



*Univerza v Ljubljani  
fakulteta za matematiko in fiziko  
Oddalek za fiziko*

# **Fizika cunamijev**

Jože Pernar

Mentor: prof. dr. Rudolf Podgornik

11. avgust 2007

# Kazalo

0.1	Povzetek . . . . .	2
0.2	Uvod . . . . .	3
0.3	O valovanju . . . . .	3
0.4	Težni površinski valovi . . . . .	4
0.5	Kaj je cunami? . . . . .	6
0.6	Povzročitelji cunamijev . . . . .	8
0.7	Geo-metrija cunamija . . . . .	8
0.8	Fizika cunamija . . . . .	10
0.8.1	Nelinearni mehanizem nastajanja cunamija . . . . .	10
0.8.2	Osnovni matematični model . . . . .	11
0.8.3	Pomožni linearni problem . . . . .	12
0.8.4	Izvor nastajanja dolgega vala . . . . .	14
0.8.5	Rezultati . . . . .	15
0.9	Zaključek . . . . .	17

## 0.1 Povzetek

V izbranem seminarju sem želel predstaviti naravni fenomen cunamija in pogoje za njegov nastanek. Skozi uvodni del in aplikativni pregled poglobljenih okoliščin za nastanek cunamija sem v drugem delu skušal poudariti fizikalno ozadje pojava. S poljudno razlago vzrokov in nastajanja tega pojava, sem želel predstaviti dokaj zapleten mehanizem nastajanja samega cunamija na čim bolj enostaven in razumljiv način. V zadnjem teoretičnem delu seminarja sem privzel matematično tezo dveh Ruskih strokovnjakov M.A.Nosova in S.N.Skachkoja. Omenjena strokovnjaka skušata skozi svoje teoretične predpostavke dokazati nelinearni mehanizem nastajanja cunamija.

## 0.2 Uvod

Cunami je naravni pojav. Ime je dobil na Japonskem. V japonsščini pomeni "tsunami" pristaniški val. Včasih ga imenujemo tudi plimni val. Vendar to imenovanje ni najbolj strokovno sprejemljivo. Val zaradi plime in cunami nimata kaj veliko skupnih lastnosti. Verjamem, da cunami obstaja odkar je voda na Zemlji. Planet Zemlja je živ planet in se stalno spreminja skozi potrese in ostale tektonske premike. In ravno potresi v globinah oceanov so najčešči vzroki za nastanek rušilnih valov. Ker se v zadnjem obdobju človek naseljuje tudi tik ob obale oceanov, so posledice cunamijev bolj opazne in za človeka zaznavne. Ogromno število žrtev in materialne škode sta v zadnjem obdobju privedli do bolj poglobljenega preučevanja te naravne ujme. Rezultati teh bi lahko predvsem s pravočasnim obveščanjem prinesli željene rezultate.

Praktično vsa energija, ki jo potres povzroči in prenese ter podeli vodi, se sprosti ob obalah. Cunami predstavlja zelo učinkovit mehanizem, ki to energijo prenese prek velikih razdalj. Valovanje je samo pojav, ki to omogoča. Torej najprej nekaj besed o valovanju.

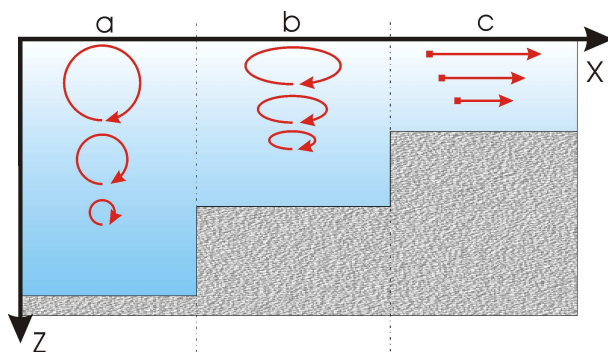
## 0.3 O valovanju

Ko govorimo o valovanju kapljev in moramo imeti v mislih mehansko valovanje. To je povezano z notranjim stanjem neke snovi. Če takšna snov ni izpostavljena zunanjim motnjam ali motnji je v ravnovesju. Za primer se osredotočimo na delec snovi. V kolikor delec ni izpostavljen zunanji motnji je v lastni ravnovesni legi. Lahko tudi niha okrog nje. Torej motnja povzroči, da se delcu spremeni ravnovesna lega. Posledica je sprememba gostote motenega dela snovi, tlak in celo njena oblika. Ta snov bo v našem primeru voda. Motnja bo podvodni potres ali vulkanski izbruh. Posledica pa cunami. Pri podmorskem potresu gre za nenadno in skokovito motnjo, ki vzbudi valovanje.

Predno se lotimo značilnosti tega pojava je potrebno vedeti še nekaj o valovanju na gladini kapljev. Gladina vode ima obliko. Zaradi tega se po njej sploh lahko širijo valovi. Vsak val ima svojo težo. Le ta strmi k ravnovesni legi, kajti voda želi zavzeti najnižjo možno lego. Dvig vodne gladine zaradi vala pomeni povečanje potencialne energije. Temu nato sledi nihanje in naprej valovanje. Ti vali nastajajo praktično zaradi svoje teže. Pravimo jim težni površinski valovi.

