

# Der Meeresspiegel steigt – aber woher wissen wir das?

Wolfgang Bosch

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI) München

Email: [bosch@dgfi.badw.de](mailto:bosch@dgfi.badw.de)



## Die Meeresoberfläche vermessen ...

- durch Pegel
  - punktweise Messungen
  - sehr genau (wenn regelmäßig kontrolliert)
  - z.T. sehr lange Zeitreihen (über 100 Jahre)
  - nicht unbedingt repräsentativ für das offene Meer
- durch Satellitenaltimetrie (Höhenmessung aus dem Weltraum)

Wetzell, 12.März 2009

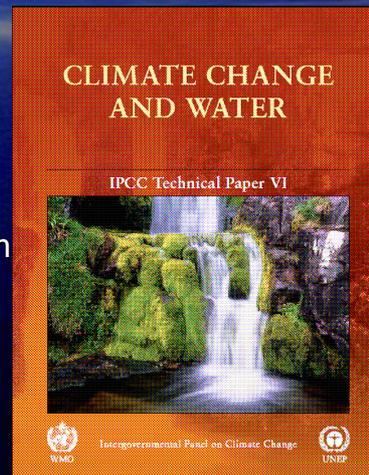
2



## Vierte Beurteilung zu Klimawandel und Wasser

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)  
(ehemals "Club of Rome")
- **Gesicherte Erkenntnisse:**

Globale Erwärmung eindeutig durch Beobachtungen nachgewiesen (Anstieg von Luft- und Wassertemperatur, Abschmelzen von Eis, Meeresspiegelanstieg)

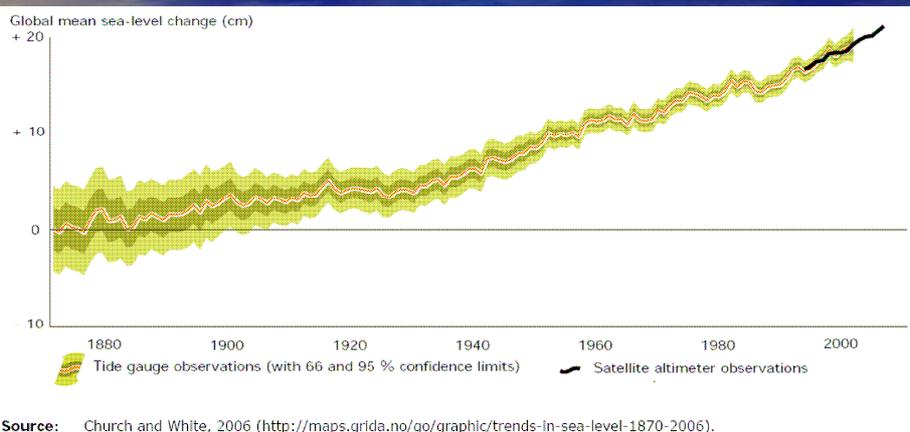


Wetzell, 12. März 2009

3



## Globale Meeresspiegeländerungen 1870-2006



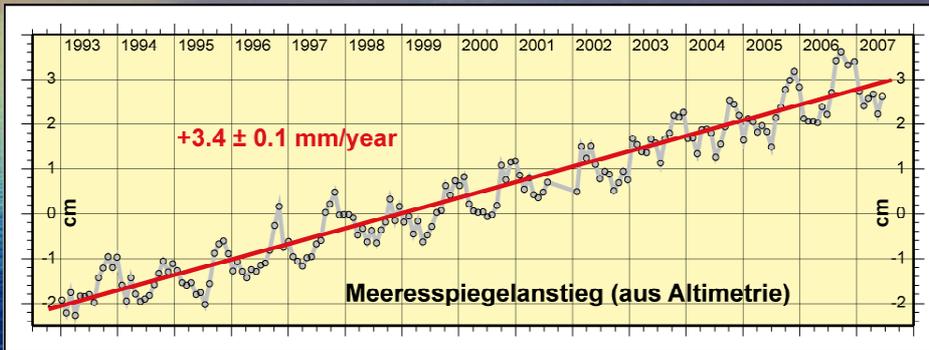
Source: Church and White, 2006 (<http://maps.grida.no/go/graphic/trends-in-sea-level-1870-2006>).

Wetzell, 12. März 2009

4



## „Globale“ Mittelwerte aller Meereshöhen in zeitliche Entwicklung (Meeresspiegelanstieg)

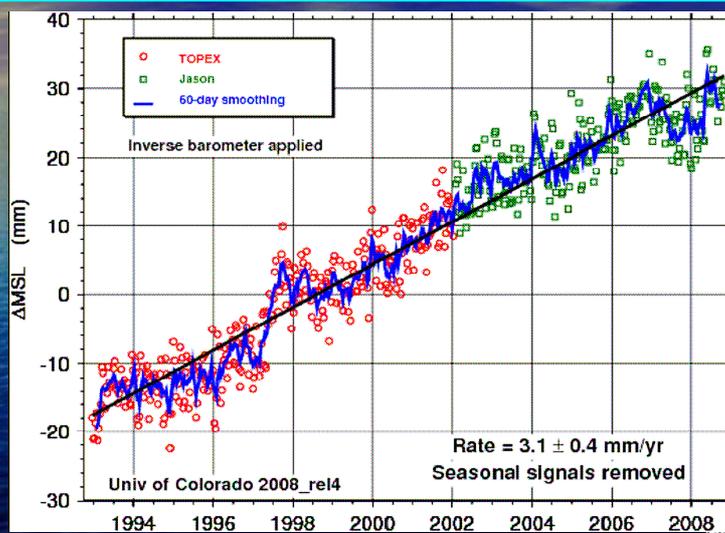


Wetzell, 12. März 2009

5



## Globaler Meeresspiegelanstieg (UCAR)



Wetzell, 12. März 2009

Quelle: Steve Nerem, UCAR, Boulder, Colorado

6



## Was trägt zum Meeresspiegelanstieg bei (1993 – 2003) ?

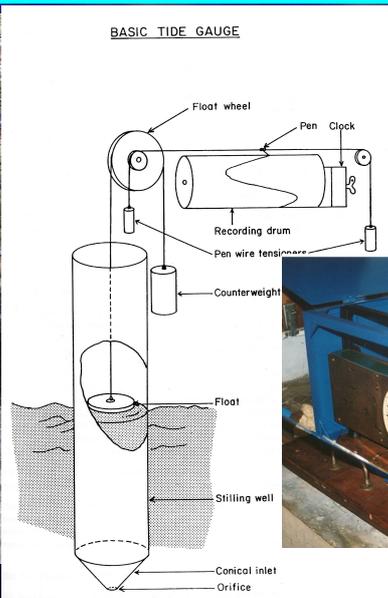
Vorgang	Beitrag [mm/Jahr]
Ausdehnung des Meerwassers	1.6 ± 0.5
Schmelzen von Gletschern	0.8 ± 0.2
Schmelzen des Grönland-Eises	0.7 ± 0.1
Schmelzen der Antarktis	0.7 ± 0.3
<b>Summe aller Abschätzungen</b>	<b>2.8 ± 0.7</b>
<b>Meeresspiegelanstieg, beobachtet</b>	<b>3.1 ± 0.7</b>
Diff: Beobachtet - Geschätzt	0.3

