

**Hydro-, morpho- and sediment-dynamic processes in the
subaqueous Mekong Delta, Southern Vietnam**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Christian-Albrechts Universität

Kiel

vorgelegt von

Daniel Unverricht

Kiel, 2014

Referent: Prof. Dr. Karl Stattegger

Koreferent: Prof. Dr. Sebastian Krastel-Gudegast

Tag der mündlichen Prüfung: 03.Juni 2014

Zum Druck genehmigt: 30.06.2014

gez. Prof. Dr. Wolfgang J. Duschl, Dekan

Ich versichere an Eides statt, dass:

- 1) Ich bis zum heutigen Tage weder an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel noch an einer anderen Hochschule ein Promotionsverfahren endgültig nicht bestanden habe oder mich in einem entsprechenden Verfahren befinde oder befunden habe.
- 2) Ich die Inanspruchnahme fremder Hilfen aufgeführt habe, sowie, dass ich die wörtlich oder inhaltlich aus anderen Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.
- 3) Die Arbeit unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstanden ist.

Kiel,

Unterschrift:

Abstract

Various sediment- and hydrodynamic factors including tides (meso-tidal system), waves, coastal currents and seasonal-driven river discharge influence the coastal zone of southern Vietnam. In particular, the Mekong River Delta (MRD) that belongs to Asian Mega-deltas, represents these land-ocean interactions in many variations. The locally prevailing processes and the amount of sediment, supplied by the Mekong distributaries, characterize the morphology and sediment distribution of the subaqueous delta. In contrast, delta morphology and sedimentary pattern reflect these impacts. This study investigates the hydro-, morpho- and sediment-dynamic processes of the subaqueous MRD to figure out their interactions.

Three cruises in 2006, 2007 and 2008 were carried out in the subaqueous MRD extending from the Bassac River, the main distributary of the MRD, to the coast N of Ca Mau Cape in the Gulf of Thailand. All cruises were performed during the inter-monsoon season (March to May) where wave and wind influences have low effects to sedimentation processes compared to the summer monsoon (May to early October) and winter monsoon season (October to early March). This study presents data of suspended matter (turbidity meter, water samples, LISST-instrument), seismic profiles (Boomer and C-Boom-system), grab and sediment core sampling and point and current-measurements (using Acoustic Doppler Current Profiler) that provide information of current velocities and directions. Data of different tide gauge stations in the MRD were included to compare the mixed semidiurnal–diurnal tidal cycle and related own relevant measurements (e.g. suspended matter, sediment transport direction).

Various factors including tides (meso-tidal system), waves, coastal currents, monsoon-driven river discharge and human impact (agriculture, fishing, sand mining, tourism) influence the MRD. The present study aims to document the seafloor relief, sediment distribution and sediment accumulation rates to interpret modern sediment transport directions and main sedimentation processes in the subaqueous Mekong Delta.

The major results of this investigation include the detection of two delta fronts 200 km apart, one at the mouth of the Bassac River (the biggest branch of the Mekong Delta) and the other around Ca Mau Cape (most south-western end of the Mekong Delta). The sediment accumulation rates vary greatly according to the location in the subaqueous delta and have reached up to 10 cm/yr for the last century. A cluster analysis of surface sediment samples revealed two different

sediment types within the delta including well-sorted sandy sediment and poorly sorted, silty sediment. In addition, a third end member with medium to coarse sand characterizes the distant parts of the delta at the transition to the open shelf. The increase of organic matter and carbonate content to the bottom set area and other sedimentary features such as shell fragments, foraminifera and concretions of palaeo-soils that do not occur in delta sediments, supports grain size-based classification.

Beginning in front of the Bassac River mouth, sedimentary pattern indicates clockwise sediment transport alongshore in western direction to a broad topset area and the delta front around Ca Mau Cape. Our results clearly show the large lateral variability of the subaqueous Mekong Delta that is further complicated by strong monsoon-driven seasonality. River, tidal and wave forcing vary at local and seasonal scales with sedimentary response to localized short term depositional patterns that are often not preserved in long term geological records.

Land-ocean interactions in the coastal zone are severely influenced by tidal processes. In regions of high sediment discharge like the Mekong River Delta in southern Vietnam, these processes are even more significant.

Cruise results show significant areas of suspended sediment concentrations (SSCs) greater than 25 $\mu\text{l/l}$ in the Mekong River branches and its subaqueous delta during the inter-monsoon season. 20 % of all measured SSCs in the subaqueous Mekong Delta exceed 100 $\mu\text{l/l}$. Highest concentrations occur close to the seabed. SSCs decrease at the transition to the open shelf. The shelf region contains only low suspension loads, especially on the south-eastern shelf (99 % of all samples < 25 $\mu\text{l/l}$). However, in the southern shelf region around Ca Mau Cape the suspension load is also higher (> 25 $\mu\text{l/l}$) close to the seabed in water depths of 20 to 25 m.

