

Abschlussbericht

Projekt: bm0762

Modellierung des marinen Stickstoffkreislaufs und der ozeanischen Emission von Treibhausgasen

im Verbundvorhaben

"Natürliche vs. anthropogene Steuerungsfaktoren spätquartärer Monsunvariabilität in Zentralasien aufgezeichnet in marinen Archiven (CARIMA)"

im Rahmen des BMBF-Forschungsschwerpunkts

„Tibet und Zentralasien: Monsun-Geodynamik und Geoökosysteme“ (CAME)

Berichtszeitraum: 01.04.2011 – 31.12.2015

Projektleitung: Joachim Segsneider

Die Hauptaufgabe dieses Projektes war die Dynamik des Monsuns im Bereich des Arabischen Meeres mithilfe eines globalen Modells der Ozeandynamik und Biogeochemie sowie der Atmosphäre besser zu verstehen und mit der Information aus Sedimentbohrkernen zu verknüpfen. Das hier beschriebene Teilprojekt 1.5 war in das Arbeitspaket 1 "Sedimente des Arabischen Meeres als Monitor des Asiatischen Monsunsystems" des Verbundvorhabens „Natürliche vs. anthropogene Steuerungsfaktoren spätquartärer Monsunvariabilität in Zentralasien aufgezeichnet in marinen Archiven (CARIMA)" des BMBF-Forschungsschwerpunktes „Tibet und Zentralasien: Monsun-Geodynamik und Geoökosysteme“ (CAME) eingebunden.

Zunächst konnte die Durchführung des Modelllaufes von 1948 bis heute mit mehr als verdoppelter räumlicher Auflösung gegenüber der ursprünglichen Planung die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens zum Teil noch verbessern. Allerdings stellte sich bei der Datierung des Sedimentkernes welcher für die Ableitung des Modellantriebes vorgesehen war heraus, daß die darin enthaltenen Sedimente mindestens 5500 Jahre alt waren. Ein alternativ beprobter Sedimentkern wies eine deutlich verringerte zeitliche Auflösung auf. Daher war die ursprünglich angestrebte Simulation der Monsunvariabilität über die letzten 2000 Jahre nicht so wie geplant möglich. Als Alternative wurde ein Modelllauf aus dem CMIP5 Archiv von 850 – 1850 im Hinblick auf die Monsunvariabilität analysiert. Dieser Modelllauf wurde am MPI mit dem MPI-ESM auch mit Hilfe der an CARIMA beteiligten Wissenschaftler durchgeführt. Die Modellkonfiguration und die Modellkomponenten entsprechen der ursprünglich angestrebten. Die Analyseergebnisse des Modells wurden dann mit den Analysen der Sedimentbohrkerne verglichen. Weiterhin sind die Modellläufe mit dem MPI-ESM bis

2005 mit beobachtetem atmosphärischen CO₂ und weitergehend bis 2300 mit CO₂ aus IPCC RCP Szenarien angetrieben worden. Insgesamt bot sich dadurch sogar eine verbesserte Möglichkeit zu untersuchen, inwieweit anthropogene Klimaänderungen den Monsun beeinflussen und welchen Einfluss dies auf den Stickstoffkreislauf im Arabischen Meer hat.

Die geschilderten Änderungen im Ablauf beziehen sich auf die Methode der Untersuchung, die Zielsetzung des Projektes - Modellierung des marinen Stickstoffkreislaufs und der ozeanischen Emission von Treibhausgasen in der Arabischen See sowie deren Änderungen durch anthropogene Einflüsse - konnte aber auch mit den gewählten anderen Methoden erreicht werden. Insgesamt wurde daher eine Änderung der Zielsetzung des Projektes nicht notwendig.

Derzeit erfolgt eine Auswertung der Modellresultate und Interpretation in enger Kooperation mit den anderen Projektpartnern. Ergebnisse wurden bereits bei der EGU 2014 einem internationalen Publikum vorgestellt.

