

# Odabrani geofizički koncepti u nastavi fizike za srednje škole

---

**Bogdanović, Patricia**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2014**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:364753>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: PROFESOR FIZIKE I INFORMATIKE

**Patricia Bogdanović**

Diplomski rad

**Odabrani geofizički koncepti u nastavi  
fizike za srednje škole**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Davorka Herak

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

4. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2014.

## Sažetak

Cilj ovog rada je uvesti osnovne fizikalne koncepte u nastavi fizike za srednje škole te objasniti njihovu primjenu u seizmologiji. U prvom dijelu rada uvodim fizikalni koncept rasprostiranja mehaničkih valova na žici pomoću kojeg putem analogije učenike upoznajem s konceptom rasprostiranja seizmičkih valova u Zemlji. U drugom dijelu rada uvodim fizikalne koncepte poput refrakcije, difrakcije i refleksije korištene u svrhu istraživanja unutrašnjosti Zemlje, dok u trećem razmatrajući potrese – izvore seizmičkih valova dotičem fizikalne koncepte rezonantne frekvencije i akceleracije kao glavnih uzročnika šteta nastalih tijekom potresa.

U radu su predstavljena dva radna listića za rad u grupama u kojima se obrađuju uzroci potresa i načini mjerenja potresa sa provjerom znanja te plan nastave za dva školska sata u kojima se obrađuje tema opasnosti od potresa.

# **Selected geophysical concepts in physics for secondary schools**

## **Abstract**

The aim of this study is introducing basic concepts of Physics into the high school curriculum and explain their application in seismology. The first part of the study focuses on transmission of mechanical waves on a wire – a user friendly analogy for familiarizing students with a concept of transmission of seismic waves in the Earth. The second part introduces notions of refraction, diffraction and reflection that are used in exploration of Earth's interior. Finally, the third part of the study focuses on earthquakes through elaboration of sources of seismic waves and notions of frequency and acceleration as main causes of earthquake related damage.

Attached are two samples of group exercises aimed at testing students' comprehension of earthquake causes and ways of measurement followed by lecture plan for two classes focusing on earthquake threat and risks.

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Osnovni fizikalni koncepti u seizmologiji</b> .....	<b>4</b>
2.1	<i>Mehanički valovi</i> .....	5
2.1.1	Nastanak i širenje mehaničkih valova .....	6
2.1.2	Jednadžba progresivnog harmonijskog vala .....	10
2.1.3	Refleksija i transmisija valova.....	11
2.1.4	Vlastiti načini titranja .....	13
2.2	<i>Seizmički valovi</i> .....	16
2.2.1	P i S valovi.....	16
2.3	<i>Snellov zakon</i> .....	21
2.3.1	Valovodi.....	22
2.3.2	Huygensov princip i difrakcija .....	24
2.4	<i>Površinski valovi</i> .....	26
<b>3</b>	<b>Istraživanje unutrašnjosti Zemlje</b> .....	<b>28</b>
3.1	<i>Refrakcijska seizmologija</i> .....	28
3.2	<i>Refleksijska seizmologija</i> .....	32
3.2.1	Zemljina kora .....	33
3.3	<i>Proučavanje vremena putovanja prostornih valova</i> .....	36
3.3.1	Faze prostornih valova i otkriće jezgre.....	37
3.3.2	Struktura plašta .....	40
3.3.3	Vizualizacija prostornih valova .....	43
<b>4</b>	<b>Potresi</b> .....	<b>45</b>
4.1	<i>Seizmička opasnost i rizici</i> .....	46
4.2	<i>Potresno inženjerstvo</i> .....	49
	<b>METODIČKI DIO</b> .....	<b>54</b>
	<i>Radni listić broj 1 – UZROCI POTRESA</i> .....	54
	<i>Radni listić broj 2 – MJERENJE POTRESA</i> .....	59

<i>Nastavni sat</i> .....	70
<i>Potresi: Uči od prošlosti, pripremi se za budućnost</i> .....	70
<b>5 Zaključak</b> .....	75
<i>Popis korištenih izvora</i> .....	77

# 1 Uvod

Teško je zamisliti pojmove zanimljivije od strukture i evolucije planeta koji se otkrivaju u dramatičnim fenomenima poput potresa. Moj je cilj sagledati ih preko odabranih fizičkih koncepata iz područja seizmologije, jedne od znanosti o Zemlji. Seizmologija se definira kao znanost o potresima i s njima povezanim fenomenima, odnosno kao znanost koja između ostalog proučava širenje elastičkih valova kroz Zemlju.

Mnogi učenici zaziru od fizike valova. Seizmologija stoga pruža dobar način za uvođenje određenih koncepata fizike valova jer primjenjuje one pojave koje bi se bez jasne primjene mogle smatrati kao nejasne i apstraktne ideje. Seizmički valovi prikazuju pojave poput refleksije, refrakcije, difrakcije i disperzije korištene u istraživanju Zemlje. Potresi demonstriraju koncepte poput čvrstih tektonskih ploča, naprezanja i deformacije, te konvekcije u plaštu. Stoga je seizmologija pravi način za proučavanje osnovnih fizikalnih koncepata u nastavi fizike za srednje škole.

Cilj ovog rada je uvesti ključne fizikalne koncepte i njihovu primjenu u predstavljenom razmatranju.

Prije no što krenemo s razmatranjem, vrijedi ukratko navesti neke načine i metode koje seizmologija koristi u proučavanju Zemlje. Seizmologija je glavni alat za proučavanje unutrašnjosti Zemlje zbog toga što je jako mali dio planeta dostupan izravnom promatranju [2]. Većina stanovništva živi u urbanim sredinama i ne sluti što se krije pod Zemljom. Podignemo li pločnik, što ćemo ugledati?

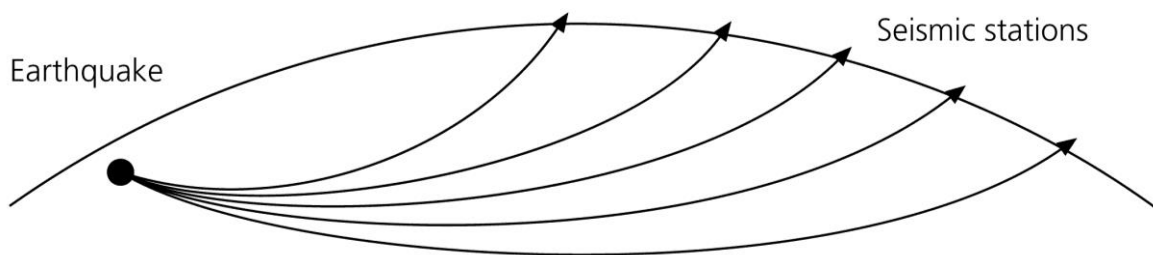
Plinske i vodovodne cijevi i električni kabeli prolaze kroz prvih 30 metara ispod površine. Tuneli i podzemne željeznice nalaze se do 60 m pod Zemljom. Na razini od 90m ispod površine gradska mreža polako nestaje. Čovjek se nikada nije spustio dublje od 4 km ispod površine Zemlje (osim bušenjem). Središte Zemlje nalazi se 6370 km dublje. [5]

Podaci o dubljim dijelovima, poput onih koji vode do centra Zemlje dobiveni su prvenstveno indirektnim metodama [2].

Seizmologija se koristi za određivanje modela unutrašnjosti Zemlje i istraživanje raspodjele fizikalnih svojstava.

Vidjet ćemo kako nekoliko jednostavnih, ali moćnih koncepata daju veliki dio uvida u to kako se valovi šire i kako odgovaraju na različita fizikalna svojstva u Zemlji. Srećom, većina tih koncepata je analogna poznatim konceptima iz širenja svjetlosnih ili zvučnih valova. Kao rezultat, proučavanje Zemlje pomoću seizmičkih valova konceptualno je slično osjećanju svijeta oko nas korištenjem zvuka ili svjetla [2]. Na primjer, čitanje ovog rada omogućeno je primanjem svjetlosti koja se reflektira od papira. Vidimo boje jer svjetlost ima različite valne duljine, npr. nebo je plavo zato što određene valne duljine koje se raspršuju prevladavaju. Još bliža analogija je korištenje zvučnih valova pomoću kojih šišmiši, delfini i podmornice „vide“ svoje okruženje. Seizmolozi daju detaljne slike strukture Zemlje, baš kao što zvučni valovi (npr. ultrazvuk) i elektromagnetski valovi (npr. X-zrake) daju detaljnu sliku ljudskih tijela za potrebe medicine.

Poznato svojstvo svjetlosti je to da se ona lomi kad putuje između sredstava unutar kojih su im brzine različite. Stvari stavljene u vodu doimaju se iskrivljeno zbog svjetlosnih valova koji putuju puno sporije u vodi nego u zraku. U prizmama i lećama koristi se taj efekt zvan refrakcija ili lom. Ovase pojavodogađa i u Zemlji zato što brzine seizmičkih valova uglavnom rastu s dubinom [2]. Zrake vala lome se od vertikale jer idu dublje u Zemlju (gdje je veća brzina valova), a nakon najdublje točke staze vraćaju se na površinu (slika 1.1.). Staze vala koriste se da bi se odredile promjene seizmičkih brzina i iz toga nešto naučilo o promjenama sastava i fizikalnih svojstva sredstava s dubinom u Zemlji [2].



*Slika 1.1. Staze seizmičkih valova u Zemlji pokazuju efekte porasta seizmičkih brzina s povećanjem dubine. (Stein and Wysession, 2003).*

Baš kao što se valovi svjetla reflektiraju na zrcalu, seizmički se valovi reflektiraju na granici duž koje se fizikalna svojstva mijenjaju kao što je npr. granica između Zemljinog plašta i kore. Zbog toga što amplitude reflektiranih i transmitiranih seizmičkih valova ovise o brzini i gustoći sredstava sa svake strane granice, analiza seizmičkih valova iznosi podatke o prirodi granica [2]. Osim refrakciji i refleksiji, valovi podliježu i



difrakciji. Baš kao što zvuk skreće iza ugla zgrade, dopuštajući nam da čujemo ono što ne vidimo, seizmički valovi skreću iza „prepreke“ kao što je Zemljina jezgra.

Osnovni podaci za ovo istraživanje su seizmogrami, zapisi gibanja tla kao rezultata prispijelih reflektiranih, refraktiranih i difraktiranih seizmičkih valova. Seizmografi imaju ugrađeno precizno mjerenje vremena kako bi se moglo odrediti vrijeme putovanja valova od žarišta potresa do površine Zemlje. Budući da je gibanje tla vektor, uglavnom se bilježe tri različite komponente (sjever-jug, istok-zapad, gore-dolje). [2]

Prema tome, iako se seizmogrami na početku doimaju kao jednostavne valovite linije, oni sadrže interesantne i korisne informacije.

## 2 Osnovni fizikalni koncepti u seizmologiji

Započet ćemo razmatranje seizmičkih valova u Zemlji iznošenjem dvaju osnovnih pitanja. Prvo, što u fizici čvrste Zemlje dopušta valovima da se kroz nju rasprostiru? Drugo, kako rasprostiranje seizmičkih valova ovisi o prirodi materijala unutar Zemlje?

Vidjet ćemo da se seizmički valovi šire kroz Zemlju zbog sredstva unutar nje, kroz čvrsto tijelo, te da mogu podlijeći unutarnjoj deformaciji sredstva. Kao posljedica toga, potresi i drugi poremećaji proizvode seizmičke valove, koji sa sobom iz unutrašnjosti Zemlje donose informacije o izvoru valova i sredstvu kroz koji se rasprostiru [2].

Za motivaciju, prvo proučavamo rastegnutu žicu, jednostavan fizikalni sustav koji valove na žici dovodi u analogiju sa seizmičkim valovima u Zemlji. Kao i kod čvrste Zemlje, deformacija žice stvara pomake koji su funkcije prostora i vremena. Brzina širenja valova duž žice ovisi o fizikalnim svojstvima žice na način sličan onome kod valova u Zemlji [2]. Također i reakcije mehaničkih valova na promjene fizikalnih svojstava žice su analogne onima koje se događaju kod valova u Zemlji.

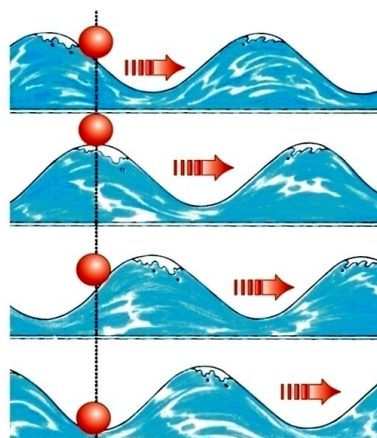
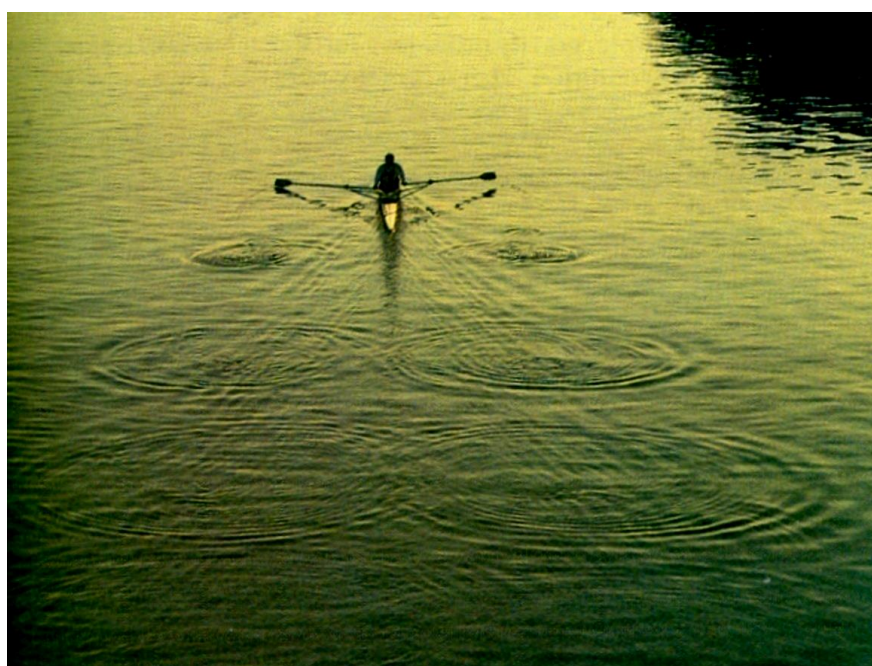
Nakon promatranja žice, otkrit ćemo osnovne koncepte u fizici čvrste Zemlje. Uvest ćemo pojam napetosti, koji opisuje sile koje djeluju unutar deformiranog krutog sredstva i deformacije. Potom ćemo istražiti odnos između ovih veličina i pokazati da pomaci unutar materijala mogu biti opisani funkcijom prostora i vremena. Osim toga, vidjet ćemo kako se dvije vrste seizmičkih valova, longitudinalni (P) i transverzalni (S), šire.

Zatim ćemo uvesti koncept valnog širenja u Zemlji stavljajući naglasak na to kako se valovi ponašaju kada naiđu na promjene u fizikalnim svojstvima sredstva kojim se šire. Ovi nam koncepti daju alate za poglavlje 3 u kojem istražujemo kako se seizmički valovi koriste u proučavanju unutrašnjosti Zemlje, te poglavlje 4 gdje se opisuje kako se seizmički valovi koriste za proučavanje potresa.

Iako se koncentriramo na seizmičke valove, puno koncepata je slično onima kod drugih tipova valova, tako da ćemo puno puta potezati analogiju sa sličnim ponašanjem svjetla, vode i zvučnih valova.

## 2.1 Mehanički valovi

Dva su načina na koja se energija može prenositi s jednog mjesta na drugo: gibanjem čestica (tijela) i valovima. Mehanički val je pojava prijenosa energije koja se odvija širenjem deformacije u nekom sredstvu, a da se sredstvo kao cjelina ne giba [1]. Mehanički valovi, za razliku od elektromagnetskih valova, ne mogu se širiti u praznom prostoru. Oni se mogu širiti samo sredstvom izgrađenim od čestica koje po svojoj električnoj naravi međudjeluju elastičkim silama.



Valovi na vodi

Slika 2.1. Valovi na vodi (Brković, 2004).

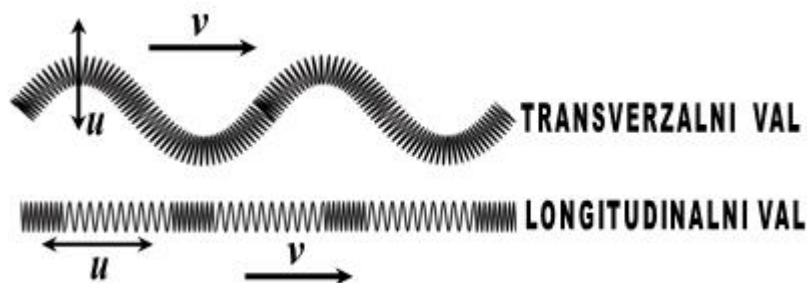
### 2.1.1 Nastanak i širenje mehaničkih valova

Mehanički val ne može nastati ni iz čega. Potreban mu je, osim sredstva kojim bi se širio, i izvor, odnosno mjesto u kojem sredstvu dovodimo energiju. U elastičkom sredstvu sve su čestice međusobno povezane silama, pa jednom kada dovedemo energiju u sredstvo, pomak jedne čestice od ravnotežnog položaja uzrokuje i pomak drugih čestica i tako val napreduje kroz sredstvo. Svaka čestica sredstva je jedan harmonijski oscilator koji počinje titrati kada do njega stigne poremećaj, dakle nešto kasnije nego prethodna čestica [1].

Prema tome razlikujemo dvije vrste mehaničkih valova [1]:

1. *transverzalne valove*
2. *longitudinalne valove*

Transverzalni valovi nastaju kad čestice sredstva titraju okomito na smjer širenja vala, a longitudinalni kad čestice titraju u smjeru širenja vala [1] (slika 2.2.).



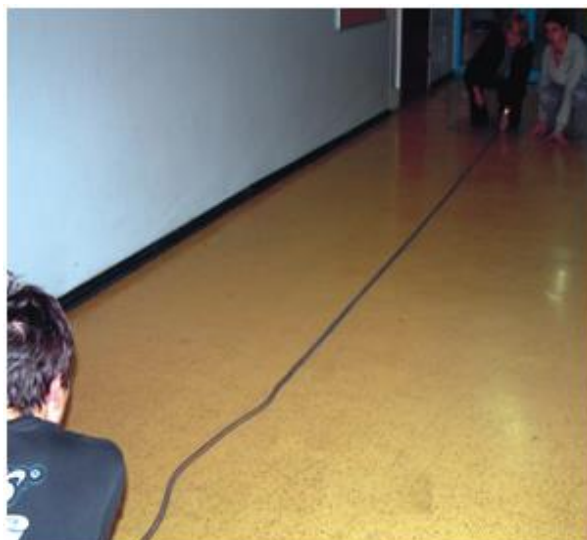
Slika 2.2. Vrste mehaničkih valova. (Brković, 2004).

Zbog inercije, deformacija se ne prenosi trenutačno, nego nekom konačnom brzinom koju nazivamo *faznom brzinom*  $v$ . Čestice pri tome ne putuju već titraju oko svog ravnotežnog položaja nekom *brzinom titranja*  $u$ . Zbog toga treba razlikovati *brzinu širenja vala*  $v$  kroz sredstvo od brzine titranja čestica  $u$  oko ravnotežnog položaja. [1]

Sljedećim ćemo pokusom pokazati kako mehanički valovi nastaju i kako se šire. Istražit ćemo o čemu ovisi brzina širenja vala, te na kraju za dani oblik vala i matematički opisati širenje vala.

## Pokus

Istražimo kako se duž opruge prostire poremećaj koji nastaje jednokratnim udarcem na jednom kraju opruge (izvoru vala). Oprugu položimo na pod i jedan kraj čvrsto držimo (ili učvrstimo), dok drugi rastežemo, pa se napetost opruge može mijenjati. Vrpcom ili papirićem negdje na sredini označimo jedan namotaj opruge. Na neučvršćenom kraju oprugu kratko udarimo okomito na



Slika 2.3. Širenje pulsa elastičnom oprugom. (Brković, 2004).

njenu duljinu, i promatramo širenje poremećaja duž opruge (sl.2.3.). Poremećaj se giba od jednog kraja do drugoga dok označeni dio opruge titra gore-dolje (transverzalno). Kroz oprugu možemo poslati i drugi tip poremećaja (longitudinalni) tako da je malo stisnemo ili rastegnemo. Tada će papirić titrati oko ravnotežnog položaja paralelno sa smjerom širenja pulsa tj. lijevo-desno. [1]

Izvedimo različite tipove pulsova, s većom i manjom amplitudom. Ovisi li brzina poremećaja o napetosti opruge?

Korištenjem 2. Newtonovog zakona, jednostavnim računom možemo doći do izraza za brzinu širenja transverzalnog vala [1]:

$$v_t = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (1)$$

pri čemu je  $\mu$  masa po jedinici duljine, a  $F$  sila napetosti.

Budući da napetost pruža silu koja nastoji vratiti bilo koji pomak od ravnotežnog položaja, veća napetost daje veću akceleraciju i stoga brže širenje vala. Drugim riječima, zbog toga što se gustoća pojavljuje u nazivniku, povećanje gustoće uzrokuje smanjenje akceleracije i sporije širenje vala.

Brzina longitudinalnog vala zbog promjene volumena prilikom širenja tog vala ovisi i o modulu nestlačivosti  $K$  i dana je sljedećom relacijom [2]:

$$v_l = \sqrt{\frac{K + 1,33\mu}{\rho}} \quad (2)$$

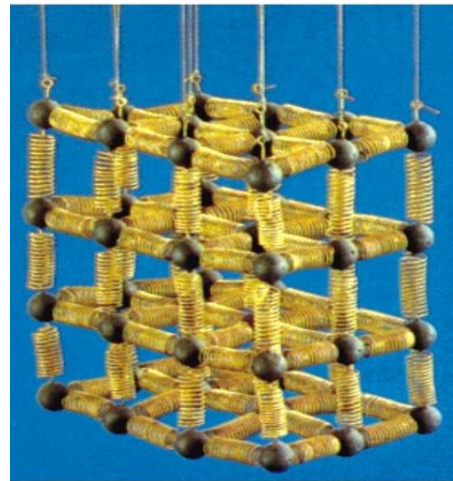
pri čemu je  $\rho$  gustoća sredstva.

Činjenica da brzina ovisi o gustoći predstavlja razlog zašto je proučavanje valova na žici korisna analogija za seizmičke valove u Zemlji. Jedan od zadataka seizmologije je proučavanje sastava Zemlje. U tu svrhu mjerimo vrijeme koje valovima treba da prijeđu udaljenost od izvora do prijarnika, iz čega nalazimo brzinu kojom su se valovi širili i tako učimo o svojstvima Zemlje.

Ako se tijelo nakon prestanka djelovanja vanjskih sila vraća u prvobitni oblik kažemo da je elastično. Kada tijelo zbog djelovanja vanjskih sila zadržava trajnu deformaciju (promjenu oblika i dimenzija) nazivamo ga plastičnim. [1]

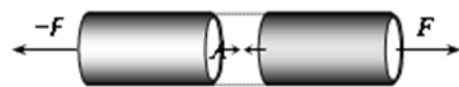
Čvrsto se tijelo može prikazati modelom tako da zamislimo da su molekule međusobno povezane oprugama koje imaju ulogu međumolekulskih sila (sl. 2.4.). Ovisno o djelovanju vanjske sile opruge se rastežu ili stežu. [1]

Nadalje, *Hookeov zakon*\* kaže da ako na neko tijelo djelujemo silama tako da ga istežemo ili stežemo tada možemo reći da se tijelo nalazi u napregnutom stanju. [1] To se stanje na jednostavan način može i matematički opisati.



Slika 2.4. Model atoma u čvrstom tijelu. (Brković, 2004.).

Promotrimo najjednostavniji slučaj napregnutog štapa na koji uzduž njegove osi djeluju sile  $F$  i  $-F$  koje ga istežu ili stežu (sl.2.5.). Svaki presjek  $A$  štapa je napregnut. Na presjek djeluju dvije jednake sile suprotnih smjerova.



Slika 2.5. Štap na koji djeluju dvije sile suprotnih smjerova. (Brković, 2004.).

\* Robert Hooke (1635.-1703.), engleskiznanstvenik.

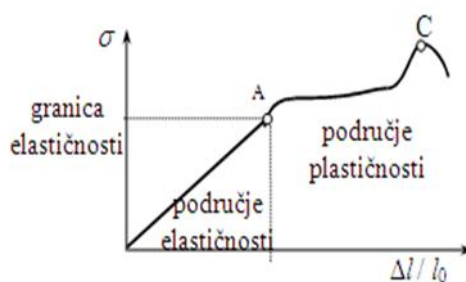
Uvedemo pojam *napetosti* kao silu na jediničnu površinu presjeka A [1]:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Sila koja djeluje na tijelo izaziva deformaciju tijela. Deformacija čvrstog tijela je promjena njegovih dimenzija i volumena, obično popraćena promjenom oblika tijela i izražava se odnosom promjene dimenzije i prvobitnih dimenzija tijela. Taj omjer nazivamo *relativnom deformacijom*. [1] Tako na primjer kod žice duljine  $l_0$  koja se pod djelovanjem sile produži za  $\Delta l$  relativna deformacija iznosi  $\Delta l/l_0$ . Na sličan način može se kod kompresije (stlačivanja) nekog tijela sa svih strana promijeniti volumen za  $\Delta V$ . Tada je relativna deformacija  $-\Delta V/V_0$ . Znak minus uzimamo zbog toga jer se volumen tijela smanjuje ako se sila povećava. Hooke je ustanovio da je kod elastičnih tijela napetost proporcionalna deformaciji. [1]

No Hookeov zakon vrijedi samo do određene granice prilikom napreznja materijala.

Ova granica nazivase granica elastičnosti i nalazi se nešto ispod područja plastičnosti [1] (sl. 2.6.). Proces deformacije uzorka trebao bi se analizirati s gledišta strukture čvrstog tijela.



Slika 2.6. Ovisnost granice elastičnosti o relativnoj deformaciji. (Brković, 2004.).

