

# OPAZOVANJE IN MODELIRANJE PLIMOVANJA

*Geofizika v geodeziji*

*Oskar Sterle*

*2024/2025*

# Vsebina

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 1. Plimovanje oceanov in morij .....                    | 1  |
| 1. 1. Mareografska postaja .....                        | 1  |
| 1. 1. 1. Izgradnja mareografa .....                     | 1  |
| 1. 1. 2. Vrste mareografov .....                        | 2  |
| 1. 1. 3. Geodetska opazovanja v okviru mareografa ..... | 3  |
| 1. 1. 4. Mareografska postaja Koper .....               | 4  |
| 1. 2. Osnovna terminologija .....                       | 5  |
| 1. 3. Plimne komponente .....                           | 6  |
| 1. 4. Mareografska opazovanja (postaja Koper) .....     | 8  |
| 1. 5. Vpliv plimovanja oceanov na površje Zemlje .....  | 12 |
| 2. Plimovanje trdne Zemlje .....                        | 13 |
| 3. Plimovanje atmosfere .....                           | 15 |

# 1. Plimovanje oceanov in morij

Vpliv plimovanja je **najbolj očiten** (in tudi opazovan) na **primeru oceanov/morij**, saj je plimovanje vidno tudi prostim očem. Po drugi strani, pa je **plimovanje trdne Zemlje** in **atmosfere** možno zaznati le posredno preko različnih **opazovanj**, v primeru plimovanja trdne Zemlje so to gravimetrična opazovanja ali satelitska opazovanja (GNSS, LLR, SLR, VLBI), v primeru atmosferskega plimovanja pa tudi zračni tlak, temperatura zraka, hitrost vetra itd.

Višino morske gladine opazujemo z **mareografi**. Prvi mareografi so bili postavljeni konec 17. stoletja v glavnih francoskih pristaniščih, kot posledica opazovanj višine morske gladine v Brestu (Francija). Zgodaj so začeli opazovati višino morske gladine tudi v Amsterdamu (Nizozemska), Liverpoolu (Anglija), Stockholmu (Švedska).

Za čas in teritorij Avstro-Ogrske so prvi mareograf postavili v Trstu leta 1854, kasneje tudi na Reki (1860) in v Puli (1868). Med obema svetovnima vojnama, sta bila vzpostavljena tudi mareografa v Bakarju in Splitu (1929). Po 2. svetovni vojni, v 50-ih letih prejšnjega stoletja, so bili postavljeni mareografi tudi v Kopru, Rovinju, Splitu in Dubrovniku.

V Sloveniji smo vzpostavili novo mareografsko postajo v Kopru leta 2005/2006.

## 1. 1. Mareografska postaja

**Mareografska postaja** ali **mareograf** je inštrument, s katerim merimo **višino morske gladine glede na datum mareografa**. Da lahko opazovane višine morske gladine dobijo smisel, je potrebno:

- ustrezno stabilizirati mareograf na ustrezni lokaciji in
- opazovanja povezati s telesom Zemljo z geodetskimi opazovanji: satelitskimi (GNSS), gravimetričnimi, nivelmanskimi in terestričnimi.

### 1. 1. 1. Izgradnja mareografa

Kriteriji, ki ji moramo upoštevati pri izbiri lokacije in načina stabilizacije mareografa, se nanašajo tudi na vrsto mareografa. Ne glede na vrsto mareografa, pa je potrebno upoštevati:

- Lokacija mora biti geološko stabilna – najboljša izbira je čvrsta skala. Lokacija ne sme biti podvržena lokalnim premikom, posedanjem, drsenju itd. Na lokaciji ne sme biti vpliva nalivev.
- Izogibati se je potrebno tudi izlivom rek in potokov v morje. Tok reke in spremembe slanosti, temperature morja vplivajo na višino morske gladine.
- Voda naj bo globoka za vsaj 2 metra več, kot je najnižja pričakovana plima. Cev mareografa mora biti locirana vsaj 1 meter nad morskim dnom. Izogibati se je potrebno plitvemu morskemu dnu.
- Lokacija in predvsem stabilizacija mora biti taka, da lahko vzdrži največja neurja in nalive, ki se dogajajo na morju.
- Lokacija naj bo enostavno dostopna, zagotoviti pa je potrebno vso ustrezno infrastrukturo – električno in telekomunikacijsko.

V realnosti je težko zagotoviti popolno lokacijo in stabilizacijo, saj je potrebno upoštevati tudi človeški faktor in pravne režime ter lastnosti obmorskih zemljišč.

### 1. 1. 2. Vrste mareografov

Mareografe lahko ločimo glede na to ali:

- beležijo višino morske gladine ali
- pa višine morske gladine NE beležijo.

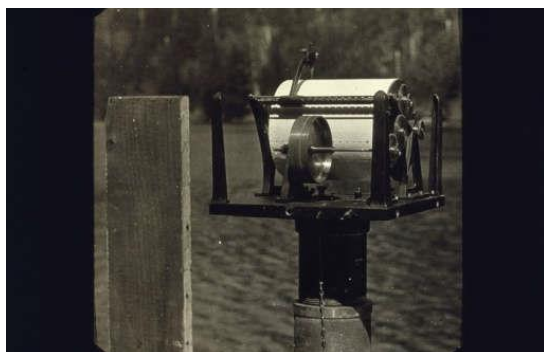
Glede na konstrukcijo, pa mareografe ločimo na:

- mehanske,
- tlačne,
- akustične
- radarske.



*Slika 1: Stari mareograf v Kopru, ki je imel tudi razdelbo, kjer je bilo čitanje ročno*

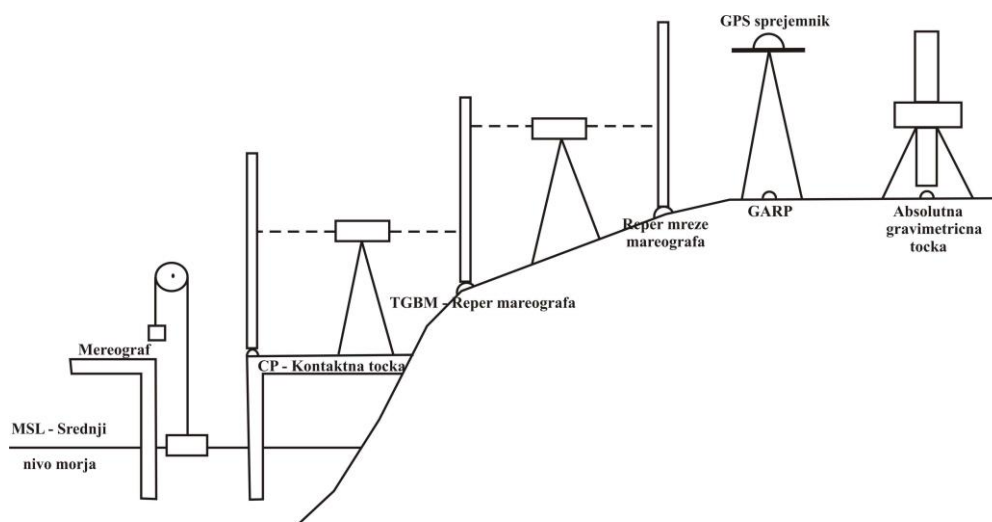
Kar se tiče beleženja višine morske vode, pa je to beleženje lahko mehansko (na bobne), ali pa digitalno.



