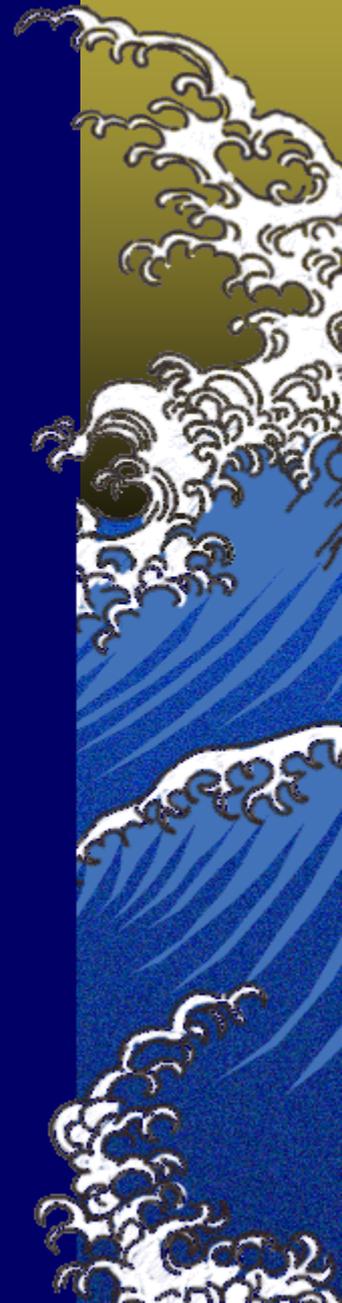


# Razina mora

*Danijel Orešić*

*Geografski odsjek PMF-a, SuZ*

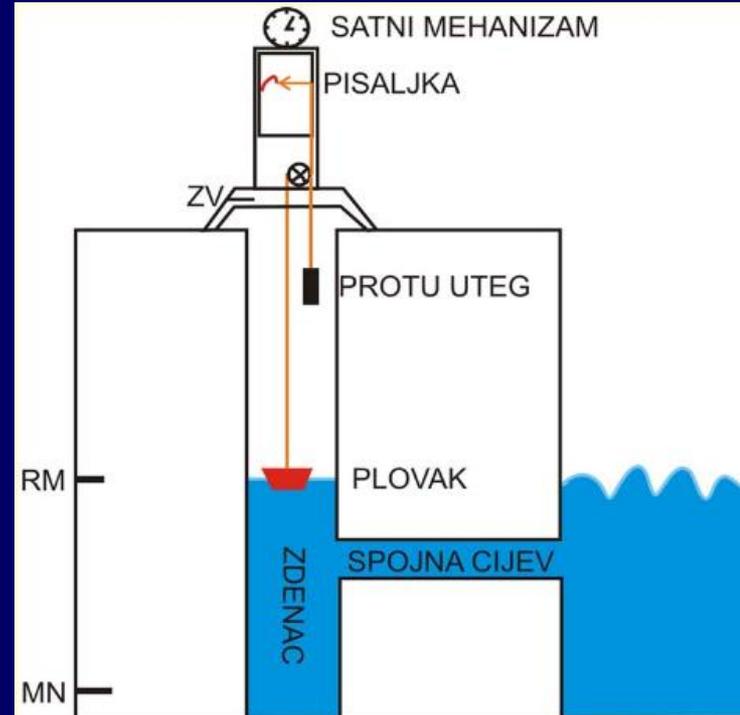
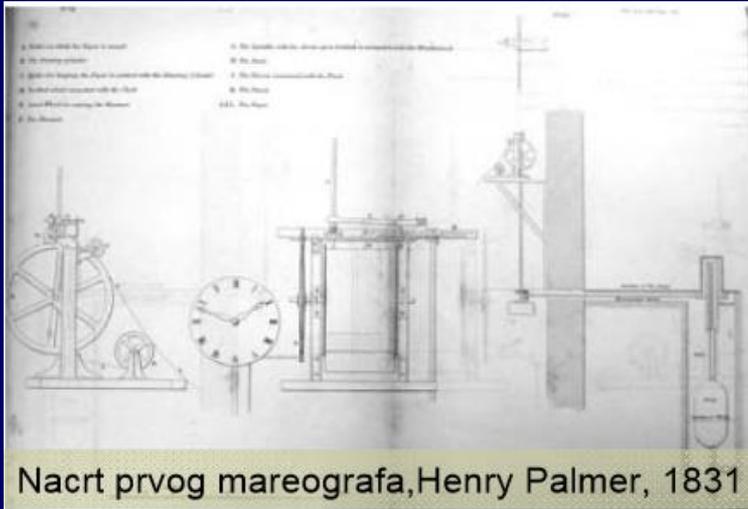


# Mjerenje razine mora

- More je u stalnom gibanju potaknuto različitim vanjskim i unutarnjim čimbenicima. Vertikalna komponenta gibanja mora rezultira stalnom varijacijom razine mora.
- Pod pojmom razina mora najčešće mislimo na srednju razinu mora (SV) na nekom mjestu u nekom razdoblju motrenja.
- Isprva su ljudi pratili promjene razine mora u odnosu na neku obilježenu točku na obali; npr. bilježenje u Amsterdamu od oko 1690-ih.
- Od neke srednje razine, preciznije određenog visinskog datuma trebalo je mjeriti dubine u moru i visine na kopnu
- Preciznije definiranje srednje (ili kakve druge) razine mora dolazi u instrumentalno doba – postavljanjem autonomnih mareografa (1831.); u Marseilleu kontinuirani niz od 1883.



# Mjerenje razine mora

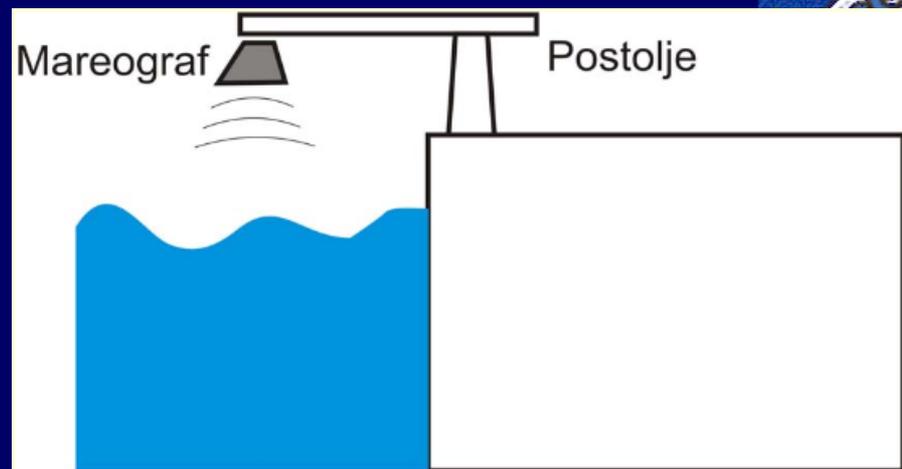


▲ Mehanički mareograf

# Mjerenje razine mora



- ▶ Daljinski mareograf (radarski mareograf, akustični mareograf)



# Mjerenje razine mora

## ▲ Tlačni mareograf



Tlačni mareograf tvrtke  
OTT-Hydrometrie

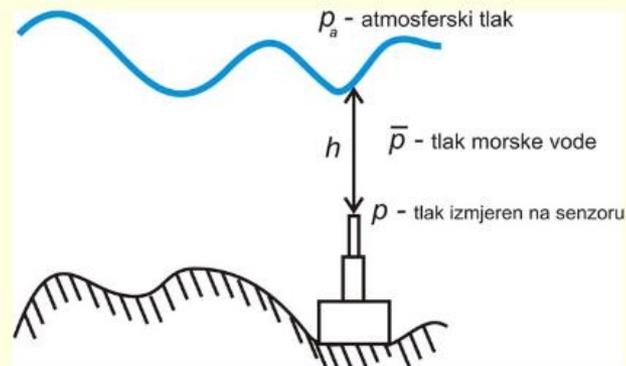
Tlak izmjeren na senzoru jednak je sumi atmosferskog tlaka i tlaka stupca morske vode:

$$p = p_a + \bar{p}$$

Tlak stupca morske vode dobije se iz hidrostatske aproksimacije:

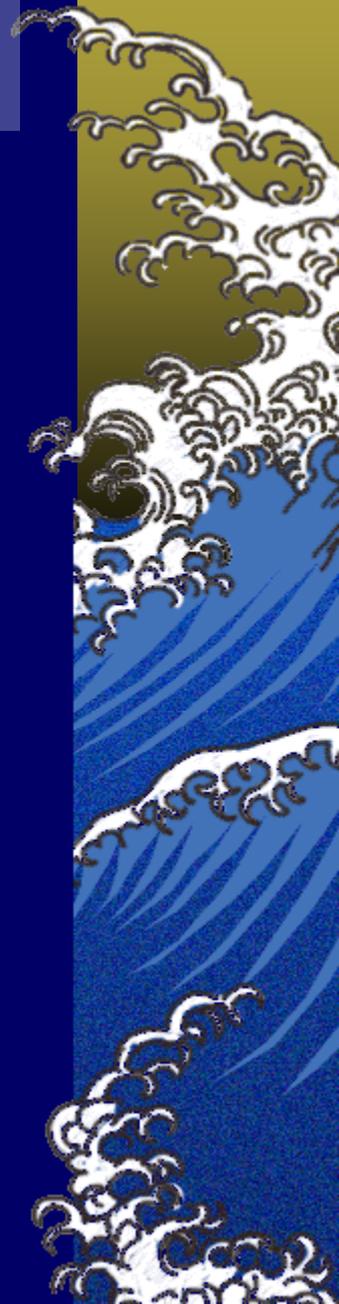
$$\bar{p} = \rho gh$$

Tada je razina mora:  $h = (p - p_a) / (\rho g)$

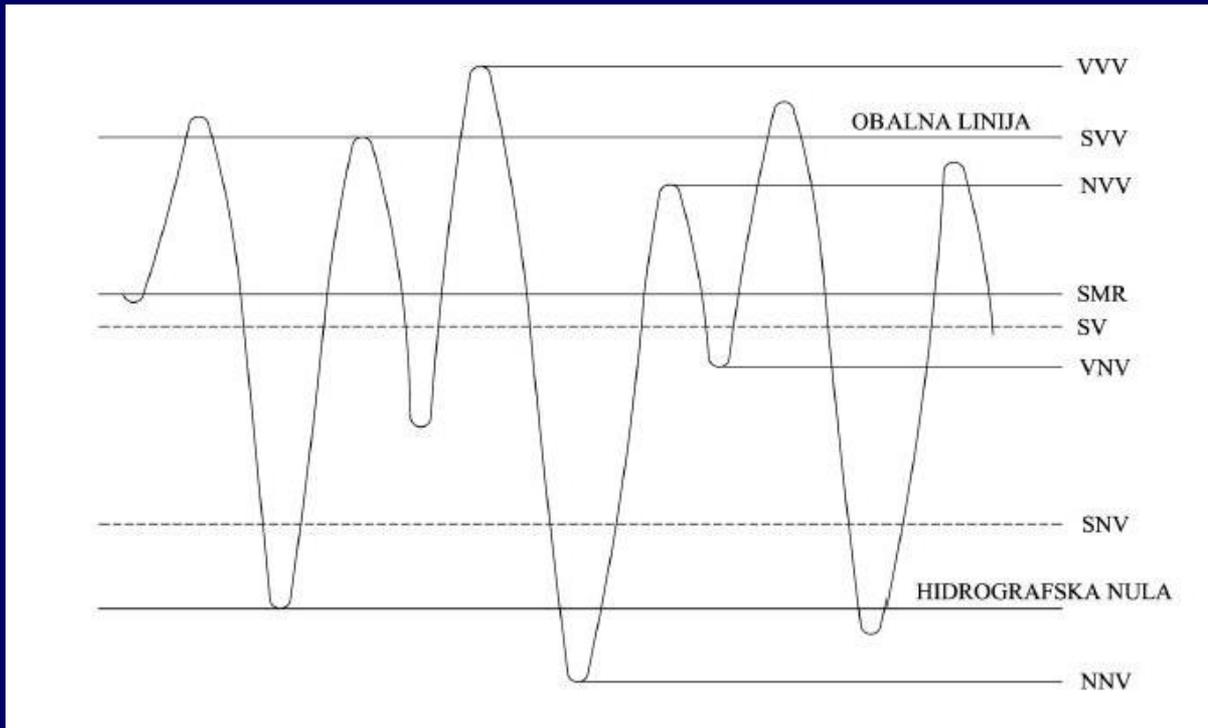


# Mjerenje razine mora

- S obzirom na to da razina mora ne miruje, moguće je definirati veliki broj vodostaja od kojih će se neke visoke i niske vode izdvojiti i u hidrografiji koristiti pri obradi ili interpretaciji nekih važnih hidrografskih parametara.
  - Visoka Visoka voda (VV) je najviša razina mora u prijelazu od uzdizanja (plime) prema spužtanju (oseci) razine.
  - Viša visoka voda (VVV) je viša voda u poludnevnom tipu morskih mijena
  - Srednja visoka voda (SVV) je aritmetička sredina svih visokih voda u toku dana, mjeseca ili godine
  - Niska voda (NV) je najniža razina mora u prijelazu od uzdizanja (plime) prema spužtanju (oseci)
  - Niža niska voda (NNV) je niža voda u poludnevnom tipu morskih mijena
  - Srednja niska voda (SNV) je aritmetička sredina svih niskih voda u toku dana, mjeseca ili godine
  - Srednja voda (SV) je vrijednost svih opaženih voda u toku nekog vremena. Ako se uzima za duži period, tipično za period Mjesečevog ciklusa 18,6 godina, naziva se srednja morska razina (SMR) tj. geodetska nula i služi kao osnova za nivelman na kopnu.