Wetzell, 12. März 2009

Quelle: EEA Report No. 04/2008 bzw. IPCC Fourth Assessment Report



## Messprinzip von Pegeln



Wetzell, 12. März 2009

8



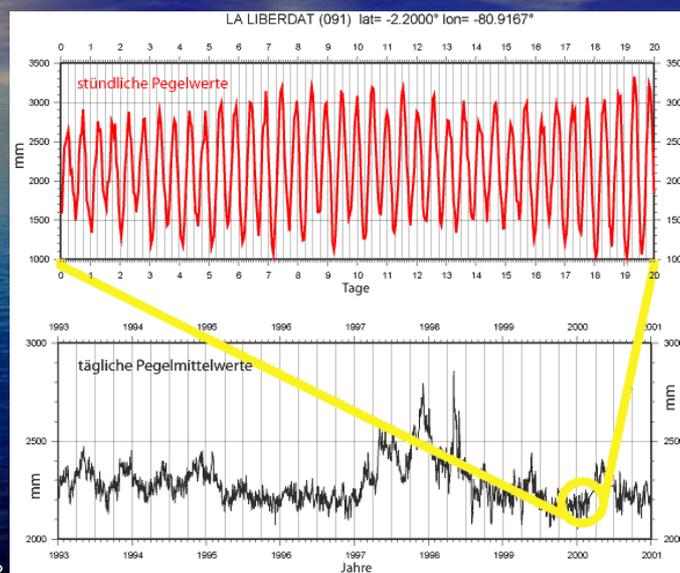
## Moderne Pegel

- Akustische Messung oder Radarsystem
- Elektronische Erfassung und direkte Datenübertragung
- Höhere Abtastraten (z.B. minütlich)



Wetzell, 12. März 2009

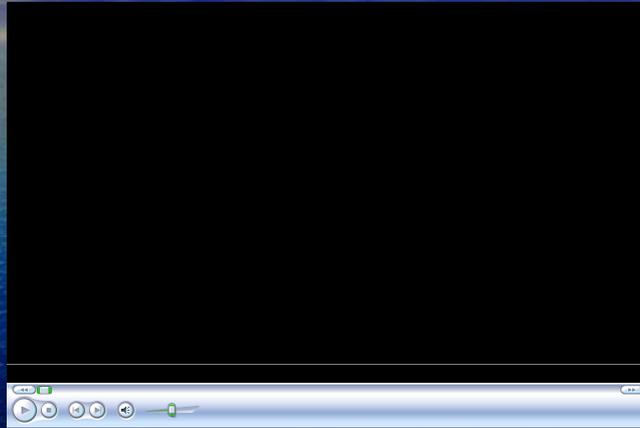
## Beispiel einer Pegelregistrierung



Wetzell, 12. März 2009



## Halbtägiger Gezeitenhub durch den Mond (M2)

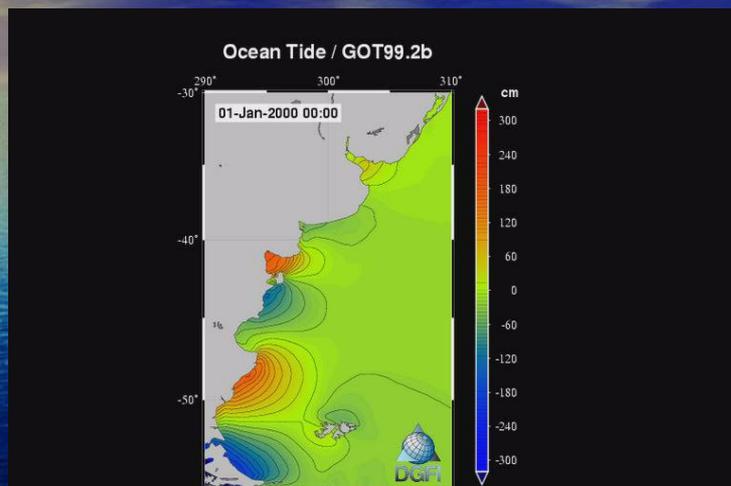


Wettzell, 12. März 2009

11



## Gezeitenwellen in Patagonien (Argentinien)

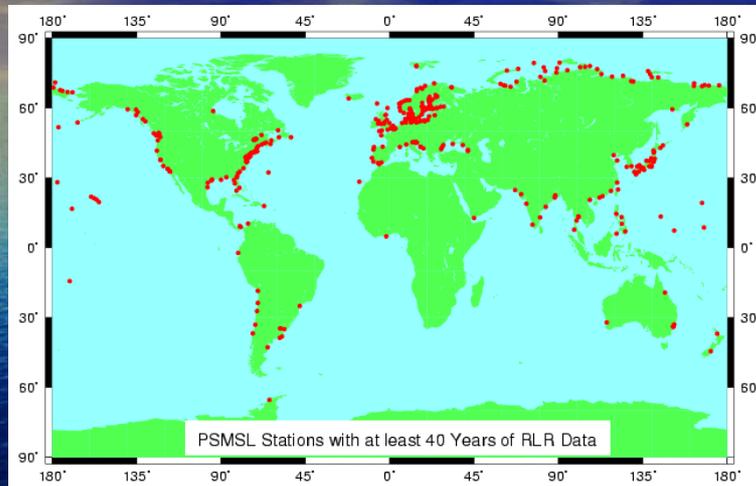


Wettzell, 12. März 2009

12



## Kontrollierte Pegel mit Messreihen von mehr als 40 Jahren



Quelle: Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL)