Na ravnom dijelu do točke A deformacija se odvija uglavnom na račun povećanja razmaka između atoma uzorka. Nakon uklanjanja napetosti atomi se vraćaju u svoje ravnotežne položaje. Ako je napreznje veće od granice elastičnosti javlja se uz elastičnu i plastična deformacija. Kad prestanemo s napreznjem uzorak se više ne vraća u prvobitno stanje već se opažaju zaostale tzv. rezidualne deformacije [1]. Pri još većem napreznju raste broj defekata te dolazi do „očvršćivanja materijala“ – prikazano kao „grba“ od A do C i konačno do pucanja u točki C.

To svojstvo materijalaglavl原因 jeuzrok potresa u Zemlji.

### 2.1.2 Jednadžba progresivnog harmonijskog vala

Oblik vala kojeg proučavamo naziva se harmonijski ili sinusoidalni. S obzirom na to da postoji pravilnost u širenju tog vala i titranja čestica, možemo ga na jednostavan način i matematički opisati.

Elongacija čestice izvora dana je jednadžbom:

$$y = y_0 \sin(\omega t + \theta_0)$$

i izraženo periodom  $T$ :

$$y = y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \theta_0\right)$$

Elongacija čestice koja se nalazi na nekoj udaljenosti  $x$  u bilo koje vrijeme  $t$ , zbog vremenske razlike  $\tau$  njenog titranja prema titranju izvora, može se napisati:

$$y = y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} (t - \tau) + \theta_0\right)$$

Ako uvrstimo vrijednost za vrijeme  $\tau$  dobijemo:

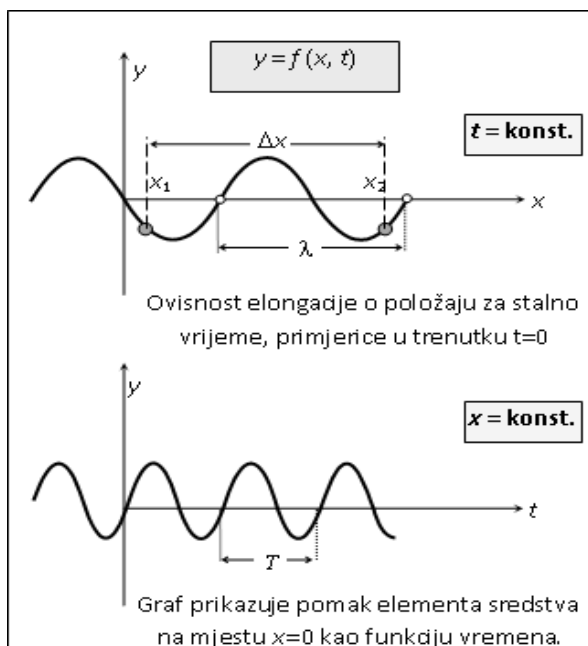
$$y = y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{vT} x + \theta_0\right)$$

Budući da je  $vT = \lambda$  možemo jednadžbu progresivnog vala pisati kao:

$$y = y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} x + \theta_0\right)$$



Iz jednadžbe vala vidimo da je elongacija  $y$  bilo koje čestice funkcija i položaja  $x$  i vremena  $t$ , [1] što je prikazano na slici 2.7. Možemo odabrati točku na žici i zabilježiti seizmogram („žicogram“) pomaka kao funkciju vremena. Za razliku od njega, „zamrznuta“ slika vala na žici pokazuje pomak kao funkciju prostora u određenom vremenu. Ove se ideje mogu primijeniti i u drugim valnim fenomenima, kao što su vodeni valovi koji dolaze na obalu.



Slika 2.7. Grafički prikaz funkcija prostora i vremena. (Brković, 2004).

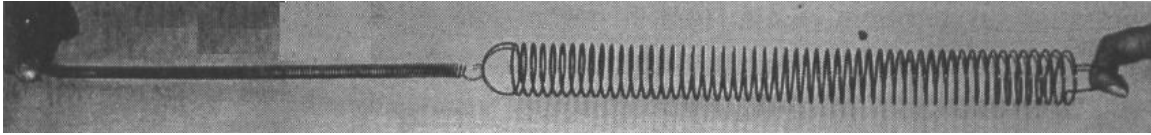
Spasilac koji gleda preko vode u nekom trenutku, vidi valove koji se mijenjaju u prostoru. Plivač, na mjestu u vodi susreće valove koji se mijenjaju u vremenu. Obojica promatraju, na drugačije načine, valove koji se mijenjaju u prostoru i vremenu. Vidjet ćemo da isti koncepti vrijede i za seizmičke valove.

### 2.1.3 Refleksija i transmisija valova

Do sad smo opisivali valove koji putuju duž žice jednakom brzinom. Kako bismo to mogli koristiti kao analogiju za Zemlju, unutar koje se fizikalna svojstva mijenjaju s dubinom, trebamo proučiti valove na žici s promjenljivim svojstvima duž njene duljine. Najjednostavnija situacija je žica sačinjena od dijelova međusobno različitih svojstava. Tu ćemo pojavu najbolje prikazati sljedećim pokusom.

#### Pokus

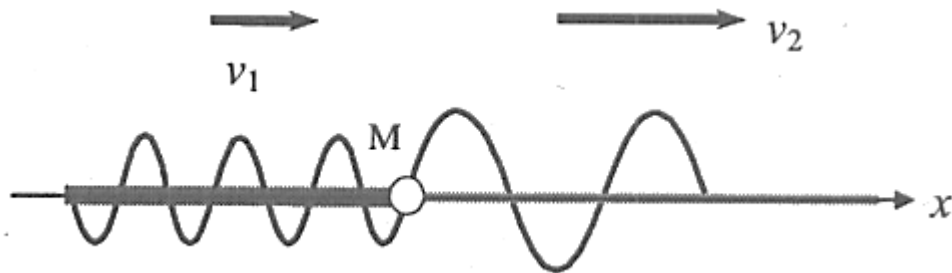
Povežite dvije opruge različitih konstanti opriranja. Krajeve opruga drže dvije osobe (sl.2.8.). Jedna osoba pošalje kratkotrajni transverzalni poremećaj (puls) koji se širi kroz opruge. Zatim druga osoba pošalje jednak puls. Promatrajte širenje pulsa kroz obje opruge. Što zamjećujete?



Slika 2.8. Sustav spojenih opruga. (Brković, 2004).

Kako se širi puls kad prolazi s čvršće opruge veće konstante opiranja na oprugu manje konstante opiranja i obratno? Što se događa s brzinom širenja pulsa? Što se događa s amplitudom pulsa? Kakve su amplitude transmitiranih i reflektiranih pulseva po predznaku i veličini u oba slučaja? Kvalitativna razmatranja svih slučajeva refleksije i transmisije valova mogu se izložiti na sljedeći način:

Promotrimo žicu različitih presjeka koja je napeta silom  $F$  (sl.2.9.).



Slika 2.9. Žice različitog poprečnog presjeka sa spojnicom u točki M. (Brković, 2004).

Neka je žica lijevo od točke M veće površine presjeka, a desno od te točke manje površine presjeka. Neka se val širi s lijeva na desno. Budući da je brzina transverzalnog vala na žici:  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ , a sila  $F$  je jednaka u cijeloj žici, vidimo da zbog različitih masa na jediničnoj duljini ( $\mu$ ) brzina  $v_1$  u području deblje žice mora biti manja od brzine  $v_2$  u tanjem dijelu žice [1]. Zbog zakona očuvanja energije, amplitude u tanjem dijelu žice moraju biti veće<sup>†</sup>. Ovo povećanje amplitude djeluje kao nova deformacija i val se djelomično reflektira u točki M [1]. Iste pojave mogu se promatrati i na žicama jednakih presjeka, ali izrađenim od različitih materijala, odnosno različitih gustoća  $\rho$ .

U opisu ovih pojava uvode se nove veličine: koeficijent refleksije i koeficijent transmisije. Koeficijent refleksije je omjer amplituda reflektiranog i upadnog vala, dok je

<sup>†</sup>Analogni fenomen se događa na plažama, gdje valovi rastu u amplitudi kako se približavaju obali zato što je valna brzina proporcionalna korijenu morske dubine [2].

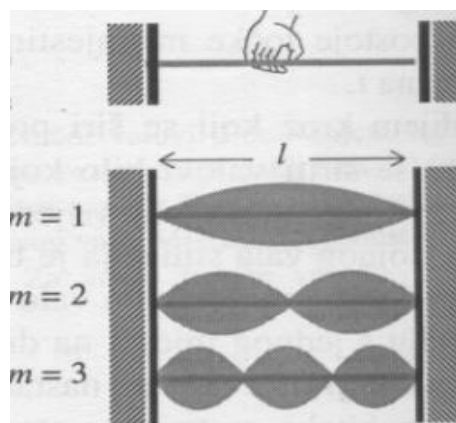
koeficijent transmisije omjer amplituda transmitiranog i upadnog vala [2]. U glavnim ćemo crtama pokazati kako relativan iznos reflektirane i transmitirane energije (vala) ovisi o razlici u svojstvima sredstava na spojnici.<sup>‡</sup> Koeficijenti refleksije i transmisije ovise o umnošku gustoće i brzine za svaku žicu  $\rho_i v_i$ , veličini koja se naziva akustička impedancija [2]. Ako impedancija dijela 2 nadilazi impedanciju dijela 1, valovi koji dolaze iz dijela 1 u dio 2 reflektiraju se sa suprotnim polaritetom (granica djeluje kao čvrsti kraj), dok se valovi koji idu drugim putom reflektiraju bez promjene polariteta (granica djeluje kao slobodni kraj). Amplituda transmitiranog i reflektiranog vala ovisi o razlici akustičkih impedancija dvaju sredstava na granici [2]. Stoga se amplitude refleksija od granica mogu koristiti u određivanju promjena u fizikalnim svojstvima.

Činjenica da se amplitude valova na žici mijenjaju kako se reflektiraju i transmitiraju na granicama gdje se svojstva žica mijenjaju prikazuje koncept važan za seizmičke valove u Zemlji.

#### 2.1.4 Vlastiti načini titranja

Do sada smo razmatrali širenje valova na žici. Dodatni uvid u širenje valova može se dobiti razmatranjem stojnih valova, koji su znani kao normalni modovi ili vlastiti načini titranja.

Zatitramo li napetu žicu duljine  $l$  učvršćenu na oba kraja (sl.2.10.), nastalo valno gibanje širi se žicom, dolazi do njenog kraja i reflektira se u suprotnom smjeru pomaknuto u fazi za  $\pi$  ili  $\frac{1}{2} \lambda$ . Umjesto progresivnog vala dobivamo stojni val. Žica je na krajevima učvršćena i to su čvorovi stojnog vala ( $x = 0$ ;  $x = l$ ). [1]



Slika 2.10. Normalni modovi žice sa čvrstim krajevima. (Brković, 2004).

<sup>‡</sup>Simultana refleksija i transmisija valova je analogna svijetljenju baterijskih lampi izvan prozora po noći; vidimo svijetlost reflektiranu o prozor, dok netko vani vidi svijetlost transmitiranu kroz prozor [12].

U tom slučaju moguće su samo određene valne duljine, tzv. diskretne valne duljine i za duljinu žice  $l$  iznose:

$$\frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots$$

ili općenito:

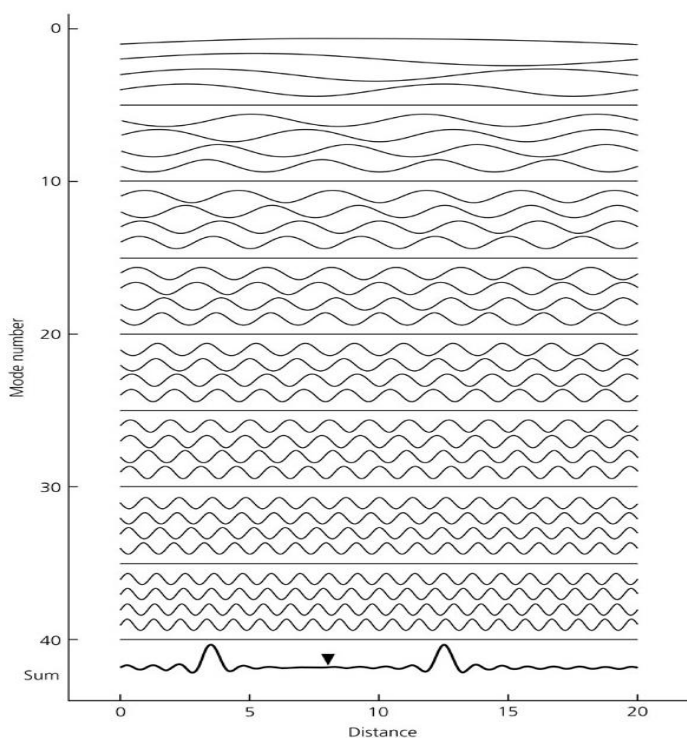
$$l = m \frac{\lambda}{2}; m = 1, 2, 3, \dots \Rightarrow \lambda_m = \frac{2l}{m}$$

Kažemo da su valne duljine kvantizirane. Frekvencije kojom titra napeta žica, tzv. vlastite frekvencije određene su brzinom širenja vala ( $v = \lambda_m f_m$ ) [1]:

$$f_m = m \frac{v}{2l}$$

Putujući val može se izraziti kao ponderirani zbroj normalnih modova žice, pa je to zbroj tzv. svojstvenih funkcija, svaka ponderirana amplitudom  $A_n$  i titra na svojoj svojstvenoj frekvenciji  $\omega_n$ . Bilo koji određeni skup valova dan je amplitudama  $A_n$ , koje su ponderirani faktori tzv. svojstvenim funkcijama. [2]

Slika 2.11. dobivena na ovakav način, pokazuje kako se prvih 40 modova žice sa čvrstim krajevima i jednakim brzinama zbrajaju i daju progresivne valove. Zbroj modova pokazuje dva vala, jedan se širi udesno i jedan ulijevo, u predviđenim točkama. Stoga, zbroj modova daje progresivne valove. Uz dodatak progresivnim valovima, vidimo male oscilacije duž žice zbog toga što smo zbrojili samo prvih 40 modova.



Slika 2.11. Pomak na žici sa čvrstim krajem izveden korištenjem formulacije normalnih modova. (Stein and Wysession, 2003).

Sada imamo dva načina razmišljanja o pomaku na žici kao funkciji vremena: kao širenje valova ili kao normalni modovi. Nijedan nije realniji od drugoga - oba su način predstavljanja kako pomak napreduje. Stoga uspoređivanjem tih dvaju načina dobivamo interesantan uvid u problematiku. Na primjer, zamislimo proučavanje svojstava žice. U formulaciji progresivnog vala, mjerimo vrijeme putovanja i iz toga određujemo brzinu. U formulaciji normalnog moda, mjerimo svojstvene frekvencije i na temelju toga određujemo brzine. Prema tome su svojstvene frekvencije analogne vremenu puta. [2]

Jednadžbenormalnih modova daju uvid u odnos između sredstva u kojem se val širi i izvora koji ga generira. Val je izražen kao zbroj tzv. svojstvenih funkcija ponderiranih s amplitudama koje ovise o izvoru. Fizikalna svojstva žice kontroliraju njegovu brzinu i prema tome njegove svojstvene frekvencije i prostorne svojstvene funkcije. Pomak slijedom bilo kojeg posebnog izvora odgovara različitom ponderiranju svojstvenih funkcija. Po toj analogiji i svojstvene frekvencije Zemljinih normalnih modova koristimo u proučavanju svojstava sredstva (Zemljine strukture), pomaka (određenog ponderiranja svojstvenih funkcija), te izvora (tipično potresa) koji su ih proizveli. [2]

## 2.2 *Seizmički valovi*

Istraživanje unutrašnjosti Zemlje pomoću seizmičkih valova složeno je, ne samo zbog mnoštva podataka koji se takvim osluškivanjem valova dobiju, već i zbog same njene veličine. Povoljna je okolnost da su energije izvora (uglavnom potresa) dovoljno velike pa valovi mogu doprijeti u svaki kutak Zemlje. Izbiju li na površinu, zadaća seizmologa je da ih zabilježe i utvrde što se s njima događalo za vrijeme njihova putovanja kroz unutrašnjost Zemlje.[3]

U takvim se istraživanjima primjenjuju posredno ili neposredno jednadžbe brzine valova (1) i (2). Njih je moguće primijeniti kada se pomoću poznatih laboratorijskih vrijednosti modula elastičnosti i gustoće želi izračunati brzina longitudinalnog i transverzalnog vala. No svrhovitije je krenuti obrnutim redom. Ako su poznate brzine valova kroz Zemlju, spomenute nam jednadžbe tada omogućuju da doznamo više pojedinosti o njezinoj gustoći u različitim dubinama. Stoga je jedan od glavnih zadataka odrediti brzine rasprostiranja prostornih valova. [3]

Osnovni podaci za određivanje brzine svakako su vrijeme koje je potrebno da val doputuje od izvora do svakog pojedinog prijarnika i duljina zrake vala.

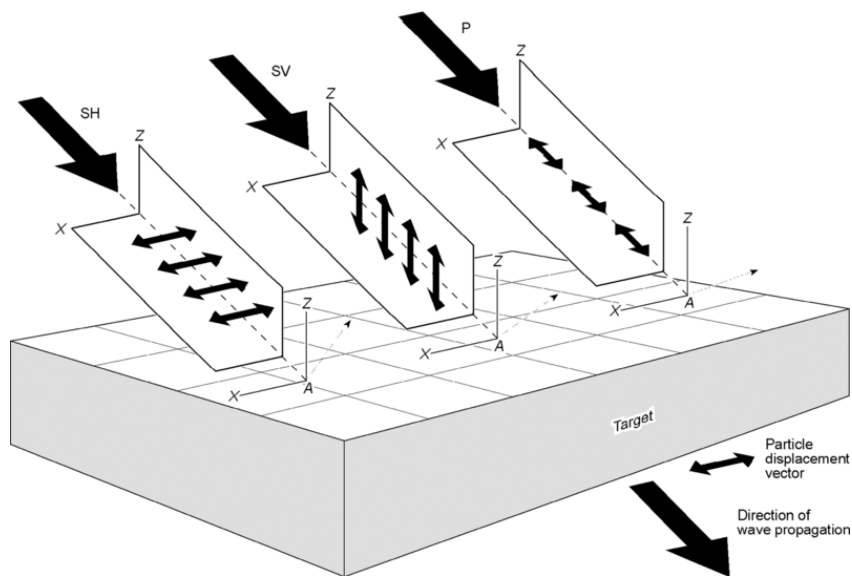
Vidjet ćemo kako se dolazi do vremena potrebnog vala da doputuje do prijarnika, te kako se ove vrste valova šire različito s brzinama koje ovise na različite načine o elastičnim svojstvima sredstva.

### 2.2.1 *P i S valovi*

P val je kompresijski (longitudinalni) val dok je S val smicajni (transverzalni).

U transverzalnim valovima čestice sredstva mogu titrati u beskonačno mnogo smjerova okomito na smjer širenja vala. Sličan primjer je elektromagnetski (EM) val. Ako želimo izdvojiti samo jedan smjer titranja EM polja EM vala, kao što je to slučaj sa česticama na žici, koristimo polarizator koji propušta titranje EM polja samo u jednom određenom smjeru. Tada za rezultatni val kažemo da je polarizirani. Kod S valova postoje dvije polarizacije: SV i SH koje imaju važnu ulogu u analizi seizmičkih valova. Ukratko ćemo opisati kako se te polarizacije određuju.

U realnoj primjeni seizmolozi često definiraju os  $z$  kao vertikalni smjer i orijentiranu ( $z-x$ ) ravninu duž kružnice koja spaja seizmički izvor i prijatelj. Ravni valovi koji direktno putuju od izvora do prijatelja se stoga šire u  $x-z$  ravnini. Smjer polarizacije smicajnih valova je prema tome definiran kao SV za smicajne valove s pomakom u vertikalnoj ( $x-z$ ) ravnini, i SH za horizontalno polarizirane smicajne valove s pomakom u smjeru  $y$ , paralelno sa Zemljinom površinom. Oba imaju pomak okomit na smjer širenja i druge polarizacije. [2] (sl. 2.12.).



Slika 2.12. Pomaci polja za širenja ravnih P i S valova u ( $x-z$ ) ravnini. (Stein and Wysession, 2003).

Seizmografi bilježe horizontalna gibanja u smjerovima sjever-jug i istok-zapad, koje rijetko odgovaraju točno SV i SH polarizacijama. Kao rezultat, podaci horizontalnih komponenta seizmograma su često rotirani. Ovaj smjer koji povezuje izvor i prijatelj, koji odgovara SV pomacima zove se *radijalan* smjer, pa se seizmogram rotiran u tom smjeru zove *radijalna* komponenta. Slično, ortogonalni smjer koji odgovara SH pomacima naziva se *transverzalni* smjer, pa se seizmogram rotiran u tom smjeru zove *transverzalna* komponenta. [2]

Budući da seizmografi bilježe komponente vektora pomaka tla, mogu se rotirati i dati komponente u novim koordinatnim sustavima koje nećemo razmatrati.

Definicija brzine P valova označene s  $\alpha$  je [2]:

$$\alpha = [(K + 4\mu/3)/\rho]^{1/2}$$

i brzina S valova označena s  $\beta$ :

$$\beta = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

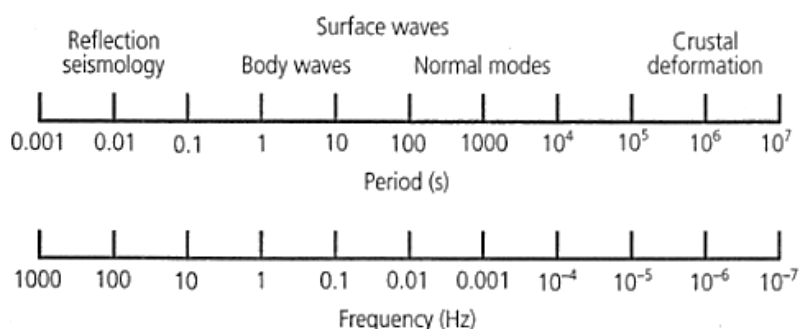
pokazuje da seizmički valovi ovise na različite načine o elastičkim konstantama materijala.

Modul smicanja  $\mu$  i modul elastičnosti  $K$  su pozitivne veličine, te P valovi putuju brže od S valova. Prema tome, prvi val koji stiže od potresa je uvijek kompresijski val. [2] Rezultat toga je povijesna nomenklatura u kojoj P originalno označava prvi pristižući - primarni val, dok S označava sekundarni val, koji isprva nije bio pridijeljen transverzalnom valu.

Da bismo dobili osjećaj za brzine valova, razmotrimo tipične vrijednosti za različite parametre. Zemljina kora je približno Poissonova krutina<sup>§</sup>, s elastičkom konstantom  $\mu=3 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ , prema tome za gustoću od  $3 \text{ g/cm}^3$  brzina P vala je  $5,5 \text{ km/s}$ . Slično, brzina S valova je  $3,2 \text{ km/s}$ . Stoga P valovi koji se šire sa brzinom  $5,5 \text{ km/s}$  i periodom od 2s imaju valnu duljinu 11km. Frekvencija je 0,5Hz i valni broj je  $(2\pi/11) 0,57 \text{ km}^{-1}$ . S druge strane, val s periodom od 10 s i istom brzinom ima valnu duljinu 55 km i frekvenciju 0,1Hz. [2]

Dugoperiodički valovi imaju veću valnu duljinu i manju frekvenciju.

„Seizmički spektar“ pokazuje seizmičke valove različitih frekvencija i tipova, kao što pokazuje slika 2.13.



Slika 2.13. Seizmički spektar pokazuje frekvencije na kojima se provode različite analize. (Stein and Wysession, 2003).

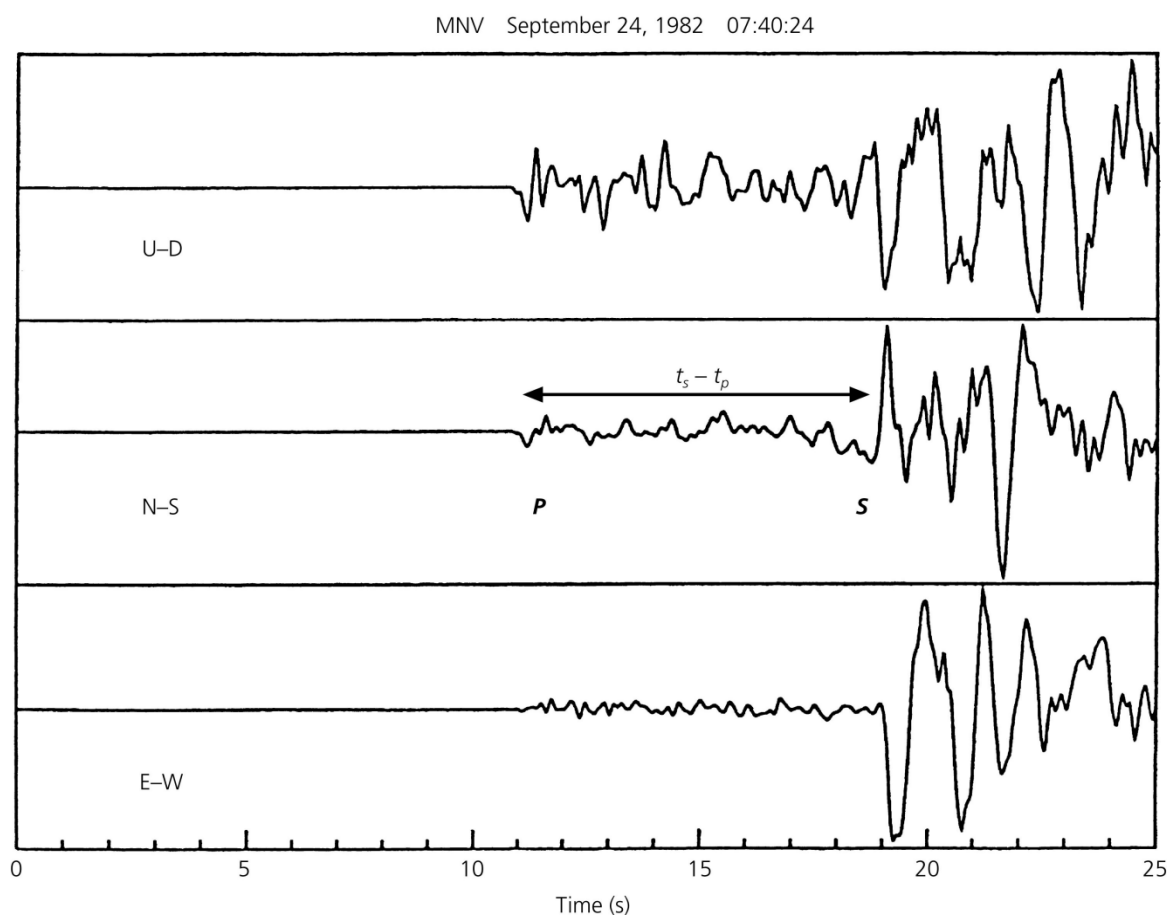
U svrhu proučavanja potresa obično se koriste periodi u intervalu od približno 0,1 s do više od 3000 s, ili frekvencije od 10 Hz do  $3 \cdot 10^{-4}$  Hz. Visokofrekventni valovi od 20 do 80 Hz proizvedeni eksplozijama ili drugim umjetnim izvorima koriste se u refleksijskoj

<sup>§</sup>Sredstvo koje je često dobra aproksimacija za čvrstu Zemlju.



seizmologiji u istraživanju Zemljine kore. Još veće frekvencije, 3-12 kHz, koje se šire uglavnom u oceanu koriste oceanolozi u mapiranju morskog dna. Na drugom dijelu spektra, gibanja tla s periodima većim od  $10^4$  s nastaju slijedom sporog gibanja ploča. [2]

Izvori potresa generiraju P i S valove, sa S valovima općenito značajno većih amplituda [2].