Das Indische Monsunsystem ist bekannt als die wichtigste und mit den saisonalen atmosphärischen Veränderungen am deutlichsten ausgeprägte Komponente des tropisch-subtropischen Klimabereichs der niederen Breiten, mit typischerweise feuchten Sommermonaten, aber kühl-trockenen Wintermonaten. Unser Arbeitsgebiet ist das Arabische Meer, wo der monsuntypische Temperaturkontrast zwischen Land und Meer durch die Insolationsänderungen auf der Nordhemisphäre sowohl in den saisonalen, aber auch in der zugrundeliegenden orbitalen Variabilität das natürliche Monsungeschehen steuert. Dies ist in den marinen Klimaarchiven vor Oman (SW-Monsun gesteuerter Sommerauftrieb) und vor Pakistan (NE-Monsun gesteuerte winterliche Vertiefung der durchmischten Deckschicht und Abkühlung durch tiefe Konvektion und kalte NE Winde) dokumentiert. Überlagert wird diese natürliche Monsun-Klimavariabilität durch die Auswirkungen der anthropogenen Veränderungen mit einem global erhöhten CO₂-Gehalt in der Atmosphäre und damit einhergehenden Veränderungen in der ozeanischen Produktivität und im Kohlenstoffzyklus, die im Arabischen Meer bereits sichtbar sind. Bisher wurden sie aber nur auf relativ langen Zeitskalen von Jahrhunderten als Abweichungen des ozeanischen Auftriebs von dem natürlichen, insolationsgesteuerten Trend der abnehmenden Insolation nachgewiesen (Anderson et al., 2002): sie bildet grob die IPCC-Temperaturkurve von Mann et al. (1999) für die letzten 1.000 Jahre mit ihrem anthropogen verursachten Temperaturanstieg ab. Dieser Anstieg der Produktivität im Auftriebsgebiet vor dem Oman seit ca. 1600 AD geht vermutlich auf eine (anthropogen verursachte) Erwärmung der Atmosphäre zurück, die den Sommermonsun und damit die Produktivität verstärkt. Die Untersuchung des Monsunsystems mit einem Erdsystemmodell stellt ein Novum dar.

In technischer Hinsicht war das Modell MPIOM/HAMOCC als Teil vom MPI-ESM betriebsbereit, es mussten die Antriebsdaten (NCEP) aufbereitet und auf das Modellgitter interpoliert werden. Modell musste hiermit eingeschungen werden. Analysewerkzeuge für die Fokussierung auf das Arabische Meer und die zu untersuchenden Prozesse mussten zum Teil noch entwickelt werden. Weiterhin sollte das Modell auf weitere Rechner portiert werden.

Zunächst konnte ein Modelllauf mit erhöhter räumlicher Auflösung (TP04, nominell 0.4°, geplant war TP10, nominell 1°) mit NCEP Antrieb von 1948 – 2010 und anthropogenem CO₂ durchgeführt werden. Durch die Zusammenarbeit mit MIKLIP (BMBF-Projekt) innerhalb des MPI-M war es möglich das biogeochemische Modell (HAMOCC) mit einem Modelllauf des physikalischen Modells MPIOM zu kombinieren

Die Ergebnisse für 1948 bis heute basieren also auf der Standardversion des biogeochemischen Ozeanmodells MPIOM/HAMOCC am MPI-M. Es wurde in einer räumlichen Auflösung von nominell 0.4° (entspricht ca. 45 x 40 km Gitterweite innerhalb des Arabischen Meeres) konfiguriert. Als Antriebsdaten dienten die NCEP-Reanalysedaten, die von 1948 bis 2010 vorlagen. Ausgehend von einem Spinup Lauf des physikalischen Ozeanmodells MPIOM wurden dann fünf Zyklen mit NCEP Antrieb gerechnet. Dabei wurden anthropogene Tracer (CO₂ und CFCs) transient vorgeschrieben, so das ihre atmosphärische Konzentrationen im 5. Zyklus mit derjenigen von 1948-2010 übereinstimmen. Dieser letzte Zyklus wurde dann analysiert, für den das Jahr der Antriebsdaten und der Tracerkonzentrationen identisch ist. Bei den anfallenden Datenmengen (ca. 3 TB) war die dauerhafte Sicherung (und Analyse) nicht trivial. Die Daten wurden daher dauerhaft in einem Bandarchiv gesichert. Das Untersuchungsgebiet und die Analyseregionen sind in Abb. 1 gezeigt.