Da bi lažje razumeli analitični del je potrebno dodati še nekaj osnovnih prvin valovanja na vodni gladini in vplivu globine morja. Tako bo generiranje mehanizma cunamija ob obali, ko se globina drastično spreminja, bolj razumljivo. Valovanje na vodni gladini ni povsem transverzhalno. To pomeni, da vodni delci na gladini ne nihajo samo v smeri gor in dol (po osi

$z$ ). Istočasno se premikajo tudi v vzdolžni smeri (po osi  $x$ ). Posamezni delec tako kroži ali elipsa, kot prikazuje slika (1). Delec ima tako poleg komponente hitrosti  $v_z$  tudi komponento  $v_x$  v vodoravni smeri. To pa se ne dogaja samo na gladini vode. Nihajo tudi delci pod gladino.



Slika 1: Tirnice globinskega nihanja delcev.

Amplituda nihanja pa se z globino spreminja. Amplituda pojema približno eksponentno z globino. Tako je od globine odvisna oblika tirnic posameznega delca. Mehanizem cunamija to izkorišča za svoje učinkovito prenašanje energije - izvirne energije motnje. V zelo globokih vodah, kjer običajno nastane izvor cunamija se delci premikajo po krožnicah (slika 1a). Na sliki (1b) je prikazan tir plitvejših delov morja. Proti obali se gibanje pretransformira v popolno vzdolžno v vodoravni smeri (1c). Tako cunami z manjšanjem globine  $H$  proti obali pridobiva na komponenti  $v_x$  in pride do izničanja komponente  $v_z \approx 0$ . Izlitje vode v obalni in naprej na kopenski del je posledica te komponente.

## 0.4 Težni površinski valovi

Kako se pravzaprav premikajo valovi? In kakšna je njihova hitrost? Od česa je odvisna? Za primer vzamem valovanje, ki se širi v smeri  $x$ . Pomik v smeri širjenja valovanja označimo s  $\psi_x$ , pomik po koordinati  $z$  pa s  $\psi_z$ . Oba pomika sta odvisna od krajevnih koordinat  $x$  in  $z$  ter časa. Ko gladina vode valovi se zaradi različnih pomikov  $\psi_z$  vodnih delcev iz gladine v navpični smeri hidrostatični tlak spreminja z vodoravno koordinato  $x$ . Razlika tlakov  $\Delta p$  pospešuje delce v vodoravni smeri. Delec dimenzije  $dx, dz$  se nahaja na globini  $z = 0$ . Po koordinati  $x$  se giblje s pospeškom

$$a_x = \delta^2 \frac{\psi_x}{\delta t^2} \quad (1)$$

tega povzroča razlika tlakov

$$\Delta p = p(x) - p(x + dx) = \rho g[\psi_z(x) - \psi_z(x + dx)] = -\rho g \left( \frac{\delta \psi_z}{\delta x} \right) dx.$$

S pomočjo Newtonovega zakona dinamike lahko nadaljujemo z enačbo:

$$dF_x = d m a_x$$

oziroma

$$dz \Delta p = \rho dz dx a_x - g \delta \frac{\psi_z}{\delta x} = \delta^2 \frac{\psi_x}{\delta t^2}$$

Za ravninsko harmonično valovanje s rekvenco  $\omega$  in valovnim številom  $k = \frac{\omega}{c}$ , ki potuje v vodoravni smeri  $x$ , lahko zapišemo:

$$\psi_z = A_z \sin(\omega t - kx) \quad (2)$$

in tudi

$$\psi_x = A_x \cos(\omega t - kx) \quad (3)$$

pri čemer sta  $A_x$  in  $A_z$  amplitudi odklikov delcev na gladini. Se pravi na nivoju  $z = 0$ .

$$A_x = -2A \exp(-kh) \cos h(kh)$$

$$A_z = 2A \exp(-kh) \sin h(kh)$$

Z okrajšanjem skupnih faktorjev dobimo enačbo za računanje hitrosti valovanja na plitvi vodi:

$$gk \sinh(kh) = \omega^2 \cos h(kh) = c^2 k^2 \cos h(kh)$$

$$\omega^2 = gk \tan h(kh)$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{g}{k}\right) \tan h(kh)} =$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi}\right) \tan h\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} = \quad (4)$$

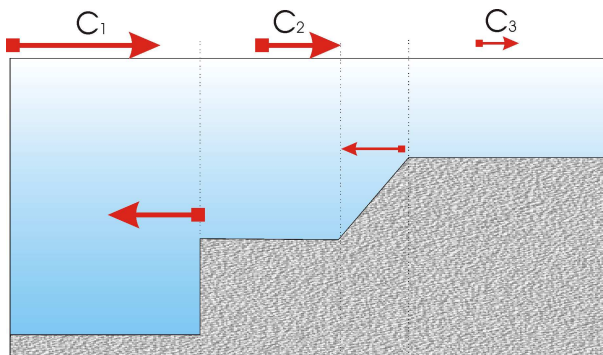
Za plitvo vodo velja pogoj  $h \ll \lambda$ . Privzememo pa lahko tudi, da je  $\tan h\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \approx \frac{2\pi h}{\lambda}$

$$c = \sqrt{g h} \quad (5)$$

Fazna hitrost površinskih težnih valov na plitvi vodi ni odvisna od valovne dolžine. Primer za to so valovi plime in oseke v plitvini. Lahko sklepamo, da je hitrost valov večja na področjih, kjer je voda bolj globoka. Lahko razmišljamo tudi obratno. Iz hitrosti valov lahko sklepamo o globini vode.

