

---

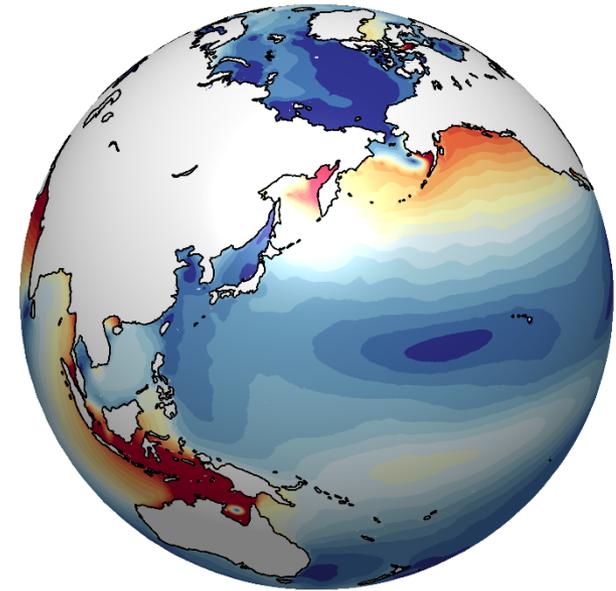
# Festvortrag Karl Rinner Preis 2016

17. Oktober 2017

---

## Ozeanmodellierung als Instrument der geodätischen Erdsystemforschung

Michael Schindelegger

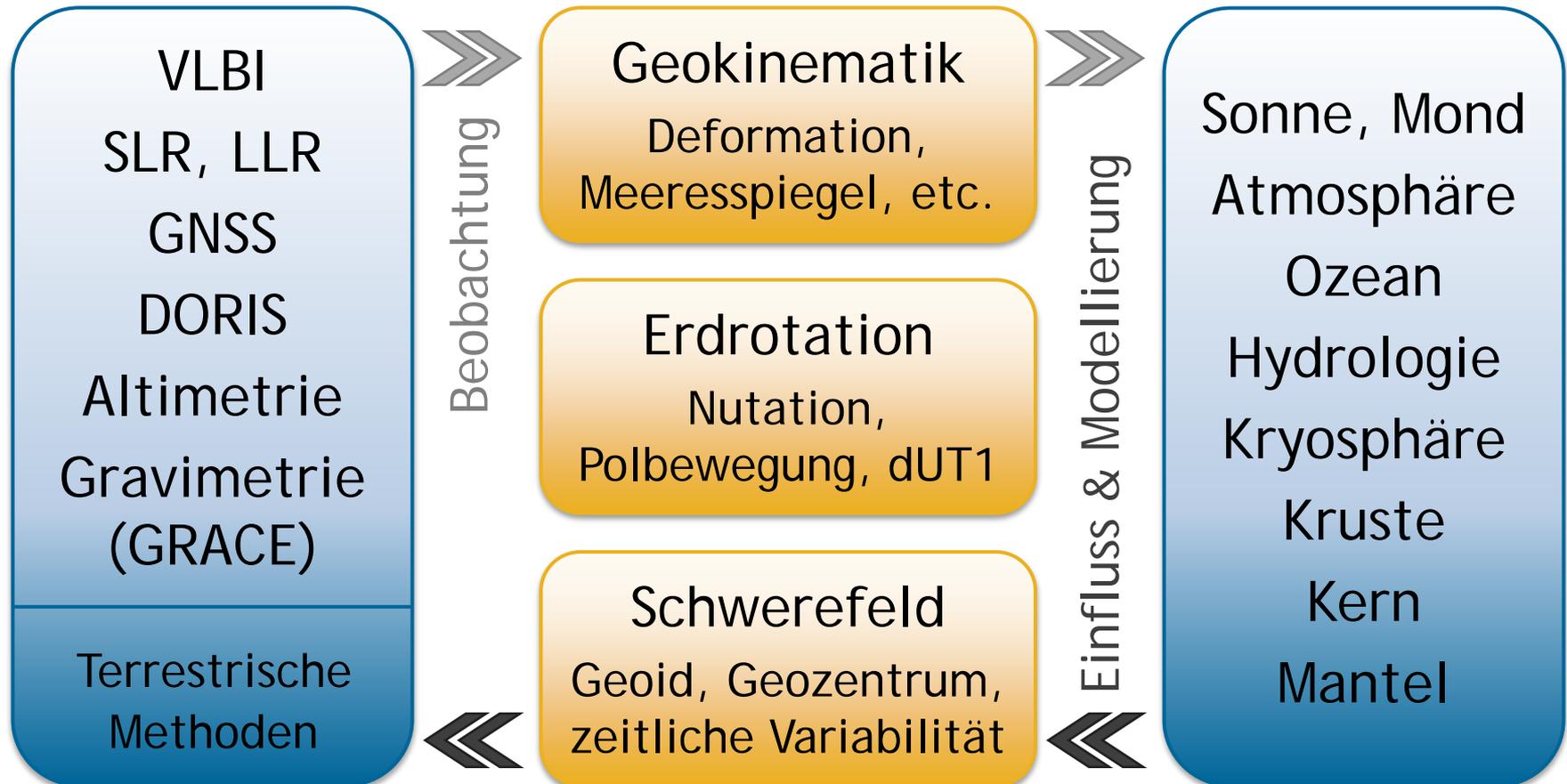


# Geodätische Erdsystemforschung

## Messung & Modellierung des Erdsystems in der Geodäsie:

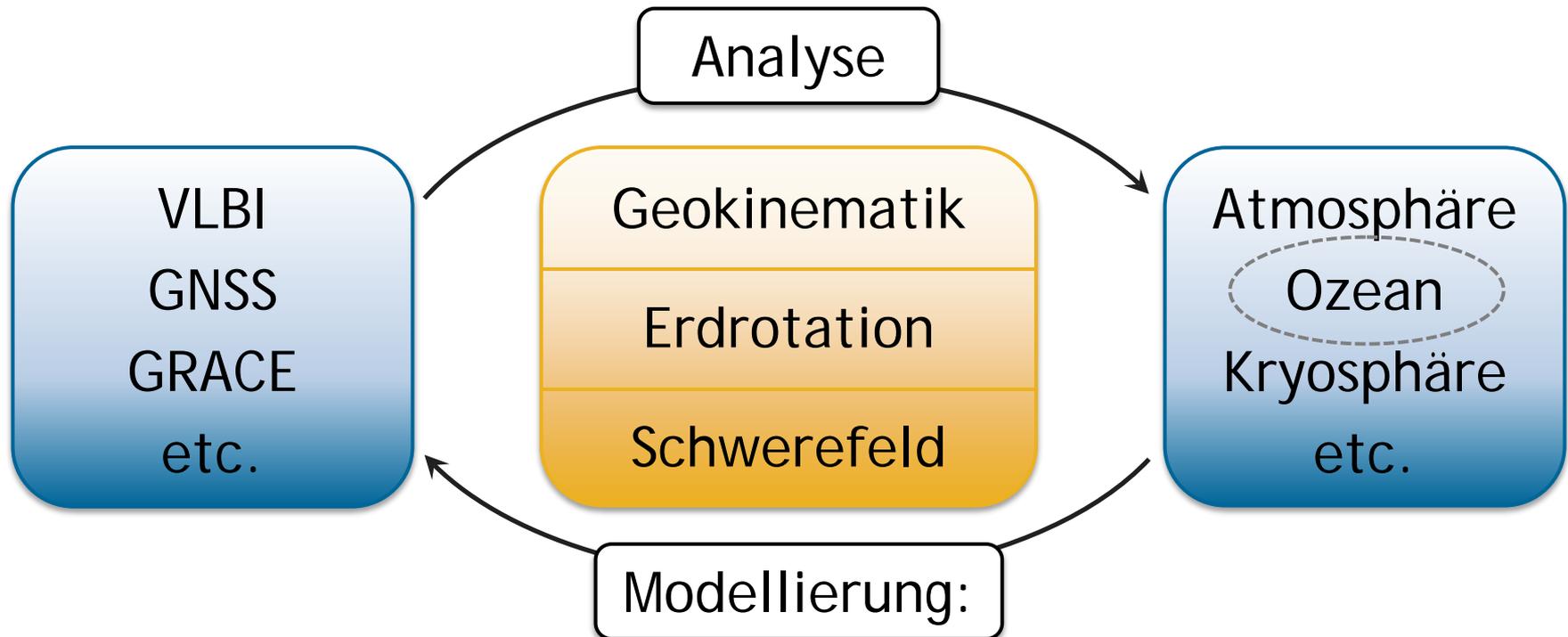
Globale Messverfahren

Erdsystem



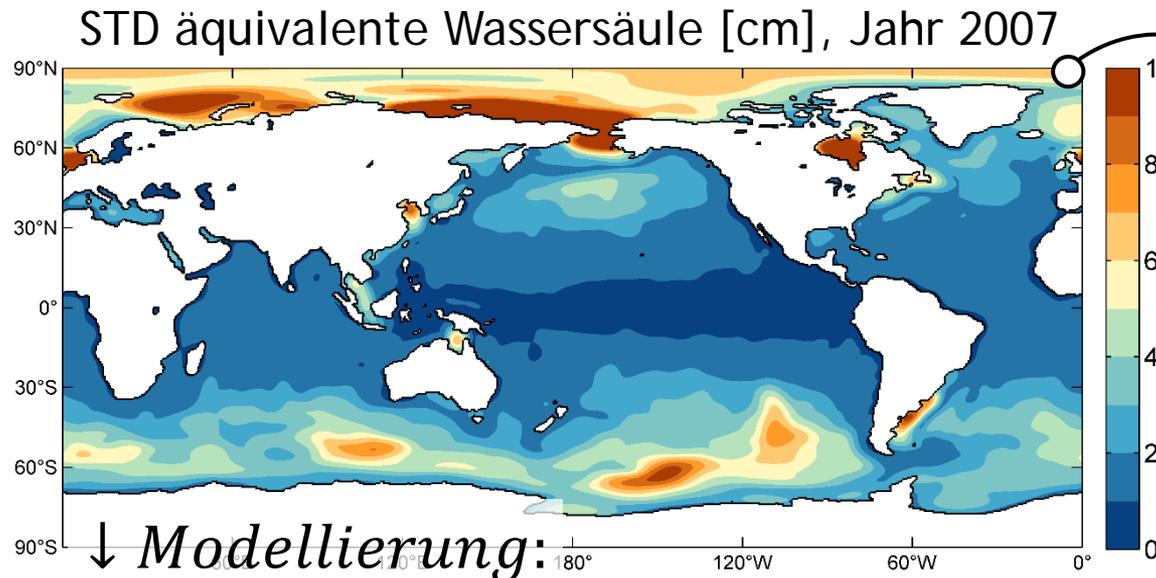
# Geodätische Erdsystemforschung

Eine geeignete **Analyse der Beobachtungen**, aber auch die **Modellierung** erlauben Rückschlüsse auf dynamische Prozesse



- Mit welcher Detailtreue kenne ich das Erdsystem?
- Was ist modelliert, was ist noch zu vervollständigen?

