folgerten, dass die Genua-Region, die auch der wichtigste Entstehungsort von Vb-Zyklonen ist, die meisten Zyklonen im Mittelmeerraum erzeugt. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurden mehrere große Hochwasserereignisse in Europa durch Genua-Zyklonen verursacht, die der Vb-Zugbahn folgten (MUSKULUS & JACOB 2005). MESSMER et al. (2005) stellten fest, dass Zyklonen, die sich über das westliche Mittelmeergebiet ausbreiten und danach nordöstlich (Vb) bewegen, eine Hauptquelle für extreme Wetterereignisse sind und für schwere Niederschläge auf der Nordseite des Alpenraums und Mitteleuropas verantwortlich sind. Sie analysierten die Vb Zyklonenkerne während der 10 schwersten Niederschlagsereignisse in Europa und zeigten, dass die Region Genua am häufigsten von den Zyklonen passiert wird (Abb. 4.2-5b). Für das Elbehochwasser im August 2002 war dies ebenso der Fall, obwohl es Uneinigkeit bezüglich des Gesamtbeitrags der damit verbundenen Feuchteströmung gibt. Während SODEMANN et al. (2009) den Nordatlantik als wichtigste Feuchtequelle identifizierten, zeigten andere Studien (z.B. STOHL & JAMES 2004, JAMES et al. 2004), dass das Mittelmeer den größten Beitrag zu diesem Ereignis lieferte.

Das Mittelmeer

Im Mittelmeerraum, einer der am stärksten von der Erderwärmung betroffenen Regionen (GIORGI 2006), sind Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkungen von wesentlicher Bedeutung. Die morphologische Komplexität des Mittelmeerbeckens führt zur Bildung von intensiven Wetterphänomenen, die teilweise durch diese Wechselwirkungen verursacht werden und auf kleinen räumlichen Skalen auftreten. Um die Wechselwirkungen an der Schnittstelle zwischen Atmosphäre und Ozean im Mittelmeerraum explizit aufzulösen, wurden verschiedene AORCMs entwickelt, wie z.B. ARPEGE-Atmosphäre gekoppelt mit OPAMED-Ozean (SOMOT et al. 2008), PROTHEUS (RegCM3 mit MITgcm; ARTALE et al. 2009), und MORCE-MED (WRF mit NEMO-MED12; DROBINSKI et al. 2012). Ein Vergleich von gekoppelten und ungekoppelten Experimenten durch SOMOT et al. (2008) zeigt, dass in den gekoppelten Simulationen ein verstärktes Klimaänderungssignal über großen Gebieten auftritt, mit feuchteren Wintern über Nordeuropa und trockeneren Sommern über Süd- und Osteuropa (Abb. 4.2-6, siehe auch SOMOT et al. 2008 und Abb. 4.2-5). Dabei scheint die besser simulierte

Oberflächentemperatur des Mittelmeeres einen wesentlichen Beitrag zu liefern.

LEBEAUPIN-BROSSIER et al. (2015) verglichen zwei ungekoppelte und gekoppelte Simulationen mit WRF und MORCE-MED und zeigten, dass im Wesentlichen die SST den Wasserhaushalt an der Meeresoberfläche bestimmt, der sich aus Verdunstung (E) und Niederschlag (P) zusammensetzt. E und P reduzierten sich um 6 bzw. 3% im gekoppelten Lauf gegenüber dem ungekoppelten Lauf. Die Änderungen sind bis 750 km landeinwärts von der Mittelmeerküste bis zum Atlantischen Ozean und dem Schwarzen Meer sowie nach Mitteleuropa erkennbar (Abb. 4.2-7, siehe auch LEBEAUPIN-BROSSIER et al. 2015, Abb. 11).

