

## Auswirkungen der Bewässerung auf den südasiatischen Monsun

### Impact of irrigation on the South Asian summer monsoon

Hagemann, Stefan; Saeed, Fahad

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Korrespondierender Autor

E-Mail: [stefan.hagemann@zmaw.de](mailto:stefan.hagemann@zmaw.de)

---

#### Zusammenfassung

Der indische Subkontinent stellt die am stärksten bewässerte Region der Welt dar. Mit dem regionalen Klimamodell REMO wird gezeigt, dass die Bewässerung einen deutlichen Einfluss auf den Monsun hat. Mit Bewässerung wird nicht nur ein Modelldefizit in Temperatur und Bodendruck über NW-Indien/Pakistan reduziert, sondern es bewirkt auch, dass Tiefdruckgebiete von der bengalischen Bucht tiefer ins Landesinnere bis nach Pakistan vordringen können. Dieser Prozess wird ohne Bewässerung unterdrückt. Daher ist deren Berücksichtigung in Klimamodellen für eine realistische Monsun-Simulation notwendig.

#### Summary

The Indian subcontinent is one of the most intensely irrigated regions of the world. Using the regional climate model REMO distinct feedbacks of the monsoon circulation with irrigation processes could be shown. With irrigation, a significant model bias in temperature and mean sea level pressure over NW India/Pakistan was removed. Moreover conditions were created favourable for currents from Bay of Bengal to intrude deep into western India and Pakistan that have been unrealistically suppressed before. Thus, the representation of irrigated water is unavoidable for a realistic monsoon simulation.

#### 1. Einleitung

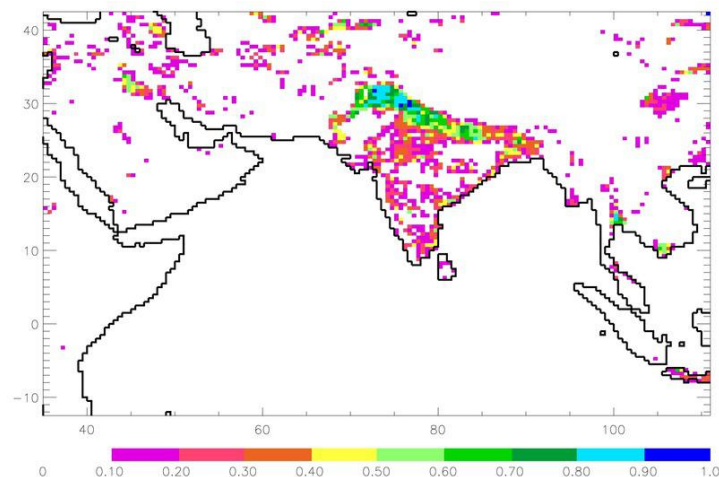
Da das Wohlergehen von 22% der Weltbevölkerung erheblich vom Jahresniederschlag beeinflusst wird, spielt in vielen Ländern Asiens der südasiatische Sommer-Monsun (SASM) eine maßgebende Rolle für die Wasser-Ressourcen, Landwirtschaft, Ökonomie und Lebensqualität. Daher ist das Verständnis von Prozessen, die den Monsun beeinflussen, sowohl von starkem wissenschaftlichen als auch gesellschaftlichen Interesse. Südasiens ist eine der am meisten bewässerten Regionen der Welt. Diverse Studien haben daher die Rolle der Bewässerung untersucht, insbesondere wie diese das lokale Klima durch verschiedene Mechanismen beeinflusst. Betrachtet man die Komplexität der Prozesse, die mit dem SASM verbunden sind, so ergibt sich daraus die Notwendigkeit, den Einfluss des Bewässerungseffekts auch auf größeren räumlichen und zeitlichen Skalen zu untersuchen.

