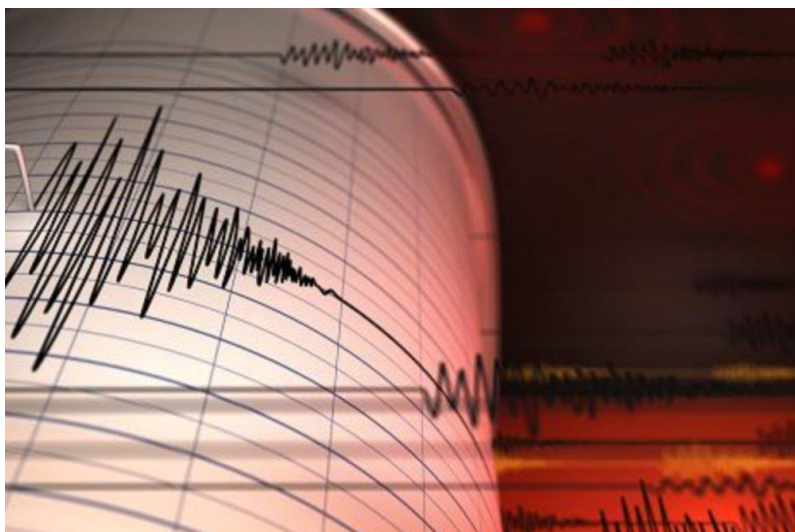


SEIZMOGRAFIJA IZ DOMAČE DELAVNICE

Raziskovalna naloga na področju tehnike



[Vir: (Ponoči se je streslo: Kje so čutili potres?, 2019)]

Avtorja: Nik Rebolj

Aljaž Rožič

Mentorja: Alen Šest, SIJ Acroni

Barbara Hudovernik, univ. dipl. ing. fiz.

Jesenice, december 2019 – marec 2021

Vsebina

POVZETEK	5
ABSTRACT	5
1 UVOD	6
2 TEORETIČNE OSNOVE	7
2.1 Potresi po svetu	7
2.1.1 Zgradba Zemlje	7
2.1.2 Nastanek potresov	8
2.1.3 Povzročena škoda	9
2.2 ARSO	9
2.2.1 Postaje v Sloveniji	9
2.3 Potresni valovi	9
2.3.1 Globinski	9
2.3.2 Površinski (povzročajo škodo)	10
2.4 Merjenje potresov	11
2.4.1 Lestvice	11
2.4.2 Triangulacija	13
2.4.3 Lom in hitrost potovanja valov	14
2.4.4 Senca	15
2.5 Seizmografi in seizmogrami	16
2.5.1 Zgodovina	16
2.5.2 Sedanjost	16
2.5.3 Vrste seizmografov	17
3 MERILNIKI IN METODE	19
3.1 Aparature in merilniki	19
3.1.1 Geofon	19
3.1.2 Predojačevalnik	21
3.1.3 Filter	22
3.1.4 Modulator	25
3.1.5 A/D pretvornik in programska oprema	27
3.1.6 Napajalnik	28
3.2 Metode	30
3.2.1 Izbira lokacije za geofon	30
3.2.2 Programska oprema za zajem in analizo signalov	30

3.2.3	Primerjava s sosednjimi opazovalnicami	31
4	REZULTATI IN RAZPRAVA	32
4.1	Izmerjeni dogodki in primerjava z ARSO	33
4.1.1	Vrsta zaznanih valov	34
4.2	Vrednotenje napak	38
4.3	Izboljšave, možnosti za naprej	39
5	ZAKLJUČEK	40
6	VIRI	41

Kazalo slik

Slika 1:	tektonske plošče	7
Slika 2:	zgradba Zemlje	8
Slika 3:	hipocenter in epicenter	8
Slika 4:	P in S valovi	9
Slika 5:	Rayleighovi in Lovejevi valovi	10
Slika 6:	Lovejevi valovi	10
Slika 7:	Rayleighovi valovi	11
Slika 8:	lestvica EMS	12
Slika 9:	Richterjeva magnitudna lestvica	12
Slika 10:	triangulacija	13
Slika 11:	lom in odboj na plasteh v Zemlji	14
Slika 12:	lom na jedru	14
Slika 13:	Moho	15
Slika 14:	potovanje valov skozi kroglo enake gostote (leva slika) in skozi kroglo, ki ji gostota narašča z globino (desna slika)	15
Slika 15:	S valovi ne gredo skozi tekočine	15
Slika 16:	P valovi se lomijo dvakrat: na zunanjem in na notranjem jedru	16
Slika 17:	seizmogram	17
Slika 18:	vertikalni seizmograf	18
Slika 19:	horizontalni seizmograf	18
Slika 20:	blok shema osnovnih sklopov seizmometra	19
Slika 21:	geofon, ki smo ga uporabljali	20
Slika 22:	podrobnosti našega geofona	20
Slika 23:	zgradba geofona	21
Slika 24:	uporabljeni predojačevalnik v ohišju	21
Slika 25:	uporabljeni predojačevalnik brez ohišja	21
Slika 26:	vezje predojačevalnika	22
Slika 27:	osnovni člen nizkoprepustnega pasivnega filtra (RC člen)	22
Slika 28:	graf frekvenčne karakteristike aktivnega nizkoprepustnega filtra	23
Slika 29:	vezje aktivnega nizkoprepustnega filtra drugega reda po Sallen-Key topologiji	23
Slika 30:	vezje uporabljenega filtra	24
Slika 31:	frekvenčna karakteristika 8-polnega aktivnega filtra z mejno frekvenco 5 Hz	24
Slika 32:	amplitudna modulacija	25
Slika 33:	vezje uporabljenega modulatorja	25

Slika 34: modulacija seizmičnega signala s chopperskim modulatorjem.....	26
Slika 35: vezje chopperskega modulatorja.....	26
Slika 36: frekvenčni odziv profesionalne zvočne kartice.....	28
Slika 37: zunanja USB zvočna kartica, nizkega cenovnega razreda.....	28
Slika 38: blok shema napajalnika.....	29
Slika 39: vezje uporabljenega napajalnika.....	29
Slika 40: povezane elektronske komponente signalnega vmesnika.....	29
Slika 41: ohišje signalnega vmesnika.....	30
Slika 42: vsi sklopi seizmografa med delovanjem.....	30
Slika 43: avstrijska mreža potresnih opazovalnic.....	31
Slika 44: državna mreža potresnih opazovalnic.....	31
Slika 45: potres pri Kobaridu, 8.03.2020, 0129 UTC, M=2,3 (skrit v motnji vlaka).....	32
Slika 46: potres v Bohinju, 16.03.2020, 0500 UTC, M=0,7 (zaradi šibkosti in oddaljenosti viden samo en sunek).....	32
Slika 47: potres v Zagrebu, 22.03.2020, 0524 UTC, M=5,4.....	33
Slika 48: potres v Zagrebu, 22.03.2020, 0601 UTC, M=4,9.....	33
Slika 49: potres v Zagrebu, 22.03.2020, 0641 UTC, M=3,7.....	34
Slika 50: vsi trije zagrebški potresi, 22.3.2020 (določanje radija epicentra).....	34
Slika 51: zapisi dogodkov na našem seizmografu, 19.3.2021, 0500-0600 UTC.....	35
Slika 52: potres v Petrinji, 19.3.2021, 0558 UTC, M=3,4; posnet z našim seizmografom.....	35
Slika 53: potres v Petrinji, ki ga je zabeležila avstrijska opazovalnica MYKA, 19.3.2021.....	36
Slika 54: določitev razdalje epicentra potresa Petrinja, 19.3.2021, 0558 UTC, M=3,4.....	36
Slika 55: primerjava oddaljenosti treh Zagrebških in enega Petrinjskega potresa.....	37
Slika 56: manjši lokalni potres, epicenter Bled, 25.03.2021, 0659 UTC, M=0,6.....	37
Slika 57: pozicioniranje seizmograma na premici P in S valov za določanje oddaljenosti epicentra....	38

POVZETEK

Odločila sva se, da poskusiva izdelati preprost in uporaben seizmometer. Želela sva doseči, da bi bila izdelava takega ali podobnega seizmometra preprosta, da bi ga lahko izdelali tudi drugi, npr. vrstniki. Zaradi tega sva uporabila cenovno dostopne komponente, ki jih tudi ni težko dobiti. S takim seizmometrom, bi se tudi drugi dijaki natančneje seznanili s potresi.

Izdelani seizmometer naj bi bil sposoben zaznavati močnejše lokalne potrese. Želela sva tudi, da bi se z njim dalo opazovati nekatere druge motnje (npr. promet, detonacije,...). Poleg tega naju je zanimalo, če lahko s takim cenovno ugodnim seizmometrom določimo razdaljo od epicentra.

Seizmometer z želenimi karakteristikami nama je uspelo v celoti izdelati. Uporaben je za zaznavanje lokalnih potresov z magnitudami nad 0,5 ali potresov v sosednjih državah z magnitudami nad 3. Za te potrese lahko določimo tudi oddaljenost na podlagi časovne razlike med prihodom S in P valov.

Smiselno bi bilo seizmometer postaviti na mirno lokacijo in z njim meriti dlje časa. Iskanje take lokacije predstavlja precejšen izziv, ker je v urbanem okolju preveč motenj, na mirnejših lokacijah pa je problem dostop do interneta in elektrike. V prihodnosti bi si želela izdelani seizmometer priključiti v mrežo amaterskih opazovalnic. Tako bi izdelani seizmometer postal prva amaterska opazovalnica v Sloveniji, ki bi bila priključena v mrežo opazovalnic.

Ključne besede

seizmograf, geofon, obdelava seizmičnih signalov, P in S valovi, določanje epicentra

ABSTRACT

Our aim was to create a seismometer that would be simple and efficient. The main idea was to produce a seismometer which would be simple enough to be made by our peers. That was the reason we used affordable and easily obtainable components. Such a seismometer would help other students study earthquakes in more detail.

The seismometer is expected to detect stronger local earthquakes as well as observe other kinds of activity such as traffic or explosions. We were also interested in finding out whether this low-cost seismometer could calculate the distance to the quake's epicentre.

We succeeded in producing a seismometer with all the desired features. The device can be used for detecting local earthquakes of magnitude over 0.5 or earthquakes in neighbouring countries of magnitude over 3. For the latter, distance can be determined based on time difference between S-wave and P-wave travel times.

It would be sensible to place a seismometer in a quiet location and measure the motions for a longer period. Finding such a location is quite a challenge since there are too many interferences in urban environment, whereas quieter locations lack access to electricity and internet. In the future we would like to connect the seismometer to the network of amateur seismic observatories. This would be the first amateur seismic observatory in Slovenia which would be connected to the network of seismic observatories.

Key words

seismograph, geophone, seismic signal processing, P and S waves, epicenter determination

1 UVOD

Potresi so stalni spremljevalci človeka že od pradavnine. Razumljivo je, da ljudi zaradi svojih učinkov že od nekdaj zanimajo. Ker jo to močan naraven pojav, sva ga iz radovednosti poskusila bolje razumeti. Če človek nek pojav bolje razume, se njegov strah zmanjša. Potresov še ne znamo napovedovati. Ljudje smo se pred njimi zaščitili z gradnjo objektov, ki so narejeni tako, da zdržijo tudi močnejše potrese in že s tem se strah zmanjša. Pred kratkim smo lahko spremljali močan potres na Hrvaškem, kjer so številni ljudje izgubili dom ali celo življenje. Prav zaradi takih dogodkov sva želela izdelati preprost in uporaben seizmometer, da bi bolje razumela ozadje, delovanje potresov in omogočila vpogled v potrese drugim vrstnikom.