## Beispiel Ozean: Sub-monatliche Bodendruckvariationen



→ *Geodäsie:*

- Signal als Alias in der Satellitengravimetrie
- Auflasteffekte in der Analyse von GNSS-, VLBI-, SLR-Daten

- ❖ Wind- und Druckantrieb der Atmosphäre relevant?
- ❖ Modellperformance gegenüber Beobachtungen einstellbar?
- ❖ Signale noch anderweitig von Interesse? (z.B. Antarktischer Zirkumpolarstrom, s. *Bergmann & Dobsław 2012*)

# Exkurs Ozeanmodellierung

## Numerische Ozeanmodelle (I):

- Komplexes 3D System, formuliert als Satz von Differentialgleichungen (DGL) + Randbedingungen

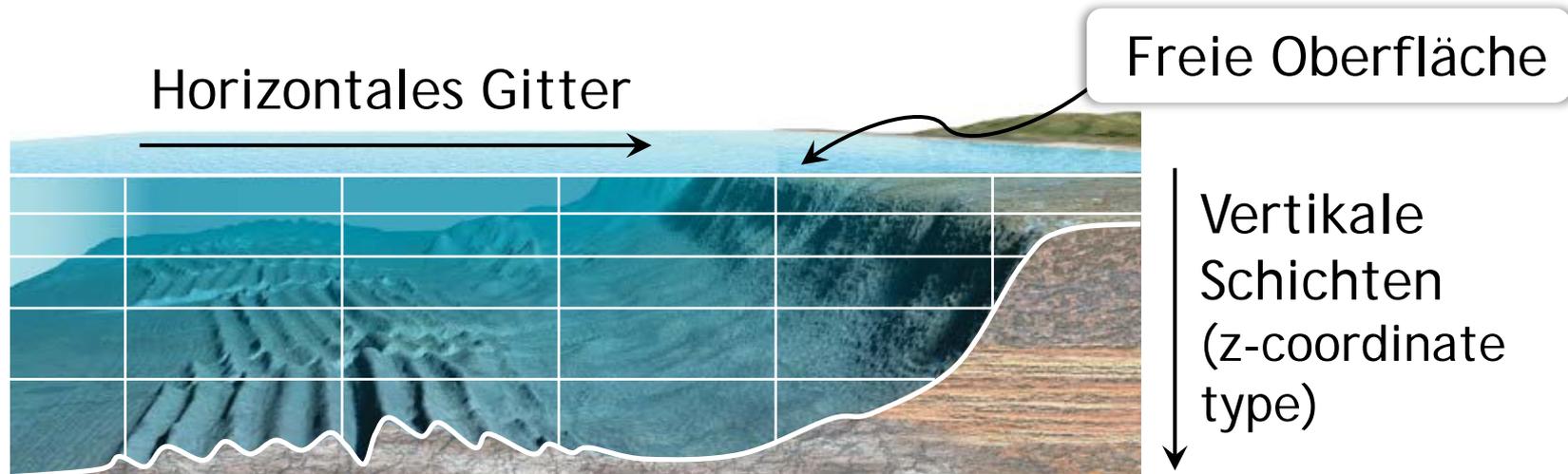


Weiterer Antrieb: Gravitationswirkung → ozeanische Gezeiten

# Exkurs Ozeanmodellierung

## Numerische Ozeanmodelle (II):

- Ergänzung / Variation von Termen (z.B. im Forcing)
- Lösung der DGL von initialem Zustand aus mittels Zeitschrittverfahren und **finiten Differenzen**:

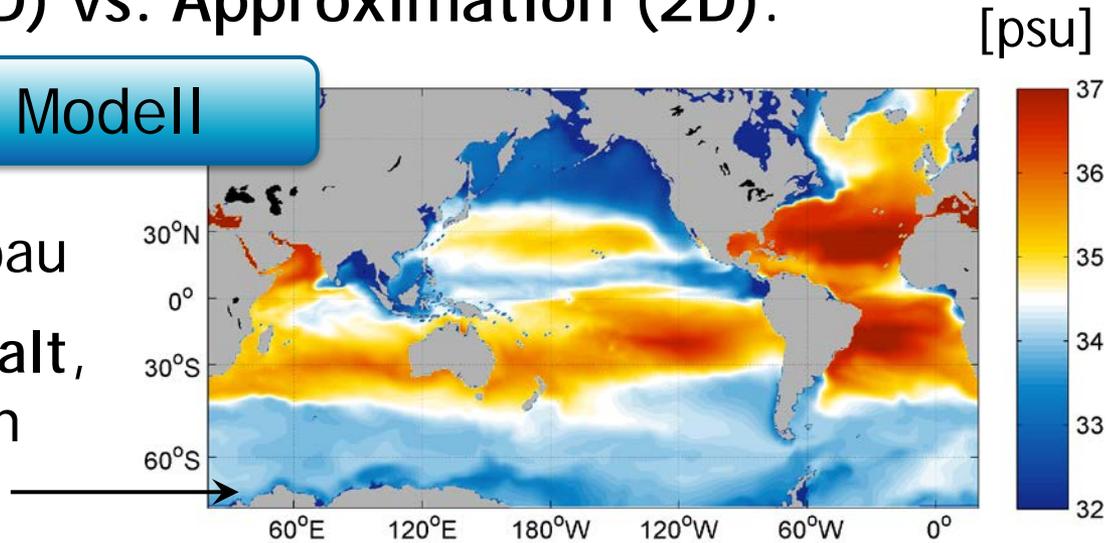


# Exkurs Ozeanmodellierung

Volles Ozeanmodell (3D) vs. Approximation (2D):

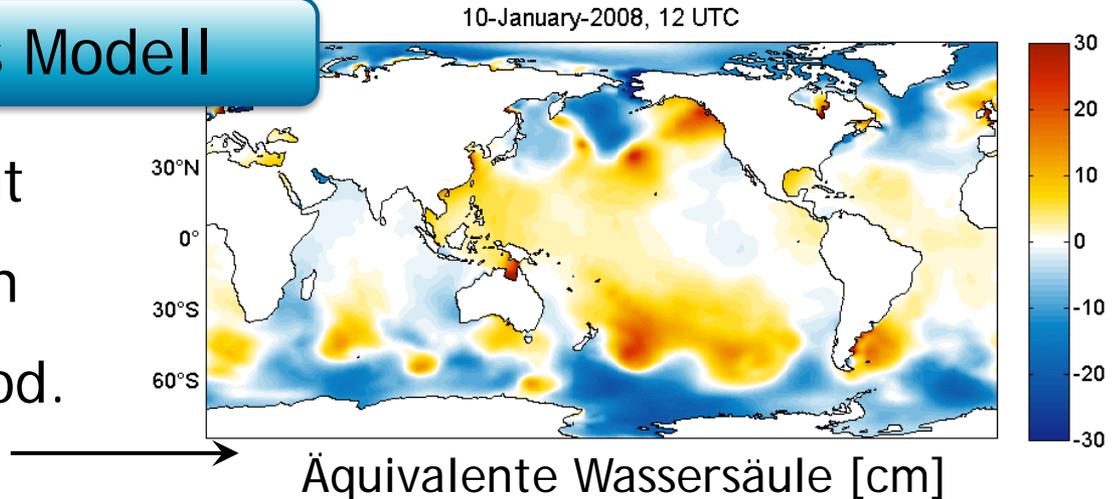
## Baroklines Modell

- Mehrschichtiger Aufbau
- Temperatur, Salzgehalt, Dichte, etc. variieren



## Barotropes Modell

- Eine vertikale Schicht
- Keine Dichtevariation
- Gezeiten & kurzperiod. Bodendrucksignale



# Ozeanmodellierung - Geodäsie

Basiswissen zum Ozean:



Konkrete Fragestellung  
in meinen Arbeiten:

$S_1$  Gezeit in der Erdrotation:

Polbewegung

Tageslängen-  
schwankung

Nutation



# $S_1$ Gezeit in der Nutation

**Einführung Nutation:** Orientierungsänderungen der Rotationsachse im Raum v.a. hervorgerufen durch ...

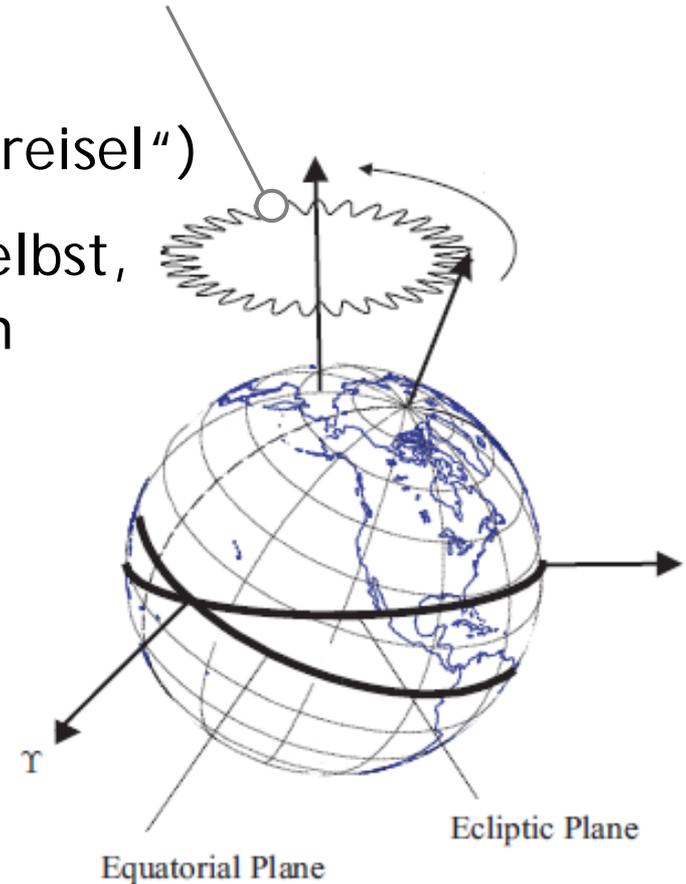
- Lunisolare Drehmomente („Erde als Kreisel“)
- Massenverlagerungen im Erdsystem selbst, insbesondere: tägliche Ozeangezeiten