# Mjerenje razine mora



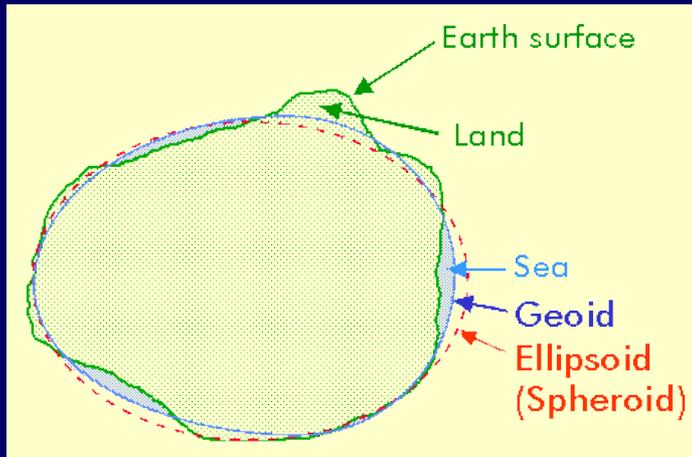
- ▲ Srednja morska razina (SMR = SV 18,6 godina) = geodetska nula; Hrvatski visinski referentni sustav za epohu 1971.5 – skraćeno HVRS71.
- ▲ Srednje niže niske vode (SNNV 18,6 godina) = hidrografska nula u RH: Hrvatski referentni sustav dubina mora za epohu 1971.5 - HRSDM71

# Geodetska nula

- ✦ Geodetska nula tradicionalno je osnova za geodetska mjerenja, odnosno za računanje visina na kopnu – pojedine države ili skupine država koriste različite datume oslanjajući se na pojedine mareografe
  - ✦ Novi visinski datum Republike Hrvatske uveden je 2004. godine (NN 110/04). Za novi visinski datum je usvojen II. NVT koji je oslonjen na pet mareografa (Kopar, Rovinj, Bakar, Split i Dubrovnik) i pet temeljnih repera raspoređenih na području Republike Hrvatske. Svi mareografi na koje je oslonjen II. NVT imaju puno razdoblje opažanja od 18,6 godina koje je računato s obzirom na 1.7.1971. godinu ( $\pm 9,3$ ). Naziv *Hrvatski visinski referentni sustav za epohu 1971.5 – skraćeno HVRS71*.
- ✦ Površina mora na Zemlji (tzv. topografija mora) nije matematički pravilno tijelo već slijedom utjecaja gravitacije i rotacije gotovo slijedi plohu geoida
  - ✦ Geoid poznat oko 200 godina, vrlo precizirano krajem 20. st. Odstupanja topografije mora od geoida (max.  $\pm 2\text{m}$ ) posljedica su razlika u gustoći, m. mijena, m. struja, atmosferskih prilika.



# Geoid



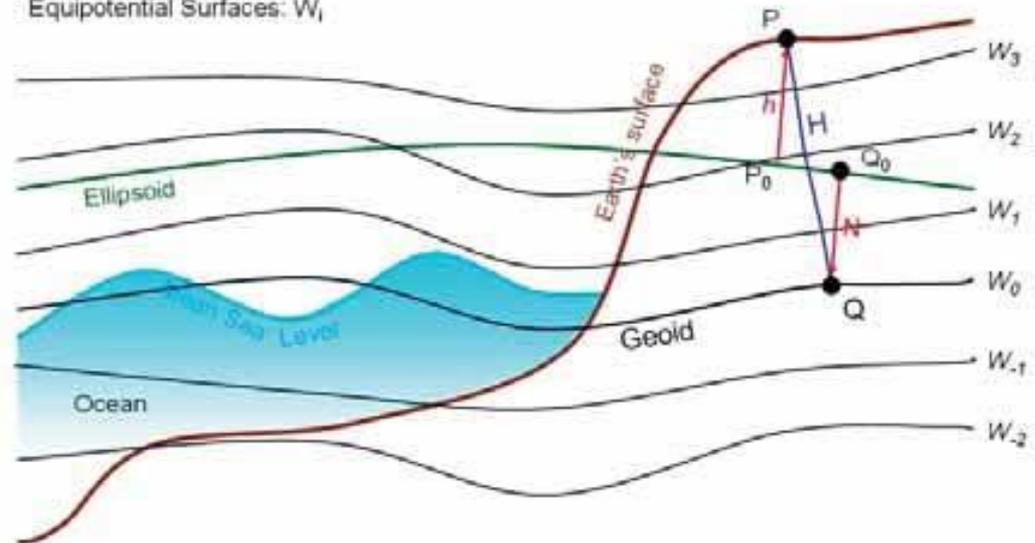
$$h = H + N$$

Ellipsoidal height ( $h$ ): Distance along the ellipsoidal normal ( $P_0$  to  $P$ )

Geoid height ( $N$ ): Distance along the ellipsoidal normal ( $Q_0$  to  $Q$ )

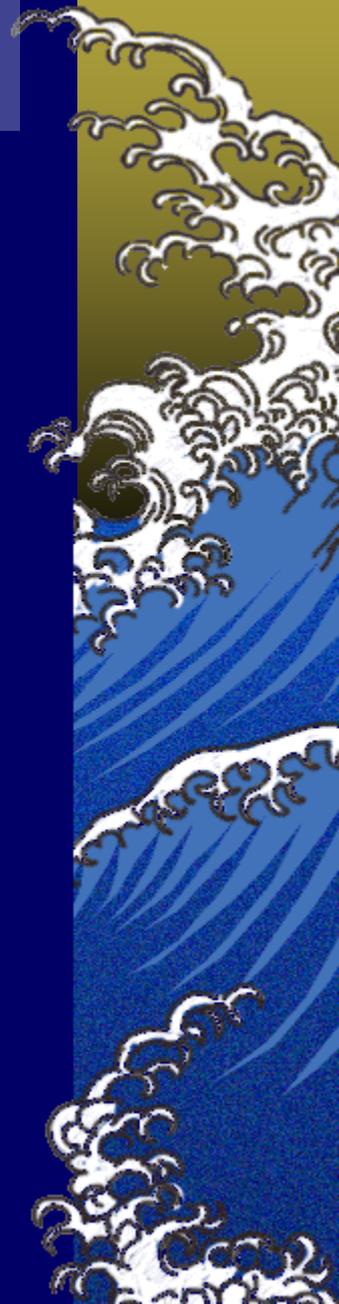
Orthometric height ( $H$ ): Distance along plumb line ( $Q$  to  $P$ )

Equipotential Surfaces:  $W_i$



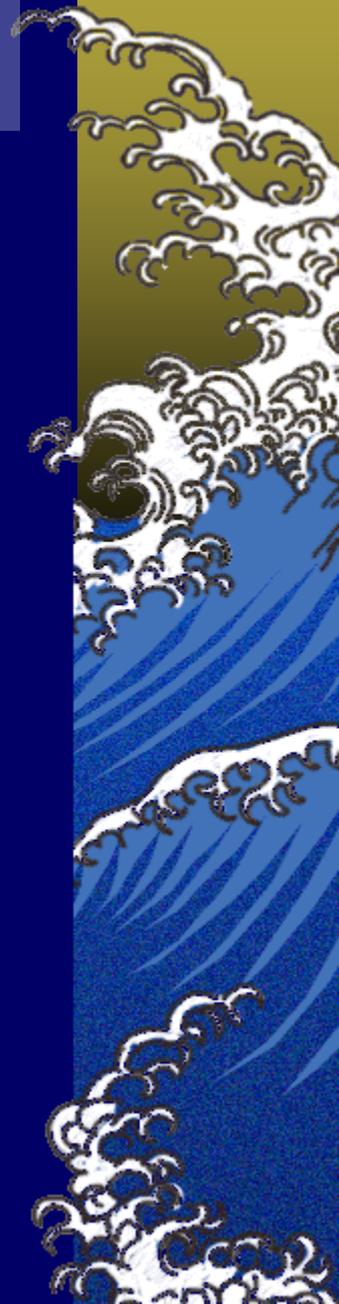
# Relativna promjena razine mora

- ✦ Mareografska mjerenja pokazala su svu kompleksnost neprestane promjene razine mora (osim valova). Uočene su periodične i neperiodične promjene, različite po trajanju
- ✦ Neke su promjene bile očekivane, poznate od davnine (npr. morske mijene) i njihovi uzročnici razmjerno dobro poznati i objašnjeni, no neke su promjene uočene, odnosno njihovi uzročnici objašnjeni tek nakon uvođenja preciznih mareografskih mjerenja.
- ✦ Kratkoročne promjene razine mora (uglavnom unutar godine dana, izravnavaju se za izračun SRM) mogu se primjerice razvrstati na:
  - ✦ Astronomski uvjetovane
    - ✦ Astronomске morske mijene (pod utjecajem različitih perioda varijacija astronomskih uzroka), rotacijske varijacije



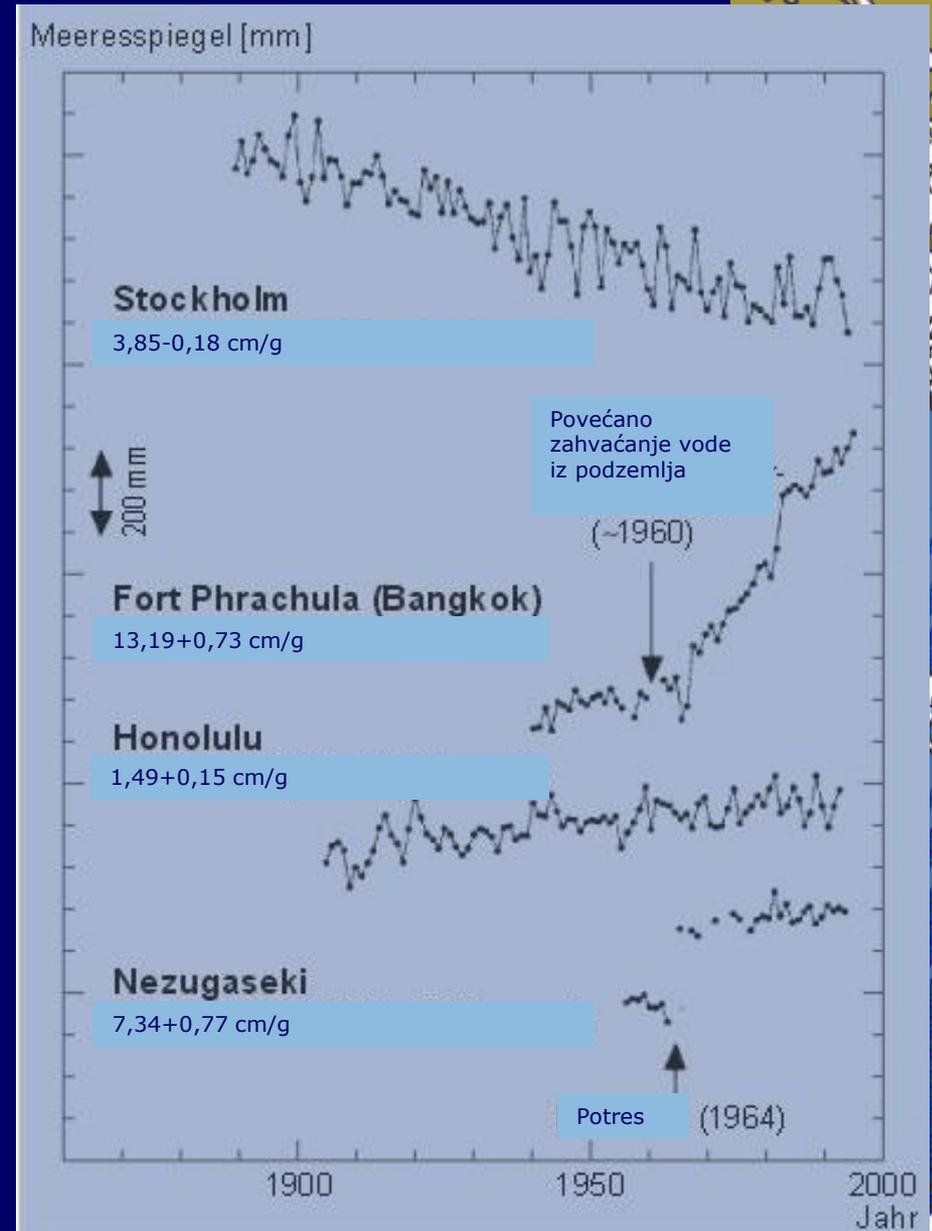
# Relativna promjena razine mora

- ▲ Klima-hidrološki uvjetovane, periodične ili neperiodične
  - ▲ Promjene razine m. uzrokovane promjenama tlaka zraka, vjetrova i morskih struja (sezonske i povremene, uključujući ENSO), promjenama gustoće mora (sezonske i povremene termohalinske promjene) promjenama u protocima tekućica na m. ušćima, sezonske promjene u bilanci oceana i mora
- ▲ Reljefno uvjetovane
  - ▲ Seševi (stojno valovanje)
- ▲ Potresno uvjetovane
  - ▲ Tsunami
- ▲ Sa sve više podataka i sve duljim nizovima, moglo se pristupiti analizi promjena srednje razine mora – pitanje je mijenja li ona globalno (eustatski); o tome su postojala pitanja u geologiji, klimatologiji...
- ▲ Pokazalo se da praćenje eustatskih promjena razine mora na Zemlji nije tako jednostavan zadatak