Postavila sva si raziskovalna vprašanja:

1. Ali lahko narediva občutljiv in funkcionalen seizmometer z minimalnimi sredstvi in z uporabo preprostih, cenovno ugodnih in splošno dostopnih komponent, ki ga bo možno uporabiti v šoli?
2. Kot drugo nalogo sva si zadala, da bo z njim možno zaznati močnejše lokalne potrese ali druge antropogene motnje (razstreljevanje, helikopterji, promet).
3. Nazadnje naju je zanimalo, če lahko s seizmometrom določiva razdaljo do epicentra bolj oddaljenih potresov.

Predpostavila sva, da nama bo uspelo narediti občutljiv in funkcionalen seizmometer, ki bo poceni in iz materialov, ki so na voljo vsem. Če sva hotela narediti seizmometer, ki naj bi zaznal šibke potrese, sva ga morala narediti v kombinaciji z ustrezno programsko opremo, sicer bi bilo zaradi preobilice elektronike to za naju nemogoče. O uspehu izdelave dokaj občutljivega seizmometra sva bila glede na izkušnje drugih, ki so se s tem že ukvarjali, dokaj prepričana. Želela sva doseči, da bi bilo z izdelanim seizmometrom možno zaznati tudi močnejše potrese, ki izvirajo iz bolj oddaljenih krajev.

Uporabljala sva eksperimentalne in terenske metode dela. Cilj te naloge je tudi pojasniti nekaj dejstev, povezanih s potresi in na ta način razbiti neutemeljene strahove ob potresih. Hkrati sva želela povečati zanimanje za ta dobro poznan naravni pojav pri dijakih, povrhu pa še omogočiti raziskovanje potresov v šolah.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Potresi po svetu

Vsako leto je okoli 100.000 tako močnih potresov, da jih ljudje čutijo, okoli 1.000 pa takih, ki povzročijo materialno škodo. Vsako leto zaradi potresov umre okoli 10.000 ljudi (National geographic, 2017).

Potrese delimo na (How does Earthquake occur with explanation, 2012):

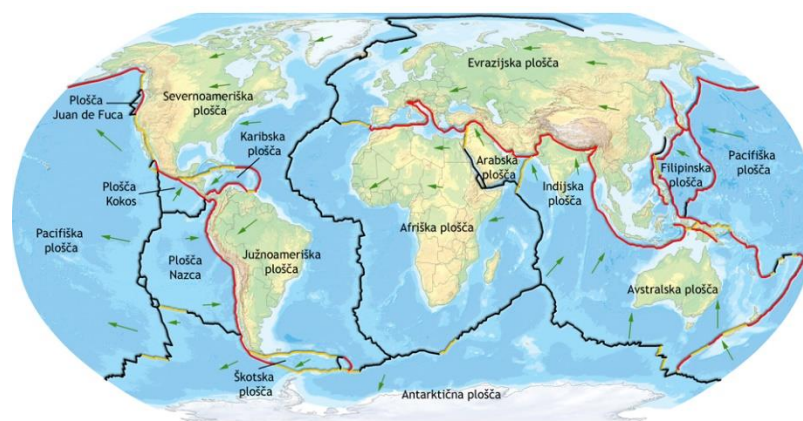
- globoke: Ti se pojavijo na globini nad 300 km in razloga zanje še ne poznamo.
- srednje globoke: Ti se pojavljajo na globinah od 55 do 300 km.
- plitvi: Prihajajo z globin, manjših od 55 km.

V Sloveniji večina potresov nastaja na globini 5 do 15 km, najgloblji pa nastanejo na globini 30 km. Globlji potresi povzročijo manj škode od plitvejših.

2.1.1 Zgradba Zemlje

Zemlja je sestavljena iz treh plasti: skorje, plašča in jedra (Marjana K. Serša, 2016).

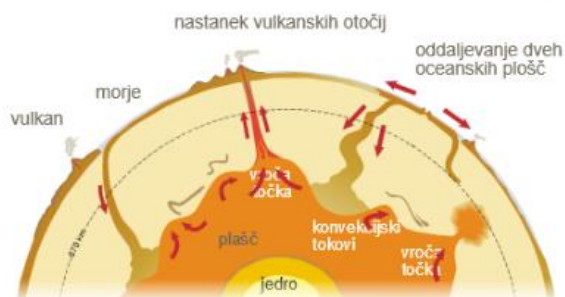
- Skorjo delimo na oceansko in celinsko.
Debela je od 0 do 35 km, ponekod pa celo do 70 km.
 - Oceanska skorja je iz železo-magnetnih silikatnih kamnin.
 - Celinska skorja je iz natrijevo-kalijevo-aluminijevih silikatnih kamnin.
- Plašč je iz zgornje ali zunanje in spodnje ali notranje plasti.
Debelina je okrog 2900 km.
Plašč je predvsem iz silicijevih, magnezijevih in železovih spojin.
 - Zgornji plašč je v trdnem agregatnem stanju. Skupaj s skorjo tvori litosfero. Ta ni iz enega kosa, temveč iz več kosov, ki jih imenujemo tektonske plošče. Te ne mirujejo, ampak se gibljejo (drsijo ena ob drugi, se zaletavajo) s hitrostmi reda 1 cm/leto. Ta del plašča ima debelino od 35 do 60 km, ponekod pa celo do 200 km.
 - Spodnji plašč je bolj vroč in pritiski so večji, zato se kamnine že talijo in nastaja magma, ki se premika in nastajajo konvekcijski tokovi. Zaradi teh tokov se premikajo tudi litosferske plošče. Ker robovi teh plošč niso ravni, se zatikajo, medtem ko se plošče gibljejo še naprej. Ko napetost dovolj naraste, se robovi sprostijo in nastane potres. Debelina tega dela plašča sega do 2900 km.



Slika 1: tektonske plošče

[Vir: (Tektonske plošče, brez datuma)]

- Jedro je zunanje, ki je tekoče, in notranje, ki je trdno. Jedro je predvsem iz niklja in železa (od tod ime nife).
 - Zunanje jedro sega do globine 5100 km
 - Od 5100 km do 6370 km je notranje jedro.



Slika 2: zgradba Zemlje

[Vir: (Marjana K. Serša, 2016)]

Meje med ploščami so treh vrst:

- divergentna:
Plošči se oddaljujeta. Magma ves čas prihaja iz globin.
- konvergentna:
Plošči se približujeta. Ena plošča se nariva, druga podriva.
- zmična:
Plošči drsita vodoravno ena glede na drugo.

Na vseh treh prihaja tako do potresov kot do vulkanskih izbruhov.

2.1.2 Nastanek potresov

Največji problem potresov je, da nastanejo nepričakovano, brez reda in brez posebnih vnaprejšnjih znakov. Veda, ki se ukvarja s potresi, je seizmologija. Sama znanost je še mlada in je poleg vpogleda v potrese prispevala tudi k boljšemu poznavanju notranje zgradbe Zemlje.

2.1.2.1 Vrste potresov

Poznamo udorne, tektonske in vulkanske potrese.

Udorni potresi nastanejo zaradi delovanja vode na apnenec, kar povzroči nastanek velikih votlin pod Zemljo. Slej ko prej pride do zrušitve. Takih je le 3 % od vseh potresov.

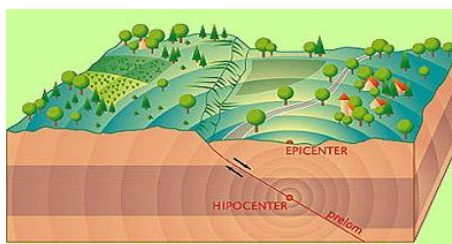
Mnogo nevarnejši in tudi mnogo pogostejši so tektonski potresi. Teh je kar 90 %. So posledica lomljenja in drsenja zemeljskih plasti. Njihova jakost in doseg sta velika.

Preostalih 7 % je vulkanskih potresov. Ti nastanejo ob izbruhih vulkanov. Njihova jakost je velika, doseg pa majhen, saj ne nastanejo na velikih globinah.

2.1.2.2 Hipocenter in epicenter

Lokacija pod površjem zemlje, kjer se potres začne, se imenuje hipocenter ali žarišče.

Lokacija na površju zemlje direktno nad hipocentrom pa se imenuje epicenter ali nadžarišče.



Slika 3: hipocenter in epicenter

[Vir: (Mosbruken, 2014)]

Včasih pred potresom zaznamo predpotresne sunke. Glavni potres se zgodi na istem mestu kot predpotresni sunki. Glavnemu potresnemu sunku vedno sledijo še popotresni sunki. Če je jakost glavnega potresnega sunka velika, se lahko popotresni sunki nadaljujejo tedne, mesece ali celo leta.

2.1.3 Povzročena škoda

Povzročena škoda ni odvisna samo od moči potresa. Pomembna je tudi gostota naselitve, razvitost protipotresne gradnje in geološka sestava tal (Kop, 2015).

Na trdnih in kompaktnih tleh je škoda mnogo manjša.

Nevarni so tudi cunamiji, ki nastanejo kot posledica potresov.

2.2 ARSO

Glavna potresna opazovalnica za Slovenijo je postavljena ob Astonomsko-geofizikalnem observatoriju na Golovcu v Ljubljani. Senzorji so nameščeni na posebni stebrih, ki niso povezani s temeljno ploščo stavbe, da ne pride do motenj.

2.2.1 Postaje v Sloveniji

V Sloveniji je trenutno 37 potresnih opazovalnic. 26 je stalnih, 11 pa začasnih.

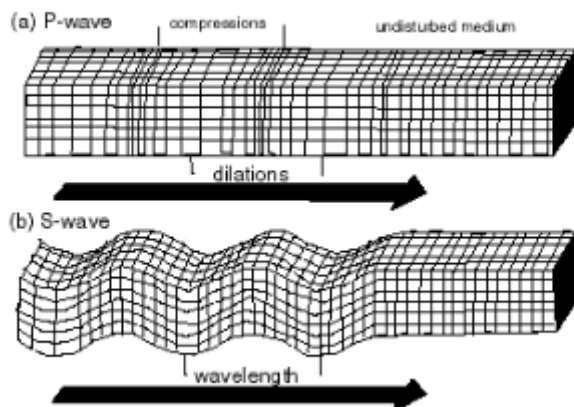
2.3 Potresni valovi

Nihanje delcev, ki nastane ob potresu, se razširja od hipocentra na vse strani v obliki valov, ki jih imenujemo potresni valovi. Hitrost širjenja potresnih valov je odvisna od gostote in elastičnosti snovi. V gostejših snoveh se val širi hitreje (Alagić, 2019).

Valove delimo na globinske in površinske.

2.3.1 Globinski

Globinske valove po fizikalni naravi in po času prihoda na površje (torej po hitrosti), delimo na P-valove ali primarne valove in S-valove ali sekundarne valove.



Slika 4: P in S valovi

[Vir: (Stergar, 2014) 4.3.2020]

2.3.1.1 P-valovi (longitudinalni, hitri)

So podobni zvočnim valovom. Sestavljeni so iz zgoščin in razredčin. Torej gre za longitudinalne valove, kjer delci snovi nihajo v smeri širjenja motnje. To valovanje se kaže kot stiskanje in raztezanje snovi.

V preperelih kamninah je njihova hitrost manjša od 2 km/s, v sedimentnih je 2-4 km/s, v metamorfih pa 5-7 km/s. V vodi potujejo s hitrostjo 1,4 km/s. V plašču so še hitrejši: 8-8,5 km/s.

P-valovi povzročijo gibanje kamnin naprej in nazaj.

2.3.1.2 S-valovi (transverzalni, hitri)

Ti valovi so transversalni in so počasnejši od P-valov. Pri transversalnem valovanju delci nihajo pravokotno na smer širjenja valovanja.

Hitrost S-valov je 0,6-krat manjša od hitrosti P-valov v istem materialu.

Podobni so širjenju elektromagnetnega valovanja.