A priori  
Nutationsmodell

Reihenentwicklung  
lunisolarer  
Drehmomente

Erdaufbau

Drehimpuls  
ozeanischer Tiden



Satellitenaltimetrie

# Einführung Nutation

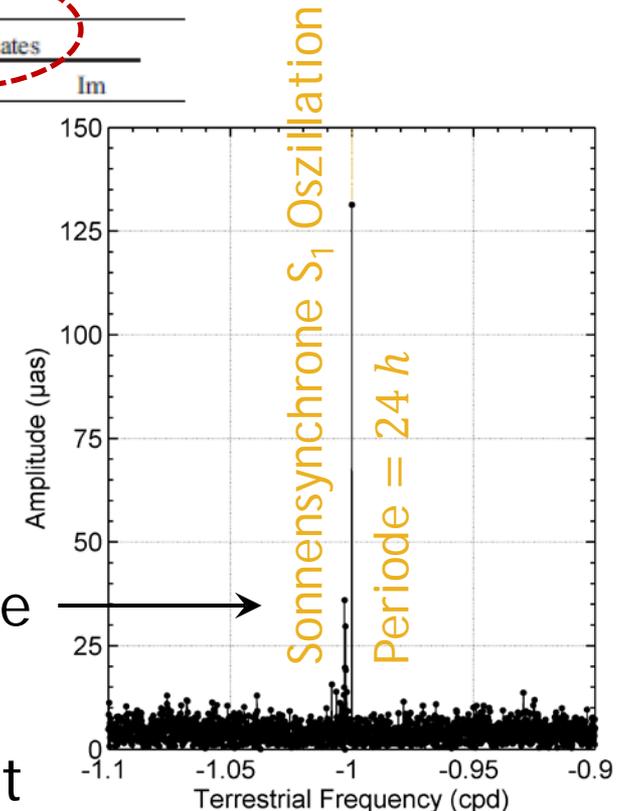
Aktuelles Nutationsmodell der IAU nach *Mathews, Herring, Buffet (MHB, 2002)* → *semianalytisch*

Theorie

Beobachtung

Table 1. Nutation Amplitudes and Precession Rate: VLBI Estimates

Period, days	Rigid Earth		VLBI Estimates	
	Re	Im	Re	Im
			<i>Nutation Amplitudes</i>	
-6798.38	-8050.866	0.078	-8024.825	
6798.38	-1177.044	0.074	-1180.497	
-3399.19	86.742	0.000	86.121	
3399.19	3.595	0.003	3.586	
		...		
-365.26	-24.894	0.000	-33.039	
365.26	25.029	0.000	25.645	
-346.64	-0.456	0.000	-0.565	
346.64	-0.067	0.000	-0.063	
-182.62	-22.592	0.000	-24.568	
182.62	-530.742	0.000	-548.471	
		...		

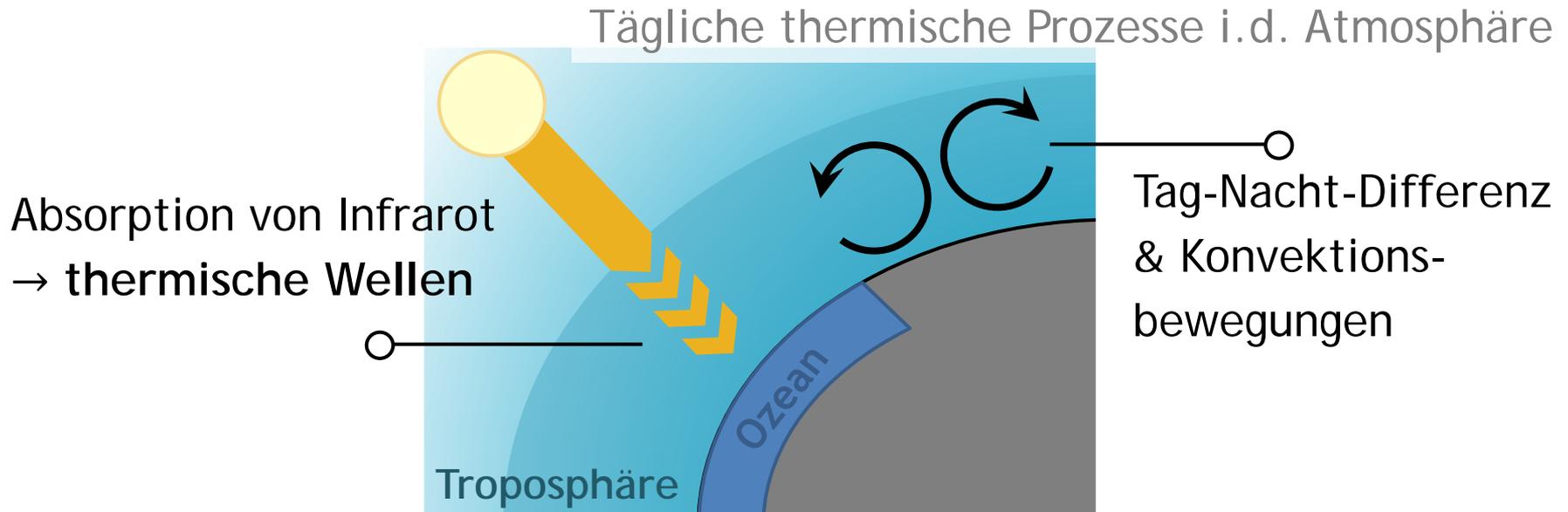


- Anomalie bei Optimierung der Theorie
- Empirisch (aus den VLBI-Daten) geschätzt und dem Modell hinzugefügt

# Einführung $S_1$

## Modellschätzungen anstelle dieser empirischen Korrektur?

- Ansatz von *Brzeziński et al. (2004, 2011)*
- Physik muss klar sein:  $S_1$  = Atmosphäre-Ozean-Signal



- Tägliche Druckvariation Ursache für  $S_1$  im Ozean
- Signal  $\sim 1 \text{ cm}$   $\Rightarrow$  Modellierung anstatt direkter Beobachtung

# Numerische Modellierung

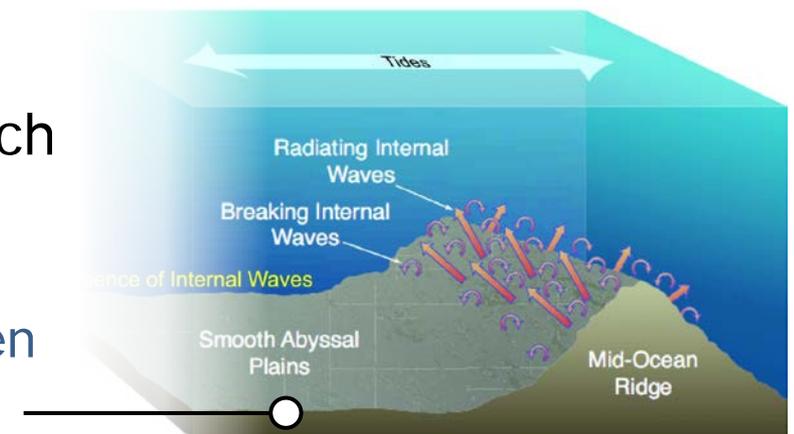
Begutachtung früherer Studien:

Gezeitenmodellierung mit folgenden Mankos:

- ❖ Ozeanmodelle Auflösung horizontal nur  $1 - 2^\circ$
- ❖ Auflast und Selbstanziehung (SAL) bleiben unberücksichtigt
- ❖ Energiezerstreuung anhand überhöhter Viskosität - physikalisch & plausibel ist aber ...

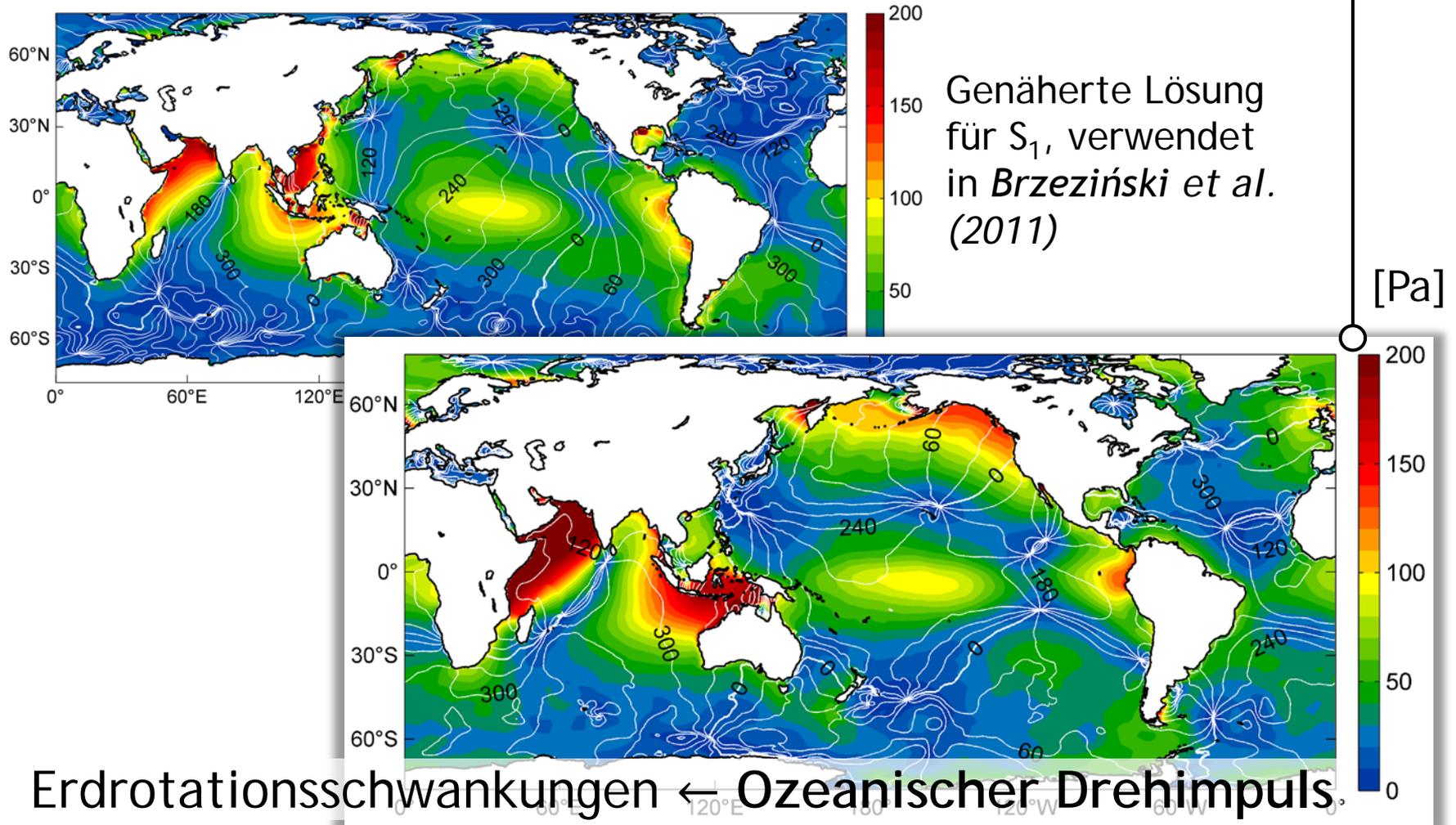
Umwandlung von barotropen Strömungen in interne Wellen („internal tide drag“)