Wetzell, 12.März 2009

13

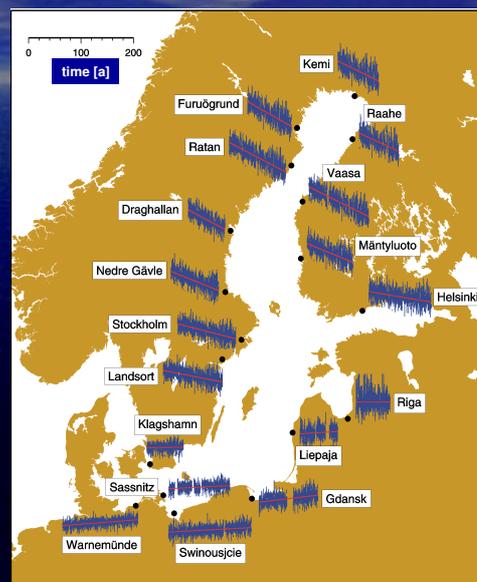


## Pegelregistrierungen sind relativ!

Die scheinbaren  
Absenkungen des  
Meeresspiegels in  
Skandinavien  
- ein Widerspruch zum  
IPCC ?

Quelle: G. Liebsch, BKG

Wetzell, 12.März 2009



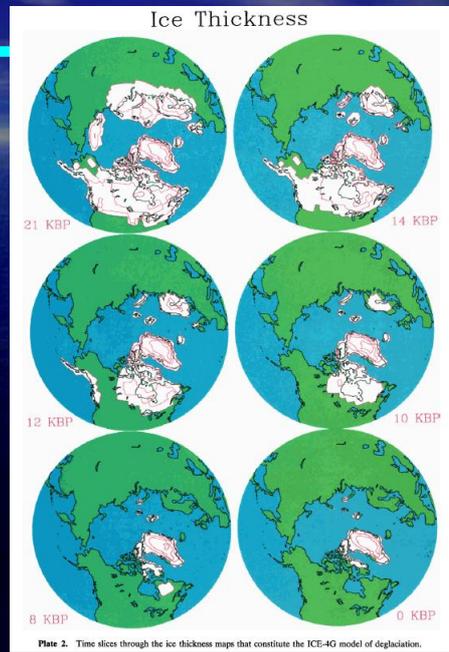
## Nacheiszeitl. Abschmelzen der nördl. Eiskappen

- (Peltier, 1998)

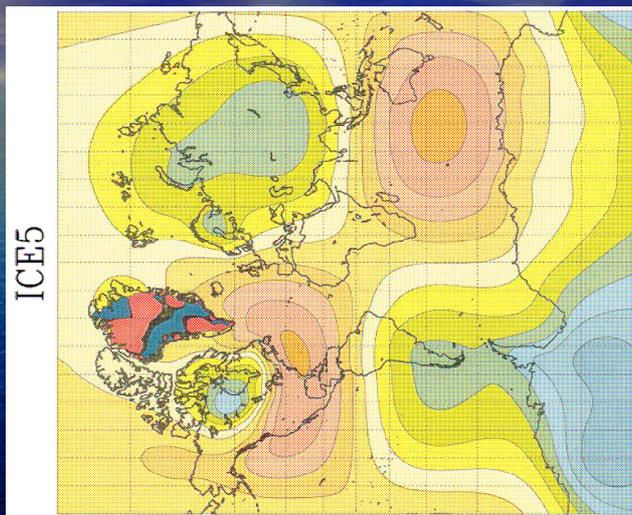
- Die Erde reagiert elastisch:

Eismassen drücken die Erde ein. Abschmelzen von Eismassen entlasten die Erde und führen zu einer Landhebung.

Wetzell, 12. März 2009



## ICE-5G(VM2) Modell zur nacheiszeitlichen Landhebung (Peltier, 2004)

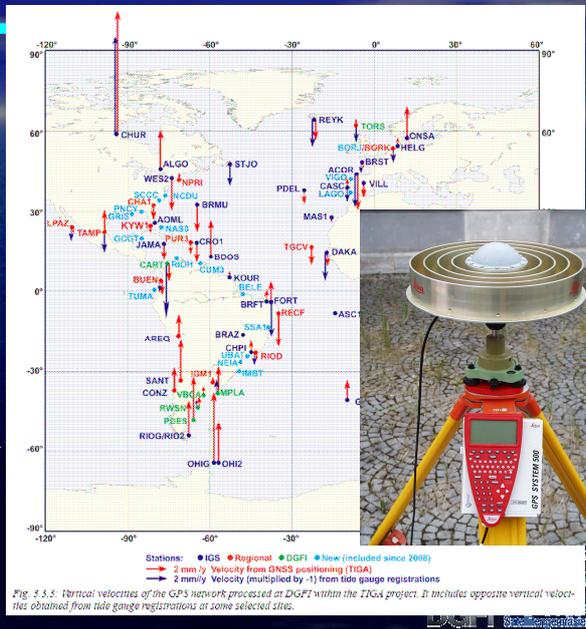


Wetzell, 12. M



## Geodätische Kontrolle von Meeres-Pegeln

- TIGA Projekt
- Kontinuierlich messende GPS Empfänger (nahe) am Pegel
- DGFI bestimmt die Vertikalbewegung der Pegel im Atlantik



Wetzell, 12. März 2009

## Kritische Betrachtung zu Pegelmessungen

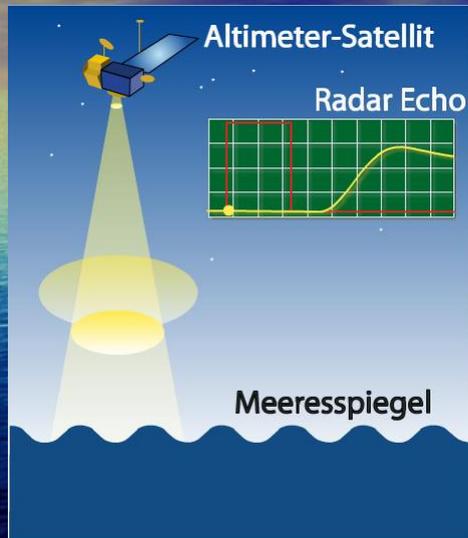
- Messreihen können sehr genau sein und absolute Meeresspiegeländerungen anzeigen – aber ...
- Sehr sorgfältige Kontrolle der Registriereinrichtung erforderlich → Niveausprünge
- Wiederholte lokale Höhenmessungen → örtliche Verankerung
- Präzise globale Punktpositionierung (z.B. mit GPS) → tektonische Hebung/Senkung (postglazial)
- Sehr unregelmäßige Verteilung von Pegeln mit kontrollierten Langzeit-Messungen

