

# Bangladesch – integriertes Monitoring in einer klimasensitiven Region

Jürgen Kusche, Bernd Uebbing, Roelof Rietbroek, Luciana Fenoglio-Marc, Amelie Bernzen und Boris Braun

## Zusammenfassung

Die Küstenregion Bangladeschs ist vom Klimawandel in mehrfacher Hinsicht betroffen: Häufige Überschwemmungen im Delta von Ganges, Brahmaputra und Meghna sowie ein Meeresspiegelanstieg über dem globalen Mittel mit Folgen wie Erosion und Versalzung treffen hier zusammen. Im Rahmen einer internationalen Forschergruppe wurde unter Einbeziehung von natur- und sozialwissenschaftlichen Aspekten ein integriertes Monitoring-Konzept für diese Region entwickelt. Hier berichten wir über gemessene Veränderungen von Wasserkreislauf und küstennahem Meeresspiegel und analysieren, ob derartige Umweltveränderungen auch tatsächlich zu Migrationsbewegungen und Landnutzungswandel führen, wie häufig angenommen.

## Summary

The coastal region of Bangladesh is affected by climate change in multiple ways: flooding occurs frequently in the Ganges–Brahmaputra–Meghna delta, and sea level rise is above global average, leading to river blocking, erosion and salinization. Our international research team including natural and social scientists has developed an integrated monitoring concept for this region. In this article we report the measured, ongoing changes in the water cycle and in coastal sea level dynamics. We further analyze whether such environmental stressors indeed lead to migration and to land use changes, which are often assumed.

**Schlüsselwörter:** Meeresspiegelanstieg, Bangladesch, Wasserkreislauf, Landnutzung, Migration

## 1 Einleitung

Bangladesch, mit dem Zusammenfluss von Ganges, Brahmaputra, und Meghna (GBM), formt eines der größten Deltas der Welt. Die Region bildet die Lebensgrundlage für über 100 Millionen Menschen und beinhaltet auch die über 17 Millionen Einwohner zählende Metropole Dhaka.

Monsunregen in den riesigen Einzugsgebieten der Flüsse, die überwiegend in Indien liegen, führen immer wieder zu schweren Überschwemmungen, die in manchen Jahren bis zu 2/3 der Landesfläche von Bangladesch betreffen. Es wird erwartet, dass die Magnitude und Häufigkeit dieser Überflutungen durch Entwaldung und Klimawandel im Himalaya sowie durch den steigenden

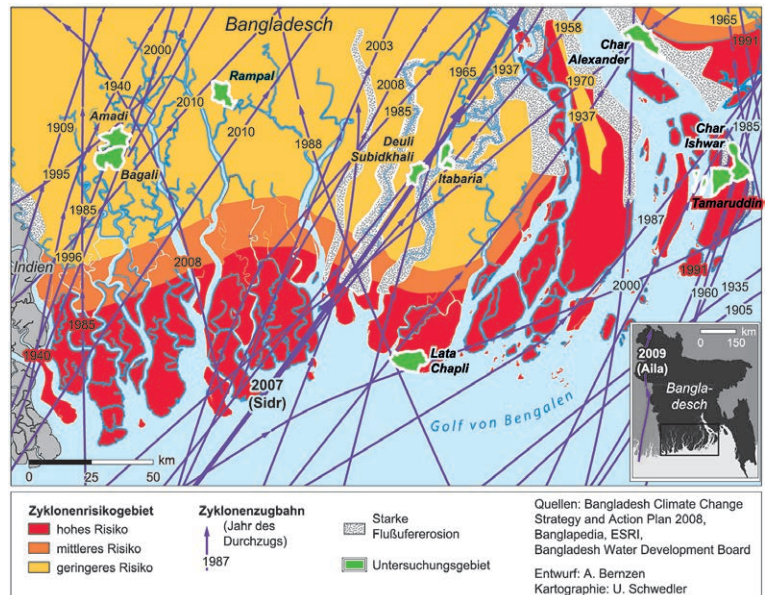


Abb. 1: Zugbahnen von Zyklonen und Flussufererosion im Küstenraum von Bangladesch sowie Lage der Untersuchungsgebiete dieser Studie

Meeresspiegel verstärkt werden. Hinzu kommt, dass sich über 600 km<sup>2</sup> des Küstenbereiches auf einem Niveau von weniger als 2 m über dem Meeresspiegel befinden; hierzu zählen auch die über 130 der Küstenlinie vorgelagerten Polder sowie weite Teile des UNESCO-Weltnaturerbes Sundarbans-Nationalpark. Die Mangrovenwälder der Sundarbans realisieren dabei bislang einen natürlichen Schutzwall gegenüber Sturmfluten und Zyklonen, von denen die gesamte Küstenregion Bangladeschs regelmäßig betroffen ist (siehe Abb. 1).

In den letzten Dekaden ist die Küsten- und Deltaregion von Bangladesch tatsächlich von erheblichen Umweltveränderungen betroffen, die allgemein auf den Klimawandel zurückgeführt werden. In der öffentlichen Debatte gilt Bangladesch mit seiner insgesamt wenig ausgeprägten Industrialisierung und CO<sub>2</sub>-Emission damit als einer der Verlierer im Klimawandel. Messungen (Shahid 2010, Endo et al. 2015) und Projektionen (IPCC 2007) belegen eine signifikante Zunahme von Niederschlägen in Bangladesch sowie in den riesigen Einzugsbereichen der großen Flüsse. Die Anzahl extremer Trockenperioden und Überflutungen nimmt insbesondere in den letzten 20 Jahren ebenfalls deutlich zu (Dastagir 2015), was allgemein der Erwärmung in den Oberläufen von Ganges und Brahmaputra sowie einer fortschreitenden Entwaldung zugeschrieben wird. Dagegen wird in der Literatur eher bezweifelt, dass die zunehmende Gletscherschmelze

in den Ganges- und Brahmaputra-Einzugsgebieten zu häufigeren Überflutungen und Dürren führt, anders als etwa im Indus-Becken (Hofer und Messerli 2006, Miller et al. 2012). Unklar ist auch, ob es beim Monsun, dessen Genese und Ausprägung von atmosphärischen Zirkulationssystemen sowie der Meeresoberflächentemperatur im südasiatischen Raum abhängt und der von der komplexen Topographie des Himalaya beeinflusst wird, bereits zu signifikanten Veränderungen gekommen ist (Loo et al. 2015). Dagegen ist unbestritten, dass wasserbauliche Großprojekte, überwiegend in Indien (etwa der Farakka-Staudamm), zu einer Verschärfung der Probleme für Bangladesch geführt haben.

Es wird aber auch angenommen, dass der Meeresspiegelanstieg (absolut etwa 6 mm/a) in Kombination mit vertikalen Landbewegungen ebenfalls für häufigere Überflutungen in den Küstenbereichen ursächlich ist. Brown und Nicholls (2015) ermittelten aus 205 Messungen verschiedensten Typs für Senkungen eine mittlere Rate von 5,6 mm/a, einen Median von 2,9 mm/a, und eine Standardabweichung von 7,3 mm/a. Höhere Meeresspiegel führen zu höheren Tidenhochwässern und zu Veränderungen in den Tiden selber (Pethik und Orford 2013), zur Blockierung der Flüsse, verstärkter Erosion, und zu einer fortschreitenden Versalzung von ursprünglich fruchtbaren Flächen.

In der Küstenregion stellt die Landwirtschaft die vorwiegende Landnutzung dar. Dabei wird das zur Verfügung stehende Land knapper. Prognosen gehen davon aus, dass sich diese Situation verschärfen wird. Allerdings liegen die Gründe nicht alleine bei den erwähnten Umweltfaktoren wie Überschwemmungen und Erosion, sondern sind auch durch die Bevölkerungszunahme sowie die Verteilungsgerechtigkeit und Machtasymmetrien zwischen staatlichen, unternehmerischen und privaten Landnutzern gegeben.

Während in der hiesigen Presse häufig Szenarien zur umfangreichen Migration von Küstenbewohnern in die großen Städte und ins Ausland (Klimaflüchtlinge) beschrieben werden, ist die tatsächliche Bedeutung negativer Umweltveränderungen auf Bevölkerungsentwicklung, Migrationsströme und Landnutzungsänderungen jedoch bislang noch weniger erforscht.

Unsere Arbeiten wurden 2013 bis 2017 durch das Belmont-Forum ([www.belmontforum.org](http://www.belmontforum.org)) im Rahmen des Projektes »Bangladesh Delta: Assessment of the causes of sea-level rise hazards and integrated development of predictive modeling towards mitigation and adaptation (Band-AID)« im Call »Coastal Vulnerability« gefördert. Das Belmont-Forum, ein Zusammenschluss von Förderorganisationen aus etwa 20 Ländern, unterstützt regelmäßig Verbundprojekte in themenorientierten Calls im Bereich der inter- und transdisziplinären Umweltforschung. Erklärtes Ziel ist es dabei, naturwissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Forschung zusammenbringen, um aus dieser Zusammenarbeit einen Mehrwert zu generieren.