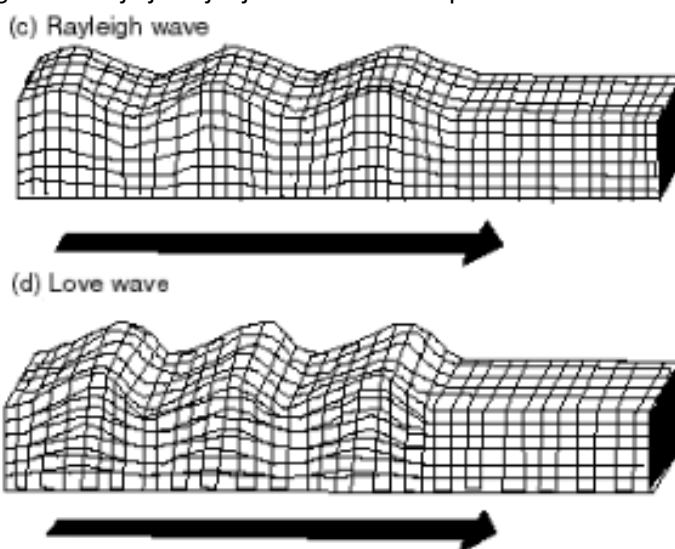
S-valovi povzročajo nihanje skal gor in dol.

2.3.2 Površinski (povzročajo škodo)

Ko P in S-valovi pridejo do površja, se spremenijo v površinske valove. Ti povzročajo največ škode.

Ti valovi potujejo po površju s hitrostmi od 2,5 km/s do 4,5 km/s. Gibljejo se od nadžarišča v smeri, ki je vzporedna Zemljinemu površju. V globini je njihova amplituda manjša, na površju večja. Širijo se vzporedno s površjem Zemlje (za razliko od globinskih, ki se širijo v vse smeri). Njihova perioda je za regionalne potrese (na razdalji več 100 do približno 1000 km) enaka 15-20 s.

Primer podobnega valovanja je širjenje valov na vodni površini.

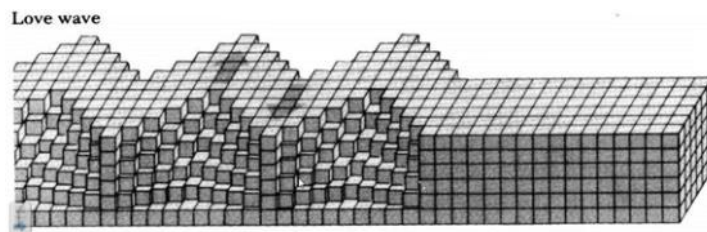


Slika 5: Rayleighovi in Lovejevi valovi

[Vir: (Stergar, 2014)]

2.3.2.1 Lovejevi valovi

So transversalni valovi in se zato ne morejo širiti po tekočinah, torej tudi ne po vodi. Gibanje delcev je vodoravno in pravokotno na smer potovanja valov (torej je gibanje levo-desno). Ti valovi so hitrejši od Reileigh-evih z enako periodo.

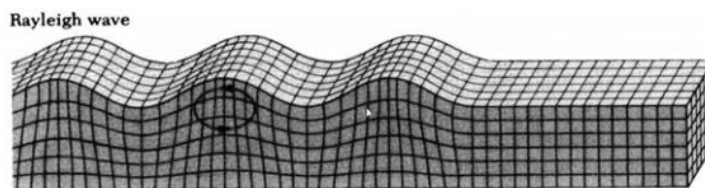


Slika 6: Lovejevi valovi

[Vir: (Goetsch, 2013)]

2.3.2.2 Reileighovi valovi

Deli tal se gibljejo po elipsah v navpični ravnini, ki jo določa smer širjenja valovanja (podobno kot oceanski valovi). Od vseh potresnih valov se širijo najdlje in jih lahko najdlje opazujemo.



Slika 7: Rayleighovi valovi

[Vir: (Goetsch, 2013)]

2.4 Merjenje potresov

S potresi se ukvarja posebna veja geofizike, imenovana seizmologija.

2.4.1 Lestvice

Intenziteta potresa je odvisna od tega, kako daleč od epicentra smo, in od tega, koliko energije se je pri potresu sprostilo. Sproščena energija je odvisna tudi od globine žarišča. Intenziteta potresa je odvisna še od lokalnih geoloških, geomehanskih in topografskih lastnosti ter od širjenja potresnih valov.

Tako se intenziteta nanaša na opazovano lokacijo in potres, magnituda pa samo na potres.

2.4.1.1 Intenzitetna lestvica

Intenziteta potresa je mera za učinke potresa na predmete, ljudi, zgradbe in naravo. Za prebivalce je pomembnejši podatek od magnitude, ki opisuje le dogajanje v središču potresa. Intenziteta je subjektivna mera, ki fizikalno ni enolično določena. Na intenziteto vplivajo: magnituda potresa, oddaljenost od žarišča potresa, globina potresa in kamninska sestava terena. Zato ima intenziteta istega potresa na lokacijah, ki so različno oddaljene od nadžarišča, različno vrednost. Z oddaljenostjo pada.

Intenzitetne lestvice se uporabljajo za opis učinkov potresov. Najbolj znana je evropske potresne lestvica (European Makroseismic Scale – EMS), ki je nastala 1992 leta. V Sloveniji se uporablja od leta 1995. Merska enota je potresna stopnja.

Intenziteta EMS	Opredelitev	Opis značilnih opažanj učinkov
I	Neobčuten	Neobčuten. Zaznajo ga samo instrumenti.
II	Komaj občuten	Občutijo redki mirujoči posamezniki v hišah, običajno v zgornjih nadstropjih hiš.
III	Šibek	Občuti malo ljudi v zgradbah. Mirujoči ljudje čutijo zibanje ali lahno tresenje.
IV	Pretežno opažen	Občutijo mnogi ljudje v zgradbah, zunaj pa le redki. Nekateri ljudje se zbudijo. Okna, vrata in posoda ropotajo.
V	Močan	V zgradbah občutijo mnogi, zunaj redki. Mnogi se zbudijo. Nekaj se jih prestraši. Zgradbe se v celoti stresejo. Viseči predmeti močno nihajo. Majhni predmeti se premaknejo. Vrata in okna loputajo ali se zaloputnejo.
VI	Neznatne poškodbe	Mnogi ljudje se prestrašijo in zbežijo iz zgradb. Nekateri predmeti padejo. Mnoge hiše utrpijo neznatne nekonstruktivske poškodbe, npr. lasaste razpoke in odpadanje manjših kosov ometa.
VII	Poškodbe	Večina ljudi se prestraši in zbeži iz zgradb. Pohištvo se premakne in mnogo predmetov pade s polic. Mnoge dobro grajene navadne stavbe pretrpijo zmerne poškodbe: manjše razpoke v stenah, odpadanje ometa, odpadanje delov dimnikov; na starejših stavbah se lahko pokažejo velike razpoke v stenah in zrahljanje polnilnih sten.
VIII	Težke poškodbe	Mnogi ljudje se težko obdržijo na nogah. Na stenah mnogih hiš nastanejo velike razpoke. Posamezne dobro grajene navadne zgradbe kažejo resne poškodbe sten, šibke starejše zgradbe pa se lahko zrušijo.
IX	Rušenje	Splošen preplah. Mnoge šibke zgradbe se zrušijo. Celo dobro grajene navadne stavbe kažejo zelo težke poškodbe: večji podori sten in delno uničenje konstrukcije.
X	Obsežno rušenje	Mnoge dobro grajene navadne stavbe se zrušijo.
XI	Uničenje	Večina dobro grajenih navadnih stavb je porušeni in celo nekatere potresno odporno grajene stavbe so uničene.
XII	Popolno uničenje	Skoraj vse stavbe so uničene.

Slika 8: lestvica EMS

[Vir: (Stergar, 2014)]

Starejša od te lestvice je Merkallijeva lestvica ali daljše Mercalli-Cancani-Siebergova lestvica (MCS), ki je bila dana v uporabo leta 1917.

2.4.1.2 Magnitudna lestvica

Vsem magnitudnim lestvicam je skupno to, da odražajo energijo, ki se sprosti med potresom. Pri tem za isti potres magnitudo določimo iz podatkov, ki jih zberejo na večjem številu opazovalnic. Ker ta lestvica temelji na merjenjih, so podatki mnogo zaneslivejši kot pri intenzitetni lestvici. Bolje bi magnitudo opisali, če bi rekli, da izraža velikostno stopnjo potresa, izračunano iz instrumentalnega zapisa nihanja tal.

2.4.1.2.1 Richterjeva lestvica

Richterjeva magnituda služi razvrščanju potresov glede na sproščeno seizmično energijo. Uporablja se že od leta 1935 in sta jo skupaj zasnovala C. H. Richter in B. Gutenberg.

Magnituda (Richter)	Opis značilnih opažanj učinkov
< 3,5	V glavnem se potresa ne čuti, zaznajo pa ga instrumenti
3,5 - 3,9	Rahlo nihanje, ki ga zaznajo le občutljivi ljudje.
4,0 - 4,4	Tresenje, kot ga povzroči tovornjak.
4,5 - 4,9	Tresenje povzroča nihanje visečih predmetov.
5,0 - 5,4	Drevesa šelestijo, zazvonijo cerkveni zvonovi
5,5 - 5,9	Pokanje sten, odpada omet.
6,0 - 6,4	Promet obstane, podirajo se dimniki.
6,5 - 6,9	Slabo grajene stavbe se podrejo.
7,0 - 7,4	Zemlja razpoka, podre se večina stavb, plinovodi, električni vodi in vodovodi so poškodovani.
7,5 - 7,9	Obstane le nekaj stavb, požari, poplave, plazovi.
≥ 8	Popolno uničenje, tla so vzvalovana in razpokana.

Slika 9: Richterjeva magnitudna lestvica

[Vir: (Stergar, 2014)]

Magnitudo sta opredelila kot desetiški logaritem razmerja dveh amplitud:

$$M_L = \log\left(\frac{A}{A_0(D)}\right)$$

Magnituda nič pomeni pomik tal v vodoravni smeri za 1 μm na razdalji 100 km. To je vrednost A v enačbi, vendar ne gre za meritve s poljubnim seizmografom, temveč s seizmografom tipa Wood-Anderson. A_0 je amplituda, ki je odvisna od oddaljenosti potresne opazovalnice od nadžarišča. Glavna pomanjkljivost je, da je D razdalja od epicentra namesto od hipocentra.

Magnituda ena pomeni približno 32-krat več sproščene seizmične energije kot magnituda nič, magnituda 2 pa 32-krat več kot pri magnitudi ena. Pri potresu z magnitudo 3 se torej sprosti 32-krat toliko energije kot pri potresu z magnitudo 2 in 32^2 -krat toliko kot pri potresu z magnitudo 1.

Resno škodo povzročijo potresi z magnitudo okoli pet.

Največjo doslej izmerjeno magnitudo je imel potres v Čilu leta 1960 in sicer 9,5. Potres v Posočju leta 1998 je imel magnitudo 5,8.

2.4.1.2.2 Popravljenе lestvice

V Sloveniji uporabljamo prilagojeno lestvico in magnitudo računamo po formuli:

$$M_{LV} = \log\left(\left(\frac{A}{T}\right)_{max}\right) + 1,52\log(D) - 3,2$$

Pri tem je D nadžariščna razdalja v kilometrih, A je največja amplituda v nm, T pa nihajni čas nihaja z največjo amplitudo v sekundah. Magnitudo izračunajo na več opazovalnicah in potem naredijo povprečje.

2.4.2 Triangulacija

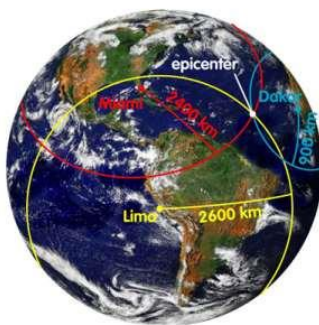
Triangulacija je postopek, s katerim lahko določimo, kako daleč od epicentra potresa se nahajamo.