<i>phase (<math>\mu</math>as):</i>	<i>in</i>	<i>out-of</i>
<i>Brzeziński et al. (2004)</i>	113.1	96.1
<i>Brzeziński et al. (2011)</i>	-60.6	83.9
MHB VLBI	-16.2	113.4



# Numerische Modellierung

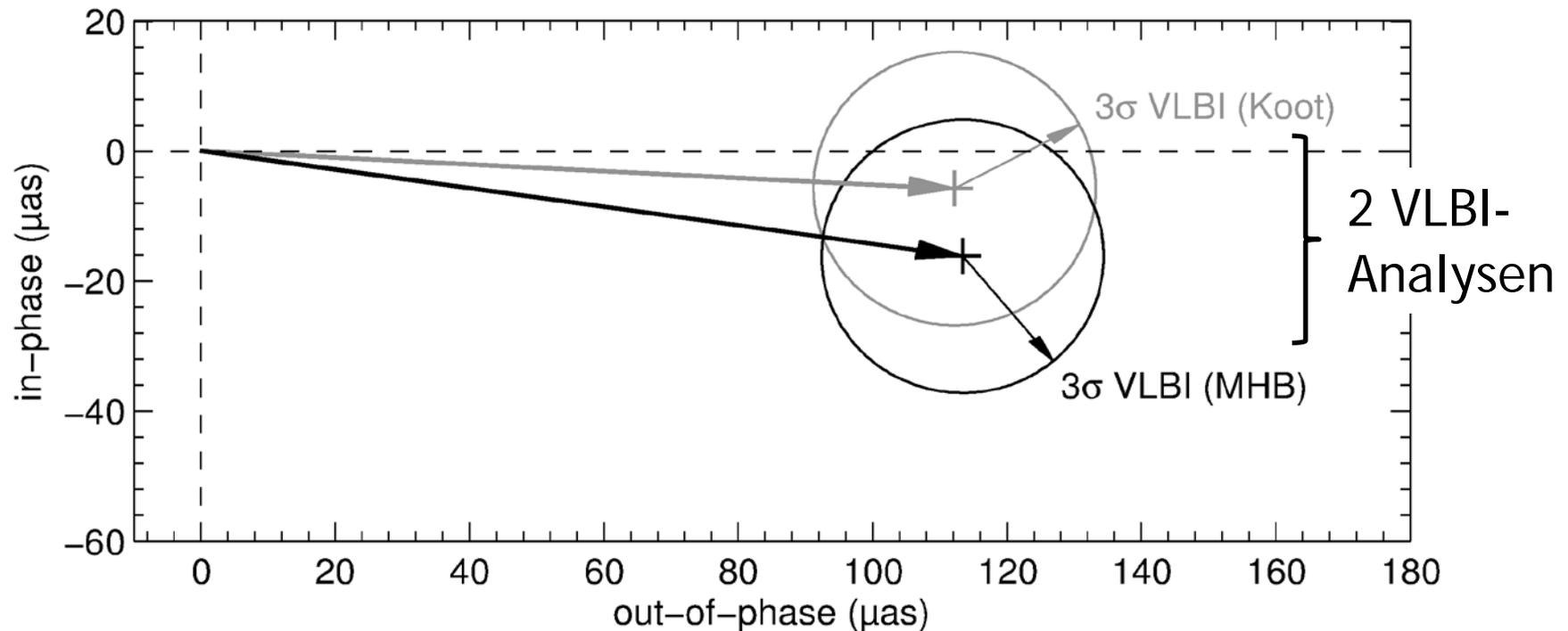
Modellierungsergebnisse,  $1/3^\circ$  inkl. SAL & „internal tide drag“



# $S_1$ Gezeit in der Nutation

Zusammenfügen des „Puzzles“:

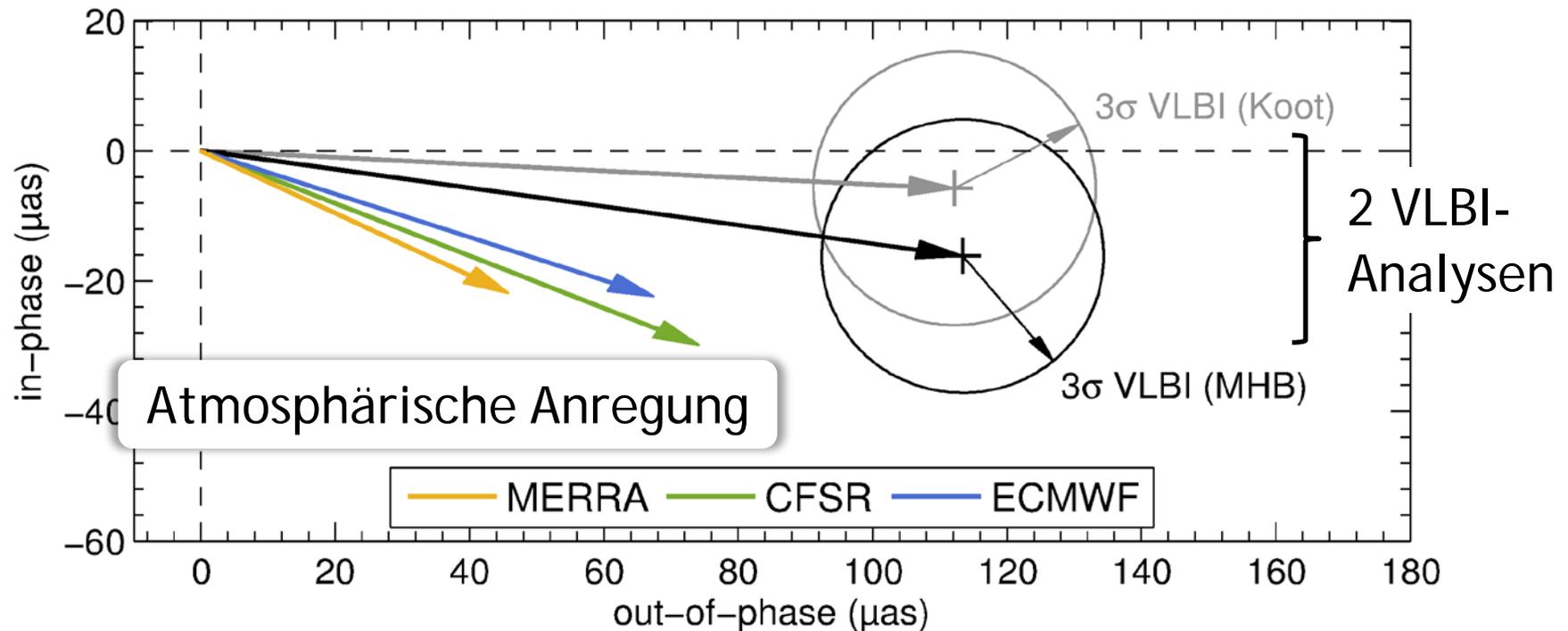
- $S_1$  Nutationsbeiträge aus drei Reanalysen & konsistent gerechneten Ozeansimulationen: 2004 - 2013 Mittelwert



# $S_1$ Gezeit in der Nutation

Zusammenfügen des „Puzzles“:

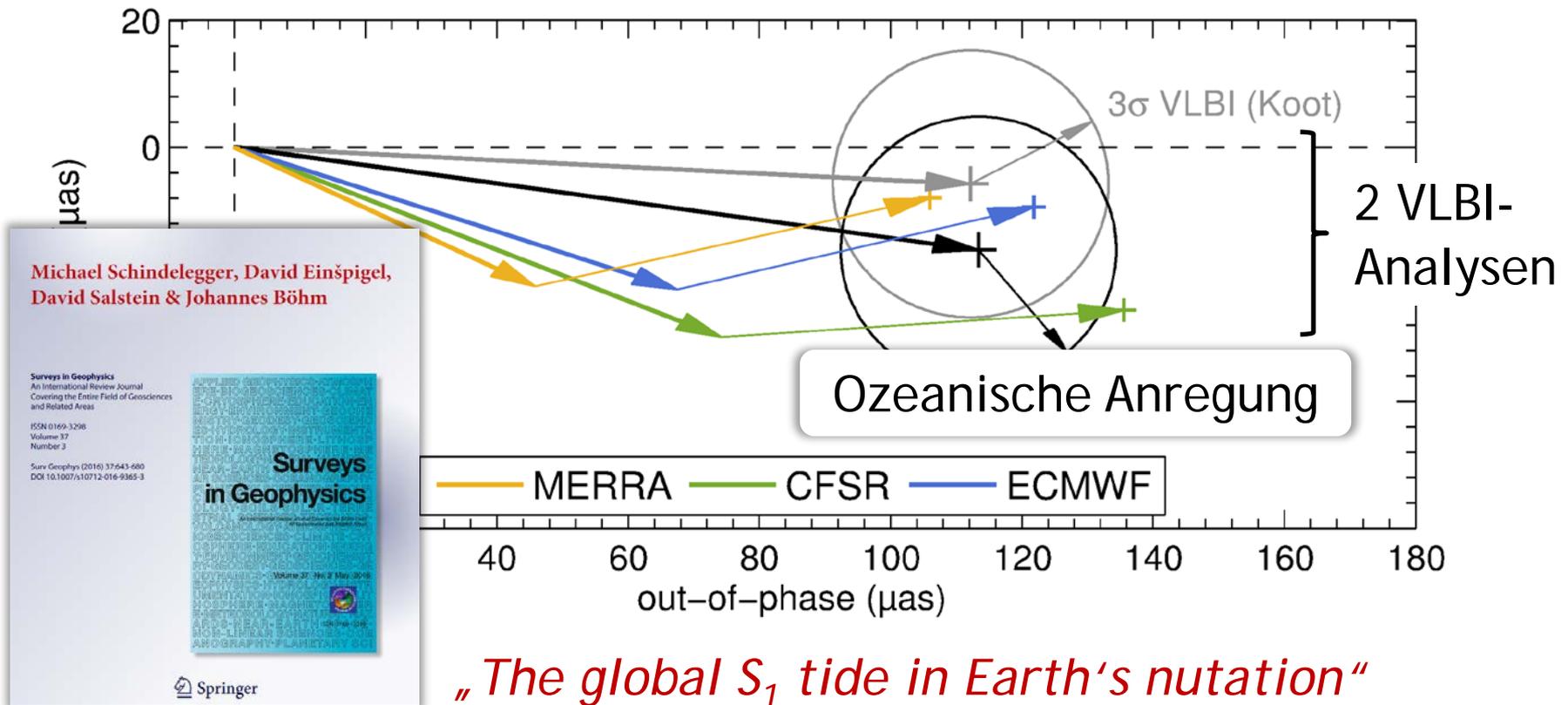
- $S_1$  Nutationsbeiträge aus drei Reanalysen & konsistent gerechneten Ozeansimulationen: 2004 - 2013 Mittelwert