*Slika 2.14. Seizmogram s tri komponente od plitkog potresa magnitude 4.9 zabilježenog na udaljenosti 64 km od Mine, Nevada. (Stein and Wysession, 2003).*

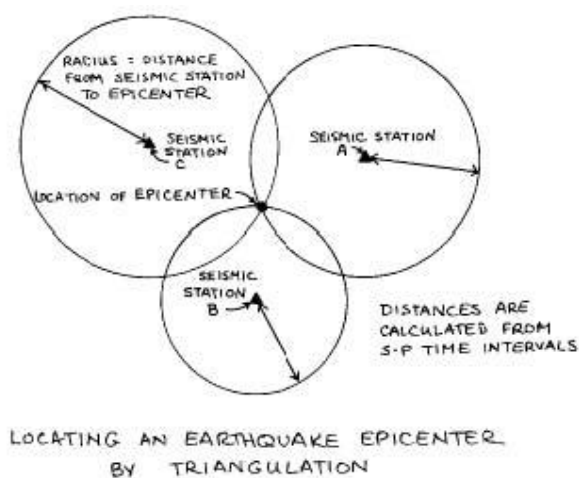
Slika 2.14. pokazuje različite tipove seizmograma: zapis plitkog potresa u Nevadi sa seizmičke postaje u krugu 100km od izvora. Vremena dolazaka P i S valova mogu se odrediti iz seizmograma. Vidjet ćemo da se s većim brojem takvih promatranja na različitim mjestima može odrediti mjesto i početno vrijeme potresa. Čak se i s jednom seizmičkom postajom može zaključiti nešto o mjestu potresa [2]. Iako se vrijeme dolaska seizmičkih valova ne može zamijeniti vremenom putovanja bez poznavanja trenutka kada se potres dogodio, nešto možemo odrediti iz same razlike vremena dolazaka P i S valova [2]. Za tipične vrijednosti kompresijskih i smicajnih valova u kori  $\alpha=5,5$  km/s i  $\beta=3,2$  km/s vremena potrebna da S i P valovi prijeđu udaljenost od  $x$  kilometara je

$$t_s = \frac{x}{3,2}, \quad t_p = \frac{x}{5,5}$$

Razlika u vremenima putovanja, koja je također i razlika u vremenima dolazaka,

$$t_s - t_p = x \left( \frac{1}{1,32} - \frac{1}{5,5} \right) = \frac{x}{7,6}$$

je stoga funkcija udaljenosti između izvora i prijammika. Budući da S val stiže oko 8 sekundi nakon P vala, potres je oko 60 km udaljen od prijammika. Ta se udaljenost slaže s onom dobivenom lociranjem pomoću vremena nailazaka faza seizmičkih valova s više seizmičkih postaja. Taj se račun provodi na jednostavan način. Oko svake se seizmološke postaje ucrtava kružnica sa središtem u postaji te radijusa jednakog gore navedenoj vijednosti  $x$  koja se određuje za svaku postaju posebno. U točki u kojoj se te kružnice sijeku nalazi se epicentar. Prema tome S-P metoda vremena putovanja daje procjenu udaljenosti seizmometra od potresa, ali ne iznos i azimut i iz toga lokaciju.\*\* Shematski, ova se metoda može shvatiti kao lociranje točke na karti gdje se presjecaju lukovi kružnica s prikladnim radijusima [2] (sl. 2.15.).



Slika 2.15. Osnovni principi triangulacije (određivanja epicentra potresa na temelju tri seizmološke stanice).

(<http://geoclass.wordpress.com/2009/09/21/odredivanje-epicentra-triangulacija/#comment-9>).

Što je više seizmoloških stanica, to je pozicija epicentra potresa preciznije određena. Sličan princip koristi se i prilikom GPS pozicioniranja [6].

\*\*\*\* Analogna metoda je korištena u procjeni udaljenosti udara groma. Ukoliko između bljeska groma i trenutka kada čujemo grmljavinu prođe 1 s, zaključujemo da je udar groma 340 m udaljen od nas.

Problem određivanja mjesta nastanka potresa je zapravo puno složeniji, jer se potresi ne događaju na površini Zemlje.

### 2.3 Snellov zakon

Put seizmičkog vala najčešće se predočava pomoću valne zrake, tj. linije okomite na valnu frontu. Svaki val koji dolazi do granice sa slojem različite brzine djelomično se reflektira, a djelomično se refraktira (lomi). [7]

Ovdje možemo primijeniti Snellov zakon iz optike, koji glasi [7]:

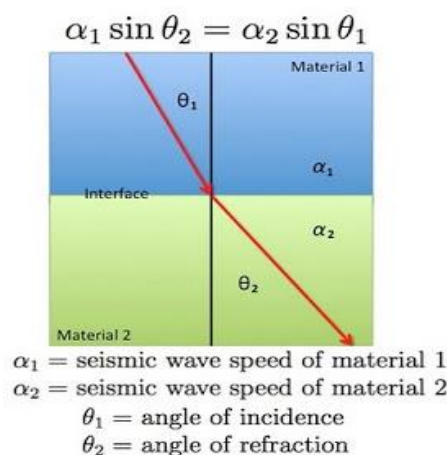
$$\frac{\sin \theta_1}{\alpha_1} = \frac{\sin \theta_2}{\alpha_2}$$

Za odbijenu (reflektiranu) zraku upadni kut jednak je izlaznom kutu,  $\theta_1 = \theta_2$ . Za refrakciju na granici slojeva iz Snellovog zakona slijedi [7]:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

Ako je brzina  $\alpha_2 > \alpha_1$ , zraka se lomi od okomice.

Ako je brzina  $\alpha_2 < \alpha_1$ , zraka se lomi k okomici (sl.2.16.). [7]



Slika 2.16. Snellov zakon.

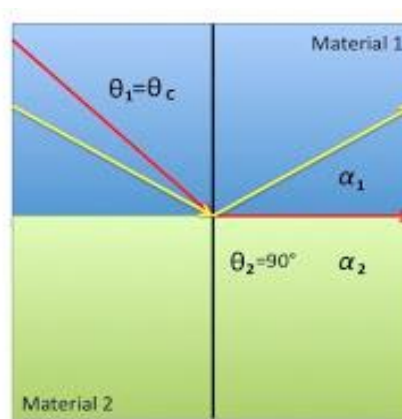
(<http://lifeonshatsky.blogspot.com/2010/08/seismic-refraction>).

Kad je upadni kut  $\theta_1$  takav da kut  $\theta_2$  dostigne vrijednost  $90^\circ$ , dolazi do pojave tzv. *totalne refleksije*, te se val širi po gornjoj granici dubljeg sloja brzinom  $\alpha_2$ . On zatim stvara val koji se širi brzinom  $v_1$  kroz plići sloj i vraća se na površinu. Upadni kut kod kojeg dolazi do refrakcije naziva se kritičnim kutom  $\theta_c$  i on se lako odredi iz Snellovog zakona [7]:

$$\theta_2 = 90^\circ \rightarrow \sin \theta_2 = 1 \rightarrow \sin \theta_c = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

pri čemu  $\theta_c$  – kritični kut, ovisi o omjeru brzina. Takav val putuje brzinom  $\alpha_2$  duž granice dubljeg sloja i izlazi na površinu pod istim kutom  $\theta_c$ . [7]

Zanimljivo je to da refraktirani val dolazi na prijammnik prije reflektiranog vala, iako mu je put veći (sl.2.17.).<sup>††</sup>



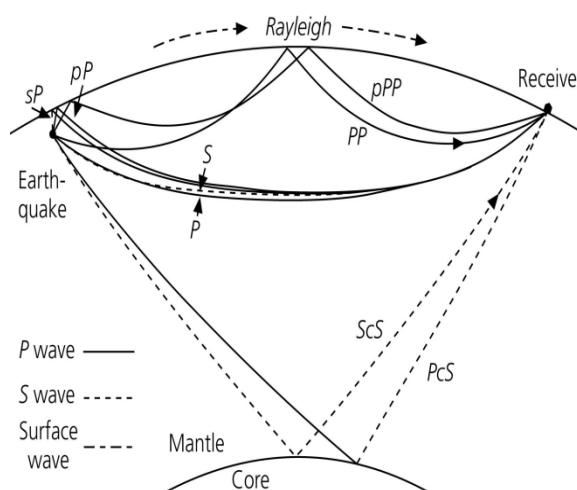
Slika 2.17. Totalna refleksija.

(<http://lifeonshatsky.blogspot.com/2010/08/seismic-refraction-and-reflection.html>).

### 2.3.1 Valovodi

Snellov zakon je koristan u seizmologiji, jer seizmološki valovi prolaze kroz različite slojeve (strukture) u unutrašnjosti Zemlje, koji se odlikuju različitim fizičkim svojstvima sredstva, uključujući efekte sastava, temperature i tlaka. [2]

Općenito, brzina raste s dubinom, pa se seizmički valovi okreću prema horizontali kako idu u dubinu. Konačno zraka „dohvati dno“ (minimum staze vala), okreće se prema gore i izbija na površinu (sl.2.18).

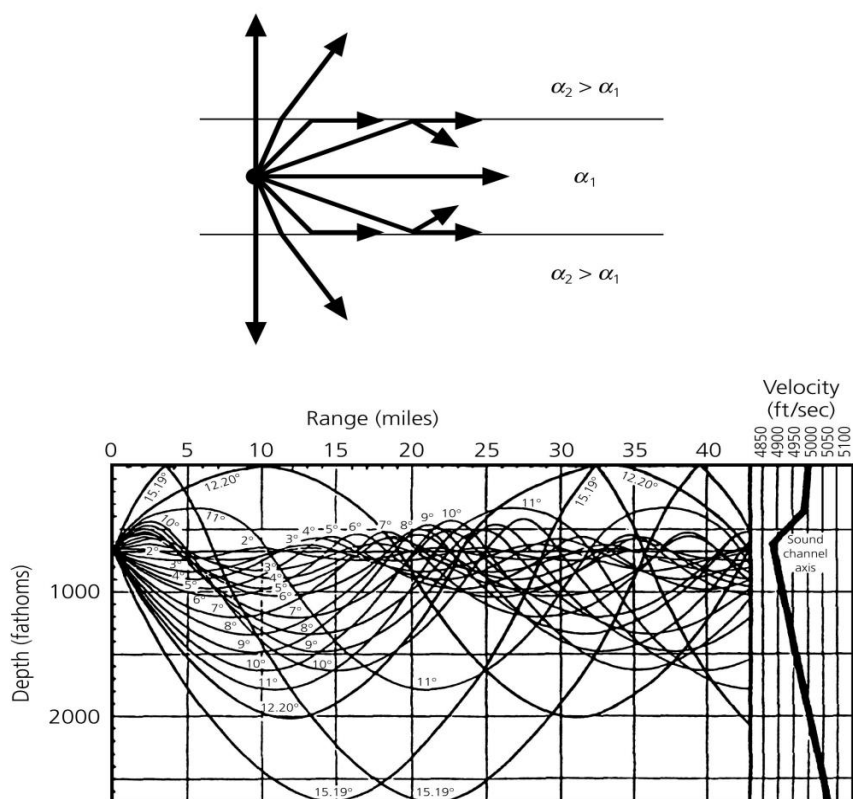


Slika 2.18. Staze vala za seizmičke faze prispjele na seizmogram. (Stein and Wysession, 2003).

Takva putanja zrake može se modelirati korištenjem Snellovog zakona čak unutar puno slojeva, ili u modelu akomodirajućih brzina koje se mijenjaju slabo (sporo) s dubinom i tako daju glatku putanju zraka [2]. Putanja zrake i vrijeme putovanja duž nje pružaju informacije o raspodjeli seizmičkih brzina i fizičkih svojstava s dubinom.

<sup>††</sup> To je analogno situaciji kada jedan automobil prestigne drugi. Onaj koji prestigne prolazi veći put, ali zbog veće brzine stiže prvi.

Valja naglasiti da u nekim područjima u unutrašnjosti Zemlje brzina seizmičkih valova pada s dubinom, npr. u astenosferi i unutarnjoj jezgri.

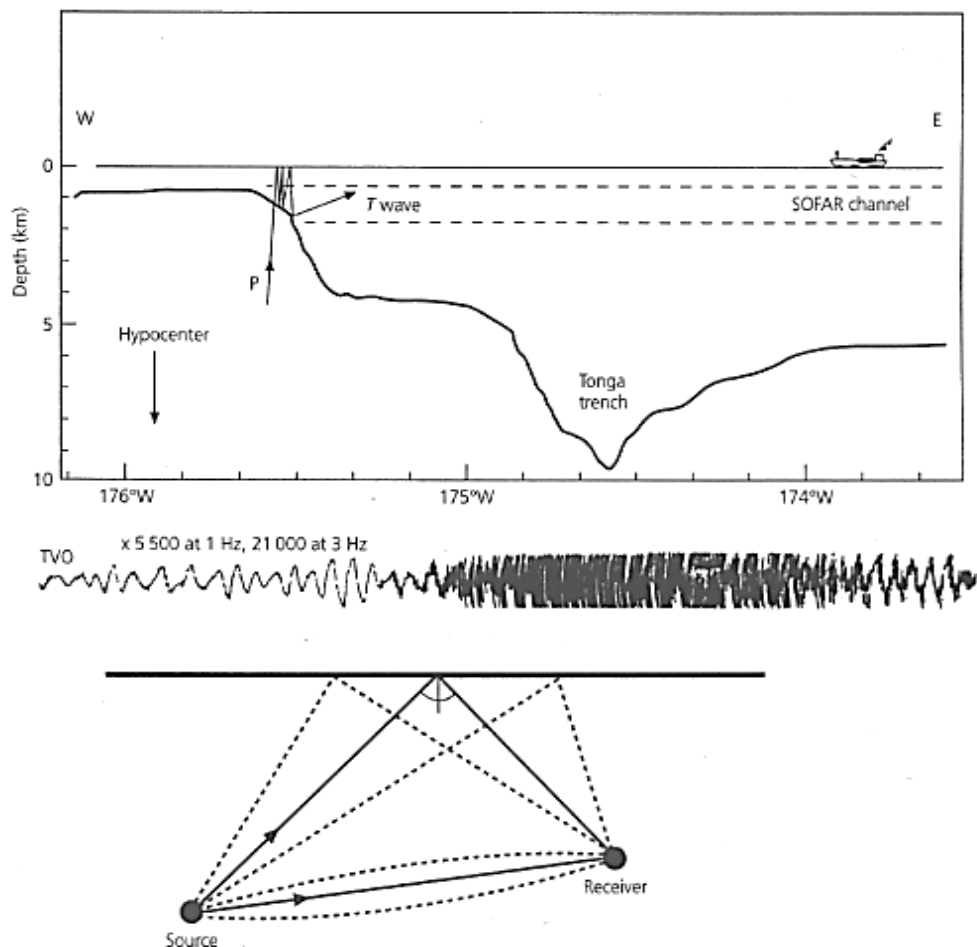


Slika 2.19. Vrh: Sloj manje brzine okružen sredstvima veće brzine. Dno: SOFAR kanal. (Stein and Wysession, 2003).

Ako su seizmički valovi generirani u sporijem sredstvu, tada će ukupna unutarnja refleksija zarobiti velik dio seizmičke energije u sporiji sloj, koji se ponaša kao valovod.<sup>††</sup> Takva se pojava događa u oceanima zato što je brzina zvuka u morskoj vodi proporcionalna temperaturi i tlaku [2]. Kombinacija smanjenja temperature i porasta tlaka s dubinom proizvodi područje manje brzine znano kao SOFAR (Sound Fixing And Ranging) kanal na dubini od oko 1000 m [2]. Zrake koje napuštaju izvor u kanalu pod kutovima od  $\pm 12^\circ$  od horizontale iznutra se reflektiraju [2] (sl. 2.19., dno slike).

Putanje valova su zakrivljene zbog promjene brzina s dubinom. SOFAR kanal propušta zvuk vrlo efikasno što omogućuje da eksplozije, podmornice i kitove detektiramo na velikim udaljenostima.

<sup>††</sup>Slično optički kablovi prenose svjetlosne signale zarobljavajući ih u sredstvu u kojem su manje brzine okruženom sredstvima unutar kojih su veće brzine.



Slika 2.20. Vrh: P val generiran u potresu, reflektiran od oceanskog dna i površine te zarobljen u SOFAR kanalu i širi se kao T val. Dno: T valovi zabilježeni na Tahitiju od potresa u Tongu. (Stein and Wysession, 2003).

Kao rezultat toga, brzina zvučnih valova u kanalu koristi se u svrhu istraživanja oceanske temperature koja se može mijenjati slijedom globalnog zatopljenja. Slično se i potresi mogu proučavati korištenjem seizmičkih valova u valovodu SOFAR koji uzrokuje T valove (sl. 2.20.), a koji se mogu detektirati hidrofona u vodi ili seizmografima kada T valovi dosegnu obalu. [2]

### 2.3.2 Huyensov princip i difrakcija

Kao što smo do sada vidjeli, možemo dobiti uvid u ponašanje seizmičkih valova razmatranjem putanja zraka koje su povezane s njima.

Ovaj pristup, proučavanje širenja vala korištenjem putanje zraka naziva se teorija rasprostiranja geometrijskih zraka. Iako ne opisuje u potpunosti aspekte širenja vala, široko

se koristi zbog često velikog pojednostavljenja analiza i daje točne odgovore i dobre aproksimacije. [2]

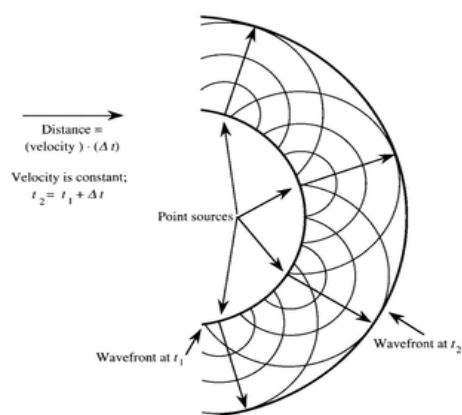
Neke primjene tretiranja progresivnih valova kao geometrijskih zraka neuspješno objašnjavaju promatranu pojavu. Najpoznatiji primjer tog neuspjeha je ogib na pukotini. Osvjetlimo li tanku pukotinu snopom svjetlosti, u području geometrijske sjene naći ćemo svjetle pruge. Drugi primjer su valovi koji skreću (ogibaju) ili difraktiraju oko Zemljine jezgre i tako dolaze do mjesta za koja Snellov zakon predviđa da nema staze vala. Slično tome, iako teorija zraka kaže da nema prijenosa energije kad val upada na granicu pod kutom većim od graničnog kuta, neka se energija u stvari transmitira [2]. Rješavanje takvog problema zahtijeva eksplicitno uzimanje u obzir činjenice da se seizmička energija širi kao val. To činimo na temelju otkrića iz seizmologije i valnih fenomena, posebno svjetlosnih valova.

Jedan važan pristup, zvan Huygensov princip prikazan je na slici 2.21.

Svaka se točka na valnoj fronti smatra novim točkastim izvorom koji stvara kružne valne fronte. Ove valne fronte konstruktivno interferiraju stvarajući nove kružne valne fronte i destruktivno interferiraju svugdje drugdje. [2]

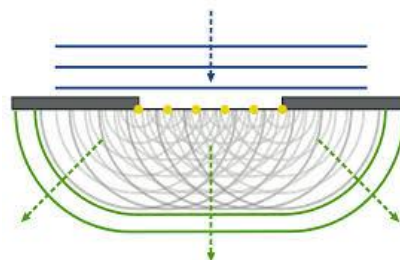
U tri dimenzije valne fronte su sferične.

Huygensov princip objašnjava fenomen difrakcije u kojem valovi zakreću oko prepreke. Iako je fenomen kompliciran, jednostavan primjer difrakcije je pukotina (sl.2.22.).



Slika 2.21. Prikaz Huygensovog principa.

(<http://www.cliffsnotes.com/sciences/physics/light/wave-optics>).



Slika 2.22. Huygensov princip na pukotini.

(<http://en.wikipedia.org/wiki/Huygens>).

Difrakcija na pukotini daje značajan uvid u uzrok nastanka valnih fronti na mjestima na kojima teorija geometrijskih zraka predviđa mirovanje.

Svaka točka na upadnoj valnoj fronti je točkasti izvor. Transmitirani val je superpozicija valova iz tih izvora. Vidimo kako takva superpozicija stvara valove koji se šire u stranu i tako mogu biti detektirani iza uglova, iako tamo nema pravocrtnog širenja zraka [2]. Analogija se događa sa smicajnim valovima koji ne mogu proći kroz tekuću vanjsku jezgru i tako difraktiraju oko nje.

Važna stvar je da difrakcija ovisi o valnoj duljini, pa veće valne duljine imaju šire brijegove i tako su više pod utjecajem difrakcije. Na primjer, možemo čuti oko otvorenih vrata ali ne možemo vidjeti oko njih zato što zvuk ima valnu duljinu od oko 0,1m u usporedbi sa  $10^{-7}$ m vidljive svjetlosti. Slično, seizmički valovi koji difraktiraju oko Zemljine jezgre gube svoje visokofrekventne komponente. Stoga, što su veće valne duljine, to siromašnijom postaje aproksimacija teorije geometrije ravnih zraka [2].

## 2.4 Površinski valovi

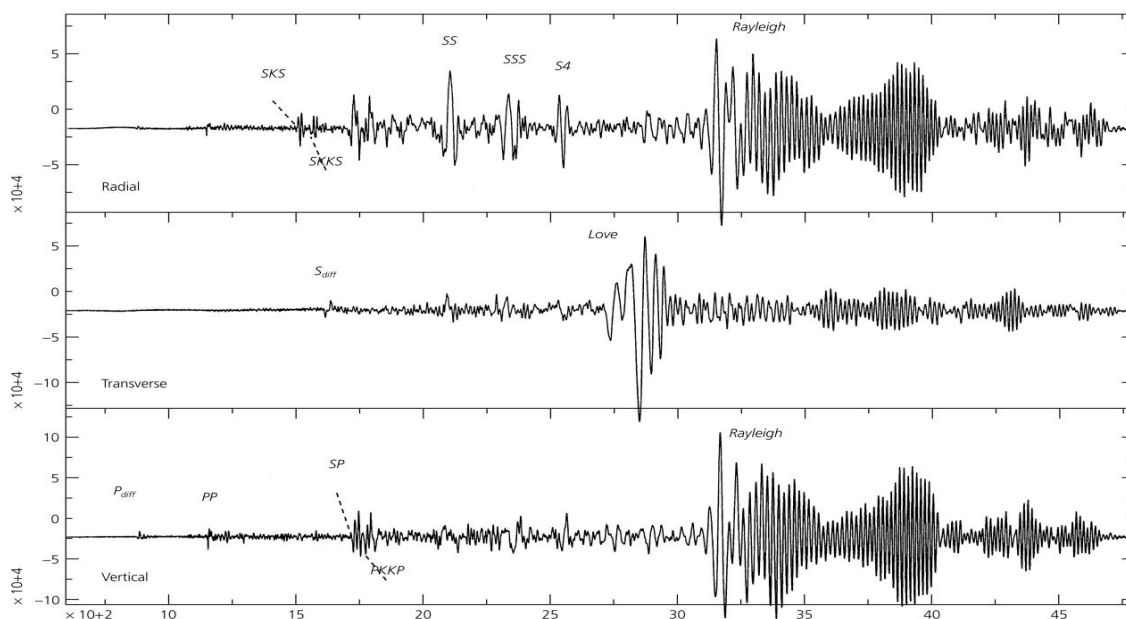
Seizmogramima dominiraju dugoperiodični valovi velikih amplituda koji stižu nakon P i S valova. Ovi valovi su površinski valovi čija je energija koncentrirana u blizini Zemljine površine. Kao rezultat geometrijskog širenja, njihove se energije šire dvodimenzionalno i padaju s udaljenošću  $r$  od izvora približno kao  $r^{-1}$ , dok se energija prostornih valova širi trodimenzionalno i pada približno brzinom  $r^{-2}$ . [2]

Stoga su na dalekim udaljenostima od izvora površinski valovi značajni na seizmogramima. Dva tipa površinskih valova znanih kao Loveovi i Rayleighovi po njihovim otkrivačima<sup>§§</sup> šire se u blizini površine Zemlje [2].

---

<sup>§§</sup>Lord Rayleigh (1842-1919) poznat među seizmolozima kao pionir rada u valnom širenju, koji je dobio Nobelovu nagradu za otkriće argona. A.E.H. Love (1863-1940) napravio je fundamentalni doprinos seizmologiji i geodinamici.





Slika 2.23. Seizmogram s tri komponente plitkog potresa u Vanuatu zabilježen 12 250 km dalje na postaji CCM. (Stein and Wysession, 2003).

Slika 2.23. pokazuje velike nizove površinskih valova koji stižu na seizmografsku transversalnu komponentu koje prati druga valna grupa na radijalnim i vertikalnim komponentama. Prvi valni niz predstavlja Loveove valove koji su rezultat SH valova zarobljenih u blizini površine. Druga valna grupa predstavlja Rayleigheve valove koji su kombinacija P i SV gibanja. U našoj geometriji Rayleighevi valovi se šire u  $(x-z)$  ravnini, a Loveovi pomaci su paralelni s  $y$ -osi [2].