Večino osnovnih podatkov o določenem potresu lahko seizmologi določijo z analizo seizmogramov na več opazovalnicah za ta potres. Podatki, ki jih zanimajo, so: globina hipocentra, lokacija epicentra, čas nastanka potresa in magnituda potresa.

Seizmologi za določanje oddaljenosti od opazovalnice do potresa uporabljajo programe, ki na podlagi natančnih podatkov o litosferi izračunajo čas potovanja med dvema točkama v notranjosti Zemlje. Taki izračuni se delajo predvsem za lokalne potrese, to pa so tisti, ki so od opazovalnice oddaljeni od 100 do 200 km. Pri natančnejših študijah analizirajo tudi odbite prečne in vzdolžne valove.

Postopek triangulacije e (Alagić, 2019):

Najprej preberemo primarne in sekundarne čase za tri opazovalnice. Iz razlike časov na posamični opazovalnici izračunamo razdaljo opazovalnice od potresa do epicentra. Upoštevati je treba faktor, ki je določen glede na kamninsko sestavo tal. Nato narišemo krožnico s središčem v dani opazovalnici. Epicenter je tam, kjer se vse tri krožnice sekajo.



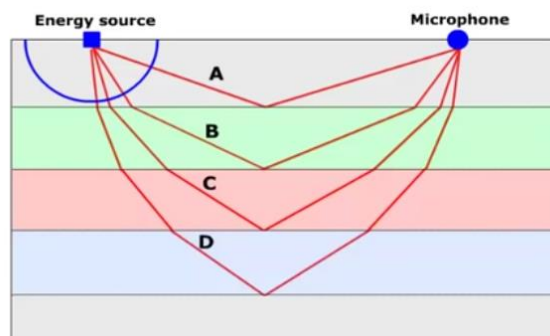
Slika 10: triangulacija

[Vir: (Određivanje epicentra – triangulacija, 2009)]

2.4.3 Lom in hitrost potovanja valov

O valovih vemo, da spremenijo hitrost, ko se premaknejo iz ene snovi v drugo. Če vpadejo pod kotom na to mejo, se tudi lomijo zaradi različne hitrosti. Poleg tega se delno tudi odbijejo.

Valovi z zakasnitvijo pridejo do merilca in iz teh zakasnitev lahko izračunamo globino, na kateri so se odbili (Markert, 2013).



Slika 11: lom in odboj na plasteh v Zemlji

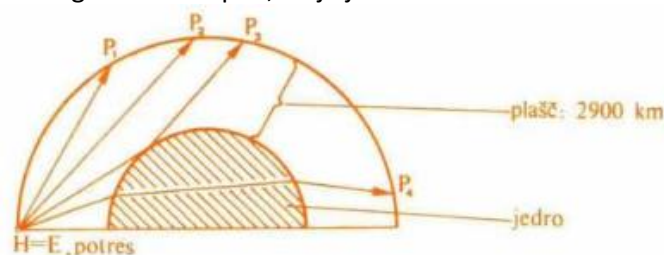
[Vir: (Markert, 2013)]

Človek je prodrli že precej globlje v vesolje kot pa v notranjost Zemlje (Vasović, 2019). Najgloblja vrtina je 12.262 m. Problem pri vrtanju nastane zaradi visokih temperatur. Zato so vsaki podatki o Zemljini notranjosti, ki jih lahko znanstveniki dobijo drugače kot z vrtanjem, zelo dobrodošli. Eden od takih virov so ravno potresi in proučevanje le-teh. Poleg potresnih valov nam podatke o notranjosti Zemlje podajo merjenja moči gravitacijskega in magnetnega polja in toplotni tokovi. Tako so znanstveniki že precej nazaj ugotovili, da Zemlja ni homogena, ampak je sestavljena iz koncentričnih ovojev, ki so bolj ali manj homogeni.

Seizmolog B. Gutenberg je že leta 1913 s pomočjo longitudinalnih P-valov potrdil domnevo, da je pod plaščem mnogo gostejše jedro. Potresni val je zadel ob jedro in na meji se je zgodil lom. Na nasprotni strani jedra se je zgodil še en lom.

O globini, kjer se nahaja jedro, lahko sklepamo s primerjavo P-valov, ki se lomijo v jedru (na sliki P_4), s tistimi, ki se na njem odbijejo (na sliki P_3), in s tistimi, ki sploh ne pridejo do njega (na sliki P_1 in P_2). Ta globina je na okoli 2900 km.

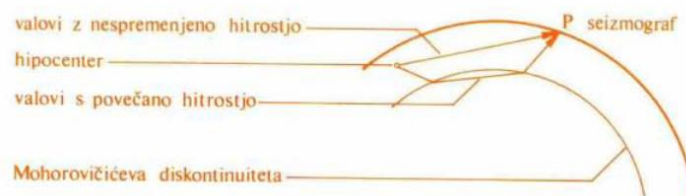
B. Gutenberg je tudi opazil, da S-valovi ne potujejo skozi jedro. Iz fizike vemo, da se transverzalni valovi ne širijo po tekočinah. Iz tega se da sklepati, da je jedro tekoče.



Slika 12: lom na jedru

[Vir: (Šmigoc, 1975/76)]

Veliko odkritje je sledilo leta 1909, ko je A. Mohorovičič s pomočjo potresnih valov odkril mejo med skorjo in plaščem. Meja je na globini okoli 50 km in se imenuje Mohorovičičeva diskontinuiteta ali Moho. Na tej globini pride so nenadnih sprememb v snovnih in elastičnih lastnostih kamenin in hitrost širjenja potresnih valov se poveča.



Slika 13: Moho

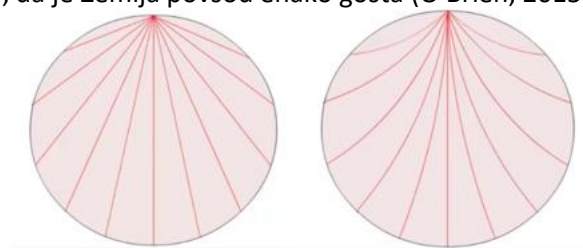
[Vir: (Šmigoc, 1975/76)]

Mohorovičić je ugotovil, da val, ki ima najkrajšo pot (zgornji na sliki) ne pride nujno prvi od izvora do merilca. Ugotovil je, da je lahko val, ki je šel na poti skozi gostejšo snov, kjer je hitrejši, pride prej do senzorja. Tako je odkril mejo med skorjo in plaščem.

Leta 1936 je Inge Lehman odkrila še tretjo diskontinuiteto, ki se nahaja med zunanjim tekočim in notranjim trdnim jedrom.

2.4.4 Senca

Valovi ne potujejo naravnost. Zemlja z globino postaja vse gostejša in lom je vse večji. Če bi potovali naravnost, bi to pomenilo, da je Zemlja povsod enako gosta (O'Brien, 2015).

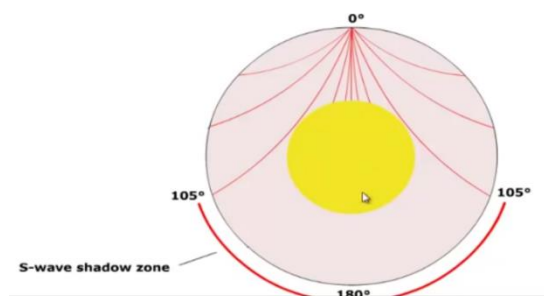


Slika 14: potovanje valov skozi kroglo enake gostote (leva slika) in skozi kroglo, ki ji gostota narašča z globino (desna slika)

[Vir: (Markert, 2013)]

Pri spremljanju potresov so znanstveniki prišli do odkritja, da posameznega potresa ni mogoče zaznati povsod na površju Zemlje, ker se ponekod pojavi senca.

2.4.4.1 Senca pri S-valovih

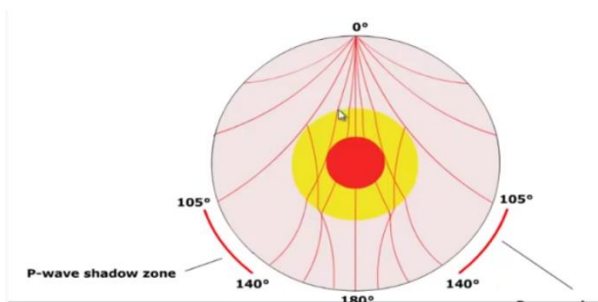


Slika 15: S valovi ne gredo skozi tekočine

[Vir: (Markert, 2013)]

Ker vemo, da S-valovi (transverzalni) ne gredo skozi tekočine, lahko iz območja in velikosti sence sklepamo na obstoj tekočega jedra in tudi na to, kako veliko je.

2.4.4.2 Senca pri P-valovih



Slika 16: P valovi se lomijo dvakrat: na zunanjem in na notranjem jedru

[Vir: (Markert, 2013)]

P-valovi se lomijo dvakrat: na zunanjem in na notranjem jedru. To vidimo iz posebnih oblik črt. Tako vemo, da imamo dve vrsti snovi.

2.5 Seizmografi in seizmogrami

2.5.1 Zgodovina

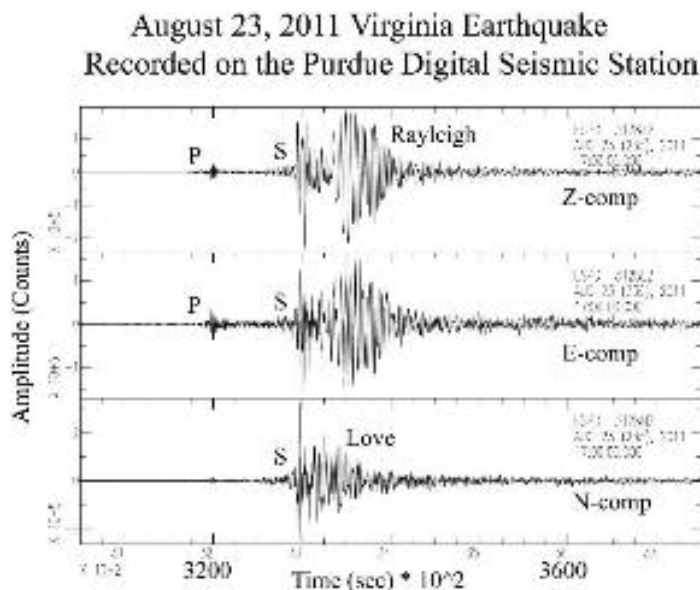
Leta 1755 je Lizbono prizadel katastrofalen potres, ki je zahteval 60.000 življenj. Mnogim učenjakom je vzbudil zanimanje za potrese. Leta 1760 so prvič zapisali, da je potres povezan s širjenjem valov skozi notranjost Zemlje. V poznih dvajsetih letih 18. stoletja sta Cauchy in Poisson matematično pokazala možnost širjenja dveh vrst valovanj v elastični snovi: tansverzalnega in logitudinalnega. Kmalu za tem so Kirchhoff, Kelvin in Rayleigh matematično obdelali še valovanje na meji homogene elastične snovi. Prvi seizmograf smo v Evropi dobili šele konec 19. stoletja. Kmalu zatem so s seizmografi začeli zapisovati vse tri komponente potresov in ugotovili, da potrebujejo kratkovalovne in dolgovalovne naprave. Prav tako so ugotovili, da potrebujejo seizmografe, ki beležijo natančno majhne potrese in seizmografe za merjenje večjih potresov (Tasič, 2003/2004).

Po prvi polovici stoletja so že znali narediti merilnike, ki so zaznali nihanja tal s periodo 0,01 s in take, ki so znali meriti nihanja tal s periodo 10 minut. V osemdesetih letih se je začel razvoj digitalnih seizmografov.