# $S_1$ Gezeit in der Nutation

Zusammenfügen des „Puzzles“:

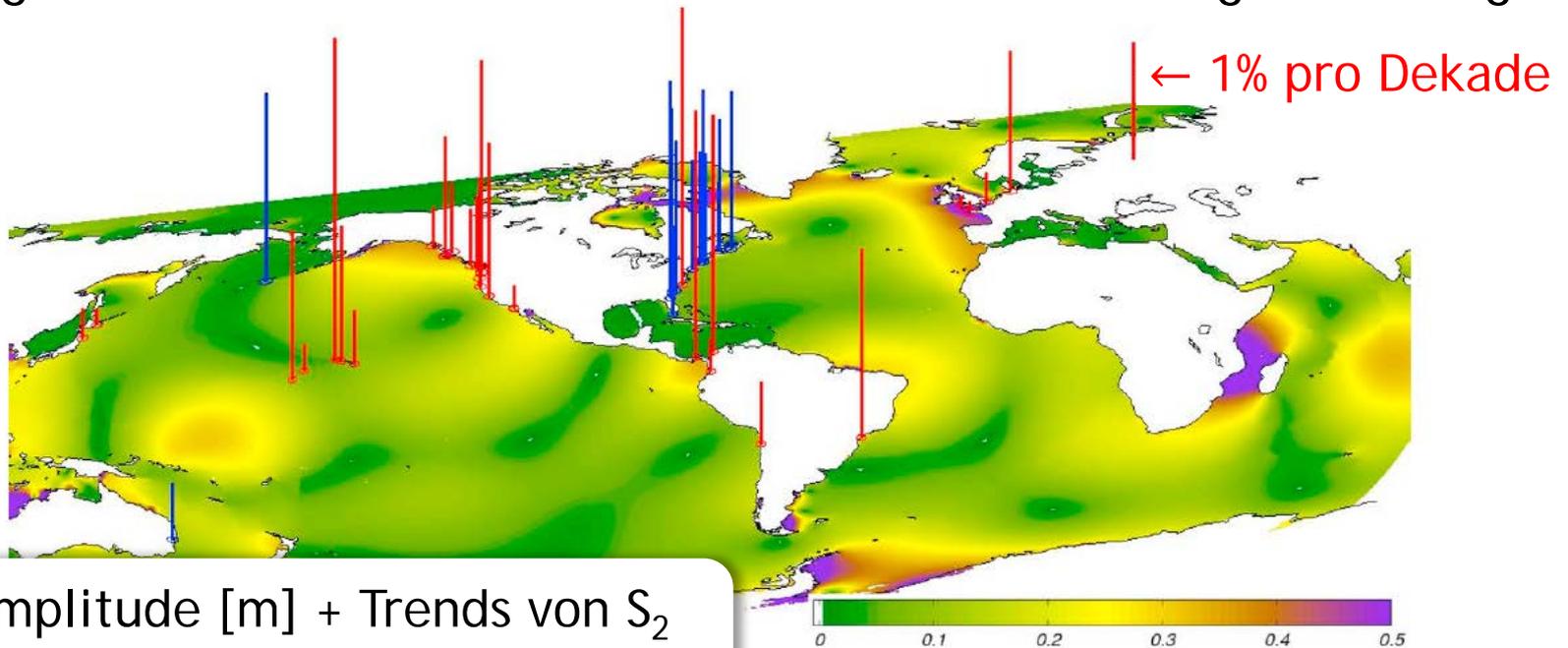
- $S_1$  Nutationsbeiträge aus drei Reanalysen & konsistent gerechneten Ozeansimulationen: 2004 - 2013 Mittelwert



# Variabilität ozeanischer Gezeiten

Treten Gezeiten stets mit **gleicher Amplitude & Phase** auf?

- Invarianz als Prämisse in vielen geodätischen Analysen
- Annahme umso kritischer je länger der Analysezeitraum ist
- Signifikante Trends im Tidenhub auf Basis von Pegelmessungen:

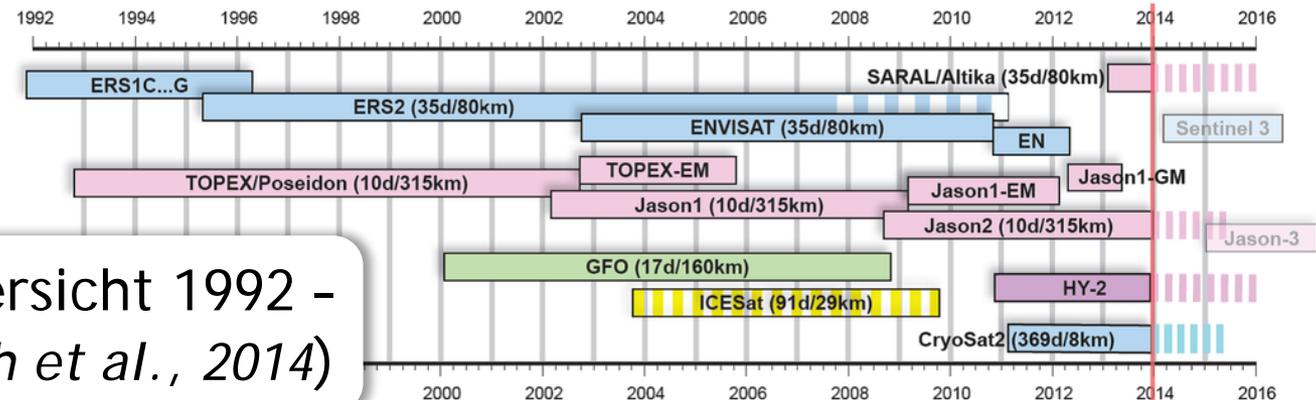


Amplitude [m] + Trends von  $S_2$   
Quelle: *Müller et al. (2011)*

# Variabilität ozeanischer Gezeiten

Treten Gezeiten stets mit gleicher Amplitude & Phase auf?

- Invarianz als Prämisse in vielen geodätischen Analysen
- Annahme umso kritischer je länger der Analysezeitraum ist
- Signifikante Trends in Pegelmessungen:  $\sim cm - dm$



Missionsübersicht 1992 - 2014 (Bosch et al., 2014)

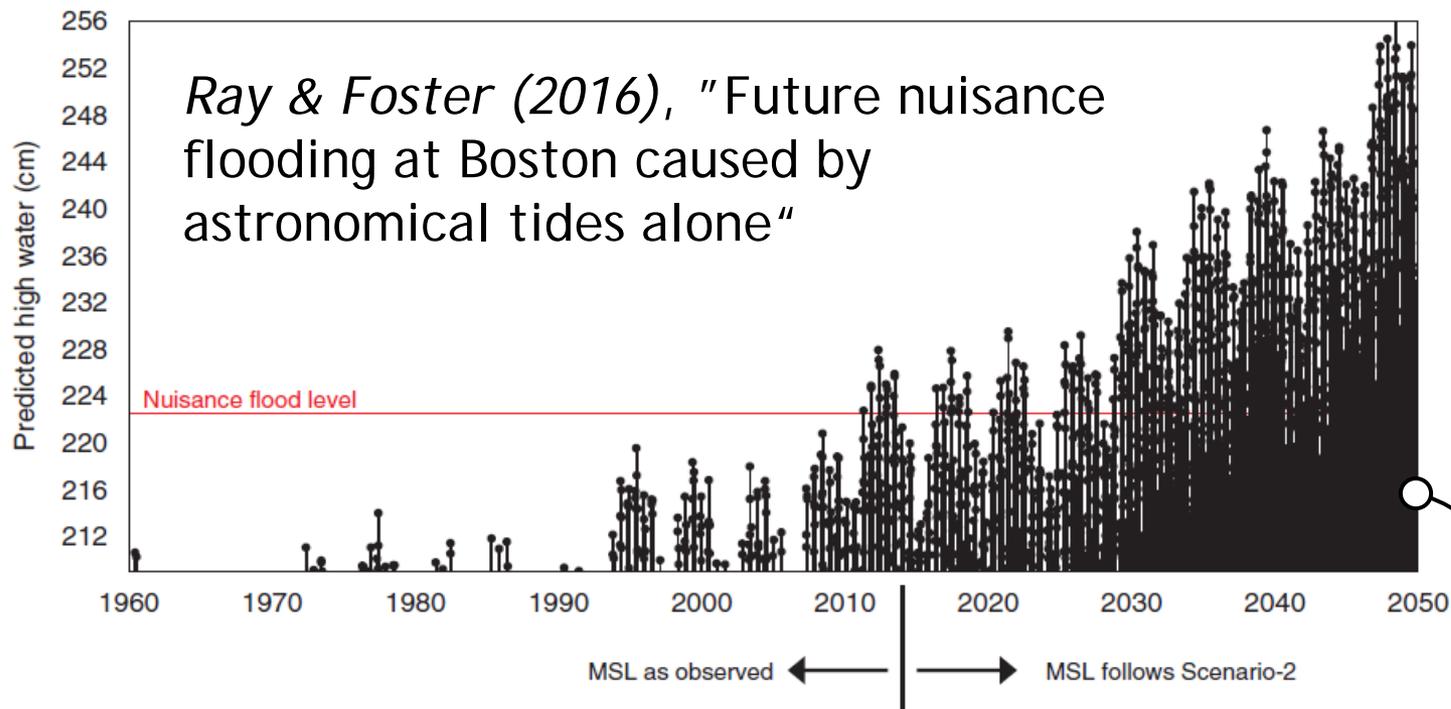
- Relevant für Gravimetrie & Altimetrie: 25 Jahre Messdaten zu einem harmonischen Modell komprimiert