Važna značajka površinskih valova je disperzija, odnosno činjenica da valovi različitih perioda putuju različitim brzinama.

Zanimljiva razlika između površinskih i prostornih valova zbog njihovih različitih brzina rasprostiranja je ta da površinski valovi mogu kružiti oko globusa puno puta nakon velikoga potresa [2]. Korištenjem direktnog vremena putovanja (direktnog puta od izvora do prijamnika), te korištenjem disperzije površinskih valova i svojstvenim funkcijama normalnih modova tj. veličinama koje odgovaraju vremenu putovanja može se proučavati struktura Zemlje .

### 3 **Istraživanje unutrašnjosti Zemlje**

Jedna od primjena seizmologije je određivanje raspodjele seizmičkih brzina i stoga elastičkih svojstava unutar Zemlje. Ta raspodjela, struktura Zemlje, mora biti u skladu s minerološkim, kemijskim i toplinskim stanjima Zemljine unutrašnjosti.

Osnovni podaci za seizmološka promatranja unutrašnjosti Zemlje su vremena putovanja seizmičkih valova [2]. Ono što je nama dostupno su mjerenja vremena nailazaka seizmičkih valova na seizmograf. Kako bismo to pretvorili u vrijeme putovanja, moramo znati početno vrijeme i mjesto potresa. Stoga vremena putovanja sadrže podatke o izvoru i svojstvima medija i razlučivanje tih doprinosa je izazov za brojna seizmološka istraživanja.

Uobičajen način određivanja tih svojstava u seizmologiji je rješavanje inverznih problema. Krene se od konačnog rezultata, seizmograma, i korištenjem matematičkih metoda dolazi se na početak – svojstvo izvora vala i sredstva kojim se val širio. Za razliku od inverznog, ostali problemi koriste teoriju širenja seizmičkih valova i na temelju toga predviđaju izgled seizmograma. Inverzni problemi su teži za rješavanje jer seizmogrami odražavaju miješane efekte izvora i sredstva, od kojih nijedan nije egzaktan. Prema tome, seizmologija u većoj mjeri od većine drugih znanstvenih disciplina često stvara „veliku sliku“ iz puno ograničenja i nedovoljno podataka [2]. Na primjer, modeli Zemlje iz seizmičkih valova „pate“ od nedostatka podataka (danas je to sve manje slučaj, zbog velikog broja seizmografa na Zemlji). To slično situaciji u kojoj doktor istražuje moguću slomljenu kost sa samo nekoliko razasutih snopova X zraka iz različitih smjerova.

Kako bi se dobio što bolji model, koriste se različite metode. U ovom ćemo poglavlju istražiti te metode i vidjeti kakvu nam seizmologija, na temelju podataka koje je do sada skupila, daje sliku o Zemlji.

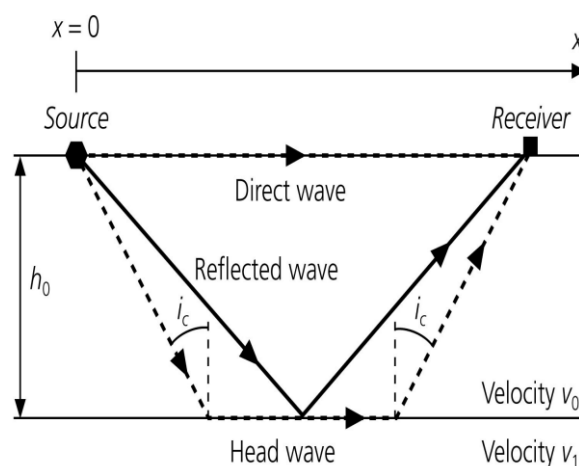
#### 3.1 **Refrakcijska seizmologija**

Najjednostavniji pristup inverznim problemima određivanja brzine u određenoj dubini korištenjem vremena putovanja vala, tretira Zemlju kao ravne slojeve s konstantnom brzinom unutar pojedinog sloja [2]. Pokazat ćemo graf vremena putovanja za dani model koji prikazuje vremena nailazaka seizmičkih valova u ovisnosti o udaljenosti od seizmičkog izvora. Vremena putovanja, posebno za valove koji su se refraktirali na

granicama pod graničnim kutovima, koristimo u svrhu određivanja brzine i širine sloja [2]. Ova se tehnika iz tog razloga zove refrakcijska seizmologija.

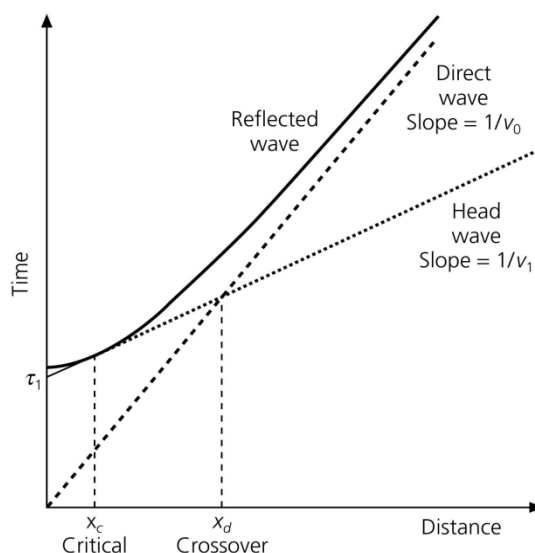
Refrakcijska se seizmologija koristi na nekoliko različitih skala. Površinske se strukture na dubinama manjim od 100 m mogu proučavati korištenjem kovačkog malja ili puške kao izvora te jednostavnog prijavnika. Slične se metode koriste u proučavanju kore i gornjeg plašta, s potresima ili eksplozijskim izvorima te brojnim prijavniciima na udaljenostima od stotinjak kilometara. [2]

Najjednostavniji slučaj prikazan na slici 3.1. je sloj debljine  $h_0$ , s brzinom  $v_0$  iznad sloja veće brzine  $v_1$ . Postoje tri osnovne staze vala od izvora na površini u ishodištu do površinskog prijavnika na udaljenosti  $x$  [2]. Vremena putovanja faza mogu se odrediti korištenjem Snellovog zakona.



Slika 3.1. Tri osnovne staze vala. (Stein and Wysession, 2003).

Prva staza vala odgovara direktnom valu koji putuje kroz sloj. Ta krivulja vremena putovanja (sl.3.2.) je linearna funkcija udaljenosti, s nagibom  $1/v_0$  koja presijeca ishodište. Druga reflektirana zraka je za reflektirani val od granice. Budući da su kutovi upadnog i reflektiranog vala jednaki, val se reflektira na pola puta između izvora i prijavnika. Treći tip faze vala je tzv. čelni val (eng. head wave). Ovaj val



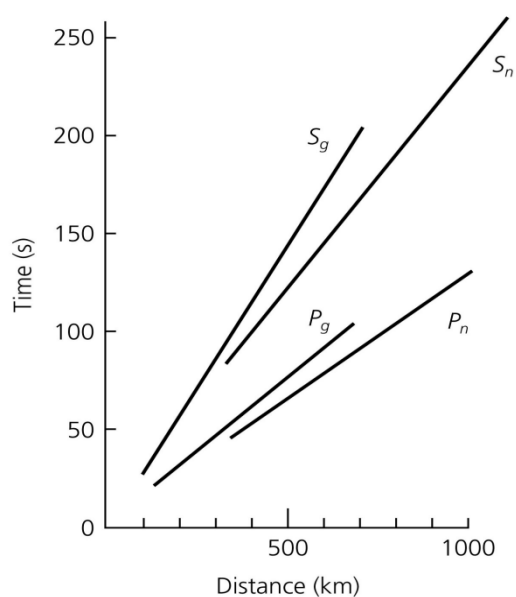
Slika 3.2. Grafovi ovisnosti vremena putovanja o udaljenosti prijavnika od izvora za tri staze vala sa slike 3.1. (Stein and Wysession, 2003).

nastaje kada val koji ide prema dolje upadne na graničnu plohu pod kutom jednakim ili većim odgraničnog kuta. [2]

Budući da vrijedi  $1/v_0 > 1/v_1$ , krivulja vremena putovanja direktnog vala ima veći nagib i počinje u ishodištu, dok čelni val ima manji nagib, ali nenulti presjek. Na graničnoj udaljenosti direktni valovi stižu prije čelnih valova [2]. U nekoj se točki krivulje vremena putovanja sijeku i iza te točke je čelni val prvi nailazeći, iako prolazi dulji put [2]. Stoga udaljenost presijecanja ovisi o brzinama i debljini sloja.\*\*\*

Prema tome, možemo riješiti inverzni problem otkrivanja brzine sloja na dubini od razlike vremena putovanja promatranih na površini kao funkcije udaljenosti izvora od prijammnika [2]. Dvije brzine,  $v_0$  i  $v_1$  odrede se iz nagiba dviju krivulja vremena putovanja. Tada se utvrdi udaljenost presijecanja i korištenjem Snellova zakona i jednadžbi iz mehanike odredi se debljina sloja,  $h_0$ . No, postoji i drugi način u kojem se debljina sloja može pronaći iz vremena refleksije ili presijecanja čelnog vala na nultoj udaljenosti [2]. Svaka od ovih metoda koristi činjenicu da postoje više od jedne valne putanje između izvora i prijammnika.

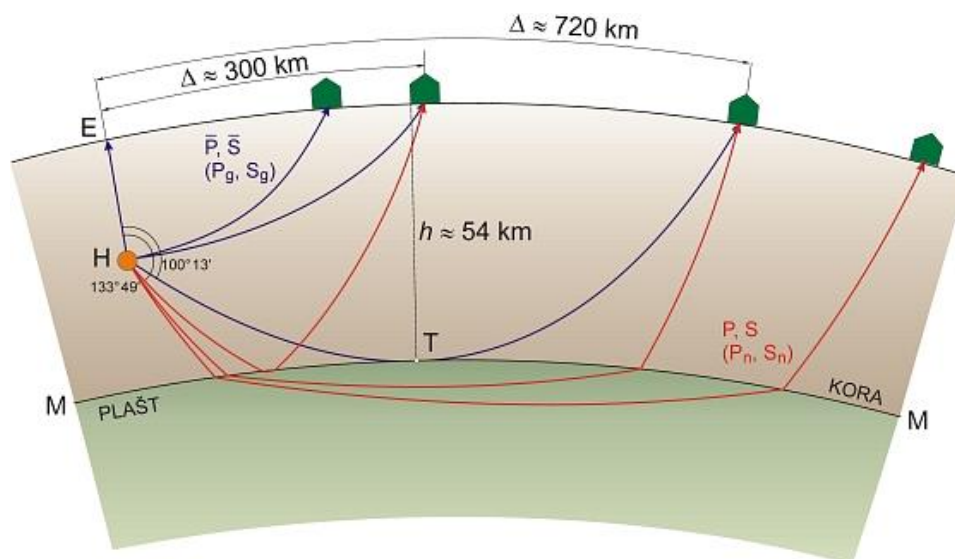
Podaci nastupnih vremena seizmoloških refrakcija kao i od direktnih valova od potresa u dolini Kupe 1909. godine i još nekoliko drugih potresa doveli su A. Mohorovičića 1910. godine do jednog od najvažnijih otkrića o strukturi Zemlje [8]. Promatrajući dolaske P valova, (sl.3.3), prepoznao je da je prvi val putovao u dubokom sloju velike brzine (7,7km/s), a drugi- za kojeg je utvrdio da je direktni - u sporijem, plićem sloju (5,6km/s) debljine oko 50km [2]. Ti se slojevi nazivaju kora i plašt. Granica između njih naziva se Mohorovičićev diskontinuitet ili Moho.



Slika 3.3. Shema Mohorovičićevih podataka pokazuje postojanje kore i plašta. (Stein and Wysession, 2003).

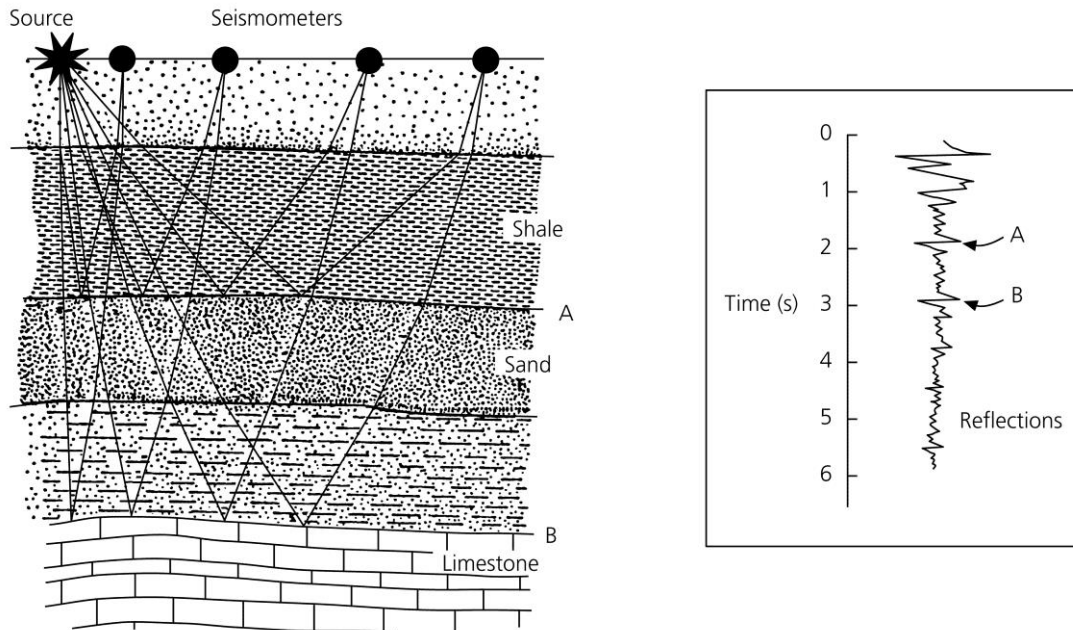
\*\*\* Jednostavna analogija je vožnja prema udaljenoj točki po cesti ili autoputu. Ako je odredište dovoljno daleko, bolje je uzeti dulju rutu koja uključuje bržu autocestu od direktne spore ceste. Točka na kojoj dolazi do pretjecanja ovisi o relativnim brzinama i dodatnoj udaljenosti potrebnoj da se prisprije do autoceste.

Sada označimo čelni val kao  $P_n$  i direktni val kao  $P_g$  (g-granitni). Odgovarajući nailasci također su promatrani i za S valove. Jedan od prvih koraka u proučavanju prirode kore je određivanje dubine Mohoa ili debljine kore i varijacija  $P_n$  brzina od mjesta do mjesta [2] (sl.3.4.).



Slika 3.4. Mohorovičićev diskontinuitet sprječava dolazak  $P_g$  i  $S_g$  faze u udaljenosti većoj od 720 km, stoga u seizmogramima dalekih stanica nalazimo jedino faze  $P_n$  i  $S_n$ . Slično do vrlo bliskih stanica ispod 300 km dolaze jedino faze  $P_g$  i  $S_g$ .  
([http://www.gfz.hr/osobne\\_stranice/davorka\\_herak/Fizika%20Zemlje%20-%20predavanja.pdf](http://www.gfz.hr/osobne_stranice/davorka_herak/Fizika%20Zemlje%20-%20predavanja.pdf))

### 3.2 Refleksijska seizmologija



Slika 3.5. Shematski prikaz metode seizmičke refleksije. (Stein and Wysession, 2003).

Važna primjena seizmologije je istraživanje područja blizu površine Zemlje u znanstvene svrhe ili za istraživanje u svrhu eksploatacije prirodnih resursa. Slika 3.5. prikazuje shemu jedne od tehnika koja se pri tome koristi. Umjetni izvor na ili u blizini površine proizvodi seizmičke valove koji putuju prema dolje, reflektiraju se od neke granične plohe u dubini i bilježe se na seizmografima. Rezultirajući se podaci procesiraju na računalima (povećava se odnos signal – šum) kako bi se istaknuli dolasci koji odgovaraju refleksijama i iz toga odredila brzina u sloju. Vertikalne se osi mogu pretvoriti iz vremenskih u dubinske korištenjem dobivenih brzina i reflektori se mogu identificirati korištenjem podataka s površine i bušotina. [2]

U prošlom smo poglavlju razmatrali kako se koriste refraktirani dolasci u određivanju brzina slojeva s dubinom i zaključili kako refraktirani dolasci također sadrže vrijedne informacije u ovu svrhu. Proučavanja koja koriste reflektirane dolaske znana kao refleksijska seizmologija, određuju brzine unutar kore te su ključna u istraživanju nafte i plina.

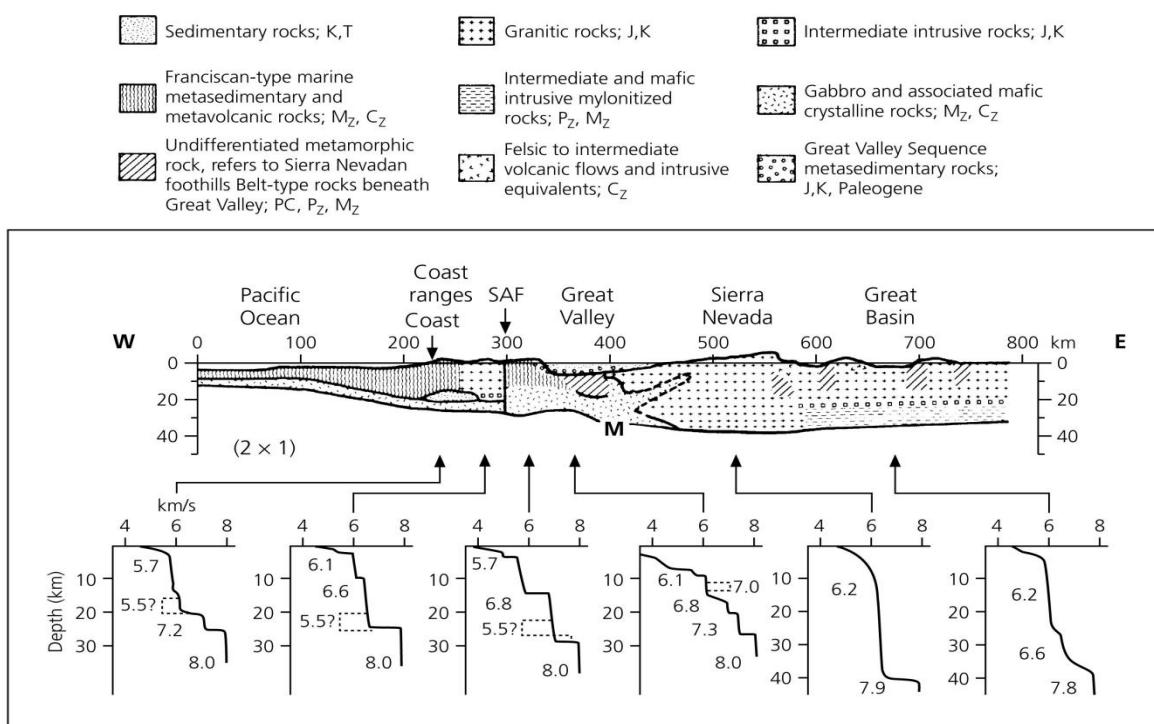
### 3.2.1 Zemljina kora

Da je Zemlja jabuka, Zemljina kora bila bi debela koliko i kora jabuke. Zemljinakoraje debljine između 5 i 70-ak km. Prekriva čitavu površinu planeta, uključujući i morsko dno, površinu veću od 510mil. km<sup>2</sup>. [5]

Informacije o građi kore i gornjeg plašta diljem svijeta određuju serefrakcijskim istraživanjima vršenimna različitim skalama. Veličine izvora, te udaljenosti izvora od prijammnika rastu kako raste dubinaslojeva koji se proučavaju. Potresi ili velike eksplozije, uključujući testove nuklearnog oružja imaju dovoljno energije da dopru do Mohoa [2].

Umjesto da Moho smatramo bazom homogenog sloja kore, bolje je to gledati kao tanki sloj(zonu) u kojem brzina longitudinalnih valova raste naglo s dubinom do 7,7km/s. [2]

Raspodjela brzinačesto se interpretira u terminu sastava (građe slojeva) kao na slici 3.6.



Slika 3.6. Model brzina u kori i geološki sastav za poprečni presjek duž zapadne obale SAD-a. SAF označava rasjed San Andreas. Crtkane linije predstavljaju područje manjih brzina. (Stein and Wysession, 2003).

Da bi to mogli učiniti, seizmološkise podaci često uspoređuju s drugim geofizičkim podacima poput gravimetrijskih, geomagnetskih te laboratorijskih istraživanja seizmičkih

brzina u stijenama. Laboratorijski podaci pokazuju da se brzina mijenja s unutarnjim sastavom Zemlje (kemijskim, fizikalnim, geološkim) [2]. Nadalje, brzina raste s tlakom i pada s temperaturom. Stoga su zaključci o sastavu slojeva izvedeni na temelju usporedbe seizmičkih brzina s promatranim svojstvima. Za tlak, očekivan na većim dubinama, kao za donji plašt i jezgru, laboratorijski eksperimenti su puno teže izvedivi pa se u istraživanju eksperimentalnih podataka na višim temperaturama i tlakovima moraju koristiti termodinamički izračuni [2].

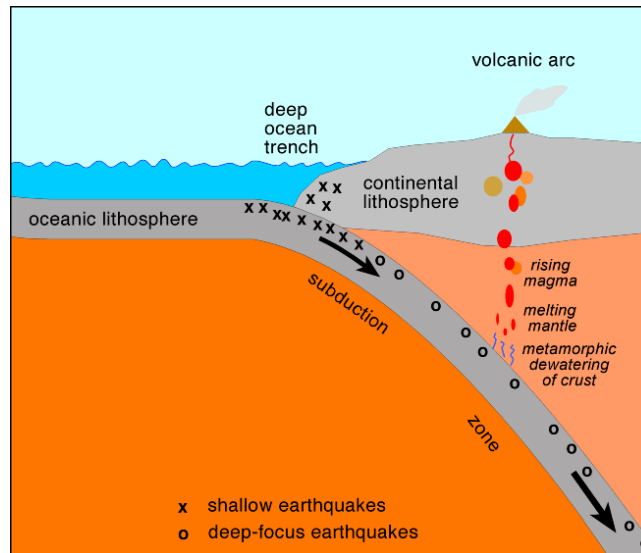
Debljina kore kreće se od svega nekoliko kilometara do oko 70 km. Razlikujemo kontinentalnu od oceanske kore. Oceanska kora, kao što i samo ime kaže, nalazi se ispod oceana. Bazaltnog je sastava i ujednačene debljine (4-10 km). Gušća je od kontinentalne kore, pa je često njezino podvlačenje i tonjenje pod kontinentalnu koru u tzv. zonama subdukcije. Kontinentalna kora izgrađuje kontinente, prosječno je granodioritnog sastava i vrlo neujednačene debljine (20-70 km). [4]

Zemljina kora zajedno s gornjim dijelom plašta sačinjava stjenovitu cjelinu - litosferu. Litosfera Zemlje razlomljena je na brojne (litosferske) ploče. One međusobno graniče ili duž oceanskih grebena, gdje se odmiču jedne od drugih i gdje na tim prostorima iz astenosfere naviru magmatske mase prema površini, ispunjavaju nastale šupljine i izljevaju se na morsko dno, stvarajući na taj način novu oceansku koru, ili se sudaraju, podvlače jedne pod druge, odnosno navlače na druge stvarajući tzv. oceanske jarke. <sup>†††</sup> Dijelovi čvrste Zemljine kore koji se podvlače (subdukcijska zona), zaranjaju do oko 700 km u ekstremno vruće dijelove gornjeg plašta (astenosferu) (sl. 3.7). Pri tome se stijene litosfere otapaju i stanjuju. [4]

---

<sup>†††</sup> Prizor je sličan onome na zaleđenim rijekama kada se ledene ploče, koje tok vode na sredini rijeke nose brže, sabijaju i podvlače pod led koji je još čvrsto vezan za obalu.

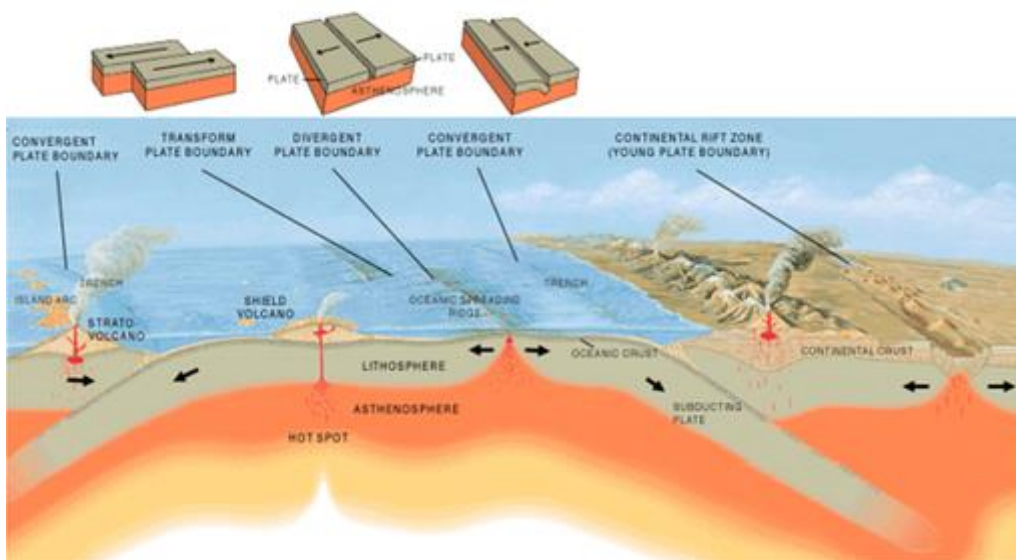




Slika 3.7. Mehanizam subdukcije. ([http://www.columbia.edu/~vjd1/subd\\_zone\\_basic.htm](http://www.columbia.edu/~vjd1/subd_zone_basic.htm)).