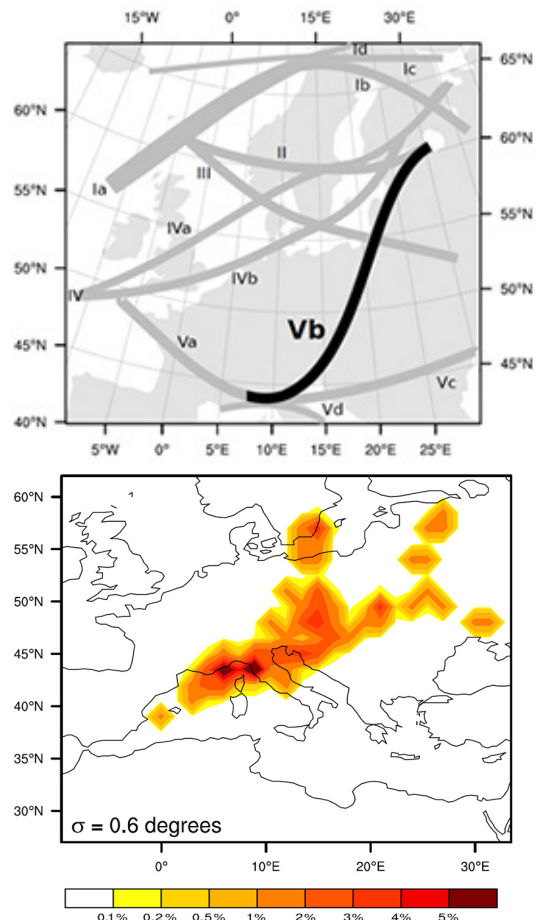


Abb 4.2-5: (a) Trajektorien der barometrischen Minima zwischen 1876 und 1880, wie von VAN BEBBER (1891) definiert. Die Trajektorie, welche die »Vb« Zyklone definiert, ist schwarz hervorgehoben. (b) Wahrscheinlichkeitsdichten von nachgewiesenen Vb-Zyklonen für die 10 schwersten Niederschlagsereignisse in Europa. Die Schattierung gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Zyklonenkern in der entsprechenden Rasterbox innerhalb des Zeitraums 1979-2013 auftrat (Quelle: MESSMER et al. 2015).

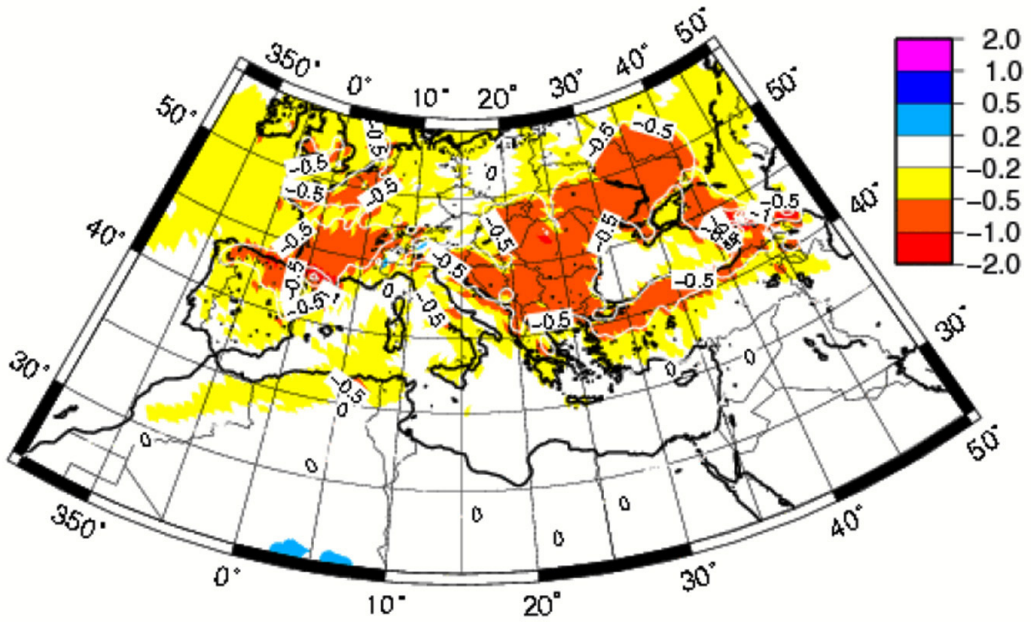


Abb 4.2-6: Der Effekt eines AORCMs auf die Klimaänderung des 30-jährigen Mittelwertes des Sommerniederschlags (mm/Tag) zwischen dem Zeitraum 2070-2099 und dem Zeitraum 1961-1990 (Quelle: SOMOT et al. 2008).