*Slika 2: Primeri treh mareografov, prva dva sta mehanska, zadnji je radarski. Beleženje prvih dveh je analogno na boben, medtem ko se vrednosti pri zadnjem beležijo digitalno.*

Ne glede na vrsto mareografa, pa vsi mareografi delajo popolnoma isto – merijo višino morske gladine glede na datum mareografa. Z geodetskega stališča so na ali v okolici mareografa pomembne tri točke:

- **Kontaktna točka mareografa:** reper oziroma ustrezna višinska točka, na katero je možno navezati mareografska opazovanja.
- **Reper mareografske postaje:** je najpomembnejši reper in predstavlja izhodišče za navezavo mareografskih opazovanj na višinski referenčni sistem. Priporoča se, da so v okolici mareografa vsaj štirje taki repreji (nadštevilnost).
- **Referenčna točka GNSS:** geodetska točka GNSS, ki izpolnjuje vse kriterije za najnatančnejšo izmero z GNSS. Referenčna točka GNSS poveže mareografska opazovanja z globalnimi terestričnimi referenčnimi sistemi.



Slika 3: Shema mareografske postaje in karakteristične geodetske točke.

### 1. 1. 3. Geodetska opazovanja v okviru mareografa

Da lahko **mareografska opazovanja** – višine morske gladine skozi čas – **dobijo smisel**, jih je potrebno **umestiti glede na Zemljo** (težnostno – fizikalno polje) in glede na **terestrične referenčne sisteme** (geometrični prostor). To lahko dosežemo tako, da na mareografski postaji izvajamo več vrst geodetskih meritev.

#### Geometrični nivelman:

Z geometričnim nivelmanom **povežemo kontaktno točko mareografa z reperjem mareografske postaje** in nato obe višinski točki z **državnim višinskim sistemom** (nivelmanska opazovanja vključimo v nivelman visoke natančnosti). S tem lahko mareografska opazovanja, predvsem **izračun srednje morske gladine, zagotovi višinski datum višinskega sistema**. Po drugi strani, z nivelmanskimi opazovanji lahko zaznamo **višinske premike mareografa glede na kopno** (višinsko mrežo).

#### Gravimetrična opazovanja:

Gravimetrična opazovanja izvajamo periodično na mareografu, s čimer lahko zagotovimo **višinsko stabilnost mareografa glede na težnostno polje Zemlje**. Po drugi strani pa z gravimetričnimi opazovanji ploskev geoida (ki ga dobimo iz gravimetričnih opazovanj) povežemo s karakterističnimi točkami mareografa.

#### Opazovanja GNSS:

Opazovanja GNSS na mareografski postaji izvajamo zato, da **karakteristične točke mareografa določimo tudi v okviru terrestričnih referenčnih sistemov** – zagotovimo geometrično lokacijo glede na referenčni elipsoid. V večini primerov so na mareografih (ali v bližini) vzpostavljene stalno delujoče postaje GNSS, kjer se na osnovi časovnih vrst koordinat točke GNSS spremlja stabilnost mareografske postaje.

#### Terestrična opazovanja:

V okolici mareografske postaje se priporoča vzpostaviti niz geodetskih točk, na katerih preko terrestričnih opazovanj (smeri, prostorske dolžine in zenitne razdalje) ugotavljamo **lokalno stabilnost mareografa**.

Izvajanje številni vrst geodetskih opazovanj je nujno zato, da zagotovimo, da so **karakteristične točke mareografa stabilne geodetske točke** ali pa da **njihov premik poznamo z visoko natančnostjo**. Po

drugi strani pa z raznovrstnimi opazovanji lahko določimo tudi, ali se premika mareograf, morska gladina, ali pa se spreminja geoid (npr. post-glacialno dviganje površja povzroča tudi dvig ploskve geoida).

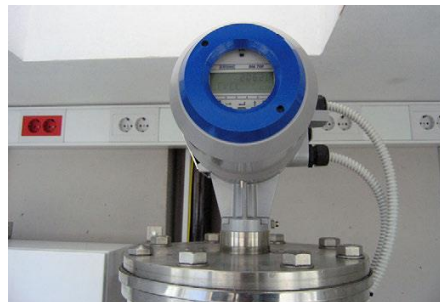
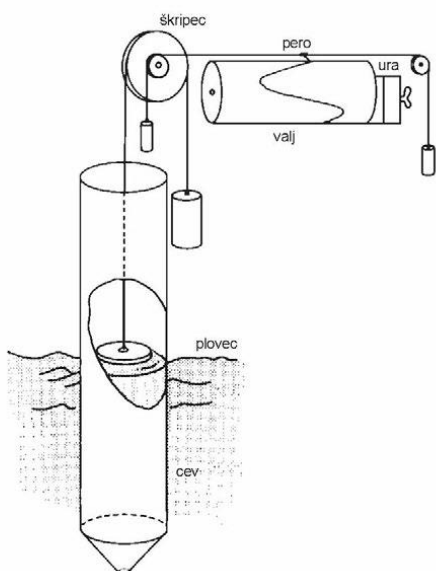
#### 1. 1. 4. Mareografska postaja Koper

Mareografska postaja Koper je bila izgrajena leta 1953, nova mareografska postaja v Kopru pa leta 2006.



Slika 4: Stara (levo) in nova (desno) mareografska postaja v Kopru.

V okviru starega mareografa (mehanski mareograf) so se opazovanja beležila analogno na boben, medtem ko se pri novem mareografu beležijo digitalno.



Slika 5: Princip delovanja starega (levo) in obeh novih mareografov (desno), zgoraj radarski, spodaj s plovcem

## 1. 2. Osnovna terminologija

**Plimovanje (bibavica) morske gladine** predstavlja dvigovanje in spuščanje morske gladine (višinska komponenta), kjer je **plima** najvišja gladina in **oseka** najnižja gladina. Plimovanje poganjajo **plimni tokovi**, ki predstavljajo horizontalno gibanje vode zaradi plimovanja.

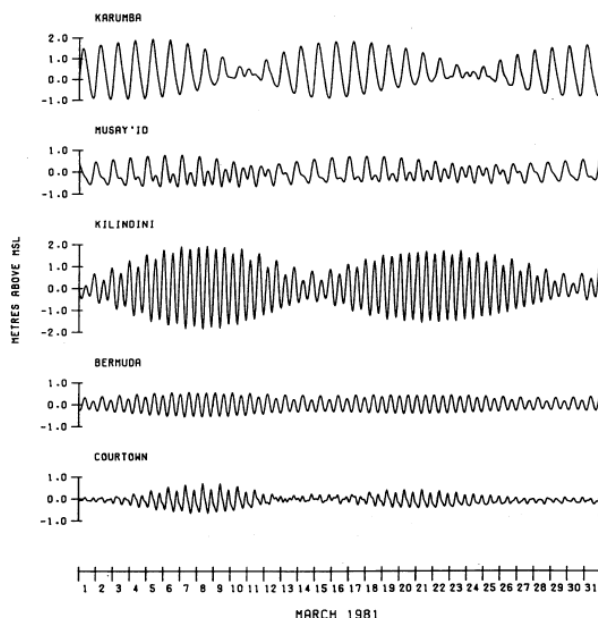
V času plime zabeležimo ti. **visoko vodo (VV)**, v času oseke pa **nizko vodo (NV)**. Če imamo dve visoki vodi, je ena **višja visoka voda (VVV)**, druga **nižja visoka voda (NVV)**, enako pa velja tudi za nizke vode, imamo **višjo nizko vodo (VNV)** in **nižjo nizko vodo (NNV)**. Razlika med visoko in nizko vodo v dnevu je **razpon plime**. Lahko znaša od smo nekaj mm do več kot 10 m.

**Perioda plime** predstavlja čas med dvema visokima vodama. Največkrat je 12 h 25 min, kar predstavlja polovico **luninega dne**. Nekje znaša tudi 24 h 50 min, kar pomeni cel lunin dan.