# Variabilität ozeanischer Gezeiten

Viel kritischer abseits der Geodäsie:

"Nuisance flooding"

- Geringfügige, regelmäßige Überschwemmungsereignisse
- Kombination aus Anstieg der Tiden & des Meeresspiegels (MSL)

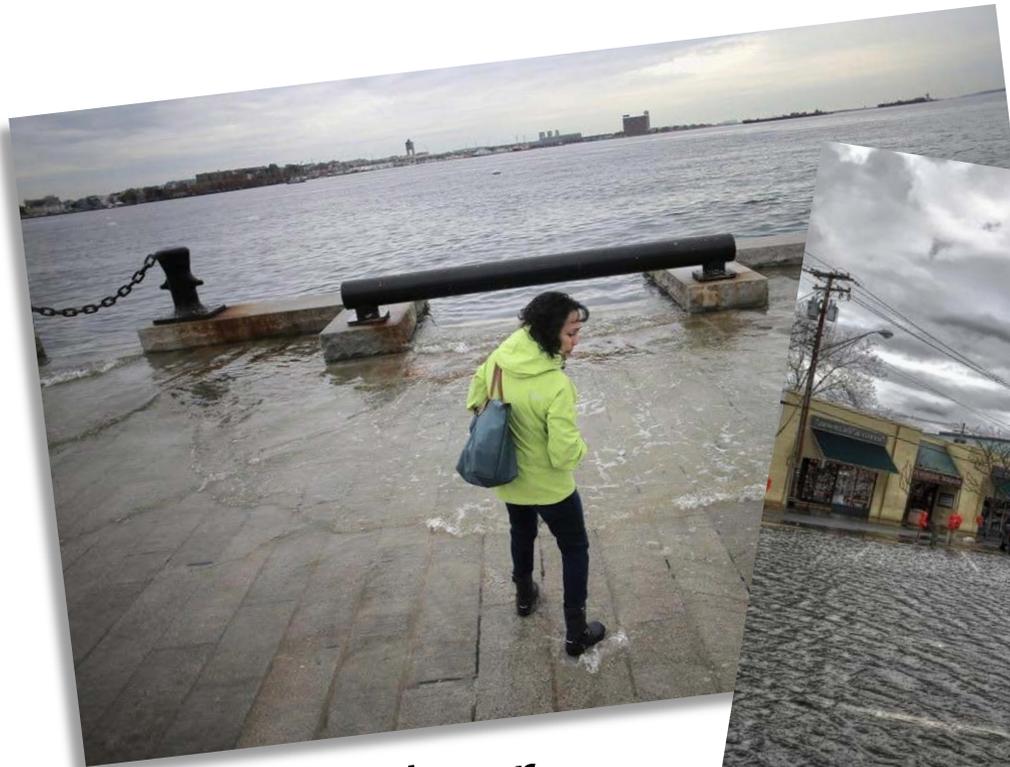


- Angenommenes Szenario: +335 *mm* MSL im Jahr 2050

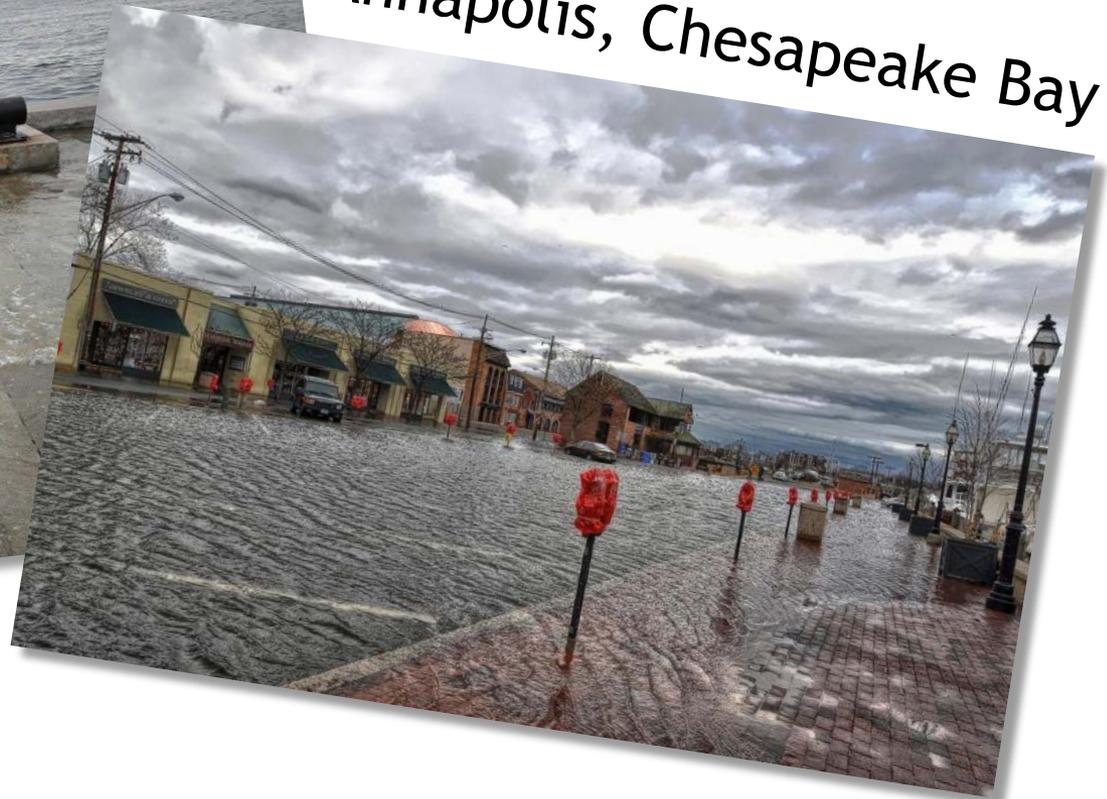
# Variabilität ozeanischer Gezeiten

Viel kritischer abseits der Geodäsie:

"Nuisance flooding"



Boston Harbour



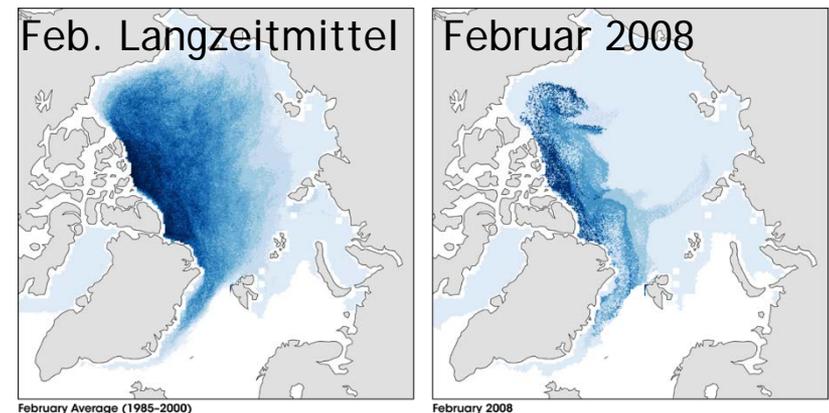
Annapolis, Chesapeake Bay

# Variabilität ozeanischer Gezeiten

## Ursachen & Einflussfaktoren (Auswahl):

- Erwärmung von Oberflächenwasser → veränderte Schichtung beeinflusst das interne Wellenfeld
- Variabilität des Meereises → veränderte Resonanzverh. in gewissen Becken
- [...] Atmosphärendynamik

Quelle: [www.climate.gov](http://www.climate.gov)



Baroklines  
Modell

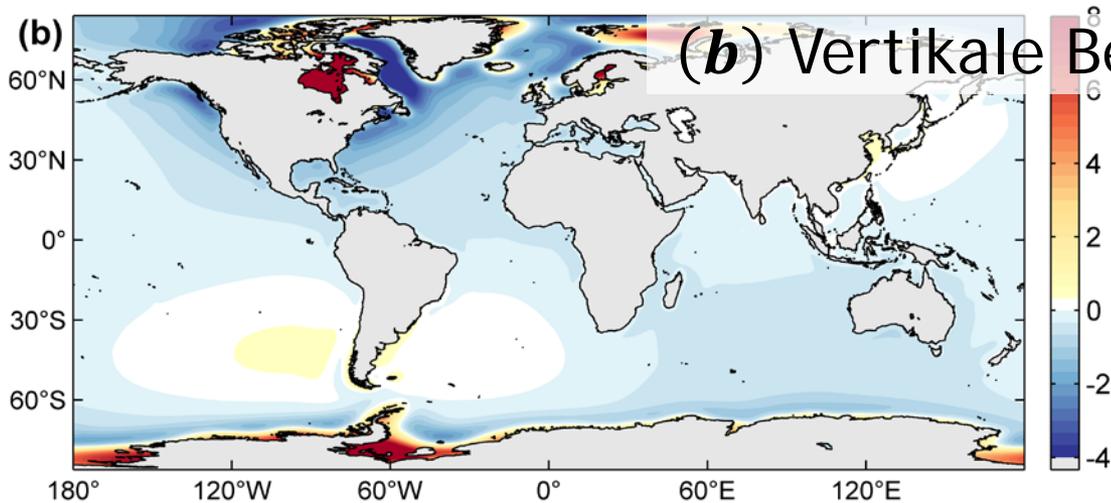
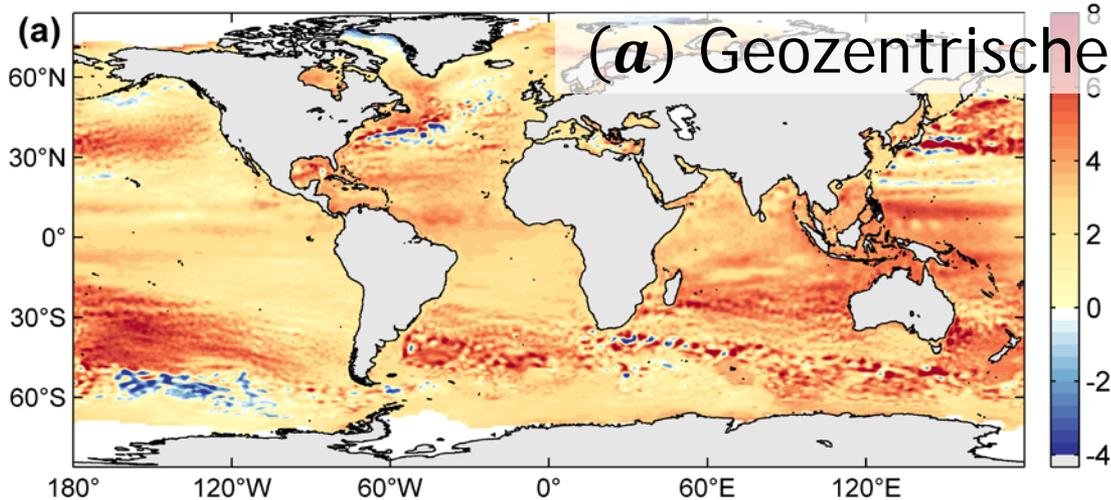
- Meereis modul
- Zirkulation/Gezeiten  
gemeinsam simuliert

