

4. STARKNIEDERSCHLÄGE UND ÜBERSCHWEMMUNG

Die Kopplung Atmosphäre-Ozean spielt global die Hauptrolle für den Hydrologischen Kreislauf. Darüber hinaus gibt es Kopplungsmechanismen zwischen Landoberfläche und Atmosphäre. Eine wichtige Rolle spielen dabei z.B. in Indien die Bodenfeuchte und die Bewässerungsflächen in der Landwirtschaft (Kap. 4.1). Im Kap. 4.2 wird gezeigt, dass auch Randmeere wie Nord- und Ostsee sowie das Mittelmeer einen Einfluss auf extreme Niederschläge in Europa haben. Die hohen beobachteten winterlichen Abflüsse in Deutschland im Zeitraum 1951-2002 sind in vielen großen Flüssen um ca. ein Drittel gestiegen. Eine Modellanalyse zeigt, dass dieser Trend größtenteils durch Klimatrends hervorgerufen wurde (Kap. 4.3). Durch die Alpen und andere Gebirgszüge und deren Flusssysteme ist das südliche Mitteleuropa besonders stark von Flusshochwassern betroffen (Kap. 4.4). Aber auch in anderen Regionen der Welt wie in China (Kap. 4.5) oder in den Monsungebieten Asiens (Kap. 4.6) werden in jüngster Zeit immer gewaltigere Flutschäden registriert. In den Tropen beeinflusst besonders das ENSO-System Starkniederschläge und Hochwasserereignisse (Kap.4.7).

4.1 Wechselwirkungen von Klima und Hydrologie

STEFAN HAGEMANN & TOBIAS STACKE

Wechselwirkungen von Klima und Hydrologie: Zwischen Landoberfläche und Atmosphäre gibt es verschiedene Kopplungsmechanismen, die zu großräumigen Auswirkungen auf Klima und Hydrologie führen können. Einige von ihnen sind noch nicht ausreichend verstanden und auch in modernen Klimamodellen nur in vereinfachter Form vertreten. Die neueste Generation von Klimamodellen ermöglicht jedoch eine wesentlich bessere Berücksichtigung und Implementierung wichtiger Kopplungsprozesse. Daher geben wir im vorliegenden Kapitel einen Überblick über relevante Wechselwirkungen von Klima und Hydrologie, die potentiell die Entstehung extremer Niederschlagsereignisse beeinflussen können. Diese beinhalten die Wechselwirkungen zwischen Bodenfeuchte und Atmosphäre sowie die anthropogene Landnutzung und insbesondere die Bewässerung, von der gezeigt wurde, dass sie sogar entfernte Regionen beeinflussen kann. An dieser Stelle präsentieren wir einen Überblick über den aktuellen Wissensstand in Verbindung mit einigen beispielhaften Studien aus einer großräumigen Perspektive. Daher konzentrieren wir uns auf die Wechselwirkungen zwischen Klima und Hydrologie, die auf Skalen relevant sind, die in aktuellen oder bevorstehenden globalen und regionalen Klimamodellstudien verwendet werden.

Climate Hydrology Interactions: Various land-atmosphere coupling mechanisms exist that may lead to large-scale impacts on climate and hydrology. Some of them are still poorly understood and not adequately represented in state of the art climate modelling. But as the current generation of climate models enables consideration and implementation of important coupling processes, the present study provides an overview on relevant climate-hydrology interactions that potentially may influence the generation of extreme rainfall events. These comprise soil moisture – atmosphere interactions as well as anthropogenic land use and especially irrigation, which has been shown to even affect remote regions. Here, we present a review of current knowledge combined with some exemplary studies from a large-scale point of view. Therefore, we focus on climate-hydrology interactions that are relevant on scales utilized in current or forthcoming global and regional climate modelling exercises.

Der Wasserkreislauf spielt eine zentrale Rolle innerhalb des Erdsystems und ist von entscheidender Bedeutung für das Leben auf der Erde einschließlich der menschlichen Gesellschaft. Daher sind der aktuelle Zustand des Wasserkreislaufs und seine zukünftige Entwicklung Schlüsselfragen in der Umweltforschung. HARDING et al. (2011) geben einen allgemeinen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand des terrestrischen globalen Wasserkreislaufs. Hier betrachten sie Aspekte der derzeitigen globalen hydrologischen Modellierung, vergangene und prognostizierte hydrologische Veränderungen der Mittelwerte und Extreme sowie Unsicherheiten in unserem Verständnis des gegenwärtigen globalen Wasserkreislaufs und wie er sich in Zukunft entwickeln wird. Jedoch wird in diesen

Aspekten die Rückkopplung der terrestrischen Hydrologie auf das Klima meist nicht berücksichtigt. Dieses ist aber notwendig, da starke Wechselwirkungen zwischen Klima, Hydrologie und Landnutzung existieren (CLAUSSEN 2004, FALLOON & BETTS 2010). Um die Wechselwirkungen zwischen Klima und Hydrologie sowie deren Veränderung unter den Bedingungen des Klimawandels untersuchen zu können, ist eine gekoppelte Betrachtung erforderlich, in der beide Komponenten angemessen vertreten sind.

In Studien zum globalen und regionalen Klimawandel sind Klimamodelle die aktuellen Arbeitsinstrumente. Obwohl sich die Fähigkeit von Klimamodellen, die verschiedenen Merkmale des Klimas oder des Erdsystems zu simulieren, in den letzten Jahrzehnten

erheblich verbessert hat, gibt es nach wie vor Lücken oder große Unsicherheiten bei der Darstellung einiger spezifischer Prozesse. So ist die Schnee-Klima-Rückkopplung gut bekannt und beschrieben (z.B. CESS et al. 1991). Jedoch sind Rückkopplungen zwischen CO_2 , Vegetation, Bodenfeuchte, Grundwasserneubildung und Klima weniger gut verstanden und in den meisten Klima- und Hydrologie-Modellen nur unzureichend verwirklicht. Im Folgenden werden wir uns auf die Wechselwirkungen zwischen Klima und Hydrologie konzentrieren, die potentiell die Entstehung von Extremniederschlägen beeinflussen können. Hier werden nur jene Interaktionen berücksichtigt, die für Skalen relevant sind, die in aktuellen oder bevorstehenden globalen und regionalen Klimamodelstudien verwendet werden. Daher betrachten wir zuerst die Wechselwirkungen zwischen Bodenfeuchte und Atmosphäre, und danach die anthropogene Landnutzung und insbesondere die Bewässerung, von der gezeigt wurde, dass sie sogar entfernte Regionen beeinflussen kann.