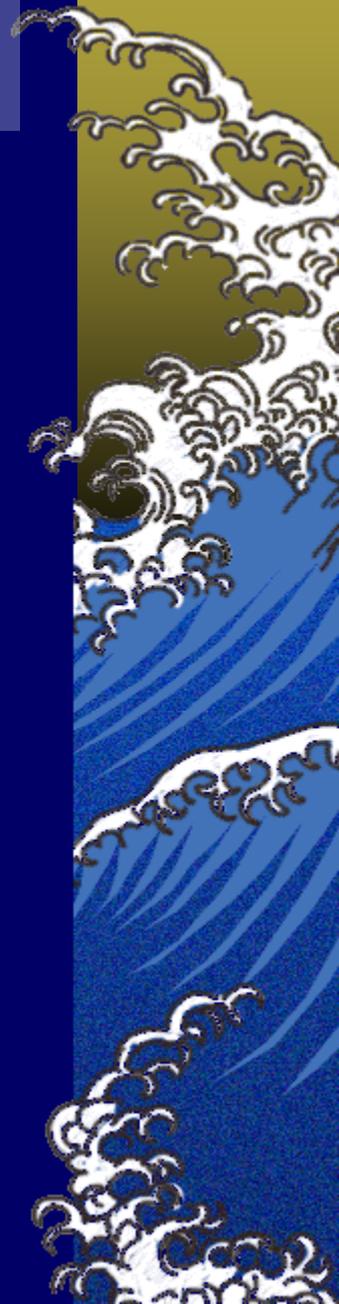
# Relativna promjena razine mora

- ✦ Na priloženim mareogramima uočavaju se bitne razlike:
- ✦ Prema stockholmskom mareografu srednjih godišnjih razina more pokazuje trend opadanja, čak 18 cm u stotinjak godina (-1,8 mm godišnje)
- ✦ Mareogram Bangkoka (Krung Thep, delta rijeke Chao Praya) pokazuje pak da more raste a posebno intenzivno nakon 1960.; stopa porasta je čak 7,3 mm godišnje
- ✦ U Honolulu bilježi se trend porasta mora od 1,5 mm godišnje
- ✦ Nezugaseki mareograf bilježi nagli skok na mareogramu koji je posljedica potresa



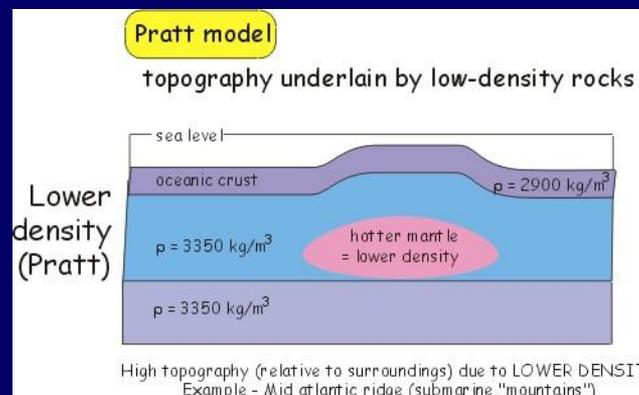
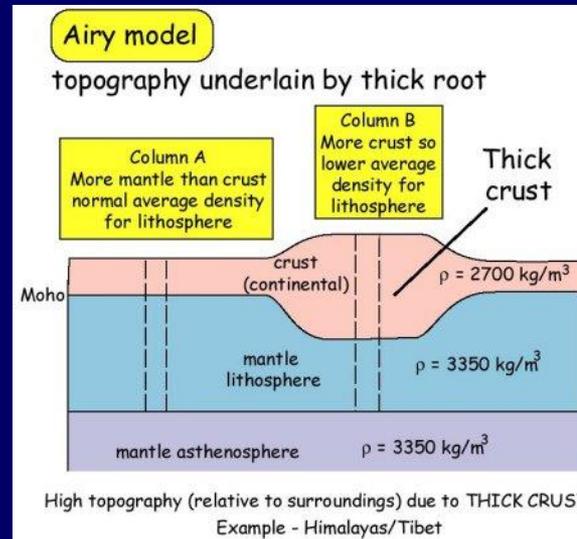
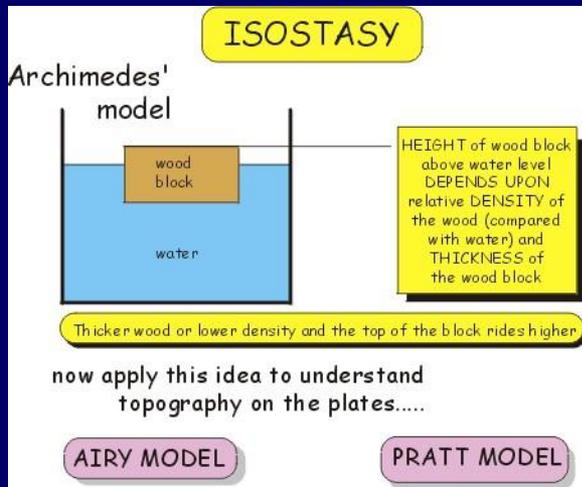
# Relativna promjena razine mora

- ▶ Bjelodano je da su mareogrami bilježili RELATIVNU promjenu razine mora, lokalnu, odnosno regionalnu.
- ▶ Relativna regionalna promjena razine mora može biti transgresija ili regresija.
- ▶ Da bi spoznali “pravu”, apsolutnu, globalnu = tzv. EUSTATSKU promjenu razine mora najprije iz lokalnih promjena zabilježenih mareogramima treba ukloniti komponentu vertikalnog gibanja kopna
- ▶ Vertikalna gibanja kopna mogu biti vezana uz izostatske (sedimentnu, glacijalnu, hidrološku, vulkansku i termalnu izostaziju) i tektonske epirogenetske pokrete, uz pokrete litosfernih ploča i orogenezu, vulkanizam, lokalizirane supsidencije... prema trajanju sve su to dugoročne promjene



# Relativna promjena razine mora

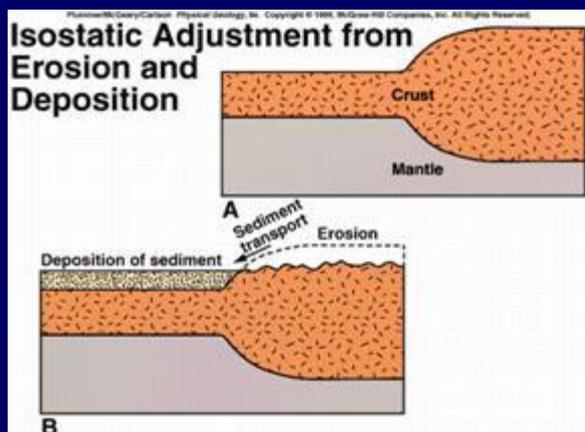
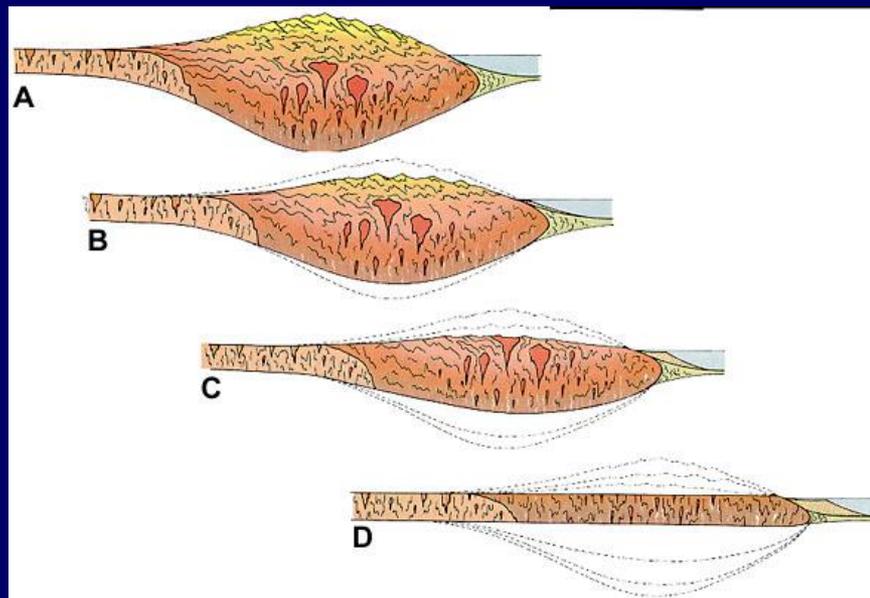
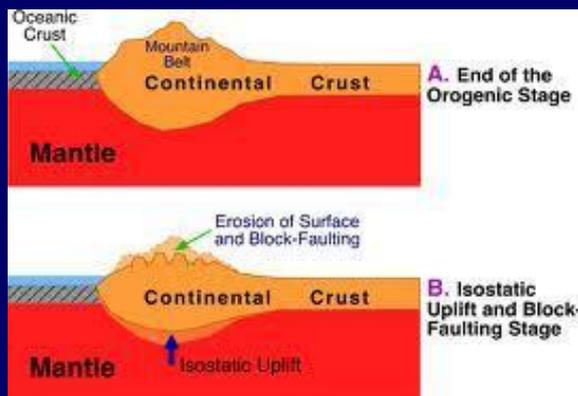
- RELATIVNO – izostatski pokreti
  - Izostazija = koncept plutanja Zemljine kore na gornjem plaštu