**Največje plimovanje** pričakujemo v času ti. *živih morskih men*, to je takrat, ko je polna (ščip) ali prazna (mlaj) Luna. Geometrično to pomeni da so **Sonce, Luna in Zemlja v liniji**. Kadar pa je prvi ali zadnji krajec Lune, pa bo **plimovanje najmanjše**, to je v času ti. *mrtvih morskih men*. Takrat sta **Sonce in Luna glede na Zemljo pod 90°**. Velikost plimovanja pa je odvisna tudi od deklinacije Sonca in Lune glede na ekvator – to je kako visoko sta Luna in Sonce nad ekvatorjem.

Poznamo **tri vrste plimovanja**, in sicer:

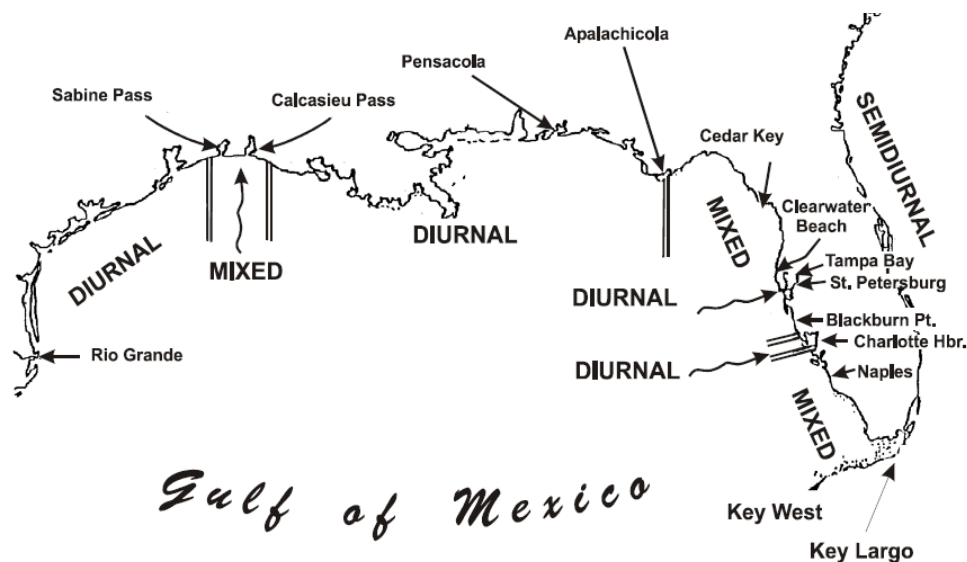
- *poldnevno plimovanje* – dve visoki in dve nizki vodi na dan,
- *dnevno plimovanje* – ena visoka in ena nizka voda na dan in
- *mešano plimovanje* – dve visoki in dve nizki vodi na dan, a sta tako visoki kot nizki vodi med seboj različni.



Slika 6: Primeri plimovanja petih mareografov: prve tri v Indijskem oceanu (dnevni, mešan in poldnevni režim), četrta v severnem Atlantiku (poldnevni režim z močnim vplivom vremena) in primeri vpliva plitve vode na plimovanje (peti primer) (vir: IOC Manuals and guides 14: Manual on sea level measurements and interpretation, Volume I Basic Procedures).

Iz slike 6 vidimo, da se plimovanje obnaša zelo drugače pri različnih točkah. To pomeni, da se vzrok plimovanja – plimna sila – popolnoma drugače lahko manifestira v višini morske gladine v odvisnosti od lokacije. Isto prikazuje slika 7.





Slika 7: Plimni režimi v Mehikanskem zalivu (vir: IOC Manuals and guides 14: Manual on sea level measurements and interpretation, Volume I Basic Procedures).

### 1. 3. Plimne komponente

V poglavju o *Fizikalnih osnovah plimovanja*, smo videli, da **plimovanje poganja plimna sila** (razlika med gravitacijsko silo Sonca in Lune ter centrifugalno silo pri kroženju), kjer smo izpeljavo prikazali v okviru **teorije ravnovesja**. Plimovanje se lahko predstavi tudi preko **plimnega potenciala**, ki smo ga razvili v **potenčno vrsto** (preko Legendrovih polinomov). Vsak člen določa eno ti. **plimno komponento** (angl. »tidal constituent«).

Vsaka plimna komponenta se lahko predstavi v obliki:

$$h_i(t) = A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) = a_i \cos(\omega_i t) + b_i \sin(\omega_i t) \quad (1)$$

V enačbi ( 1 )  $h_i(t)$  predstavlja višino vode zaradi  $i$ -te plimne komponente v nekem trenutku  $t$ ,  $A_i$  amplitudo valovanja,  $\omega_i$  kotno hitrost valovanja (določa periodo cikla) in  $\phi_i$  začetno fazo (fazni zamik). **Vsaka plimna komponenta** ima v ozadju tudi **fizikalno pojasnitev**. Parametre ( $A_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\phi_i$ ) pa se dobi na osnovi mareografskih opazovanj, kjer se po metodi najmanjših kvadratov opazovano višino morske gladine parametrizira s večimi plimnimi komponentami iz enačbe ( 1 ).

**Osnovne tri plimne periode**, ki izhajajo iz osnovnega fizikalnega modela Sonce-Zemlja-Luna:

- Rotacija Zemlje okoli lastne osi določa **sončni dan** in **zvezdni dan**,
- Kroženje Lune okoli Zemlje določa **(lunin) mesec (29,5 dni)** in
- Kroženje Zemlje okoli Sonca določa **leto (365,24 dni)**.

**Tirnici** Zemlje okoli Sonca in Lune okoli Zemlje sta **elipsi** (ne krožnici!):

- Zemlja – Sonce: ekscentriciteta elipse je  $e = 0,01674$ , zato se (zaradi spremembe oddaljenosti) spreminja plimovanje z amplitudo enega leta in
- Luna – Zemlja: ekscentriciteto elipse  $e = 0,055$  zato se (zaradi spremembe oddaljenosti) spreminja plimovanje z amplitudo enega luninega meseca.

**Elipsa tirnice Lune** (ko kroži okoli Zemlje) **počasi rotira** in naredi **en obhod v 8,85 letih**, kar predstavlja še eno periodo pri opisu plimovanja.



Elipsa tirnice Lune je nagnjena glede na ekliptiko (okoli  $5^{\circ}9'$ ), ekvatorska ravnina pa je nagnjena glede na ekliptiko (okoli  $23^{\circ}27'$ ). Položaja Sonca in Lune se tako spreminjata – višina nad ekvatorjem. Periodi sta **eno leto** in en **lunin mesec**. To pojasni različni vrednosti visokih (in nizkih) voda pri pol dnevnem plimovanju.

Vpliv Sonca na tirnico Lune je, da **povzroča perturbacije – premikanje tirnice Lune (precesijo tirnice)** s periodo 18,6 let, kar predstavlja še eno periodo pri opisovanju plimovanja.

V **enem luninem mesecu** se bo Luna dvakrat postavila na **linijo Zemlja-Sonce** (polna luna – ščip in prazna luna – mlaj) in dvakrat v pozicijo, »**polovične**« **Lune** (prvi in zadnji krajec). Ta sprememba geometrije Sonce-Zemlja-Luna povzroča spremembo velikosti plimovanja s periodo 14 dni.