Treći tip granica između pojedinih ploča je transformna granica. Duž nje se ploče sudaraju i gibaju jedna pored druge. Pri tome ne dolazi do podvlačenja jednih pod druge u većim razmjerima, niti do izdizanja magmatskih masa duž njih prema površini. Tipičan primjer takve granice je rasjed sv. Andrije u Kaliforniji. [4]

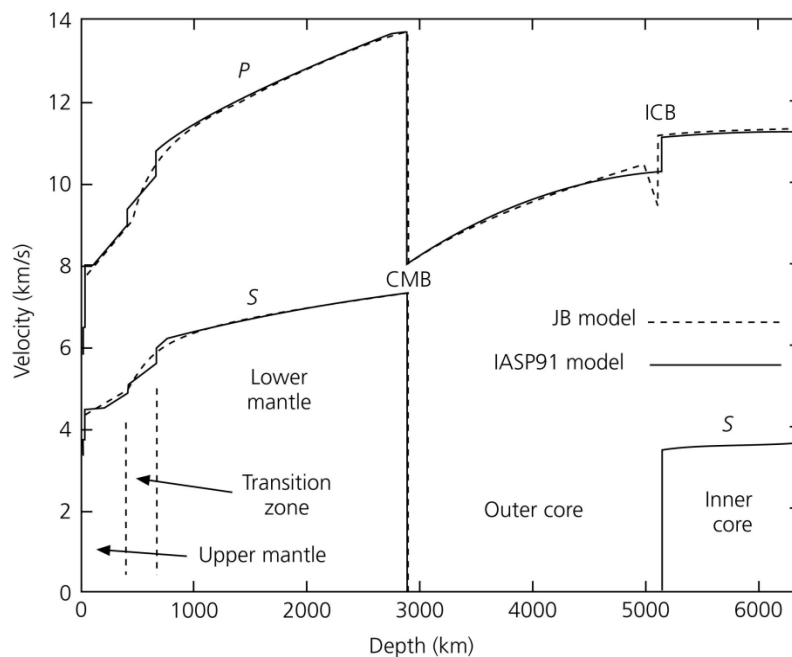
Tipovi granica ploča prikazani su na slici 3.8.



Slika 3.8. Pregled svih tipova granica između litosfernih ploča. (<http://geoclass.wordpress.com/2009/07/03/tektonika-ploca-tipovi-granica>).

### 3.3 Proučavanje vremena putovanja prostornih valova

Vremena putovanja prostornih seizmičkih valova mogu se koristiti u određivanju njihovih brzina kao funkcije dubine [2]. Početkom 20. stoljeća, tablice vremena putovanja bile su sastavljene korištenjem podataka iz brojnih potresa promatranih na različitim epicentralnim udaljenostima [2]. Ta su seizmološka promatranja bila glavni izvor podataka za pregled osnovnih osobina raspodjele brzina unutar Zemlje. Rezultat toga bio je Jeffreys-Bullenov model (JB) Zemlje (sl.3.9.).<sup>\*\*\*</sup>JB model tretira Zemlju kao redove ljusaka, opisanih po ponašanju brzina s dubinom [2].



Slika 3.9. Usporedba klasičnog JB modela Zemlje i novijeg modela, IASP91. (Stein and Wysession, 2003).

Po JB modelu plašt je podijeljen u gornji i donji plašt, a oba imaju glatku promjenu brzina. Gornje i donje područje plašta odvojeno je prijelaznom zonom gdje brzina naglo raste s dubinom. Jezgra je podijeljena navanjsku i unutarnju koje su odvojene prijelaznom zonom.

Naknadna istraživanja iznijela su modele kao što je IASP91 model, koji je također prikazan na slici 3.9., koji potvrđuje osnovnu strukturu JB modela i pruža bolju rezoluciju važnih područja [2]. Na primjer, JB model nije riješio brzine seizmičkih valova u unutarnjoj jezgri, dok noviji model ima dobro definirane brzine u unutarnjoj kori,

<sup>\*\*\*</sup>Ovaj model je izrađen opsežnim zajedničkim istraživanjem Zemljine strukture Sir Harolda Jeffreysa (1891-1989) koji je 1926. dokazao da je jezgra tekuća i Keitha Bullena (1906-76).

implicirajući da je unutarnja jezgra u krutom stanju [2]. Slično, novi model pruža više detalja o prijelaznoj zoni plašta i granice jezgre-plašta, i uključuje skok u brzini na granici unutarnje i vanjske jezgre.

Jeffreysev i Bullenov izvod radijalno simetričnog modela Zemlje iz promatranja vremena putovanja preokretno prethodno grubu sliku Zemlje u onu koju je današnja znanost promijenila samo u detaljima. Noviji radijalni modeli ne razlikuju se puno jedni od drugih, te se teže približiti točnom radijalnom modelu Zemlje. [2]

Modeli poput Jeffreys-Bullenovog i IASP91 izvedeni su iz podataka o nastupnim vremenima iz čitavog svijeta i usrednjeni preko lokalnih i regionalnih razlika u strukturi. Međutim, i lateralne (bočne) razlike u strukturi mogu biti značajne i dati uvid u tektonske procese. Stoga je jedan od ciljeva seizmologije definirati trodimenzionalnu raspodjelu brzina koja je rezultat činjenice da je Zemlja geološki aktivan planet. [2]

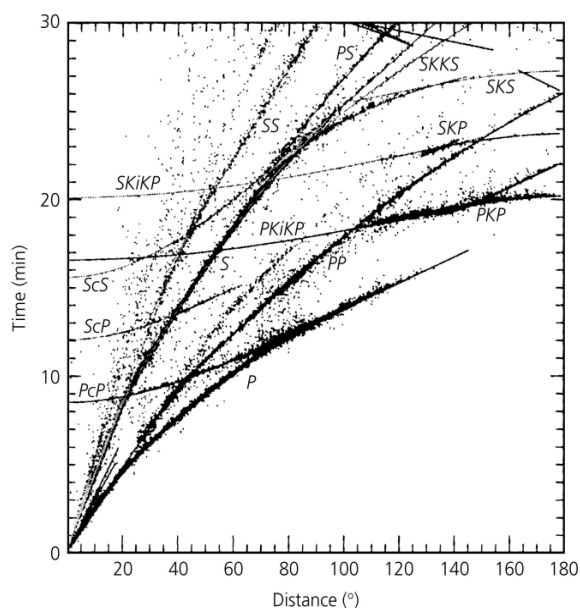
### *3.3.1 Faze prostornih valova i otkriće jezgre*

Vidjeli smo da seizmološki valovi mogu putovati između izvora i prijarnika duž više staza. Na primjer, porast u brzini može uzrokovati triplikaciju koja uzrokuje tri različita dolaska na prijarnik. Refleksije s granica različitih slojeva i difrakcije mogu uzrokovati dodatne faze seizmičkih valova. Stoga seizmogrami sadrže puno dolazaka (nailazaka) ili faza koje odgovaraju različitim stazama [2].

To je prikazano na slici 2.18. Slika pokazuje nekoliko faza koje su promatrane i neke od odgovarajućih staza vala. Sve su prikazane faze, osim onih Rayleighovih površinskih valova, prostorni valovi koji putuju kroz unutrašnjost Zemlje.

Seizmogrami pružaju podatke koji se koriste kako bi se izradila tablica vremena putovanja odnosno hodokrona [2].

Slika 3.10. pokazuje vremena putovanja faza seizmičkih valova za različite epicentralne udaljenosti. Ovi modeli predviđaju promatrana vremena putovanja jako dobro, kao što je prikazano fitanjem teoretskih vremena putovanja (linije na slici 3.10.) s onim promatranim [2].

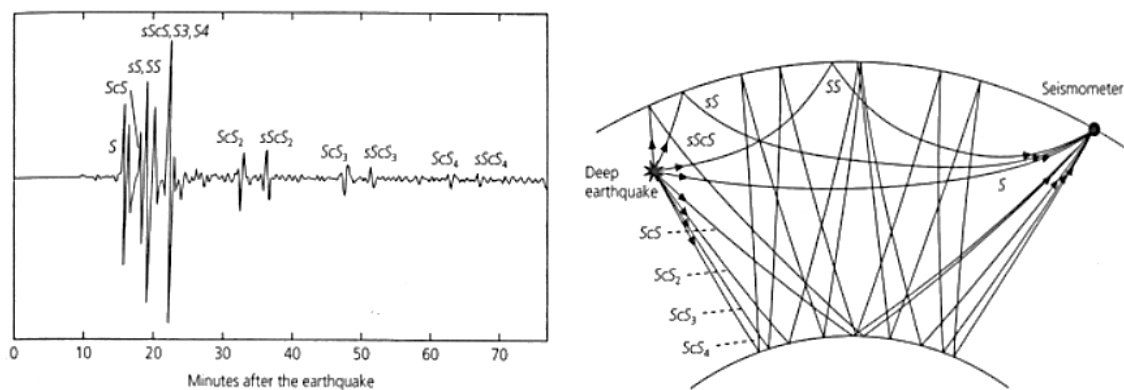


Slika 3.10. Graf ovisnosti vremena putovanja o epicentralnoj udaljenosti za model IASP91. (Stein and Wysession, 2003).

Vrijedno je zapamtiti da su tablice vremena putovanja sastavljene od promatranja seizmičkih dolazaka. Iako većina nailazakana seizmogramima može biti potvrđena iz postojećih tablica, važni su rezultati objašnjavanje prethodno neprepoznatih dolazaka.

Razlika u svojstvima između krutog plašta i tekuće vanjske jezgre koja ima manju brzinu od plašta, čini jezgru dobrom za seizmološka proučavanja korištenjem reflektiranih, transmitiranih, konvertiranih (iz S u P i obratno) i difraktiranih dolazaka. [2]

Refleksije jezgre su od velikog značaja zato što je granica jezgre-plašta (CMB) granica između krutine i tekućine i stoga jak reflektor za smicajne valove [2]. Refleksije od CMB su označene malim slovom c pa je ScS refleksija S vala i PcP refleksija P vala. Također se na CMB-u događaju i promjene. ScP ide kroz plašt kao smicajni val i vraća se kao kompresijski, dok PcS ide suprotno. Neke faze podliježu višestrukim refleksijama na jezgri i na površini Zemlje, ScSScS (ili ScS2) odbija se dvaput na CMB i jednom na površini. Takve refleksije znane kao višestruke ScS prikazane su na slici 3.11.

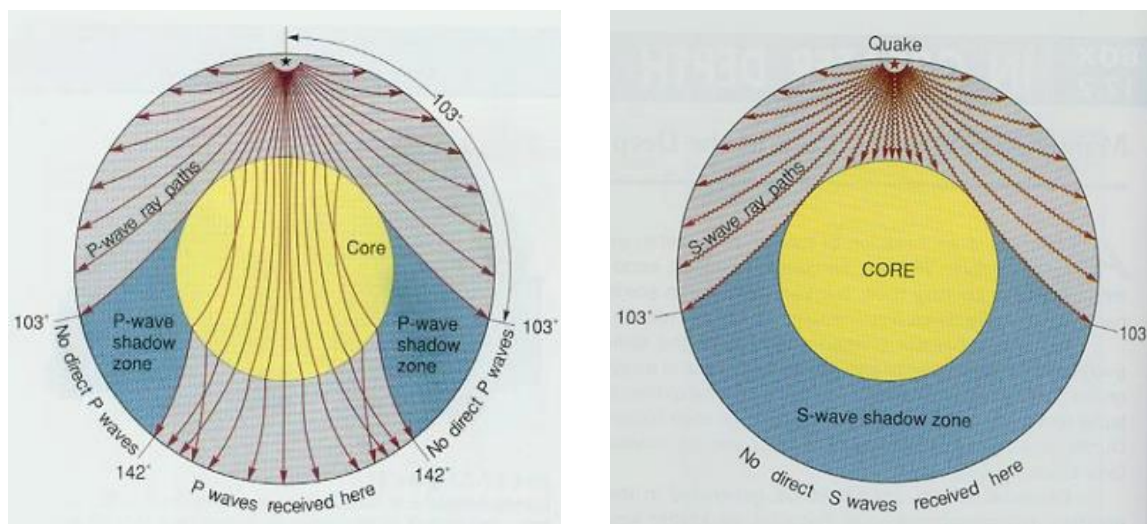


Slika 3.11. Lijevo: vertikalna komponenta seizmograma u Golden Coloradu. Desno: staze vala za neke od seizmičkih faza prispijelih na seizmogram. (Stein and Wysession, 2003).

ScS je puno izražajniiji dolazak od PcP jer tekuća jezgra ne propušta smicajne valove [2].

Refleksija jezgre, posebno ScS koristi se u proučavanju strukture Zemlje jer daje vertikalno usrednjenje brzine za plašt. Krivulje staza valova su konkavne prema gore poput onih za refleksije od vrha sloja u ravnoj geometriji. [2]

Putanje zraka pokazuju da manja brzina u vanjskoj jezgri stvara zonu geometrijske sjene za seizmičke valove, gdje Snellov zakon predviđa da neće doći direktne zrake.<sup>§§§</sup> (sl. 3.12.) Ukratko ćemo pokazati koji su sve zaključci izvedeni na temelju seizmoloških promatranja.



Zona sjene P valova nastala refrakcijom unutar Zemljine jezgre.

Direktni S valovi ne prolaze kroz jezgru (jezgra je tekuća).

Slika 3.12. Otkriće postojanja geometrijske sjene za P i S valove. ([http://www.gfz.hr/osobne\\_stranice/davorka\\_herak/Fizika%20Zemlje%20-%20predavanja.pdf](http://www.gfz.hr/osobne_stranice/davorka_herak/Fizika%20Zemlje%20-%20predavanja.pdf)).

<sup>§§§</sup> Jezgru Zemlje otkrio je R. D. Oldman 1906. godine na temelju proučavanja zapisa potresa.

Zemljina jezgra ima promjer 2400 km, što otprilike odgovara veličini Mjeseca. Sastoji se od čvrste željezne unutarnje jezgre s primjesama nikla i kobalta, iznad koje se nalazi sloj željeza i nikla u tekućem (rastaljenom) stanju. [9]

Vanjska tekuća jezgra se polako hladi i stvrdnjava, zbog čega se unutarnja svake godine uveća za oko 1 mm. Unutarnja jezgra je, uslijed velikog pritiska kojem je izložena, u krutom stanju. Temperatura u samom središtu Zemlje procjenjuje se na 7500 K (7227 °C), što je toplije od površine Sunca. [9]

Hlađenjem Zemljine unutrašnjosti dolazi do miješanja hladnog i toplog materijala u procesu koji se naziva konvekcija, odnosno smjerenom gibanje ili strujanje fluida, pri čemu se topliji fluid giba prema hladnijem i predaje toplinu okolini.

Konvekcijsko gibanje materijala u jezgri, povezano s okretanjem Zemlje oko svoje osi, stvara magnetsko polje Zemlje. Zemljina jezgra ponaša se kao divovski magnet, stvarajući ogromno magnetsko polje koje okružuje naš planet i štiti živi svijet od udarnih valova i štetnog zračenja Sunca.

### 3.3.2 *Struktura plašta*

Zemljin plašt je debela ljuska, sastavljena od gustih stijena, koja okružuje vanjsku tekuću jezgru, a nalazi se direktno ispod Zemljine kore. Proteže se do skoro 2900 km dubine i zauzima 70% Zemljinog volumena. [10]

U području astenosfere koja se proteže između približno 80 i 250 km, a ponegdje doseže do približno 700 km (ovisno o temperaturi), seizmički valovi putuju sporije, stoga se još naziva i zonom sporijih brzina (LVZ – eng. low velocity zone). Zbog čega dolazi do usporavanja? Po nekim pretpostavkama, stijene u astenosferi su bliže točki tališta nego one iznad ili ispod, a neki geolozi smatraju da su stijene u astenosferi djelomično rastaljene. Ako je to točno, onda je ta zona važna iz dva razloga:

1. to je zona gdje se stvara magma;
2. stijene u toj zoni imaju relativno malu čvrstoću zato se mogu lakše kretati, što znači da astenosfera djeluje kao lubrikant za litosferske ploče. [10]

Plášť se razlikuje od kore po svojim mehaničkim svojstvima i kemijskom sastavu. U stvari, kora je prvenstveno produkt taljenja plašta.

U plaštu se temperature kreću od 500°C do 900°C na granici s korom do više od 4000°C na granici s jezgrom. Unatoč tome što su tako velike temperature daleko veće od temperatura tališta na površini, plašt je gotovo u potpunosti krut. Ogromni litostatski tlak u plaštu sprječava taljenje, zato što temperatura tališta raste s porastom tlaka [10].

Zbog temperaturne razlike između Zemljine površine i vanjske jezgre, te sposobnosti kristaliziranih stijena da na visokim temperaturama i tlaku podliježu sporim, viskoznim deformacijama, u plaštu postoji cirkulirajući mehanizam konvekcije. Vrući materijal se izdiže, vjerojatno s granice s vanjskom jezgrom, dok hladniji i teži materijal tone. Za vrijeme uzdizanja materijal se hladi i adijabatski i kondukcijom ponire u hladnije dijelove plašta koji ga okružuju.\*\*\*\* Temperatura pada sa smanjenjem tlaka (koje je povezano s manjom dubinom), pa se toplina materijala raspodjeljuje na veći volumen. Budući da temperature tališta padaju sa smanjenjem tlaka, moguće je da se parcijalno taljenje događa točno ispod litosfere što uzrokuje vulkanizam i plutonizam (sl. 3.13.). [10]



*Slika 3.13. Umjetnički prikaz konvekcije topline u plaštu.*

*(<http://www.rediff.com/news/slide-show/slide-show-1-journey-to-centre-of-the-earth-it-is-happening/20110330.htm>).*

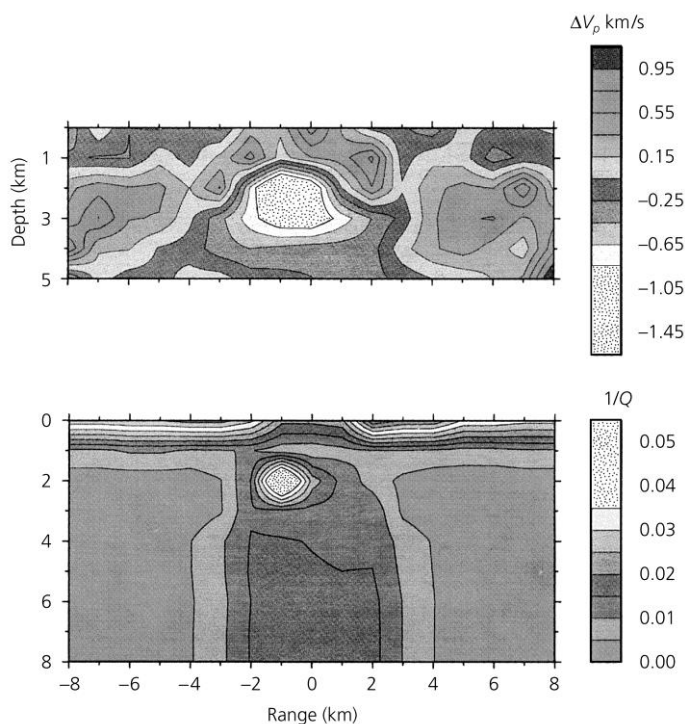
---

\*\*\*\* Zagrijavanje vode u čaši uzrokuje istu reakciju. Voda bliža plamenu brže se zagrijava i podiže prema gore, premještajući hladniju vodu s vrha. Hladnija voda je teža i „ponire“. Ciklus se tada ponavlja i ponavlja.

Konvekcija plašta je kaotičan proces (u smislu dinamike fluida) i sastavni je dio tektonike ploča, glavnog procesa koji oblikuje naš planet.

Uvid u termalne varijacije unutar plašta i kore daje nam pojava koja se naziva atenuacijom. To je pojava pri kojoj amplituda vala pada slijedom širenja valne fronte. Mnogi važni geofizički procesi (konvekcija u plaštu, tektonika ploča, magnetizam...) sadrže lateralne promjene u temperaturi [2]. Brzine elastičkih valova su također osjetljive na temperaturu, ali su bolje za mapiranje hladnih (brzih) anomalija poput subdukcijskih ploča od vrućih (sporih) materijala poput onih na srednjooceanskom hrbtu [2]. Seizmičke brzine ovise linearno o temperaturi, dok atenuacija ovisi eksponencijalno o temperaturi [2]. Stoga kombiniranje proučavanja brzina i atenuacije može pružiti vrijedne informacije.

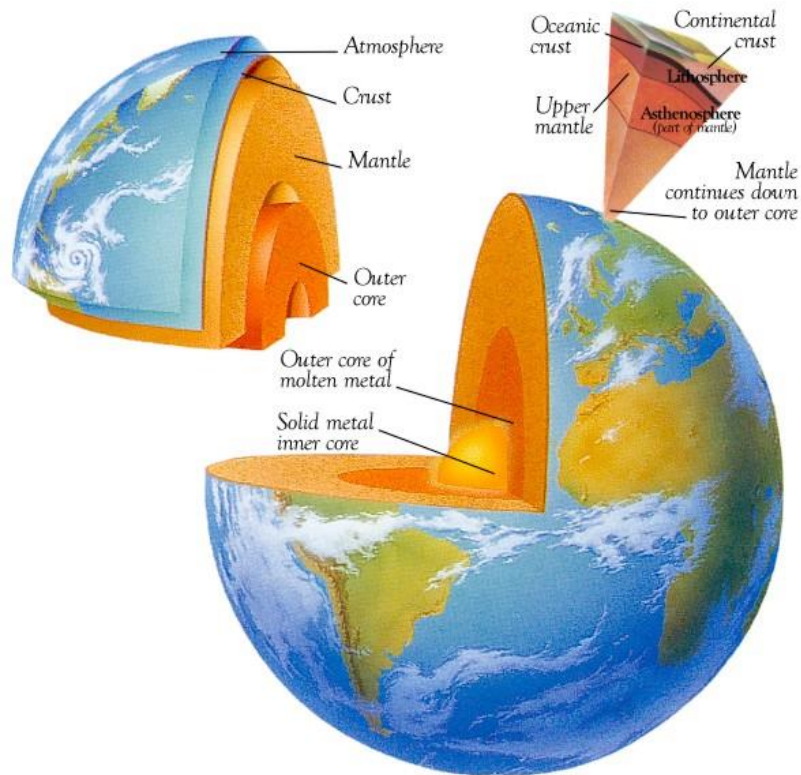
Slika 3.14. pokazuje raspodjelu brzina i atenuacije na dijelu stvarajuće osi Istočnog Pacifika, gdje se područje niže brzine i visoke atenuacije protumačilo kao komore napunjene otopljenom magmom. To je jedan primjer kako korištenjem amplituda i brzina valova možemo steći uvid u pojave koje se odvijaju duboko ispod nas.



Slika 3.14. Brzina  $P$  – valova (gore) i atenuacija (dolje) dobiveni tomografijom duž osi Istočnog Pacifika. (Stein and Wysession, 2003).

I na kraju, pogledajmo kako shematski izgleda model unutrašnjosti Zemlje kojeg nam danas seizmologija pruža na osnovi svega navedenoga (sl. 3.15.).





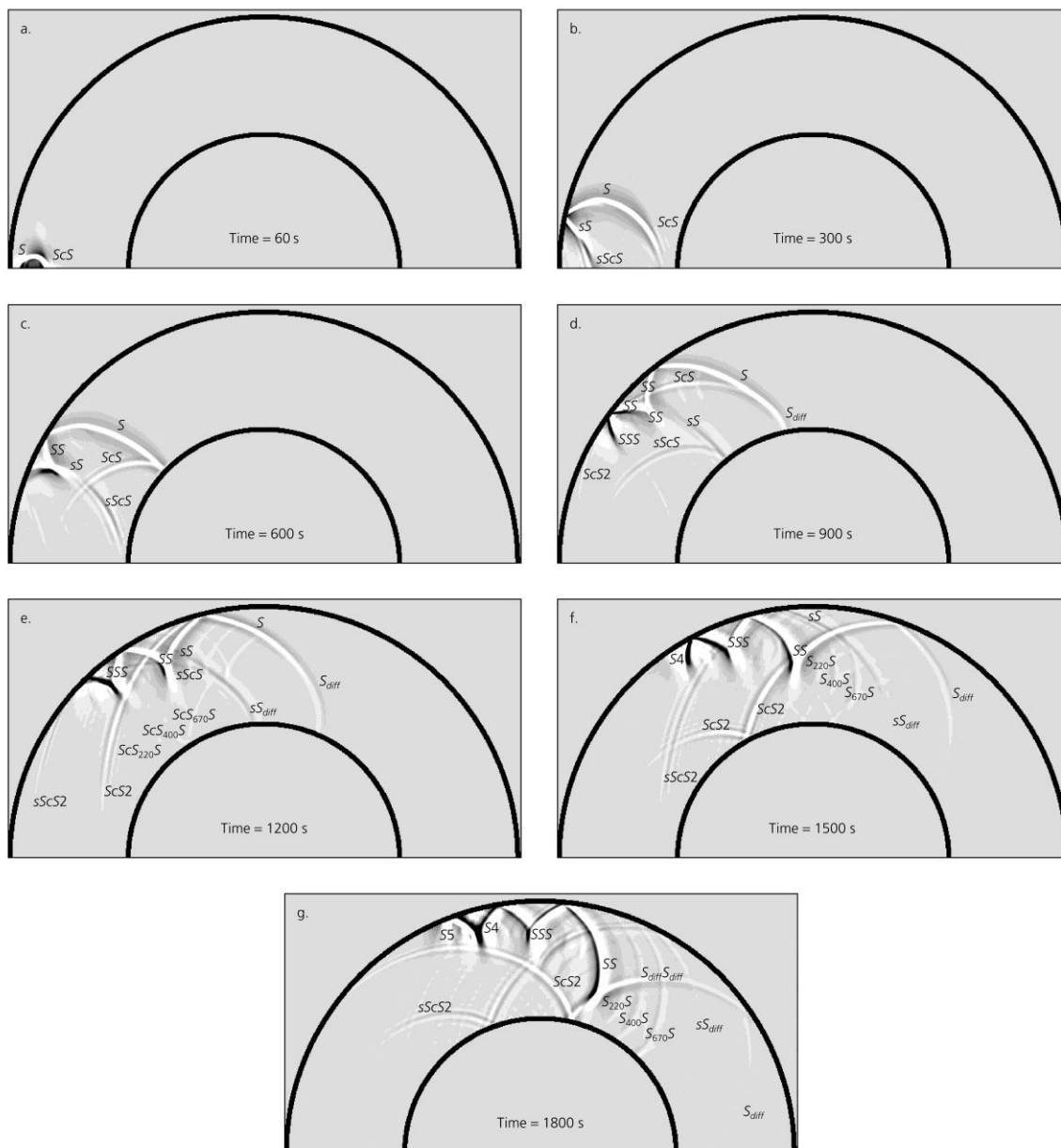
*Slika 3.15. Model unutrašnjosti*

*Zemlje..([http://www.gfz.hr/osobne\\_stranice/davorka\\_herak/Fizika%20Zemlje%20-%20predavanja.pdf](http://www.gfz.hr/osobne_stranice/davorka_herak/Fizika%20Zemlje%20-%20predavanja.pdf)).*

### 3.3.3 Vizualizacija prostornih valova

Prije no što završimo razmatranje prostornih valova, vrijedno je razmotriti njihovu fizikalnu prirodu. Tretirali smo dolazke faza prostornih valova poput S i ScS kao geometrijske zrake. Međutim, iako je opće prihvaćeno opisivati ove valove kao zrake i prikazati njihove putanje, ta aproksimacija ne opisuje njihovo ponašanje u potpunosti [2].