<http://www.geo.cornell.edu/hawaii/220/PRI/isostasy.html>

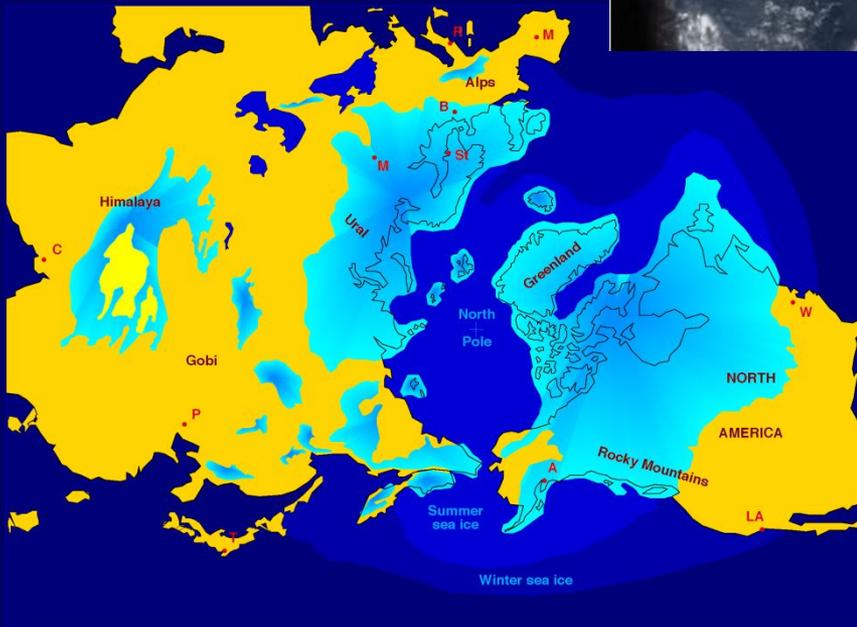
# Relativna promjena razine mora

- RELATIVNO – izostatski pokreti
- Erozijsko-sedimentna izostazija



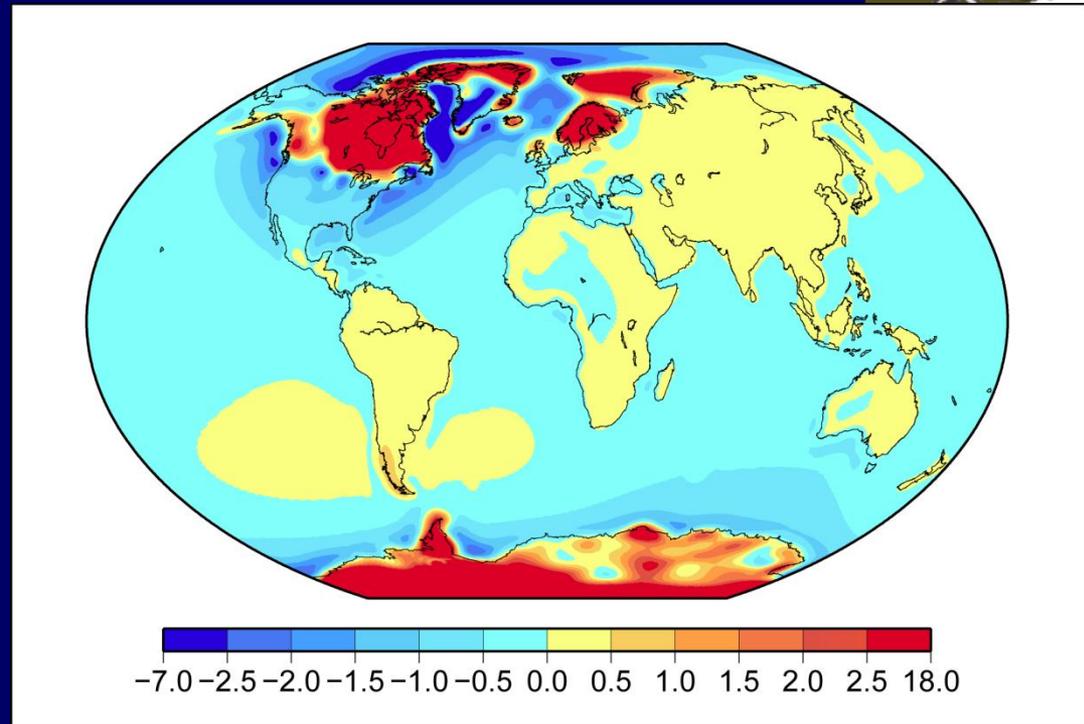
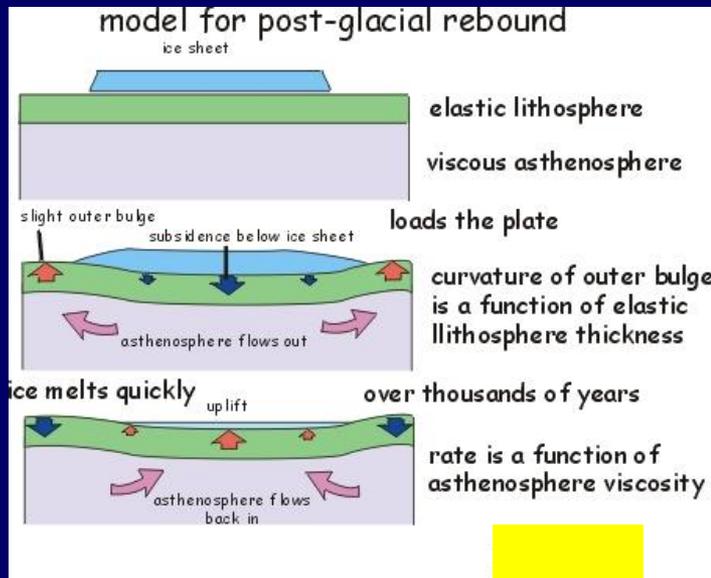
# Relativna promjena razine mora

- RELATIVNO – izostatski pokreti
- Glacioizostazija – izostatska kompenzacija zbog promjene terećenja kore ledom



# Relativna promjena razine mora

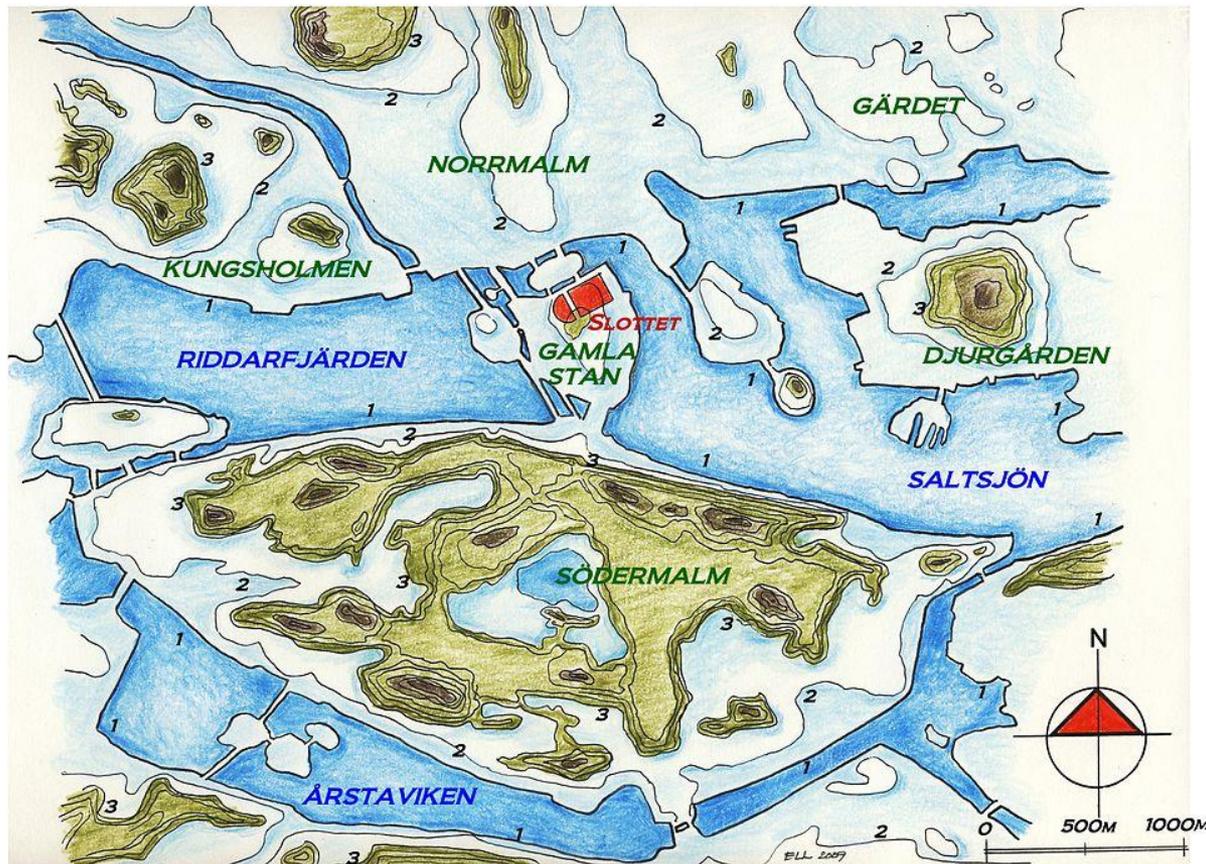
- RELATIVNO – izostatski pokreti
- Glacioizostazija – izostatska kompenzacija zbog promjene terećenja kore ledom



# Relativna promjena razine mora

- RELATIVNO – izostatski pokreti
- Glacioizostazija – primjer Stockholm

## AUSWIRKUNG DER POSTGLAZIALEN LANDHEBUNG IN STOCKHOLM



QUELLEN: SVENSKA TURISTFÖRENINGEN UND  
KARTOGRAFISKA INSTITUTET

- 1: STRANDLINIE IM JAHR 2000 (HEUTE)
- 2: STRANDLINIE IM JAHR NULL (-10 M)
- 3: STRANDLINIE IM JAHR 2000 V.CHR. (-25 M)

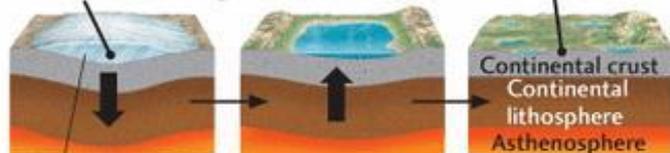
# Relativna promjena razine mora

- RELATIVNO – epirogenetski pokreti (izostatski i magmatski)
  - Epirogeneza = spori radijalni pokreti velikih dijelova kore (dugovalno zasvođivanje i ugibanje) bez orogeneze; glavni primjeri:

## (a) 1 GLACIAL REBOUND

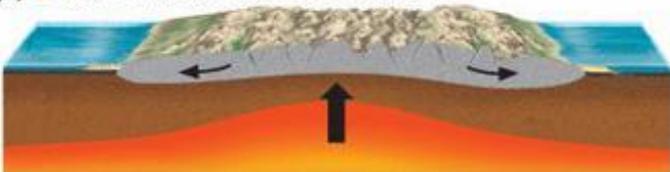
A glacial ice load downwarps the continental lithosphere....

...which rebounds once the ice is removed.



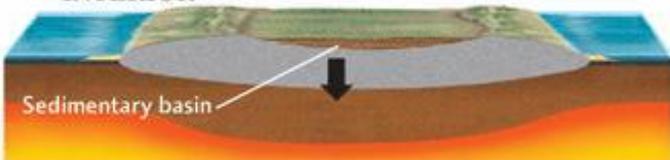
Continental glacier

## (b) 2 HEATING OF LITHOSPHERE



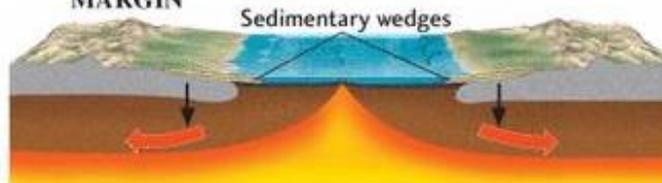
Upwarping and thinning of continental lithosphere are a result of heating and rifting.

## (c) 3 COOLING OF LITHOSPHERE IN CONTINENTAL INTERIOR



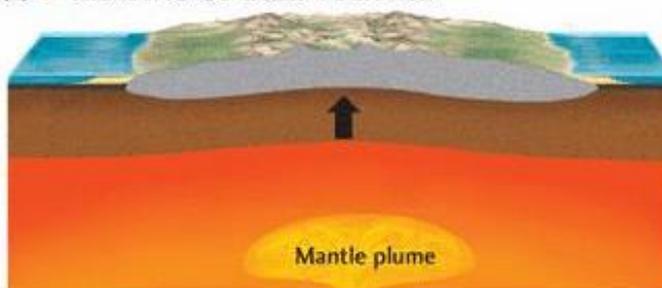
As the lithosphere cools and contracts, it subsides to form a basin within the continent.

## (d) 4 COOLING OF LITHOSPHERE ON CONTINENTAL MARGIN



When a new episode of seafloor spreading splits a continent apart, the edges of the continent subside as they cool, accumulating thick sedimentary wedges.

## (e) 5 HEATING OF DEEP MANTLE



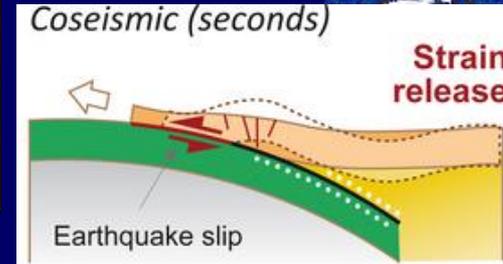
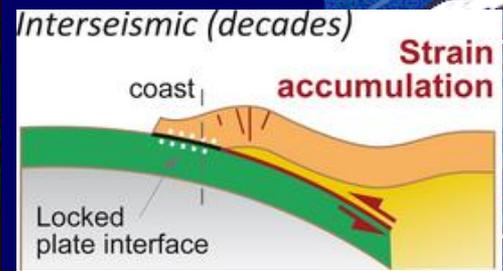
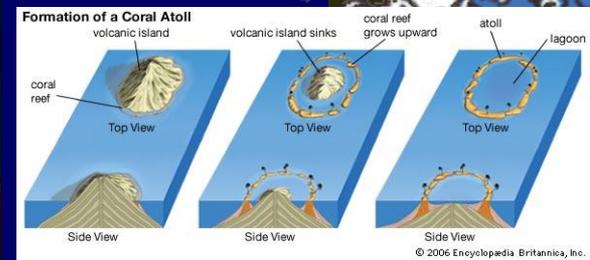
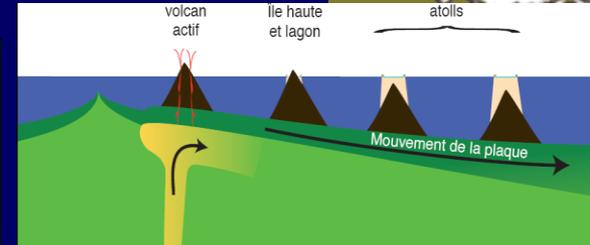
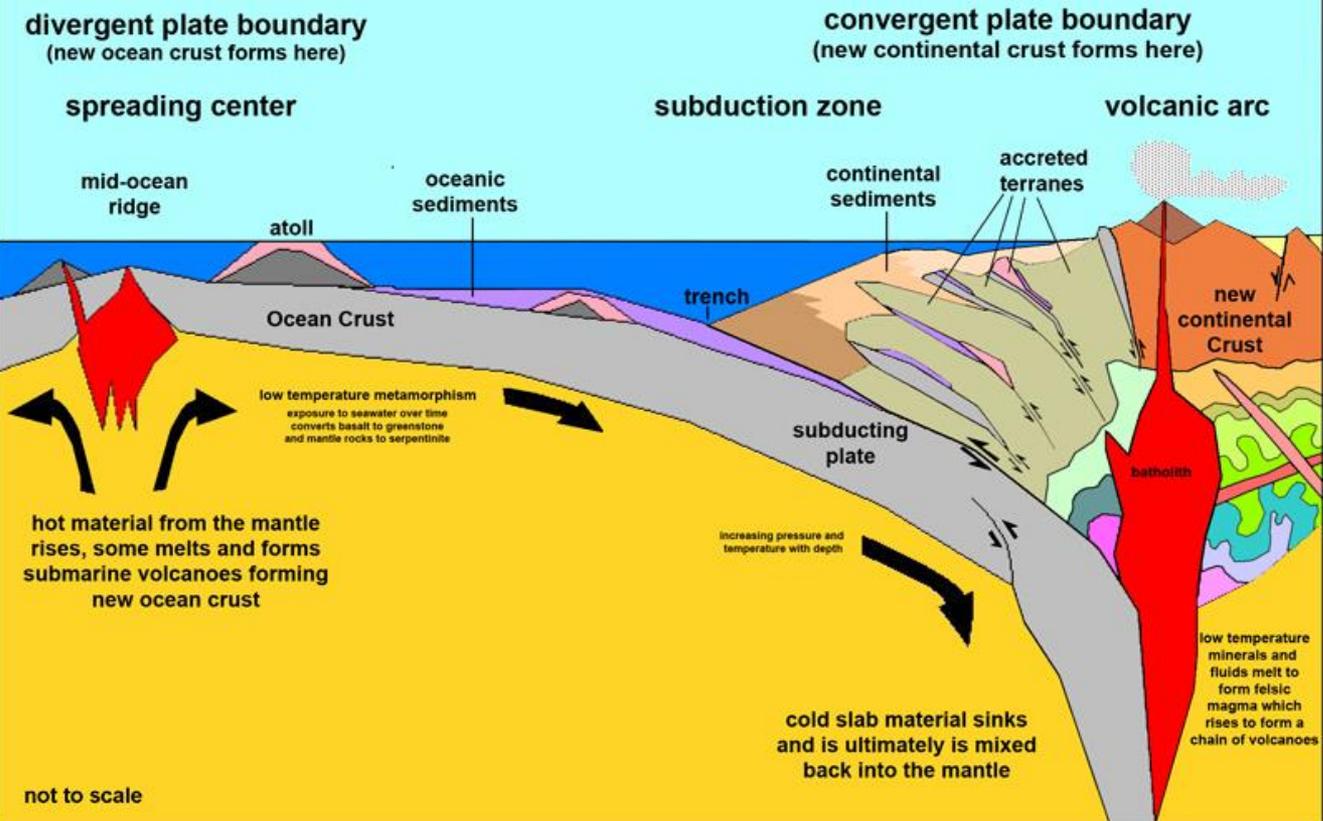
A plume rising from the mantle heats the continent and raises the base of the lithosphere, upwarping the surface over a broad area.