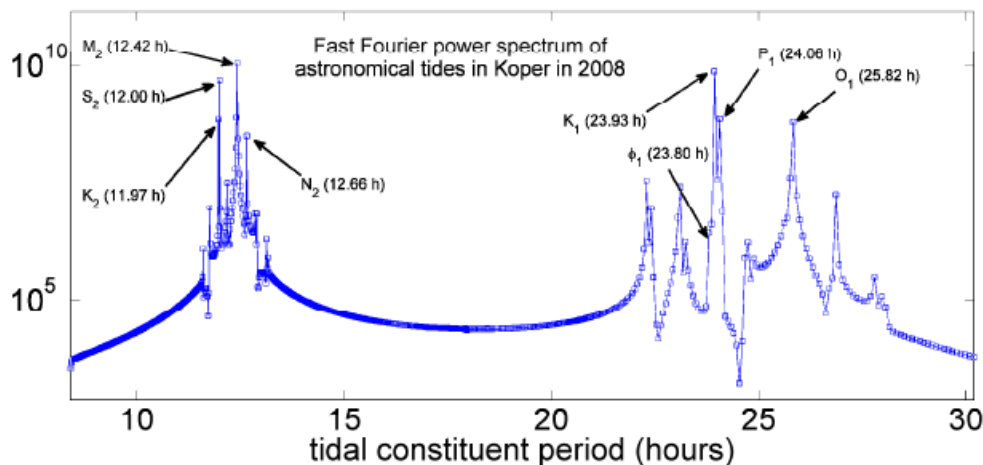
**Opis plime preko plimnih komponent** pomeni, da seštejemo doprinose posameznih komponent, ki so podana z amplitudo, periodo in faznim zamikom, v skupno – opazovano – plimovanje. Plimne komponente so označene z:

- veliko črko, ki opredeli vrsto komponente (npr.  $M$  za Luno,  $S$  za Sonce)
- indeksom, ki opredeli število period/vrhov (npr. 1 za dnevno periodo, 2 za poldnevno periodo).

S tem lahko zapišemo osnovne astronomske komponente (npr.  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ) , a ker obstaja že več kot 1000 komponent, ostale nimajo tako jasnega pomena. Glavne komponente plimovanja so:

- Poldnevne komponente:
  - $M_2$  – perioda 12,421 h – relativna amplituda 100 – *glavna lunina poldnevna komponenta*
  - $S_2$  – perioda 12,000 h – relativna amplituda 47 – *glavna sončeva poldnevna komponenta*
  - $N_2$  – perioda 12,658 h – relativna amplituda 19 – *lunina eliptična poldnevna komponenta*
  - $K_2$  – perioda 11,967 h – relativna amplituda 13 – *lunisolarna poldnevna komponenta*
- Dnevne komponente:
  - $K_1$  – perioda 23,934 h – relativna amplituda 58 – *lunisolarna dneva komponenta*
  - $O_1$  – perioda 25,819 h – relativna amplituda 42 – *glavna lunina dnevna komponenta*
  - $P_1$  – perioda 24,066 h – relativna amplituda 19 – *glavna sončeva dnevna komponenta*
  - $Q_1$  – perioda 24.000 h – relativna amplituda 8 – *glavna lunarna eliptična komponenta*
- Dolgo periodne komponente:
  - $M_f$  – perioda 13.661 dni – relativna amplituda 17 – *lunarna štiritedenska komponenta*
  - $M_m$  – perioda 27.555 dni – relativna amplituda 9 – *lunina mesečna komponenta*
  - $M_{sa}$  – perioda 0,5 let – relativna amplituda 8 – *sončeva polletna komponenta*

Kako lahko vidimo plimne komponente? Uporabimo opazovanja na mareografu in naredimo spektralno analizo s Fourierjevo transformacijo. Na primeru opazovanih višin morske gladine mareografa Koper je spektralna analiza plimovanja prikazana na sliki 8.



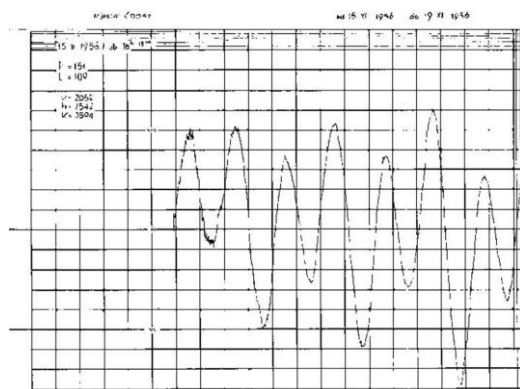
Slika 8: Spektralna analiza plimovanja na mareografski postaji Koper (vir: Ličer, M., Žagar, D., Jeromel, M., Jerman, J. 2006. Modeliranje vodostaja morja z metodo nevronske mreže na primeru neurne vala tržaškega zaliva decembra 2008, ACTA hydrotechnica. <https://actahydrotechnica.fgg.uni-lj.si/paper/a41ml.pdf>).

Z izračunom plimnih komponent iz opazovanj plimovanja lahko napovedujemo plimo v prihodnosti. Uporaba glavnih astronomskih komponent predstavlja večji del, plimovanje lahko napovemo do 10% točno. V splošnem se uporabi okoli 30 komponent za napovedovanja za kakšno leto v naprej v okolici pristanišč in luk in več kot 60 komponent v primeru, ko je mareograf lociran v bližini izlivov rek in ob vplivu morskega dna in obale na valovanje.

Kako pridemo do ostalih plimnih komponent? Hidrodinamična analiza, ki vključuje oblikovanje in sestava morskega dna, izlive rek in potokov, slanosti, gostote in temperature morske vode, splošno gibanje morske vode (tokovi), geodetske lokacije itd. ter spektralna analiza.

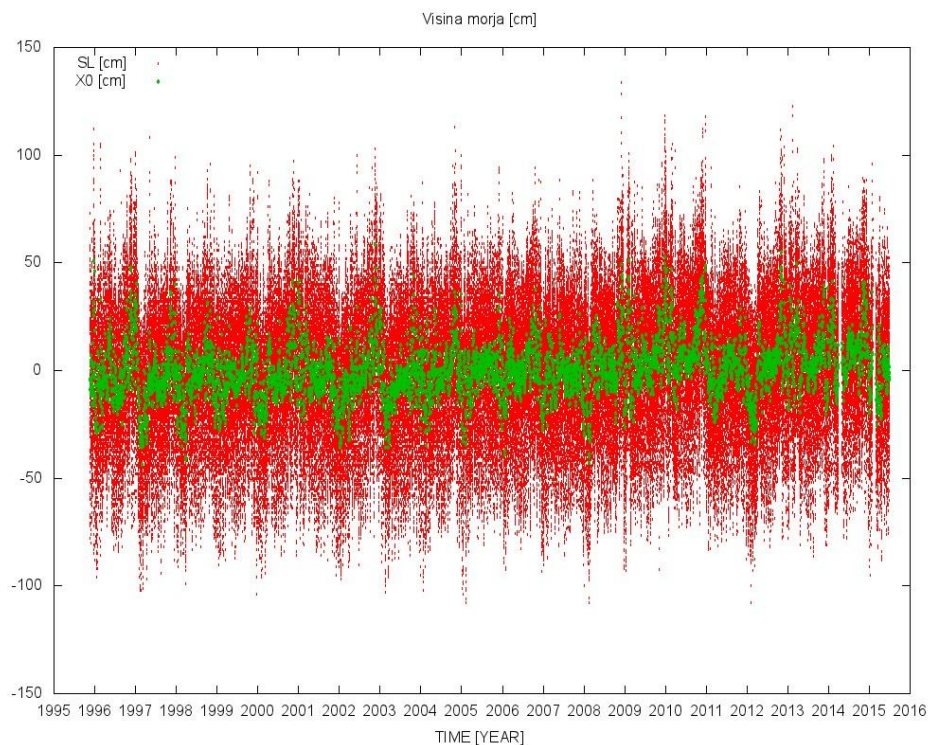
#### 1. 4. Mareografska opazovanja (postaja Koper)

Nova mareografska postaja v Kopru je bila izgrajena na lokaciji stare postaje, a tako, da smo lahko povezali izmerjene višine morske gladine starega mareografa z novimi izmerjenimi vrednostmi. Na ta način imamo opazovane višine morske gladine od 1953 leta do 2006 starega mareografa in opazovanja novega mareografa od 2006 naprej.