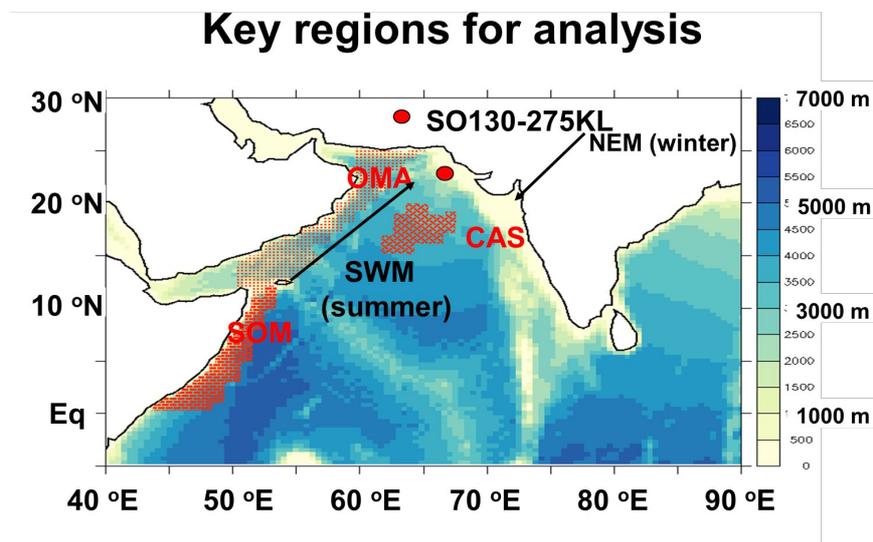


Abbildung 1: Schlüsselregionen für die Analyse der Modellergebnisse. OMA = vor Oman, SOM = vor Somalia, CAS = Central Arabian Sea. SWM=Südwestmonsun, NEM=Nordostmonsun. Die Lage des Sedimentkernes SO130-275KL ist als roter Kreis markiert. Die Meerestiefe ist farblich dargestellt, Farbskala im Balken rechts

Bei der Analyse stand zunächst die Frage im Vordergrund wie sich die Monsunintensität der Antriebsdaten in den ozeanischen Modelldaten widerspiegelt und in welchen Regionen welche atmosphärischen Parameter (z.B., Windgeschwindigkeit, Niederschlag) welche ozeanischen Parameter (z.B. Upwelling, biologische Produktion, Sedimentation) beeinflussen. Ebenfalls wurde untersucht, wie diese Zusammenhänge für den Sommer- bzw. Wintermonsun variieren.

Hierzu wurde zunächst ein Vergleich der Modellergebnisse mit Beobachtungen durchgeführt. Dazu wurden die modellierten Felder von Mixed Layer Tiefe (MLD), Nitrat (NO_3)- und Chlorophyllkonzentration (Chl) für die Periode des Sommermonsuns sowie die Primärproduktion als integral über die euphotische Schicht im Verlauf des Jahres mit Daten von Resplandy et al. (Contribution of mesoscale processes to nutrient budgets in the Arabian Sea, JGR, 2011). Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung der beobachteten und simulierten Verteilungen von MLD, NO_3 und Chl (Abbildung 2).

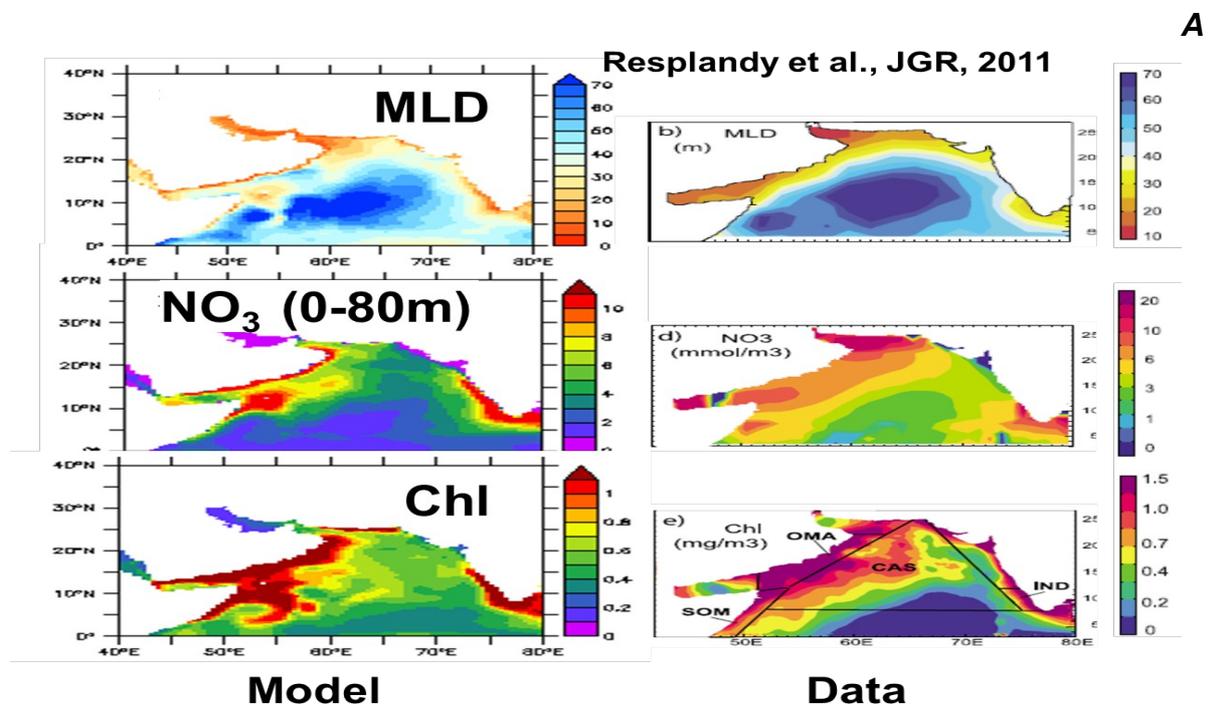


Abbildung 2: Simulierte (links) und beobachtete (rechts) Tiefe der Durchmischungsschicht (MLD), des Nährstoffgehalts (NO_3), und der Chlorophyllkonzentration (Chl).