In diesem Aufsatz gehen wir zunächst der Frage nach, welche Aussagen zu Umweltveränderungen sich mit Hilfe eines integrierten geodätischen Monitoringsystems ableiten lassen, das in Bangladesch weitgehend auf Satellitenverfahren beschränkt sein muss. Im zweiten Teil werden wir die sozio-ökonomische Bedeutung dieser Veränderungen analysieren.

## 2 Das Projekt Band-AID

In die Überwachung und Vorhersage von Wasserständen in Flüssen und an der Küste ist in Bangladesch eine ganze Reihe staatlicher und halbstaatlicher Institutionen involviert, oft im Rahmen von Projekten der Weltbank oder der Asiatischen Entwicklungsbank:

Das Institute for Water Modelling in Dhaka (IWM) betreibt unter anderem ein Netz von Flusspegeln, auch im Mündungsbereich des Golfs von Bengalen, sowie ein umfangreiches Ensemble von Simulations- und Vorhersageprogrammen. Das IWM befasst sich auch mit Höhenmessungen entlang von Flüssen und im Küstenbereich, und operiert ein NASA/USAID-gefördertes und von der Tennessee Technological University entwickeltes operationelles Frühwarnsystem, das auf Jason-2 Höhenmessungen basiert (Hossain et al. 2014). Auch das Bangladesh Water Development Board (BWDB) befasst sich mit dem Monitoring von Pegelhöhen. Das BWDB betreibt ein weiteres, auf Stationsdaten basierendes operationelles Frühwarnsystem für Überschwemmungen. Die Landesvermessung, der Survey of Bangladesh (SOB), ist für die Bereitstellung der Höhenbezugsfläche, den nivellitischen Anschluss von Pegelstationen sowie für den Betrieb eines Kernnetzes von GNSS-Permanentstationen zuständig. Auch die Universität von Dhaka betreibt, zusammen mit amerikanischen Partnern, ein GNSS-Überwachungsnetz für tektonische Analysen. Das Bangladesh Meteorological Department (BMD) ist schließlich für die Vorhersage von Zyklonen, Niederschlag, Sturmfluten und Seegang verantwortlich.

Im Band-AID Projekt war als lokaler Partner das IWM mit seiner Coast, Port and Estuary Division beteiligt. Das IWM hat damit auch die Koordination mit den anderen Einrichtungen in Bangladesch übernommen. Die Gesamtkoordination von Band-AID erfolgte durch das Team von Prof. C.K. Shum an der Ohio State University in Columbus, USA.

Das Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Universität Bonn hat sich mit der Analyse von Radaraltimetermessungen sowohl im Golf von Bengalen als auch im Bereich der großen Flüsse, von Pegelmessungen sowie von Schwerefeldbeobachtungen der Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Satellitenmission beteiligt, während der französische IRD (Institut de Recherche pour le Développement), Toulouse, Expertise in der GPS-Auswertung, Installation von Pegelstationen sowie hydrodynamischen Modellierung beisteuerte.

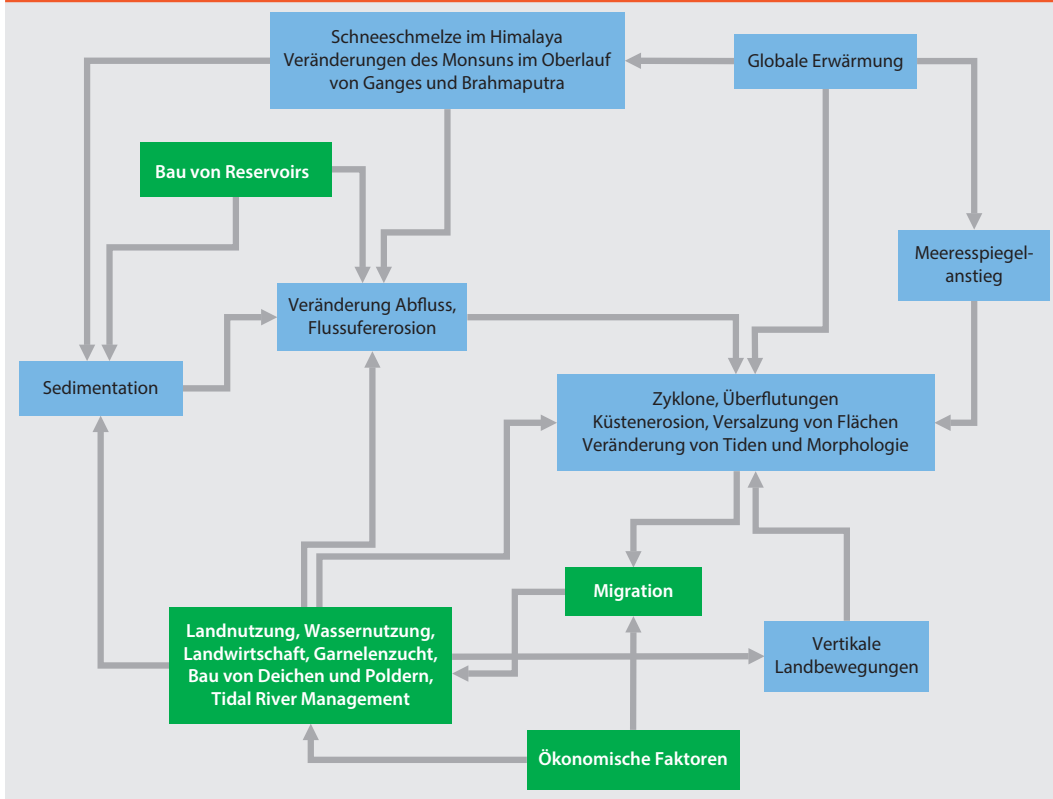


Abb. 2: Prozesse als Gegenstand naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Forschung in Band-AID; grün: anthropogene Effekte, blau: Umweltveränderungen

Im Bereich der sozialwissenschaftlichen Fragestellungen beteiligte sich die Universität zu Köln mit dem Geographischen Institut sowie die Ohio State University mit der Division for Geodetic Science und dem Mershon Centre for International Security Studies an dem Projekt. Durchgeführt wurden in diesem Zusammenhang Untersuchungen zu Landsenkungseffekten, unter anderem mit Hilfe von Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR-) Messungen, sowie zum Einsatz von Fernerkundungsmethoden für die Quantifizierung von Überflutungsflächen und der Radaraltimetrie zur Messung von Wasserständen in Flüssen. Mit sozialwissenschaftlichen Methoden wurden mögliche Adaptions- bzw. Anpassungsmaßnahmen ländlicher Haushalte im Hinblick auf die vielfältigen Herausforderungen und Risiken im Zusammenhang mit Umweltveränderungen analysiert. Im Fokus standen hierbei vor allem Fragen der Migration und der Landnutzung.

Die für ein Verständnis von Umweltveränderungen im Küstenbereich wichtigsten Prozesse, die den Kontext des Projektes bildeten, sind in Abb. 2 dargestellt. Spezifische

naturwissenschaftliche Fragestellungen die adressiert wurden, sind beispielsweise: (1) Welche großräumigen Veränderungen im Wasserkreislauf können derzeit durch geodätische und Fernerkundungsverfahren beobachtet werden? (2) Welcher Anstieg des Meeresspiegels wird derzeit beobachtet, und welche spezifischen globalen und regionalen Effekte sind die Ursachen dafür? (3) Ist es möglich Landsenkungen zu quantifizieren? (4) Sind Pegelmessungen (siehe Abb. 3 zur Lage der Stationen) repräsentativ für den relativen Meeresspiegelanstieg entlang der gesamten Küste? (5) Sind die Meeresspiegelszenarien des IPCC repräsentativ für die Region? (6) Lassen sich geodätische Messungen auch für die Kalibrierung des operationellen Meeresspiegel- und Flutvorhersagesystems verwenden?

Spezifische sozialwissenschaftliche Fragestellungen umfassen vor allem die folgenden Punkte: (1) Welche sozio-ökonomischen und umweltbedingten Faktoren tragen zu Landnutzungsänderung und zu Veränderungen im Lebensunterhalt von kleinbäuerlichen Haushalten bei, und welche Rolle spielen dabei Umweltveränderungen? (2) Welcher Zusammenhang besteht zwischen Umweltveränderungen, wie Überschwemmungen, Meeresspiegelanstieg, Erosion und Versalzung, und Migration? (3) Welche Motive sind für die Migration bestimmend und welche räumlichen Muster nimmt diese an?