# Relativna promjena razine mora

- RELATIVNO - vertikalna gibanja kopna vezana uz pokrete litosfernih ploča – orogeneza, vulkani, potresi...

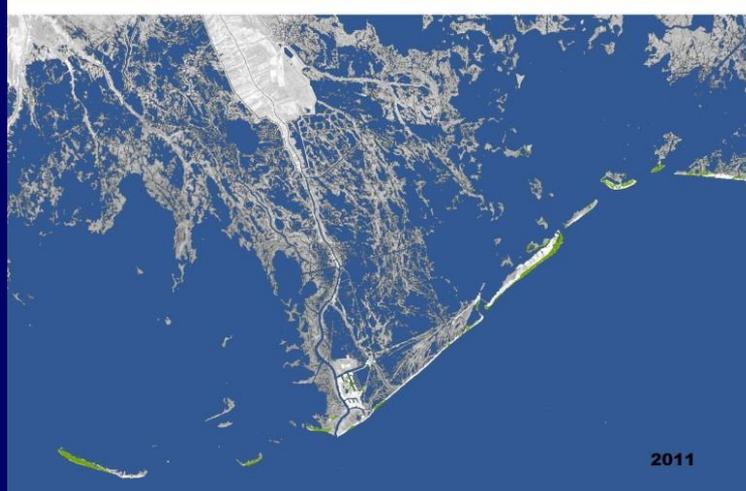
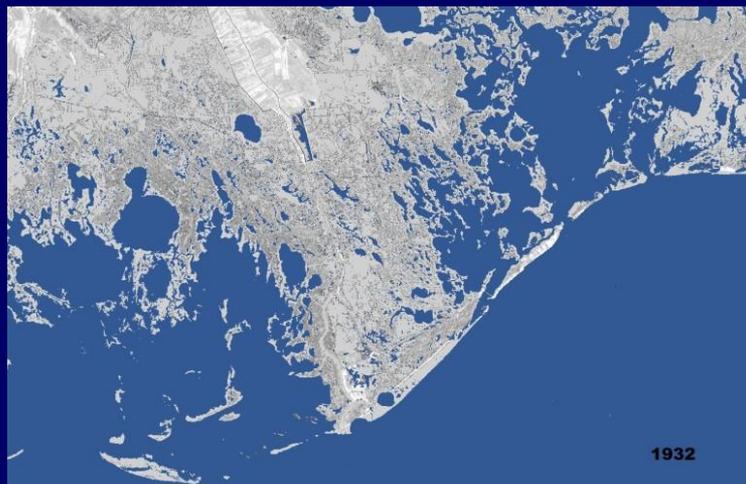
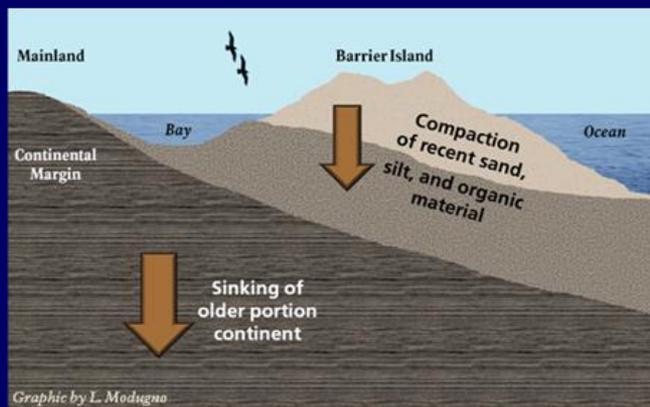


Model illustrating plate tectonics and accretion of rocks on continental margins



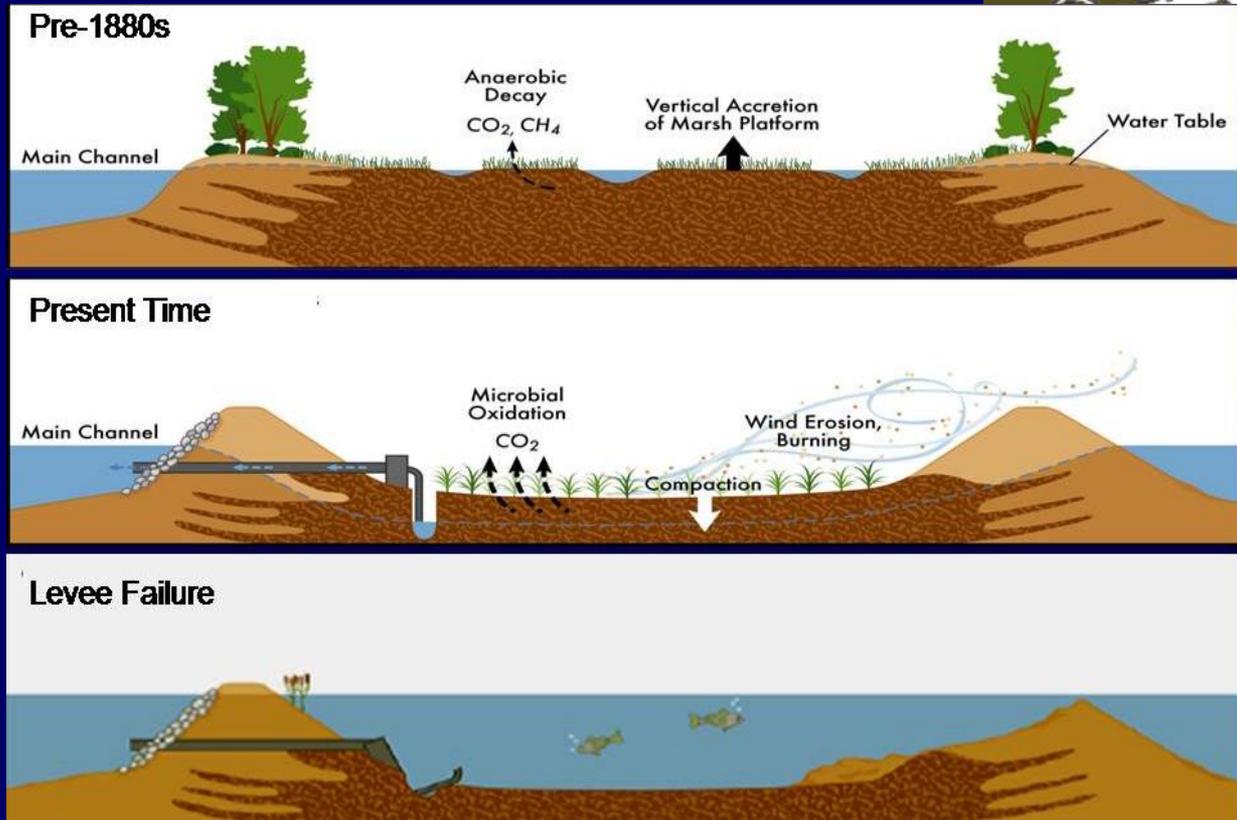
# Relativna promjena razine mora

- RELATIVNO – lokalne supsidencije
  - uzrokovane prirodnom kompakcijom klastita (npr. delte), urušavanjem prirodnih šupljina, ali i djelovanjem ljudi (prekomjerno crpljenje vode, ekstrakcija minerala...)



# Relativna promjena razine mora

## RELATIVNO – lokalne subsidencije

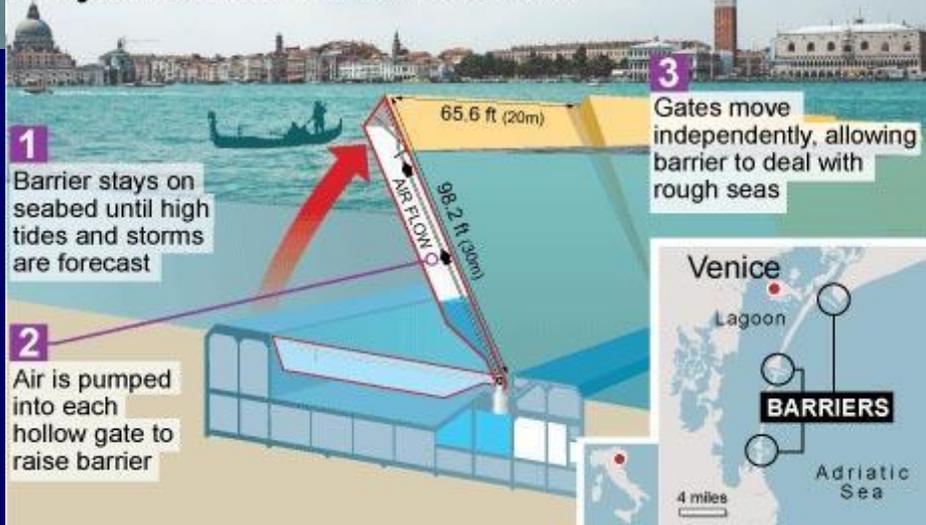


# Relativna promjena razine mora

## RELATIVNO – lokalne supsidencije

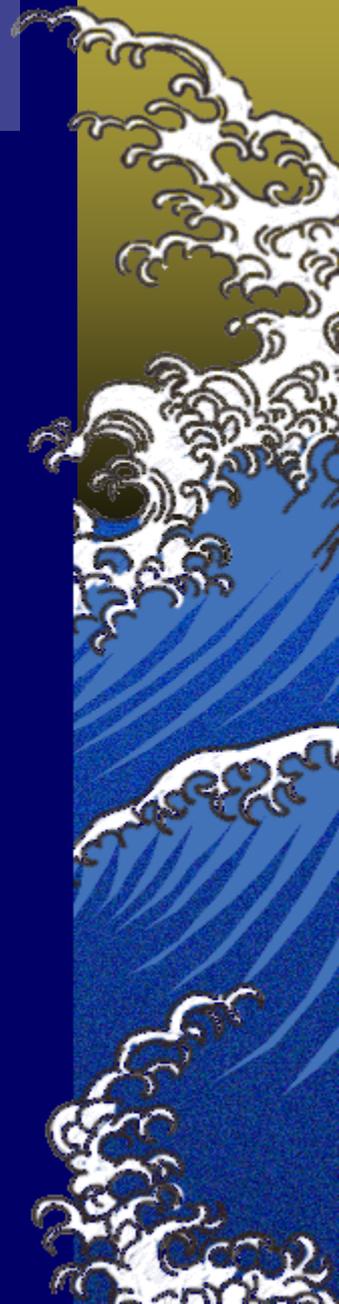


## Project MOSES: How it will work



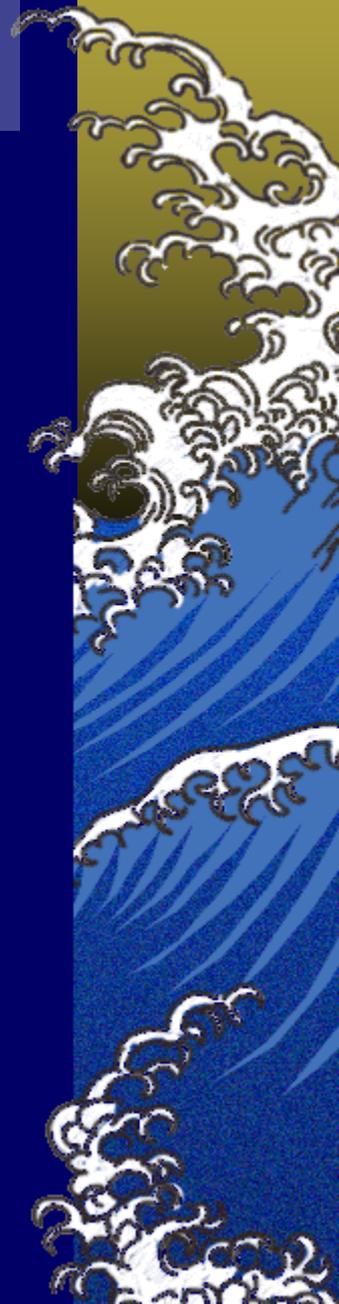
# Eustatske promjene razine mora

- ✦ Kao i kod kratkoročnih promjena jedan dio dugoročnih promjena razine mora kako lokalnih-relativnih tako i globalnih-eustatskih bio je očekivan i njihovi uzročnici razmjerno dobro poznati i objašnjeni, no neke su promjene uočene, odnosno njihovi uzročnici objašnjeni tek u najnovije doba.
- ✦ Kad su se iz mareograma uklonile manje ili više pouzdano procjenjene vertikalne promjene kopna (dugoročne promjene lokalnog karaktera), ostali su podaci o eustatskoj promjeni razine mora
- ✦ Eustatska promjena razine mora odraz je dugoročnih promjena globalnog karaktera.
- ✦ One se mogu primjerice razvrstati na:
  - ✦ Astronomski uvjetovane
    - ✦ Promjene razine mora zbog promjena u rotaciji Zemlje i nagibu osi tj. ekvinočijskoj precesiji, eksterne gravitacijske promjene, donos juvenilne vode iz svemira.