Seit mehr als einer Dekade wird der Kerndruck des Hitze-Tiefs über NW-Indien und Pakistan als wichtiger

Indikator für den SASM-Niederschlag benutzt [1]. Der größte Teil dieses Hitzetiefs überdeckt dabei das dichtbewässerte Einzugsgebiet des Indus. Dieser Fluss besitzt das größte kontinuierliche Bewässerungsnetzwerk der Welt, und die Komponenten des Wasserkreislaufs an der Landoberfläche werden durch große Dämme, Kanäle, Wasserführungen, etc. stark modifiziert, was zu beträchtlichen Änderungen im Bodenwasser geführt hat [2]. Man schätzt, dass nur ca. 1/8 des Niederschlags im Indus-Gebiet die Mündung als Abfluss erreicht, während das restliche Wasser hauptsächlich für die Bewässerung genutzt wird und letztlich durch Verdunstung in die Atmosphäre gelangt [3]. Daher kann vermutet werden, dass diese Nutzung des Wassers zur Bewässerung das lokale Klima in der Hitzetief-Region modifiziert, und vermutlich auch die groß-skalige SASM-Zirkulation beeinflussen kann.

## 2. Methode

Im Rahmen einer Studie wurde das regionale Klimamodell REMO [4] über Südasien mit einer Auflösung von  $0,5^\circ$  (ca. 55 km) angewendet, wobei es am Rand mit Re-Analysedaten des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage angetrieben wurde (ERA40, [5]). Die Referenz-Simulation, die mit der Standard-Version ohne Bewässerung durchgeführt wurde, umfasst den Zeitraum von 1958-2000, wobei die ersten drei Jahre wegen der Einschwingphase des Modells unberücksichtigt blieben. Um in einer zweiten Simulation die Bewässerung zu berücksichtigen, wurde eine Karte der bewässerten Flächen [6] verwendet (**Abb. 1**).



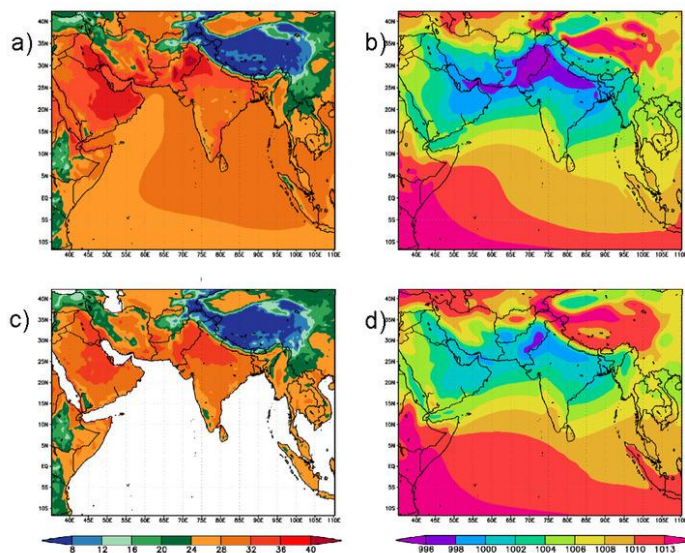
**Abb. 1:** Anteil der bewässerten Fläche in Südasien nach [6].  
© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Für den bewässerten Anteil einer Gitterbox wurde dann in jedem Zeitschritt die Bodenfeuchte derart erhöht, dass die maximale Verdunstung stattfinden kann. Hierbei wird angenommen, dass die Bewässerung optimale Bedingungen für die Vegetation/Nutzpflanzen herstellt, so dass diese mit der maximalen Rate transpirieren können. Diese Sensitivitätsstudie mit Bewässerung wurde für den Zeitraum 1986-1992 durchgeführt, wobei wiederum die ersten drei Jahre wegen der Einschwingphase verworfen wurden. Im Folgenden werden alle Ergebnisse als zeitliche Mittelwerte über die vier Monsun-Monate Juni, Juli, August und September (JJAS) präsentiert.