Barotropes  
Modell

- Vertikale Ausdehnung der Wassersäule als  
Folge des Meeresspiegelanstieges

# Gezeiten & Meeresspiegelanstieg

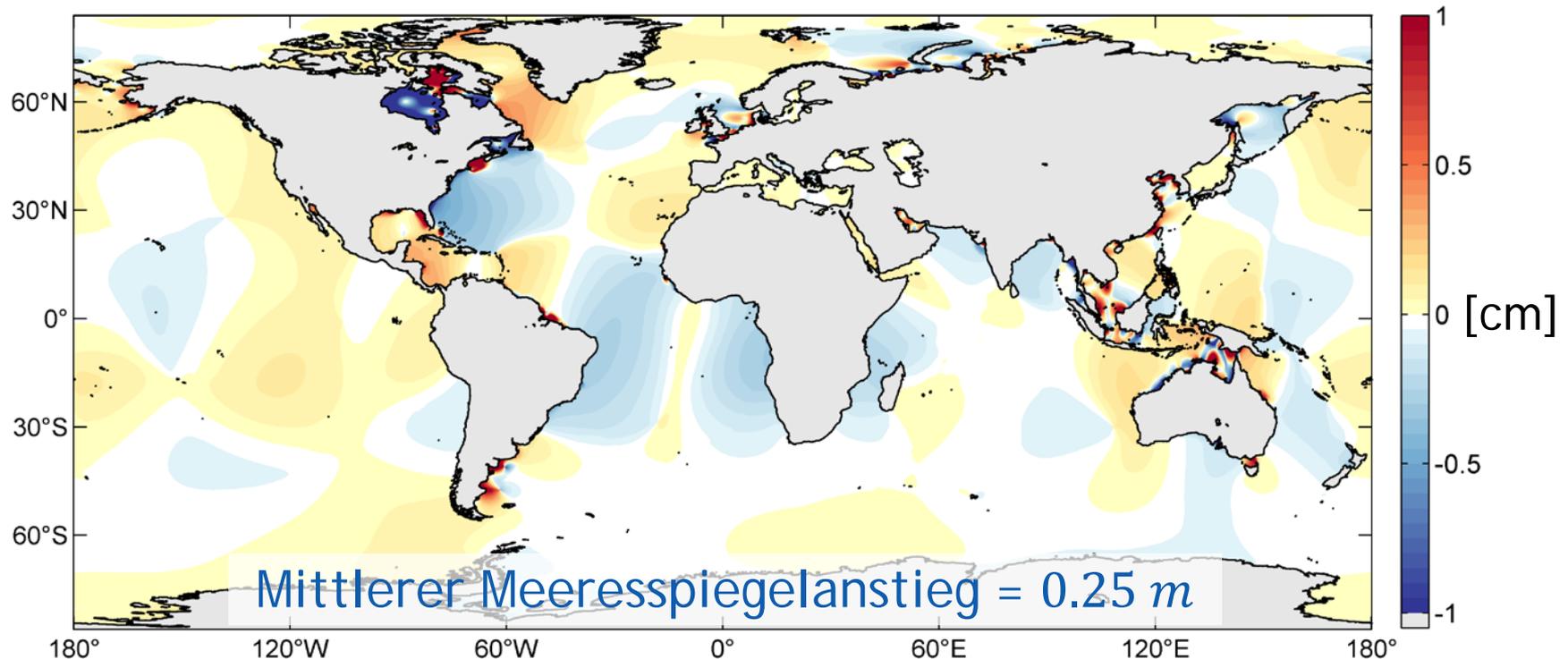
Änderung der Ozeantiefe als Differenz  $(a) - (b)$ :



# Gezeiten & Meeresspiegelanstieg

Perturbation der  $M_2$  Gezeit im Zuge von sea level rise + GIA

- Globale Simulationen auf einem  $1/12^\circ$  Gitter
- Vergleich von  $M_2$  aus zwei Läufen {  
Heutige Bathymetrie  
Zukünftige Bathymetrie



# Variationen der $M_2$ Gezeit

Close-Up zeigt Signale bis zu 4 *cm*:

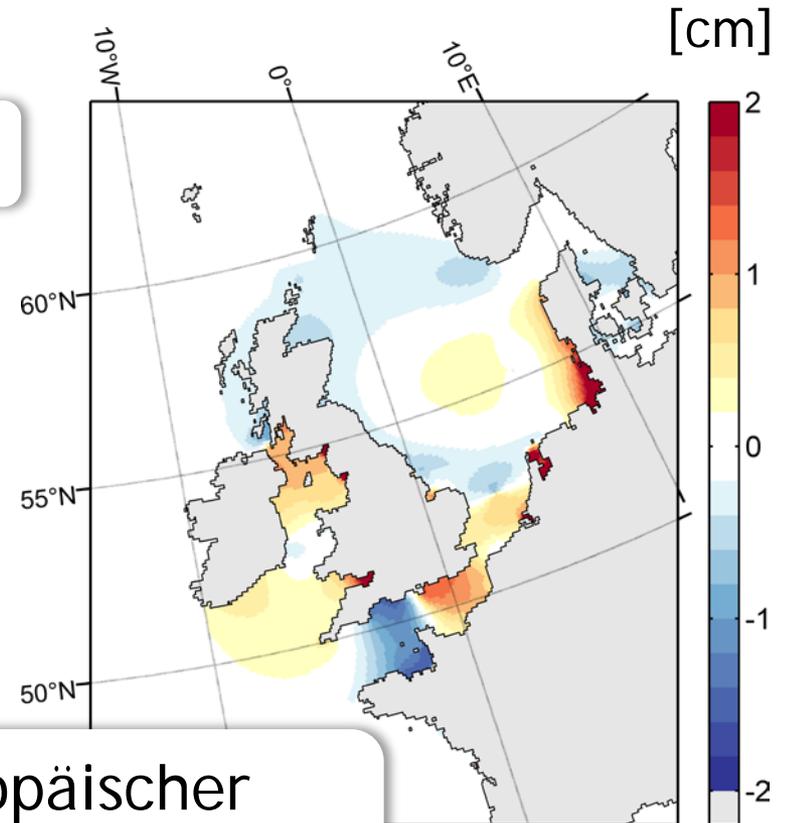
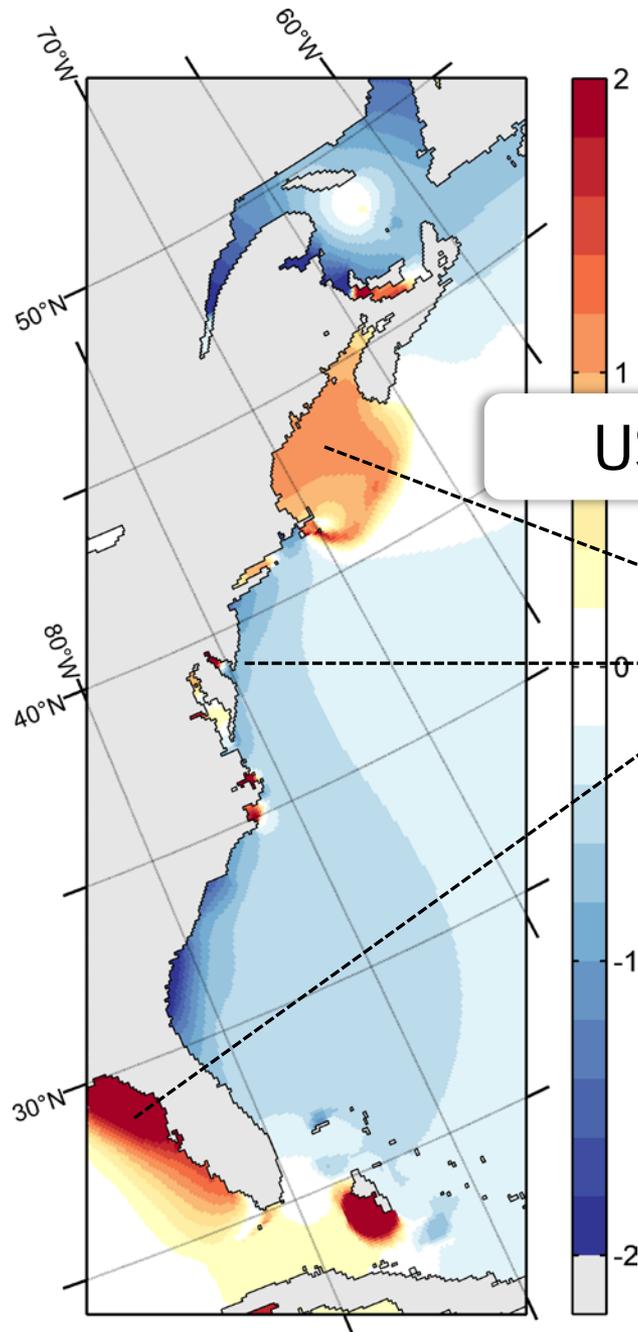
US-Ostküste