Die Primärproduktion wurde für drei Schlüsselregionen mit Beobachtungen verglichen: SOM vor der Küste von Somalia, OMA vor der Küste von Oman, und CAS in der zentralen Arabischen See. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs der Primärproduktion (Abbildung 3).

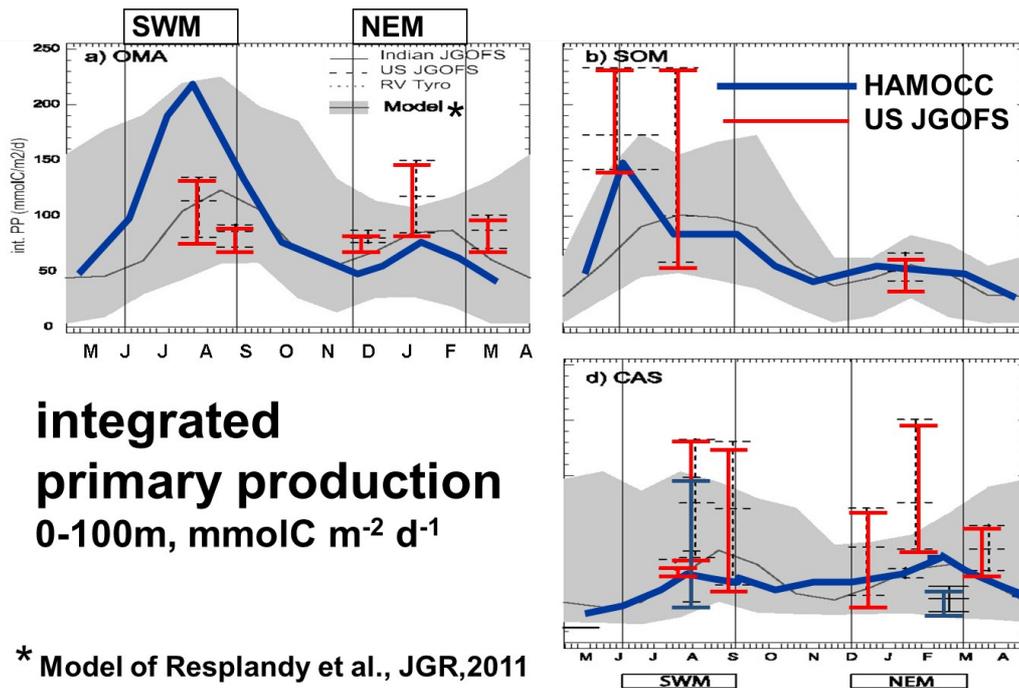


Abbildung 3: Beobachtete und simulierte Primärproduktion im Jahresverlauf in den 3 Schlüsselregionen OMA (vor Oman), SOM (vor Somalia), und CAS (zentrales Arabisches Meer). Dargestellt sind die Ergebnisse von Resplandy et al. (2011) als schwarze Linie und schattierter Bereich (Unsicherheit), HAMOCC (blaue Linie) sowie Beobachtungen und deren Unsicherheiten (vertikale Linien).

In einem nächsten Schritt wurde die zeitliche Korrelation zwischen verschiedenen atmosphärischen Antriebsparametern (Windgeschwindigkeit, kurzweilige Strahlung, Lufttemperatur und Niederschlag) und dem Fluss von Kalziumkarbonat in das Sediment sowohl für den Sommer- als auch den Wintermonsun berechnet um abzuschätzen inwieweit der atmosphärische Monsunantrieb im (modellierten) Sediment abgebildet wird. Hierbei zeigt sich eine relativ starke Korrelation für die Windgeschwindigkeit während des Sommermonsuns vor der Küste Somalias, und für die kurzweilige Strahlung während des Wintermonsuns vor der Küste Pakistans und in der zentralen Arabischen See. Für die anderen untersuchten Parameter sind die Korrelationen weniger eindeutig und räumlich heterogen.