Pri ocenjevanju hitrosti valov se lahko včasih zgodi sprememba hitrosti. Ta je običajno posledica globine. Včasih je lahko ta sprememba zelo hipna in je posledica nenadne spremembe globine. Podmorski prag ob obali lahko

občutno zmanjša hitrost vala. Del valovnega energijskega toka se odbije. Cunami lahko na takšnih pragih izgubi del svoje energije (slika 2). Žal se v večini primerov, kjer cunami naredi veliko škodo izkaže, da je spreminjanje globine počasno in brez pragov, zato cunami prenese skoraj vso svojo energijo na obalo.



Slika 2: Podmorski prag povzroča spremembo hitrosti valov.

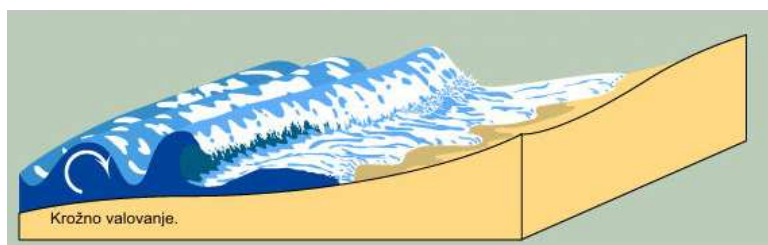
O globoki vodi lahko govorimo, ko je izpolnjen pogoj  $h \gg \lambda$ . Tudi tu lahko poenostavimo, da je  $\tan h\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \approx 1$ . Tako velja zapis:

$$c \approx \sqrt{\frac{g \lambda}{2\pi}} \quad (6)$$

Za razliko od plitve vode se tu izrazi disperzija valovanja. Valovi se tako širijo tem hitreje, čim večja je njihova valovna dolžina. Temeljna značilnost cunamija pa je ravno zelo velika valovna dolžina.

## 0.5 Kaj je cunami?

Cunami je navaden gravitacijski vodni val, kot ga poznamo z obale, le da ima zelo veliko valovno dolžino. Ta v nekaterih primerih znašala tudi do 500 km. Njegova druga poglobitna lastnost pa je, da ima relativno majhno amplitudo. Pri primeru valovne dolžine 200 km je njegova časovna perioda dobrih 15 minut. Tu lahko vidimo prvo opazno razliko v primerjavi z valovi plime in oseke. Cunami je mnogo hitrejši. Ker je motnja, ki povzroča bibavico, počasna in postopna v primerjavi s hitrostjo širjenja valovanja, je pri bibavici morska gladina ves čas skoraj v ravnovesju. Praktično ne pride do valovanja. Lahko bi rekli, da bibavica zaradi svoje dolge periode vzdržuje ravnovesno stanje. Višina vode se počasi spreminja. Podobno je tudi pri stalnih valovih, ki jih povzroča veter ali drugi ustaljeni pojavi (slika 3). Ti valovi zaradi razmerja globine vode in valovne dolžine spadajo med

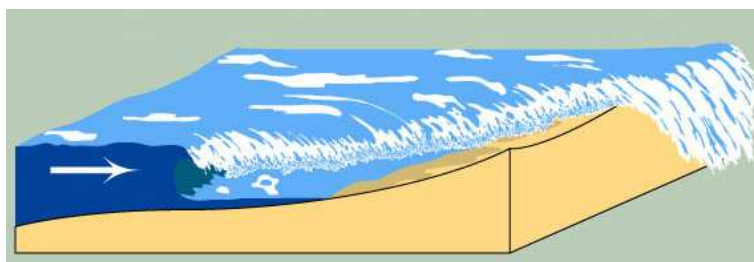


Slika 3: Krožno valovanje ne dosega višjih delov obale.

gravitacijske vodne vale globoke vode. Površinski deli vode krožijo, kot je prikazano na sliki (1). Ko gremo v globino, to gibanje zamira. Gibanje vode dosega globino, ki je približno enaka valovni dolžini. Globlje voda miruje.

Ker je valovna dolžina cunamija mnogo večja od globine oceana, smo pri cunamiju v režimu gravitacijskega valovanja na plitvi vodi. Kot je razvidno iz prejšnjega poglavja je značilno, da od zgoraj omenjenega kroženja delov vode ostane praktično le horizontalna komponenta hitrosti (zelo sploščena elipsa (slika 1c)).