Wetzell, 12. März 2009

18



## Satellitenaltimetrie



Wetzell, 12. März 2009

Typische Kennzeichen:

Trägerfrequenz	13,5 GHz
Impulsdauer	12,5 nsec
Impulslaufzeit	5 msec
Pulsfolge	1000Hz
Mittelbildung	0,05 sec

Flughöhe	800km
„footprint“	2-11 km
Geschwindigkeit	6,7 km/sec

Analyse des Radar-Echos:

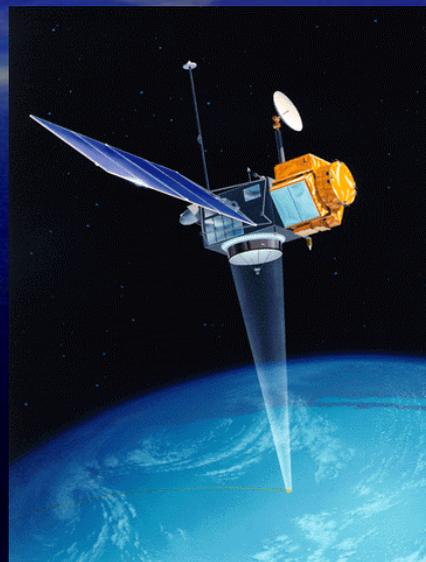
- Laufzeit → Abstand zur Meeresoberfläche
- Neigung der Flanke → Wellenhöhe
- Energie → Windgeschwindigkeit

19



## TOPEX – erfolgreichster Altimetersatellit

- 13-jährige Messreihe (bis 2005) mit Wiederholrate von zehn Tagen
- Sehr genaue Bahnbestimmung durch GPS, Laser und Doris
- Zwei-Frequenz Altimeter
- Nachfolger: Jason-1 (seit 2002)



Wetzell, 12. März 2009

20



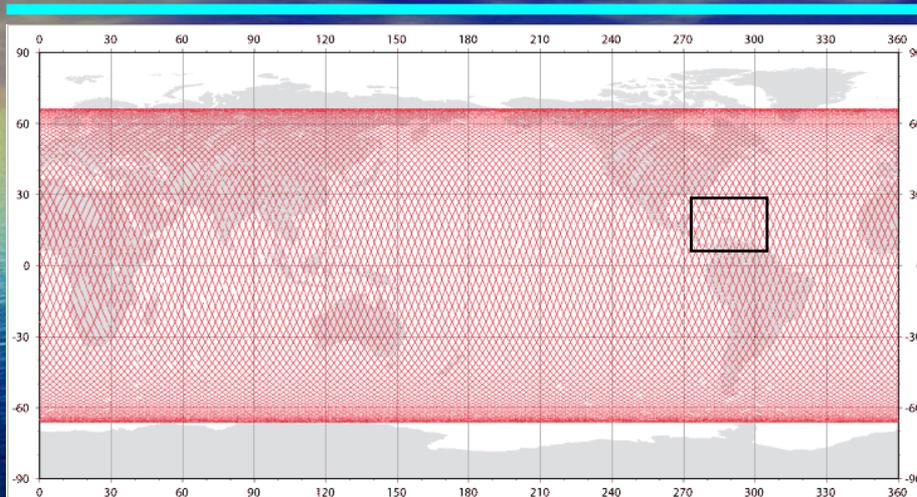
# ENVISAT

- Größter und komplexester Umweltsatellit
- Seit März 2002 in Betrieb
- Bau und Betrieb durch die ESA (Europäische Raumfahrt-Agentur)

Wetzell, 12. März 2009



# Bahnspuren von TOPEX und Jason1



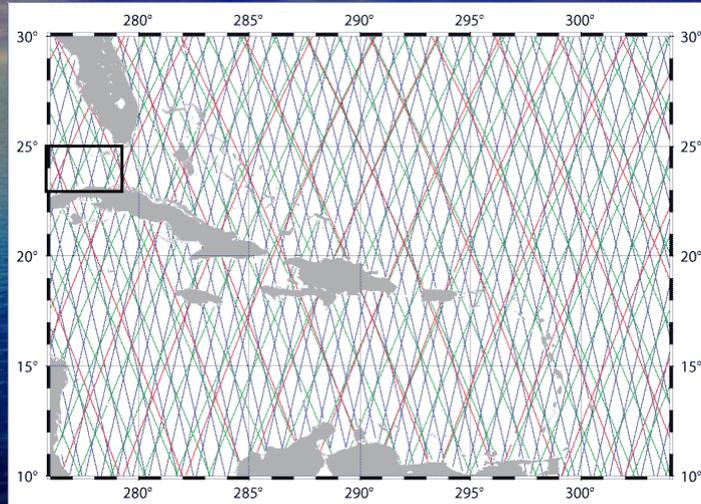
- Nach ca. 10 Tagen wiederholter Überflug