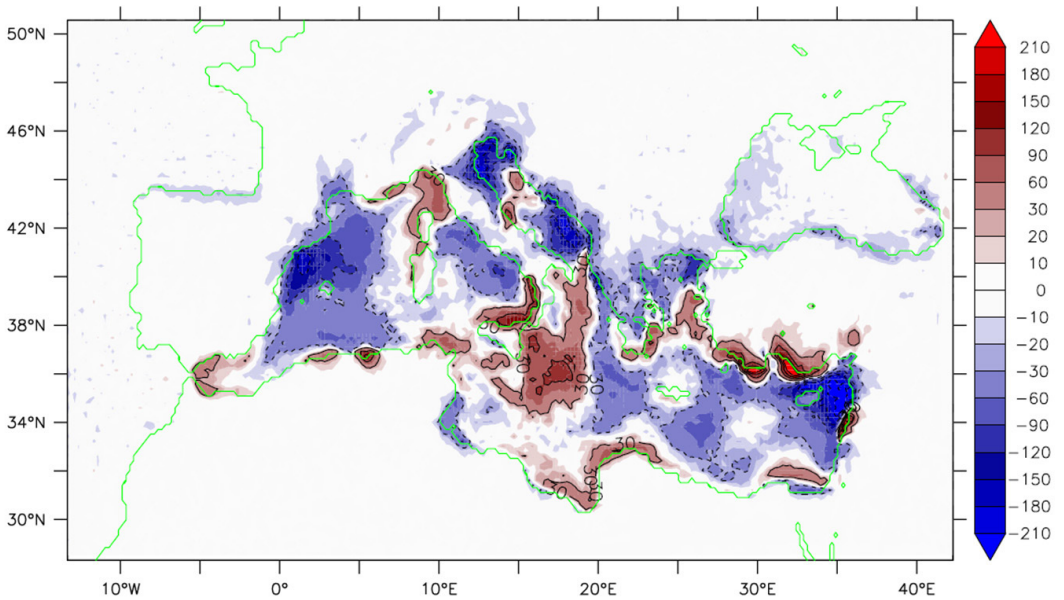


Abb 4.2-7: Unterschiede im Niederschlag (mm/Jahr) zwischen gekoppelten und ungekoppelten Modellexperimenten. (Quelle: LEBEAUPIN-BROSSIER et al. 2015).

Gekoppelte AORCMs können den Wärmehaushalt des Mittelmeeres besser reproduzieren als ungekoppelte Atmosphärenmodelle (DUBOIS et al. 2012, SEVAULT et al. 2014) und seine zukünftige Entwicklung besser abschätzen. Wenn zusätzlich der Frischwasserzufluss durch Flüsse berücksichtigt wird, können gekoppelte AORCMs den gesamten Wasserhaushalt des Mittelmeeres beschreiben. Außerdem können gekoppelte AORCMs verbesserte Simulationen von Medicanes (tropensturm-ähnliche Sturmtiefs im Mittelmeerraum) liefern (AKHTAR et al. 2014, GAERTNER et al. 2016), die insbesondere für Starkregen in diesem Gebiet relevant sind. SANNA et al. (2013) zeigten mit einem hochaufgelösten, wirbelauflösenden Ozeanmodell, dass die gekoppelte SST die Simulation von Niederschlag und Zyklonogenese deutlich verbessert. Der Einfluss einer hochfrequenten Atmosphäre-Ozean-Kopplung auf Starkniederschläge wurde in Fallstudien mittels Zwillingsexperimenten mit einem AORCM und dem dazugehörigen atmosphärischen RCM untersucht (LEBEAUPIN-BROSSIER et al. 2013, BERTHOU et al. 2014, 2015). Diese Studien zeigten, dass die Kopplung die Ergebnisse in Bezug auf Intensität und Position wesentlich beeinflusst. RUTI et al. (2015) geben einen Überblick über gekoppelte AORCM-Studien für das Mittelmeergebiet, die im Rahmen der MED-CORDEX Initiative für mediterrane Klimastudien durchgeführt wurden.