Ko se val približuje obali, kjer je globina vse manjša, njegova amplituda narašča. Energijska gostota cunamija se namreč približno ohranja, masa vode, ki se giblje, pa je zaradi plitvejšega morja vse manjša. Presežna energija se naloži v dvigovanje gladine in v hitrejše gibanje vode proti obali. Hkrati se hitrost valovanja na vse plitvejši vodi zmanjšuje, s tem pa se v smeri proti obali zmanjšuje tudi energijski tok, ki ga nosi valovanje – produkt gostote energije in hitrosti valovanja. Z drugimi besedami, več energije priteče, kot je uspe odteči proti obali. Zaradi tega se še dodatno poveča gostota energije, kar spet pomeni večanje amplitude vala in hitrejše gibanje vode proti obali. Pojav je povsem enak kot pri običajnih valovih, na katerih surfajo, le da je energija neprimerno večja in da cunami zaradi večje valovne dolžine obalo začuti mnogo prej. Navadni valovi, četudi so lahko po višini povsem primerljivi s cunamiji, zaradi valovne dolžine nekaj deset ali sto metrov niso preveč nevarni, saj pridejo in grejo in ne sežejo daleč v notranjost (slik 3). Cunami pa kopno dobesedno poplavi (slika 4).

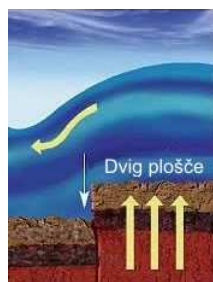


Slika 4: Val cunamija s svojo količino prodre globoko na obalo.



## 0.6 Povzročitelji cunamijev

Cunami je val na morski gladini ali skupina takšnih valov, ki nastanejo zaradi potresa (slika 5), zdrsa zemeljskih tal, ognjeniškega delovanja (slika 6) ali padca meteorita ali drugega nebesnega telesa v morje ali blizu morja.



Slika 5: Potres.



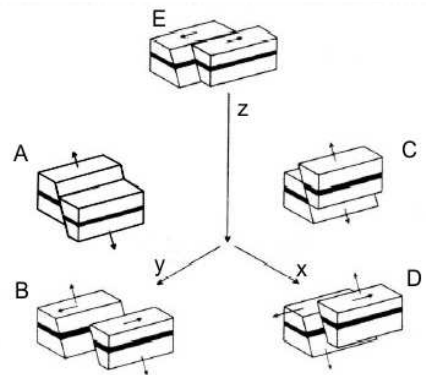
Slika 6: Vulkan.

## 0.7 Geo-metrija cunamija

Z razliko od podmorskih potresnih sunkov je cunamijev, ki nastanejo zaradi podvodnih vulkanskih izbruhov izredno malo. Cunamija, ki bi ga povzročilo padlo astronomsko telo v novejši civilizaciji ne beležimo. Premiki zemeljskih plasti pa so nenehni. Vprašanje je samo intenziteta te vrste motnje in lokacija kjer se zgodijo. Kljub vsemu pa se tovrstne motnje med sabo zelo razlikujejo. Na sliki (7) lahko vidimo nekaj osnovnih tipov motenj cunamija na osnovi zemeljskih premikov.

Ne povzroči vsak potres ali premik zemeljskih plasti enakih motenj za nastanek cunamija.

A - Pogosta motnja. Zdrs v smeri dveh koordinatnih osi od katerih je ena



Slika 7: Osnovni tipi tehtonskih zdrsov.

pokončna  $z$ . Gre za takoimenovani ugrez dela dna morja.

B - Poleg navpičnega pomika plošči zdrsneti tudi v smeri tretje osi.

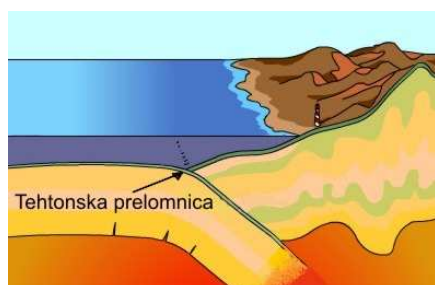
C - Podobna motnja kot v primeru A. Pojav je le obraten, saj se del morskega dna dvigne in sprosti energijo proti površju.

D - Obratne smeri koordinat, kot v primeru B.

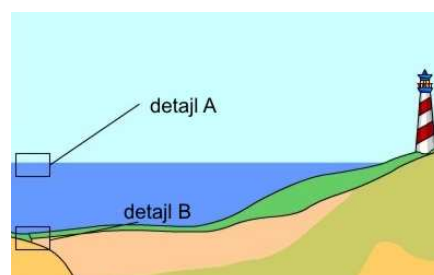
E - Zdrs dveh plošč na isti višini, ki ne povzroči motnje zadostne za nastanek cunamija.

Od vseh je najpogostejši primer dviga (tip C) dela morskih tal.

Skozi naslednje slike in detalja A in B se nazorno vidi nastajanje cunamija. Na podmorskem dnu je stik dveh tehtonskih plošč (slika 8)- žarišče potresa.

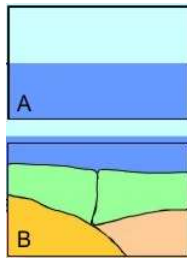


Slika 8: Tehtonski plošči.

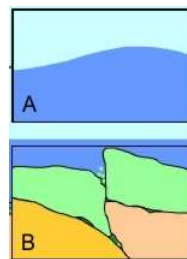


Slika 9: Zdrs - motnja.