### 3 Ausgewählte Ergebnisse

An dieser Stelle kann nur eine Auswahl von Ergebnissen zusammengefasst werden. Wir werden im Folgenden zunächst auf die großräumigen Veränderungen im Wasserhaushalt und Meeresspiegelbudget eingehen, wie sie mit

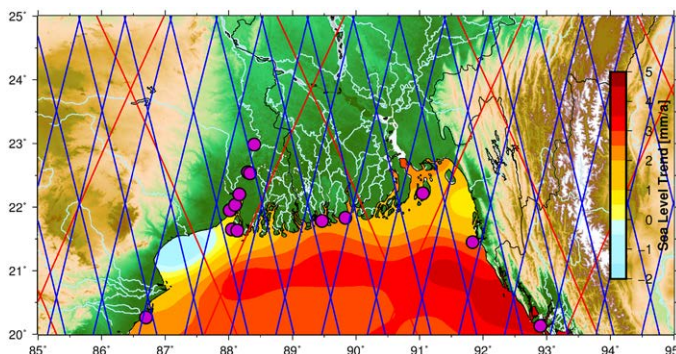


Abb. 3: Bodenspuren der Altimetersatelliten und Lage der Küsten- bzw. Flusspegel im Mündungsbereich

Hilfe der GRACE-Satelliten beobachtet werden können. Dann werden wir geodätische Messungen im Küstenbereich und ihre Nutzung zur Validierung von operationellen Modellen beschreiben, und schließlich die Ergebnisse zu den Ursachen des Landnutzungswandels und der Landnutzungsdiversifizierung im Küstenraum sowie zur Analyse von Migrationsströmen zusammenfassen. Insgesamt werden wir uns auf die letzten 10 bis 25 Jahre beschränken. Detailliertere Darstellungen der Projektergebnisse können in Bernzen et al. (2016), Braun et al. (2016, 2017) und Kusche et al. (2016) gefunden werden.

Texte und Bilder zum Projekt wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) in ihr multimedialen Webangebot zum Klimawandel im Rahmen des Wissenschaftsjahrs 2016/17 »Meere und Ozeane« aufgenommen ([www.wissenschaftsjahr.de](http://www.wissenschaftsjahr.de)). Ein durch Prof. Feisal Hossain (Univ. Washington) erstelltes populärwissenschaftliches Video »Bay of Hope« zu BanD-AID in Bangla kann mit englischen, französischen oder deutschen Untertiteln in YouTube abgerufen werden.

### 3.1 Großräumige Veränderungen des Wasserhaushalts

In einer Reihe von Studien konnte bereits früh gezeigt werden, dass die Daten der GRACE-Satellitenmission erlauben, die Wassermassen der großen Überschwemmungen in Bangladesch zu quantifizieren (Andersen et al. 2008, Steckler et al. 2010). Projektziel war es hier jedoch, das Potential der GRACE-Satellitenmission zur Quantifizierung langfristiger Veränderungen im Wasserkreislauf, wie sie aufgrund des Klimawandels erwartet werden, zu bestimmen. Veränderungen von Niederschlag und Abfluss- oder auch Sedimentationsraten der Flüsse (Schätzungen gehen davon aus, dass Ganges und Brahmaputra jeweils mehrere hundert Millionen Tonnen Sedimente in den Indischen Ozean spülen) sind einigermaßen gut dokumentiert, sie unterliegen aber großen Schwankungen und können nicht das gesamte Bild des Wasserhaushaltes beschreiben.

Mit Hilfe der Daten der GRACE-Satellitenmission wurden deshalb zunächst Trends und Zeitreihen der totalen Wasserspeicherung über der GBM-Region betrachtet. Abb. 4 zeigt, dass im GRACE-Zeitraum das Gesamtvolumen der Wasserspeicherung in Bangladesch sowie im Einzugsgebiet von Ganges und Brahmaputra dramatisch abnimmt. Dies hängt zum Teil auch mit dem Rückzug der Gletscher im Himalaya zusammen, deren Massenbilanz sich in den GRACE-Daten jedoch nicht separat auflösen lässt.

Abb. 5 zeigt vergleichbare Trends, die mit Hilfe des globalen hydrologischen Modells WaterGAP (Döll et al. 2003) abgeleitet wurden. Auch hier findet sich eine massive Abnahme der Wassermenge insbesondere im Norden Bangladeschs. WaterGAP integriert neben Niederschlags- und Temperaturdaten auch Statistiken zur Bewässerung

und Grund- und Oberflächenwassernutzung und bietet eine deutlich höhere räumliche Auflösung. Allerdings ist die Zuverlässigkeit von Modellen in der datenarmen Region schwierig einzuschätzen. Des Weiteren berücksichtigt das Modell WaterGAP keine Veränderungen von Gletschern, wie in der Abbildung deutlich wird. Aber auch die von GRACE beobachtete Zunahme der Wassermenge im Oberlauf des Irrawaddy im Norden Myanmars kann das hydrologische Modell nicht korrekt wiedergeben.

Unsere GRACE-Ergebnisse passen recht gut zu Berechnungen von Shamsudduha et al. (2012), die aus Daten von Grundwassermessstellen schließen, dass die GRACE-Trends 2003 bis 2007 in Bangladesch zum großen Teil durch Grundwasserentnahmen für die landwirtschaftliche Nutzung bedingt sind. Wie in Kusche et al. (2016) dargestellt, herrschen im GRACE-Zeitraum in den Einzugsgebieten von Ganges und Brahmaputra zunächst leicht positive Trends vor, die sich dann ab etwa 2004 bis 2005 umkehren.

Mit maximal etwa 100.000 m<sup>3</sup>/s realisieren Ganges und Brahmaputra den drittgrößten Süßwasserzufluss in den globalen Ozean, bei starken saisonalen Unterschieden zwischen Frühjahr und Monsunsaison. Langjährige Messungen des Abflusses von Ganges und Brahmaputra an den Stationen Hardinge Bridge und Bahadurabad, die inzwischen auch mit radaraltimetrischen Messungen kombiniert werden konnten (Papa et al. 2012), lassen zwar auch hohe Jahr-zu-Jahr-Variabilitäten erkennen, jedoch ist kein klarer Trend auszumachen. Insgesamt ist

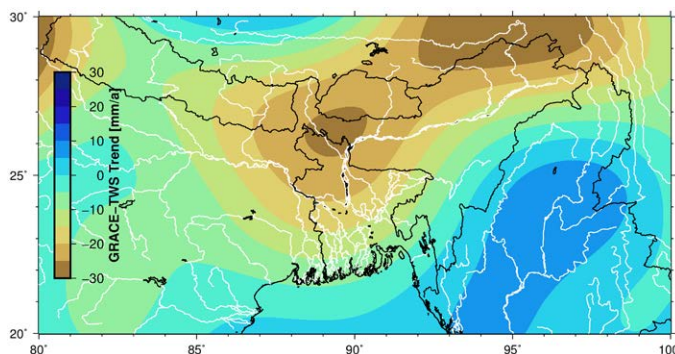


Abb. 4: Trends der Gesamtwasserspeicherung aus GRACE

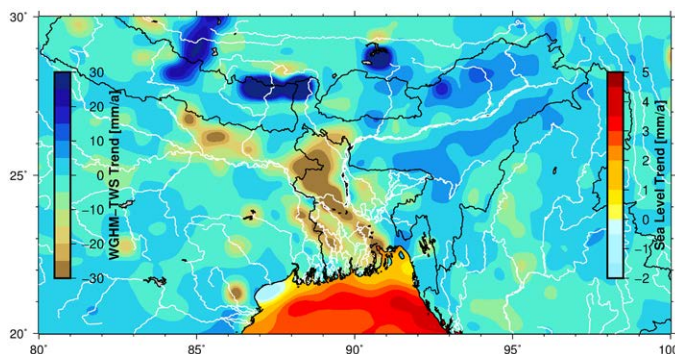


Abb. 5: Trends der Gesamtwasserspeicherung aus dem hydrologischen Modell WaterGAP sowie Meereshöhenänderungen aus der Altimetrie

es aufgrund der schwierigen Datensituation in der Region derzeit nicht möglich, die von GRACE beobachteten Veränderungen der Wasserbilanz neben Effekten der direkten Wassernutzung eindeutig klimatischen Veränderungen im Unterlauf der Flüsse, also dem Niederschlag oder indirekten anthropogenen Effekten wie einer Veränderung der Landnutzung, zuzuordnen.

Abb. 4 kann weiter entnommen werden, dass GRACE auch im Küstenbereich sowie im gesamten nördlichen Golf von Bengalen eine Zunahme an Wassermenge detektiert. In BanD-AID haben wir uns die Frage gestellt, wieweit sich diese Ergebnisse auch zum Verständnis des regionalen Meeresspiegelanstiegs und damit zur Entwicklung besserer Projektionen nutzen lassen. In Abb. 5 sind dafür auch die seit 2003 von Radaraltimetersatelliten beobachteten absoluten (geozentrischen) Trends im Meeresspiegel dargestellt. Im gesamten Golf (hier nach Definition der International Hydrographic Organization) macht dieser Anstieg etwa 6,1 mm/a aus (Kusche et al. 2016), also etwa das Doppelte des globalen Mittels. Regionale Projektionen mit einem Zeithorizont von 2050, wie sie beispielsweise für die von der Weltbank finanzierte Erneuerung des Polder- und Deichsystems (Coastal Embankment Improvement Project) notwendig sind, sollten die Ursachen dieser beobachteten Trends berücksichtigen: Hier wäre die Erwärmung des Indischen Ozeans zu nennen (Lee et al. 2015), Veränderungen in den auflandigen Winden, aber auch vertikale Landbewegung entlang der Küste.