## 3. Ergebnisse der REMO-Simulation ohne Bewässerung

Das REMO-Standardmodell ist in der Lage, die generellen Eigenschaften des SASM zu simulieren (siehe auch [7]). Auffällig ist jedoch ein systematischer Temperaturfehler über großen Landflächen des indischen

Subkontinents, der besonders ausgeprägt (mehr als 5°C) über der Hitzetief-Region (siehe oben) des Indus ist (**Abb. 2a, c**). Hier simuliert REMO die Lage des Hitzetiefs, jedoch ist dieses Druckgebilde zu stark ausgeprägt, da mit der überschätzten Temperatur auch eine deutliche Unterschätzung des Druckes auf Meeresspiegelhöhe (MSLP; **Abb. 2b, d**) einhergeht.



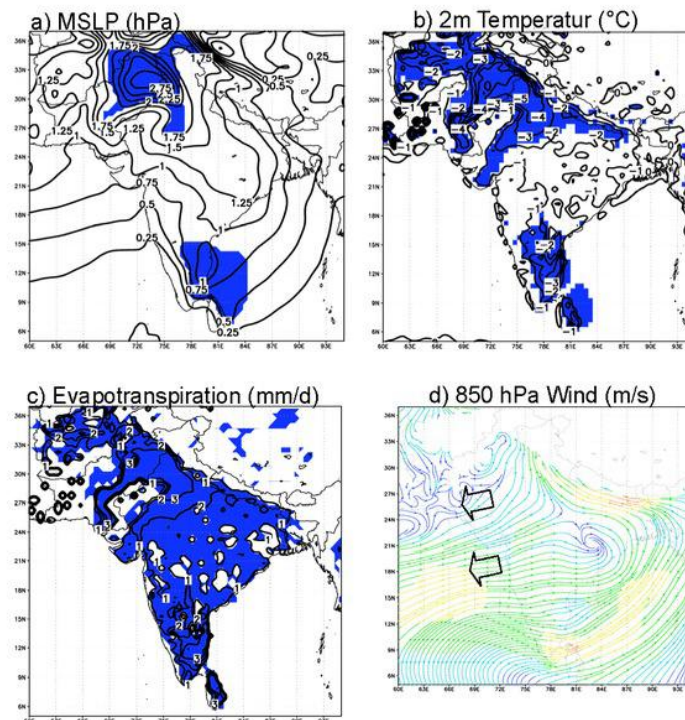
**Abb. 2:** Simulierte (oben) und beobachtete (unten) Sommer-Klimatologien (JJAS) für den Zeitraum 1961-2000: 2m Temperatur [°C] (links, REMO und Beobachtungen der Climate Research Unit [9]) und Bodendruck MSLP [hPa] (rechts, REMO und ERA40 [5]).

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Diese zu ausgeprägte Simulation des Hitzetiefs ist ein weit verbreiteter, systematischer Fehler, der in vielen regionalen Klimamodellen über Südasien auftritt [8]. In REMO führt dies zu einer verstärkten differentiellen Erwärmung des Landes relativ zum Ozean, was wiederum zu intensive Westwinde zur Folge hat, die vom arabischen Meer her die indischen Ebenen beeinflussen. Zu Zeiten, in denen der Monsun aussetzt, spielen diese Winde nur eine passive Rolle, da sich üblicherweise die Monsunströmungen von der bengalischen Bucht entweder nach Norden entlang des Hügelvorlands des Himalaya oder in die südliche Halbinsel verlagern. In diesem Fall können diese Westwinde tiefer in die Ebenen von Zentralindien vordringen [10]. In der REMO-Simulation führt die zu starke Erwärmung des Landmassen jedoch dazu, dass die Westwinde eine aktive Rolle einnehmen und durch ihr Eindringen bis nach Zentralindien bewirken, dass die westwärtige Verlagerung von Strömungen und Tiefdruckgebieten aus der bengalischen Bucht bis nach Westindien und Pakistan unterdrückt wird. Infolgedessen wird weniger Wasser in diese Region transportiert, was zu einer Unterschätzung des Niederschlags führt.

#### 4. Ergebnisse der REMO-Simulation mit Bewässerung

Wenn der Einfluss der Bewässerung im Modell berücksichtigt wird, wird eine deutlich realistischere Simulation des SASM-Klimas erzielt. **Abbildung 3** vergleicht die Änderungen, die sich aus den REMO-Simulationen mit und ohne Bewässerung für den Zeitraum 1989-1992 ergeben.