Wechselwirkungen der Bodenfeuchte mit der Atmosphäre

Die Bodenfeuchte steuert die Aufteilung der durch Einstrahlung verfügbaren Energie in den latenten und fühlbaren Wärmestrom und konditioniert den Oberflächenabfluss. Durch die Steuerung der Evapotranspiration werden die Energie-, Wasser- und Kohlenstoffflüsse verknüpft (KOSTER et al. 2004, DIRMEYER et al. 2006, SENEVIRATNE & STÖCKLI 2008). SENEVIRATNE et al. (2006) stellten fest, dass eine durch den Klimawandel bedingte Verschiebung der klimatischen Bedingungen in Europa nach Norden zu einer neuen Übergangsklimazone zwischen trockenen und feuchten Klimaten mit starker Land-Atmosphäre-Kopplung in Mittel- und Osteuropa führen wird. Sie betonen insbesondere die Bedeutung von Bodenfeuchte-Temperatur-Rückkopplungen (zusätzlich zu Bodenfeuchte-Niederschlag-Rückkopplungen) für zukünftige Klimaveränderungen in dieser Region. Eine umfassende Übersicht über Bodenfeuchte-Rückkopplungen geben SENEVIRATNE et al. (2010). Deren allgemeine Prinzipien sind bekannt (z.B. KOSTER et al. 2004, 2006, TEULING et al. 2009), obwohl noch Modellverbesserungen nötig sind, damit deren Auswirkungen, speziell in einem zukünftigen Klima, genauer untersucht werden können.

Der Zustand der Landoberfläche ist nicht nur wichtig für die durchschnittlichen klimatischen Bedingungen über diesen Regionen. Landoberflächen-Prozesse können darüber hinaus auch Auswirkungen auf Extremereignisse haben (PITMAN et al. 2012). Mehrere Studien haben darauf hingewiesen, dass die Bodenfeuchte zu Beginn eines Ereignisses erhebliche Aus-

wirkungen auf Ausmaß und Schweregrad von Dürren und Hitzewellen haben kann (z.B. LORENZ et al. 2010, QUESADA et al. 2012). Eine positive Bodenfeuchte-Niederschlags-Rückkopplung zum Beispiel kann eine Dürre verlängern und/oder verstärken (z.B. TAYLOR et al. 2013). FISCHER et al. (2007) wiesen darauf hin, dass die rekordbrechende Hitzewelle in Europa im Jahr 2003 durch die großen Anomalien der Bodenfeuchte verstärkt wurde, die durch ein großes Niederschlagsdefizit zusammen mit einem frühen Ergrünen der Vegetation in den Monaten vor dem extremen Sommerereignis verursacht wurden. LÖW et al. (2009) zeigten, dass diese Bodenfeuchteanomalien mit Fernerkundungssensoren beobachtbar waren. Darüber hinaus deuten aktuelle Studien von Klimaprojektionen (z.B. GUTOWSKI et al. 2004, PAN et al. 2004) darauf hin, dass Sommerniederschläge stark von Oberflächenprozessen abhängen, insbesondere bei der Simulation regionaler Extreme (RANDALL et al. 2007). HO-HAGEMANN et al. (2015) zeigten, dass der Zustand der Bodenfeuchte vor Beginn des Oderhochwassers im Juli 1997, das Auftreten von Starkregen in der zweiten Phase dieses Ereignisses erheblich beeinflusst hat (siehe auch Kap. 4.2 - HO-HAGEMANN & ROCKEL). Generell ist der Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und Extremniederschlägen bisher aber nur wenig untersucht.

Hauptsächlich sind Bodenfeuchterückkopplungen in die Atmosphäre auf Regionen beschränkt, in denen die Evapotranspiration wasser-limitiert ist. In diesen Regionen befindet sich die Bodenfeuchte im Übergangsbereich zwischen dem permanenten Welkepunkt (Bodenfeuchtwert, unter dem die Pflanzen durch Transpiration kein Wasser aus dem Boden gewinnen können, da die Saugkräfte des Bodens größer sind als die Transpirationskräfte der Pflanzen) und der kritischen Bodenfeuchte, über der die Pflanzen mit der potentiellen Rate transpirieren, welche durch die atmosphärischen Bedingungen verursacht wird (siehe z.B. Abb. 5 in SENEVIRATNE et al. 2010). In dieser Hinsicht sind die hohen Breiten gewöhnlich von diesen Regionen ausgeschlossen, da sie als überwiegend energie-limitiert gelten (TEULING et al. 2009). Daher wurde bisher angenommen, dass dort die Kopplung zwischen Bodenfeuchte und Atmosphäre keine Rolle spielt (KOSTER et al. 2004, 2006). Kürzlich jedoch haben HAGEMANN et al. (2016) gezeigt, dass die Einbeziehung von Bodenfrostprozessen in das MPI-ESM eine Bodenfeuchte-Niederschlagsrückkopplung über den nördlichen hohen Breiten im Sommer ermöglicht (Abb. 4.1-1). Hier führt der gefrorene Boden während der kalten Jahreszeit (Spätherbst bis Anfang Frühling) zu weniger Infiltration von Regen und Tauwasser und somit zu mehr Oberflächenabfluss, insbesondere wäh-

rend der Schneeschmelze, welches üblicherweise in den hohen Breiten der Zeitraum ist, wo die extremsten Abflüsse auftreten. Einerseits resultiert dies in einer deutlichen Verbesserung des simulierten Abflusses (Abb. 4.1-2a). Auf der anderen Seite verringert dieses Verhalten die Bodenfeuchte (Abb. 4.1-2b). Das Bodenfeuchtedefizit im Frühjahr wirkt durch das Gedächtnis (z.B. ORTH & SENEVIRATNE 2012) der Bodenfeuchte bis in den borealen Sommer. Hier bewirkt die verringerte Bodenfeuchte eine Abnahme in der Evapotranspiration (Abb. 4.1-2c), so dass weniger Feuchtigkeit in die Atmosphäre zurückgeführt wird, und die niedrigere Luftfeuchtigkeit verursacht eine Verringerung des Niederschlags (Abb. 4.1-2d), was wiederum zu einer weiteren Verringerung der Bodenfeuchte führt. Diese Rückkopplungsschleife hebt die Bedeutung von physikalischen Prozessen an der Landoberfläche in den hohen Breiten für das regionale Klima hervor und ist bemerkenswert, da Bodenfeuchte – Atmosphären – Rückkopplungen bisher nicht im Forschungsschwerpunkt über die hohen Breiten lagen (s.o.).