Wetzell, 12. März 2009

22



## Wiederholte Bahnspuren in der Karibik von Jason1/TOPEX (10), GFO (17), ERS/ENVISAT(35)

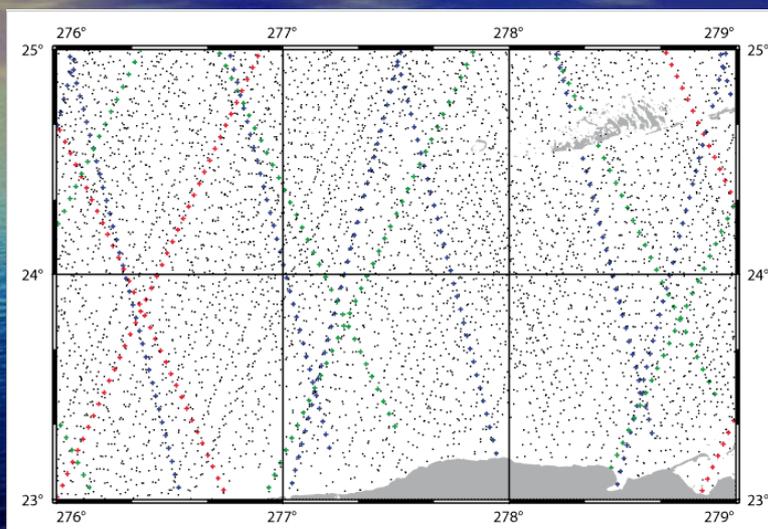


Wetzell, 12.März 2009

23



## Messpunkte "geodätischer" Missionsphasen (ERS-1 & Geosat) mit Wiederhol-Spuren



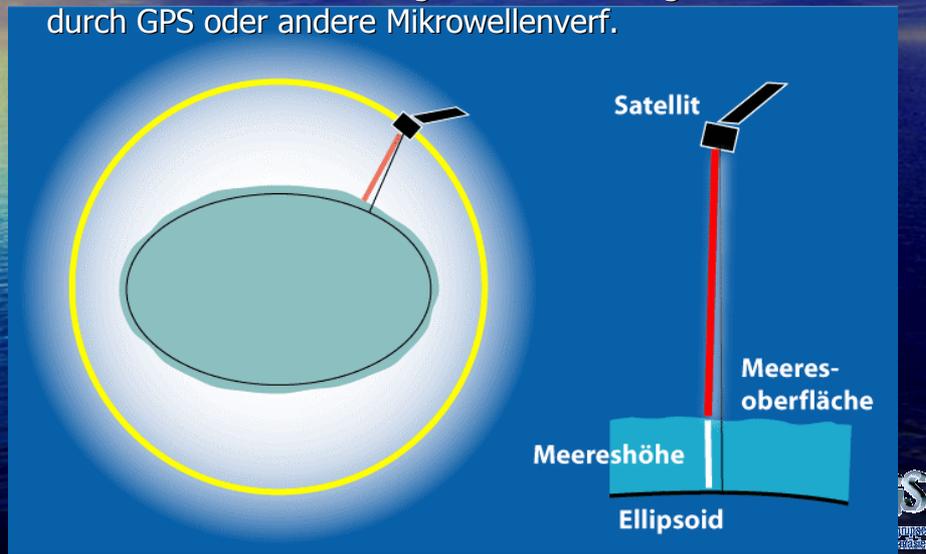
Wetzell, 12.März 2009

24



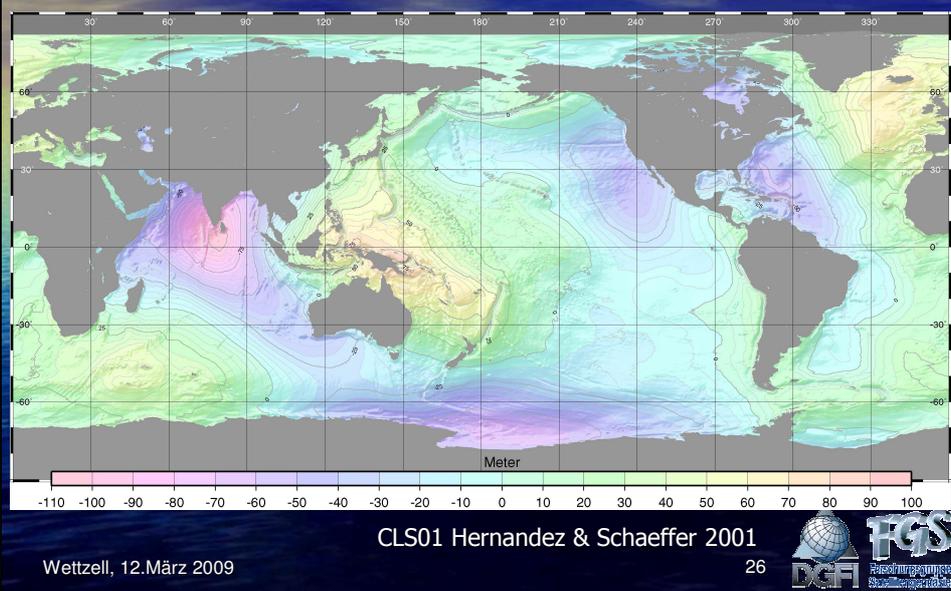
## Meereshöhen aus Satellitenaltimetrie

- Entscheidend: Vermessung und Bestimmung der Bahn durch GPS oder andere Mikrowellenverf.