Neben einem stetigen Meeresspiegelanstieg sind im Golf von Bengalen starke Jahr-zu-Jahr-Variationen zu finden; dies macht die Ableitung von linearen Veränderungsdaten aus kurzen Zeitreihen allerdings problematisch. Temperaturänderungen in den oberen Schichten des Indischen Ozeans, die mit dem Indian Ocean Index IOD korrelieren, dominieren wahrscheinlich die interannualen Schwankungen (Llovel et al. 2011, Lee et al. 2015). Andere relevante Effekte sind Veränderungen der Monsunwinde sowie Variationen der Zirkulation im Golf aufgrund des stark schwankenden Frischwassereintrags aus dem Delta (Durand et al. 2011). Insbesondere im Küstenbereich kann eine starke saisonale Variation der Meereshöhe mit 20 bis 30 cm Amplitude beobachtet werden, die mit entlang der Küste propagierenden planetaren Wellen zusammenhängt, die im tropischen Indischen Ozean generiert werden (Sreenivas et al. 2012).

Eine detaillierte Partitionierung (Chambers 2006) allein des von Satelliten oder Pegeln im Küstenbereich beobachteten Meeresspiegelanstiegs ist aus verschiedenen Gründen nicht möglich. Wenn wir der Methodik von Rietbroek et al. (2016) folgen, lässt sich für den gesamten Golf von Bengalen das Meeresspiegelbudget in etwa wie folgt zusammenfassen, wobei die Unsicherheiten erheblich sind: Etwa 1,1 mm/a trägt der Rückgang der großen Eisschilde Grönland und Antarktis zum Anstieg bei, 0,3 bis 0,4 mm/a die Gletscher der Welt einschließlich des Himalaya, während mit etwa  $-0,3$  mm/a die Landmassen

der Erde (anders als die GBM-Region) insgesamt derzeit Wasser aufnehmen und so den Anstieg eher bremsen (siehe auch Rietbroek et al. 2016, Kusche et al. 2016 Tab. 4). Insgesamt liegt die massenbezogene Rate (die GRACE beobachtet) bei etwa 1,2 mm/a, mit einer signifikanten jährlichen Zunahme von etwa 0,06 mm/a. Deutlich über dem globalen Mittel liegt mit 3,1 mm/a die wärmebedingte Zunahme des Meeresspiegels im Golf von Bengalen, was auch für den gesamten Indischen Ozean derzeit zutrifft (s. a. Llovel et al. 2011). Unsere kombinierte Analyse von Radaraltimetrie- und GRACE-Messungen passt recht gut zu Messungen, die wir vergleichsweise aus Ozean-temperatur- und Salzgehaltsdaten des Argo-Netzes von Ozeanmessbojen abgeleitet haben (Kusche et al. 2016). Werden diese Ergebnisse nun mit Projektionen für die Erwärmung des nördlichen Indischen Ozeans aus dem CMIP5-Projekt kombiniert, lässt sich beispielsweise unter dem RCP8.5-Szenario ein Anstieg des absoluten Meeresspiegels im Golf von Bengalen von 40 cm für 2050 relativ zu 2005 berechnen (Kusche et al. 2016). Das ist etwas geringer als von der Weltbank (World Bank 2000) prognostiziert, liegt jedoch oberhalb nationaler Berechnungen, die meist auf einem globalen mittleren Meeresspiegelanstieg basieren.

Ein zentrales Problem bleibt jedoch, dass sich Satellitenmessungen und Modellrechnungen auf absolute (geozentrische) Meeresspiegelveränderungen beziehen. In der Küstenregion Bangladeschs kommt es sowohl aufgrund tektonischer Veränderungen als auch anthropogener Wasserentnahmen zu Landsenkungen (Brown und Nicholls 2015), zu denen noch Veränderungen der effektiven Landhöhe aufgrund von teils natürlichen und veränderlichen Sedimentationsprozessen, teils anthropogenen Maßnahmen (Tidal River Management) hinzukommen. Rechnet man nur 5,6 mm/a (Brown und Nicholls 2015) zu den Abschätzungen von Kusche et al. (2016) hinzu, würde sich ein zusätzlicher relativer Meeresspiegelanstieg von 25 cm bis zum Jahr 2050 (mit Bezug auf 2005) ergeben.

Vertikale Landbewegungen sind in der Region schwierig zu quantifizieren; so waren bislang Küsten- oder Flusspegel nicht mit GNSS-Empfängern ausgestattet. Permanente GNSS-Stationen befinden sich in Bangladesch



Foto: Stephane Calmant, IRD

Abb. 6: Direkter Vergleich von Altimetermessungen mit GPS



Abb. 7: Im Projekt installierte GNSS-Pegelstation Char-changa

eher im Landesinneren oder in den tektonisch aktiveren und erdbebengefährdeten Regionen an der Grenze zu Myanmar. Zudem fallen Monumente der Landesvermessung im Küstenbereich regelmäßig Zyklonen und Überflutungen zum Opfer. Im Rahmen vom Band-AID Projekt konnten die Stationen Charchanga und Cox's Bazar im Jahr 2014 mit neuen GNSS-überwachten Radarpegeln ausgestattet werden (Abb. 7).

Um trotz unbekannter Landbewegung zumindest das Potential der vorhandenen PSMSL- (Permanent Service for the Mean Sea Level-) Küstenpegel für wissenschaftliche Untersuchungen einschätzen zu können, haben wir in Band-AID schließlich trendfreie Zeitreihen der drei Stationen Chittagong, Chennai und Vishakapatnam mit altimetrischen Meereshöhen verglichen. Dabei zeigt sich, dass Pegelmessungen in Chittagong mit Altimetermessungen im gesamten Schelfbereich (bis etwa 300 km) sehr gut korrelieren, während die beiden indischen Stationen nur entlang des dort sehr viel schmalere Schelfs repräsentativ die Meeresdynamik im Golf von Bengalen widerspiegeln (Kusche et al. 2016), wie auch schon von Sreenivas et al. (2012) beobachtet.

### 3.2 Küstenregion

Wie schon erwähnt, wurde der Küstenregion in Band-AID besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Neben der Installation von GNSS-Pegeln wurden von den französischen Partnern auch GNSS-Messungen mit dem CalNaGeo-System direkt an Kreuzungspunkten der Saral/Altika-Altimetersatelliten durchgeführt, um eine Validierung zu erlauben.

Ein alternativer Weg, um vertikale Landbewegungen zu bestimmen, liegt darin, satellitenaltimetrische Messungen bis an die Pegel fortzusetzen und mit den Pegelraten zu vergleichen (Kuo et al. 2004). In Bangladesch ist es allerdings wegen der stark variierenden Küstenmorphologie (Sandbänke; wandernde Inseln, sog. Chars) und starker Tiden schwierig, Altimetermessungen im Küstenbereich auszuwerten. Und es existieren auch nur für die drei bereits erwähnten PSMSL-Pegel ausreichend lange

Zeitreihen, so dass diese Option im Projekt verworfen wurde.

Andererseits existieren in Bangladesch verschiedene numerische Vorhersagesysteme für Wasserstände, um die Folgen von vorhergesagten Zyklonen abschätzen zu können und Frühwarnsysteme zu aktivieren. Da kein langer Datensatz existiert, der für eine Verbindung von Altimetrie und Pegeln hätte genutzt werden können, hatten wir uns im Projekt entschlossen, die Problemstellung umzukehren: Im Rahmen des Band-AID Projektes wurde am IGG das von IWM zur Vorhersage von Wasserständen im Golf von Bengalen genutzte hydrodynamische Modell (Uddin et al. 2014) validiert. Dafür haben wir für das Jahr 2014 Messungen des Satelliten Cryosat-2 im SAR (Synthetic Aperture Radar) Modus verwendet, die bei einer Along-Track-Auflösung von etwa 300 m tatsächlich bis sehr nahe an der Küste nutzbar sind (Dinardo et al. 2017). Abb. 8a zeigt das Untersuchungsgebiet sowie die Vergleiche entlang der Bodenspur.

In einem ersten Schritt wurde verifiziert, dass die SAR-Messung im Bereich der offenen See, mehr als 6 km von der Küste entfernt, zu sehr ähnlichen Ergebnissen kommt wie die – mit klassischen Altimetermessungen vergleichbaren – PLRM-Daten (Pseudo Low Resolution Mode) des

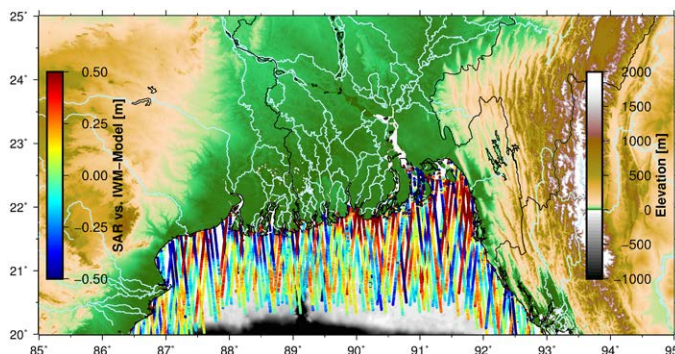


Abb. 8a: Vergleich von Meeresspiegelanomalien (SLA) aus modellierten Wasserhöhen und Cryosat-2 SAR-Daten, 2014. Along-Track Differenzen von gemessenen und simulierten SLA. Unterlegt ist die Bathymetrie.