Da bismo to vidjeli, koristimo nekoliko simulacija koje prikazuju vremena nailaska SH smicajnog vala generiranog 600km dubokim potresom (sl.3.16.).



Slika 3.16. Slike umjetnih SH valova koje pokazuju širenje valova nakon 600 km dubokog potresa. (Stein and Wysession, 2003).

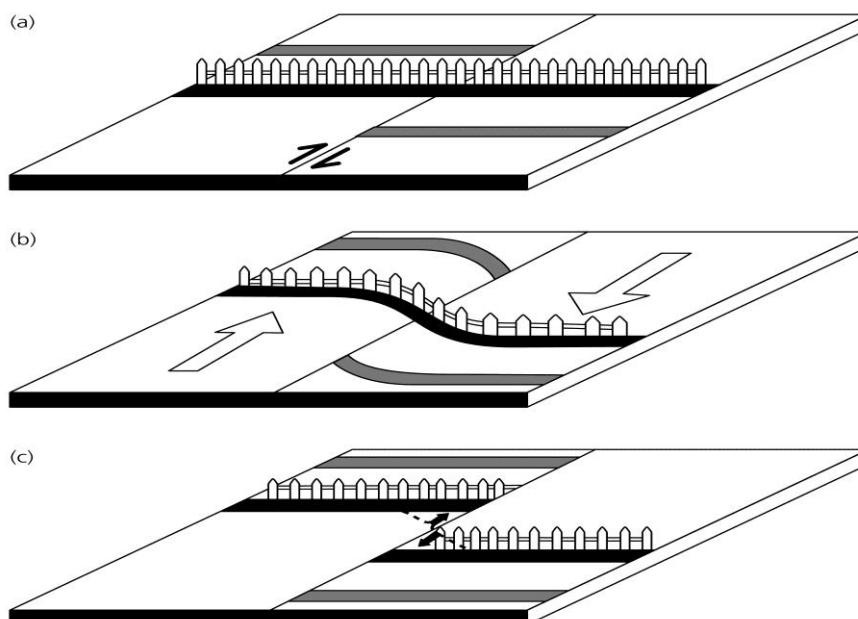
Ova simulacija pokazuje da, iako su putanje zraka koje se koriste u opisivanju prostornih valova u Zemlji intuitivno primjenjive i korisne, one su jednostavni načini u opisu kompliciranih poljavalova. Potresi na početku generiraju sferne valne fronte čije interakcije s raznim granicama stvaraju nove valne fronte. Koristimo imena za dolaskevalnih fronta nastalih na površini, pa su za različite putanje iste valne fronte ili za iste dijelove u različito vrijeme dana različita imena. [2]

## 4 Potresi

Na početku smo razmatrali širenje seizmičkih valova i kako se koriste za proučavanje unutrašnjosti Zemlje. U ovom ćemo poglavlju ukratko razmotriti nastanak seizmičkih valova i kako se oni koriste za proučavanje potresa te se na kraju dotaknuti opasnosti od potresa.

Potresi uglavnom nastaju narasjedima, strukturama u Zemlji na kojima se jedna strana giba u odnosu na drugu. U pravilu, potresi nastaju na rasjedima koji suprethodno utvrđeni geološkim kartiranjem, na kojima se vidi da su se u prošlosti odvijala gibanja duž rasjeda. Potresi koji su se dogodili na površini ili dovoljno blizu površine Zemlje često ostavljaju vidljiv prijelom tla duž rasjeda. Na primjer, potresi nastali duž rasjeda San Andreas mogu se vidjeti kao pukotine na velikim udaljenostima duž Kalifornije. U jednom od tih potresa (San Francisco, 1906.) utvrđeno je kako se nekoliko stotina kilometara jedne strane rasjeda pomaknulo za nekoliko metara u odnosu na drugu stranu. [2]

Proučavajući navedeni potres, H. Reid je iznio *teoriju elastičkog odrazaza* potrese na rasjedu. U tom modelu, sredstva na suprotnim stranama rasjeda gibaju se jedna u odnosu na drugu, ali trenje na rasjedu to gibanje „blokira“ i sprječava pomicanje krila rasjeda (sl.4.1.). U konačnici napetost akumulirana u stijenama nadmaši onu koju stijene na rasjedu mogu podnijeti i dogodi se pomak na rasjedu rezultirajući potresom. [2]



Slika 4.1. Model elastičkog odrazaza.

[http://levee.wustl.edu/seismology/book/book\\_no\\_captions/figures/ch4/4\\_1\\_03.JPG](http://levee.wustl.edu/seismology/book/book_no_captions/figures/ch4/4_1_03.JPG)

Teorija elastičkog odraza je veliki konceptualni iskorak, zato što se rasjedanje viđeno na površini Zemlje prije smatralo posljedicom potresa, a ne njegovim uzrokom [2]. Otkriveno je da potresi odražavaju gibanja litosfernih ploča i tako pružaju korisne informacije o tome kako se i zašto ploče gibaju. Npr. potresi na rasjedu San Andreas nastaju slijedom stalnih gibanja Sjevernoameričke i Pacifičke ploče. Ima mnogo neodgovorenih pitanja o tome kako i kada rasjedi pucaju, čak i za potrese koji nastaju u blizini Zemljine površine, odakle je relativno lako prikupiti podatke. Ovi su problemi važni za društvo zato što poznavanje mjesta i vremena u kojem se potres može zbiti te očekivano gibanje tla tijekom potresa može pomoći u ublažavanju opasnosti od potresa. [2]

Mjesto nastanka potresa (žarište ili hipocentar) određuje se pomoću vremena nailazaka seizmičkih valova zabilježenih na seizmografima [2]. Točka na Zemljinoj površini vertikalno iznad žarišta potresa naziva se epicentar. Veličina potresa mjeri se iz amplituda gibanja tla zabilježenih na seizmogramima i iskazuje se pomoću magnitude ili seizmičkog momenta [2].<sup>††††</sup> Seizmogrami nekog potresa sa brojnih stanica diljem svijeta daju važne informacije o geometriji rasjeda u svrhu analize potresa. Npr., usporedbom nekoliko seizmograma određenog potresa, po polaritetu prispjelih valova možemo odrediti u kojem se smjeru rasjed pomaknuo.

Važno je imati na umu da su seizmički modeli samo aproksimacije puno kompliciranije stvarnosti.

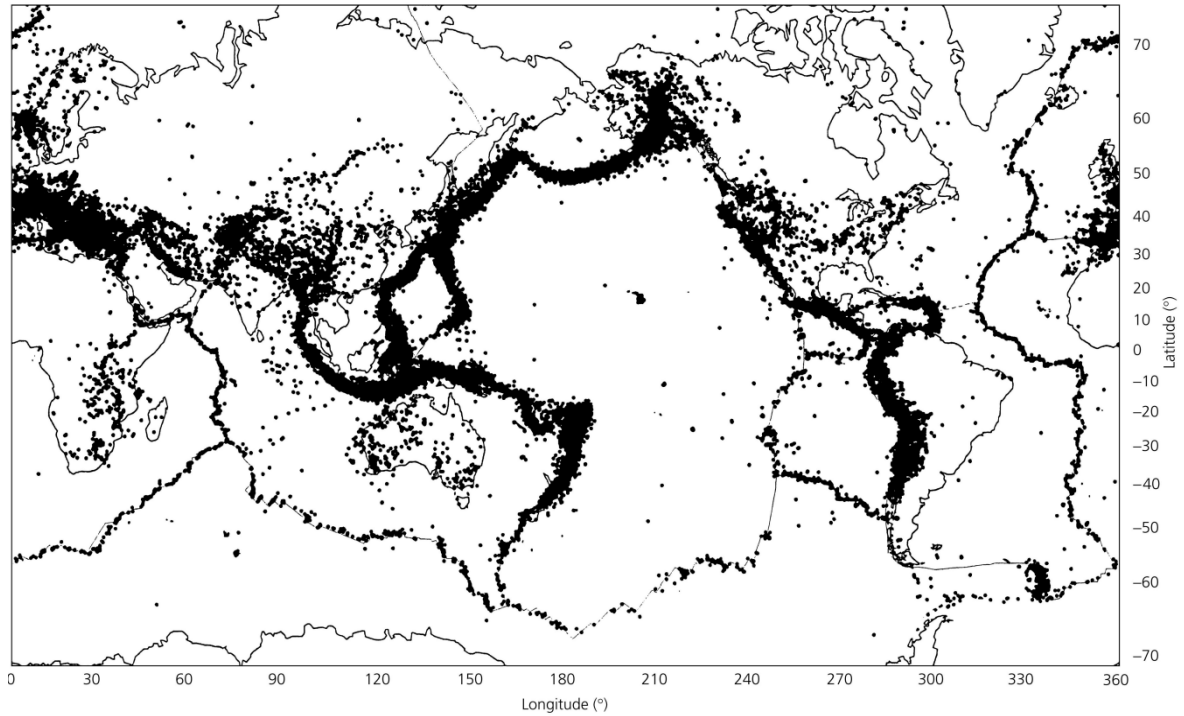
#### **4.1 Seizmička opasnost i rizici**

Jedna od glavnih motivacija za proučavanje potresa i seizmologije je šteta uzrokovana velikim potresima. U mnogim djelovima svijeta, seizmičke opasnosti (hazardi) su značajne, neovisno o tome jesu li javno prepoznate (kao u Japanu gdje se u školama provode vježbe (treninzi) u vezi potresa) ili nisu. Najveći dio izazova u predviđanju i određivanju opasnosti od potresa je taj da se u bilo kojem datom području veliki potres jako rijetko dogodi na ljudskoj vremenskoj skali, ali kada se dogodi napravi veliko uništenje [2].

---

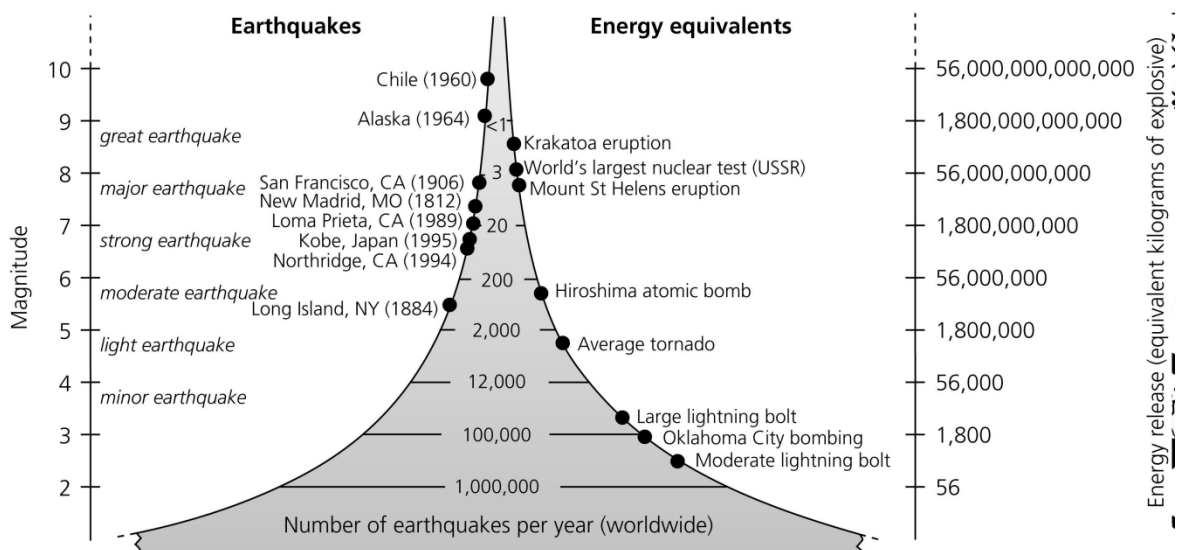
<sup>††††</sup> Magnituda je dana kao bezdimenzionalan broj mjeran na različite načine, uključuje magnitudu prostornog vala  $m_b$ , magnitudu površinskog vala  $M_s$ , i moment magnitude  $M_w$ . Seizmički moment ima dimenziju energije, Nm.

Potresi se uglavnom događaju na granicama između listosferskih ploča, iako se neki potresi događaju i u područjima unutar ploča. Slika 4.2. pokazuje mjesta epicentara potresa s magnitudama  $m_b \geq 4$ , između 1963. i 1995. godine. Mjesta na kojima su epicentri potresa najgušći ocrtavaju granice između ploča.



Slika 4.2. Karta prikazuje epicentre svih potresa tijekom 1963. – 1995. s magnitudom od  $m_b \geq 4$ . (Stein and Wysession, 2003).

Energija oslobođena velikim potresima je zastrašujuća (sl.4.3.).



Slika 4.3. Usporedba frekvencije, magnitude i energije oslobođene potresom i drugih fenomena. (Stein and Wysession, 2003).

Na primjer, potres u San Franciscu 1906. godine oslobodio je oko  $3 \cdot 10^{16}$  J<sup>\*\*\*\*</sup> elastičke energije. Ta je energija ekvivalentna onoj oslobođenoj za nuklearne eksplozije od 7Mt, puno više od 0,012 megatonske bombe koja je pala na Hirošimu. Najveći zabilježeni potres, 1960. u Čileu je događaj u kojem se pojavilo oko 21m širok odron na rasjedu dugačkom 800km i širokom 200km te je pritom bilo oslobođeno oko  $10^{19}$ J elastičke energije, puno veće od 200 Mt bombe. Ovaj je potres oslobodio puno više energije od svih nuklearnih bombi koje su ikad eksplodirale, od kojih je najveća imala 85Mt. Za usporedbu, ukupna globalna godišnja potrošnja energije je oko  $3 \cdot 10^{20}$ J. [2]

Srećom, veliki potresi su rijetki zato što se oslobođena energija sporo akumulira kroz dugo vremena. Potres u San Franciscu dogodio se na rasjedu San Andreas u Sjevernoj Kaliforniji [2]. Studije koje koriste satelite za Globalni sistem pozicioniranja (engl. Global Positioning System – GPS) pokazuju da se dalje od međusobne granice te dvije ploče međusobno gibaju brzinom od oko 4mm/god [2]. Veći dio rasjeda San Andreas je većinu vremena „zablokiran“. Jednostavan izračun predviđa da bi se takvi potresi trebali dogoditi prosječno svakih 4000mm/(45mm/god) ili 90 godina [2]. Stvarni interval dakako nije jednoličan.

Magnituda potresa ( $M_s$ )	Broj po godini	Oslobođena energija ( $10^{15}$ J/god)
$\geq 8$	0-1	0-1000
7-7.9	12	100
6-6.9	110	30
5-5.9	1,400	5
4-4.9	13,500	1
3-3.9	>100,000	0,2

Tablica 4.1. Broj potresa po godini. (Stein and Wysession, 2003).

Kao što je pokazano u tablici 4.1, potresi magnitude 7 događaju se približno jedanput mjesečno, a potresi magnitude 6 i više događaju se prosječno svaka tri dana. Potresi dane magnitude događaju se oko 10 puta rjeđe od onih koji su za jedinicu magnitude manji. Kako je magnituda proporcionalna logaritmu oslobođene energije, očito

\*\*\*\* Nuklearne se eksplozije često označavaju u Megatonama (Mt), to je jednako 1.000.000 tona TNT ili  $4,2 \cdot 10^{15}$  J.

je najviše seizmičke energije oslobođeno u velikim potresima. Magnituda potresa 8,5 oslobađa puno više energije od svih drugih potresa koji su se dogodili u godini zajedno. Stoga opasnost proizlazi od velikih potresa (tipično magnitude veće od 6.5).

U procjeni moguće opasnosti od potresa ili drugih prirodnih katastrofa korisno je razlikovati opasnost (hazard) od rizika (ugroženost). Opasnost (hazard) je unutarnja priroda pojave potresa i rezultirajuće gibanje tla uz druge efekte [2]. Rizik je mjera mogućnosti da određeni hazard utječe na živote i imanja [2]. Stoga, iako je opasnost (hazard) neizbježna prirodna činjenica, rizik utječe na ljude i građevine. Područja velike opasnosti mogu imati male rizike zato što tamo živi malo ljudi i/ili građevine su kvalitetno napravljene, a područja umjerene opasnosti mogu imati velike rizike zbog velike populacije i nekvalitetnih građevina. Rizici od potresa mogu se smanjiti ljudskim djelovanjem dok se opasnost ne može.

Seizmologija se na razne načine koristila u ublažavanju rizika od potresa.

## **4.2 Potresno inženjerstvo**

Najviše smrti povezanih s potresima su posljedica urušavanja građevina, jer se ljudi, koji stoje na otvorenom polju tijekom velikog potresa, samo sruše na tlo. Stoga se često kaže da „*potresi ne ubijaju ljude, građevine ubijaju ljude*“ [2]. Posljedica toga je ispravna izgradnja kao glavna metoda smanjenja rizika od potresa. Pitanje smanjenja rizika od potresa je upućeno inženjerima seizmologije i potresnim inženjerima, disciplinama na granici između seizmologije i građevinarstva. Zajednički im je cilj razumjeti gibanje tla tijekom potresa koje može oštetiti građevine i projektirati konstrukcije koje će to nadvladati. [2]

Ova se istraživanja više usredotočuju na snažna gibanja tla u blizini potresa koja su dovoljno snažna da nanesu štetu, nego na manja i često neprimjetna gibanja tla korištena u brojnim drugim seizmološkim primjenama [2]. Dva se česta mjerenja koriste u karakteriziranju gibanja tla na nekom mjestu. Jedan je mjerenje akceleracija gibanja tla. Akceleracije su najodgovornije za uništenje građevina [2]. Kuća bi bila neoštećena npr. na brzom „vlak“ koji putuje po ravnim tračnicama, kada ne bi bilo akceleracije. Međutim, tijekom potresa kuća će biti uzdrmana i mogla bi se oštetiti kad bi akceleracija bila

dovoljno velika. Ovi se problemi istražuju korištenjem akceleroorafakoji mogu raditi tijekom jakog potresanja u blizini potresa, ali su manje osjetljivi na manja gibanja tla udaljenih potresa [2]. Seizmički hazard za dano područje često je opisan numeričkim modelima koji procjenjuju koliko je vjerojatno da će određeno područje doživjeti neku akceleraciju u određenom vremenu [2].

Drugi način karakteriziranja jakog gibanja tla koristi makroseizmički intenzitet, mjeru koja opisuje posljedice trešnje za potresa.

*Tablica 4.2. MCS ljestvice.*

*([http://www.gfz.hr/osobne\\_stranice/davorka\\_herak/Fizika%20Zemlje%20-%20predavanja.pdf](http://www.gfz.hr/osobne_stranice/davorka_herak/Fizika%20Zemlje%20-%20predavanja.pdf)).*

Stupanj intenziteta potresa	Učinci potresa
I	Nezamjetljiv potres. Bilježe ga samo seizmografi.
II	Vrlo lagan potres. Osjeti ga više vrlo osjetljivih osoba, i to pretežno u višim katovima kuća.
III	Lagan potres. Osjeti ga više ljudi u unutrašnjosti kuća.
IV	Umjeren potres. U kućama ga primijeti velik dio stanovnika, a na otvorenom prostoru samo pojedine osobe. Tresu se vrata i pokućstvo, zveče prozori i posuđe, kao pri prolazu teških kamiona. Od onih koji spavaju neki se probude.
V	Prilično jak potres. Primijete ga mnogi na otvorenom prostoru. Predmeti koji slobodno vise, zanjšu se, ure njihalice se zaustavljaju. Slike na zidu se pomiču. Pojedini manji predmeti padaju. Vrata i prozori se otvore ili zatvore. Oni koji spavaju se bude, pojedinci bježe iz kuća.
VI	Jak potres. Primjećuju ga sve osobe i bježe iz kuća. Slike padnu sa zidova, mnogi predmeti se ruše, posuđe se razbija. Komadi pokućstva pomaknu se sa svog mjesta ili se prevrnu. Manja crkvena zvona zazvone. Na pojedinim dobro građenim kućama nastaju lagane štete.
VII	Vrlo jak potres. Događaju se rušenja i razaranja i nastaju znatne štete na namještaju u stanovima. Oštećuje se veći broj dobro građenih kuća. Crjepovi se lome i kližu s krova, ruše se mnogi dimnjaci.
VIII	Razoran potres. Jako oštećuje oko četvrtinu kuća, pojedine kuće se ruše, a mnoge postaju neprikladne za stanovanje. U mokrom tlu i na strmim obroncima nastaju pukotine.
IX	Pustošan potres. Oko 50% zidanih kuća znatno je oštećeno, mnoge se ruše a većina ih postaje neprikladna za stanovanje.
X	Uništavajući potres. Teško oštećuje oko tri četvrtine zgrada, a većina njih se ruši. U tlu nastaju pukotine široke i po nekoliko decimetara. S brda se odronjava zemlja a otkidaju se i dijelovi pećina.
XI	Katastrofalan potres. Ruše se sve zidane zgrade. U tlu nastaju široke pukotine iz kojih prodire voda noseći pijesak i mulj. Zemlja se odronjava, mnoge se stijene otkidaju i ruše.
XII	Velika katastrofa. Nijedna ljudska tvorevina ne može opstati. Tlo potpuno preobrazuje izgled, jezera se zatrpavaju, nastaju vodopadi, a rijeke mijenjaju korita.



Tablica 4.2. prikazuje skraćeni oblik Mercalli-Cancani-Siebergove ljestvice za određivanje jakosti potresa, koja je podijeljena na 12 stupnjeva jakosti potresa, označenih rimskim brojevima od I (uglavnom neopaženo) do XII (totalno uništenje) [2]. Intenzitet nije jedinstveno povezan s akceleracijom, koja je numerički parametar kojeg seizmolozi izračunavaju za potrese i inženjeri koriste za opis utjecaja na građevine. Tablica pokazuje približno slaganje između intenziteta i akceleracije, ali ono može varirati. Prema tome, intenzitet je koristan jer je zaključen na temelju ljudskih iskaza i može se odrediti tamo gdje nema postavljenih seizmometara i za potrese koji su se dogodili prije otkrića modernih seizmografa (oko 1890. godine) [2]. Iako vrijednost intenziteta može biti neprecizna (srušeni dimnjak može podići vrijednost za veliko područje), on je često najbolja informacija o potresima koji su se dogodili u prošlosti [2].

Projektiranje građevina da izdrže potrese su tehnološki, ekonomski i društveni izazov. Istraživanje se usmjerava boljem razumijevanju kako građevine odgovaraju na gibanje tla i kako bi se trebale graditi da bolje opstanu. Budući da takvo projektiranje podiže cijenu gradnje i tako preusmjerava sredstva u druge svrhe, od kojih bi neke mogle spasiti više života za manji trošak ili inače učiniti više društvenog dobra, problem je procijeniti seizmički hazard i odabrati nivo potresno otporne gradnje koja ima ekonomskog smisla. [2]

Važan faktor za potresno inženjerstvo je da konstrukcije rezoniraju na drugačijim periodima [2]. Iako rezonantni period ili periodi ovise o specifičnoj geometriji građevine i materijalu, oni općenito rastu s porastom visine ili temeljne širine građevine [2]. Na primjer, tipična kuća ili mala zgrada imaju periode od oko 0,2s, dok tipična deseterokatnica ima period 1s [2]. Ako je vrhunac energije gibanja tla blizu rezonantnog perioda građevine, i trešnja traje dovoljno dugo, građevina može podleći velikim oscilacijama i može biti ozbiljno oštećena. Ovaj je efekt poput ljuľjačke – guranje ljuľjačke u nasumičnim intervalima će je vjerojatno zaustaviti, no ako se guranje ponavlja na njezinom rezonantnom periodu, osobi se na njoj pruža dobra vožnja. Kroz taj mehanizam, potres može razoriti određene građevine i niti jedne druge [2]. Slično, građevine se mogu srušiti nakon potresa magnitude 7, ali mogu i ostati stajati nakon događaja magnitude 8 s vrhom energije na nižoj frekvenciji.

Drugi važan faktor na potres otpornih građevina je materijal tla tog mjesta. Labavi sedimenti i druge slabe stijene na površini povećavaju gibanje tla u usporedbi s mjestima

stjenovitog tla. Sedimenti u blizini površine mogu povećati pomake tla za više redova veličine od onih na čvrstoj stijeni [2].

Zgrade nisu jedini izazov za gradnju otpornu na potrese. Autoceste, mostovi, parkirališne konstrukcije, odlagališta, akumulacijska jezera, cjevovodi i energetska postrojenja predstavljaju dodatne probleme. Mnoge od ovih konstrukcija ključne su za društvo stoga je potreban dobrovoljan napor kako bi preživjele potres.

Akumulacijska jezera imaju poseban problem, a to je da mogu izazvati potrese. Ovo se doima nelogično, zato što bi dodatna količina vode trebala povećati tlak na stijene ispod i spriječiti rasjedanje, zbog pretpostavke da su dvije strane rasjeda pritisnute zajedno jače, zahtijevajući veću silu kojom bi nadjačali trenje. Međutim, čini se da voda zatvorena branama ponekad istječe među stijene smanjujući trenje duž rasjeda i olakšavajući raskid. Vjerojatnost da akumulacijska jezera induciraju potrese je stoga uzeta u obzir prilikom projektiranja brana. [2]

Najveći uzrok smrti povezanih s potresima i uništenja, čak veći od rušenja zgrada, su požari (nakon potresa). Glavni doprinos ovom problemu je taj da cijevi za vodu mogu puknuti čineći borbu protiv požara težom. [2]

Spektakularne izuzetke tvrdnji da „potresi ne ubijaju ljude, građevine ih ubijaju“ čine tsunamiji, klizišta, lavine i rastapanje tla. Planiranje potresnog hazarda također uključuje prepoznavanje mjesta gdje se ovi rizici pojavljuju.