2.5.2 Sedanjost

Za merjenje potresnih valov uporabljamo seizmografe. Ti naredijo zapis, ki se imenuje seizmogram. Merijo v vseh treh prostorskih smereh:

- vzhod-zahod
- sever-jug
- komponenta z



Slika 17: seizmogram

[Vir: (Stergar, 2014)]

Na zgornjem seizmogramu vidimo, da so prvi prišli P-valovi, sledijo S-valovi in nazadnje še površinski valovi. Iz razlik med časi prihoda P in S-valov lahko ocenimo oddaljenost potresa.

2.5.3 Vrste seizmografov

Seizmograf je naprava, katere naloga je posneti točne podatke o tresenju tal zaradi nekega potresa. Osnova vsakega seizmografa je dolgoperiodno nihalo, kar pomeni, da je lastna perioda tega nihala bistveno večja od periode nihanja tal. S povratno zanko vedno izvedemo še dušenje lastnega nihanja.

Glede na moč in oddaljenost potresa je gibanje tal zelo različno. Amplituda valov je lahko od nekaj nm do nekaj cm. Periode so lahko nekaj stotink sekunde do nekaj ur. Lokalni potresi imajo periode reda stotinke sekunde.

Nimamo senzorjev, ki bi lahko pokrili vse to področje, zato uporabljamo več različnih naprav. Veliko se uporablja kombinacija seizmometra in akcelometra. Seizmometri merijo hitrost nihanja podlage, akcelometri pa pospeške nihanja podlage. Seizmometri so bolj občutljivi na šibke in srednje močne potrese in so priključeni ves čas. Pri zelo močnih potresih pa so prekrmljeni na akcelometre. Ti so manj občutljivi in namenjeni opazovanju močnejših sunkov.

Poleg seizmometra je vsak seizmograf sestavljen še iz ure in vmesnikov, ki izmerke pretvorijo v funkcijo časa in shranijo. Včasih so bili ti zapisi narejeni na papir s pisalom ali na foto papir s svetlobnim curkom, danes pa se shranjujejo v digitalni obliki na disk ali v pomnilnik (Tasič, 2003/2004).

2.5.3.1 Seizmometri

Seizmometri beležijo hitrost nihanja tal v odvisnosti od časa in podatke zapisujejo za kasnejšo analizo. Izkoriščajo princip vztrajnostne mase. Prve so leta 1880 zgradili v Evropi. Zapise, ki jih naredijo seizmometri, imenujemo seizmogrami.

Danes so to kompleksni in tehnično zahtevni inštrumenti, ki imajo širok razpon delovanja in z njimi lahko merimo tako šibke kot močne potrese.

Sodobne opazovalnice imajo tri seizmometre, ki lahko merijo nihanje tal v treh različnih smereh.

Delimo jih na mehanske in digitalne.

2.5.3.1.1 Mehanski

Slabost mehanskih seizmometrov je predvsem premajhna povečava in občutljivost.

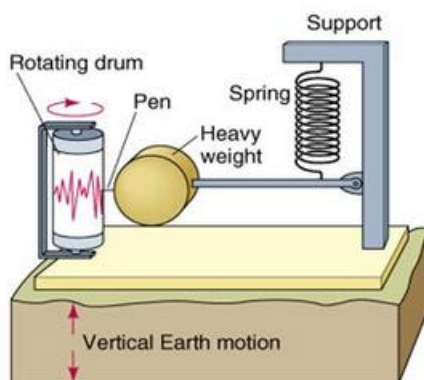
En način delitve mehanskih seizmometrov je glede na smer delovanja na horizontalne in vertikalne.

2.5.3.1.1.1 Vertikalni

Najosnovnejši vertikalni seizmograf je sestavljen iz stabilnega ogrodja, mehke vzmeti in pisala ter papirja za zapis. Vzmet z utežjo je pritrjena na ohišje. Utež ob tresenju ostane na mestu, saj vzmet absorbira tresenje. Premika se ohišje in gibanje se zapiše na papir.

Seveda je dobro, če poskrbimo še za dušenje, ker sicer na zapisu dobimo preveč podatkov. Za dušenje lahko poskrbi ploščica, potopljena v tekočino. Poleg tega je treba poskrbeti za to, da se papir premika, ker potrebujemo zapis valov v času. Papir lahko pritrdimo na vrteči se boben.

Glavni problem take sestave je trenje med papirjem in svinčnikom, zato je bolje da za zapis uporabimo tehniko beleženja inducirane napetosti na tuljavi. Ko se nihanje začne, se tuljava premika v magnetnem polju, kar sproži nastanek inducirane napetosti, ki jo lahko beležimo.



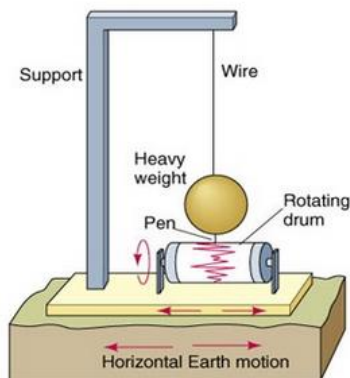
Slika 18: vertikalni seizmograf

[Vir: (Seizmografi, 2014)]

2.5.3.1.1.2 Horizontalni

Pri takem seizmografu dobimo zapis horizontalnih premikov tal.

Namesto vrvice lahko uporabimo vzmet in za dušenje na primer uporabimo magnet.



Slika 19: horizontalni seizmograf

[Vir: (Seizmografi, 2014)]

2.5.3.1.2 Digitalni oz. elektronski

Digitalni merilniki imajo razmeroma majhno maso, ki je vezana preko tuljave v magnetnem polju na ojačevalec impulzov. Ko se masa premakne, se premakne tudi tuljava v magnetnem polju in zato se v njej inducira napetost. To napetost ojačimo in prenesemo na občutljiv galvanometer, ki ima namesto igle lahko vgrajeno zrcalo, ki usmerja žarek na papir ali pa se prenese s pomočjo črnila na papir.

Digitalni seizmometri v današnjem času torej pretvarjajo premik tal v električni signal. Pri pasivnih seizmometrih pretvorimo v električni signal odmik uteži iz ravnovesne lege. Pasivni seizmometri delujejo na zelo omejenem frekvenčnem pasu. Zato so bolj uporabni aktivni seizmometri, ki imajo povratno zanko. Premik uteži kompenzira povratna električno generirana sila. Tako utež ostaja v ravnovesni legi, merimo pa tok, ki je potreben za ustvarjanje ravnovesja. Ti senzorji delujejo na širšem frekvenčnem področju in z boljšimi dinamičnimi karakteristikami.

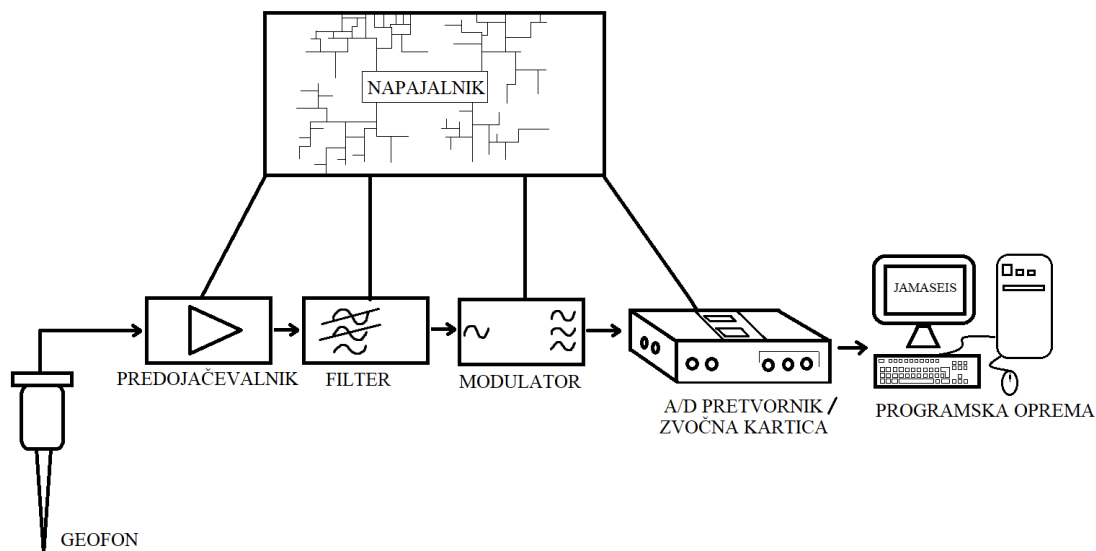
2.5.3.2 Akcelerometri

Princip delovanja je podoben principu seizmometra, le da ima nihalo lastne periode, ki so nižje od period nihanja tal pri potresu (Petelin, 1999). Akcelerografi niso priključeni stalno, vključijo se samo v primeru, ko pospeški presežejo neko določeno mero.

3 MERILNIKI IN METODE

3.1 Aparature in merilniki

Mehanske tresljaje tal (seizmični signali) z geofonom spremenimo v šibak električni signal. Ojačimo ga s predojačevalnikom in ga pošljemo naprej na nizkoprepustni filter, modulator in končno na ceneno USB zvočno kartico. Ta služi kot digitalizator (A/D pretvornik) za prenos signala v računalnik, kjer ga naprej obdeluje in prikazuje namenski program AmaSeis.



Slika 20: blok shema osnovnih sklopov seizmometra

3.1.1 Geofon

Geofon je vrsta mikrofona, ki ne zazna valovanja zraka, ampak tresljaje tal. Mehanske pospeške pretvori v električni signal. Ker so signali, ki prihajajo v geofon, zelo šibki, je potrebna uporaba predojačevalnika in električnega ali magnetnega oklopa. Brez tega bi bil elektromagnetni šum iz okolja prevelik.

Z geofonom zaznavamo potrese, kar pomeni, da nas zanimajo frekvence od nekaj desetink Hz do nekaj Hz. Uporabljeni geofon je narejen za sprejemanje slušnih frekvenc od 16 Hz do nekaj kHz, torej se v frekvenčnem spektru potresi ne ujemajo najboljše z našim geofonom. Njegova impedanca je 300 ohmov. Prvotno je bil namenjen za vojaško uporabo (za zaznavanje hoje na varovanih območjih).

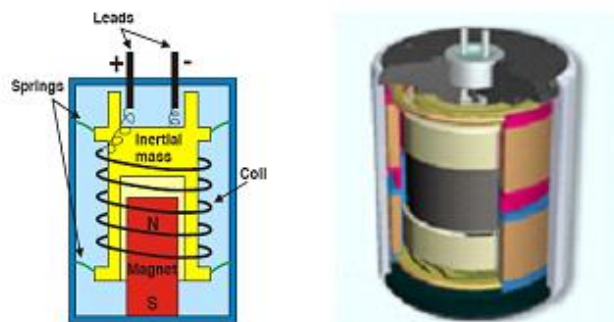


Slika 21: geofon, ki smo ga uporabljali



Slika 22: podrobnosti našega geofona

Velik problem predstavlja tudi prenos signala od geofona do naslednjega elementa v vezju, saj lahko pride do prevelikega vdora šuma od zunaj.