Auswirkungen der Landnutzung und Bewässerung auf das Klima

Während der Einfluss anthropogener Emissionen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe in modernen Klimamodell-Simulationen gut etabliert ist, werden die möglichen Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf das Klima in langfristigen Klimasimulationen bisher weitgehend vernachlässigt. DALE (1997) überprüfte die Literatur, die sich mit der Beziehung zwischen Landnutzungs- und Klimawandel befasst und kam zu dem Schluss, dass Landnutzungsänderungen in den letzten Jahrhunderten viel größere Auswirkungen auf ökologische Größen hatten als der Klimawandel. PIELKE et al. (2002) dokumentierten, dass Landnutzungsänderungen das regionale und globale Klima sowohl durch das Oberflächenenergiebudget als auch durch den Kohlenstoffkreislauf beeinflussen, wobei die Auswirkungen des Oberflächenenergiebudgets vermutlich wichtiger sind

als die Kohlenstoffkreislaufeffekte. Während dies für vergangene Klimaperioden gilt, weisen die Ergebnisse von COX et al. (2000) darauf hin, dass Kohlenstoff-Rückkopplungen den Klimawandel im 21. Jahrhundert deutlich beschleunigen könnten, was die Notwendigkeit hervorhebt, die potenziell großen direkten menschlichen Einflüsse auf die terrestrische Kohlenstoffaufnahme durch Veränderungen in der Bodenbedeckung und Landwirtschaft genauer zu betrachten. Veränderungen an der Landoberfläche (Vegetation, Böden, Wasser) können das regionale Klima durch Veränderungen der Strahlungs- und Wasserflüsse, Bewölkung und Oberflächentemperatur beeinflussen, so dass die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen über Zeiträume von Jahrzehnten oder länger für das regionale Klima von größerer Bedeutung sein können (DENMAN et al. 2007). Die Auswirkungen einer spezifischen Landnutzungsänderung auf das Klima hängen von der Umgebung und den Klimateigenschaften ab, wie eine regionale Modellstudie von GAO et al. (2003) über China gezeigt hat.

Ein extremer anthropogener Einfluss auf die lokale Hydrologie ist die Bewässerung. Über 18% der weltweiten Anbaufläche werden bewässert (SIEBERT et al. 2005). Darüber hinaus wurden viele nichtlandwirtschaftliche Flächen durch menschliche Aktivitäten erheblich verändert. Die Umwandlung von natürlichen Landflächen in landwirtschaftlich genutzte, wirkt sich nicht nur auf die lokale Verdunstung und andere hydrologische Prozesse aus, sondern kann auch die Verteilung von Niederschlag und Verdunstungsbedarf in der umgebenden Landschaft beeinflussen und somit Auswirkungen auf die großräumige Zirkulation haben. Landwirtschaft und Stadtentwicklung haben im vergangenen Jahrhundert erheblich zugenommen und werden sich im 21. Jahrhundert weiter ausdehnen. Jede Abschätzung der weltweiten Wasserressourcen muss daher sowohl die direkten als auch die indirekten Einflüsse von Landnutzungsänderungen und der Nutzung des Flussnetzes berücksichtigen.

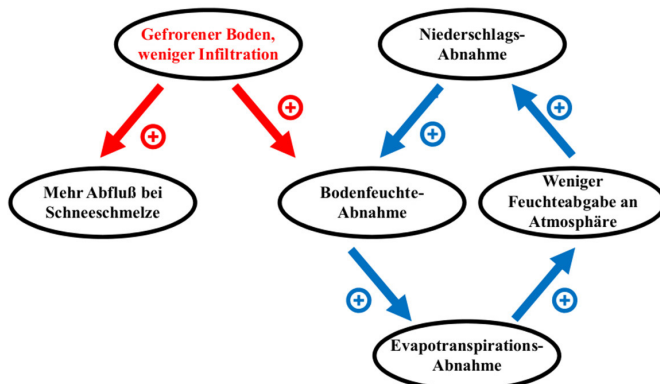


Abb. 4.1-1: Prozesskette, die bei der Bodenfeuchte-Niederschlags-Rückkopplung über den hohen Breiten beteiligt ist. Rote Pfeile zeigen den Beginn der positiven Rückkopplungsschleife durch das Vorhandensein von gefrorenem Boden im Frühjahr an, blaue Pfeile zeigen die ausgelöste Schleife im Sommer.

Die Bewässerung kann das regionale Klima erheblich beeinflussen (BOUCHER et al. 2004, LOBELL et al. 2009). So schwächt Bewässerung die Kopplung zwischen Land und Atmosphäre ab, wodurch Temperaturextreme ausgeglichen werden (THIERY et al. 2017). Ob sich eine Änderung der Bewässerung auch direkt auf Extremniederschläge auswirken kann, ist zurzeit jedoch noch unsicher (ALTER et al. 2015) und wenig untersucht. Allerdings kann ihre Rückkopplung auf den Niederschlag (TER MAAT et al. 2006) besonders stark werden, wenn die Bewässerung in Bereichen globaler Hotspots für Landoberflächen – Atmosphären-Rückkopplungen stattfindet. KOSTER et al. (2004) identifizierten die Sahel-Zone als einen der Hotspot-Bereiche für die Rückkopplung der Oberflächen-Bodenfeuchte auf nachfolgende Regenfälle. In diesem semiariden Gebiet ist die Bewässerung keine wichtige landwirtschaftliche Praxis, aber es ist eine Zunahme der konventionellen Landwirtschaft möglich, die in solch trockenen Gebieten empfindlich auf Niederschlagssummen reagiert. Eine Studie von TAYLOR et al. (2002) zeigte, dass zukünftige Änderungen der Landbedeckung (u.a. Ausweitung der Anbauflächen und damit gekoppelte Entwaldung) zu einem Rückgang der Niederschläge um fast 10% führen könnten. Ein weiterer Hotspot der

Bodenfeuchte – Niederschlagskopplung befindet sich über Indien (KOSTER et al. 2004). Der indische Subkontinent ist eine der am intensivsten bewässerten Regionen der Welt (SACKS et al. 2009), und viele Studien haben gezeigt, dass die Bewässerung das lokale Klima durch Rückkopplungsmechanismen verändert (z.B. DE ROSNAY et al. 2003, DOUGLAS et al. 2006). Die Auswirkungen der Bewässerung, die in den südasiatischen Sommermonsun eingebettet sind, betreffen 22% der Weltbevölkerung und spielen daher eine entscheidende Rolle bei der Veränderung der Wasserressourcen, der Landwirtschaft, der Wirtschaft und dem Überleben der Menschen in der Region. Daher wird dieses Thema im folgenden Abschnitt separat behandelt.