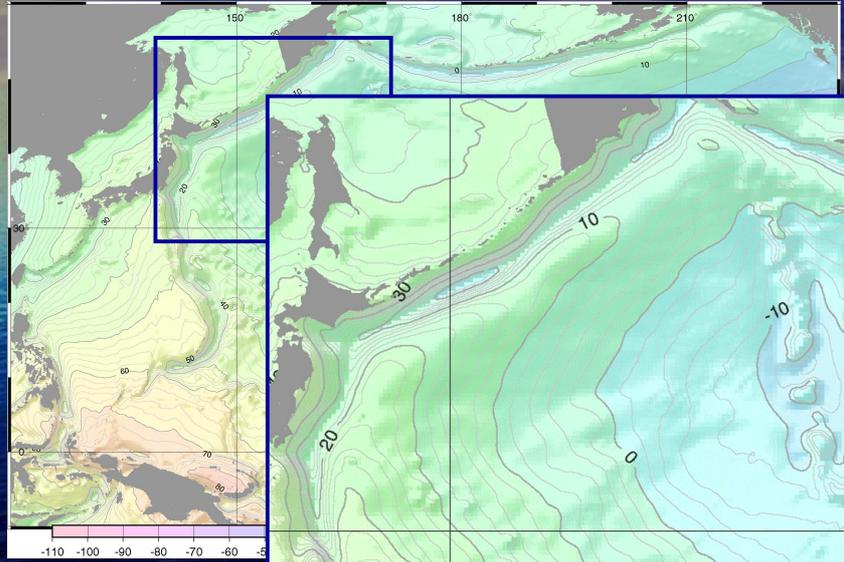


## Karte der mittleren Meeresoberfläche

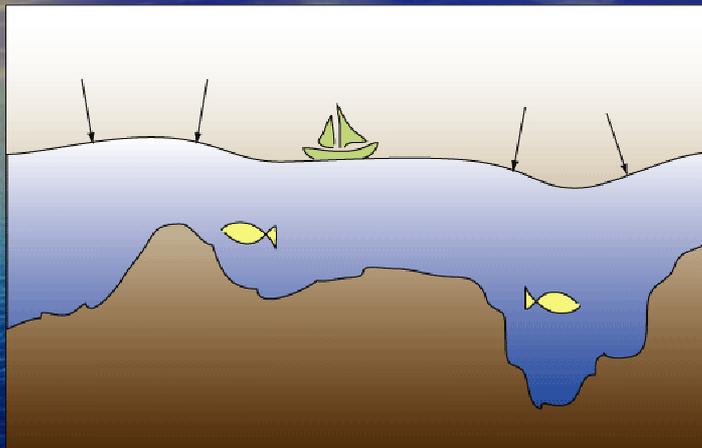
Höhen (m) über einem Erdellipsoid



## Mittlere Meeresoberfläche im West Pazifik



## Der Meeresspiegel – ein geglättetes Abbild des Meeresbodens



- Der Meeresspiegel steht überall senkrecht zur Lotrichtung

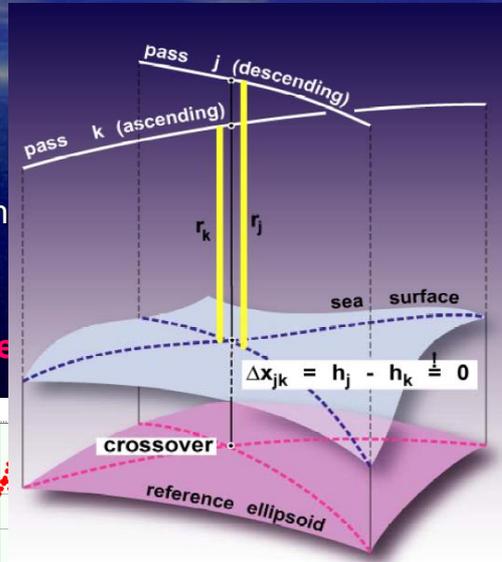
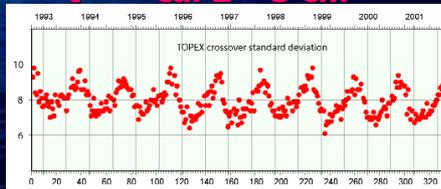
Wettzell, 12. März 2009

28

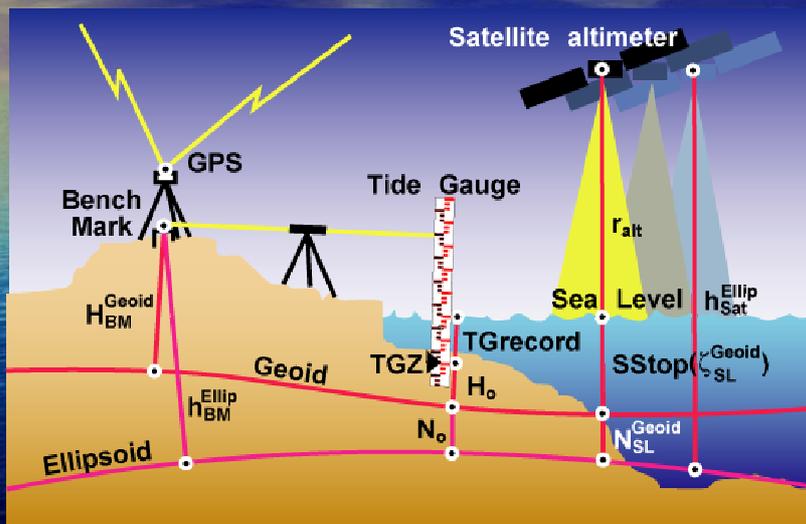


## Wie genau sind diese Meereshöhen?

- Doppelbestimmung an Kreuzungspunkten
- Im Mittel sind diese Differenzen ca. 8 cm
- Davon sind ca. 6 cm durch Meeresvariabilität verursacht
- **Meereshöhengenauigkeit ca. 2 – 3 cm**



## An der Küste: Vergleich von Altimetrie- und Pegelmessungen



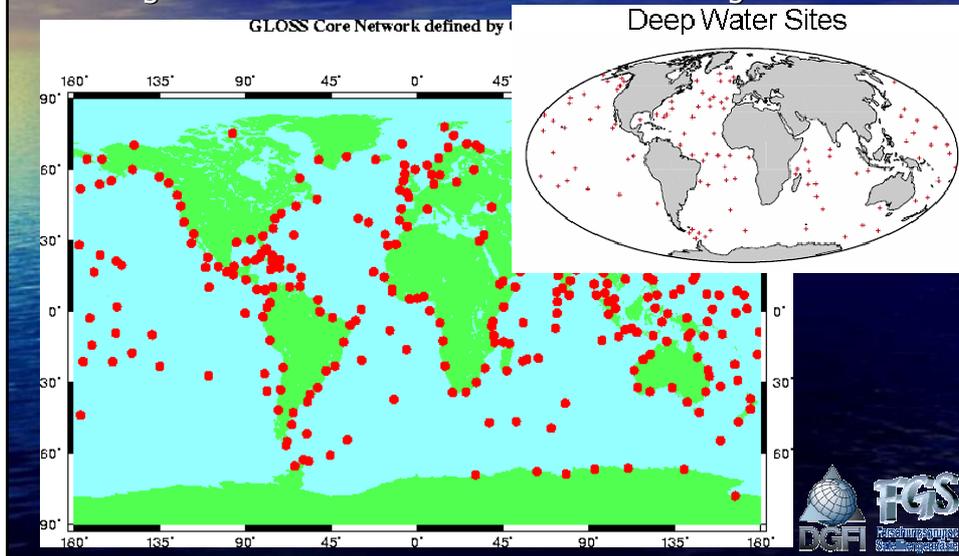
Wetzell, 12. März 2009

30



## Basisnetz moderner, kontrollierter Pegel

- Geeignet zur Kalibration von Altimetermessungen



## Das Wichtigste ... 1(2)

- Die Meeresoberfläche steht in erster Näherung im Gleichgewicht mit der Schwerkraft. Die Oberfläche bildet deshalb alle Massenunregelmäßigkeiten im Erdinneren bzw. am Meeresboden ab.
- Mit der Satellitenaltimetrie können einzelne Meereshöhen mit ca. 2 – 3 cm genau bestimmt werden
- Durch den wiederholten Überflug der Bahnspuren werden die Meereshöhen alle 10 Tage (TOPEX/Jason-1), alle 17 Tage (GFO) und alle 35 Tage (ENVISAT) erneut vermessen
- Dadurch können Zeitreihe über nunmehr 15 Jahre gebildet werden