Slika 23: zgradba geofona

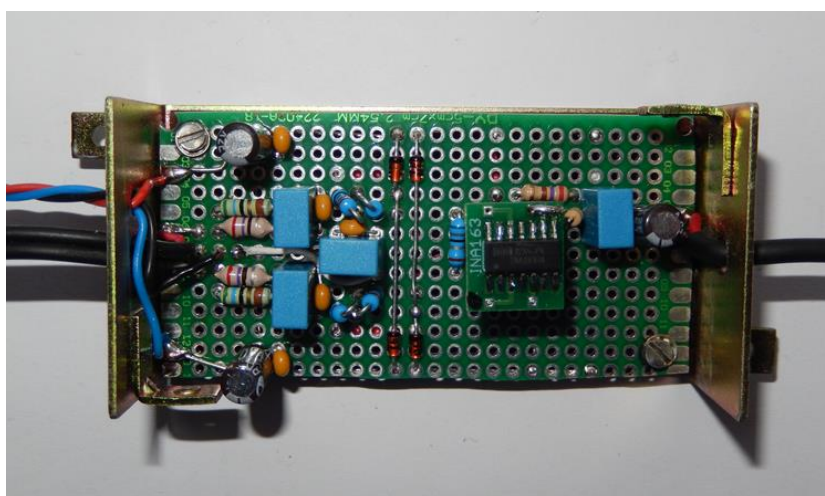
[Vir: (Geophones, 2020)]

3.1.2 Predojačevalnik

Predojačevalnik mora izboljšati razmerje signal/šum. Predojačevalnik mora torej signal toliko ojačati, da se dovolj dvigne nad nivo šuma. Pri tem sam ne sme prispevati dodatnega šuma.

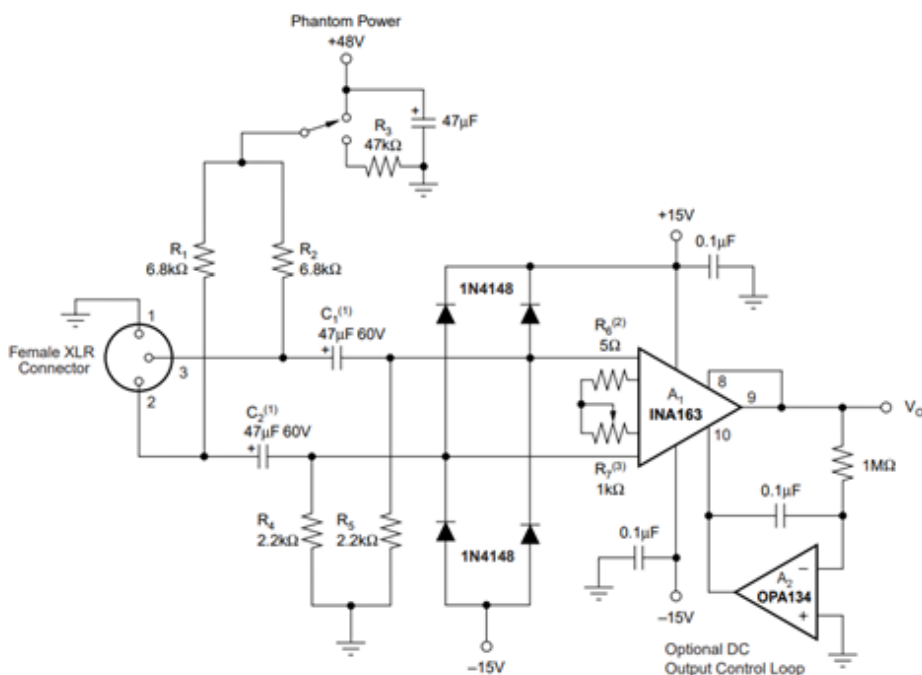


Slika 24: uporabljeni predojačevalnik v ohišju



Slika 25: uporabljeni predojačevalnik brez ohišja

Na začetku smo v našem vezju uporabljali profesionalno zvočno kartico, ki smo jo uporabili le kot predojačevalnik. Kasneje smo jo nadomestili s predojačevalnikom, zgrajenim v diskretni obliki okoli integriranega vezja - specialno nizkošumnega operacijskega ojačevalnika INA 163. Vezje je zasnovano za zajem signalov iz nizko impedančnih magnetnih senzorjev (mikrofoni, geofoni). Ima simetrični vhod, kar je zelo pomembno za visoko imunost proti vdoru motenj v vhodno stopnjo ojačevalnika. Z vsemi temi ključnimi lastnostmi se ujema z našim geofonom, zaradi tega smo ga tudi izbrali.

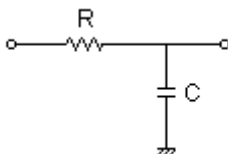


Slika 26: vezje predojačevalnika

[Vir: (INA163 , 2000)]

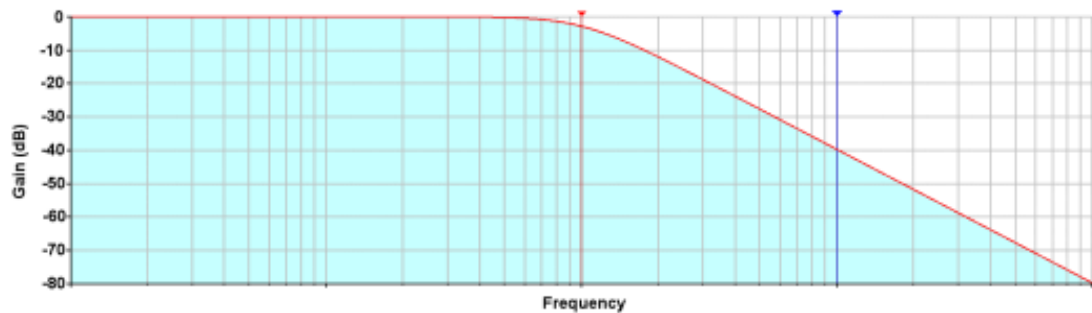
3.1.3 Filter

Naš filter smo sestavili tako, da nizke frekvence prepušča, višje pa poreže. S tem izločimo nezaželene signale in motnje z višjimi frekvencami. Osnova filtra je kondenzator, ki je element s spremenljivim frekvenčnim odzivom. Za razumevanje filtra moramo torej poznati karakteristiko kondenzatorja: visoke frekvence prepušča bolj kot nizke.



Slika 27: osnovni člen nizkoprepustnega pasivnega filtra (RC člen)

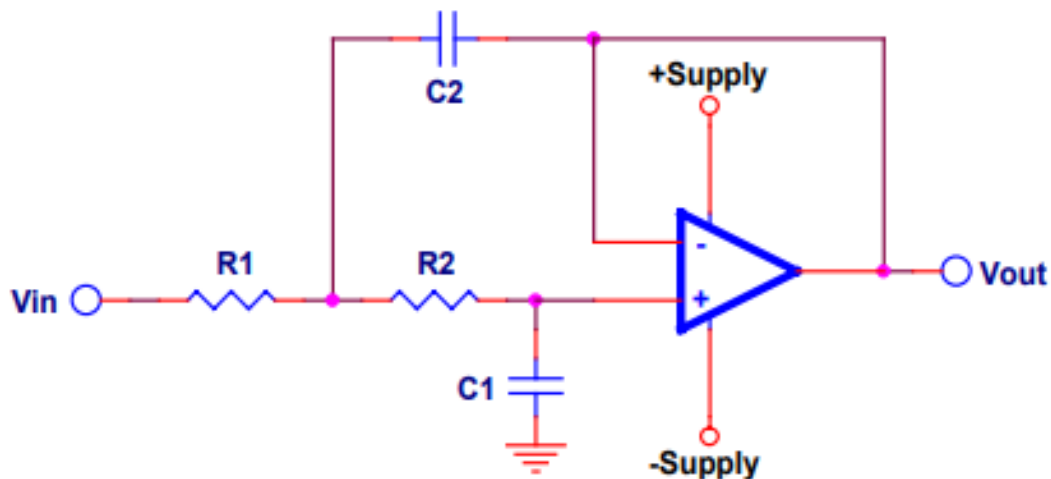
[Vir: (RC Low-pass Filter Design Tool, 2004-2021)]



Slika 28: graf frekvenčne karakteristike aktivnega nizkoprepustnega filtra

[Vir: (Carter, 2001)]

Vezja, ki vsebuje samo kondenzatorje, tuljave in upornike, so pasivni filtri, ki imajo velike izgube koristnega signala. Zaradi tega smo sestavili aktivni filter. V njem imamo tudi operacijski ojačevalnik. Ta nadomesti vlogo zgoraj navedenih elementov, ki so prisotni v pasivnih filtrih, in izgube signala, ki se pojavijo v njih.



Slika 29: vezje aktivnega nizkoprepustnega filtra drugega reda po Sallen-Key topologiji

[Vir: (Carter, 2001)]

Prehodna frekvenca je točka, kjer električna moč signala pade na polovico, kar izrazimo v logaritemskih enotah - decibelih (dB). Prehodna frekvenca je definirana pri minus treh dB. Z decibeli izražamo logaritemsko razmerje moči signalov pri prehodu skozi določena vezja:

$$f(P_{1,2}) = 10 \log(P_1/P_2); [\text{dB}]$$

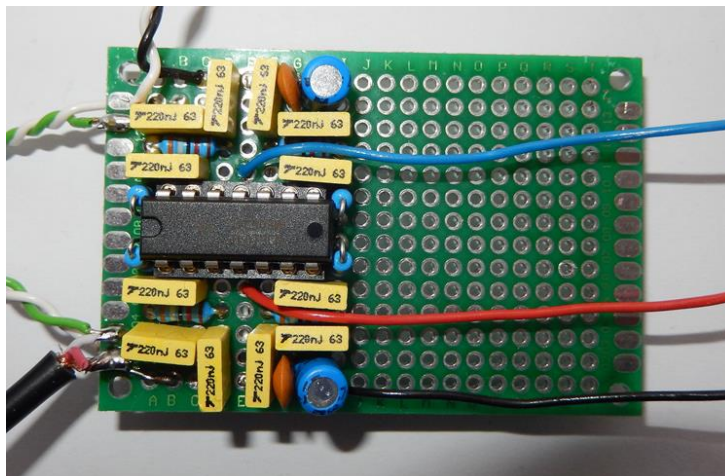
Za primer, ko moč pade na polovico, dobimo:

$$f(P_1/P_2) = 10 \log (1/2) = -3 \text{ dB}$$

Razpon frekvenc 2 : 1 imenujemo oktava.

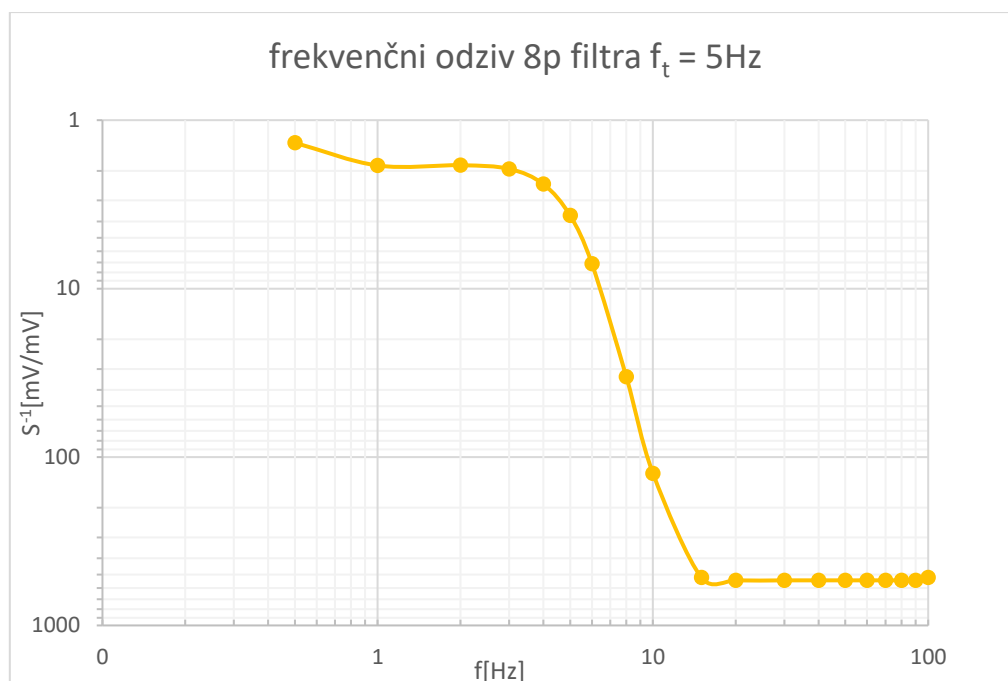
Lastnost filtra prvega reda (z enim kondenzatorjem) je, da oslabi amplitudo (napetost) na eno polovico, kar ustreza -3 dB. Moč signala je definirana s kvadratom amplitude, zato se ta zmanjša za 6 dB/oktavo.