Two surveys lasting 25 hours each were performed on mooring stations in 12 m (Mooring 1) and 26 m (Mooring 2) water depth and located 3.2 km apart on the subaqueous delta slope. Similar patterns of SSC over time show that concentrations of suspension load correlate with the tidal current velocities. High tidal current velocities of up to 0.6 m/s near the sea bottom generate increasing SSCs of more than 25 $\mu\text{l/l}$ in the water column. Additionally a significant trend of decreasing SSC from the near-seabed to the upper part of the water column can be observed. In terms of sediment transport the ebb phase dominates the tidal cycle by its higher tidal current velocities but the flood phase has the longer duration. The switch of the tidal current direction

from ebb to flood phase occurs rapidly against which the change from flood to ebb phase requires up to 3 hours. This leads to an asymmetry of the tidal ellipses and may cause a net-sediment transport from the shelf into the subaqueous Mekong delta.

In the subaqueous Mekong Delta and adjacent shelf, seven transects show similar patterns of SSCs dependent to the tidal phase. A hypopycnal sediment plume from the subaqueous Mekong Delta into the shelf region was not observed. Our results imply that resuspension by tidal currents dominates the sediment transport in the subaqueous Mekong Delta and adjacent shelf regions during the inter-monsoon season.

Mega-deltas like the Mekong River delta differ in shape and sedimentary pattern in dependence on the interplay of river, tide and wave forces. Specific hydro- and morphodynamic conditions in the subaqueous part of the Mekong River Delta generate a sand-ridge-system combined with erosional channels, which is unique in subaqueous delta formations. This large-scale morphological feature extends along the delta front, in particular, the delta slope and subaqueous delta platform of the Mekong River Delta. A system consisting of two sand ridges and two erosional channels (termed sand-ridge-channel-system (SRCS)) covers at least an area of 1971 km² and extends in minimum 128 km along the coast. Three different areas west of the Bassac river mouth, the largest and western-most Mekong distributary, were distinguished according to their morphology. The eastern area, where the channel-ridge formation begins, stretches along the delta slope and inner shelf platform southwest of the Bassac river mouth with slightly concave and erosional features. The central area covers the southern part of the subaqueous delta platform with a pronounced sand-ridge and erosional channel morphology. Hydroacoustic cross-sections of the SRCS reveal an asymmetric shape including steeper ridge flanks facing into offshore direction. The channel troughs incise up to 18.2 m b.s.l. and 10.5 m from the ridge top at the shallow subaqueous delta platform, respectively. At the western part of the central area, the sand ridges pinch out while the two channels merge into one and form a giant scour of up to 33 m water depth within the subaqueous delta platform of generally less than 7.7 m water depth. In the western area, the channel gets shallower and vanishes along the south-western most subaqueous delta platform around Ca Mau Cape.

Headland retreat and sediment transport from erosive areas of the Mekong river delta coast are the source to form the sand-ridges and coastal subparallel tidal currents maintain and stabilize

them. In contrast, tide and wind-driven currents cut the erosional channels, which act as fine sediment conveyor to the distal part of the delta front that is 200 km apart of the next main distributary. The SRCS represents a new morphological feature in the subaqueous deltaic environment and is a relevant indicator of delta instability and coastal erosion in subaqueous deltas.

Zusammenfassung

Einflüsse sediment- und hydrodynamischer Faktoren wie Tide, Wellen, küstennahe Strömungen und sich verändernde Flusseinträge infolge jahreszeitlich bedingter Wettervariationen (Monsun) sind in den Küstenzonen zu beobachten. Besonders das Mekong-Delta in Südvietsnam, das zu Asiens großen Deltas zählt, repräsentiert diese Interaktionen zwischen Land und Meer in vielfacher Weise. Der Flusseintrag aus den Mekongarmen und die lokal domierenden Prozesse bestimmen die Deltamorphologie und die örtliche Sedimentverteilung im subaquatischen Delta. Im Gegensatz gibt die Deltaform und die Sedimentverteilung Einsichten über die Einflussfaktoren wieder. Diese Arbeit beschäftigt sich mit den hydro-, morpho- und sedimentdynamischen Prozessen im subaquatischen Mekongdelta und versucht einen Beitrag zum Verständnis ihrer Interaktionen zu leisten.