Detalj A in B (slika 10 in 11) prikazujeta odvisnost gladine morja (A) od motnje zaradi premika prelomnice (B). Ob zdrs in dvigu (narivanje) tehtonske plošče (detalj B Slika 11) prenese premik - motnjo vse do površine. Ta vzvalovi (detalj A Slika 11). Val se širi koncentrično po površini morja (slika 16).

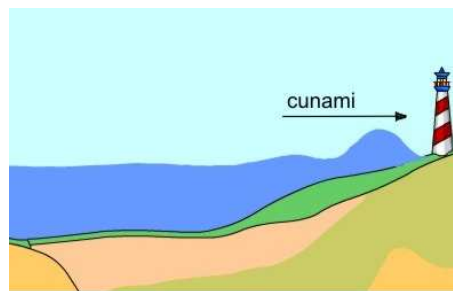


Slika 10: Detajl A in B.



Slika 11: Premik in val.

Val cunamija potuje z veliko hitrostjo proti obali (slika12). Zaradi počasi dvigajoče obale mu amplituda drastično narašča.



Slika 12: Večanje amplitude cunamija.

## 0.8 Fizika cunamija

Nelinearni mehanizem nastajanja dolgih gravitacijskih površinskih vodnih valov z visoko frekvenco globinskih nihanj v vodnem sloju konstantne globine. Ta del naloge je pripravljen na analitičnem nivoju. Poudarek analize je na povezavi med površinsko amplitudo vala in parametri globinskih nihanj ter izvora dolžine vala.

### 0.8.1 Nelinearni mehanizem nastajanja cunamija

Če je frekvenca navpičnih globinskih nihanj med podvodnim potresom večja od  $\sqrt{g/H}$  in nihanja niso spremljala ostanek premestiti, se preostanek prenese tako, da pride do učinkovitega vzburljanja površine in ustavrjanja površinskih valov (cunami). Ali je to sploh res in mogoče? Po trditvah ruskega strokovnjaka za cunamije to ni mogoče (Nosov, 1999). Ta rezultat naj bi bil posledica linearne teorije. Kakorkoli močni podvodni potresi so zagotovo spremljevalci in sokrivci globinskih nihanj za pomembno hitrost magnitude. Ta linearna teorija postane neaplikativna in nelinearni pojav ne moremo zapostaviti. Tu

upoštevamo dolgi gravitacijski val generiran kot rezultat nelinearne vodne plasti hitrih nihanj. Naš cilj pri analiziranju cunamija je odnos med amplitudo dolgega gravitacijskega vala in parametri globinskih nihanj.

## 0.8.2 Osnovni matematični model

Dovolimo si privzeti idealni sloj nestisljivo homogene tekočine na konstantni globini  $H$  v težnostnem stanju. Kartezijev koordinatni sistem  $OXZ$  postavimo v območje brez motenj na površju.  $OZ$  osi usmerimo navpično navzgor. Predpostavimo da hitrost tekočine niha hitro povprečje časa pa počasi. Sledi zapis:

$$u^\Sigma(x, z, t) = u(x, z) \cos(\omega t) + U(x, z, t), \quad (7)$$

$$\omega^\Sigma(x, z, t) = \omega(x, z) \cos(\omega t) + W(x, z, t), \quad (8)$$

kjer sta  $u$  in  $w$  vodoravna in navpična komponenti hitrosti tekočine.

Nadomeščanje izrazov (7) in (8) v levem delu Eulerjevih enačb in povprečje teh enačb v času dosežemo na naslednji način:

---


$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\Sigma}{\partial t} + u^\Sigma \frac{\partial u^\Sigma}{\partial x} + w^\Sigma \frac{\partial u^\Sigma}{\partial z} &= \\ &= \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} - fx, \end{aligned}$$


---

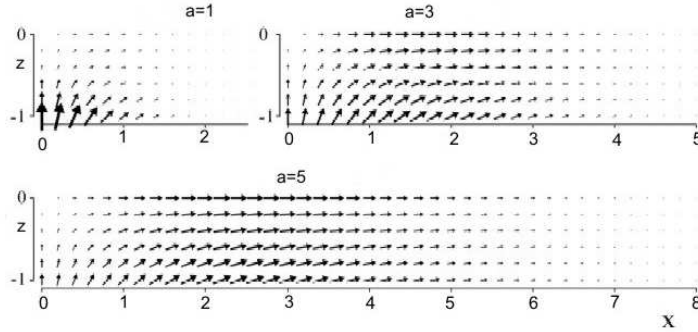
$$\begin{aligned} \frac{\partial w^\Sigma}{\partial t} + u^\Sigma \frac{\partial w^\Sigma}{\partial x} + w^\Sigma \frac{\partial w^\Sigma}{\partial z} &= \\ &= \frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + W \frac{\partial W}{\partial z} - fz, \end{aligned}$$

kjer je

$$f_x(x, z) = -\frac{1}{2} \left[ u(x, z) \frac{\partial u(x, z)}{\partial x} + w(x, z) \frac{\partial u(x, z)}{\partial x} \right], \quad (9)$$

$$f_z(x, z) = -\frac{1}{2} \left[ u(x, z) \frac{\partial w(x, z)}{\partial x} + w(x, z) \frac{\partial w(x, z)}{\partial x} \right], \quad (10)$$

Eulerjeva nelinearna enačba ustvari dodatne pogoje v glavnih enačbah za povprečen čas toka. Ta dva zapisa (9,10) uvrščata  $x$  in  $z$  kot stranski komponenti sile mase.