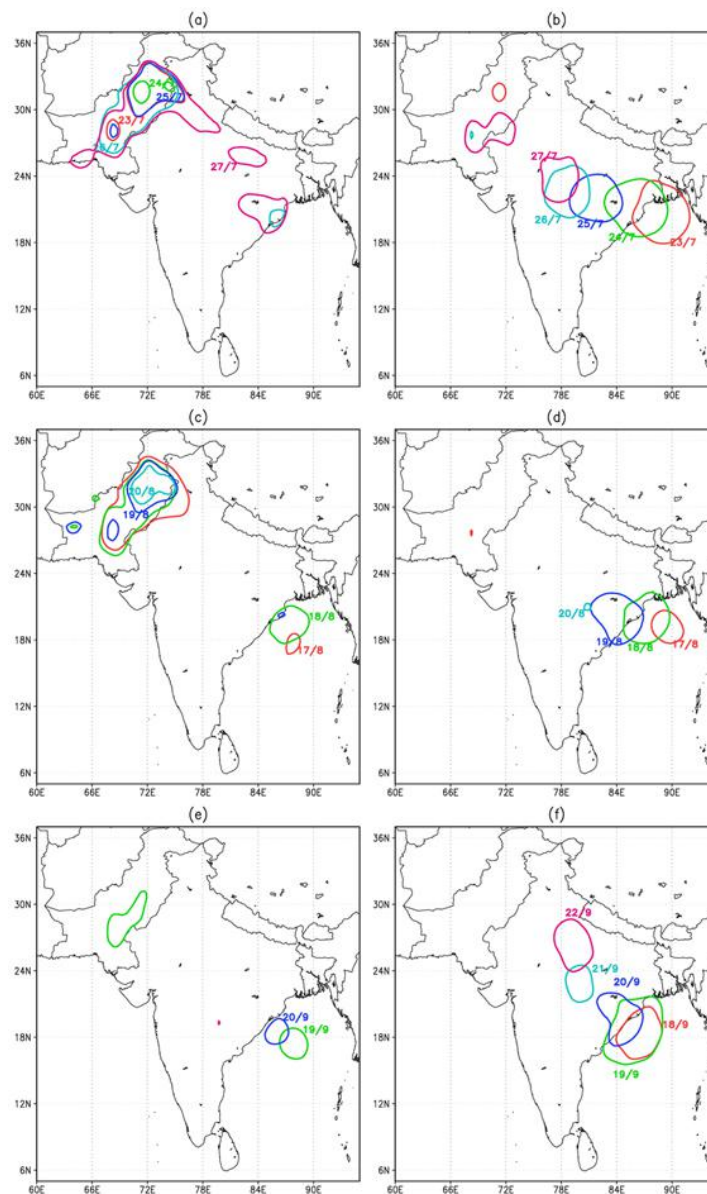
**Abb. 3:** Differenzen verschiedener Größen der REMO-Simulationen mit und ohne Berücksichtigung der Bewässerung der Sommermittelwerte (JJAS) für den Zeitraum 1989-1992: a) MSLP [hPa], b) 2m Temperatur [°C], c) Evapotranspiration [mm/d] und 850 hPa Wind [m/s]. Die schattierten blauen Flächen kennzeichnen signifikante Änderungen (90% Level eines Zweistichproben-t-Tests).  
© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Es lassen sich deutliche Verbesserungen der Simulation der Temperatur- und MSLP-Verteilung über der ganzen Region erkennen, welche besonders deutlich und statistisch signifikant in den Einzugsgebieten des Indus und des Ganges sowie in Südindien sind (Abb. 3a, b). Für diese Regionen treten im Standardmodell die größten systematischen Fehler auf. Abbildung 3c zeigt, dass sich die Evapotranspiration (ET; Summe aus Oberflächenverdunstung und Transpiration der Pflanzen) durch die Bewässerung signifikant über dem ganzen indischen Subkontinent erhöht, wobei die stärksten Änderungen im Indus-Gebiet und in Südindien auftreten. Im Indus-Gebiet beträgt die ET nun ca. 92% des Niederschlages, was deutlich näher am beobachteten Wert von 84% [3] liegt als in der Simulation ohne Bewässerung (ca. 52%). Eine Überschätzung des beobachteten Wertes war zu erwarten, da im Experiment optimale Bewässerungsbedingungen angenommen wurden.