Schlussfolgerungen und Diskussion

In diesem Abschnitt wurden die Einflüsse der Atmosphäre-Ozean-Kopplung auf simulierte Starkregenfälle in Europa vorgestellt. Viele Studien haben gezeigt, dass AORCMs, die für die Nord- und Ostseeregionen und den Mittelmeerraum konzipiert wurden, bessere Ergebnisse bei der Reproduktion von Starkregen in Europa aufweisen als ungekoppelte Modelle. Für beide Regionen wurde in allen Studien die wichtige Rolle der Meeresoberflächentemperatur in der Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkung hervorgehoben. Über den Nord- und Ostseeregionen werden starke Regenfälle über Mitteleuropa in AORCMs besser simuliert, da die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Wind, Verdunstung und Meeresoberflächentemperatur zu einer verbesserten, großräumigen Feuchtekonvergenz führen. Über dem Mittelmeerbecken führt eine bessere Repräsentation der Meeresoberflächentemperatur in den AORCMs zu besseren Ergebnissen des Wärme- und Wasserhaushalts des Mittelmeers sowie der Repräsentation von sogenannten Medicanes, die für Starkregenereignisse wichtig sind. Der Vergleich von gekoppelten und ungekoppelten Experimenten (SOMOT et al. 2008) zeigte, dass in den gekoppelten Simulationen das Klimaänderungssignal in Gebieten mit maritimen Einfluss deutlich verstärkt werden kann.

Die meisten der oben genannten Studien sind jedoch nicht untereinander abgestimmt. Je nach Forschungszwecken unterscheiden sich die verwendeten Modelle in Bezug auf Gebiet und Auflösung, Häufigkeit, Region und Methode der Kopplung, usw. Um belastbarere Schlussfolgerungen zu erhalten, sind koordinierte Experimente für AORCMs erforderlich. Das MED-CORDEX-Programm hat sich seit 2012 bemüht, koordinierte AORCM-Experimente für mediterrane Klimastudien durchzuführen. Eine Initiative zu koordinierten Experimenten für die Nord- und Ostseeregion wurde im Rahmen des Baltic Earth-Programms gestartet. Die AORCM des MED-CORDEX-Programms konzentrieren sich jedoch auf das Mittelmeer und vernachlässigen oft die Ostsee, während die AORCM des Baltic Earth-Programms nur die Nord- und die Ostsee berücksichtigen. Um den Einfluss dieser Meere auf die Starkregenereignisse in Europa Rechnung zu tragen, sollten daher beide Regionen in einem AORCM erfasst werden.

Literatur

- AKHTAR, N., J. BRAUCH, A. DOBLER et al. (2014): Medicanes in an ocean-atmosphere coupled regional climate model. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14: 2189-2201.
- ALDRIAN, E., D. SEIN, D. JACOB et al. (2005): Modeling Indonesian rainfall with a coupled regional model. *Clim. Dyn.*, 25:1-17.
- ARTALE, V., S. CALMANTI, A. CARILLO et al. & The PROTHEUS Group (2010): An atmosphere-ocean regional climate model for the Mediterranean area: assessment of a present climate simulation. *Clim. Dyn.*, 35: 721-740.
- BENDER, M. A., I. GINIS & Y. KURIHARA (1993): Numerical simulations of hurricane-ocean interaction with a high resolution coupled model. *J. Geophys. Res.* 98:23245-23263.
- BERTHOU, S., S. MAILLER, P. DROBINSKI et al. (2014): Prior history of mistral and tramontane winds modulates heavy precipitation events in southern France. *Tellus*, 66A, 24064, doi:10.3402/tellusa.v66.24064.
- BERTHOU, S., S. MAILLER, P. DROBINSKI et al. (2015): Sensitivity of an intense rain event between atmosphere-only and atmosphere-ocean regional coupled models: 19 September 1996. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141: 258-271.
- DIETERICH, C., S. SCHIMANKE, S. WANG et al. (2013): Evaluation of the SMHI coupled atmosphere-ice-ocean model RCA4-NEMO. *SMHI Report Oceanography* 47, 80pp.
- DÖSCHER, R., U. WILLEN, C. JONES et al. (2002): The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCAO. *Boreal Environ. Res.*, 7:183-192.
- DROBINSKI, P., A. ANAV, C. LEBEAUPIN BROSSIER et al. (2012): Model of the Regional Coupled Earth system (MORCE): Application to process and climate studies in vulnerable regions. *Environmental Modelling and Software*, Elsevier, 35:1-18.
- DUBOIS, C., S. SOMOT, S. CALMANTI et al. (2012): Future projections of the surface heat and water budgets of the Mediterranean sea in an ensemble of coupled atmosphere-ocean regional climate models. *Clim. Dyn.*, 39 (7-8):1859-1884. DOI 10.1007/s00382-011-1261-4.
- EEA, European Environment Agency (2003): Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe. *Environmental issue report No. 35*, European Environment Agency, Copenhagen, p. 47.
- GAERTNER, M. A., J. J. GONZALEZ-ALEMAN, R. ROMERA et al. (2016): Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble: impact of ocean-atmosphere coupling and increased resolution. *Clim. Dyn.*, doi:

- 10.1007/s00382-016-3456-1.
- GIMENO, L., A. DRUMOND, R. NIETO et al. (2010): On the origin of continental precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L13804.
- GIORGI, F. (2006): Regional climate modeling: Status and Perspectives. *Journal de Physique IV*, (139): 101-118.
- GAO, S. & X. LI (2008): Chapter 10, Cloud-Resolving Modeling of Convective Processes, pp. 147-155, doi: 10.1007/978-1-4020-8276-4.
- GRÖGER M., C. DIETERICH, H. E. M. MEIER & S. SCHIMANKE (2015): Thermal air-sea coupling in hindcast simulations for the North Sea and Baltic Sea on the NW European shelf. *Tellus A* (67), 26911. <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v67.26911>.
- HAGEMANN, S., M. BOTZET & B. MACHENHAUER (2001): The summer drying problem over south-eastern Europe: Sensitivity of the limited area model HIRHAM4 to improvements in physical parameterization and resolution. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, 26: 391-396.
- HAGEMANN, S., B. MACHENHAUER, R. JONES et al. (2004): Evaluation of water and energy budgets in regional climate models applied over Europe. *Clim. Dyn.*, 23: 547-567. doi: 10.1007/s00382-004-0444-7.
- HO-HAGEMANN H. T. M., S. HAGEMANN & B. ROCKEL (2015): On the role of soil moisture in the generation of heavy rainfall during the Oder flood event in July 1997. *Tellus A* (67), 28661. doi:10.3402/tellusa.v67.28661.
- HO-HAGEMANN H. T. M., M. GRÖGER, B. ROCKEL et al. (2017): Effects of air-sea coupling over the North Sea and the Baltic Sea on simulated summer precipitation over Central Europe. *Clim. Dyn.*, 49(11): 3851-3876, doi:10.1007/s00382-017-3546-8.
- ICPDR, International Commission for the Protection of the Danube River Basin: Flooding fears return to the Danube. *Danube Watch*, 2, 14-15, 2006.
- JAMES, P. M. (2007): An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theor. Appl. Climatol.*, 88: 17-42.
- JAMES, P., A. STOHL, N. SPICHTINGER et al. (2004): Climatological aspects of the extreme European rainfall of August 2002 and a trajectory method for estimating the associated evaporative source regions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4: 733-746. doi:10.5194/nhess-4-733-2004.
- KOTLARSKI, S., K. KEULER, O. B. CHRISTENSEN et al. (2014): Regional climate modelling on European scales: A joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7: 1297-1333.
- LAVERS, D. A. & G. VILLARINI (2013): The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe. *Geophys. Res. Lett.*, 40: 3259-3264.
- LEBEAUPIN BROSSIER, C., P. DROBINSKI, K. BÉRANGER et al. (2013): Ocean memory effect on the dynamics of coastal heavy precipitation preceded by a mistral event in the north-western Mediterranean. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 139: 1583-1597. doi:10.1002/qj.2049.
- LEBEAUPIN BROSSIER, C., S. BASTIN, K. BÉRANGER & P. DROBINSKI (2015): Regional mesoscale air-sea coupling impacts and extreme meteorological events role on the Mediterranean Sea water budget. *Clim. Dyn.*, 44: 1029-1051. doi:10.1007/s00382-014-2252-z.
- MEEHL, G. A. (1994): Coupled land-ocean-atmosphere processes and south Asian monsoon variability. *Science*, 266: 263-267. doi:10.1126/science.266.5183.263.
- MESSMER, M., J. J. GÓMEZ-NAVARRO & C. C. RAIBLE (2015): Climatology of Vb-cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe *Earth Syst. Dynam. Discuss.*, 6: 907-941.
- MUSKULUS, M. & D. JACOB (2005): Tracking cyclones in regional model data: The future of Mediterranean storms. *Adv. Geosci.*, 2: 13-19. doi:10.5194/adgeo-2-13-2005.
- NABAT, P., S. SOMOT, M. MALLET et al. (2015): Direct and semi-direct aerosol radiative effect on the Mediterranean climate variability using a coupled Regional Climate System Model. *Clim. Dyn.*, 44: 1127-1155.