Slika 13: Primeri globinskega nastajanja in razporeditev silnic za  $\eta_1$  (iz formule (9),  $a = 1, 3$  in  $5$ .)

### 0.8.3 Pomožni linearni problem

Pri računanju zunanje sile je potrebno določiti hitrost polja tekočinskega sloja. Definirajmo to polje kot linearen odziv idealne tekočine spodnjih-talnih nihanj  $\eta(x, t)$ . Pomožni linearni problem imamo lahko v zapisu hitrosti potenciala hitrosti  $F(x, z, t)$ :

$$F_{xx} + F_{zz} = 0, \quad (11)$$

$$F_{tt} = -gF_z, \quad z = 0, \quad (12)$$

$$F_z = \eta_t, \quad z = -H, \quad (13)$$

Potencial (enačba 11) z mejnimi pogoji na površini (12) in dnu (13) se reši z uporabo standardne metode ločevanja spremenljivk. Glavna rešitev tega problema raztezanja je v Laplas in Fourier zapisu:

$$F_{(x,z,t)} = -\frac{1}{4\pi^2 i} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} dp \int_{-\infty}^{\infty} dk \frac{p \exp(pt - ikx) ch(kz) [gk - p^2 th(kz)]}{kch(kH) [gkth(kH) + p^2]} G(p, k), \quad (14)$$

kjer je

$$G(p, k) = \int_0^\infty dt \int_{-\infty}^\infty dx \exp(-pt + ikx) \eta(x, t) \quad (15)$$

Komponente hitrosti so lahko izražena v obliki potenciala:

$$u(x, z, t) = \frac{\partial F}{\partial x}, \quad w(x, z, t) = \frac{\partial F}{\partial z}.$$

Privzamemo naslednjo funkcijo za talna - globinska nihanja:

$$\begin{aligned} \eta(x, t) &= \eta_i(x) \theta(t) \sin(\omega t), \quad i = 1, 2 \\ \eta_1(x) &= \eta_0 \exp(-x^2 a^{-2}) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\eta_2(x) = \begin{cases} \eta_0, & |x| \leq b, \\ \eta_0 c^{-1} (b - |x|) + 1, & b < |x| \leq b + c, \\ 0, & |x| > b + c, \end{cases}$$

Kjer je  $\eta_0$  amplituda in  $\omega$  frekvenca globinskega nihanja, oziroma je  $\theta$  Heaviside -ov korak funkcije.

Predstavimo brezdimenzijske spremenljivke

$$\begin{aligned} k^* &= Hk, \quad t^* = t(g/H)^{1/2}, \quad \omega^* = \omega(H/g)^{1/2}, \\ \{x^*, z^*, a^*, b^*, c^*\} &= H^{-1}\{x, z, a, b, c\}, \\ \{u^*, \omega^*\} &= \{u, \omega\} / (\eta_0 \omega). \end{aligned} \quad (17)$$

Končne formule za komponente hitrosti tekočin so naslednje:

$$u(x, z, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} dk \frac{\sin(kx) \operatorname{ch}(kz) X_i(k)}{\operatorname{ch}(k)(p_0^2 - \omega^2)} \times \{ \cos(\omega t)[k + \omega^2 \operatorname{th}(kz)] - \cos(p_0 t)[k + p_0^2 \operatorname{th}(kz)] \} \quad (18)$$

$$\omega(x, z, t) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} dk \frac{\cos(kx) \operatorname{ch}(kz) X_i(k)}{\operatorname{ch}(k)(p_0^2 - \omega^2)} \times \{ \cos(\omega t)[k \operatorname{th}(kz) + \omega^2] - \cos(p_0 t)[k \operatorname{th}(kz) + p_0^2] \} \quad (19)$$

kjer je

$$p_0^2 = k \operatorname{th}(k)$$

$$X_i(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} dx \exp(ikx) \eta_i(x).$$

Numerične analize izrazov (18) in (19) omogočata verjeti izjavi, da v območje frekvence  $\omega > 2\pi\sqrt{g/H}$  vsaka točka tekočine niha harmonično, kot smo privzeli v zapisih (7) in(8). Sedaj, ko imamo eksplisitni zapis za funkciji  $u(x, z)$  in  $\omega(x, z)$  je dokaj lahko, s pomočjo uporabe formule (9) in (10), izračunati komponenti sile  $f_x$  in  $f_z$ .

Primeri prostorsko razporejene sile so prikazani na primerih sliki (13). Izračunali smo širjenje aplitude  $\eta_1(x)$  globinskega nihanja za različno globoke izvire. Iz slik je razvidno, kako sila razširja in prenaša glavni izvor za dolgi gravitacijski val. Ta predstavlja jedro cunamija. Ko izvor časovno narašča skozi navpično komponento sile istočasno postopoma prehaja v vodoravno komponento. Vodoravna dimenzija izvora cunamija tako običajno prekorači globino oceana. Gre za glavno značilnost cunamija. Tako je lahko teorija o linearni plitki vodi uporabna z predhodno oceno gravitacijskih valov vzbujenih s silo mase tekočine.