Uporabili smo štiri operacijske ojačevalnike. Vsak ojačevalnik vsebuje dva kondenzatorja, kar tvori filter drugega reda (en člen filtra). Vse štiri ojačevalnike smo vezali zaporedno, s čimer smo dobili filter osmega reda (z osmimi členi). S tem smo povečali strmino filtra, kar pomeni da močno duši signale nad prehodno frekvenco.



Slika 30: vezje uporabljenega filtra

Ker smo uporabili filter osmega reda, se slabljenja posameznih členov med seboj množijo. V logaritemski skali to pomeni, da se seštevajo. Za tak filter dobimo skupno slabljenje 48 dB. To pomeni, da če je signal v prepustnem območju pod mejno frekvenco (npr. 10 Hz), bo amplituda signala z dvakrat višjo frekvenco (20 Hz) 250-krat manjša, moč pa celo 63 000-krat manjša po prehodu skozi filter. To pomeni, da je strmina našega filtra velika.

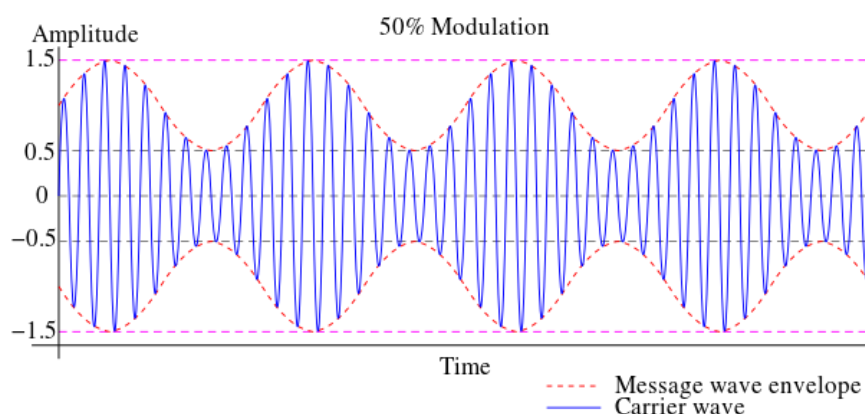


Slika 31: frekvenčna karakteristika 8-polnega aktivnega filtra z mejno frekvenco 5 Hz

3.1.4 Modulator

Modulator je naprava, ki ojačani signal prilagodi tako, da ga zvočna kartica zna prebrati. Zvočna kartica v osnovi ni narejena za nizkofrekvenčne signale, kot jih imajo potresi. Zato moramo signal modulirati in ga dvigniti na 2 do 3 kHz, ki jih kartica zna prebrati.

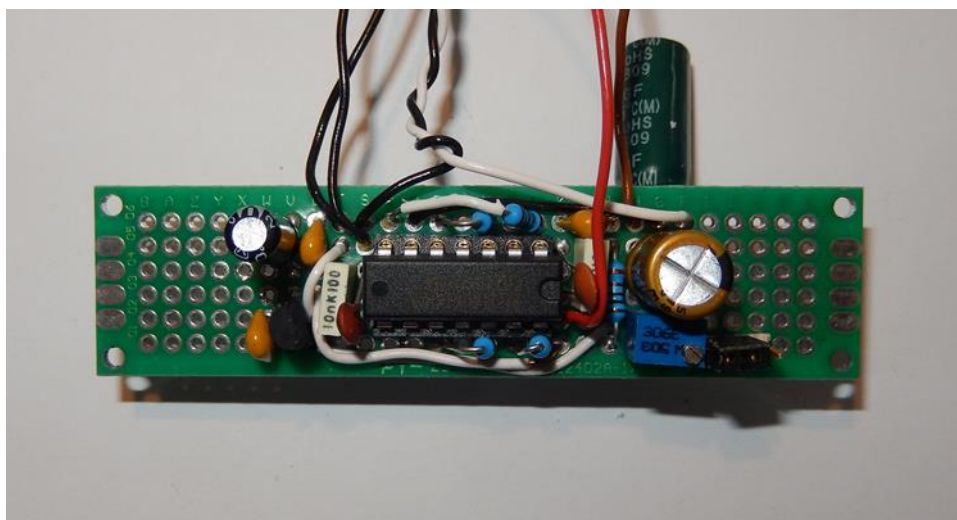
Proces obdelave signala, kjer signal nižje frekvence, ki prenaša koristno informacijo, "vtisnemo" na signal višje frekvence (nosilna frekvenca), imenujemo modulacija. Na sprejemni strani ga moramo demodulirati, torej naredimo obraten proces. Tako iz nosilne frekvence razberemo nizkofrekvenčni signal, ki vsebuje koristno informacijo. Na ta način lahko prenašamo signale na bolj učinkovit način preko različnih medijev in na večje razdalje. Najznačilnejši primer modulacije je prenos zvoka in slike preko radijskih valov (AM-amplitudna modulacija in FM-frekvenčna modulacija).



Slika 32: amplitudna modulacija

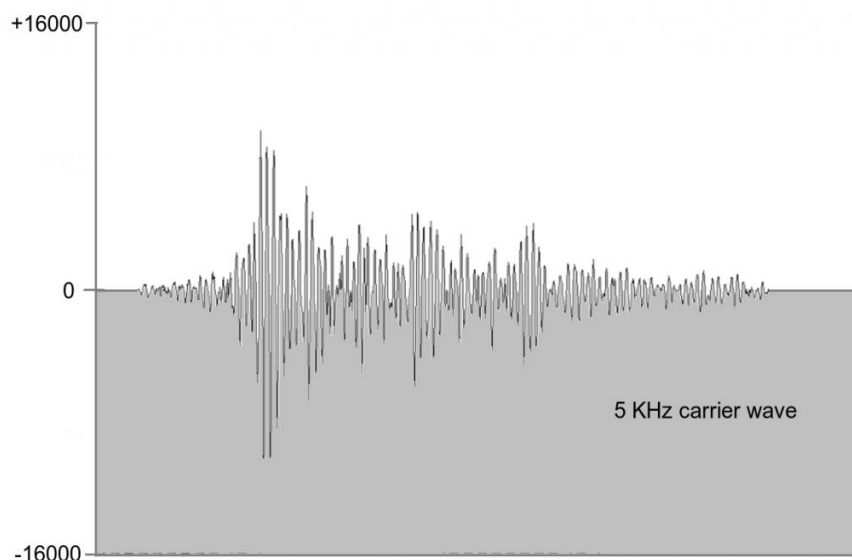
[Vir: (Amplitude modulation, 2004)]

Naš seizmološki signal ima približno 1000-krat nižjo frekvenco od modulatorske. Moduliramo ga, ker zvočna kartica lahko digitalizira le visokofrekvenčne signale. V našem vezju za seizmograf moduliramo signal zelo nizkih frekvenc iz geofona (nekaj desetink Hz do nekaj Hz) na višjo (nosilno) frekvenco 5 kHz. To dosežemo s spreminjanjem amplitude nosilne frekvence, tako da v našem primeru govorimo o uporabi AM.



Slika 33: vezje uporabljenega modulatorja

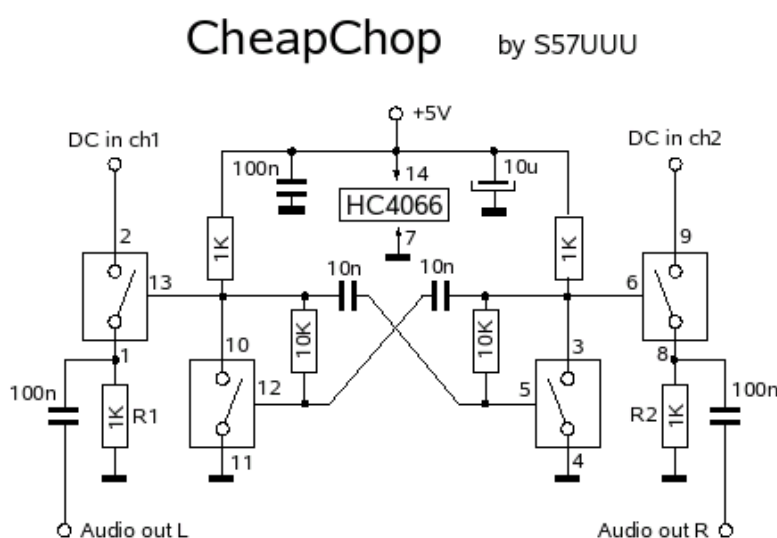
Amplitudno modulacijo dosežemo na poseben način z vezjem, ki se imenuje chopper. Sestavljeno je iz več digitalno krmiljenih zelo hitrih elektronskih stikal, ki jih v ritmu 5 kHz odpiramo in zapiramo ter s tako frekvenco prepuščamo nizkofrekvenčni signal. Ta zato izgleda "nasekano", od tod tudi angleško ime. Frekvenco 5 kHz za krmiljenje stikal proizvaja oscilator, ki je eden od sestavnih delov vezja. Oscilator ima v našem vezju posebno topologijo, ki jo imenujemo astabilni multivibrator. To je vezje, ki zaradi stalnega prehajanja med dvema nestabilnima stanjema proizvaja ponavljajoče se električne nihaje določene frekvence. Zvočna kartica zdaj vidi signal 5 kHz, ki pa se z amplitudo spreminja.



Slika 34: modulacija seizmičnega signala s chopperskim modulatorjem

[Vir: (Cheap seismometer using sound card and Amaseis – now running under Windows, 2012)]

V vezju so vsa digitalna stikala v enem samem integriranem vezju - čipu z oznako 4066. Izdelano je v tehnologiji CMOS (plementary metal–oxide–semiconductor) in ima zato izredno majhno porabo. To je pomembno, ker je naše vezje napajano z baterijo.



Slika 35: vezje chopperskega modulatorja

[Vir: (Cebokli, brez datuma)]

3.1.4.1 Merjenje karakteristike modulatorja

V našem praktičnem vezju smo preverjali funkcionalnost modulatorja z opazovanjem monofrekvenčnih spektrov, generiranih s frekvenčnim generatorjem v programu AmaSeis. Tokrat signala iz frekvenčnega generatorja nismo priključili neposredno na vhod zvočne kartice, ampak smo ga priključili preko nizkofrekvenčnega filtra (NF), ki duši vse frekvence nad 20 Hz. Začeli smo pri 10 Hz in frekvenco spuščali nižje. Končali smo pri 0,1 Hz. Signale s tako nizkimi frekvencami smo opazovali s programom AmaSeis. Na ta način smo opazovali amplitudo, obliko in posredno frekvenco. Frekvenco smo analizirali preko funkcije FFT oziroma Fourierjeve analize (FFT - Fourier Fast Transformation). Ugotovili smo, da je razmerje signal/šum izredno dobro in signalov z drugimi frekvencami praktično ni, razen tistega iz generatorja signalov. Omenjeni modulator ima tudi negativne posledice, saj posreduje naprej tudi zelo počasi spreminjajoče se signale, ki jih lahko označimo kot enosmerno komponento, neke vrste plato. Zaradi počasnih sprememb višine (napetosti) tega platoja so frekvence v področju mHz do nekaj desetink Hz. Če želimo zmanjšati motnje vezja, bi morali vezje vključiti vsaj 15 minut prej in počakati, da se temperaturno stabilizira. V prostoru bi morala biti temperatura čimbolj konstantna. Te motnje lahko popravi tudi program AmaSeis, tako da vključimo programski NF filter. Nad 5 Hz, imamo zopet omejitve. Vzorčenje oziroma zajem digitaliziranega signala v program AmaSeis se namreč izvaja s frekvenco 7-16 Hz in ko se frekvenca opazovanega signala začne približevati tej frekvenci vzorčenja, nastopijo razni fenomeni (npr. aliasing).