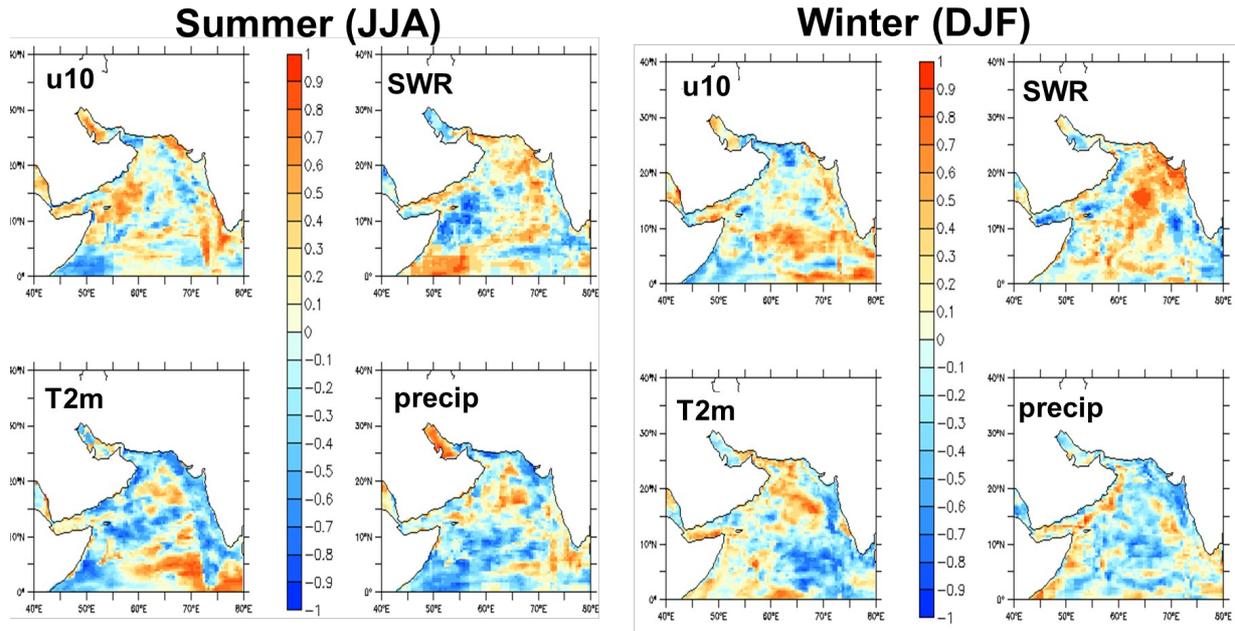


Abbildung 4: Korrelation des CaCO_3 -Flusses in das Sediment mit verschiedenen Parametern für den Sommermonsun (links) und den Wintermonsun (rechts). Von oben links im Uhrzeigersinn: Windgeschwindigkeit in 10m Höhe (u10), kurzwellige Strahlung (SWR), Lufttemperatur (T2m) und Niederschlag (precip)

Schließlich wurde der Zusammenhang zwischen Mixed Layer Tiefe und Primärproduktion an der geographischen Lage des Sedimentbohrkerns SO130-275KL (24°49,31'N, 65°54,60'O) auf der Basis eines CMIP5 Experimentes (*historical*, 1850 - 2005) untersucht. Hierbei ergab sich eine relativ hohe Übereinstimmung der interannualen Variabilität für den Wintermonsun (Nordostmonsun), während die Änderungen während des Sommermonsuns phasenversetzt erfolgen. Insgesamt ist davon auszugehen, daß der Sedimentbohrkern SO130-275KL eher die Intensität des Wintermonsuns abbildet (Abbildung 5). Allerdings ist aufgrund der großen Wassertiefe ein Großteil des an der Oberfläche gebildeten organischen partikulären Kohlenstoffs remineralisiert, bevor er den Meeresboden erreicht.