- NISSEN, K. M., U. ULBRICH, & G. C. LECKEBUSCH (2013): Vb cyclones and associated rainfall extremes over Central Europe under present day and climate change conditions. *Meteorol. Z.*, 22: 649-660, doi:10.1127/0941-2948/2013/0514.
- PHAM, V. T., J. BRAUCH, C. DIETERICH, B. FRUEH & B. AHRENS (2014): New coupled atmosphere-ocean-ice system COSMO-CLM/NEMO: assessing air temperature sensitivity over the North and Baltic Seas. *Oceanologia*, 56 (2). doi:10.5697/oc.56-2.167.
- RATNAM, J. V., F. GIORGI, A. KAGINALKAR & S. COZZINI (2009): Simulation of the Indian monsoon using the RegCM3-ROMS regional coupled model. *Clim. Dyn.*, 33: 119-139.
- RUTI, P. M., S. SOMOT, F. GIORGI et al. (2015): MED-CORDEX initiative for Mediterranean Climate studies. *BAMS* (on-line, November 2015). doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00176.1>
- SANNA, A., P. LIONELLO & S. GUALDI (2013): Coupled atmosphere ocean climate model simulations in the Mediterranean region: effect of a high-resolution marine model on cyclones and precipitation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13: 1567-1577. doi:10.5194/nhess-13-1567-2013.
- SEVAULT, F., S. SOMOT, A. ALIAS et al. (2014): A fully coupled Mediterranean regional climate system model: design and evaluation of the ocean component for the 1980-2012 period. *Tellus A*, 66, 23967. <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v66.23967>.
- SODEMANN, H., H. WERNLI & C. SCHWIERZ (2009): Sources of water vapour contributing to the Elbe flood in August 2002 – A tagging study in a mesoscale model. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 135: 205-223. doi:10.1002/qj.374.
- STOHL, A. & P. JAMES (2004): A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle, Part I: Method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in Central Europe. *J. Hydrometeorol.*, 5: 656-678. doi:10.1175/1525-7541(2004)005<0656:ALAOTA>2.0.CO;2.
- SOMOT, S., F. SEVAULT, M. DÉQUÉ & M. CRÉPON (2008): 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled Atmosphere-Ocean Regional Climate Model. *Global and Planetary Change*, 63(2-3): 112-126. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.10.003.
- THIELEN, J., J. BARTHOLME, M. -H. RAMOS & A. DE ROO (2009): The European Flood Alert System - Part I: Concept and development. *Hydro. Earth Syst. Sci.*, 13: 125-140.
- TRIGO, I., T. DAVIES, & G. BIGG (1999): Objective Climatology of Cyclones in the Mediterranean Region, *J. Climate*, 12: 1685-1696.
- VAN BEBBER, W. (1891): Die Zugstrassen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875-1890. *Meteorol. Z.*, 8: 361-366.
- VAN DER ENT, R. J., H. H. G. SAVENIJE, B. SCHAEFLI & S. C. STEELE-DUNNE (2010): Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 46, W09525. doi:10.1029/2010WR009127.
- VIDALE, P. L., D. LÜTHI, C. FREI, S. I. SENEVIRATNE & C. SCHÄR (2003): Predictability and uncertainty in a regional climate model. *J. Geophys. Res.*, 108 (D18), 4586. doi:10.1029/2002JD002810.
- WANG, S., C. DIETERICH, R. DÖSCHER et al. (2015): Development and evaluation of a new regional coupled atmosphere-ocean model RCA4-NEMO and application for future scenario experiments. *Tellus A* (67), 24284.
- XIE, S. P. & S. G. H. PHILANDER (1994): A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific. *Tellus*, 46A: 340-350.

Kontakt:

Dr. Ha T.M. Ho-Hagemann
 Dr. Burkhardt Rockel
 Institut für Küstenforschung
 Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Deutschland
ha.hagemann@hzg.de

Ho-Hagemann, H. T. M. & B. Rockel (2018): Einfluß von Atmosphäre-Ozean Wechselwirkungen auf Starkniederschläge über Europa. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang & R. Weisse (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Extremereignisse*. pp. 161-168. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi: 10.2312/warnsignal.klima.extremereignisse.23.