Einfluss der Bewässerung auf den Sommermonsun in Südasien

Bewässerungsunterstützte Landwirtschaft spielt eine essentielle Rolle für die globale Nahrungversorgung und für das Wohlergehen eines großen Teils der Weltbevölkerung, da sie zu ungefähr 40% zur globalen Produktion von Kulturpflanzen beiträgt (SIEBERT et al. 2005). Ferner besitzt sie einen substantiellen Einfluss auf die globalen Frischwasser-Ressourcen, denn derzeit werden ca. 70% des Frischwasserbedarfs der

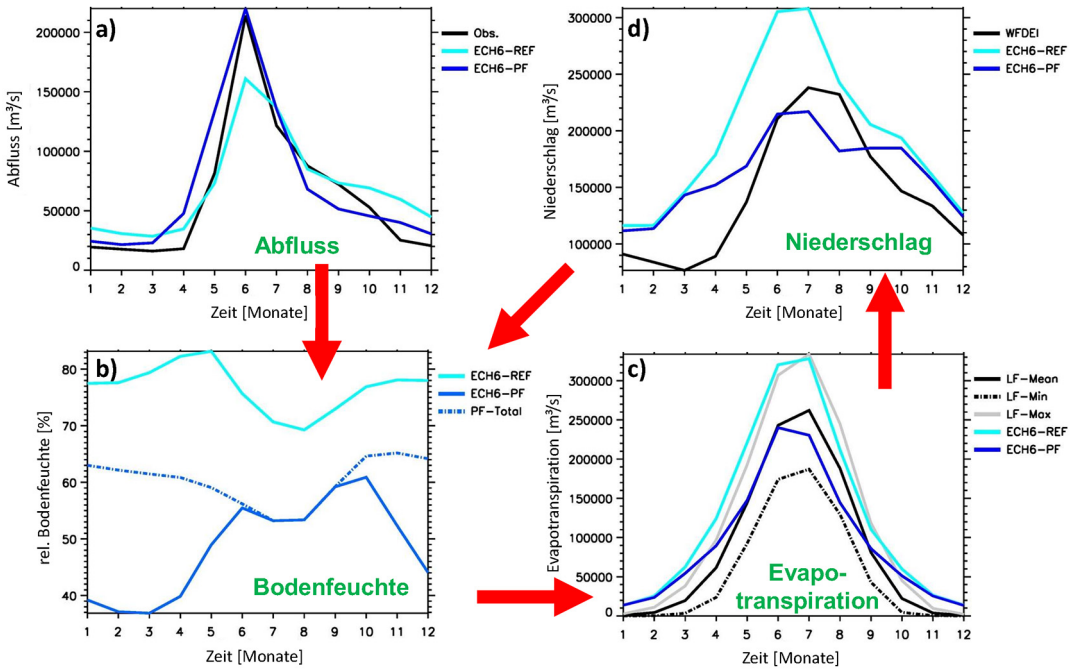


Abb. 4.1-2: Mittlere monatliche Klimatologien (1989-2009) über den Einzugsgebieten der 6 größten arktischen Flüsse. Die schwarzen Linien kennzeichnen verschiedene Beobachtungsdatensätze, ECH6-REF und ECH6-PF sind die Simulationen ohne (türkis) und mit (blau) Bodenfrostprozessen. In b) wird die relative (flüssige) Bodenfeuchte in der Wurzelzone dargestellt, wobei die gestrichelte blaue Linie das gesamte Bodenwasser (flüssig + gefroren) für ECH6-PF zeigt. In c) stellen LF-Mean, Min und Max Mittelwerte, Minimum und Maximum der diagnostischen Abschätzungen der Evapotranspiration aus dem LandFlux-EVAL-Datensatz (MUELLER et al. 2013) dar. In d) bezeichnet WFDEI Niederschläge aus den WFDEI-Daten (WEEDON et al. 2014), die auf Niederschlagsbeobachtungen des Global Precipitation Climatology Centre beruhen.

Menschheit durch Bewässerung verursacht (WADA et al. 2013). Man kann davon ausgehen, dass diese Zahlen in der näheren Zukunft mit der wachsenden Weltbevölkerung eher zu- als abnehmen werden. (DE FRAITURE & WICHELNS 2010). Die bewässerungsunterstützte Landwirtschaft wird durch sich ändernde Klimabedingungen und knapper werdenden Frischwasserressourcen nicht nur beeinflusst, sondern sie wirkt sich in umgekehrter Richtung auch auf diese aus. Durch die Umverteilung von Wasser beeinflusst sie stark den Wasserkreislauf und den Energiehaushalt an der Landoberfläche. Die geschätzte durch Bewässerung zusätzlich verursachte Verdunstung beträgt bis zu 2.600 km³/Jahr, was ungefähr 4% der gesamten terrestrischen Verdunstung entspricht (Gordon et al. 2005, OKI & KANAE 2006).

Der Einfluss der Bewässerung auf das lokale Klima wurde bereits in diversen numerischen Studien untersucht. Speziell für Südasien gibt es modellbasierte regionale Studien, die tiefgreifende Auswirkungen der Bewässerung auf die regionalen Zirkulationseigenschaften wie den Indischen Monsun, Niederschlag und Oberflächentemperaturen festgestellt haben (siehe DE VRESE et al. (2016) und Referenzen darin). Ein markantes Beispiel ist die Studie von SAEED et al. (2009), die den Einfluss der Bewässerung mit dem regionalen Klimamodell REMO abschätzen. Zum einen führt eine Vernachlässigung der Bewässerung in Simulationen des heutigen Klimas üblicherweise zu einer zu stark ausgeprägten Simulation des Hitze-Tiefs über Nord-

west-Indien und Pakistan (siehe auch LUCAS-PICHER et al. 2011). Zum anderen konnten sie zeigen, dass die Bewässerung über dem Indischen Subkontinent nicht nur das lokale Klima über den bewässerten Flächen ändert, sondern sich auch großräumig auf die Monsun-Zirkulation über Indien auswirkt. So führte die durch die Bewässerung erhöhte Verdunstung zu einer geringeren differentiellen Erwärmung des Landes gegenüber dem Ozean, was wiederum eine Abschwächung der (ohne Bewässerung zu starken) Westwinde aus dem Arabischen Meer in die indischen Ebenen zu Folge hatte. Dies schafft günstige Bedingungen für Monsun-Depressionen aus dem Golf von Bengalen, die mit starken Niederschlägen einhergehen, um tief in das Land bis in den Westen Indiens und Pakistans einzudringen. SAEED et al. (2009) konnten dieses Verhalten für die Entwicklung und Bewegung von mehreren Monsun-Tiefdruckgebieten illustrieren, die Regen in den westlichen Teil der indischen Halbinsel gebracht haben und die in der veröffentlichten Literatur diskutiert wurden. *Abb. 4.1-3* zeigt einen dieser Fälle vom 19. bis 21. September 1991 (MAHAJAN et al. 1995). Allen diesen Fällen ist gemeinsam, dass sich in der REMO-Simulation ohne Bewässerung in der Bucht von Bengalen eine Depression bildet, die sich jedoch bereits an der Ostküste Indiens auflöst. Nur in der Simulation mit Bewässerung kann die Depression tief in das Land nach Westindien und Pakistan eindringen und Feuchtigkeit und starke Niederschläge in diese Regionen transportieren, was mit