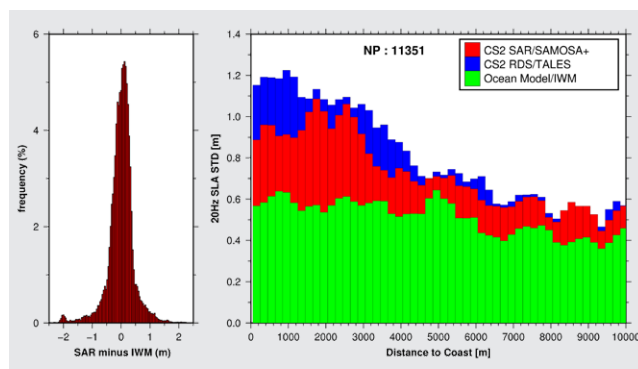


Abb. 8b: Vergleich von Meeresspiegelanomalien (SLA) aus modellierten Wasserhöhen und Cryosat-2 SAR-Daten, 2014. Histogramm der Differenzen im gesamten Gebiet (links) und Variabilität der SLA als Funktion des Abstandes zur Küste (rechts).

Satelliten. Die Messungen im SAR-Modus haben allerdings eine höhere Genauigkeit als die PLRM-Messungen (siehe Fenoglio-Marc et al. 2015): Direkte Vergleiche der vom Modell simulierten Wasserhöhen zeigen eine bessere Übereinstimmung mit SAR (RMS 0,46 m, Korrelation 0,24), als mit PLRM (0,49 m, 0,25) und legen nahe, dass das Modell die Variabilität unterschätzt (Abb. 8b rechts). Die größten Differenzen zwischen Modell und Messungen finden sich im Küstenbereich; Grund dafür ist auch die schlechtere Qualität der Altimeterdaten in weniger als 3 km Abstand von der Küste. Die niedrige Korrelation zwischen Modell und SAR-Daten kann durch Ausschluss einiger für das Modell problematischer Regionen im Küstenbereich aber bis auf 0,8 steigen. Insgesamt legen unsere Ergebnisse jedoch nahe, dass die Vorhersagegenauigkeit des Modells zu wünschen übrig lässt. Es ist deshalb beabsichtigt, dieses gegen ein am IRD entwickeltes Modell (Krien et al. 2016) auszutauschen. In Verbindung mit neueren Pegeldata über längere Zeiträume sowie mit Cryosat-2 und Sentinel-3 SAR-Messungen wird sich die Frage nach der Verbindung von Pegeln und Altimetrie dann erneut stellen.

### 3.3 Migration und Landnutzungsänderungen

Die Landwirtschaft ist nach wie vor die dominierende Landnutzung im Küstenraum von Bangladesch. In den 19 Küstendistrikten wird etwa die Hälfte der Gesamtfläche aktuell landwirtschaftlich genutzt (BBS 2016, S. 262 ff.). Dies bedingt eine starke Abhängigkeit der ländlichen Bevölkerung von den natürlichen Ressourcen Wasser und Land, um ihren Lebensunterhalt zu bestreiten.

Problematisch ist dabei, dass das zur Verfügung stehende Land immer knapper wird. Schon vor gut zehn Jahren wurde geschätzt, dass über 80 % aller im Küstenraum lebenden Menschen keinen Zugang mehr zu landwirtschaftlich nutzbarem Land haben. Gleichzeitig gehen Prognosen davon aus, dass sich die pro Kopf zur Verfügung stehende Fläche bis 2050 von 0,056 ha auf 0,025 ha halbieren wird (vgl. PDO-ICZMP 2005 in Islam 2006, S. 238).

Diese Verknappung an Landressourcen ist nicht nur auf Umweltfaktoren wie Erosion, Überschwemmungen oder Zyklonen zurückzuführen, sondern auch auf den steigenden Bevölkerungsdruck und die Machtasymmetrien zwischen verschiedenen Landnutzern, wie staatlichen Einrichtungen, unternehmerischen Investoren und (Klein-)Bauern. Ländliche Haushalte befinden sich somit in zunehmend komplexen und vulnerablen Lebenssituationen, die geprägt sind von sich verknappenden Ressourcen und einer ständigen Bedrohung durch Naturgefahren.

Das humangeographische Teilprojekt von BanD-AID untersuchte vor allem zwei Fragekomplexe, die mit möglichen Adaptions- bzw. Anpassungsmaßnahmen ländlicher Haushalte im Hinblick auf diese vielfältigen Herausforderungen und Risiken verbunden sind: Zum einen, welche

sozio-ökonomischen und umweltbedingten Faktoren zu Landnutzungsänderung und zum kleinbäuerlichen Lebensunterhalt (livelihoods) beitragen, zum anderen, welcher Zusammenhang zwischen Umweltveränderungen und Migration besteht.

Ein zentraler Treiber für Landnutzungsänderungen im Ganges-Meghna-Brahmaputra-Delta ist die seit knapp 40 Jahren stark wachsende Nachfrage nach tropischen



Abb. 9: Großflächige Garnelenaufzucht im Südwesten Bangladeschs (Foto: Amelie Bernzen)

Garnelen aus Europa, Nordamerika und Japan. Mit Garnelen lassen sich höhere Gewinne erzielen als mit dem Anbau von Reis. Inzwischen haben sich Garnelen zur Massenware und zum zweitwichtigsten Exportgut Bangladeschs nach Bekleidung und Textilwaren entwickelt.

Die Folge war eine weitflächige Transformation von Reisfeldern in Garnelenzuchtteiche (Abb. 9), vor allem auf den seit den 1950er Jahren mit Hilfe der Weltbank angelegten Polder (Falk 2015). Diese mit Schutzwällen eingefriedeten (Anbau-)Flächen waren gut für die Anlage von Garnelenaufzuchtteichen geeignet, während die zunehmende Staunässe den Reisanbau ohnehin immer unwirtschaftlicher machte. Des Weiteren wurden großflächig Mangrovenwälder gerodet, um neue Flächen für die Aufzucht von Garnelen zu schaffen. Im Südwesten Bangladeschs, vor allem in den Gebieten nördlich des Sundarbans-Nationalpark, sind heute weite Landstriche fast ausschließlich von Garnelenzuchtteichen geprägt. In manchen Gemeinden machen sie bis zu 70 % der gesamten Nutzfläche aus (Ministry of Land 2011). Auch die absolute Fläche der Garnelenzuchtteiche nimmt weiterhin stark zu. Sie stieg von etwa 165.000 ha im Jahr 2005 auf fast 275.600 ha im Jahr 2015 (Azad et al. 2009; BBS 2016, S. 465). Dieser Trend ist auch auf Satellitenbildern deutlich zu erkennen. So ist zum Beispiel der Anteil der Wasserflächen an der Oberflächenbedeckung im Upazila Rampal (Distrikt Bagerhat) im Vergleich zu 1989 deutlich angestiegen (vgl. Abb. 10).

Trotz aller Vorteile für die bangladeschische Wirtschaft hat die Ausweitung der exportorientierten Garnelenproduktion eine Reihe gravierender sozialer und ökologischer Folgen (vgl. Dietsche 2010, Paul und Vogl 2011). Dazu gehört etwa die seitens des Staates kaum regulierte

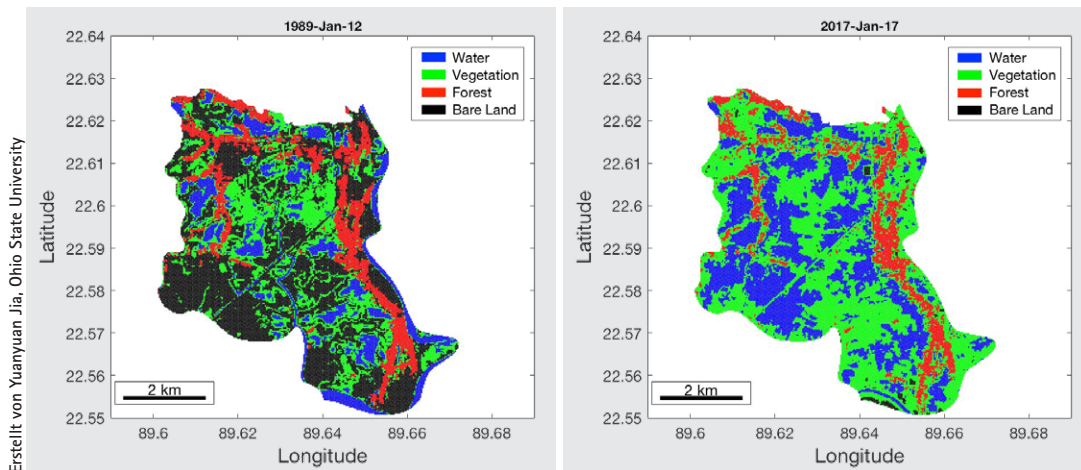


Abb. 10:  
Veränderung der  
Oberflächen-  
bedeckung in  
Rampal zwischen  
1989 und 2017

Ausweitung der Garnelenzuchtteiche, die gewaltsame Aneignung vormals kleinbäuerlicher Flächen durch ortsfremde Investoren und der Rückgang der lokalen Erwerbsmöglichkeiten durch die im Vergleich zum Reisbau deutlich weniger arbeitsintensive Garnelenaufzucht (vgl. Islam 2008, Kabir et al. 2016). Die Rodung von Mangrovenwäldern verringert zudem den natürlichen Schutz vor Zyklonen und Sturmfluten. Weitere ökologische Probleme sind eine abnehmende Biodiversität, zunehmende Wasserverschmutzung, Trinkwasserknappheit und vor allem die Bodenversalzung durch das für die Garnelenaufzucht benötigte Salz- und Brackwasser. Letzteres kann die Kultivierung von salz-intoleranten Pflanzen längerfristig unmöglich machen. Vielfach werden durch das Einsickern von Salzwasser auch die Anrainer von Garnelenzuchtteichen zur Umstellung auf die Garnelenproduktion gezwungen.