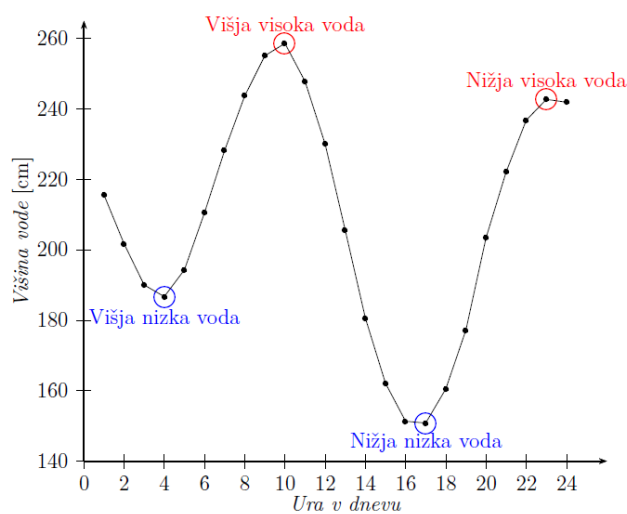
Slika 9: Primer zapisa višine morske gladine na list bobna (analogno) starega mareografa

Opazovanja na mareografski postaji so podana na vsako uro, za obdobje od 19. 11. 1995 do 30. 6. 2015 so prikazana na sliki 10.



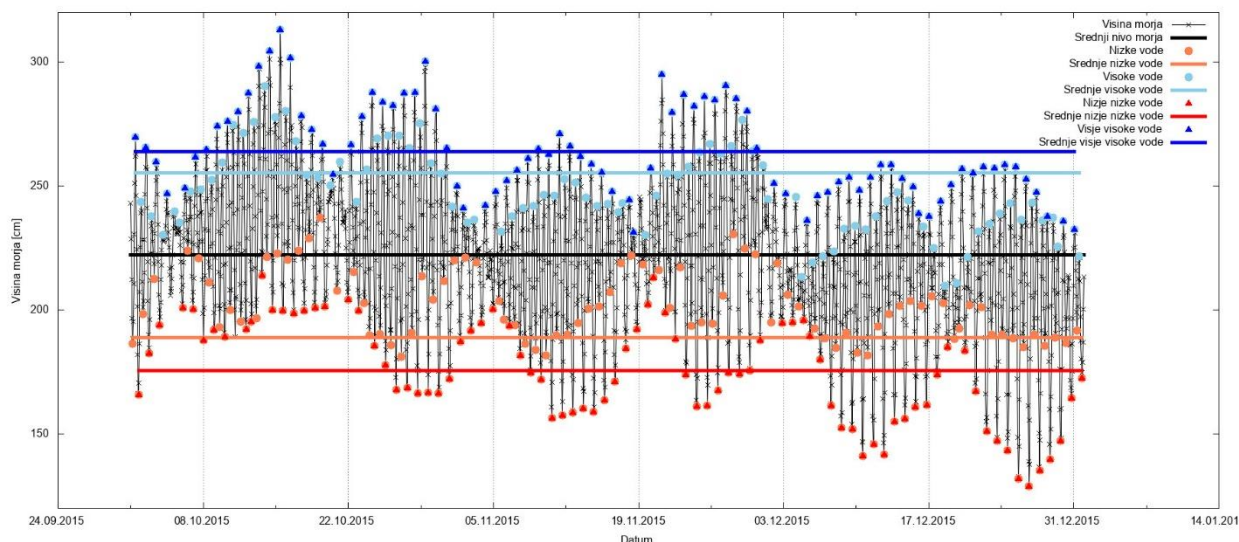
Slika 10: Izmerjena višina morske vode na mareografski postaji Koper za obdobje 18,6 let

Opazovana višina morske gladine v enem dnevu pa je prikazana na sliki 11. Vidi se, da sta v Kopru dve visoki vodi in dve nizki vodi čez dan. Visoki vodi nista enako visoki in nizki vodi nista enako nizki, kar pomeni, da je v severnem Jadranu mešan režim plimovanja.



Slika 11: Prikaz višine morske gladine na MP Koper za dan 11. 12. 2015

Za obdobje treh mesecev (oktobra, novembra in decembra) leta 2015 pa višino morske gladine na mareografski postaji Koper prikazuje slika 12. Na sliki se vidi vpliv geometrije Lune in Sonca na višino morske gladine.



Slika 12: Prikaz višine morske gladine na MP Koper za dan oktobra, novembra in decembra 2015

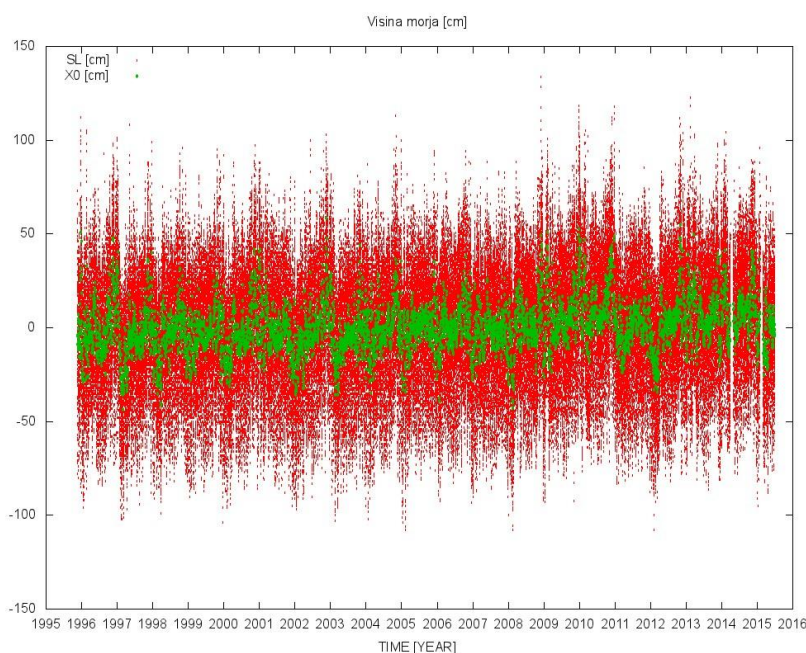
Mareografska opazovanja lahko v prvi vrsti uporabimo za **izračun srednje gladine morske vode**, s čimer definiramo **višinski datum** višinskega referenčnega sistema. V to točko je pripet geoid.

Izračun višinskega datuma lahko naredimo na različne načine, uporabimo pa opazovanja za obdobje 18,6 let (perioda precesije lunine tirnice):

- aritmetična sredina vseh izmerjenih višin morske gladine,
- prvo odstranimo 37-plimnih komponent in nato izračunamo aritmetično sredino in
- z uporabo ti. X0 filtra, ki ima obliko:

$$X_T = \frac{1}{30} \sum_{t=-19}^{19} F(t)h(T+t) \quad t \neq 0 \quad (2)$$

Kjer je  $F(t) = [2,1,1,2,0,1,1,0,2,0,1,1,0,1,0,0,1,0,1]$ ,  $h(T+t)$  odčitek višine morske gladine v trenutku  $T+t$  in  $T$  referenčni trenutek, za katerega računamo popravljen/reduciran odčitek. Z X0 filtrom odstranimo dnevno energijo plimovanja in vplive višjih frekvenc plimovanja.