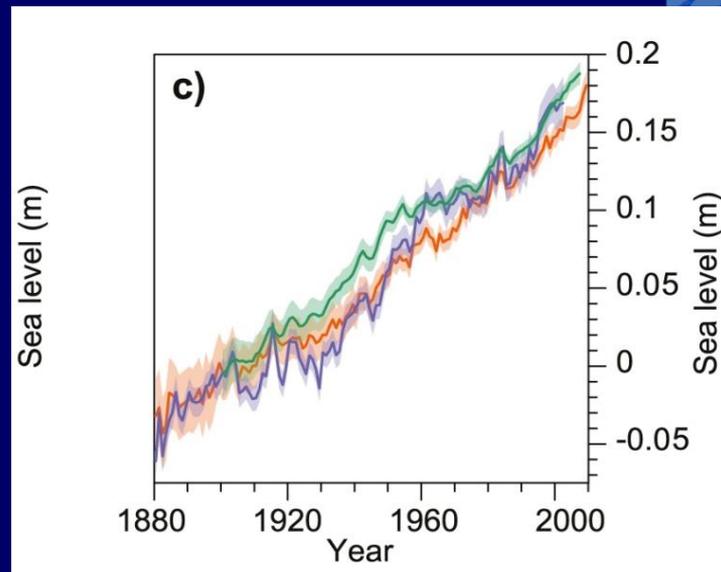
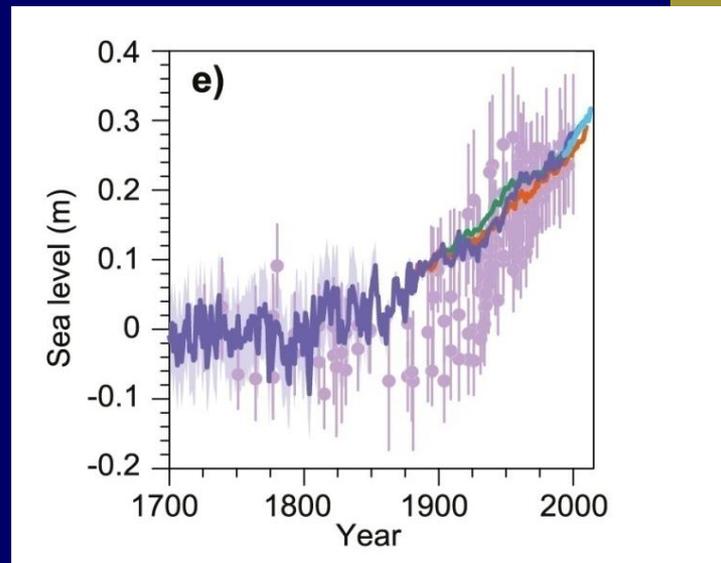
# Eustatske promjene razine mora

- ▲ Geološki uvjetovane
  - ▲ Promjene razine mora zbog promjena u zapremini oceanskih bazena, utjecaj paleogeografije, utjecaj donosa juvenilne vode iz Zemljine unutrašnjosti
- ▲ Klima-hidrološki uvjetovane
  - ▲ Promjene razine mora zbog promjena u hidrološkom ciklusu – zadržavanju ili otpuštanju vode iz kopnenih prirodnih hidroloških spremnika, promjene morske razine zbog termohalinske promjene gustoće mora
- ▲ Uzroci su doduše toliko povezani i kompleksni (te u novije doba uključuju i antropogene učinke) da bi se sve promjene mogle podijeliti i drugačije, primjerice na one uzrokovane promjenom volumena oceana (bilo promjenom količine vode u svjetskom moru bilo promjenom volumena zbog promjene gustoće) i one uzrokovane promjenom zapremine oceanskih bazena.



# Eustatske promjene razine mora

- ▶ Marfeografima je, uz određenu razinu procjene zbog provedenih korekcija, vrlo jasno zabilježen trend eustatskog porasta razine mora
- ▶ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 5. izvještaj (AR5): U zadnjih 2000 godina geološki podatci upućuju da eustatske varijacije nisu prelazile  $\pm 0,25$  m na vremenskoj skali od nekoliko stotina godina
- ▶ Prijelaz s kasnoholocenskih promjena reda veličine desetinke mm/g na suvremeni rast razine reda veličine mm/g događa se u 19. i posebno od ranih 1900-ih
- ▶ Od 1901 do 2010 zabilježena je stopa rasta GMSL od 1,7 mm/godišnje



# Eustatske promjene razine mora

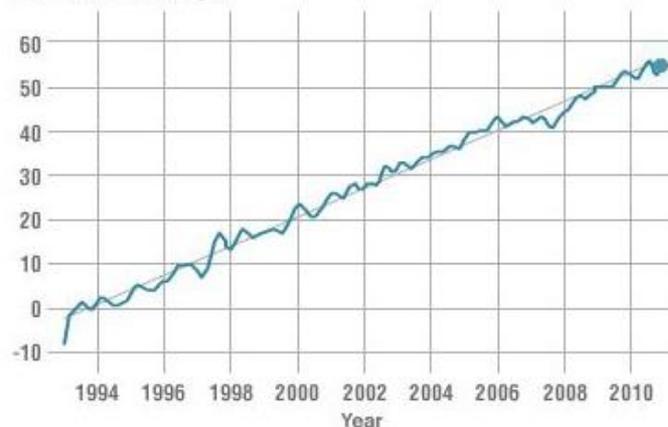
- Od 1992. (revolucionarni satelit Topex/Poseidon 1992.-2006., potom sateliti Jason1 2001.-2013. i Jason2 2008.) provode se precizna mjerenja topografije mora, odnosno mjeri se razina mora u odnosu na referentni elipsoid radarskim altimetrom (prije toga samo kratak niz sa Seasat satelita)
- U razdoblju 1993.-2012. zabilježena je stopa rasta GMSL od 3,2 mm/godišnje
- IPCC opsežna analiza povezuje suvremeni eustatički porast razine mora s globalnim zatopljenjem.

## SATELLITE DATA: 1993-PRESENT RATE OF CHANGE

Data source: Satellite sea level observations.