Die innerhalb des BanD-AID-Projekts durchgeführten Befragungen liefern vertiefte Einblicke in die Ursachen des Landnutzungswandels und der Landnutzungsdiversifizierung im Küstenraum Bangladeschs in den letzten 10 bis 15 Jahren. Damit sollte insbesondere die relative Bedeutung von ökologischen und sozio-ökonomischen Treibern für Landnutzungsänderungen – auch außerhalb der Garnelenzuchtgebiete – erforscht werden. Die im Folgenden hierzu präsentierten Befunde basieren auf empirischen Daten, die Ende 2014 im Rahmen einer Befragung von 1.188 Haushalten in neun *union parishads* (Gemeinden) in unterschiedlichen ökologischen Zonen erhoben wurden (siehe zur Lage der Untersuchungsgebiete in Abb. 1).

Die Ergebnisse lassen drei Regionen mit unterschiedlichen Entwicklungstrends erkennen: Erstens die traditionellen Garnelenproduktionsregionen im Südwesten des Landes, in denen bis zu zwei Drittel der befragten Haushalte angaben, seit 1999 zu einem signifikanten Landnutzungswandel beigetragen zu haben. Dies erfolgte vor allem zugunsten der Garnelenproduktion, wobei auch die Anpassung an sich verändernde physische Faktoren – vor allem Boden- und Wasserversalzung – ausschlaggebend für die Umstellung der Produktion waren. Gemischter Anbau, der vor allem aus ökonomischen Gründen prakti-

ziert wird, kommt in dieser Region als Kombination von Garnelen- und Fischzuchtteichen vor, wird aufgrund der hohen Salzbelastung des Bodens jedoch kaum kombiniert mit Reis.

Die zweite Region umfasst die Untersuchungsgebiete im Distrikt Patuakhali, die stark vom verheerenden Zyklon Sidr im Jahr 2007 betroffen waren. Hier ist der Landnutzungswandel deutlich weniger ausgeprägt. Es gibt jedoch einen relativ hohen Anteil an kleinbäuerlichen Haushalten, die gemischten Anbau in Form verschiedener Anbaupflanzen durchführen. Durch diese Diversifizierung des Anbaus verbessern diese Bauern ihre Subsistenzgrundlage und können ihre Familien stabiler ernähren.

Demgegenüber spielen im Osten des Deltas, am Ufer des Meghna, wo die stärksten Ufererosionen und die höchsten Tidebewegungen stattfinden, weder Landnutzungsänderungen noch eine Diversifizierung des Anbaus eine signifikante Rolle. Vielmehr kommt es hier vielerorts zu einer ständigen Verlagerung der Anbauflächen durch Ufererosion einerseits und die Entstehung von neuem Land andererseits.

Unsere Befunde zeigen, dass eine gezielte Diversifizierung der Landnutzung längerfristig soziale und ökologische Vorteile haben kann. Dies liegt zum einen an den geringeren notwendigen Mengen an Kunstdünger und Pflanzenschutzmitteln bzw. an Antibiotika zur Garnelenaufzucht, zum anderen aber auch an der Risikostreuung im Falle von Missernten, Unwetterschäden oder dramatischen Preisänderungen für bestimmte Agrarprodukte (vgl. auch Swapan and Gavin 2011). Nicht zuletzt zeigen die empirischen Daten, dass eine Diversifizierung in den Lebenserhaltungsstrategien der Haushalte über die Landwirtschaft hinaus zu verzeichnen ist, was sich unter anderem in einer stark gestiegenen Anzahl an Gründungen von nicht-landwirtschaftlichen Unternehmen nach den schweren Wirbelstürmen Sidr (2007) und Aila (2009) zeigt.

Auch für die zweite Untersuchungsthematik, die Ursachen von Migrationsbewegungen, spielen die ökonomisch motivierten Landnutzungsänderungen von Reisbau zur Garnelenaufzucht eine wichtige Rolle. Sie sind ein wichtiger Grund für die Abwanderung aus dem Südwesten des Deltagebietes. Dieser Effekt ist nach den



Ergebnissen mehrerer Studien bedeutender als die Einflüsse von Zyklonen oder dem Meeresspiegelanstieg (Amoako-Johnson et al. 2016, Falk 2015). Daten des Bangladesh Bureau of Statistics (BBS) belegen eine überwiegend negative Bevölkerungsentwicklung in den von der Garnelenproduktion geprägten Siedlungen – ein deutlich gegenläufiger Trend zu den meisten anderen Gemeinden, die aufgrund von Zuwanderung, aber vor allem auch aufgrund von Geburtenüberschüssen eine positive Bevölkerungsentwicklung aufweisen (Braun et al. 2016).

Im Rahmen des BanD-AID-Projekts sollten sowohl Migrierende als auch Nicht-Migrierende systematisch erfasst und auf dieser Basis die relative Bedeutung unterschiedlicher Wanderungsursachen analysiert werden. In den 1.188 befragten Haushalten wurden Daten von 6.132 Einzelpersonen erfasst. Unter den Erwachsenen (älter als 15 Jahre) beträgt die Quote von Personen mit Migrationserfahrung etwas mehr als 5 %. Diese (überwiegend aus Männern bestehende) Gruppe migrierte zum größten Teil temporär, nur etwa jeder fünfte dauerhaft. In 16,5 % aller befragten Haushalte konnte mindestens eine Person mit Migrationserfahrung verzeichnet werden. Diese Zahlen weisen zwar darauf hin, dass Migration durchaus eine wichtige Anpassungsstrategie von Haushalten im Küstenraum Bangladeschs ist, jedoch von einer in den Medien oft sehr dramatisierend dargestellten Entwicklung hin zu Massenexodus von Millionen von Menschen aus dem vom Meeresspiegelanstieg betroffenen Gebieten zumindest aktuell (noch) keine Rede sein kann.

Insgesamt unterstützen die Befragungsdaten die These, dass Migrationsentscheidungen vor allem ökonomisch bedingt sind. Denn obwohl die Abwanderungsrate in den stark durch die Zyklonen Sidr und Aila getroffenen Gemeinden zwischen 8 und 12 % liegt und somit gegenüber anderen Gebieten deutlich erhöht ist, nannten die Befragten so gut wie nie extreme Naturereignisse oder klimatische Veränderungen als primären Abwanderungsgrund (vgl. Abb. 11). Die Frage nach den Hauptgründen für Migration liefert vielmehr sehr eindeutige Hinweise auf die Dominanz ökonomischer Faktoren für die Abwanderung. Hierzu gehören vor allem das bessere Arbeits- und Bildungsangebot in den größeren urbanen Zentren im Küstenraum selbst (z.B. Khulna, Barisal) sowie in der Hauptstadt Dhaka. Bei Frauen spielt auch Heirat eine wichtige Rolle, da Ehefrauen nach der Hochzeit traditionell zur Familie ihres Ehemannes ziehen.

Deutliche Trends zeigen die Befragungsergebnisse auch im Hinblick darauf, ob eher die wohlhabenderen oder die ärmeren Menschen abwandern (Ressourcen- versus Armutshypothese). Auf den Befragungsdaten basierende logistische Regressionsanalysen unterstützen die Ressourcen-

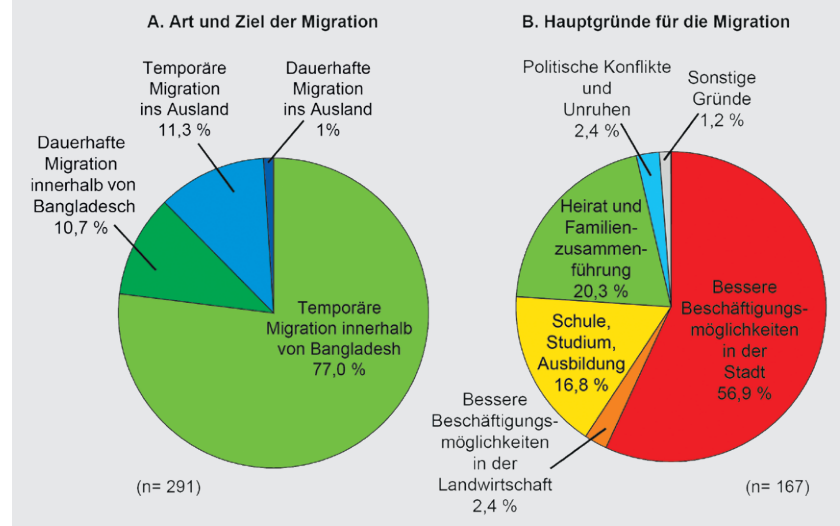


Abb. 11: Wesentliche Migrationstypen und -gründe in den Untersuchungsgebieten

Eigene Erhebung, leicht verändert nach Braun et al. 2016

cenhypothese (detaillierter in Braun et al. 2017): So steigt die Abwanderungswahrscheinlichkeit signifikant mit einer guten Ausbildung, dem Erwerb außerlandwirtschaftlicher Qualifikationen, höherem materiellen Wohlstand sowie engen sozialen Kontaktnetzwerken. Menschen wandern demnach häufiger aus ihren ländlichen Gemeinden ab, wenn sie aufgrund ihrer individuellen Fähigkeiten und individueller Ressourcenausstattung an einem anderen Ort bessere Chancen sehen, die Einkommenssituation der gesamten Familie verbessern zu können – etwa durch Rücküberweisungen in ihre Heimatdörfer.