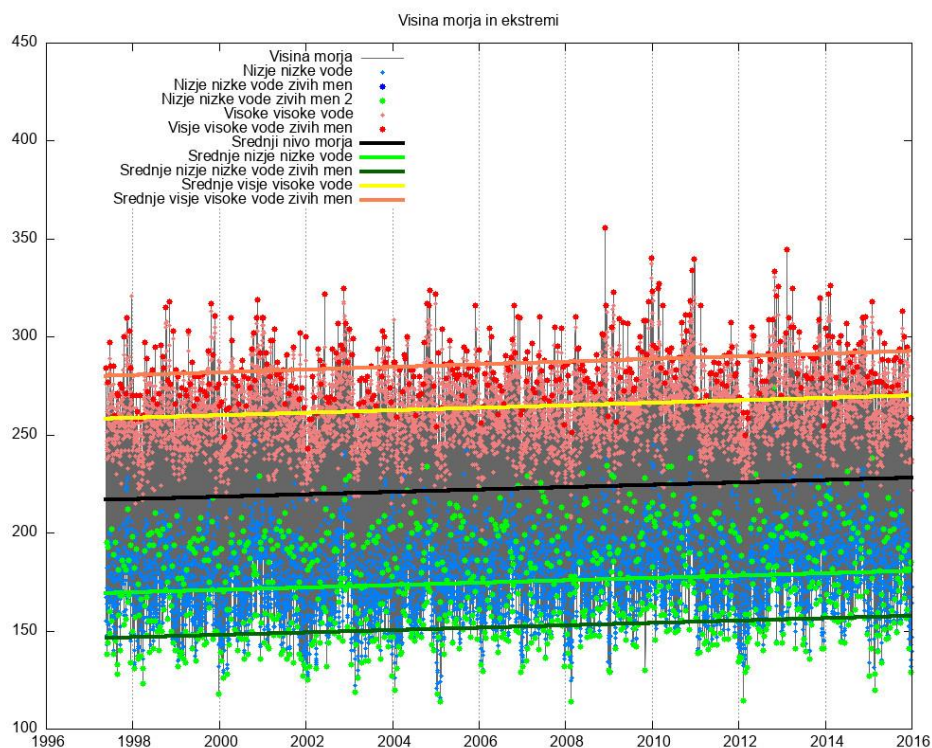
Slika 13: Izmerjena višina morske vode na mareografski postaji Koper za obdobje 18,6 let in izračunane vrednosti s X0 filtrom



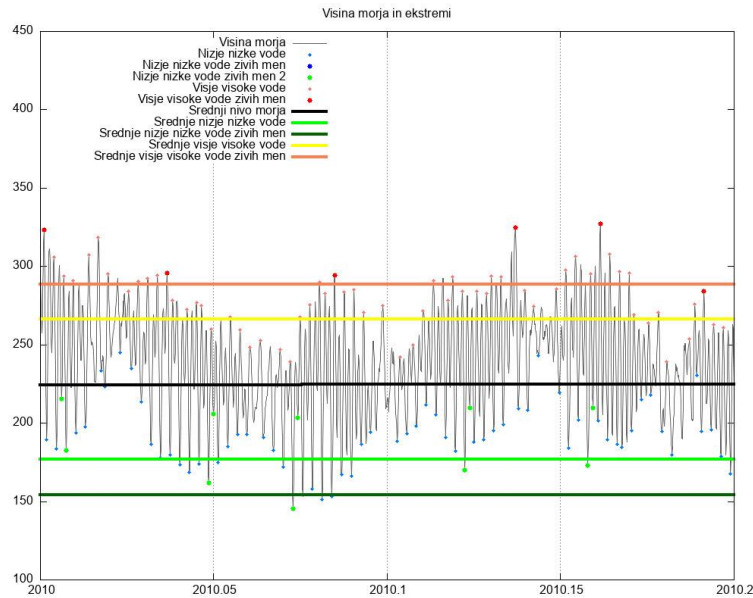
Iz opazovanj višine morske gladine lahko izračunamo tudi:

- srednje nizke vode
- srednje nižje nizke vode
- srednje nižje nizke vode živih morskih men
- srednje visoke vode
- srednje višje visoke vode in
- srednje visoke višje vode živih morskih men.

Zakaj so pomembne vse te sredine? V Sloveniji **globinski datum** določajo **srednje nizke nižje vode** – glede na to vrednost se določajo globine morskega dna. **Srednje višje visoke vode** pa določajo **mejo kopnega** – glede na to vrednost se določi meja med kopnim in morjem (pomen za gradnjo ob obali!).



Slika 14: Različne vrste izmerjenih višin morske vode in njihove sredine – obdobje 18,6 let



Slika 15: Različne vrste izmerjenih višin morske vode in njihove sredine – obdobje okoli treh mesecev

Trend spreminjanja sredine morske gladine skozi čas pa nam omogoča izračun **dvigovanja ali upadanja morske gladine**. Iz opazovanj mareografske postaje Koper izračunamo trend okoli 6 mm/leto. Numerična vrednost je verjetno pretirana, saj tu niso upoštevani številni parametri, kot je obnašanje Jadranskega morja, spreminjanje klime skozi čas (več deževnih dni, večja neurja...), ki so posledica tudi globalnega spreminjanja podnebja.

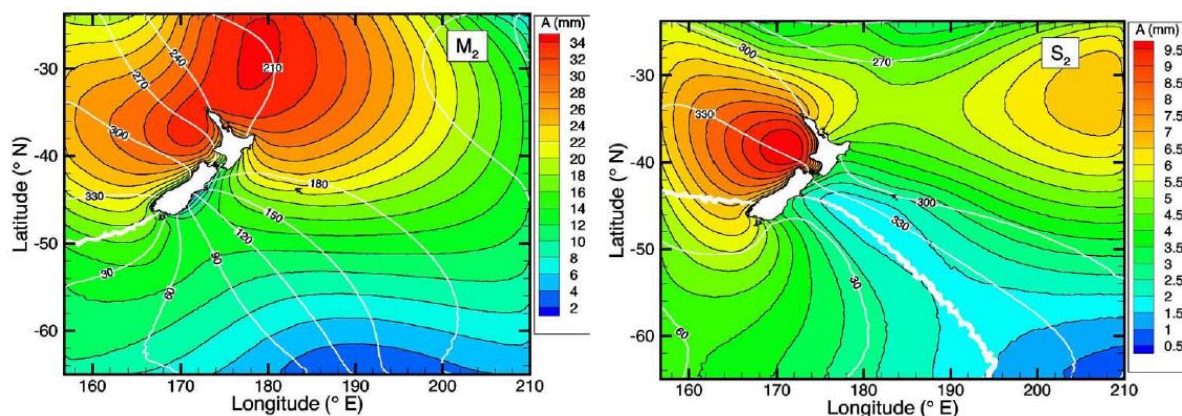
## 1. 5. Vpliv plimovanja oceanov na površje Zemlje

Plimovanje oceanov ima velik pomen za vse, ki so kakorkoli povezani z morjem, z definiranjem višinskega izhodišča tudi za geodezijo. Po drugi strani pa ima **narivanje vode v plimi in odtekanje vode pri oseki** vpliv na **položaje točk na kopnem**, saj se spreminja **obremenitev površja**. Vpliv plimovanja površja se izračuna na sledeč način:

$$\Delta \mathbf{c} = \sum_i f_j A_{cj} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \phi_{cj}) \quad (3)$$

Kjer v enačbi ( 3 )  $\Delta \mathbf{c}$  predstavlja premik točke v sistemu LG (N, E, in h). Količine  $f_j$ ,  $\chi_j$  in  $u_j$  se nanašajo na položaj Lune in Sonca glede na Zemljo,  $A_{cj}$  in  $\phi_{cj}$  predstavljata amplitudo in začetno fazo plimne komponente ter  $\omega_j$  kotno hitrost plimne komponente. Parametra  $A_{cj}$  in  $\phi_{cj}$  sta specifična za vsako točko na površju Zemlje in se jih lahko izračuna iz različnih fizikalnih modelov. Pri izračunu premika točke se v enačbi ( 3 ) upošteva 11 največjih astronomskih plimnih komponent (parameter  $i$  pri vsoti): poldnevne  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$  in  $K_2$ , dnevne  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$  in  $Q_1$  in dolgo-periodične  $M_f$ ,  $M_m$  in  $S_{sa}$ .