Credit: CLS/Cnes/Legos

↑ 3.27 mm per yr\*

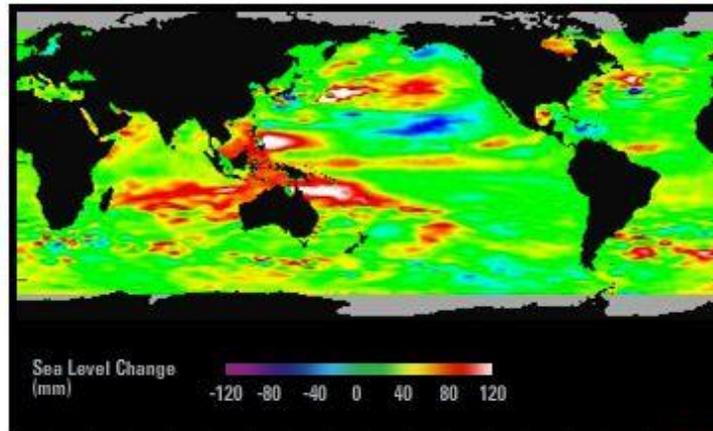


## TIME SERIES: 1993-2009

Data source: OSTM/Jason-1/Topex-Poseidon

Credit: NASA

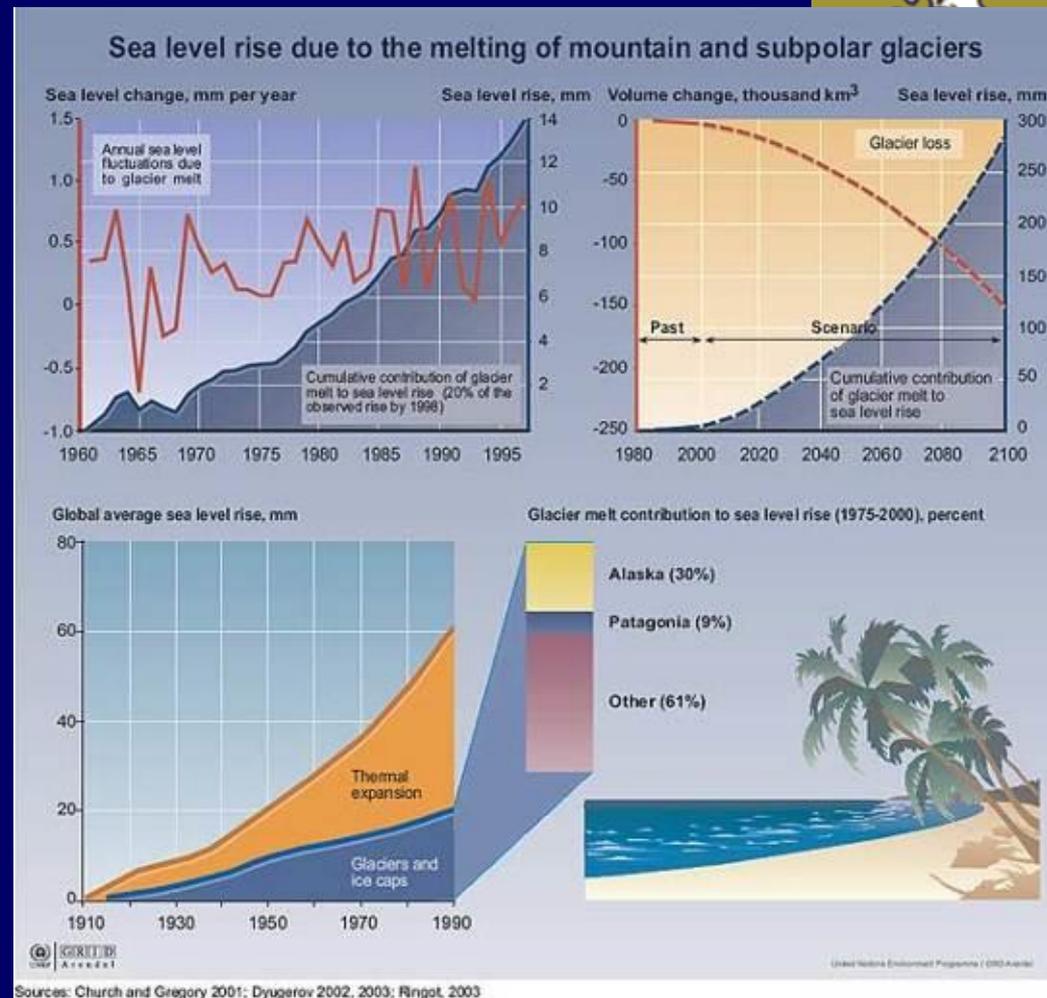
2009



1994 1996 1998 2000 2002 2004 2006 2008

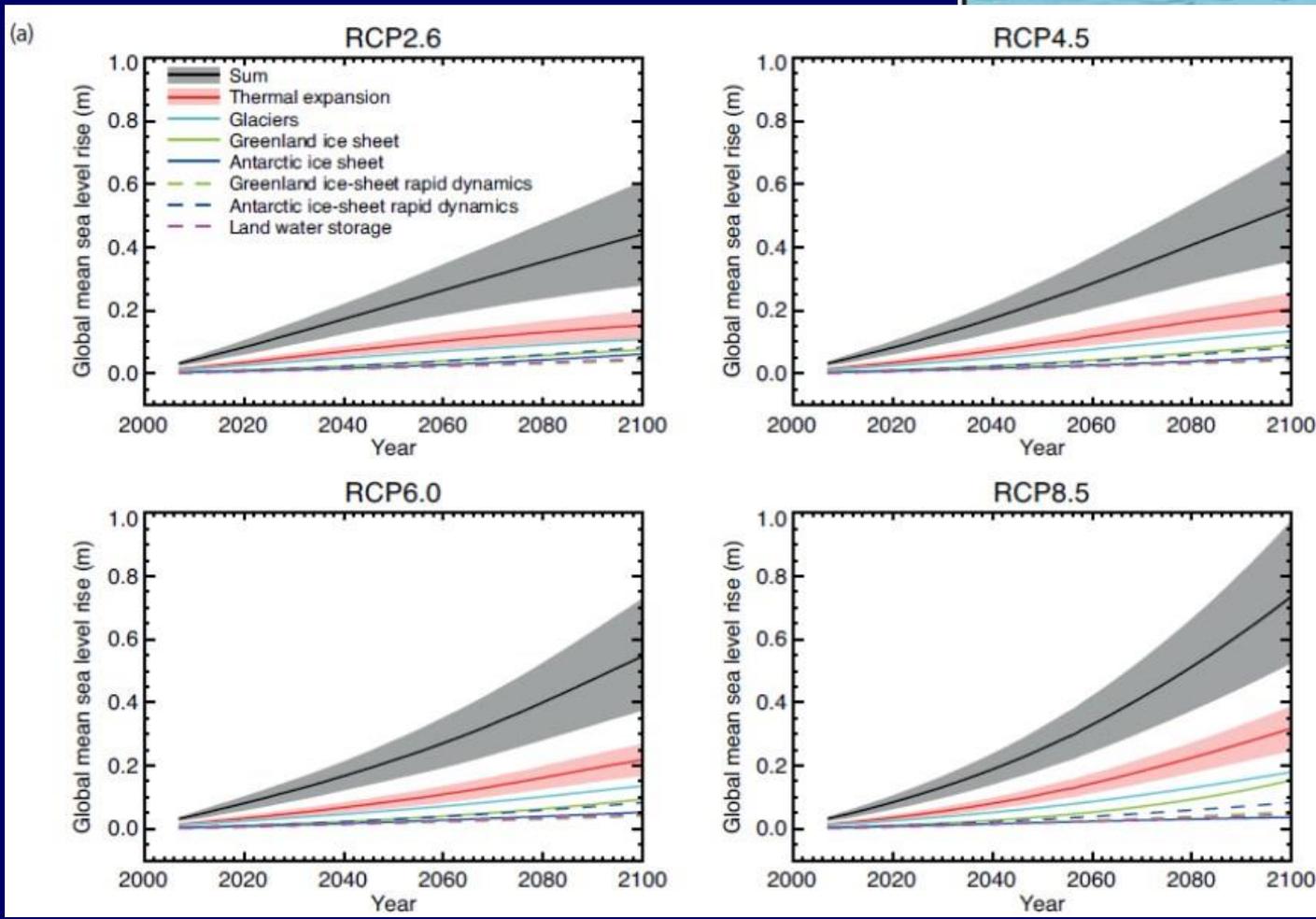
# Eustatske promjene razine mora

- Zaključuje se (IPCC AR5) da su dva glavna uzročnika eustatičkog porasta razine mora:
  - Termalna ekspanzija mora (najviše u sloju do 700 m dubine, a ukupan porast oko 1,1 mm/god)
  - Porast mase mora na račun kopnenog leda (taljenje leda od kopnenih ledenjaka, oko 0,76 mm/god, ledenih kapa – Grenland, oko 0,33 mm/god i Antarktičkog pokrova, oko 0,27 mm/god; sveukupno oko 1.36 mm/god)
  - Od značaja je i smanjenje pohrane vode na kopnu (oko 0,38 mm/god.; podatci za 1993-2012 )



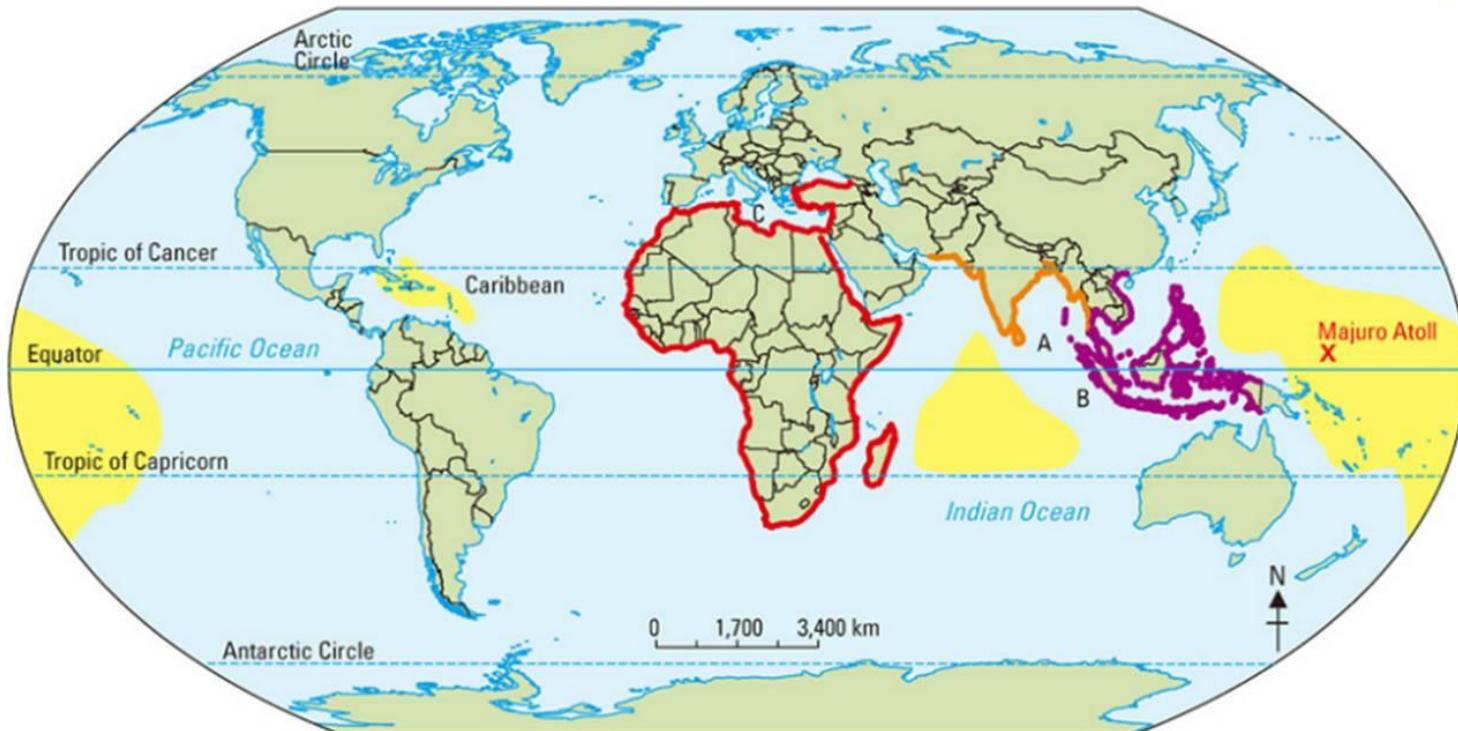
# Scenariji budućeg rasta

- IPCC AR5 izvještaj zaključuje da će more eustatski rasti i ubuduće, uz najgori scenarij (emisije stakleničkih plinova) do 2100 more će porasti gotovo 1 m (u odnosu na osnovicu 1986.-2005.), a uz najbolji scenarij (smanjenje emisije) 0,3 do 0.6 m



# Scenariji budućeg rasta

- ✦ Iako porast razine mora direktno utječe samo na obalna područja, to su najgušće naseljena i ekonomski najaktivnija područja na Zemlji



People at risk (millions per region)

<10 million

10 – 50 million

>50 million

Vulnerable island regions

# Scenariji budućeg rasta

- Štete od porasta razine mora od 1 m – zastarjelo ali pogledajmo realtivne podatke

Land (Jahr der Studie)	Betroffene Bevölkerung		Verlust an Kapitalwerten		Landverlust		Verlust an Feuchtbiotopen [Tsd. km <sup>2</sup> ]	Kosten <sup>1</sup> für zusätzlichen Küstenschutz	
	[Mio.]	Anteil <sup>2</sup> [%]	[Mrd. US-\$]	Anteil <sup>3</sup> [%]	[Tsd. km <sup>2</sup> ]	Anteil <sup>4</sup> [%]		[Mrd. US-\$]	Anteil <sup>3</sup> [%]
Bangladesch (1995)	71	60	–	–	25	17,5	5,8	>1	>0,06
Ägypten (1992)	4,7	9	59	204	5,8	1	–	13,1	0,45
Marshallinseln (1992) <sup>5</sup>	0,02	100	0,16	324	0,009	80	–	>0,36	>7,04
Niederlande (1991)	10	67	186	69	2,17	5,9	0,642	12,3	0,05
Polen (1992)	0,24	1	22	24	1,7	0,5	0,036	1,4	0,02
Tonga (1992) <sup>5</sup>	0,03	47	–	–	0,007	2,9	–	–	–
USA (1991)	–	–	–	–	31,6 <sup>6</sup>	0,3	17	>156	>0,03
Venezuela (1995)	0,056 <sup>7</sup>	<1	0,33 <sup>7</sup>	1	5,7	0,6	5,6	>1,6	>0,03

<sup>1</sup> für Maßnahmen außerhalb von Gebieten mit geringer Bevölkerungsdichte, Wertstellung für das Jahr 1990

<sup>2</sup> an der Gesamtbevölkerung

<sup>3</sup> am jährlichen Brutto sozialprodukt

<sup>4</sup> an der Gesamtfläche

<sup>5</sup> Minimalschätzung, unvollständige Daten für das gesamte Land

<sup>6</sup> Bestschätzung: 20000 km<sup>2</sup> Festland gehen verloren, aber ca. 5400 km<sup>2</sup> werden zu Küstenfeuchtbiotopen umgewandelt

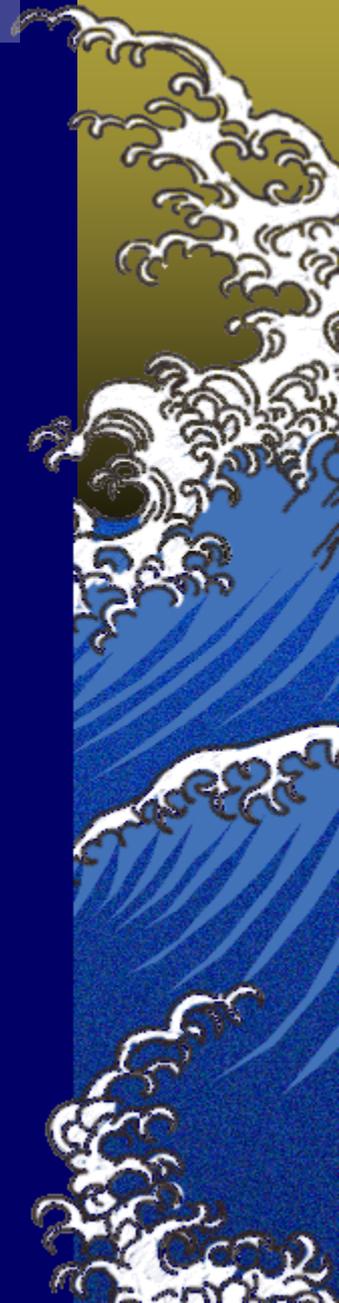
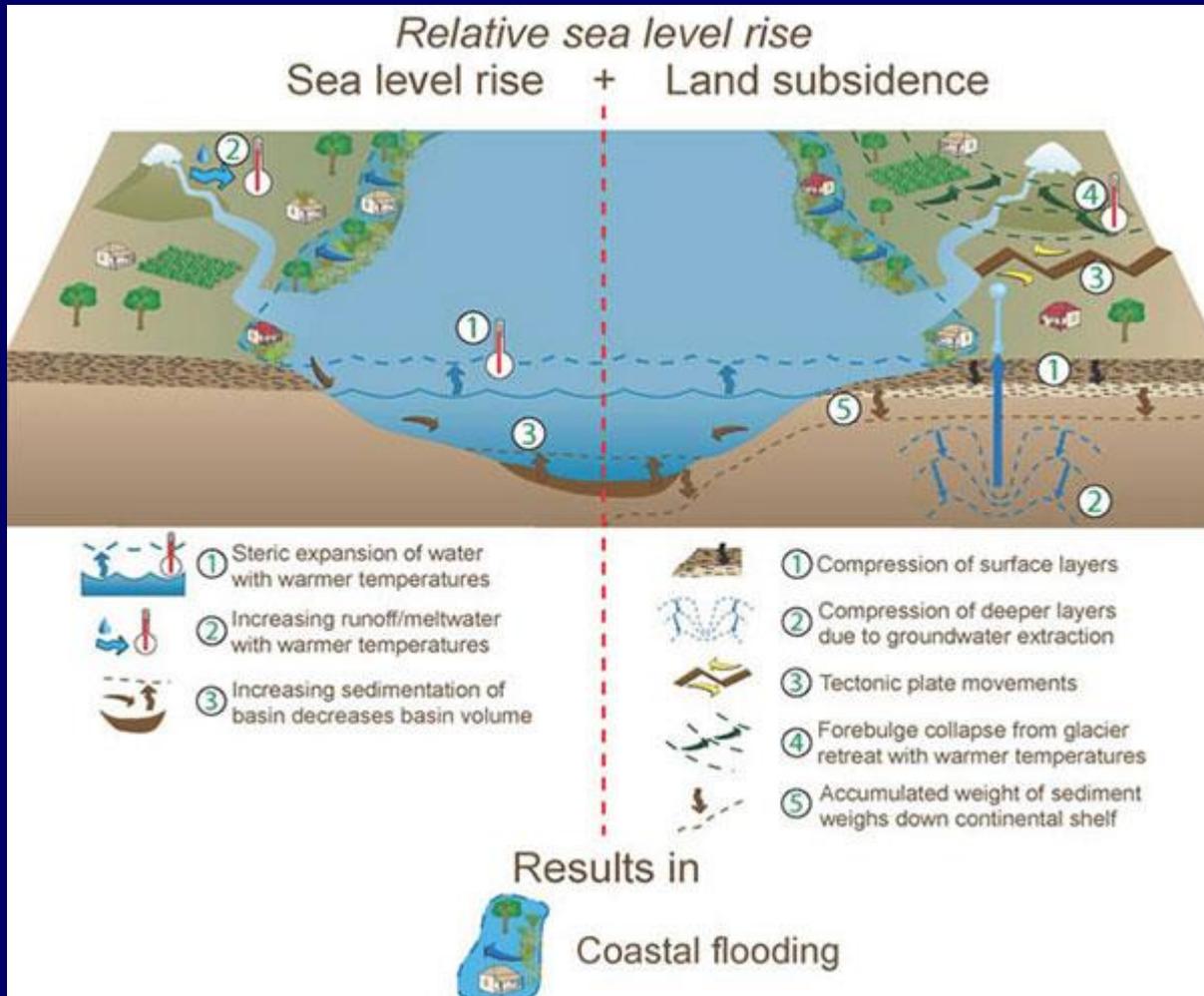
<sup>7</sup> Minimalschätzung