Die Regressionsanalysen weisen jedoch ebenfalls darauf hin, dass auch Umweltfaktoren einen signifikanten Effekt auf Wanderungsentscheidungen haben können. Dies zeigte sich beispielsweise bei Familien, die aufgrund der Ufererosion dauerhaft kultivierbares Land verloren hatten und so zur Abwanderung gezwungen wurden. Insgesamt ist dieser Effekt im Vergleich zu den primär ökonomischen Migrationsmotiven jedoch weniger stark ausgeprägt; außerdem finden viele dieser unmittelbarer umweltbedingten Wanderungen nur über kürzere Distanzen statt.

#### 4 Synthese

Geodätische Weltraumverfahren können zusammen mit Fernerkundungsmethoden eine Basis für ein integriertes Monitoring von Umweltveränderungen im Küstenbereich bilden. Sie können helfen, regionale Projektionen des Meeresspiegelanstiegs abzuleiten und damit eine verbesserte Entscheidungsgrundlage für Küstenmanagement und Infrastrukturplanung bereitzustellen. Dies muss aber auch mit einem verbesserten Verständnis einhergehen, wie Umweltveränderungen bei der Bevölkerung wahrgenommen werden, welche Motivationsmuster auf den unterschiedlichen Ebenen eine Rolle spielen und wie konkrete Entscheidungsprozesse letztlich ablaufen.

Insgesamt zeigt eine Reihe von Studien, dass es in Bangladesch nicht nur im Küstenbereich zu massiven

Veränderungen im Wasserhaushalt kommt. Allerdings können die verschiedenen Datensätze wie GRACE, Niederschlagszeitreihen, Grundwasserstände und Abflussmessungen noch nicht zu einem konsistenten Bild zusammengesetzt werden. Forschung ist insbesondere noch nötig, um Effekte der direkten Wassernutzung, des Landnutzungswandels und des Klimawandels klar voneinander zu trennen.

Der derzeitige (absolute) Meeresspiegelanstieg im Golf von Bengalen beträgt etwa 6 mm im Jahr, was zu deutlichen Veränderungen im Küstenbereich, wie Erosion, Veränderung von Tiden und Versalzung, führt. Ein deutlich höherer relativer Anstieg wurde an einzelnen Pegeln beobachtet, insgesamt ist der Beitrag der Landsenkung wegen fehlender Messungen aber nicht hinreichend klar. Gründe für den Anstieg des Meeresspiegels liegen primär in der Erwärmung (3,1 mm/a), die derzeit für den gesamten Indischen Ozean beobachtet wird; ein Zusammenhang mit der Zyklonenhäufigkeit ist aber in der Literatur noch nicht gefunden worden. Wir konnten mit Hilfe der SAR-Altimetrie auch bestätigen, dass numerische Modelle, wie das operationelle Vorhersagemodell des IWM, noch Potential für Verbesserungen aufweisen. Insgesamt lassen sich massive Umweltveränderungen (geodätisch) beobachten. Der Link zum Klimawandel ist jedoch nur im Hinblick auf den absoluten Meeresspiegel eindeutig, sonst aber nicht klar zu quantifizieren.

Auch die Befunde zum Zusammenhang von Meeresspiegelanstieg und den Landnutzungs- und Migrationsentscheidungen von Küstenbewohnern sind ambivalent. Im Hinblick auf das Migrationsgeschehen und die Landnutzungsveränderungen im Küstenraum von Bangladesch spielen Klimawandel und Meeresspiegelanstieg bislang (noch) eine nachrangige Rolle. Selbst wo längerfristig naturbedingte Umweltveränderungen zunehmen, sind diese für die Menschen vor Ort kaum unmittelbar, sondern vor allem als Zunahme von Extremereignissen auf lokaler Ebene erfahrbar. In der Regel »übersetzen« die Menschen dann die Veränderungen in ihrer unmittelbaren Lebensumwelt rational in ökonomische Entscheidungsmotive, die letztlich zu Abwanderung bzw. – häufiger – zu zirkulären Migrationsformen des Gehens und Wiederkommens führen. Zudem findet ein großer Teil der Wanderungen, der durch Umweltveränderungen ausgelöst wird, über relativ kurze Entfernungen statt. Umfangreiche Migrationsströme über weite Distanzen aufgrund von Klimawandel und Meeresspiegelanstieg lassen sich aus den bisherigen Befunden eher nicht ableiten.

## 5 Ausblick

In Bangladesch treten dramatische Umweltveränderungen mit Konsequenzen für Millionen Menschen auf, die über Extremereignisse, wie Zyklone und Überschwemmungen, hinausreichen. Auch langsame Veränderungen sind in Beobachtungen wie der Radaraltimetrie, Pegel-

messungen, Niederschlagsdaten oder GRACE-Messungen wahrnehmbar. Ob diese Veränderungen wirklich durch den globalen Klimawandel verursacht sind, ist aber – außer beim Meeresspiegelanstieg – nicht eindeutig aus den Daten abzuleiten, da auch andere natürliche und anthropogene Faktoren von erheblicher Bedeutung sind.

Gleichzeitig werden Migrationsströme und Landnutzungsänderungen beobachtet, die zum Teil, nicht aber primär, durch Umweltveränderungen bedingt sind. An dieser Stelle lässt sich zusammenfassen, dass natur- und sozialwissenschaftliche Teilprojekte in BanD-AID fruchtbar zusammengearbeitet haben, dass aber noch weitere interdisziplinäre Forschung notwendig ist, um komplexe sozial-ökologische Systeme, wie im Küstenraum Bangladeschs, wirklich zu verstehen.

Wegen der großen Abweichungen zum globalen Meeresspiegel-Mittel wird es in den nächsten Jahren wichtig sein, verbesserte regionale Projektionen zu entwickeln. Auch an dieser Stelle sollten natur- und sozialwissenschaftliche Gruppen weithin verstärkt zusammenarbeiten. Regionale Projektionen zu Meeresspiegeländerungen und Veränderungen des Wasserkreislaufs benötigen Szenarien zur Land- und Wassernutzung über Dekaden, was wiederum Annahmen und Modelle zu Migration und Landnutzung bedingt, so dass eine Zweizeigekopplung berücksichtigt werden sollte. Viele äußere Faktoren lassen sich jedoch kaum vorhersagen, und eine integrierte datenbasierte naturwissenschaftliche Modellierung unter Berücksichtigung sozio-ökonomischer Zusammenhänge und Szenarien ist noch zu entwickeln.

## Dank

Dieses Projekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert (KU1207/19-1, BR1678/13-1).

## Literatur

- Amoako Johnson, F., Hutton, C.W., Hornby, D., Lázár, A.N., Mukhopadhyay, A. (2016): Is shrimp farming a successful adaptation to salinity intrusion? A geospatial associative analysis of poverty in the populous Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta of Bangladesh. *Sustainability Science*, 11 (3), 423–439.
- Andersen, O., Berry, P., Freeman, J., Lemoine, F.G., Luthcke, S., Jakobsen, F., Butts, M. (2008): Satellite altimetry and GRACE gravimetry for studies of annual water storage variations in Bangladesh. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19:47–52.
- Azad, A.K., Jensen, K.R., Lin, C.K. (2009): Coastal aquaculture development in Bangladesh: Unsustainable and sustainable experiences. *Environmental Management*, 44 (4), 800–809.
- BBS, Bangladesh Bureau of Statistics (2016): Yearbook of Agricultural Statistics 2015. 27th Series. Dhaka.
- Berzen, A., Al-Maruf, A., Lin, A., Ahmed, R. (2016): Landnutzungsveränderung im Küstenraum von Bangladesch: Management von Land auf Gemeinde- und Haushaltsebene. *Geographische Rundschau* 68 (7–8), 16–22.
- Braun, B., Berzen, A., Jenkins, C. (2017): Dynamic delta – climate change, economic opportunity and rural migration in coastal Bangladesh. Konferenzbeitrag bei der Coastal Transitions-Tagung in New Haven, 30.3.–2.4.2017, unterstützt durch die IGU Commission on the Dynamics of Economic Spaces, organisiert durch die Liverpool John Moores University und die Southern Connecticut State University.