Tsunamiji su veliki morski valovi koji se događaju kadse komad morskog dna pomakne, vulkanskom erupcijom, podmorskim klizištem ili podvodnim potresima [2] (sl.4.4.).



*Slika 4.4. Pogled iz zraka na Valdez, Aljaska, prikazuje poplavljanje obale slijedom potresa 1964. godine.(Stein and Wysession, 2003).*

Tsunami su neprimjetni dok prelaze oceane, ali se mogu dramatično povećati pri dodiru s obalom. Da se oslovi ovaj rizik, uspostavljen je sistem upozorenja na tsunamije u svrhu procjene vjerojatnosti da veliki potres generira tsunamije. [2]

Druga opasnost od potresa je likvefakcija, proces u kojem se labav, vodom zasićen pijesak ponaša kao tekućina kada se snažno tresu. U normalnim uvjetima, zrna pijeska su u kontaktu jedna s drugima i voda puni pore među njima. Snažnatrešnja pomiče zrna na stranu tako da se tlo ponaša poput muljevitog fluida slično „živom pjesku“. Građevine mogu potonuti, iako neoštećene, tijekom nekoliko sekundi vrhunca gibanja tla i završiti trajno zaglavljene kada trešnjaprestane i tlo se stvrdne. [2]

Sve navedene opasnosti pružaju dobru motivaciju za istraživanje potresa u nastavi fizike. Pomoću date motivacije učenike možemo zainteresirati, ali i olakšati problem savladavanja gradiva o mehaničkim valovima. Mehanizam nastanka potresa te kako mjerimo potrese učenicima ćemo najbolje približiti kroz rad u grupama te raspravom. U grupama rješavaju radne listiće u kojima se od njih traži da sami istraže danu pojavu dok u raspravi otkrivamo koje nam sve opasnosti prijete od potresa.

## METODIČKI DIO

(Prema: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:-mNcpSs-iKAJ:www.msnuceus.org/membership/html/jh/earth/earthquakes/jhearth.pdf+&cd=1&hl=hr&ct=clnk&gl=hr&client=firefox-a>)

### Radni listić broj 1 – UZROCI POTRESA

#### Materijali za učenike:

- članak
- radni list
- ljepilo
- bojice
- škare

**CILJ:** Učenici uče o uzrocima potresa.

#### UPUTE ZA PROFESORE

Ovaj članak daje učenicima znanstvenu podlogu o potresima. Navedeni su različiti oblici energije koji se oslobađaju putem seizmičkih valova. Ovaj članak također opisuje različite oblike rasjeda koji mogu nastati uslijed oslobađanja te energije.

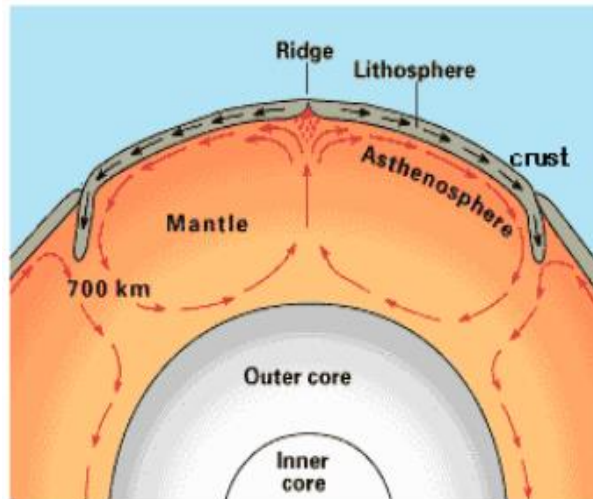
Od učenika se traži da naprave model rasjeda i usporede različite oblike gibanja.

#### Članak:

Zamislite da sjedite na kauču i gledate TV. Odjednom se televizor počne tresti naprijed - natrag. Prvo pomislite da je to jedan veliki kamion, ili niskoletajući avion. Kakogod, umjesto da prođe, potresanje postaje sve jače. Knjige i papiri počnu padati sa zidova. Možda padnu na vas. Pokušavate stajati, ali trešnjaje toliko jaka da ne možete držati ravnotežu. Završite na podu i sklonite se ispod čvrstog stola. Buka vam odzvanja u ušima, skoro pa zaglušujuća. Nestaje struje. Televizor pada. Čujete posude koje se razbija u kuhinji. Soba se puni prašinom. Trešnja postepeno prestaje i vi možete ponovo ustati. Trčite van. Drveća su popadala. Obližnja se građevina urušila.

Doživjeti potres magnitude 7 jedan je od najstrašnijih doživljaja kojeg ikad možete doživjeti. Ali kako Zemlja može biti tako destruktivna?

Zemlja nije samo čvrsta stijena, koja se okreće oko svoje osi. Znanstvenici su otkrili da se unutrašnjost Zemlje sastoji od nekoliko različitih slojeva, kore, plašta i jezgre. Međudjelovanje kore i plašta uzrokuje većinu potresa. Gornji dio plašta sadrži područje zvano astenosfera koje je djeomično rastopljeno.



Područje iznad astenosfere zove se litosfera. Litosfera „pluta“ na astenosferi u velikim blokovima koji međudjeluju. Ovi „blokovi“ su ono što znanstvenici nazivaju pločama. Ploče se polako gibaju iz nekoliko razloga koji uključuju konvekciju, gravitaciju, rotaciju i druge sile.

Konvekcijaska struja u Zemlji nastaje kada se koncentrirano područje s dna plašta zagrije. Toplije stijene tada se pomiču prema gore uzrokujući trodimenzionalno kružno gibanje. Ako razmislimo o konvekcijskoj struji unutar plašta, možemo zaključiti kako ova gibanja uzrokuju napetosti u Zemljinoj kori.

Kontinenti su sastavljeni od lakših materijala i čini se da nikada neulaze u konvekcijsku struju. Slično bi bilo s uljem koje pluta na vrhu kipteće vode. Ono uvijek ostaje na vrhu.

Postoje također druge napetosti u litosferi koje uzrokuje rotacija Zemlje oko svoje osi. Ekvator se giba puno brže od polova. To je kao kad košarkaš vrti loptu na svom prstu. Igrač nađe točku na osi koja se ne giba i koja balansira. Kako idete prema ekvatoru Zemlje od rotacijske osi putujete iz 0 km/hu 1669,8 km/h. Na Zemlji to ne osjećamo zbog drugih fizikaknih ograničenja, ali „vanzemaljac“ koji bi nas gledao odozgo bi to vidio. Dakle, polarni medvjed na Sjevernom Polu i pingvini na Južnom Polu bi stajali mirno, dok bi se ljudi u New Yorku kretali brzinom 960 km/h, čak i ako bi mirno stajali u prometu. Pa kakve to ima veze sa potresima?

Ove osnovne napetosti uzrokovane tektonikom litosfernih ploča koja su pod utjecajem rotacije i konvekcijom su naprosto previše za litosferu. Ona otpušta svoju

napetost „pucanjem“ ili poznatije - rasjedima. Kakogod, micanja duž rasjeda uzrokuju oslobađanje energije koja se prenosi seizmičkim valovima. Kad valovi stignu na površinu Zemlje tresu je uzrokujući potrese.

Potresi nastaju iznenadnim pokretima i prijelomima stijenskih masa duž već postojećih rasjeda. Rasjed je pukotina u Zemljinoj kori. Točka u rasjedu na kojoj pomak nastane naziva se žarište potresa. Točka na površini Zemlje točno iznad žarišta je epicentar. Rasjedi mogu nastati izdizanjem, spuštanjem, ili pomicanjem rasjednih krila..

Seizmički valovi putuju kroz Zemlju. Postoji puno različitih vrsta valova koje razlikujemo. Dva su glavna vala, P i S val. Prva se vrsta naziva P-val, longitudinalni ili primarni val. P val se može opisati kao „povuci-potegni“ val jer se giba skupljanjem i širenjem materijala duž horizontalnog puta.

Druga vrsta vala naziva se S-val. S-valovi su smicajni (ili transverzalni) valovi. S-valovi su sporiji od P-valova. Čestično gibanje za prolaska smicajnih valova okomito je na smjer rasprostiranja vala.

Energija oslobođena tijekom potresa uzrokuje trešnju tla. Što se više približavamo epicentru, to je trešnja tla u mnogo slučajeva ozbiljnija. Ova se promjena događa iz mnogo razloga. Najznačajniji je taj da se seizmička energija troši kako val putuje kroz stijene uslijed trenja i drugih čimbenika. Osim toga, različite vrste seizmičkih valova putuju različitim brzinama. To znači da u blizini epicentra potresa, svi valovi dolaze otprilike u isto vrijeme i tlo se jako tresu u kratkom vremenskom periodu. Dalje od epicentra brži valovi dolaze prije sporijih. Širenje energije čini trešnju slabijom.

Seizmički valovi nastali u potresima mogu biti zabilježeni i mjereni pomoću seizmografa. Zapis napravljen na seizmografu zove se seizmogram.

## *Zadatak za učenike – model rasjeda*

### I. Napravite model

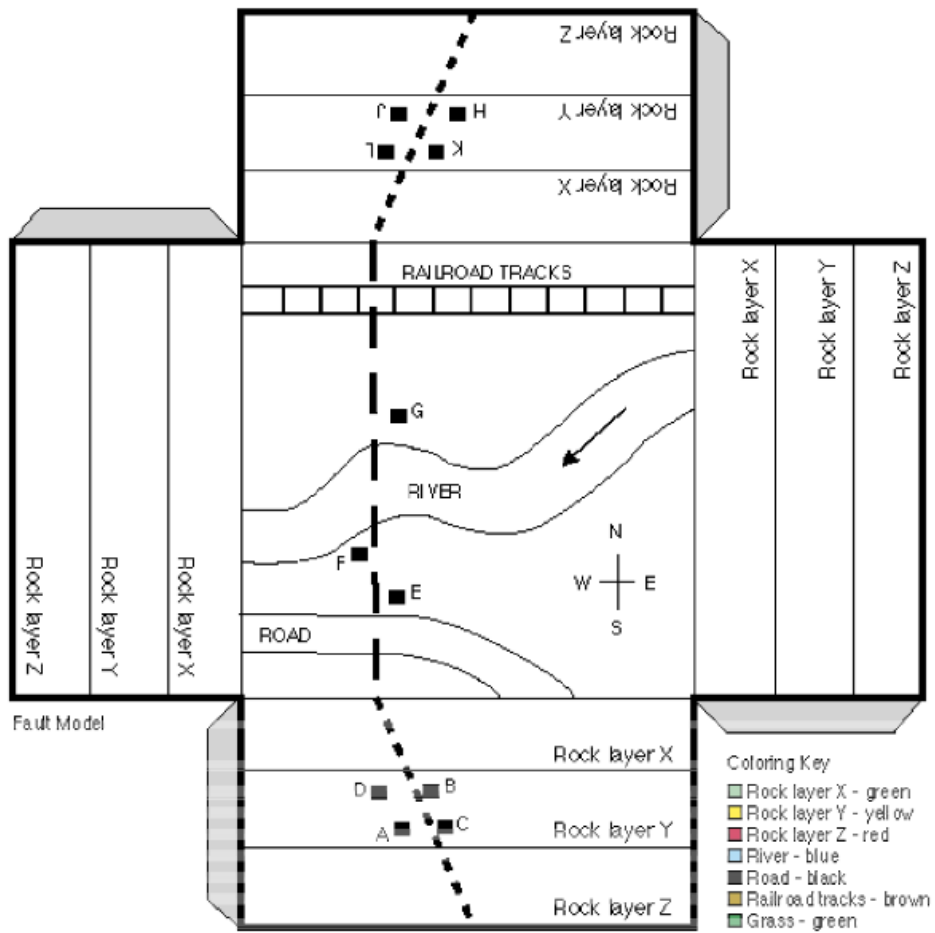
1. Obojite dani model rasjeda prema naznačenim bojama.
2. Zalijepite model rasjedana komad građevinskog papira.
3. Izrežite model rasjeda i savinite svaku stranicu prema dolje tako da načinite kutiju sa doljnjim karakteristikama vrhu. Budite sigurni da ste sklopili sve dijelove prije no što ih zaljepite.
4. Spojite trakom ili zalijepite kutove zajedno. Kutija je trodimenzionalan model gornjih slojeva Zemljine kore.
5. Isprekidane linije na vašem modelu predstavljaju rasjed. Pažljivo režite duž isprekidanih linija. Završit ćete s dva komada. Možete tražiti da Vaši učenici zalijepi komad građevinskog papira na obje strane bloka rasjeda duž ploha rasjeda. To će pomoći kod demonstracije.

### II. Prikaz modela rasjeda

U ovoj vježbi učenici otkrivaju model normalnog rasjeda. Nakon što napravite model rasjeda po gore navedenim uputama, prikažite „normalan rasjed“.

1. **Upute za učenike:** pronađite točke A i B na svom modelu. Pomaknite točku B tako da bude blizu točke A. Promatrajte model sa strane (s poprečnog presjeka). Upravo promatrate „normalan rasjed“. Postoje li drugi načini na koje rasjedi mogu uzrokovati pokrete?

List rasjeda:





## Radni listić broj 2 – MJERENJE POTRESA

### Matrijali za učenike:

**CILJ:** Učenici interpretiraju magnitudu i intenzitet.

- članak
- ravnalo
- kompas - neobavezno
- radni list

### UPUTE ZA PROFESORE

Učenici uče o razlici između intenziteta i magnitude potresa. Intenzitet je jačina gibanja tla na određenom mjestu. Koristimo prepravljenu Mercallijevu ljestvicu pri mjerenju intenziteta koristeći Rimske brojeve od I do XII. Magnituda potresa je mjera količine oslobođene energije za potresa. Potres ima puno intenziteta ovisno o tome gdje se potres nalazi. Međutim, potres ima samo jednu magnitudu.

Geološkaslužba uSAD-u (USGS) pruža stručne i znanstvene podatke o potresima, geomagnetskom polju Zemlje, te ostalim geofizičkim i geološkim pojavama profesorima, učenicima i društvu. USGS, odnosno njezin dio NEIC (National Earthquake Information Center) je agencija uključena u razumijevanje znanosti o potresima (seizmologiji) i skuplja podatke po cijelom svijetu. U članku ispod se od učenika traži da posjete stranicu USGS (<http://earthquake.usgs.gov>) kako bi pogledali koji su se potresi nedavno dogodili. Možete ih tražiti da odaberu 5-10 različitih potresa i popišu magnitude pronađene na web stranici. Provjerite jesu li zabilježili datum i mjesto.

Također, uključen je i radni list u kojem učenici određuju mjesta potresa na temelju očitavanja seizmograma. Svi su seizmogrami s oznakama u jedinicama koje predstavljaju UTC vrijeme. Tako je izbjegnuta zbrka mjesnih datuma i vremena. Svaka točka i dugačka crtica predstavlja jednu minutu. To će nam koristiti u određivanju dolazaka P i S valova. Opskrbite učenike kompasima kako biste im olakšali mjerenje radijusa i kako bi izradili krugove iz datog mjesta.

ODGOVORI: Princ Rupert, Britanska Kolumbija; C (A) vrijeme kašnjenja: 3min i 50 s; km:  $230s \times 8 = 1840$  km; New Orleans, Louisiana (B) vrijeme kašnjenja: 3min i 40s; km:  $300s \times 8 = 2400$  km; Honolulu, Hawaii (C) vrijeme kašnjenja: 5min i 40s; km:  $340s \times 8 = 2720$  km. Epicentar je negdje u središnjoj Kaliforniji.

## Članak:

Ne tresu svi potresi Zemlju jednako. Ljudi mogu osjetiti trešnju različitih intenziteta na različitim mjestima. Neki potresi tresu sve (visok intenzitet), a neki se uopće ne osjećaju (nizak intenzitet). Uspoređivanje ovih potresa je stoga jako važno kako bi se izbjegla šteta.

Prije izuma seizmografa, bile su korištene različite metode bilježenja potresa. U Italiji je 1902. godine Giuseppe Mercalli izradio skalu s 12 točaka koja je bila osnovana na opisima oštećenja.

Danas prerađena Mercallijeva ljestvica predstavlja lokalne efekte ili štete uzrokovane potresom. „Intenzitet“ na različitim točkama općenito pada što smo dalje od epicentra potresa. Raspon intenziteta od I do XII se uvijek izražava u Rimskim brojevima. Npr. potres intenziteta „II“ ljudi će jedva osjetiti, dok će se teško oštećenje označiti sa „X“.

Richterova magnituda je matematička mjera oslobođene energije mjerene na seizmografu. To je u stvari mjera veličine valova proizvedenih potresom. Magnitudu je u seizmologiju uveo Charles F. Richter na Kalifornijskom institutu za tehnologiju 1935. Radi se o logaritamskoj vezi između veličine potresa i opaženog gibanja tla [11]. Magnituda 7, npr. bilježi poremećaj gibanja tla 10 puta veći od zabilježenog potresa magnitude 6. Oslobođena energija potresa M 7 je međutim približno 30 puta veća od one oslobođene potresom M 6.

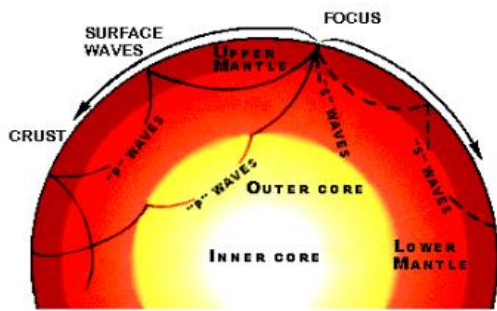


Charles F. Richter

Potres M 8 oslobađa 900 puta (30x30) veću energiju od potresa M 6. Postoji samo jedna „magnituda“ potresa korištenjem Richterove ljestvice.

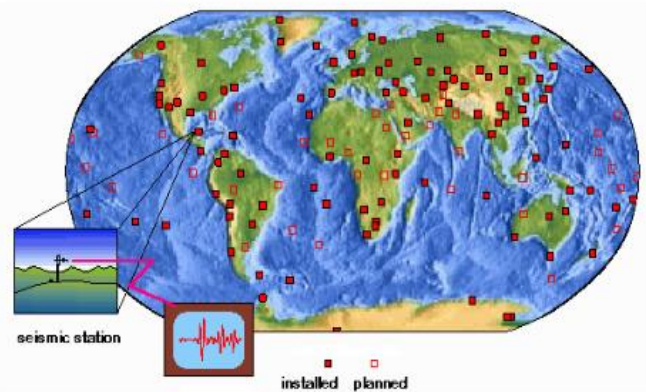
Budući da Richterova skala ne razlikuje adekvatno velike potrese seizmolozi koriste novu „momentnu“ magnitudu kako bi pružili bolja mjerenja. Naskali momentnemagnituda, potres u San Franciscu je procijenjen na magnitudu 7,7 u usporedbi s procijenjenom Richterovom magnitudom 8,3.

Seizmogrami bilježe energije emitirane seizmičkim ili potresnim valovima koje zrače iz žarišta (točke na kojoj potres počinje). Seizmolozi (znanstvenici koji istražuju potrese) koriste seizmogramе kako bi matematički opisali magnitudu potresa.



Potresi proizvode mnogo različitih vrsta seizmičkih valova. Seizmogrami bilježe dolaske P valova prije dolazaka S valova. Površinski se valovi također proizvode i putuju po površini Zemljine kore.

Znanstvenici s geološkog instituta u SAD-u (USGS) otvaraju seizmografske postajepo cijelom svijetu već više od 35 godina. Suraduju s drugim znanstvenicima iz više od 80 zemalja u Globalnoj seizmičkoj mreži. Glavna primjena seizmografskih mreža je lociranje potresa.



Iako je moguće zaključiti općenito o lokaciji događaja na temelju bilježenja jedne stanice, najtočnije je koristiti tri ili više stanica.

Kad se dogodi potres, podaci se sa seizmografa šalju u glavni centar za istraživanje gdje se analiziraju seizmogrami. Ova analiza određuje gdje se potres dogodio i kolika mu je magnituda.

Dana je jedna seizmička postaja, zapis seizmograma će voditi mjerenja S-P vremena dolazaka (sekunde od kada stigne P do kada stigne S). Udaljenost između postaje i žarištamože se izračunati. Pogledajmo slučaj potresa koji se dogodio negdje u SAD-u i odredimo mu približnu lokaciju.

Koristit ćemo tri stanice koje uključuje Prince Rupert, Britanska Kolumbije (A), New Orleans, Louisiana (B) i Honolulu, Hawaii (C). Dolasci P i S valova su već određeni u danojtablici. Oduzmite dolazak S vala od dolaska P vala i odredite „vrijeme kašnjenja“ te zabilježi podatak.

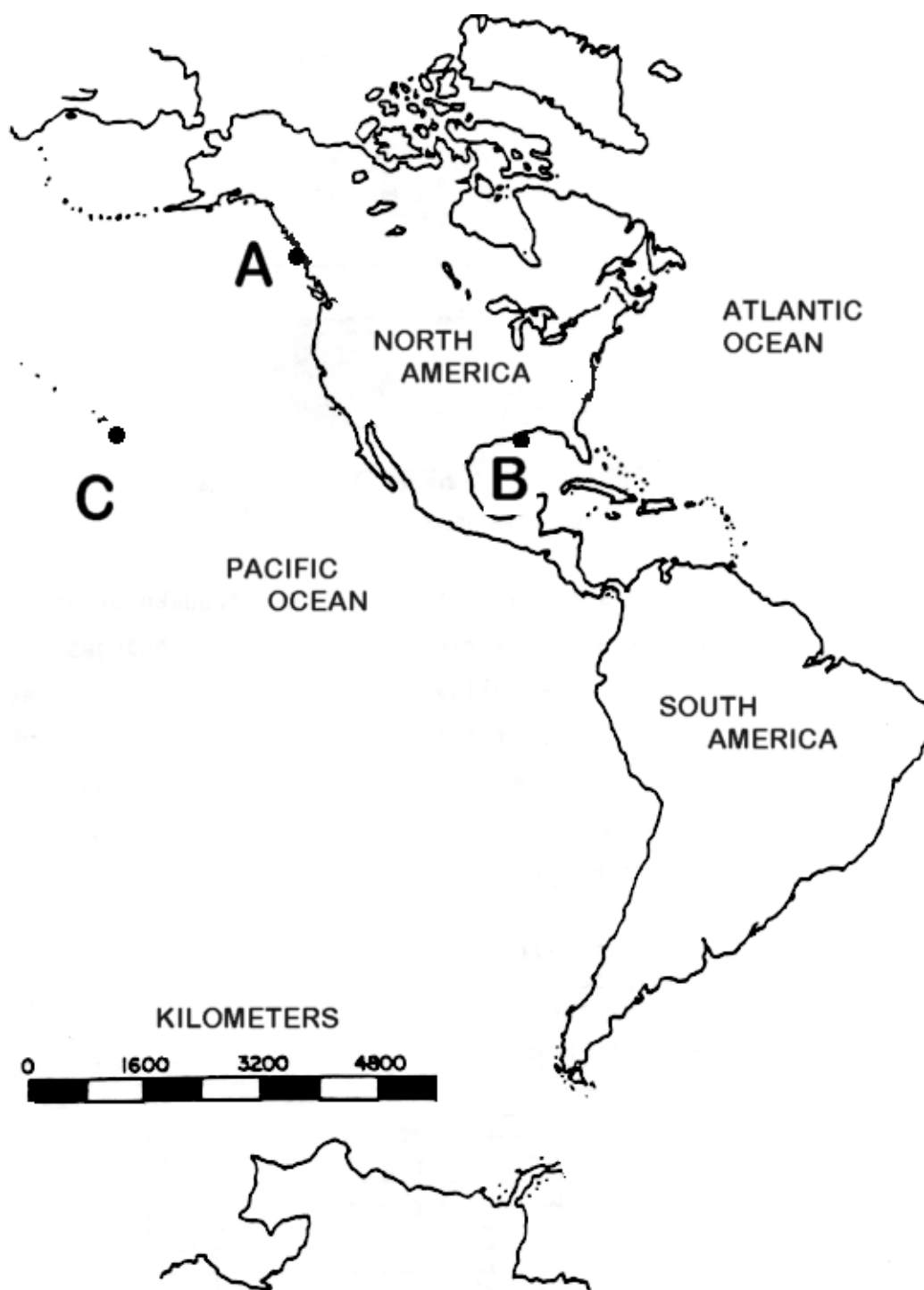
Pomnožite sekunde S-P sa 8 km/s za kilometre udaljenosti i zabilježite u grafu. Koristite skalu i ucrtajte krug na mapu oko mjesta stanice koristeći kompas, s radijusom