Največji vpliv ima komponenta  $M_2$ , celoten vpliv pa ne znaša več kot 5 cm pri višini in 2 cm pri horizontalni komponenti.



Slika 16: Prikaz višinske komponente premika točk zaradi plimovanja oceanov komponente  $M_2$  (levo) in  $S_2$  (desno) na primeru Nove Zelandije (vir: Goring, G. D., Walters, R. A. 2002. Ocean-tide loading and Earth tides around New Zealand. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 36 (2), pp. 299-309)

## 2. Plimovanje trdne Zemlje

Isti fizikalni zakoni, ki povzročajo plimovanje oceanov, povzročajo tudi plimovanje trdne Zemlje. Medtem ko je plimovanje oceanov relativno komplicirano, se plimovanje trdne Zemlje lahko modelira z **visoko točnostjo na osnovi relativno enostavnega fizikalnega modela**. Zaradi tega spada vpliv plimovanja trdne Zemlje pod kategorijo 1, kar pomeni, da je potrebno sistematični **pogrešek plimovanja trdne Zemlje odstraniti iz opazovanj GNSS v sklopu obdelave opazovanj GNSS**.

Trdna Zemlja ni tekoča (kot oceani), zato je plimovanje trdne Zemlje posledica deformiranja oblike trdne Zemlje in ne pretakanja »tekočin« v notranjosti (ali površja) Zemlje. Obnašanje plimovanja trdne Zemlje sledi **astronomskemu plimovanju**, kjer imajo vpliv na premik točk na površini Zemlje vse **plimne komponente** (poldnevne  $M_2, S_2, N_2, K_2$ , dnevne  $K_1, O_1, P_1, Q_1$  in dolgo-periodične  $M_f, M_m, M_{sa}$ ).

Skupno lahko plimovanje znaša tudi do **55 cm po višinski komponenti in do okoli 15 cm po horizontalni komponenti**, kar pomeni, da plimovanja trdne Zemlje ni zanemarljiv geofizikalen vpliv.

**Enačba za izračun premika  $\Delta \mathbf{x}$  poljubne točke na Zemlji zaradi vpliva plimovanja Trdne Zemlje** je podana z:

$$\Delta \mathbf{x} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_Z} \frac{|\mathbf{r}_Z|^4}{|\mathbf{r}_j|^3} \left( h_2 \mathbf{e} \left( \frac{3}{2} (\mathbf{r}_j \mathbf{e})^2 - \frac{1}{2} \right) + 3l_2 (\mathbf{r}_j \mathbf{e}) (\mathbf{r}_j - (\mathbf{r}_j \mathbf{e}) \mathbf{e}) \right) \quad (4)$$

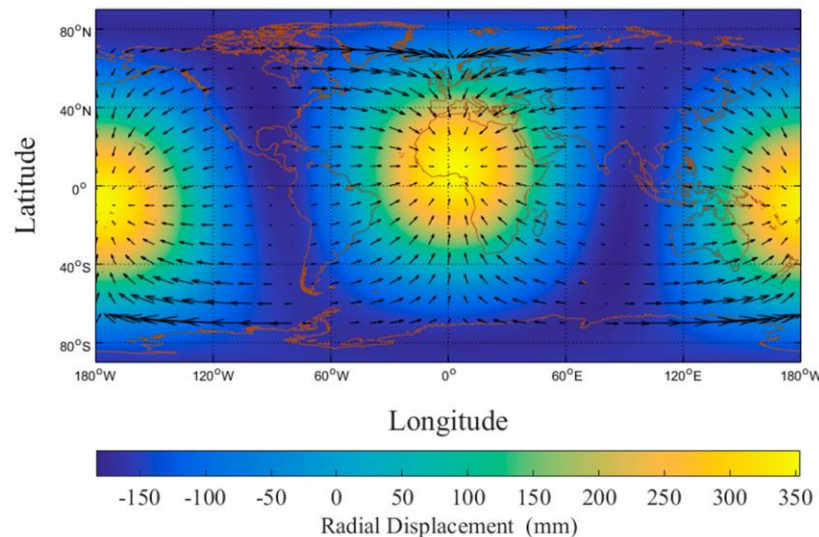
Kjer so v enačbi (4) količine določene z:

- $GM_Z$  – produkt gravitacijske konstante  $G$  in mase Zemlje  $M_Z$ ,
- $GM_j$  – produkt gravitacijske konstante  $G$  in mase Lune ( $j = 2$ ) in Sonca ( $j = 3$ ),
- $\mathbf{r}_Z, \mathbf{r}_j$  – radij vektor položaja točke na Zemlji in radij vektor nebesnega telesa (Lune ( $j = 2$ ) in Sonca ( $j = 3$ )) v terestričnem koordinatnem sistemu,
- $\mathbf{e} = \mathbf{r}_Z / |\mathbf{r}_Z|$  – enotski vektor položaja točke na Zemlji,
- $h_2, l_2$  – Love ( $l_2 = 0.0847$ ) in Shida ( $h_2 = 0.6078$ ) števili stopnje 2, s katerima se opiše elastičnost Zemlje.

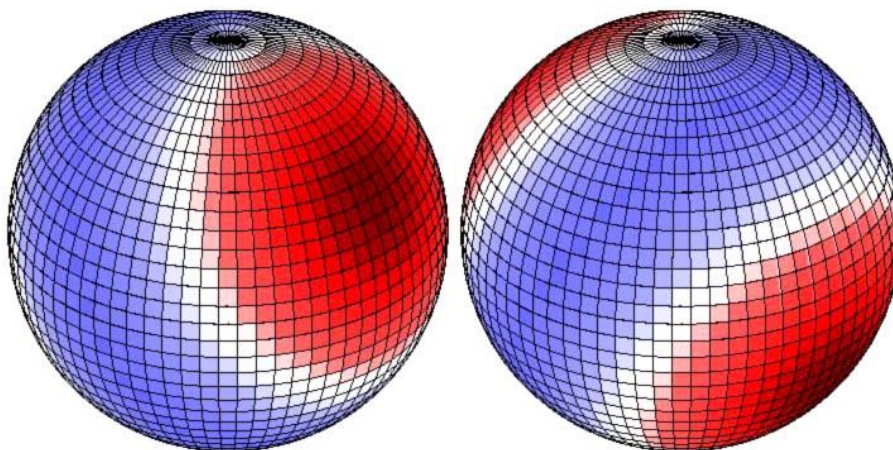


Enačba ( 4 ) modelira premik poljubne točke, ob poljubnem trenutku, zaradi vpliva plimovanja trdne Zemlje s **točnostjo višjo od 5 mm**. Za točnost na nivoju višjem od milimetra je potrebno upoštevati še vpliv 2. in 3. reda. Naj natančnejši model plimovanja trdne Zemlje, ki naj se uporabi pri obdelavi satelitskih opazovanj (tudi GNSS) je predstavljen v poglavju 7 (angl. »Displacements of reference points«) zadnje objavljene konvencije službe IERS, to je **IERS Conventions (2010)** (<https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>).

Kako pa izgleda vpliv plimovanja trdne Zemlje globalno? To prikazujeta sliki 17 in 18.