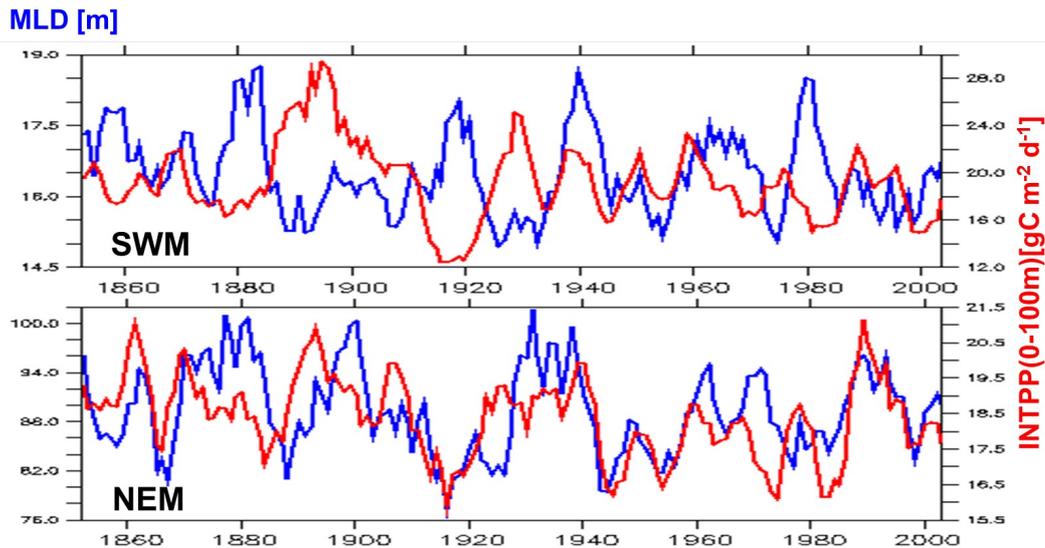


Abbildung 5: Simulierte Tiefe der Durchmischungsschicht (blau, [m]) und Primärproduktion in den in den oberen 100m (rot, [gC m⁻² d⁻¹]) für den Zeitraum des Sommermonsuns (oben) und des Wintermonsuns (unten) an der Lokation des Bohrkerns SO 130-275KL von 1850-2005.

Das Hauptaugenmerk im weiteren Verlauf des Vorhabens lag auf der Analyse des CMIP5 past1000 Modelllaufes mit dem Erdsystemmodell des Max-Planck-Institutes für Meteorologie (MPI-ESM-LR) von 850-1850. Aufgrund der Datenmengen ist diese Analyse recht aufwendig. Zeitliche begrenzte Modellexperimente untersuchten die ozeanischen Freisetzungsraten der Treibhausgase N₂O und DMS aus dem Arabischen Meer.

Bei der Analyse des past1000 Modelllaufes wurde ein Zusammenhang mit der Intensität des Monsuns und den langfristigen Klimaschwankungen festgestellt. Hierzu wurde sowohl ein Wind-basierter als auch ein Niederschlag-basierter Monsunindex aus den Modelldaten berechnet. Während der ‚Medieval Warm Period‘ (MWP) wurde ein stärkerer, während der ‚Little Ice Age‘ (LIA) wurde ein schwächerer Monsun simuliert. Dies stellt einen Fortschritt gegenüber früheren Simulationen der letzten 1000 Jahre mit einer gröber auflösenden Modellversion des MPI-ESM dar (Jungclaus et al., 2010). In dieser Modellversion war noch kein Zusammenhang zwischen klimatischen Bedingungen und Monsun erkennbar.

MPI-ESM simulated summer monsoon index anomalies

Based on JJA all indian rain fall zonal wind anomaly; r=0528

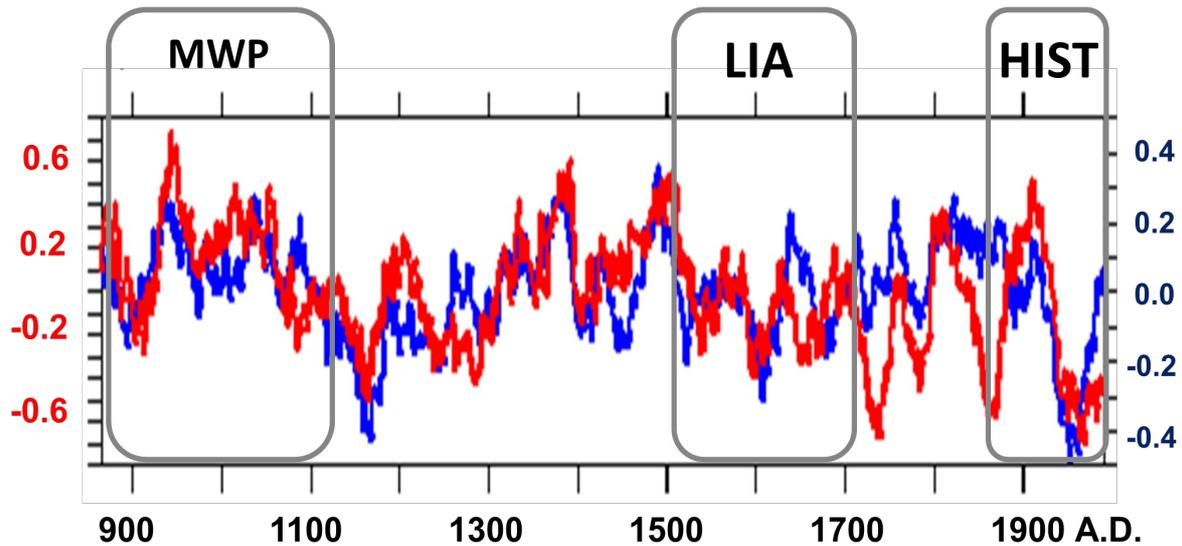


Abbildung 6: Anomalien eines simulierten Sommermonsunindex basierend auf dem Niederschlag über Indien (rot) und der Anomalie des zonalen Windes (blau) von 850 - 2005. MWP=Medieval Warm Period, LIA=Little Ice Age, HIST='historical' period (1850-2005) in IPCC model experiments.