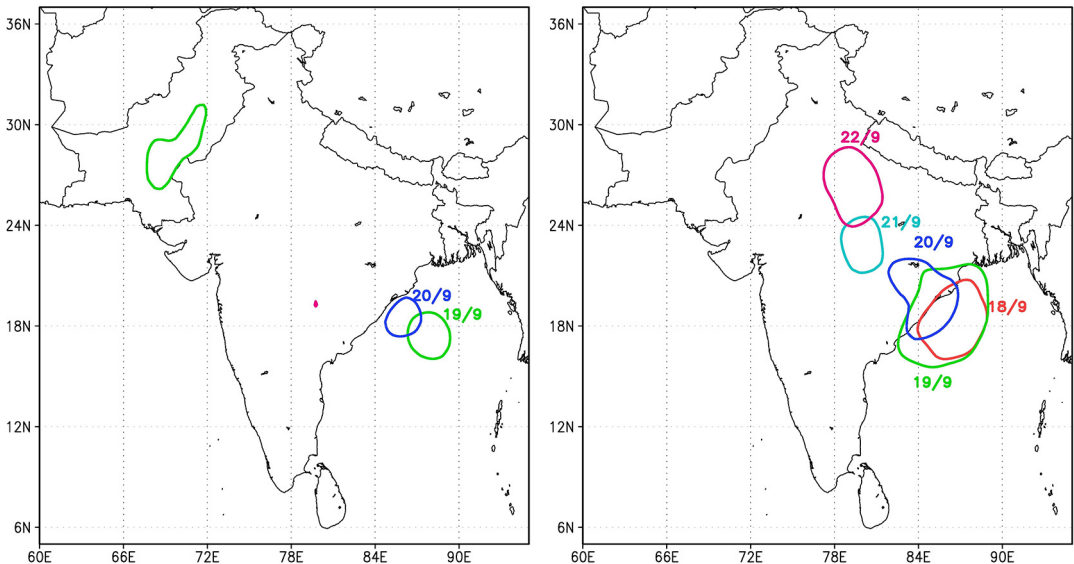


Abb. 4.1-3: Simulierte Entwicklung und Bewegung einer Monsun-Depression, die in der Zeit vom 18.-22. September 1991 beobachtet wurde: Die Panels zeigen die MSLP-Konturlinien bei 999 hPa um das Zentrum der Depression, simuliert von REMO ohne (links) und mit (rechts) Bewässerung [Quelle: HAGEMANN et al. 2013]. Die gezeigten Daten stammen aus REMO-Simulationen für die Jahre 1986-1992, die mit ERA40-Reanalysen als laterale Randbedingungen und als Meeresoberflächentemperatur angetrieben wurden.

Beobachtungen übereinstimmt. Zusammen mit dem erhöhten lokalen Recycling von Feuchte aufgrund der erhöhten Evapotranspiration, führt dies zu einer Zunahme der Niederschläge über Zentral-/Westindien und Pakistan, wodurch der systematische Modellfehler der zu geringen Niederschläge in diesem Gebiet verringert wird.

Die reine Menge des Wassers, welche die Atmosphäre aufgrund der Bewässerung zusätzlich erreicht, legt nahe, dass diese auch einen deutlichen Einfluss auf das globale Klima hat. Es existieren jedoch bisher erst wenige Studien, die dieses auf der globalen Skala untersuchen. In diesen Studien werden die generellen Mechanismen identifiziert, mit denen die Bewässerung den Zustand von Landoberfläche und Atmosphäre beeinflusst. An der Oberfläche verursacht Bewässerung eine Abkühlung durch verstärkte Verdunstung, während der zusätzliche Wasserdampfeintrag in die Atmosphäre dort eine erhöhte Absorption der solaren Einstrahlung verursachen kann. Dies verursacht eine Verstärkung des Treibhauseffektes, der zusätzlich durch kondensationsbedingte Wärmeabgabe intensiviert wird (BOUCHER et al. 2004). Ferner wirken sich Änderungen in den Wasserdampf- und Temperaturprofilen auf grundlegenden atmosphärische Prozesse wie Konvektion, Wolkenbildung und Niederschlag aus (SACKS et al. 2009). Allerdings haben sich die bisherigen Studien auf der globalen Skala nicht tiefergehend mit den dynamischen Mechanismen

beschäftigt, durch welche sich die Bewässerung in bestimmten Regionen auf den Zustand von Oberfläche und Atmosphäre in Gebieten auswirkt, die beträchtlich von den bewässerten Flächen entfernt sind.

Kürzlich jedoch haben DE VRESE et al. (2016) in einer Studie mit dem globalen Erdsystemmodell MPI-ESM herausgefunden, dass die Bewässerung in Asien nicht nur das lokale und regionale Klima verändert, sondern deren Effekte sogar über das Meer hinaus bis nach Afrika zu spüren sind. In manchen ariden Regionen von Ostafrika kann bis zu 40% des heutigen Niederschlags mit der bewässerungsunterstützten Landwirtschaft in Asien in Verbindung gebracht werden. *Abb. 4.1-4a* zeigt, dass die Bewässerung in Asien den dortigen Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre erhöht, welcher dann durch die vorherrschenden Winde in Frühling und Sommer über große Strecken transportiert wird. Dadurch nimmt der Wasserdampf über Ostafrika zu (*Abb. 4.1-4b*), was dort wiederum zu einem verstärkten Niederschlag führt (*Abb. 4.1-4c*). Andererseits reduziert die Bewässerung über Südasien den Wärmegradienten zwischen Land und Ozean, so dass die Monsunwinde in Simulationen mit Bewässerung schwächer sind als ohne. Die resultierende Abschwächung des ostasiatischen Monsuns verringert den Niederschlag und erhöht die Temperaturen in Südostasien (siehe *Abb. 3* in DE VRESE et al. 2016).