Slika 17: Premiki točk globalno zaradi vpliva plimovanja trdne Zemlje (vir: Wu, K., Ji, C., Lou, L., Wang X. 2020. *Simulation Study of Moon-Based InSAR Observation for Solid Earth Tides*. *Remote Sensing*, 12-123. [https://mdpi-res.com/d\\_attachment/remotesensing/remotesensing-12-00123/article\\_deploy/remotesensing-12-00123-v2.pdf](https://mdpi-res.com/d_attachment/remotesensing/remotesensing-12-00123/article_deploy/remotesensing-12-00123-v2.pdf))

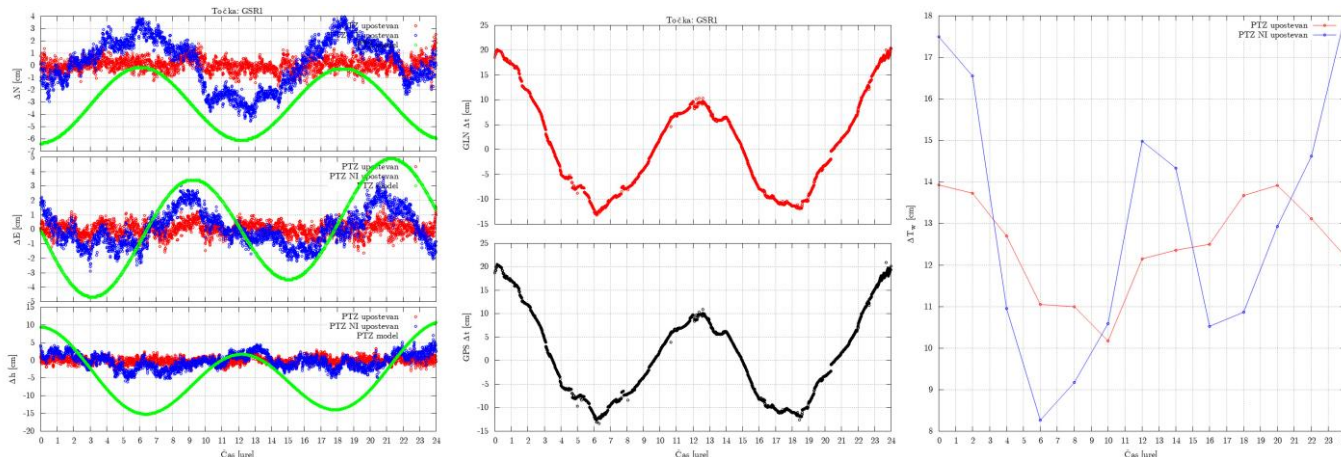


Slika 18: Vpliv Lune na plimovanje trdne Zemlje če je Luna nad točko 30°S (levo) ali 30°N (levo) (vir: Wikipedia – Earth Tide. [https://en.wikipedia.org/wiki/Earth\\_tide](https://en.wikipedia.org/wiki/Earth_tide))

Iz slik 17 in 18 lahko vidimo, da je vpliv plimovanja trdne Zemlje globalen, to pomeni, da so razlike med premiki točk vidni le na velikih razdaljah. **Pri obdelavi opazovanj GNSS vektorjev**, ki so krajši od nekaj 100 km, lahko vpliv plimovanja trden Zemlje zanemarimo, saj se pogrešek v celoti eliminira s sestavo enojnih faznih razlik.

Pri **obdelavi opazovanj GNSS po metodi PPP**, kjer dobimo absolutni položaj točke v globalnem koordinatnem sistemu, pa moramo plimovanje trdne Zemlje **nujno upoštevati**. Slika 19 prikazuje,

kakšen je vpliv ne-upoštevanja plimovanja Trdne Zemlje na rezultate obdelave opazovanj GNSS točke GSR1 (Ljubljana).



Slika 19: Vpliv ne-upoštevanja plimovanja trdne Zemlje na položaj točke (levo), na pogrešek ure sprejemnika (sredina) in na ocenjene parametre troposfere (desno) pri metodi PPP

Ker plimovanje trdne Zemlje predstavlja spremembo dolžine satelit-sprejemnik, se ne-upoštevanje plimovanja **prelije v vse neznanke pri metodi PPP** (položaj, ura sprejemnika, troposferski parametri, fazne nedoločenosti).

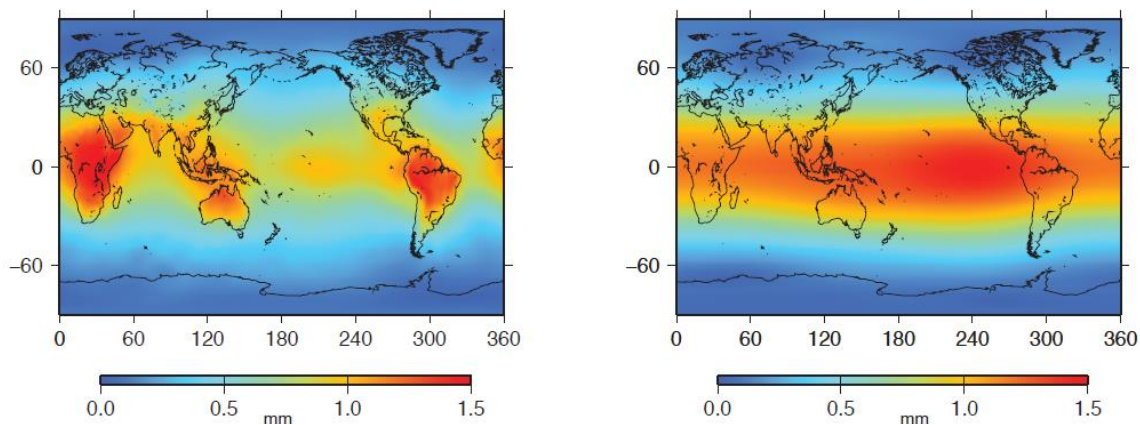
### 3. Plimovanje atmosfere

**Plimna sila**, ki deluje na oceane in na trdno Zemljo, **deluje tudi na atmosfero**. Poleg plimne sile, ki je posledica **razlike v gravitacijski sili in centrifugalni sili**, na atmosfero v znatni meri vpliva tudi **segrevanje atmosfere zaradi sončevega sevanja**. Zato plimovanje atmosfere opredelimo kot periodične spremembe osnovnih »sestavin« atmosfere (veter, temperatura, gostota, zračni tlak, prisotnost vodne pare), kjer se izkaže, da plimovanje atmosfere določata dve komponenti:

- $S_1$  – dnevna perioda (24 hr) in je posledica sončevega segrevanja ozračja in
- $S_2$  – pol-dnevna perioda (12 hr) in je posledica plimne sile.

Plimovanje atmosfere je možno določiti na osnovi stalnih opazovanj atmosferskih sestavin, tj. temperature, zračnega tlaka, prisotnosti vodne pare... skozi daljše časovno obdobje. V okviru tega obdobja se s frekvenčno analizo ugotavlja prisotnost komponent v meritvah, ki imajo osnovo v astronomskem plimovanju (periode komponent morajo ustrezati periodam, ki jih določata Sonce in Luna).

Posledica plimovanja atmosfere je poleg razlik v »sestavinah« atmosfere tudi v **spremembi debeline atmosfere** (lahko se spreminja tudi do nekaj kilometrov) in **»obremenitvi« površja** (večji zračni tlak), ki povzroči **spremembo v položaju točk** na površini Zemlje. Vpliv obeh komponent ( $S_1$  in  $S_2$ ) na višinsko komponento položaja točk prikazuje slika 20.



Slika 20: Vpliv komponente  $S_1$  (levo) in komponente  $S_2$  (desno) na višinsko komponento položaja točke (vir: IERS Conventions (2010), slika 7.1)

Vpliv plimovanja atmosfere na višino znaša kvečjemu 1,5 mm, na horizontalne komponente pa še manj (vsaj 10-krat manj). Plimovanje atmosfere se pri obdelavi satelitskih opazovanj upošteva le pri znanstvenih programskih paketih najvišjega kakovostnega reda. Pri obdelavi npr. opazovanj GNSS pri komercialnih paketih (Leica Infinity, Trimble Business Center...) pa se vpliv plimovanja zanemari.