Bei einem Vergleich der simulierten Oberflächentemperaturanomalie mit aus dem Sedimentkern abgeleiteten Werten aus Teilprojekt 1.1 wurde für die beiden Klimaereignisse MWP und LIA eine gute Übereinstimmung gefunden. Generell zeigen die Sedimentkerndaten aber größere Variationen. Die ausgeprägte negative Anomalie der Oberflächentemperatur in den aus dem Sedimentkern abgeleiteten Daten um 1800 wird nicht von Modell simuliert. Die Gründe hierfür sind noch unklar.

Anomalies Central Arabian Sea (850-1850)

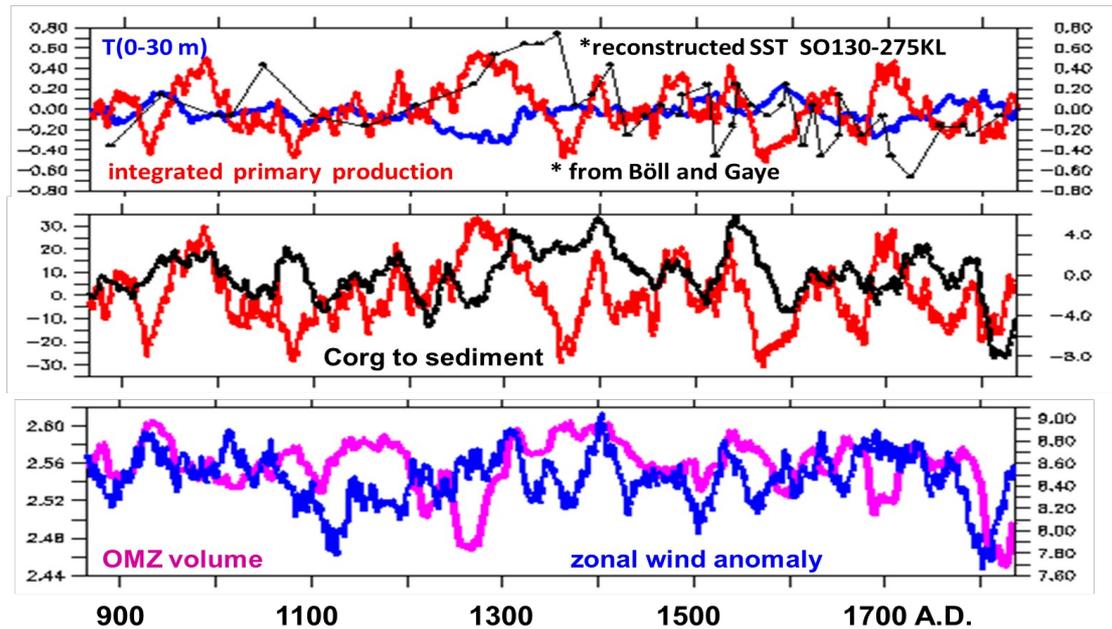


Abbildung 7: Zeitserien in der zentralen Arabischen See (CAS) für oben: Temperatur der oberen 30m (blau), Temperatur aus Sedimentdaten abgeleitet von Böll und Gaye (schwarz) und Primärproduktion in den oberen 100m (rot), mitte: integrierte Primärproduktion der oberen 100m (rot) und Fluss von organischem Material in das Sediment (schwarz); unten: Volumen der Sauerstoffminimumzone (pink) und zonaler Wind (blau).

Weiterhin wurde die Denitrifizierung (die Remineralisierung von organischem Material unter Verwendung des Sauerstoffes aus Nitrat, einhergehend mit dem ‚Verlust‘ des Nährstoffs Stickstoff durch Bildung von N_2) für den vorindustriellen, den gegenwärtigen (2005) und den zukünftigen (2100) Zustand des Arabischen Meeres räumlich analysiert (Abbildung 8). Hierbei ergab sich eine Abnahme der Denitrifizierungsrate schon für 2005 im Arabischen Meer, während die Rate im Golf von Bengalen 2005 höher als im vorindustriellen Zustand ist. Für 2100 (unter Annahme des RCP8.5 Szenarios) wird eine weitere Abnahme im Arabischen Meer simuliert und auch für den Golf von Bengalen werden nun erniedrigte Werte simuliert. Ebenso wurden Zeitreihen der Denitrifizierung für die Schlüsselregionen Zentralarabische See und vor der Küste Omans von 850 -1850 erstellt (blaue Kurven). Diese zeigen eine teils gute Korrelation mit der Zeitreihe des auf Niederschlag basierenden Monsunindex (rote Kurve).