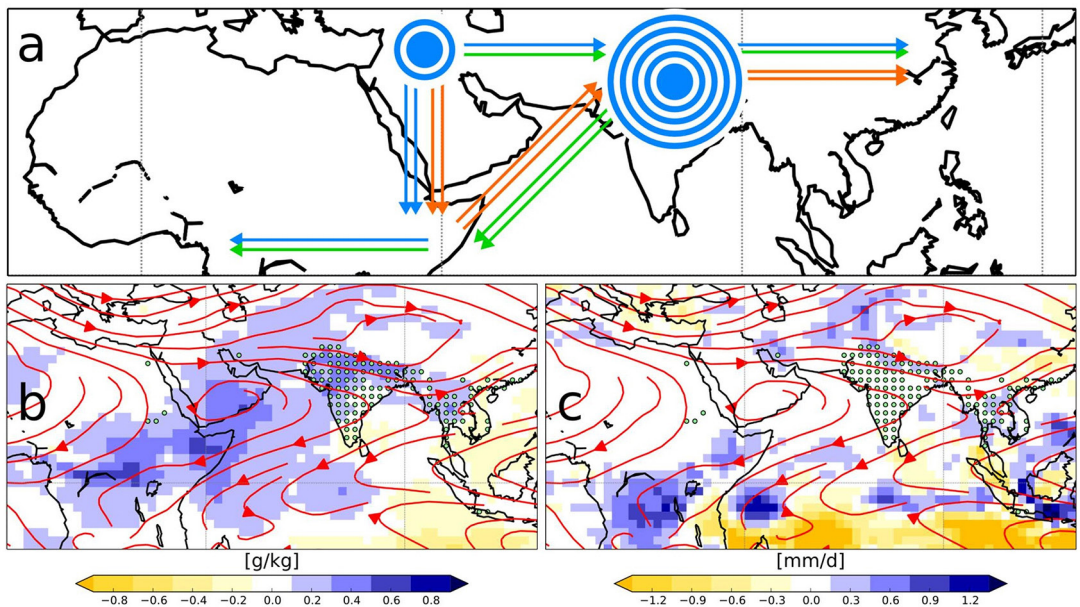


Abb. 4.1-4: Auswirkung der Bewässerung in Indien auf Ostafrika: (a) Schematische Darstellung troposphärischer Winde im frühen Frühling (grüne Pfeile), späten Frühling (blaue Pfeile) und Sommer (orange Pfeile) aus bewässerten Regionen (blaue Kreise); 20-jährige mittlere Differenzen von Februar-März für (b) die spezifische Feuchte in der unteren Atmosphäre (1.000-600 hPa) und (c) Niederschlag. Rote Stromlinien zeigen die Richtung der Winde in der unteren Troposphäre (1.000-600 hPa) in der Bewässerungssimulation, gepunktete Bereiche zeigen die mittlere Bewässerung pro Gitterbox > 3 mm/Monat (Quelle: DE VRESE et al. 2016).

Da der Einfluss der Bewässerung auf entfernte Regionen sehr empfindlich auf den bewässerungsinduzierten Feuchtefluss reagiert, ist es wahrscheinlich, dass sich eine zukünftige Ausdehnung oder Verringerung der bewässerten Flächen aufgrund eines erhöhten Nahrungsbedarfs oder abnehmender Frischwasser-Ressourcen auch auf Niederschlag und Temperaturen in entfernten Regionen auswirkt. Zudem kann die Bewässerung selbst auch den Grad einer möglichen zukünftigen Erwärmung verändern. So zeigen REMO-Simulationen von HAGEMANN et al. (2013) über Südasien, dass eine projizierte 2m-Temperaturänderung von 4-6 °C über Indien durch Bewässerung auf 2-4 °C verringert wird. Dies unterstreicht die Rolle, welche die Bewässerung bei der Abschwächung des Klimawandels über der südasiatischen Region spielen kann. Daraus kann ebenfalls geschlossen werden, dass die im Laufe des 20. Jahrhunderts zunehmende Bewässerung möglicherweise die jüngsten Signale des Klimawandels über dieser Region maskiert hat.

Ein großer Teil der Abflüsse im Indus-Becken werden der Schmelze von Schnee und Gletscher zugeschrieben. In Anbetracht der großen Auswirkungen der Bewässerung auf das Verhalten des Sommermonsuns über Südasien kann man davon ausgehen, dass sich die Zeiten der Wasserzuflüsse im Zuge der globalen Erwärmung in Richtung früherer Monate verschieben werden, was zu Veränderungen der Anbauformen und anschließend der Bewässerung führen kann. Da die Bewässerung das Signal des Klimawandels über den Monsun beeinflusst, werden Veränderungen der Bewässerungsmuster über dem Indus-Becken auch Auswirkungen auf die Monsun-Zirkulation und die damit verbundenen Regenfälle haben. Daher müssen nicht nur die Bewässerung selbst, sondern auch Veränderungen der Bewässerungsmuster für Klimastudien über der südasiatischen Monsun-Region betrachtet werden.

Während sich die Bewässerung positiv auf das südasiatische Monsun-Klima auswirkt, sieht das Bild anders aus für Bereiche, in denen der menschliche Wasserverbrauch zum Austrocknen und Schrumpfen von Oberflächengewässern führt (ASOKAN et al. 2010). Der damit verbundene Rückgang der Verdunstung aus diesen Oberflächengewässern wirkt dem direkten Bewässerungseffekt – der zunehmenden Evapotranspiration über bewässerten Landflächen – entgegen. Ein sehr prominentes Beispiel ist der Aralsee, der bis 1960 der viertgrößte See auf dem Globus mit einer Fläche von etwa 68.000 km² war. Großangelegte Bewässerungsaktivitäten in vielen Teilen von Zentralasien waren hauptsächlich für die katastrophale Austrocknung des Aralsees in den letzten fünf Jahrzehnten verantwortlich (siehe BRECKLE & GELDYEWA (2012) und Referenzen

darin). Die Frage, wie sich die Bewässerung auf das aktuelle Klima ausgewirkt hat oder wie sie das zukünftige Klima unter den Bedingungen der globalen Erwärmung in anderen Regionen beeinflussen könnte, ist ein wichtiges Thema für zukünftige Studien. Die Bewässerung führt auch in vielen Gebieten der Erde zu Grundwasserentnahmen (DÖLL et al. 2012). Wie dies das Klima und die Wasserressourcen beeinflussen kann, ist eine Perspektive für zukünftige Studien, da das derzeitige Wissen über die Auswirkungen der Veränderung des Grundwassers auf das Klima begrenzt ist.