– keine Angaben

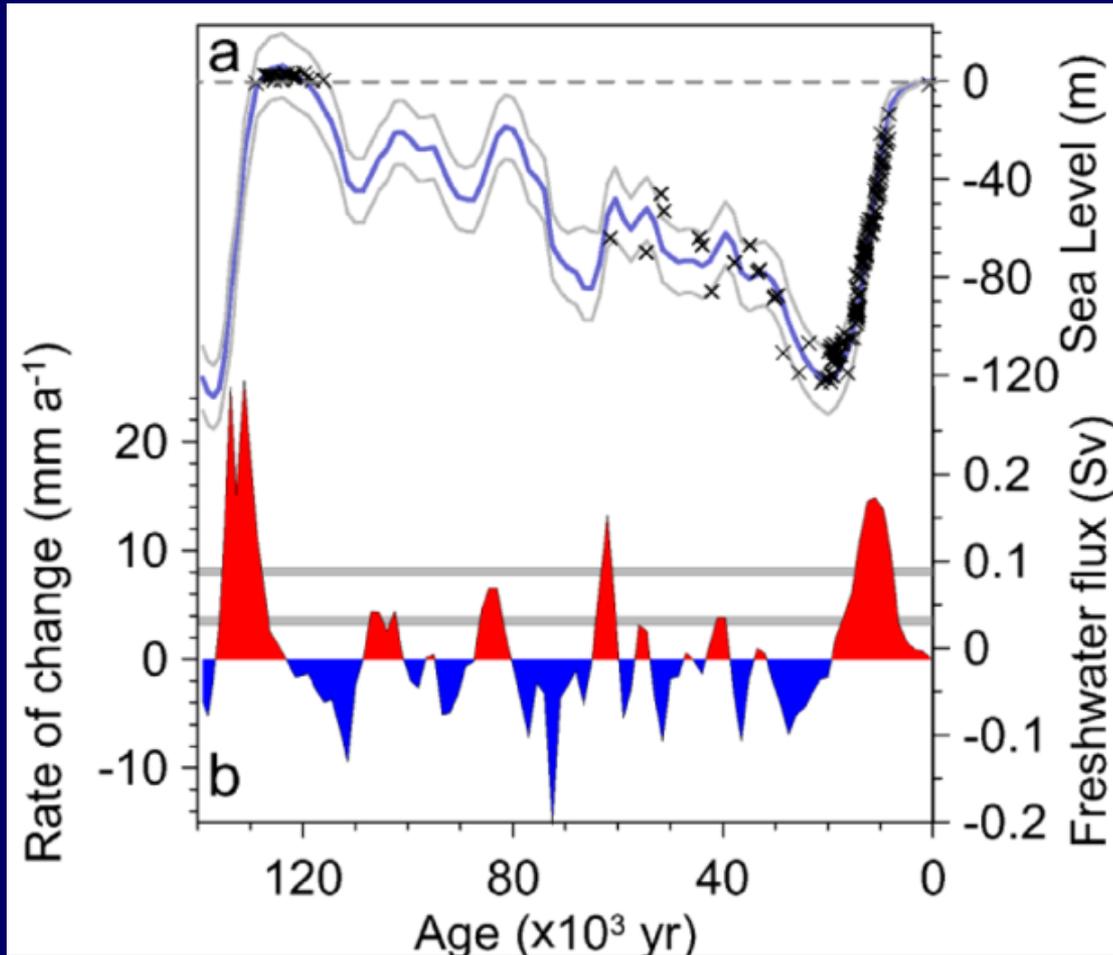
**Fig. 13** Fallbeispiele für die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs um 1 m in verschiedenen Ländern für den Fall, dass keine Gegenmaßnahmen getroffen werden (aus IPCC 1996b, Tab. 9–3)

# Scenariji budućeg rasta

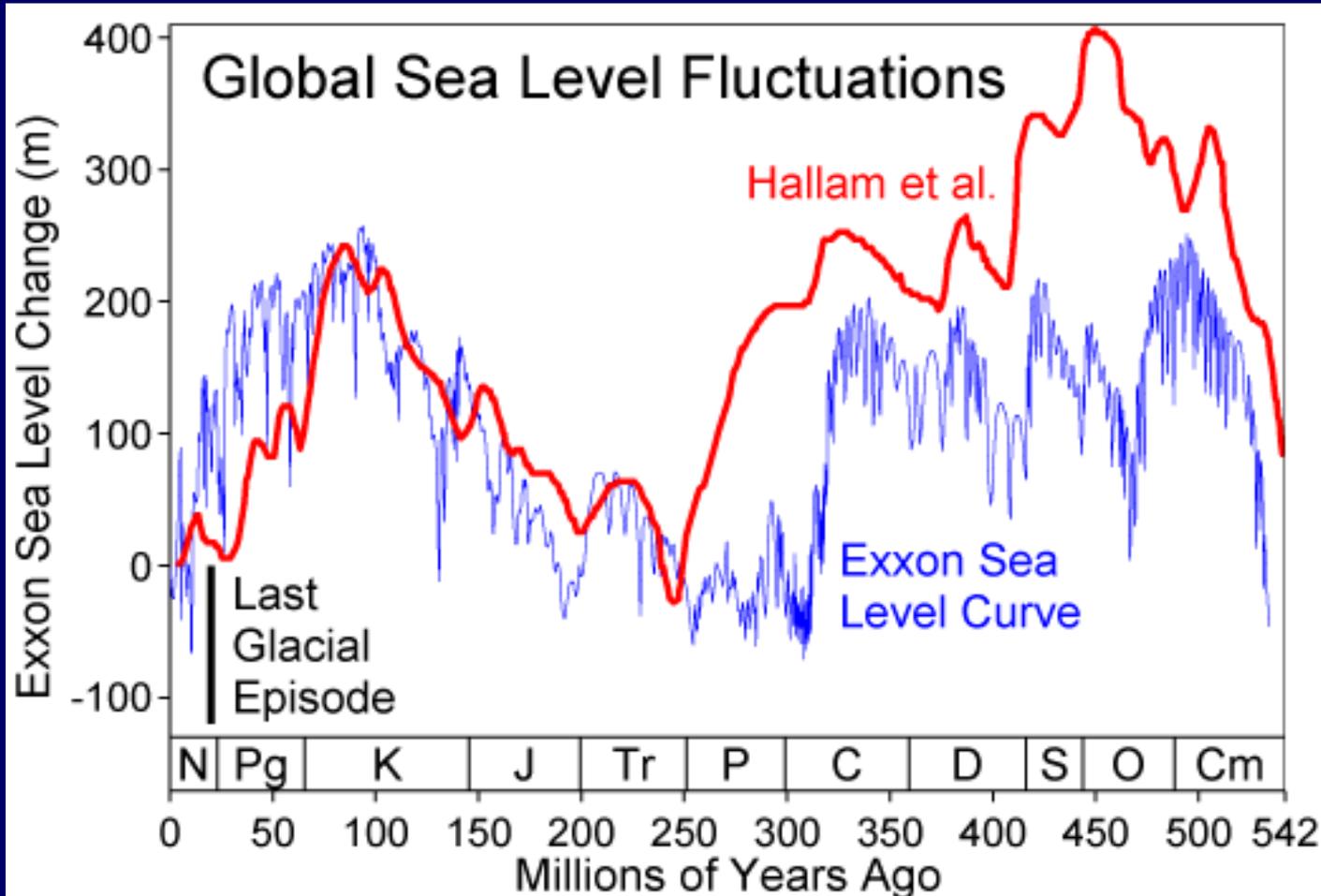
- Najveće štete su tamo gdje se očekuje spužtanje kopna, pa se eustatički učinci zbrajaju s lokalnom transgresijom



# Razina mora u geološkoj prošlosti



# Razina mora u geološkoj prošlosti



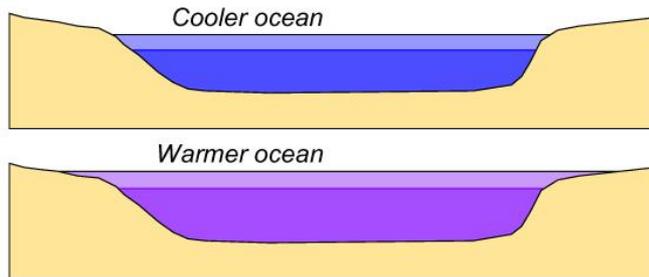
# Razina mora u geološkoj prošlosti

Railsback's *Some Fundamentals of Mineralogy and Geochemistry*

## Possible causes of sea-level change

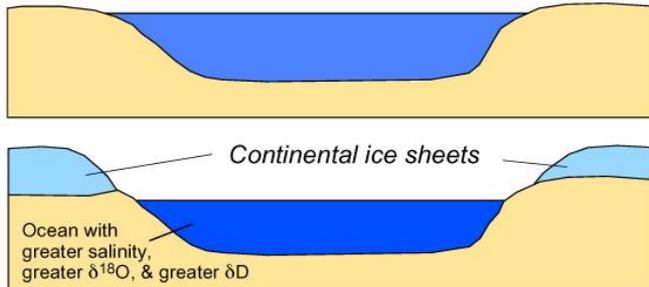
Sea level is known to have changed at geologic time scales. This page uses very schematic cartoons to present four possible causes, with emphasis on their different vertical and temporal scales.

### 1. Warming of ocean's water and thermal expansion



This causes SL change of **centimeters to meters**. Warming of water above the thermocline could be effected in a matter of years by mixing by waves and currents; warming of water below the thermocline requires circulation through the deep oceans and thus takes thousands of years.

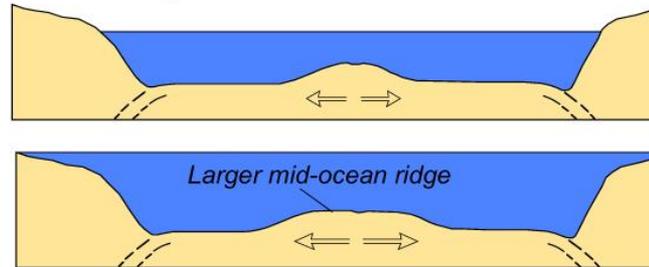
### 2. Storage of ocean's water as ice in ice sheets



This causes SL change of **tens of meters to 200 meters**. Growth of ice sheets typically takes tens of thousands of years to lower sea level, whereas melt-out and sea-level rise can occur over thousands of years. Note that only this mechanism changes the *amount* of  $\text{H}_2\text{O}$  in the oceans.

### 3. Changes in rate of sea-floor spreading

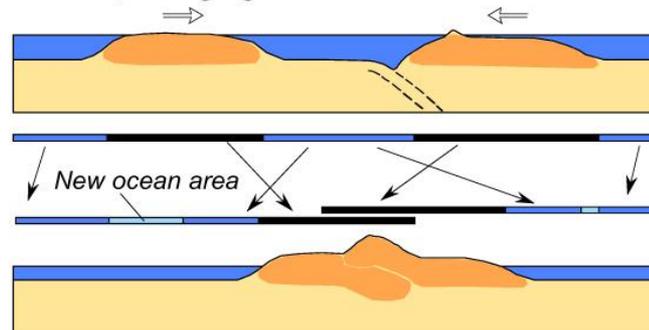
(More young, and thus hot, and thus expanded oceanic crust at MORs occupies more of the volume of the ocean basins)



This causes SL change of **hundreds of meters**. Correlation of lowering of sea level over the past tens of millions of years with slowing of seafloor spreading makes this model attractive.

### 4. Continent-continent collision

(Stacking of continental crust causes reduction of area of continents, leaving a greater oceanic area and thus volume)



This causes SL change of **hundreds of meters**. Correlation of lowering of sea level over the past tens of millions of years with Himalayan collision, and correlation of lower Late Paleozoic sea level with the assembly of Pangaea, make this an attractive model. In addition, it is possible that continent-continent collision could lessen the global rate of sea-floor spreading, so that Causes 3 and 4 could coincide.

Volume of water in the oceans changes  
Volume of the ocean basins changes