N-cycle: denitrification

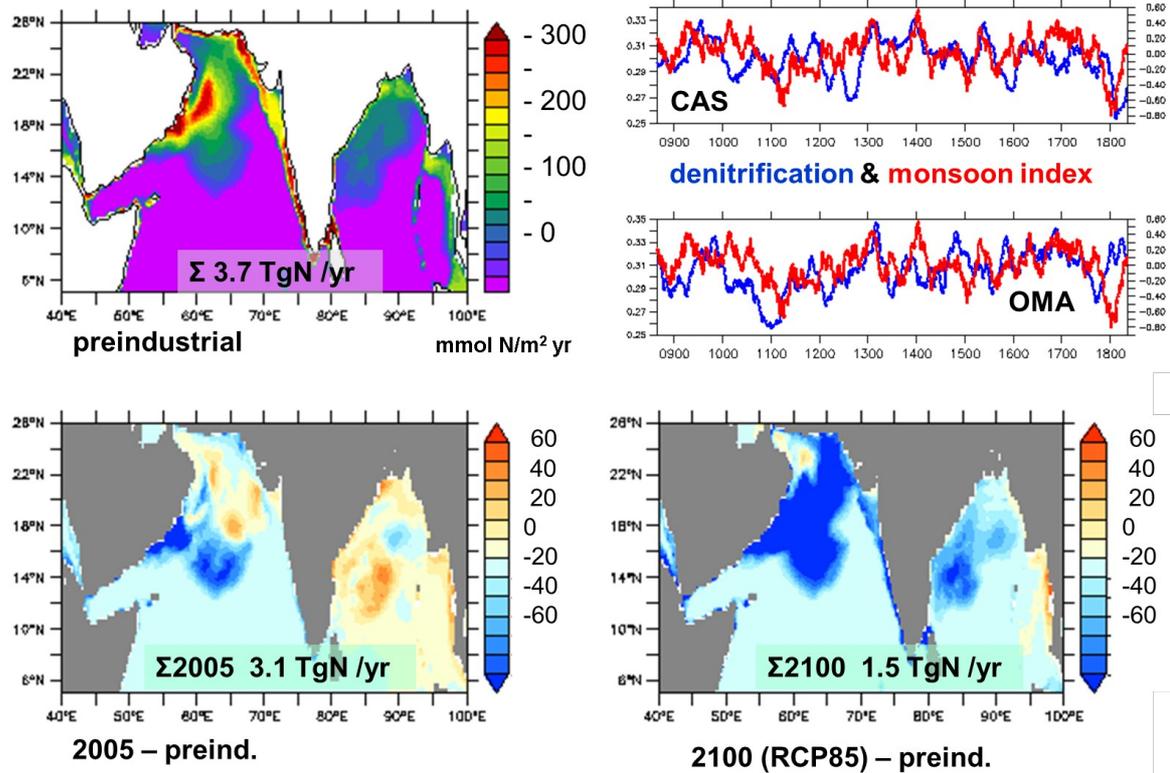


Abbildung 8: Räumliche Verteilung der simulierten Denitrifizierung im Arabischen Meer für oben links: präindustrielle Bedingungen, unten links: Differenz 2005 - präindustriell, unten rechts: Differenz 2100 - präindustriell. Oben rechts: Zeitserien der Denitrifizierung als Summe über die Zentrale Arabische See (CAS) (blau, oben) und vor Oman (OMA) (blau, unten) sowie des Monsunindex (rot) von 850 - 1850.

Die Analyse des N_2O -flusses aus dem Arabischen Meer über den Zeitraum 850-1850 ergab Variationen von etwa 10%, die phasenweise (d.h. über einige hundert Jahre) mit dem windbasierten Monsunindex korreliert sind, phasenweise aber auch unkorreliert. Inwieweit hier die Intensität des Monsuns die Stärke der ozeanischen N_2O -Quelle im Arabischen Meer mitbestimmt, soll noch untersucht werden.

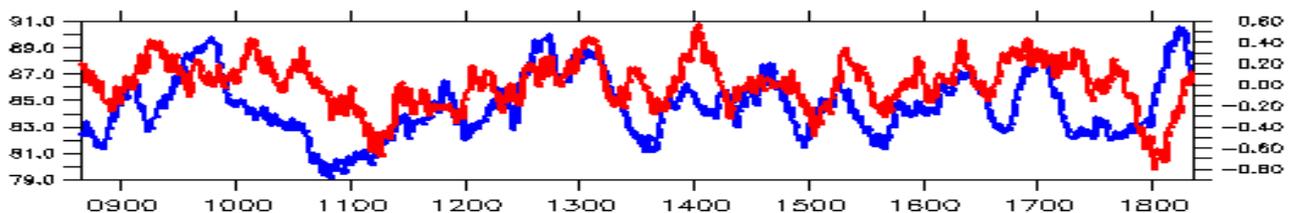


Abbildung 9: Zeitserie des jährlichen N_2O -Flusses als Summe über die Arabische See (blau, Skala links, Einheit= GgN/a) und des Monsunindex (rot, Skala rechts) von 850 -1850.