Abschlussbetrachtung

In der vorliegenden Abhandlung sind wir auf relevante Wechselwirkungen zwischen Klima und terrestrischer Hydrologie eingegangen, die potentiell auch einen Einfluss auf Extremniederschläge haben können. Diese Wechselwirkungen werden oft durch unterschiedliche Kopplungsmechanismen zwischen Land und Atmosphäre verursacht. In vielen Regionen bestimmt der feuchte Zustand des Bodens (Bodenfeuchte, Feuchtgebiete, Bewässerung) die Rückkopplungseigenschaften. Diese Rückkopplungen wirken sich nicht nur auf der lokalen Ebene aus, sondern beeinflussen häufig auch großskalige Prozesse. In dieser Hinsicht kann auch die menschliche Landnutzung abgelegene Regionen beeinflussen, wie es für die Bewässerung über der südasiatischen Monsunregion gezeigt wurde. Da der Charakter der zugehörigen Rückkopplungen für verschiedene Regionen unterschiedlich ist und sich unter zukünftigen Klimabedingungen ändern kann, müssen sie in entsprechenden Modellierungsstudien berücksichtigt werden.

Literatur

- ALTER, R. E., Y. FAN, B. R. LINTNER & C. P. WEAVER (2015): Observational evidence that Great Plains irrigation has enhanced summer precipitation intensity and totals in the midwestern United States, *J Hydrometeorol* 16(4), 1717-1735.
- ASOKAN, S. M., J. JARSJÖ & G. DESTOUNI (2010): Vapor flux by evapotranspiration: effects of changes in climate, land-use and water-use. *J Geophys Res* 115, D24102, doi:10.1029/2010JD014417.
- BOUCHER, O., G. MYHRE & A. MYHRE (2004): Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapor and climate. *Clim Dyn* 22: 597-603, doi:10.1007/s00382-004-0402-4.
- BRECKLE, S.-W. & G. V. GELDYEVA (2012): Dynamics of the Aral Sea in Geological and Historical Times. In: S.-W. BRECKLE et al. (eds.), *Aral-kum - a Man-Made Desert: The Desiccated Floor of the Aral Sea (Central Asia)*, *Ecological Studies* 218: 13-35, DOI 10.1007/978-3-642-21117-1_2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- CESS, R. D., G. L. POTTER, M. H. ZHANG, J. P. BLANCHET et al. (1991): Interpretation of snow-climate feedback as produced by 17 general circulation models. *Science* 253: 888-892, doi:10.1126/science.253.5022.888.
- CLAUSSEN, M. (2004): The global climate. *Vegetation, Water, Humans and the Climate*. In: P. Kabat et al. (eds.), *Global Change - The IGBP Series* 24: 33-57, Springer.
- COX, P. M., R. A. BETTS, C. D. JONES, S. A. SPALL & I. J. TOTTERDELL (2000): Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408: 184-187.
- DALE, V. H. (1997): The Relationship Between Land-Use Change and Climate Change. *Ecol Appl* 7: 753-769.
- DE FRAITURE, C. & D. WICHELNS (2010): Satisfying future water demands for agriculture, *Agric Water Manage* 97(4), 502-511.
- DE ROSNAY, P., J. POLCHER, K. LAVAL & M. SABRE (2003): Integrated parameterization of irrigation in the land surface model OR-