Gulf of Maine

Delaware Bay

Gulf of Mexico

Europäischer  
Kontinentalsockel



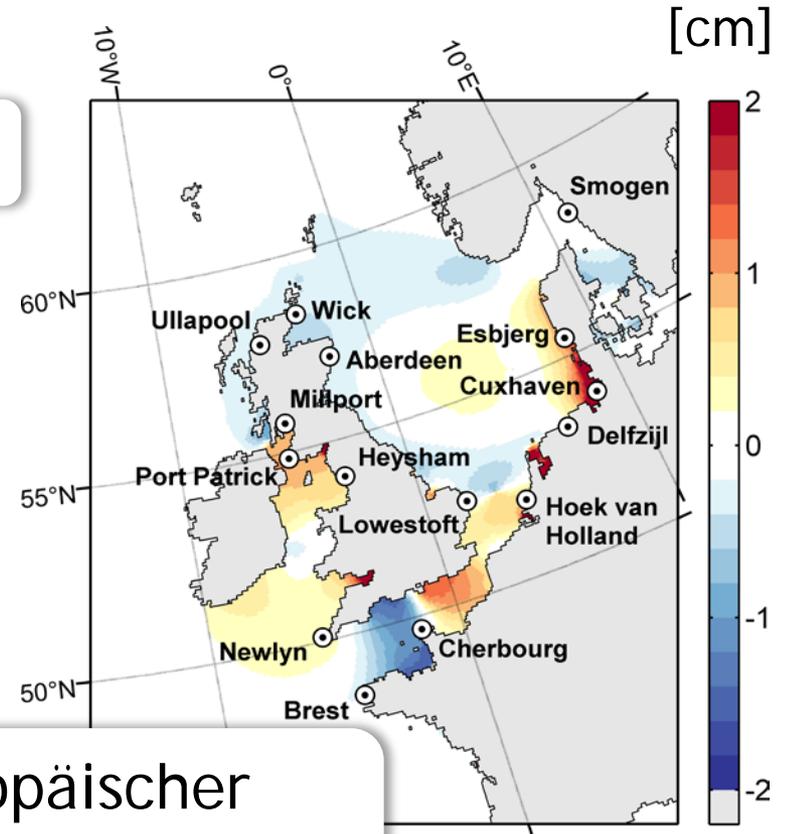
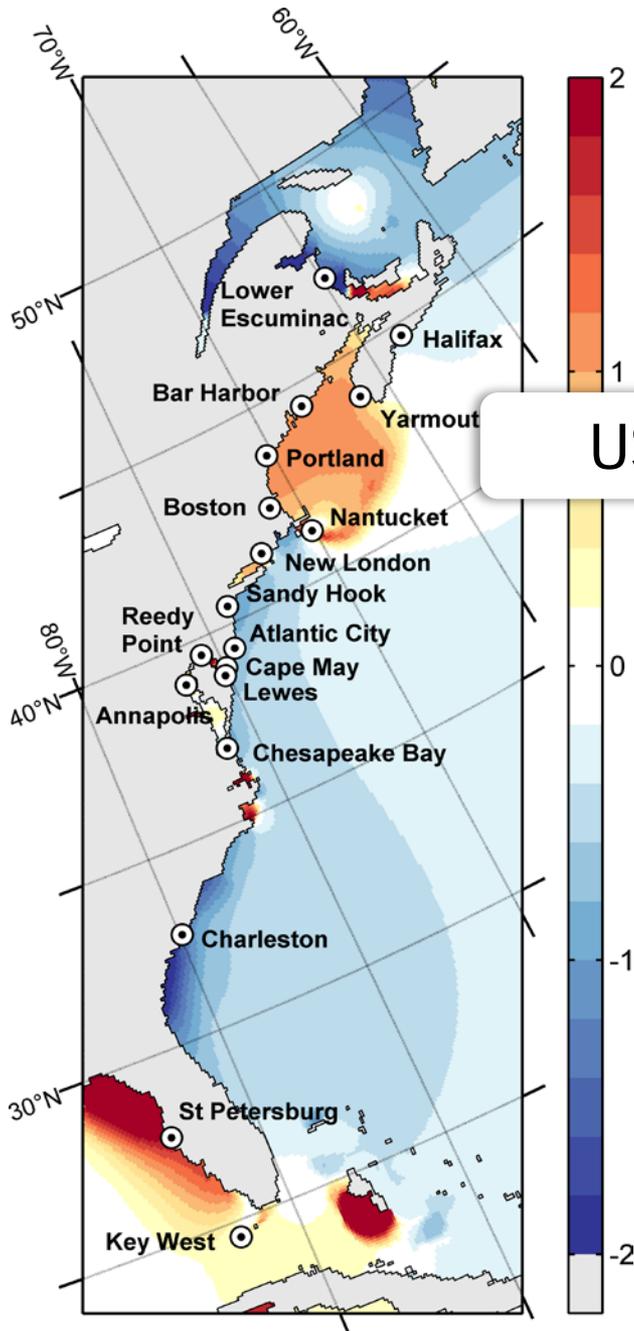
# Variationen der $M_2$ Gezeit

Close-Up zeigt Signale bis zu 4 *cm*:

## US-Ostküste

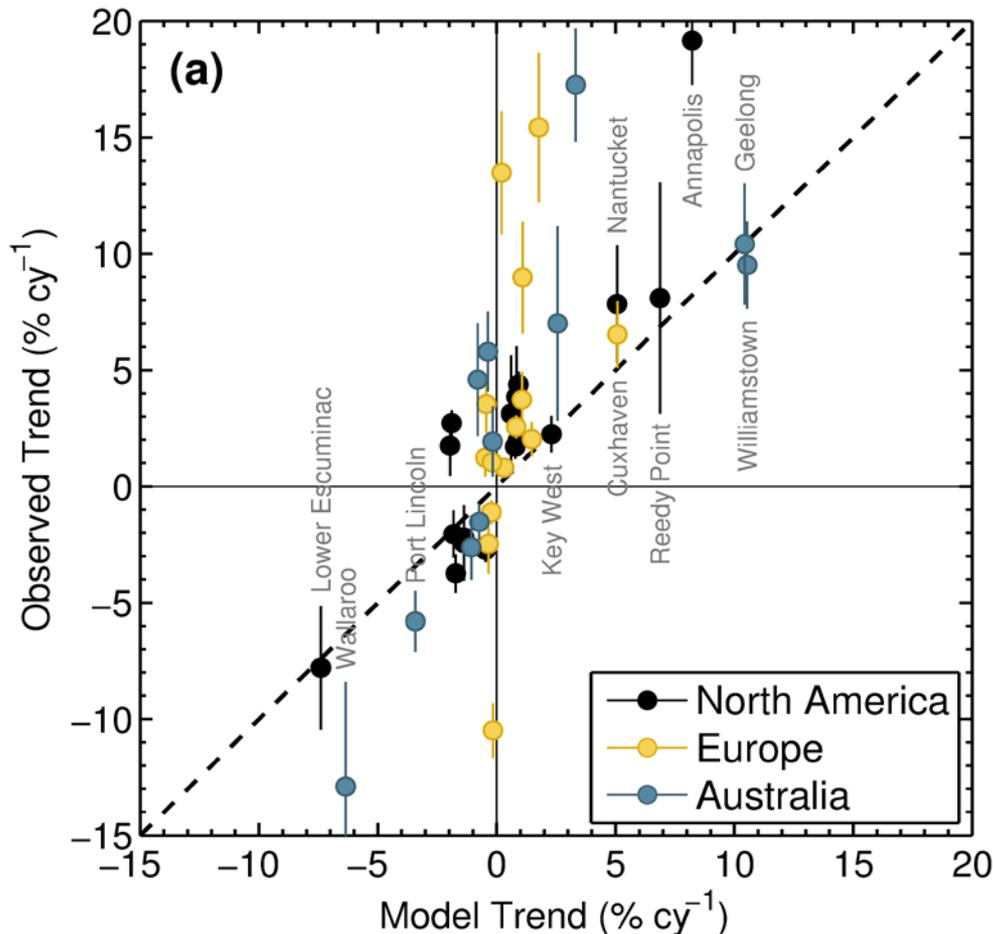
Gulf of Maine  
Delaware Bay  
Gulf of Mexico

## Europäischer Kontinentalsockel



# Variationen der $M_2$ Gezeit

## Validierung der Modellrechnungen mit Beobachtungen:



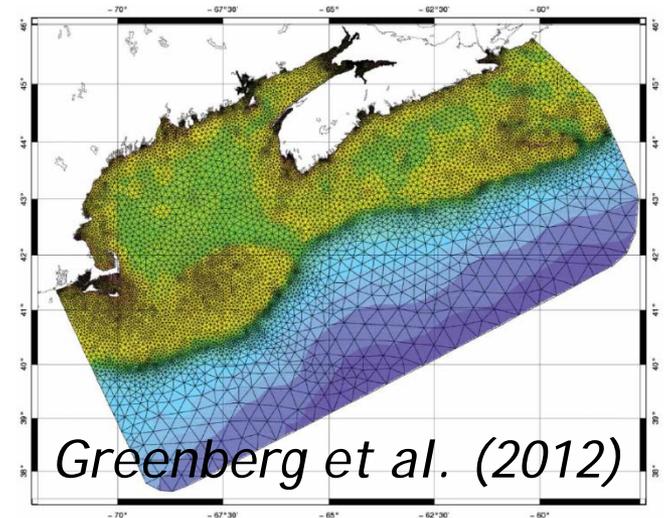
- Ensemble von 45 global verteilten Gezeitenpegeln
- Fokus auf Trends der  $M_2$  Amplituden [ $\% \text{ cy}^{-1}$ ]
- **Europäisches Schelf:** Regression durchwachsen
- **US-Ostküste:** typische Diskrepanz Faktor 2 – 3

Fehlerbalken = 2 \* formaler Fehler

# Conclusio & Ausblick

## Langzeitvariabilität von Gezeiten:

- ❖ Sea level rise + GIA erklären ca. 20 – 30% der gemessenen Trends in der derzeitigen Modellkonfiguration
- ❖ Genauigkeitsgewinn durch höhere Modellauflösung & Simulationen auf einem **unstrukturiertem Gitter**
- ❖ Barokline Läufe zur Analyse weiterer Faktoren



## Geodätische Erdsystemforschung:

- ❖ Nicht nur auf Gezeiten beschränkt
- ❖ Upcoming: Untersuchung von Signalen auf längeren Zeitskalen



**Danke für die Aufmerksamkeit!**

Project SCORE (P30097) is funded by the Austrian Science Fund