Wetzell, 12.März 2009

32



## Zeitliche Änderungen der Meeresoberfläche

... erfolgen auf allen Raum- und Zeitskalen:

- Gezeiten mit 12- und 24-stündigen Perioden
- Kleinräumige, kurzfristige Anomalien ("Eddies")
- Jahreszeitliche Variationen (mit großräumigem Muster)
- Langperiodische (mehrjährige) Änderungen
- Globaler Meeresspiegelanstieg

Altimetrie erlaubt es erstmals alle Phänomene im Detail zu untersuchen

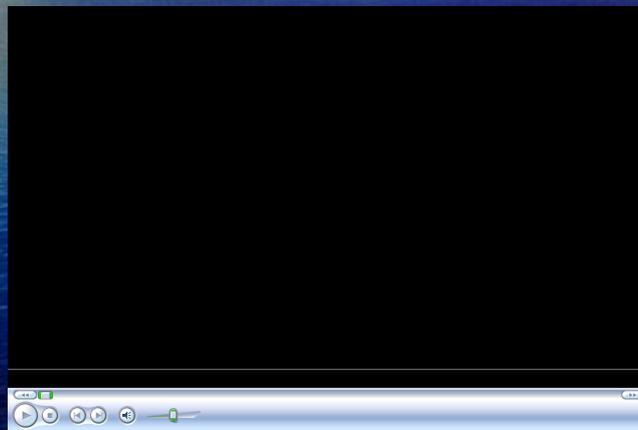
Wettzell, 12.März 2009

33



## Kleinräumige Wirbel (Eddies) im Kuroshio-Strom

- ARGO-Floats (Treibbojen, deren Position durch Satelliten überwacht wird)

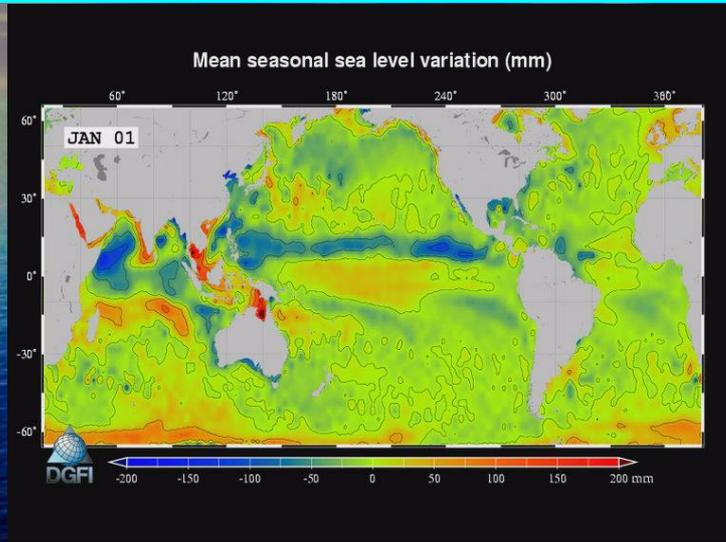


Wettzell, 12.März 2009

34



## Mittlere jahreszeitliche Schwankungen (ohne Gezeiten, d.h. Tidenhub korrigiert)



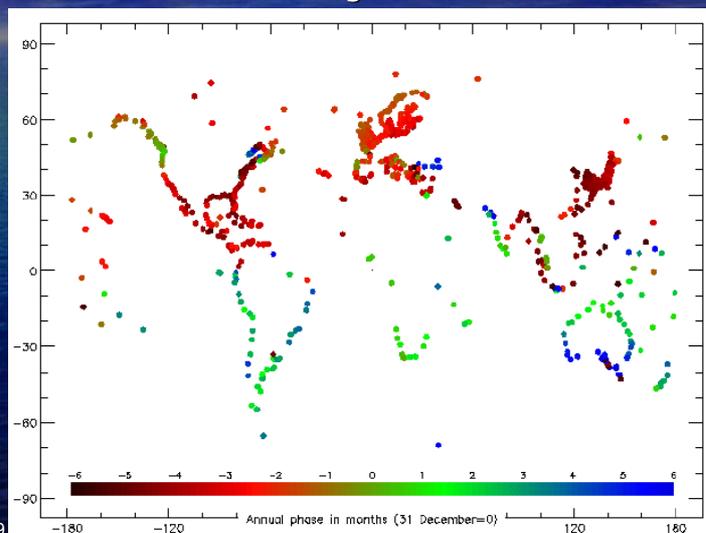
Wettzell, 12. März 2009

35



## Jahreszeitliche Schwankungen des Meeresspiegels

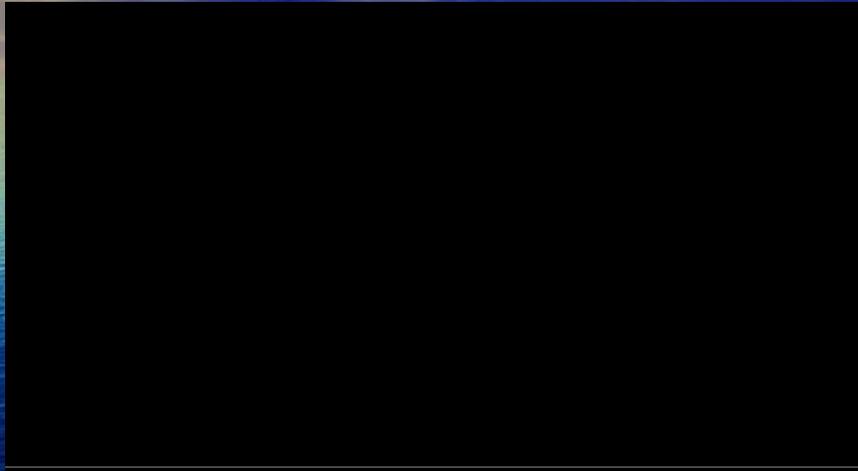
- In welchem Monat erreichen die Pegel ihr Maximum?