- CHIDEE: Validation over Indian Peninsula, *Geophys Res Lett* 30: 1986, doi:10.1029/2003GL018024.
- DE VRESE, P., S. HAGEMANN & M. CLAUSSEN (2016): Asian Irrigation, African Rain: Remote Impacts of Irrigation. *Geophys Res Lett* 43, doi:10.1002/2016GL068146.
- DENMAN, K. L., G. BRASSEUR, A. CHIDTHAISONG, P. CIAIS et al. (2007): Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DIRMEYER, P., R. KOSTER & Z. A. D. GUO (2006): Do Global Models Properly Represent the Feedback between Land and Atmosphere? *J Hydrometeorol* 7: 1177-1198.
- DÖLL, P., H. HOFFMANN-DOBREV, F. T. PORTMANN, S. SIEBERT et al. (2012): Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *J Geodyn* 59(6): 143-156.
- DOUGLAS, E. M., D. NIYOGLI, S. FROKLING, J. B. YELURIPATI et al. (2006): Changes in moisture and energy fluxes due to agricultural land use and irrigation in the Indian Monsoon Belt. *Geophys Res Lett* 33: L14403. doi:10.1029/2006GL026550.
- FALLOON P. & R. A. BETTS (2010): Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation - The importance of an integrated approach. *Sci Total Environ* 408: 5667-5687.
- FISCHER, E. M., S. I. SENEVIRATNE, P. L. VIDALE, D. LÜTHI & C. SCHÄR (2007): Soil moisture - atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. *J Clim* 20: 5081-5099.
- GAO, X., Y. LUO, W. LIN, Z. ZHAO & F. GIORGI (2003): Simulation of effects of land use change on climate in China by a regional climate model. *Adv Atmos Sci* 20 (4): 583-592.
- GORDON, L. J., W. STEFFEN, B. F. JONSSON, C. FOLKE, M. FALKENMARK & A. JOHANNESSEN (2005): Human modification of global water vapour flows from the land surface. *P Natl Acad Sci USA* 102: 7612-7617.
- GUTOWSKI, W. J., F. OTIENO, R. W. ARRITT, E. S. TAKLE & Z. PAN (2004): Diagnosis and attribution of a seasonal precipitation deficit in a US regional climate simulation. *J Hydrometeorol.*, 5: 230-242.
- HAGEMANN, S., T. BLOME, F. SAEED & T. STACKE (2013): Perspectives in modelling climate-hydrology interactions Surveys in *Geophys.* 35: 739-764, ISSI special issue on Hydrological Cycle, doi:10.1007/s10712-013-9245-z.
- HAGEMANN, S., T. BLOME, A. EKICI & C. BEER (2016): Soil-frost-enabled soil-moisture-precipitation feedback over northern high latitudes. *Earth Syst. Dynam.* 7: 611-625, doi:10.5194/esd-7-611-2016.
- HARDING, R. J., M. BEST, E. BLYTH, S. HAGEMANN et al. (2011): Current knowledge of the terrestrial Global Water Cycle. *J Hydrometeorol* 12: 1149-1156, doi: 10.1175/JHM-D-11-024.1.
- HO-HAGEMANN, H. T. M., B. ROCKEL & S. HAGEMANN (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, dx.doi.org/10.3402/tellusa.v67.28661.
- KOSTER, R. D., P. A. DIRMEYER, Z. GUO, G. BONAN et al. (2004): Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science* 305: 1138-1140.
- KOSTER, R. D., Z. GUO, P. A. DIRMEYER, G. BONAN et al. (2006): GLACE: The Global Land-Atmosphere Coupling Experiment. Part I: Overview. *J Hydrometeorol* 7: 590-610.
- LOBELL, D., G. BALA, A. MIRIN, T. PHILLIPS, R. MAXWELL & D. ROTMAN (2009): Regional differences in the influence of irrigation on climate. *J Clim* 22: 2248-2255, doi:10.1175/2008JCLI2703.1.
- LORENZ, R., E. B. JAEGER & S. I. SENEVIRATNE (2010): Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory. *Geophys Res Lett* 37, L09703, doi:10.1029/2010GL042764.
- LÖW, A., T. HOLMES T & R. DE JEU (2009): The European heat wave 2003: early indicators from multisensoral microwave remote sensing? *J Geophys Res* 114: D05103.
- LUCAS-PICHER, P., J. H. CHRISTENSEN, F. SAEED, P. KUMAR, S. ASHARAF, B. AHRENS, A. WILTSHIRE, D. JACOB & S. HAGEMANN (2011): Can regional climate models represent the Indian monsoon? *J Hydrometeorol* 12: 849-868, doi:10.1175/2011JHM1327.1.
- MAHAJAN, P. N., D. R. TALWALKAR, G. R. CHINTHALU & S. RAJAMANIET (1995): Use of INSAT winds for better depiction of monsoon depression over Indian region. *Meteorol Appl* 2: 333-339.
- MUELLER, B., M. HIRSCHI, C. JIMENEZ, P. CIAIS et al. (2013): Benchmark products for land evapotranspiration: LandFlux-EVAL multi-dataset synthesis, *Hydrol Earth Syst Sci* 17, 3707-3720, doi:10.5194/hess-17-3707-2013.
- OKI, T. & S. KANAE (2006): Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, 313(5790), 1068-1072.
- ORTH, R. & S. I. SENEVIRATNE (2012): Analysis of soil moisture memory from observations in Europe. *J Geophys Res* 117, D15115.
- PAN, Z., J. H. CHRISTENSEN, R. W. ARRITT, W. J. GUTOWSKI JR., E. S. TAKLE & F. OTIENO (2004): Evaluation of uncertainties in regional climate change simulations. *J. Geophys. Res.*, 106: 17735-17752.
- PIELKE S. R., R. A., G. MARLAND, R. A. BETTS, T. N. CHASE, J. L. EASTMAN, J. O. NILES et al. (2002): The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Phil Trans R Soc Lond A* 360: 1705-1719, doi:10.1098/rsta.2002.1027.
- PITMAN, A. J., N. DE NOBLET-DUCOUDRE, F. B. AVILA, L. V. ALEXANDER et al. (2012): Effects of land cover change on temperature and rainfall extremes in multi-model ensemble simulations, *Earth Syst Dyn* 3, 213-231, doi: 10.5194/esd-3-213-2012.
- QUESADA, B., R. VAUTARD, P. YIOU, M. HIRSCHI & S. I. SENEVIRATNE (2012): Asymmetric European summer heat predictability from wet and dry southern winters and springs, *Nat Clim Chang* 2(10), 736-741, doi:10.1038/nclimate1536.
- RANDALL, D. A., R. A. WOOD, S. BONY, R. COLMAN et al. (2007): Climate Models and Their Evaluation. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- SACKS, W. J., B. I. COOK, N. BUENNING, S. LEVVIS & J. H. HELKOWSKI (2009): Effects of global irrigation on the near-surface climate, *Clim Dyn* 33: 159-175, doi:10.1007/s00382-008-0445-z.
- SAEED, F., S. HAGEMANN & D. JACOB (2009): Impact of irrigation on the South Asian Summer Monsoon. *Geophys Res Lett* 36, L20711, doi:10.1029/2009GL040625.
- SENEVIRATNE, S. I., & R. STÖCKLI (2008): The role of land-atmosphere interactions for climate variability in Europe. In: *Climate Variability and Extremes during the Past 100 years*. In: BRÖNNMANN et al. (eds.), *Adv Global Change Res* 33, Springer Verlag. (Book chapter)
- SENEVIRATNE, S. I., D. LÜTHI, M. LITSCHI & C. SCHÄR (2006): Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443: 205-209.
- SENEVIRATNE, S. I., T. CORTI, E. DAVIN, M. HIRSCHI et al. (2010): Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Syst Sci Rev* 99: 125-161, doi:10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- SIEBERT, S., P. DÖLL, J. HOOGEVEEN, J.-M. FAURÉS, K. FRENKEN & S. FEICK (2005): Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrol Earth Syst Sci* 9:535-547.
- TAYLOR, C. M., E. F. LAMBIN, N. STEPHENNE, R. J. HARDING & R. L. H. ESSERY (2002): The influence of land use change on climate in the Sahel. *J Clim* 15: 3615-3629.
- TAYLOR, C. M., C. E. BIRCH, D. J. PARKER et al. (2013): Modeling soil moisture-precipitation feedback in the Sahel: Importance of spatial scale versus convective parameterization, *Geophys Res Lett* 40, 6213-6218, doi:10.1002/2013GL058511.
- TER MAAT, H. W., R. W. A. HUTJES, R. OHBA, H. UEDA et al. (2006): Meteorological impact assessment of possible large scale irrigation in Southwest Saudi Arabia. *Global Planet Change* 54: 183-201.
- TEULING, A. J., M. HIRSCHI, A. OHMURA, M. WILD et al. (2009): A regional perspective on trends in continental evaporation. *Geophys Res Lett* 36, L02404, doi:10.1029/2008GL036584.
- THIERY, W., E. L. DAVIN, D. M. LAWRENCE, A. L. HIRSCH et al. (2012): Present-day irrigation mitigates heat extremes, *J. Geophys Res Atmos* 117: 1403-1422, doi:10.1002/2016JD025740.
- WADA, Y., D. WISSER, S. EISNER, M. FLÖRKE et al. (2013): Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change, *Geophys Res Lett* 40, 4626-4632, doi:10.1002/grl.50686.
- WEEDON, G. P., G. BALSAMO, N. BELLOUIN, S. GOMES, M. J. BEST & P. VITERBO (2014): The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data, *Water Resour Res* 50, doi:10.1002/2014WR015638.

Kontakt:

Dr. Stefan Hagemann (stefan.hagemann@hzg.de)
Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Institut für Küstenforschung
Dr. Tobias Stacke
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Hagemann, S. & T. Stacke (2018): Wechselwirkungen von Klima und Hydrologie. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Graf, D. Kasang & R. Weisse (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Extremereignisse*. pp. 153-160. Online: www.klimawarnsignale.uni-hamburg.de. DOI: 10.25592/warnsignal.klima.extremereignisse.22.