Die reduzierte differentielle Erwärmung des Landes relativ zum Ozean sorgt für eine Verminderung der zu starken Westwinde, die vom arabischen Meer auf die indischen Ebenen ziehen (Abb. 3d). Dadurch werden Bedingungen geschaffen, die es Monsun-Tiefdruckgebieten erleichtern, von der bengalischen Bucht aufs Land bis nach Westindien zu ziehen. Dieses verdeutlicht **Abbildung 4**, in der die Bewegung diverser Tiefdruckgebiete in beiden Simulationen verfolgt wird.

Alle drei Beispiele in Abbildung 4 belegen, dass sich ohne Berücksichtigung der Bewässerung ein Tiefdruckgebiet in der bengalischen Bucht bildet, dieses jedoch an der Ostküste Indiens stoppt und sich wieder auflöst. Nur im Modelllauf, in dem die Bewässerung berücksichtigt wird, ist es möglich, dass diese Gebilde tiefer ins Landinnere nach Westen vorstoßen, und damit auch Wasser und Niederschlag nach NW-Indien und Pakistan transportieren können. Zusammen mit dem verstärkten lokalen *Recycling* von Feuchte infolge der größeren Evapotranspiration sorgt dies für eine Verstärkung des Niederschlags in NW-Indien und

Pakistan, so dass die dortige Unterschätzung des Niederschlags deutlich verringert wird.



**Abb. 4:** Simulierte Entwicklung und Bewegung von Monsun-Tiefdruckgebieten in REMO ohne (links) und mit (rechts) Bewässerung: Dargestellt sind a, b) 993 hPa MSLP für 23-27.07.1991, c, d) 996 hPa MSLP für 17-20.08.1990, und e, f) 999 hPa MSLP für 18-22.09.1991.

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

## 5. Schlussfolgerung

Die vorgestellte Studie untersucht die Rolle der Bewässerung auf die Temperaturverteilung und die damit verbundenen Änderungen der großskaligen Zirkulation und des Niederschlags auf dem indischen Subkontinent mit Hilfe von Simulationen des regionalen Klimamodells REMO. Zur Untersuchung dieser Fragestellung war es notwendig, die Auswirkungen der Bewässerung über dem Indus-Einzugsgebiet zu betrachten, wenn man den Einfluss der Bewässerung auf den SASM analysieren möchte. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die Berücksichtigung des für die Bewässerung verwendeten Wassers in Klimamodellen notwendig ist, um eine realistische Simulation der SASM-Zirkulation und der damit verbundenen Niederschlagsverteilung zu erzielen.

Es konnte gezeigt werden, dass die bisherige Vernachlässigung der Bewässerung die Hauptursache für einen systematischen Modellfehler über der Hitzetief-Region in NW-Indien und Pakistan ist, der zu einer Überschätzung (zu warm, zu tief) dieses Hitzetiefs führt. Durch eine Berücksichtigung der Effekte infolge der Bewässerung im Modell konnte dieser systematische Fehler entfernt werden. Die Bewässerung führte nicht nur zu einer verstärkten Evapotranspiration und zu einem verstärkten vertikalen Austausch, die den lokalen Niederschlag intensivieren, sondern auch zu einer Abschwächung des simulierten Hitzetiefs, infolgedessen es zu abgeschwächten Westwinden vom arabischen Meer kam, so dass Tiefdruckgebiete von der bengalischen Bucht tiefer ins Landesinnere nach Westindien und Pakistan eindringen. Dies wiederum hatte zur Folge, dass systematische Fehler im simulierten Niederschlag (Überschätzung an der Küste der bengalischen Bucht, Unterschätzung in Zentral- und Westindien/Pakistan) entfernt bzw. reduziert wurden.