Quelle: PSMSL

Wettzell, 12. März 2009

# Meeresspiegelanomalien (ohne saisonale und säkulare Entwicklung)

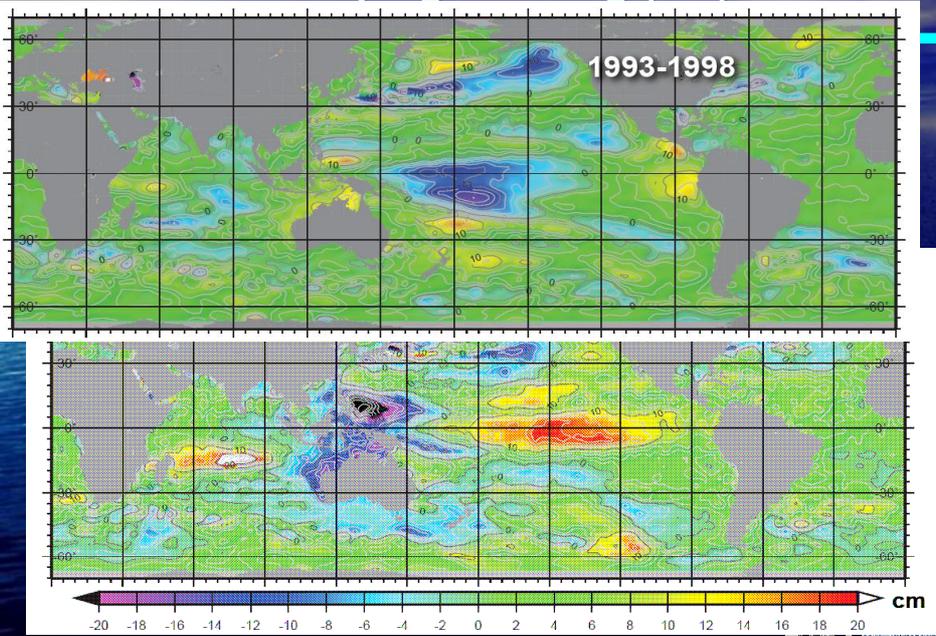


Wetzell, 12. März 2009

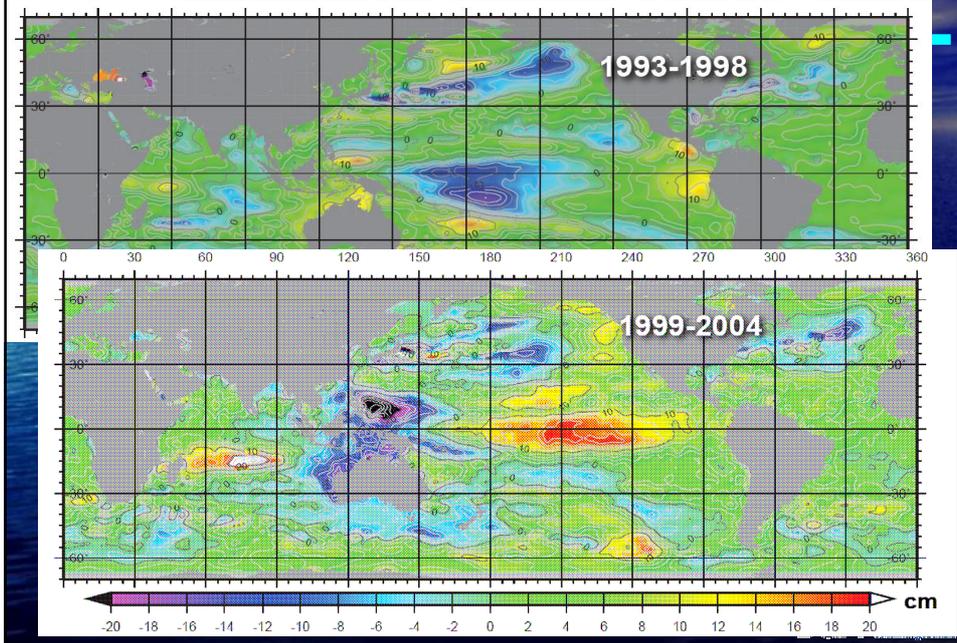
37



## Lokaler Meeresspiegelanstieg (cm)



## Lokaler Meeresspiegelanstieg (cm)



## Fließband-Zirkulation

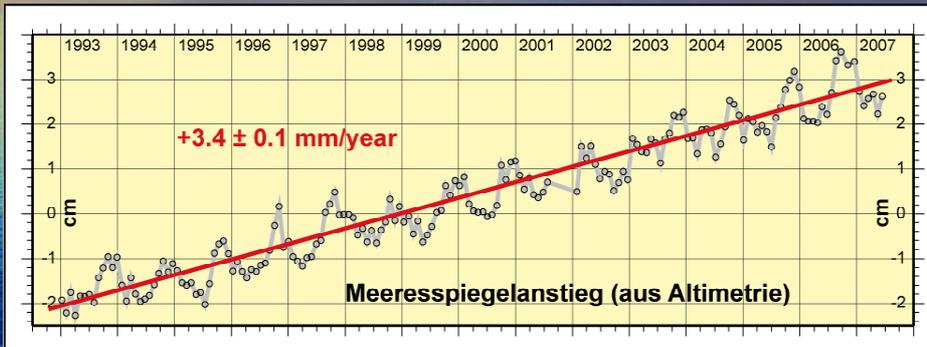


The ocean plays a major role in the distribution of the planet's heat through deep sea circulation. This simplified illustration shows this "conveyor belt" circulation which is driven by differences in heat and salinity. Records of past climate suggest that there is some chance that this circulation could be altered by the changes projected in many climate models, with impacts to climate throughout lands bordering the North Atlantic.

Wettzell, 1



## „Globale“ Mittelwerte aller Meereshöhen in zeitliche Entwicklung (Meeresspiegelanstieg)



Wetzell, 12. März 2009

41



## Das Wichtigste ... 2(2)

- Die Satellitaltimetrie ermöglicht eine umfassende Überwachung des Meeresspiegels auf wenige cm genau.
- Die Meeresoberfläche variiert jahreszeitlich und kurzfristig. Damit lassen sich die **Meereszeiten** und viele Details der **Oberflächenströmung** bestimmen bzw. verbessern.
- Regional entwickelt sich die mittlere Meeresoberfläche sehr unterschiedlich mit **bis zu  $\pm 20 \text{ cm/Dekade}$** .
- Ein globaler Meeresspiegelanstieg von ca.  **$+3 \text{ mm/Jahr}$**  ist nachweisbar und signifikant.

Wetzell, 12. März 2009

42



---

**Danke  
für ihr Interesse !**

Die Animationen sind auch verfügbar unter  
<http://www.dgfi.badw.de/?169>

Wetzell, 12.März 2009

43