#### 0.8.4 Izvor nastajanja dolgega vala

Teorije linearnih enačb na plitvih vodah delujejo na račun učinka vodoravne sile  $f(x, t)$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + f(x, t),$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + H \frac{\partial U}{\partial x} = 0$$

zmanjšane z ustaljenim pristopom enačb nehomogenih valov. Enačba je napisana v naslednji (manjdimenzionalni) obliki:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{H}{g} \frac{\partial f}{\partial x}, \quad (20)$$

kjer je  $\xi$  prosta površinska ravnotežna razporeditev. Pri tem velja, da sta  $\xi$  in  $f$  v enačbi (20) dimenzijski količini. Analitična rešitev tega vprašanja je dobro znana:

$$\xi(x, t) = \frac{H}{2g} \int_0^t d\sigma \int_{x-(t-\sigma)}^{x+(t-\sigma)} \frac{\partial f}{\partial \zeta} d\zeta. \quad (21)$$

Vzemimo, da so globinska nihanja s konstantno amplitudo in frekvenco. Čas trajanja nihanja je  $\tau$ . Funkcijo  $f(x, t)$  lahko zapišemo v obliki

$$f(x, t) = f(x) [\theta(t) - \theta(t - \tau)]. \quad (22)$$

S substitucijo (22) in (21) integriranjem po  $d\xi$  dosežemo

$$\xi(x, t) = -\frac{H}{2g} \int_0^t [\theta(\sigma) - \theta(\sigma - \tau)] [f(x + (t - \sigma)) - f(x - (t - \sigma))] d\sigma. \quad (23)$$

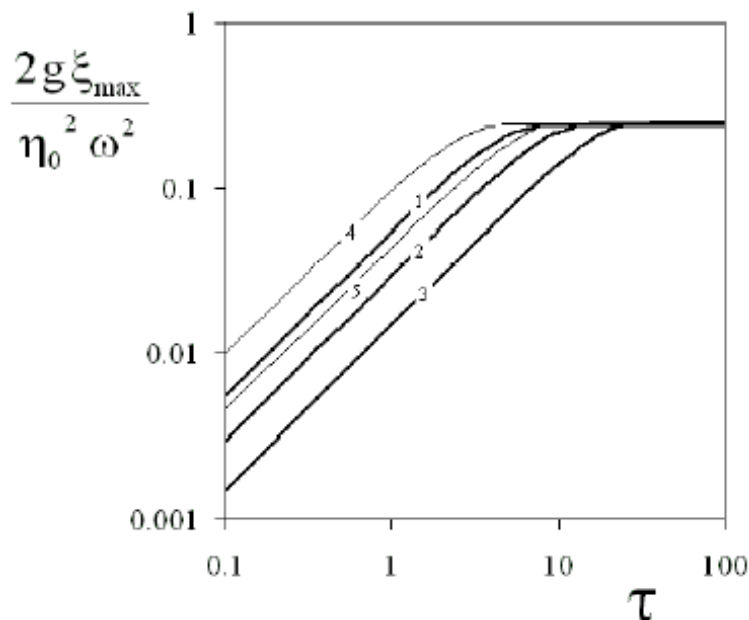
Na koncu lahko definiramo funkcijo  $f(x)$  s pomočjo formule (9)

$$f(x) = f_x(x, -0.5).$$

### 0.8.5 Rezultati

Z uporabo enačbe (16) dosežemo nastajanje nelinearnega mehanizma prosto površinskega premeščanja .





Slika 14: Največje vrednosti amplitud.

Diagram na sliki (14) prikazuje maksimalno amplitudo dolgega vala kot funkcijo trajanja globinskega nihanja. Krivulje 1,2,3 ustrezajo  $\eta_1(x)$  iz formule (9),  $a = 5, 10$  in  $20$ . Krivulji 4 in 5 pa ustrezata  $\eta_2(x)$ :  $b = 2, c = 3$  (4) in  $b = 1, c = 9$  (5). Prikazuje tudi maksimalno premeščanje amplitude  $\xi_{max}$  narisana, kot funkcija nihanj trajanja  $\tau$ . Naraščanje do maksimuma amplitude se odvija monotono do vrednosti 0.25. Noben vodoravni izvor niti prostorsko razporeditve  $\eta_i(x)$  ne spreminijo to odvisnost za veliko. V vseh primerih ni maksimum amplitude presegel vrednosti 0.25. Vrednost  $\tau$  pa je bila velika.

Ta nelinearni pojav lahko interpretiramo tudi na sledeč način. Amplituda nihajočega delca tekočine se zmanjšuje, ko se le ta oddaljuje od izvira nihanja. To je tudi vzrok zakaj se delci tekočine po periodi nihanj ne povrnejo v izhodiščno točko (prvotni položaj). Posledica je, da je ta del tekočine iztisnjen iz območja intenzivnejših nihanj. Istočasno je to povod za tvorbo dolgega gravitacijskega vala. Amplituda takšnega vala je odvisna od prostorskega razširjanja globinskih nihanj, nihanja amplitude hitrosti  $\eta_0\omega$  in trajanja samega pojava  $\tau$ .