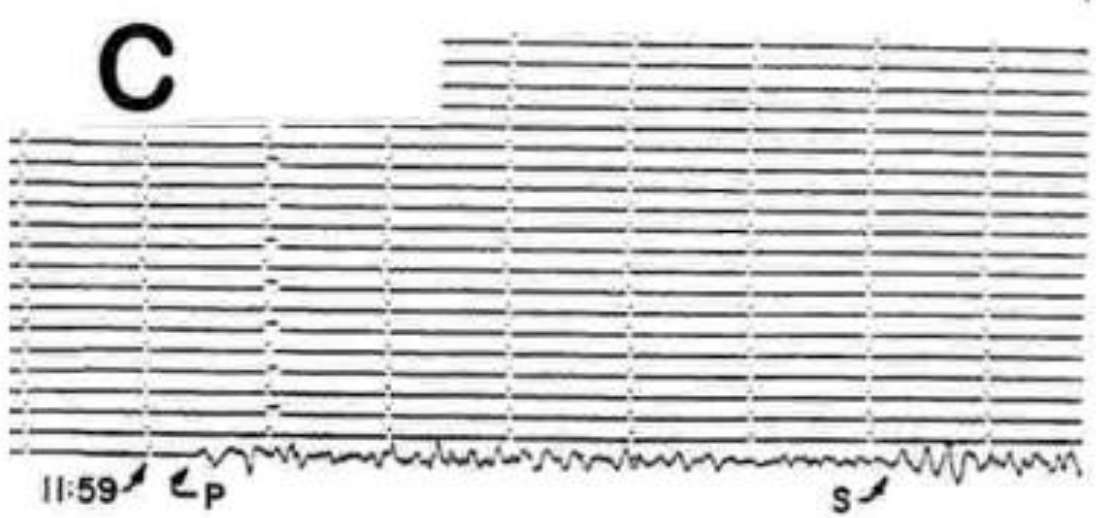
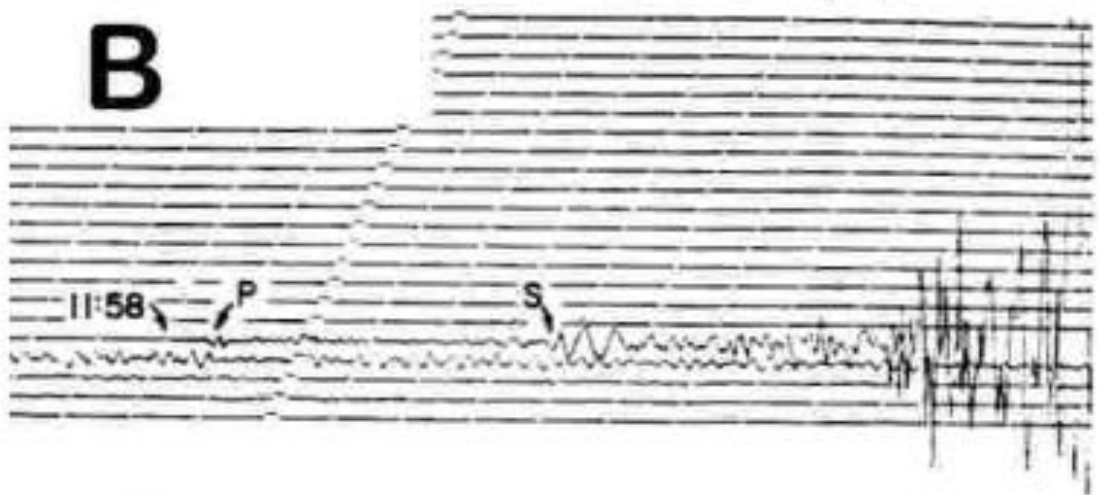
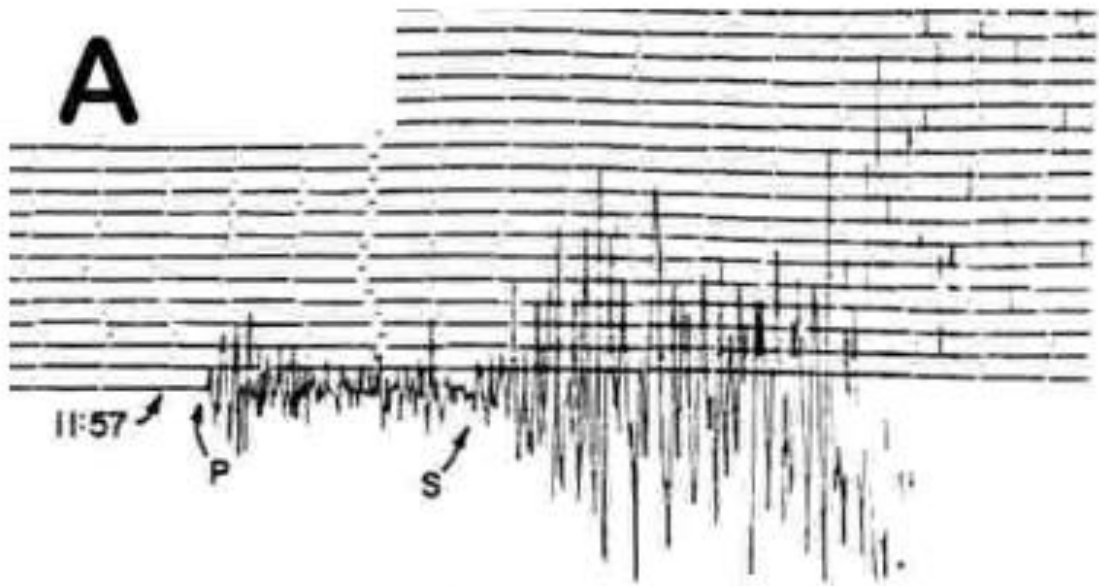
jednakim udaljenosti. Sa S-P vremenom s druge stanice, krug oko te stanice će suziti moguća mjesta na dvije točke. Samo sa S-P vremenom treće stanice s kojim možete nacrtati treći krug možete odrediti koja je od dvije moguće prethodne lokacije stvarna.

Možete li odrediti gdje se nalazi epicentar potresa?

	Vrijeme nailaska P vala			Vrijeme nailaska S vala			Vrijeme kašnjenja		Udaljenost od epicentra
	[h]	[min]	[s]	[h]	[min]	[s]	[min]	[s]	[s * 8 km]
Prince Rupert, BC	11	57	40	12	1	30			
New Orleans, LA	11	58	40	12	3	40			
Honolulu, HA	11	59	30	12	5	10			

*Zadatak za učenike – Lociraj epicentar potresa magnitude 7.7*

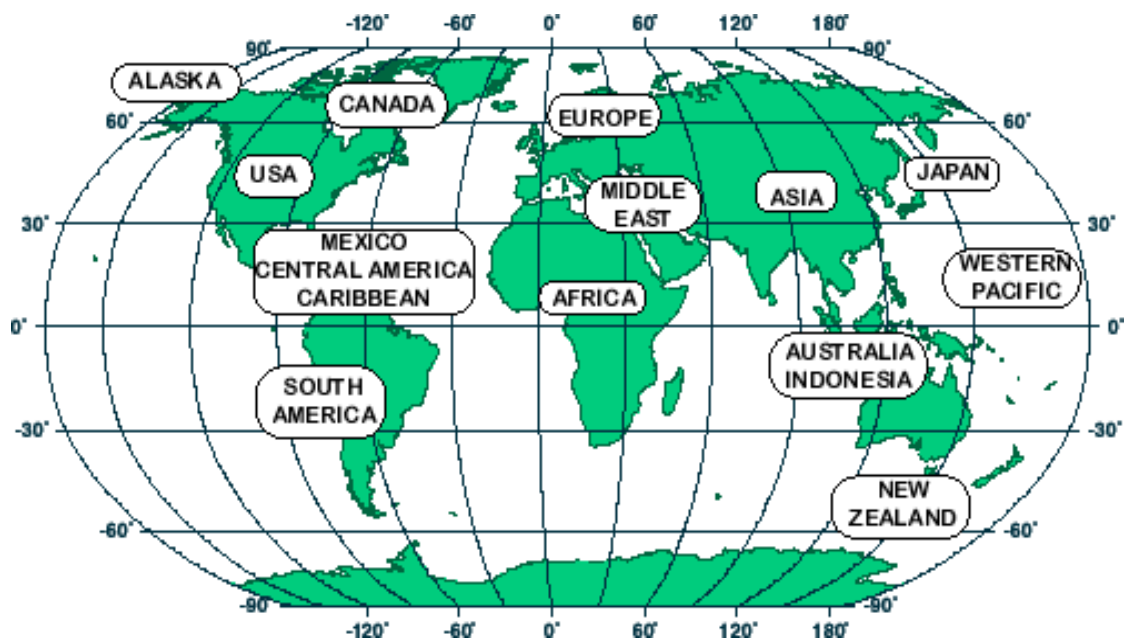




### *Zadatak za učenike – lociranje potresa korištenjem interneta*

Potresi se zbivaju svaki dan po cijelom svijetu. Na sljedećoj web-stranici locirajte 10 potresa diljem svijeta i zabilježite te podatke na kartu.

<http://earthquake.usgs.gov/activity/world.html>



### ISPIT ZNANJA:

**Dio 1. Definicije.** Spari brojeve poredpojmovia ili koncepata u stupcu 1 s definicijama iz stupca 2.

Stupac 1	Stupac 2
1. Žarište	a. Povuci potegni ili primarni val
2. Rasjed	b. Mjera za energiju oslobođenu u žarištu potresa
3. Čile	c. Gornji dio plašta
4. Prince William Sound, Aljaska	d. Debljina ploča
5. S val	e. Mjesto u SAD-u gdje se dogodio najveći potres
6. (Richterova)magnituda potresa	f. Potresom puknuta površina
7. Mercallijeva ljestvica	g. Kompresijski ili sekundarni val
8. P val	h. Mjesto gdje se dogodio potres najveće magnitude
9. Astenosfera	i. Točka u kojoj nastaju seizmički valovi
10. Litosfera	j. Intenzitet

**Dio 2. Višestruki izbor.** Odaberite najbolji odgovor kako biste zaokružili svaku izjavu.

1. Što nije sloj Zemlje?
  - a. plašt
  - b. unutarnja jezgra
  - c. jarak
  - d. kora
  
2. Ploče su dio
  - a. kore i gornjeg plašta



- b. donjeg plašta
- c. plašta i gornje kore
- d. kore i cijelog plašta

3. Kontinenti se nisu podvukli pod plašt zato što:

- a. su učvršćeni
- b. su teški
- c. „plutaju“
- d. nisu podesivi

4. Što nije napetost uzrokovana pomacima u litosferi?

- a. širenje
- b. sabiranje
- c. promjenjiva gibanja
- d. voda

5. Prvi seizmički valovi koji se bilježe su:

- a. P valovi
- b. C valovi
- c. A valovi
- d. S valovi

6. Snimka koju bilježi seizmograf zove se:

- a. gram

b. seizmogram

c. potres

d. snimka

7. Mitovi o uzrocima potresa su nastali zbog

a. nepoznavanja znanstvenih razloga

b. straha

c. traženja objašnjenja

d. svega navedenog

8. MSC ljestvicom potresa s 12 stupnjeva mjeri se

a. magnituda

b. sila kojom djeluje potres

c. intenzitet lokalnih učinaka potresa

d. ništa od navedenog

9. Richterova magnituda mjeri

a. matematičku mjeru oslobođene energije

b. silu

c. intenzitet

d. izmijenjeni Mercalli

10. Potres koji je zadesio Novi Madrid u južnom djelu SAD-a je značajan zbog toga što

a. je jedini potres koji se dogodio u SAD-u

- b. je na granici ploča
- c. nije na granici ploča
- d. ništa od navedenog.

## **Nastavni sat**

(Prema: <http://www.discoveryeducation.com/teachers/free-lesson-plans/earthquakes-learn-from-the-past-prepare-for-the-future.cfm>)

### ***Potresi: Uči od prošlosti, pripremi se za budućnost***

#### ***Ciljevi***

Učenici će razumjeti sljedeće:

1. Osnove o tome kako potresi funkcioniraju i zašto se događaju
2. Važnost visokokvalitetne gradnje u zoni potresa
3. Političke aspekte pripravnosti od potresa i čišćenje
4. Što možemo naučiti od prošlih potresa i kako nam te pouke mogu pomoći da se pripremimo za buduće potrese

#### ***Materijali***

Za ovu lekciju, trebat će vam:

- Računalo s pristupom internetu
- Dvije velike spužve
- Jedna velika gumica
- Papirnati odsječci kontinenata (napravljeni od čvrstih papira i kartesvijeta)
- Flomasteri u boji
- Materijali za pisano izvješće ili prezentaciju, kao što su PowerPoint ili HyperStudio

- Kopije za svakog učenika Karta # 1: Zemljine litosferske ploče, koje su dostupne.
- Kopije za svakog učenika Karta # 2: Karta svijeta za iscrtavanje epicentara potresa.

### *Upute*

1. Pitati učenike kojih se potresa sjećajuo kojima su čuli u novinama tijekom zadnjih nekoliko godina. Koje su bile posljedice tih potresa? Čemu bi nas ovi potresi mogli naučiti kako bismo se bolje pripremili za one buduće? Držite kratku nastavnu raspravu o ovim pitanjima.
2. Informirati učenike da je područje zaljeva San Francisco pretrpilo ozbiljne potrese i da postoji velika opasnost od drugog velikog potresa. Kažite im da je njihov cilj u ovoj lekciji, nakon nekoliko preliminarnih istraživanja, prezentirati političarima s područja zaljeva San Francisco, inženjerima građevine, arhitektima i geoznanstvenicima pouku koju moraju naučiti iz prošlih potresa diljem svijeta.
3. Ako učenici nisu do sada učili o potresima, dajte im da koriste internet i/ili knjige da nađu pozadinske informacije o potresima, kao što su odgovori na sljedeća pitanja:
  - Zašto nastaju potresi?
  - Što se događa ispod tla tijekom potresa?
  - Što se događa iznad tla tijekom potresa?
  - Gdje se potresi obično pojavljuju? Zašto se potresi pojavljuju na tim područjima?
4. Zapišite sljedeća zanimanja na ploču: *seizmolog, geolog, inženjer građevine/arhitekt, i političar*. Kao vrste, definirajte ova zanimanja i raspravite o različitim ulogama svakoga u planiranju potresa i oporavku. Koja bi vrsta informacije pomogla ljudima u svakom zanimanju da se pripreme za potres? Recite razredu da će oni provoditi istraživanja na prošlim potresima ili na trenutnoj pripravnosti za potrese na području zaljeva San Francisco.
5. Podijelite razred na male grupe približno po četiri učenika u svakoj. Dajte svima

osim jednoj grupi dapomoću literature i/ili interneta istraže različite velike potrese koji su se dogodili u prošlih 20 godina. Neki potresi za istraživanje uključuju Loma Prieta (područje zaljeva San Francisco), Northridge (Los Angeles), Kobe i Turskepotrese. Tražite ih da odgovore na sljedeća pitanja:

- Zašto su se potresi pojavili ovdje? Je li taj grad na glavnoj potresnojzoni?
  - Koliko je bio ozbiljan taj potres? Kolika je bila magnituda potresa? Za starije potrese pronaći makroseizmički intenzitet potresa.
  - Kako je taj potres utjecao na život ljudi u toj regiji?
  - Kakva je bila kvaliteta građevina u toj regiji? Kako su se građevine i druge konstrukcije ponašale u potresu?
  - Kako je taj grad bio pripremljen za potres? Koji su dokazi kojima biste potkrijepili svoj odgovor?
  - Kako su političari reagirali na potres?
  - Što su seizmolozi ili drugi stručnjaci rekli da se treba učiniti kako bi se pripremio grad za drugi potres?
6. Neka preostala grupa istraži i uzme bilješke o trenutnoj seizmičkojsituaciji u području zaljeva San Francisco. Ova se grupa treba baviti sljedećim pitanjima:
- S koliko se velikim rizikom od potresa područje Zaljeva suočava?
  - Što se čini kako bi se pripremlilo na takav događaj? Kako seizmolozi, geolozi, inženjeri građevine, arhitekti i političari surađuju (ili ne surađuju)?
  - Što seizmolozi misle da se treba učiniti, uključujući suradnju sa političarima i adekvatnim fondovima.
7. Organizirajte razrednu raspravu u kojoj se posljednja skupina (ona koja je proučavala trenutni rizik na području San Francisca) pretvara da predstavlja područje San Francisca političarima, inženjerima građevine, seizmolozima i geolozima. Uloge se mogu podijeliti u toj skupini. Neka svaka od drugih grupa objasni San Francisco grupi (i ostatku razreda) lekciju koju su trebali naučiti iz potresa kojeg su istraživali. Tražite članove San Francisco grupe da odgovore s

informacijama o geologiji područja Zaljeva i pripravnosti na potrese i da objasne što misle kako bi im nove informacije mogle pomoći da se bolje pripreme. Na kraju rasprave svaka će grupa morati predstaviti glavne točke svog istraživanja i San Francisco grupa će morati informirati razred o svojim istraživanjima potresne situacije u području Zaljeva.

8. Sada kad su naučili o određenim potresima, tražite učenike da razmotre načine na koje bi tri profesije napisane na ploči međudjelovale jedna s drugom da se pripreme i oporave od potresa. Vodite razrednu raspravu na tu temu, koristeći sljedeća pitanja kao niti vodilje:

- Koju ulogu imaju seizmolozi u proučavanju potresa?
- Zašto inženjeri građevine i arhitekti trebaju biti upoznati s potresima? Trebaju li uvijek preporuke seizmologa i geologa kada konstruiraju građevine ili konstrukcije? Zašto da ili zašto ne?
- Koju ulogu igraju političari u raspravi o potresima? Kako politički faktori utječu na utjecaj geologa i inženjera građevine ili arhitekta? Baziraju li političari svoje odluke uvijek na preporukama seizmologa i geologa?
- Kako ove tri profesije surađuju skupa za pripravnost od potresa i posljedica od potresa? Kako su efektivno surađivali u zadnjim potresima i kako bi trebali surađivati u području Zaljeva San Francisco danas?

### ***Prilagodbe***

Prilagodbe za mlađe učenike.

Neka svaka grupa istraži jedan veliki potres, poput onog na području Loma Prieta u području Zaljeva San Francisco ili kod Northridgea blizu Los Angelesa. Kako je potres utjecao na živote ljudi? Je li društvo bilo pripremljeno za taj potres? Neka učenici izrade poster ili brošuru na temu "Pripravnost na potrese" u kojoj objašnjavaju što ljudi trebaju znati o potresima uz zahtjev da budu dobro pripremljeni. Uključite informacije o tome kako se pojedinci ili obitelji mogu

pripremiti za potres.

### ***Pitanja za raspravu***

1. Raspravite ulogu koju politički faktori igraju u određivanju kako će se gradovi i regije pripremiti i reagirati na potrese.
2. Pretpostavite što bi se dogodilo u vašem gradu kad bi seizmolozi odjednom objavili jaki potres s velikom vjerojatnošću u sljedećih 20 godina. Što mislite kako bi gradski lideri i narod reagirali? Ako je to realna situacija u vašem gradu, kakve su bile reakcije do sada?
3. Što mislite koliko je važno za građevinsku industriju da otkriju materijale i tehnike u izgradnji građevina i drugih konstrukcija sigurnih tijekom potresa? Što ako su ta istraživanja jako skupa? Trebaju li i onda biti provođena?
4. Misлите li da je važno istraživati povijesne događaje, kao što su potresi iz prošlosti, kako biste se naučili kako se nositi sa takvim događajima u sadašnjosti i budućnosti? Kako nam učenje o prošlim događajima pomaže u sadašnjosti i budućnosti?
5. Pretpostavite učinke velikog potresa u različitim dijelovima svijeta bazirano na vašem znanju o političkoj situaciji, građevnim materijalima i drugim faktorima u različitim državama. Bi li potres magnitude 6,5 na primjer, utjecao na regije na isti način, ili bi posljedice bile različite ovisno o lokaciji?
6. Što mislite čemu bi narod trebao biti poučen u vezi potresa? Raspravite o stvarima kojima ste vi poučeni i procijenite jeste li naučili dovoljno o potresima tijekom školovanja i iz medija.

### ***Ocjenjivanje***

Ocijenite učeničke prezentacije na skali od jedan do pet, koristeći ova pitanja kao kriterije:

- Je li učenik susretljivo surađivao u grupi?
- Je li učenik jasno objasnio svoje točke?



- Je li učenik jednako dugo govorio kao i drugi članovi grupe?
  - Je li grupa slijedila upute? Je li istraživala i objavila odgovore na sva postavljena pitanja?
  - Jesu li ukupni zaključci grupe logični i na temelju istraživanja?
- 

## 5 Zaključak

J. Goldberg tvrdi kako je „*sva fizika zapravo geofizika, jer se sve fizikalno istraživanje vrši pod zemaljskim uvjetima, u zemaljskim intervalima varijabla stanja*“ [13]. Ta me je tvrdnja ohrabrila u ideji da u svoju nastavu uvedem sadržaje iz geofizike više nego što je to do sada bilo.

Početakom 18. st. „*metoda kartografskog prikazivanja empiričnog materijala geofizike ... je cijelo pitanje geofizike prebacila u geografiju*“ [13]. Iako je geofizika već u 19. stoljeću izašla iz deskriptivnog razdoblja pod utjecajem snažnog razvoja fizike, koji je potakao na dublje fizikalno prodiranje u geofizičke pojave, ona se iz nastave fizike i dan danas prešutno prebacuje u nastavni plan i program zemljopisa [14]. Često učenici ne povezuju kako su brojne stvari toga tipa koje uče u nastavi zemljopisa produkt čiste fizike. To je šteta jer bi im te teme bile velika motivacija u savladavanju većini učenika morskog gradiva valnog gibanja.

Nadalje, prema nacionalnom centru za vanjsko vrednovanje obrazovanja, težnja je nastave fizike razvijati i ostvarivati četiri temeljna cilja matematičko-prirodosnanstveno-tehničkog nastavnog područja, što znači da učenik treba [12]:

- steći znanja o važnim pojmovima znanstvenog područja te o hipotezama, modelima i teoriji za njihov opis i objašnjenje,
- upoznati neke samosvojne metode dotične znanosti i naučiti ih primjereno primjenjivati,

- naučiti procijeniti doseg i granice vrijednosti samosvojnih znanstvenih metoda, kao i uzajamne odnose područja u matematičko-prirodnoznanstveno-tehničkom području,
- biti osposobljen da se racionalno i svjestan odgovornosti sučeljava s individualnim i društvenim problemima koristeći se znanjem i pojmovima stečenim u matematičko-prirodnoznanstveno-tehničkom području.

Seizmologija stoga, kao i sve ostale grane geofizike, pruža bogat izvor sredstava za razvoj i ostvarenje temeljnih ciljeva nastave fizike. U ovom radu sam to pokušala pokazati. Npr., uvela sam pojmove refrakcije, refleksije i difrakcije koji se primjenjuju u seizmologiji za izradu modela strukture Zemlje. Opisala sam metode seizmološke refrakcije i refleksije kao samosvojne metode dotične znanosti iz kojih se jasno vidi primjena. Važno je učenicima naglasiti doseg i granice vrijednosti spomenutih metoda, što sam kroz radnju često naglašavala po pitanju izrade modela strukture Zemlje. Kao što sam i ranije napisala, cijeli je problem prebačen u zemljopis kojinavedene pojave opisuje bez fizikalnih objašnjenja. To nam je dakle prilika da povežemo fiziku s drugim predmetima, u ovom slučaju sa zemljopisom i tako učenicima pomoći da stvore ispravne i mentalne modele bez „rupa“. I na kraju opasnost od potresa spada u individualne a i društvene probleme sa kojima se kroz grupni rad i rasprave u ovom radu učenike osposobljava i sučeljava s datim problemima u svrhu osposobljavanja za racionalnu i svjesnu odgovornost koju imaju u društvu.

Ovaj rad spada u gradivo trećeg razreda gimnazije. Zadaća programske građe trećeg razreda gimnazije po A-inačici je „*povezati obradom periodičkih pojava mehaničkoga i električnoga titranja, mehaničkih i elektromagnetskih valova, strukturne pojmove (čestice, valove i polja)*“ [12]. U radu su obrađene periodičke pojave mehaničkog titranja, mehaničkih valova kao i dati pojmovi. Uz to su ostvarena sva četiri temeljna cilja nastave fizike zbog čega smatram da sam pokazala kako seizmologija treba zauzeti mjesto uz astronomiju kao još jedan predmet primjenjene fizike u srednjoškolskoj nastavi fizike.

## Popis korištenih izvora

- [1.] Brković, N. (2004) *Fizika 3*, Luk d.o.o., Zagreb.
- [2.] Stein, S., Wysession, M. (2003) *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*, Blackwell Publishing.
- [3.] Skoko, D., Mokrović J. (1998) *Andrija Mohorovičić*, Školska knjiga, Zagreb.
- [4.] Sikošek, B. (1986) *Zemljotres i ja*, Niro exportpress, Beograd.
- [5.] Beek, L. (2011.) *Earth machine*, dokumentarni film, Hrvatska radiotelevizija.
- [6.] *Određivanje epicentra – triangulacija* (2009), Geo Class,  
<http://geoclass.wordpress.com/2009/09/21/odredivanje-epicentra-riangulacija>  
(stranica posjećena 15. veljače 2014.).
- [7.] *Seizmička refrakcija i refleksija* (2010), Life on Shatsky,  
<http://lifeonshatsky.blogspot.com/2010/08/seismic-refraction-and-reflection.html>  
(stranica posjećena 15. siječnja 2014.).
- [8.] Mohorovičić, A. (1910) *Potres od 8.X. 1909, God. izvyješće Zagr. met. ops. za g. 1909*, Zagreb.
- [9.] *Zemljina jezgra se topi* (2011), Vidi,  
<http://www.vidi.hr/Sci-Tech/Znanost/Zemljina-jezgra-se-topi>  
(stranica posjećena 17. ožujka 2014.).
- [10.] *Zemljin plašt* (2009), Zvrkov portal,  
[http://www.medioteka.hr/portal/ss\\_geografija2.php?ktg=3&pktg=&mid=43](http://www.medioteka.hr/portal/ss_geografija2.php?ktg=3&pktg=&mid=43)  
(stranica posjećena 12. veljače 2014.).
- [11.] Herak, D. (2011) *Fizika Zemlje – predavanje*, Nastavni materijal za kolegij Fizika Zemlje i atmosfere,  
[http://www.gfz.hr/osobne\\_stranice/davorka\\_herak/Fizika%20Zemlje%20-%20predavanja.pdf](http://www.gfz.hr/osobne_stranice/davorka_herak/Fizika%20Zemlje%20-%20predavanja.pdf).
- [12.] Glasnik ministarstva kulture i prosvjete (2009.) *A. Četverogodišnji program*, Nastavni program za gimnazije, Nacionalni centar za vanjsko vrednovanje obrazovanja,

[http://dokumenti.ncvvo.hr/Nastavni\\_plan/gimnazije/obvezni/fizika.pdf](http://dokumenti.ncvvo.hr/Nastavni_plan/gimnazije/obvezni/fizika.pdf),

(datum objave: 28. travnja 2009.).

[13.] Goldberg, J., *Fizika i geofizika*, Glasnik matematičko-fizički i astronomski, Serija II.-T.1. – Zagreb 1946. – No.2.

[14.] Glasnik ministarstva kulture i prosvjete (2009.) *A. Četverogodišnji program*, Nastavni program za gimnazije, Nacionalni centar za vanjsko vrednovanje obrazovanja,

[http://dokumenti.ncvvo.hr/Nastavni\\_plan/gimnazije/obvezni/zemljopis.pdf](http://dokumenti.ncvvo.hr/Nastavni_plan/gimnazije/obvezni/zemljopis.pdf),

(datum objave: 28. travnja 2009.).