In den Jahren 2006, 2007 und 2008 wurden Forschungsausfahrten in das subaquatische Deltagebiet zwischen dem Bassac Fluß, dem größten Hauptarm im Mekongdelta, und dem östlich gelegenen Golf von Thailand durchgeführt. Alle Ausfahrten fanden während der Intermonsunzeit statt (März bis Mai), in der vergleichsweise zur Sommer- und Wintermonsunzeit (Mai bis anfang Oktober bzw. Oktober bis März) Wind- und Wellenenergie geringen Einfluss auf die Sedimentationsprozesse haben. Diese Studie verarbeitet Daten von Sedimentschwebstoffen (Trübmessers, Wasserproben, LISST-Instrument), hydroakustischen Profilen (Boomer und C-Boom-System), Backgreiferproben und Schwerelotkernen. Des Weiteren wurden Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen mit Hilfe eines ADCPs (Acoustic Doppler Current Profiler) entlang von Profilen und an speziellen Ankerstationen über die gesamte Wassersäule aufgenommen. Die tideabhängigen Wasserstandsveränderungen entlang der Küste des Mekongdeltas wurden von geeigneten Messstationen hinzugezogen, um die Tidephasen mit den eigenen Untersuchungen zu korrelieren.

Das Mekong-Delta wird von vielfältigen Faktoren wie Tide (meso-tidales System), Windwellen, küstennahe Strömungen, monsungesteuerter Ausfluss der Flüsse und menschlichen Eingriffen (Agrikultur, Fischerei, Sandausbaggerungen, Tourismus) geprägt. Deshalb soll die rezente Untersuchung darauf zielen, die Meeresbodenmorphologie, Sedimentverteilung und Sedimentakkumulationsraten zu erfassen, um somit die gegenwärtige Sedimenttransportrichtung und die dominierenden Sedimentationsprozesse im subaquatischen Mekong-Delta zu interpretieren.

Im Mekong-Delta sind zwei Deltafronten herausgebildet. Eine befindet sich direkt vor dem Bassac-Fluss und den Hauptflussmündungen des Mekong-Flusses während die Zweite sich 200 km am Kap Ca Mau, dem südwestlichen Ende des Mekong-Deltas, erstreckt. Die Sedimentakkumulationsraten des subaquatischen Mekong-Deltas sind stark ortsabhängig und erreichen für das letzte Jahrhundert bis zu 10 cm/a. Eine Clusteranalyse der Oberflächensedimente ergab zwei Sedimenttypen, die das subaquatische Mekong-Delta repräsentieren. Der erste Typ besteht aus gut sortierten Sanden während der zweite Typ ein breites Korngrößenspektrum dominierend in der Siltfraktion aufweist und schlecht sortiert ist. Ein drittes Cluster, bestehend aus mittleren und groben Sanden, charakterisiert den distalen Deltabereich im Übergang zum offenen Schelf. Die auf der Korngrößenverteilung basierende Klassifikation wird sowohl durch einen anwachsenden Anteil an organischen Material und erhöhtem Karbonatanteil am auslaufenden Deltahang in seewärtiger Richtung als auch vorkommende Muschelbruchstücke, Foraminiferen und Konkretionen von Paläoböden, die nicht in Deltasedimenten vorkommen, unterstützt.

Die Sedimentmuster seewärts des Bassac-Flusses zeigen einen Sedimenttransport im Uhrzeigersinn und in westlicher Richtung entlang der Küste bis zu einem breiten flachen Gebiet der Deltafront von Kap Ca Mau. Die subaquatischen Deltasedimente zeigen eine sehr hohe laterale Variabilität auf, die durch die stark lokal und monsungesteuerte saisonal variierende Wirkung aus Flussfracht, Tide und Wellen resultiert. Häufig werden diese Sedimente nicht in langfristigen geologischen Aufzeichnungen erhalten.

Tideprozesse beeinflussen die Interaktion zwischen Land und Meer. Besonders in Regionen mit einem hohen Sedimentausfluss wie im Mekongdelta in Südvietnam sind diese Prozesse weitaus stärker von Bedeutung.

Während der Forschungsausfahrten in der Intermonsunzeit sind erhöhte Sedimentkonzentration größer $25\mu\text{l/l}$ in Bereichen der Hauptflussarme des Mekongs und des subaquatischen Gebietes beobachtet worden. Im Besonderen überstiegen 20 % aller Messungen im subaquatischen Delta eine Sedimentkonzentration von $100\mu\text{l/l}$, wobei die höchsten Werte nahe des Meeresbodens gemessen wurden. Im Übergang zum offenen Schelf nehmen die Sedimentkonzentrationen ab und speziell in der südöstlichen Schelfregion sind 99 Prozent aller Messungen unterhalb von $25\mu\text{l/l}$. Eine Ausnahme zeigt das südliche Schelfgebiet um das Kap Ca

Mau, wo bodennah in Wassertiefen von 20 bis 25 m eine erhöhte Sedimentschwebfracht ($>25 \mu\text{l/l}$) auftritt.