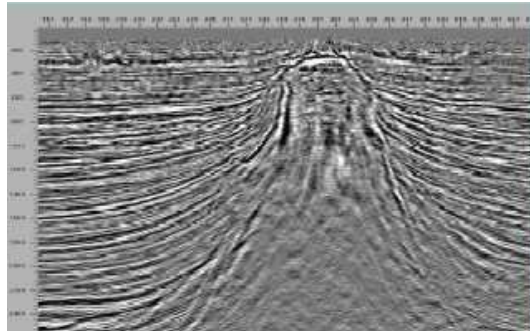
Prikaz v diagramu na sliki (14) omogoča ocenitev prispevka nelinearnega mehanizma na amplitudo cunamija. Za izvorni parameter globine  $H=1\text{km}$ ,  $a=10\text{km}$  (prostorska razporejenost  $\eta_1$ ) globinskih nihanj z amplitudo hitrosti  $10\text{ m/s}$  se ustvari val visok  $0,8\text{m}$  v trajanju  $50\text{s}$ .

Tak val pa je že upoštevanja vreden v teoriji stisljivih tekočin pri vi-

sokih frekvencah globinskih nihanj. To vsiljuje določene omejitve za uporabo dobljenih rezultatov. Stisljivost tekočin v tem pojavu sta upoštevala Novikova in Ostrowsky v svojem delu (1982). Vendar je tudi njuno delo baziralo na hipotetičnih izvornih načelih.

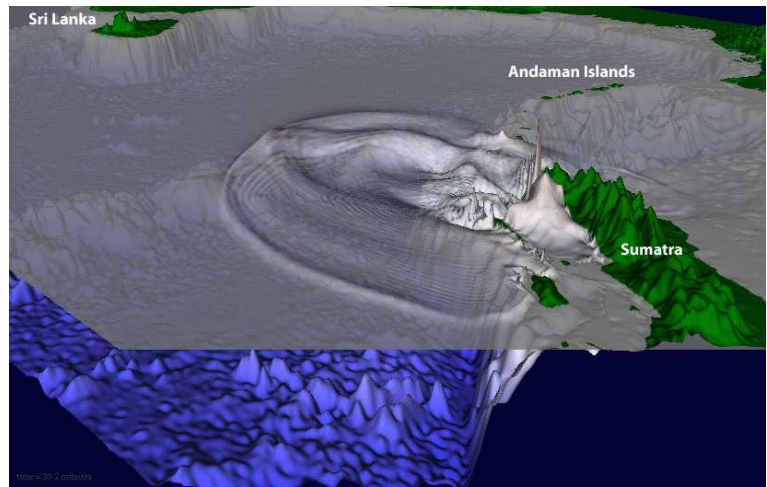
## 0.9 Zaključek

Tekočine in njihova nihanja ter turbulence, ki pri tem nastajajo so še dokaj trd in v nekaterih primerih celo nestrta oreh fizike. Vedeti je potrebno, da je cunami, kot enkratni naravni pojav neponovljiv in v razmerah, kjer nastaja - izvira praktično ni mogoče opraviti veliko meritev. Novejše raziskave gredo v smer simulacije (slika 15) in računalniške animacije (slik16).



Slika 15: Simulacija globinskih nihanj - motnje.

Zavedati se je potrebno še enega dejstva. Vse ali večino podatkov o cunamiju si lahko pridobimo, kot njegov produkt. Tako tudi računski del naloge ni popolnoma zanesljiv. Kot sem že omenil je privzetih veliko predpostavk in poenostavitev: nestisljivost tekočine, ni upoštevana vrtnčenje tekočine in turbulence, enakomeren in ne-konstantnost prenosa nihanj skozi poligon nastajanja vala, ni upoštevana površinska napetost, raporeditev silnic, zanemarjena tretja dimanzija (koordinata  $y$ ), homogenost tekočine in gostota ter zunanji vplivi, katere je zelo težko uštevati. Kljub tem omejitvam lahko z omenjeno nalogo pridemo do zanimivih spoznanj in ugotovitev v zvezi nastajanja cunamija.



Slika 16: Simulacija prostorskega potek cunamija.

# Literatura

- [1] M.A. Nosov and S.N.Skachko: *Nonlinear tsunami generation mechanism*, Physics of Sea and Inland Waters Chair, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State Univerity, Russia (2001)
- [2] Zygmunt Kowalik: *Basic relations between Tsunamis calculation and their Phisics-II*, Science of Tsunami Hazards, Vol 21, Number 3 (2003) page 154-173, Institut of Marine Science, University of Alaska Fairbanks, AK 99775, USA
- [3] Rudolf Kladnik: *Visokošolska fizika - valovni pojavi*, (Državna založba Slovenije, 1989)
- [4] <http://www.kvarkadabra.net/article.php/cunami>, stran obiskana 23.julij, 2007
- [5] <http://www.tsunamidevelopment.com/docs/Tsunami> stran obiskana 29.julij, 2007
- [6] [http://ffden-2.phys.uaf.edu/212\\_spring2005.web.dir/michaeltapp/index](http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_spring2005.web.dir/michaeltapp/index), stran obiskana 29.julij, 2007