Zurzeit stammen 80% des Indus-Abflusses aus dem Schmelzwasser von Schnee und Gletschern. Als Folge der globalen Erwärmung kann man davon ausgehen, dass eine Verschiebung des zeitlichen Verhaltens der Zuflüsse hin zu einem früheren Zeitpunkt im Jahr auftreten wird, mit dem auch Änderungen in den landwirtschaftlichen Bepflanzungsplänen und der Bewässerung einhergehen werden. Wenn man den ausgeprägten Effekt der heutigen Bewässerung auf das Verhalten des SASM berücksichtigt, kann gefolgert werden, dass zukünftige Änderungen im Bewässerungsverhalten wiederum einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die SASM-Zirkulation und die damit verbundenen Niederschlagsfelder haben werden. Dieser Effekt muss zusätzlich zu Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den SASM ins Kalkül bezogen werden.

Detaillierte Ergebnisse der Studie wurden veröffentlicht als:

Saeed, F.; Hagemann, S.; Jacob, D.: Impact of irrigation on the South Asian Summer Monsoon. *Geophysical Research Letters* **36**, L20711, doi:10.1029/2009GL040625 (2009).

[1] **Singh, D.; Bhadram, C. V. V.; Mandal, G. S.**

**New regression model for Indian summer monsoon rainfall**

*Meteorology and Atmospheric Physics* 55, 77-86, doi:10.1007/BF01029603 (1995)

[2] **Khan, S.; Rana, T.; Gabriel, H. F.; Muhammad, K. U.**

**Hydrogeologic assessment of escalating groundwater exploitation in the Indus Basin, Pakistan**

*Hydrogeology Journal* 16, 1635-1654, doi:10.1007/s10040-008-0336-8 (2008)

[3] **Karim, A.; Veizer, J.**

**Water balance of the Indus River Basin and moisture source in the Karakoram and western Himalaya: Implications from hydrogen and oxygen isotopes in river water**

*Journal of Geophysical Research* 107(D18), 4362, doi:10.1029/2000JD000253 (2002)

[4] **Jacob, D.; Bärring, L.; Christensen, O. B.; Christensen, J. H.; Hagemann, S.; Hirschi, M.; Kjellström, E.; Lenderink, G.; Rockel, B.; Schär, C.; Seneviratne, S. I.; Somot, S.; van Ulden, A.; van den Hurk, B.**

**An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance**

*Climatic Change (Prudence Special Issue)* 81, Supplement 1, 31-52 (2007)

[5] **Uppala, S. M., et al.**

**The ERA-40 re-analysis**

*Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131, 2961-3012, doi:10.1256/qj.04.176 (2005)

[6] **Siebert, S.; Döll, P.; Hoogeveen, J.; Faures, J.-M.; Frenken, K.; Feick, S.**

**Development and validation of the global map of irrigation areas**

Hydrology and Earth System Sciences 9, 535-547 (2005)

[7] **Saeed, F.; Hagemann, S.; Jacob, D.**

**A framework for the evaluation of the South Asian Summer Monsoon in a regional climate model applied to REMO**

International Journal of Climatology 32, 430-440, doi:10.1002/joc.2285 (2012)

[8] **Lucas-Picher, P.; Christensen, J. H.; Saeed, F.; Kumar, P.; Asharaf, S.; Ahrens, B.; Wiltshire, A.; Jacob, D.; Hagemann, S.**

**Can regional climate models represent the Indian monsoon?**

Journal of Hydrometeorology 12, 849-868, doi:10.1175/2011JHM1327.1 (2011)

[9] **Brohan, P.; Kennedy, J. J.; Harris, I.; Tett, S. F. B.; Jones, P. D.**

**Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850**

Journal of Geophysical Research 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548 (2006)

[10] **Prasad, V. S.; Hayashi, T.**

**Active, weak and break spells in the Indian summer monsoon**

Meteorology and Atmospheric Physics 95, 53-61, doi:10.1007/s00703-006-0197-4 (2007)