- Braun, B., Chen, J.J., Dotzel, K.R., Jenkins, J.C. (2016): Klimawandel und Migration im Küstenraum von Bangladesch. *Geographische Rundschau* 68 (7–8), 10–15.
- Brown, S., Nicholls, R.J. (2015): Subsidence and human influences in mega deltas: the case of the Ganges-Brahmaputra-Meghna. *Science of The Total Environment*, 362–374.
- Chambers, D. (2006): Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111, C3:2156–2202.
- Dagestir, M. (2015): Modeling recent climate change induced extreme events in Bangladesh: A review. *Weather and Climate Extremes* 7:49–60.
- Dietsche, C. (2010): Garnelen aus Bangladesch im Weltmarkt. *Geographische Rundschau* 62 (4), 34–40.
- Dinardo, S., Fenoglio-Marc, L., Buchhaupt, C., Becker, M., Scharro, R., Fernandez, J., Benveniste, J. (2017): CryoSat-2 performance along the German coasts. *Advances in Space Research, Special Issue CryoSat-2*. DOI: 10.1016/j.asr.2017.12.018.
- Döll P., Kaspar F., Lehner B. (2003): A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *J. Hydrol.* 270:105–134.
- Durand, F., Papa, F., Rahman, A., Bala, S.K. (2011): Impact of Ganges-Brahmaputra interannual discharge variations on Bay of Bengal salinity and temperature during 1992–1999 period. *J. Earth Syst. Sci.* 120:859–872.
- Endo, N., Matsumoto, J., Hayashi, T., Terao, T., Murata, F., Kiguchi, M., Yamane, Y., Shah Aslam, Md. (2015): Trends in precipitation characteristics in Bangladesh from 1950 to 2008. *SOLA* 11:113–117.
- Falk, G.C. (2015): Land use change in the coastal regions of Bangladesh: A critical discussion of the impact on delta-morphodynamics, ecology, and society. *ASIEN* 134 (1), 47–71.
- Fenoglio-Marc, L., Dinardo, S., Scharro, R., Roland, A., Dutour, M., Lucas, B., Becker, M., Benveniste, J., Weiss, R. (2015): The German Bight: a validation of CryoSat-2 altimeter data in SAR mode. *Advances in Space Research*. DOI: 10.1016/j.asr.2015.02.014.
- Hofer Th., Messerli, B. (2006): *Floods in Bangladesh: History, Dynamics and Rethinking the Role of the Himalayas*. 468 Seiten, Tokyo, Japan/ New York, USA/London, UK: United Nations University Press.
- Hossain, F., Shum, C.K., Turk, F.J., Biancamaria, S., Lee, H., Limaye, A., Hossain, M., Shah-Newaz, S., Mazumder, L.C., Ahmed, T., Yig-zaw W., Siddique-E-Akbor, A.H.M. (2014): A guide for crossing the valley of death: Lessons learned from making a satellite based flood forecasting system operational and independently owned by a stakeholder agency. *Bulletin of American Meteorological Society*. DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00176.1.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *Climate change 2007: Impacts, Adaption and Vulnerability*. In: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Parry et al. (Eds.), Cambridge University Press.
- Islam, M.R. (2006): Managing Diverse Land Uses in Coastal Bangladesh: Institutional Approaches. In: Hoanh, C.T., Tuong, T.P., Growing, J.W., Hardy, B. (Hrsg.). *Environment and Livelihoods in Tropical Coastal Zones*. Wallingford: CAB International, 237–248.
- Islam, M.S. (2008): In search of “white gold”: Environmental and agrarian changes in rural Bangladesh. *Society & Natural Resources* 22 (1), 66–78.
- Kabir, M.J., Cramb, R., Alauddin, M., Roth, C. (2016): Farming adaptation to environmental change in coastal Bangladesh: Shrimp culture versus crop diversification. *Environment, Development and Sustainability* 18 (4), 1195–1216.
- Krien, Y., Mayet, C., Testut, L., Durand, F., Tazkia, A.R., Islam, A.K.M.S., Gopalakrishna, V.V., Becker, M., Calmant, S., Shum, C.K., Khan, Z.H., Papa, F., Ballu, V. (2016): Improved Bathymetric Dataset and Tidal Model for the Northern Bay of Bengal. *Marine Geodesy*, 39(6):422–438.
- Kuo, C.Y., Shum, C.K., Braun, A., Mitrovica, X. (2004): Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauge data in Fennoscandia. *Geophys. Res. Lett.*, 31, 1, 1944–8007.
- Kusche, J., Uebbing, B., Rietbroek, R. (2016): Asiatische Deltas und Meeresspiegelanstieg: Methoden der Messung und zentrale Befunde. *Geographische Rundschau* 68 (7–8), 44–50.
- Kusche, J., Uebbing, B., Rietbroek, R., Shum, C.K., Khan, Z. (2016): Sea level budget in the Bay of Bengal (2002–2014). *JGR (Oceans)* 121(2):1194–1217.
- Lee, S.-L., Park, W., Baringer, M., Gordon, A., Huber, B., Liu, Y. (2015): Pacific origin of the abrupt increase in Indian Ocean heat content during the warming hiatus. *Nat. Geosci.* DOI: 10.1038/ngeo2438.
- Llovel, W., Meyssignac, B., Cazenave, A. (2011): Steric sea level variations over 2004–2010 as a function of region and depth: Inference on the mass component variability in the North Atlantic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L15608.
- Loo, Y.Y., Lawal, B., Singh, A. (2015): Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia. *Geoscience Frontiers*, 6(6):817–823.
- Miller, J.D., Immerzeel, W.W., Rees, G. (2012): Climate Change Impacts on Glacier Hydrology and River Discharge in the Hindu Kush-Himalayas. *Mountain Research and Development* 32(4):461–467.
- Ministry of Land (2011): Land zoning report of Rampal Upazila of Bagerhat District. [www.landzoning.gov.bd/report.php](http://www.landzoning.gov.bd/report.php) [29.2.2016].
- Paul, B.G., Vogl, C.R. (2011): Impacts of shrimp farming in Bangladesh: Challenges and alternatives. *Ocean & Coastal Management* 54 (3), 201–211.
- PDO-ICZMP, Program Development Office for Integrated Coastal Zone Management Plan (2005): *Living in the coast: Urbanization*. Dhaka: PDO-ICZMP, Water Resources Planning Organisation.
- Pethick, J., Orford, J.D. (2013): Rapid rise in Effective Sea-Level in southwest Bangladesh: Its causes and contemporary rates. *Global and Planetary Change*. 111, 12.2013, 237–245.
- Rietbroek, R., Brunnabend, S.-E., Kusche, J., Schröter, J., Dahle, C. (2016): Revisiting the contemporary sea-level budget on global and regional scales. *PNAS* 113(6):1504–1509.
- Shahid, S. (2010): Rainfall variability and the trends of wet and dry periods in Bangladesh. *Int. J. Climatology*, 30:2299–2313.
- Sreenivas, P., Gnasaseelan, C., Prasad, K. (2012): Influence of El Nino and Indian Ocean Dipole on sea level variability in the Bay of Bengal. *Global Planet. Change*, 80–81, 215–225.
- Steckler, M.S., Nooner, S.L., Akhter, S.H., Chowdhury, S.K., Bettadpur, S., Seeber, L., Kogan, M.G. (2010): Modeling Earth deformation from monsoonal flooding in Bangladesh using hydrographic, GPS, and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data. *J. Geophys. Res.*, 115, B08407.
- Swapan, M.S.H., Gavin, M. (2011): A Desert in the Delta: Participatory Assessment of Changing Livelihoods Induced by Commercial Shrimp Farming in Southwest Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 54 (1), 45–54.
- Uddin, M., Alam, J., Khan, Z., Jahid Hasan, G., Rahman, T. (2014): Two Dimensional Hydrodynamic Modelling of Northern Bay of Bengal Coastal Waters. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 3, 140–151.
- World Bank (2000): *Bangladesh, climate change and sustainable development*, Rep. 21104-BD.

**Kontakt**

Prof. Dr. Jürgen Kusche | M.Sc. Bernd Uebbing |  
 Dr. Roelof Rietbroek | Dr. Luciana Fenoglio-Marc  
 Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn  
 Astronomische, Physikalische und Mathematische Geodäsie  
 Nußallee 17, 53115 Bonn  
[kusche@uni-bonn.de](mailto:kusche@uni-bonn.de) | [uebbing@geod.uni-bonn.de](mailto:uebbing@geod.uni-bonn.de) |  
[roelof@geod.uni-bonn.de](mailto:roelof@geod.uni-bonn.de) | [fenoglio@geod.uni-bonn.de](mailto:fenoglio@geod.uni-bonn.de)

Dr. Amelie Bernzen | Prof. Dr. Boris Braun  
 Geographisches Institut, Universität zu Köln  
 Albertus-Magnus-Platz, 50923 Köln  
[abernzen@uni-koeln.de](mailto:abernzen@uni-koeln.de) | [boris.braun@uni-koeln.de](mailto:boris.braun@uni-koeln.de)

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter [www.geodaesie.info](http://www.geodaesie.info).