Es wurden zwei Untersuchungen von jeweils 25 Stunden an Ankerstationen in Wassertiefen von 12 m (Ankerstation 1) und 26 m (Ankerstation 2) durchgeführt, um jeweils über eine Tidephase die Sedimentkonzentrationen der Wassersäule und die Strömungsgeschwindigkeiten bzw. -richtungen in unterschiedlichen Wassertiefe zu ermitteln. Die Stationen befinden sich am subaquatischen Deltahang und 3.2 km voneinander entfernt. Beide Untersuchungen zeigen über die Zeit ähnliche Sedimentverteilungen, die mit den Tidesströmungen korrelieren. Es werden erhöhte Sedimentkonzentrationen ($>25 \mu\text{l/l}$) bei hohen Tidesströmungen von bis zu 0.6 m/s gemessen. Zusätzlich ist ein abnehmender Trend der Sedimentkonzentration vom bodennahen Bereich hin zu der Meeresoberfläche zu beobachten. Bezüglich des Sedimenttransportes hat die Ebbphase höhere Strömungsgeschwindigkeiten gegenüber der Flutphase, die jedoch länger andauert. Des Weiteren ist der Wechsel von Ebb- zur Flutphase sehr schnell während der Übergang von Flut zu Ebbe bis zu 3 Stunden andauern kann. Die erzeugte Asymmetrie der Tideellipse, kann infolge der höheren Tidesströmungen der Ebbphase einen Netzsedimenttransport vom Schelf in das subaquatische Mekong-Delta verursachen.

Sieben Transekte zeigen in Abhängigkeit zur Tidephase im subaquatischen Mekong-Delta und dem angrenzenden Schelf ähnliche Schwebfrachtverteilungen. Ein hypopyknischer Plume vom subaquatischen Mekong-Delta in den offenen Schelf ist nicht beobachtet worden. Aus den Untersuchungsergebnissen ist zu folgern, dass während der Intermonsunzeit der Sedimenttransport aufgrund der Resuspension durch Tidesströmungen erfolgt.

Der lokale Einfluss von Tide, Wellen und Flüssen prägt die Morphologie und Sedimentverbreitung in großen Deltas wie dem Mekong-Delta. Spezifische hydro- und morphodynamische Bedingungen bilden im Mekong-Delta ein Sandrücken-System in Verbindung mit erosiven Rinnen, dass einzigartig in subaquatischen Deltagebieten ist. Es erstreckt sich großräumig entlang der Deltafront, im Besonderen am Deltahang und der subaquatischen Deltaplattform. Bestehung aus zwei Sandrücken und zwei erosiven Rinnen nimmt es mindestens eine Fläche von 1971 km² ein und verläuft 128 km entlang der Küste. In Abhängigkeit von der Morphologie werden drei Einheiten westlich der Mündung des Bassac-Flusses, dem größten und westlichsten Flussarm des Mekong-Deltas, unterschieden. Der östliche

Bereich des Sandrücken-Rinnen-System beginnt südwestlich der Bassac-Flussmündung. Dort erstreckt es sich am Deltahang und der inneren Schelfplattform und ist morphologisch durch konkave und erosive Merkmale am Meeresboden gekennzeichnet. Den zentralen Bereich des Sandrücken-Rinnen-Systems nimmt die südliche subaquatische Deltaplattform ein, auf der die Sandrücken und erosiven Rinnen deutlich ausgeprägt sind. Anhand hydroakustischer Querschnitte durch das Sandrücken-Rinnen-System ist seine asymmetrische Form gut erkennbar, wobei die steileren Flanken in seewärtige Richtung zeigen. Die Rinnen schneiden sich bis zu 18 m Wassertiefe und bis zu 10.5 m, gemessen vom Rückenamm, in die subaquatische Deltaplattform ein. Im westlichen Bereich des zentralen Gebietes laufen die Sandrücken aus und die Rinnen vereinigen sich in Form einer großen Kolkung von bis zu 33 m Wassertiefe in der subaquatischen Deltaplattform, die im Umfeld der Kolkung Wassertiefen kleiner als 7.7 m aufweist. In dem westlichen Gebiet des Sandrücken-Rinnen-Systems wird die einzelne Rinne stetig flacher bis sie in der südwestlichen subaquatischen Deltaplattform um das Kap Ca Mau verschwindet.

Rückschreitende Erosion an Landzungen und weitere erosiven Küstengebiete des Mekongdeltas sind Nährgebiete für die Sandrücken während Tidedrömungen, subparallel zur Küste, sie unterhalten und stabilisieren. Im Gegensatz formen auch Tide- und windinduzierte Strömungen die Rinnen, die sich tief in die subaquatische Deltaplattform einschneiden und als Sedimentförderband zu der distalen Deltafront um das Kap Ca Mau dienen, das 200 km von der nächsten Hauptflussmündung entfernt liegt. Das Sandrücken-Rinnen-System repräsentiert eine neue morphologische Besonderheit in einer Deltaumgebung und ist ein Indikator für Instabilitäten und Küstenerosion in subaquatischen Deltas.