Aliasing je pojav, ko v vzorčenem spektru vidimo signale ali frekvence, ki jih v resnici ni ali so drugačne. Gre za neke vrste popačenje, ki nastane zaradi prenizke frekvence vzorčenja. Z namenom izogibanja aliasom in fantomskim signalom med procesom vzorčenja z nizko frekvenco smo dodali tudi nizkoprepustni filter.

Trenutno je mejna frekvenca tega filtra nastavljena na 20 Hz, saj je bil filter prvotno zamišljen kot zaščita proti motnjam 50 Hz in šele kasneje se je izkazalo, kakšen problem predstavljajo motnje na višjih frekvencah (pralni stroji, promet, helikopterji...). Tako zdaj filter pridobiva pomen še v drugi vlogi.

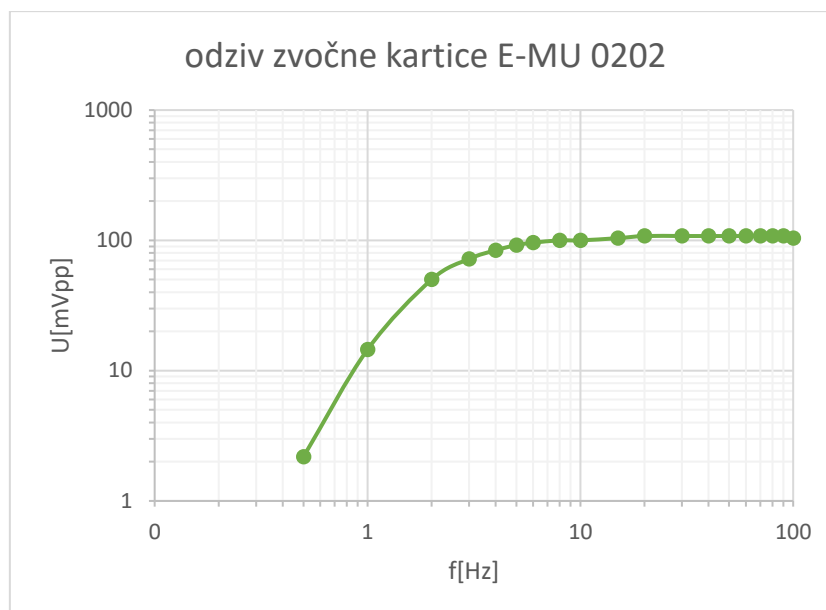
Omejitve za opazovani signal so definirane z Nyquistovim kriterijem. Če signal vzorčimo s 16 Hz, potem je najvišja možna opazovana frekvenca $16/2$, kar je 8 Hz. Če je opazovana frekvenca višja od tega kriterija, se nam prikaže navidezna frekvenca, ki jo izračunamo po formuli: $f_{\text{prikazana}} = 8 - (f_{\text{dejanska}} - 8)$. Na ta način vidimo drugačne frekvence signalov, kot so v resnici – aliasing. Zato je ključno, da previsoke frekvence pred vzorčenjem izločimo z ustreznim NF filtrom.

3.1.5 A/D pretvornik in programska oprema

Vlogo A/D pretvornika opravlja zvočna kartica, ki pretvori analogni električni signal, v katerem se skriva informacija o potresu, v digitalnega. Le-tega s pomočjo programske opreme naprej obdeluje računalnik. Programska oprema (SW) nadomesti nekatere funkcije (filtriranje, izločanje motenj).

Zvočne kartice so namenjene zajemanju in digitalizaciji signalov v avdiofrekvenčnem spektru (20 Hz-20 kHz). Območje seizmoloških signalov, ki nas zanimajo, pade ravno pod mejo, ki jo kartica še zazna. Frekvenco seizmološkega signala 10 Hz smo zato z modulatorjem prestavili v območje 5 kHz in smo takega vzorčili z zvočno kartico 48 000-krat na sekundo. S tem smo popolnoma zadostili Nyquistovemu kriteriju.

Zvočni kartici smo izmerili frekvenčni odziv. Ta odziv smo merili s funkcijskim generatorjem (generator električnih signalov, ki jim lahko določimo obliko – sinusna, kvadratna, žaga).



Slika 36: frekvenčni odziv profesionalne zvočne kartice

Tako smo obdelani seizmološki signal po predojačanju, filtraciji in modulaciji končno tudi zajeli in ga digitalizirali ter prenesli v računalnik. Ker program za prikaz potresov »razume« le nizke frekvence, tja do nekaj Hz, moramo, preden mu naš signal posredujemo, iz njega zopet izluščiti naš NF signal. To opravimo s procesom demodulacije. Ta se zgodi programsko na računalniku (program AudioSeis).

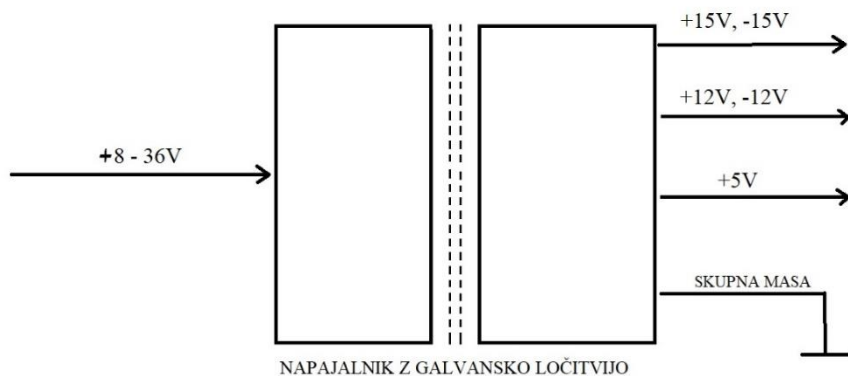


Slika 37: zunanja USB zvočna kartica, nizkega cenovnega razreda

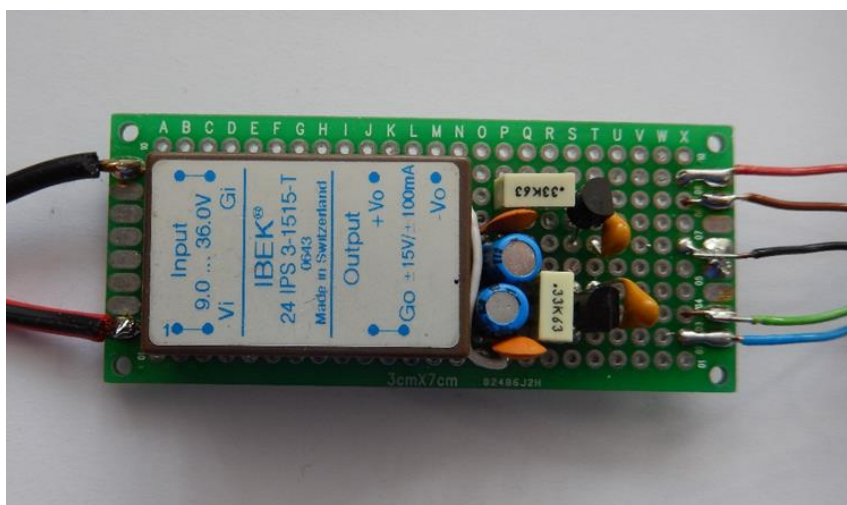
[Vir: (Zvočna kartica USB 2.0, brez datuma)]

3.1.6 Napajalnik

Naloga napajalnika je, da oskrbuje vse zgoraj opisane sklope vezja z različnimi napetostmi ki jih potrebujejo. Zasnovan je na osnovi DC-DC pretvornika in napetostnih stabilizatorjev. DC-DC pretvornik je stikalno vezje, ki vhodno enosmerno napetost najprej pretvori v izmenično in nato jo s pomočjo visokofrekvenčnega transformatorja pretvori v več nižjih ali višjih napetosti. Nato jih usmeri in stabilizira. Zaradi transformatorja so vhodne in izhodne napetosti med sabo galvansko ločene, kar je zelo pomembno za preprečitev vnosa motenj. Vhodna napajalna napetost se lahko giblje v zelo širokem razponu (8-36 V), kar nam omogoča široko izbiro virov napajanja: avtomobilski akumulator, razni adapterji, fotovoltaika. Kljub spremenljivi vrednosti vhodne napetosti, izhodne ostanejo nespremenjene in stabilne. Različni sklopi vezja potrebujejo različne napetosti: predojačevalnik potrebuje simetrično enosmerno napetost ± 12 V, filter ± 15 V, modulator +5 V. Osnovni del napajalnika je miniaturni kompaktni DC-DC pretvornik IBEC 24 IPS 3-1515-T. Uporaba tega pretvornika nam je prihranila veliko denarja, časa in prostora.



Slika 38: blok shema napajalnika



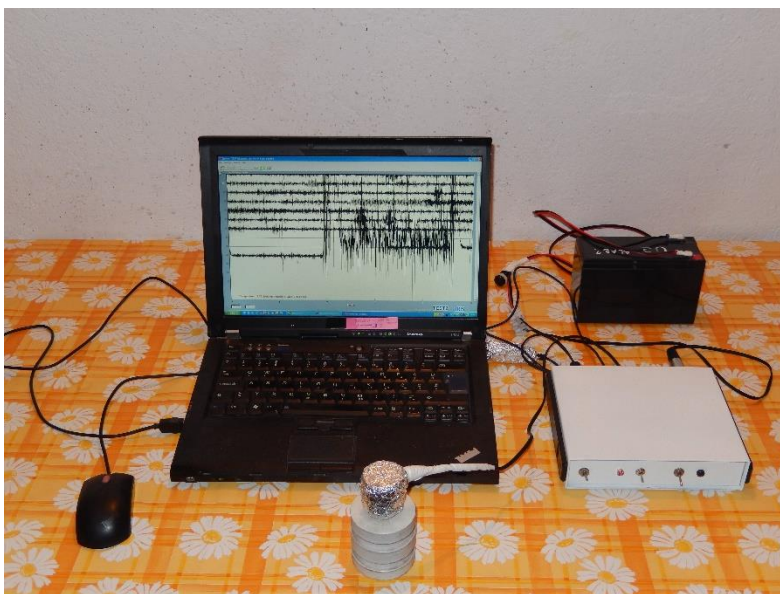
Slika 39: vezje uporabljenega napajalnika



Slika 40: povezane elektronske komponente signalnega vmesnika



Slika 41: ohišje signalnega vmesnika



Slika 42: vsi sklopi seizmografa med delovanjem

3.2 Metode

3.2.1 Izbira lokacije za geofon

Zahteve za postavitev geofona so: mirna lokacija (s čim manj antropogenimi motnjami), zatišna lega in možnost povezave na internetno in električno omrežje in lahka dostopnost. Take lokacije zaradi okoliščin še nismo uspeli dobiti in zato smo geofon začasno namestili kar v klet stanovanjskega objekta. Geofon smo povezali s tlemi. Luknjo za geofon smo zvrtili v betonsko talno ploščo, da geofon ni bil obdan z mehкими materiali, ki bi dušili naš signal. Kljub temu so se motnje (hoja stanovalcev, pralni stroji, ...) prenašale tudi po nosilnih stenah na talno ploščo. Signale smo po zajemu prenašali na tablico.

3.2.2 Programska oprema za zajem in analizo signalov

AmaSeis je že dodelan program in vanj nismo kaj posebej posegali. Najdemo ga lahko na spletu in je namensko izdelan za amatersko izobraževalno uporabo. Sam program zahteva dva podprograma za prilagoditev podatkov (comOcon, Seizmo chop). Program AmaSeis je namreč napisan za tipske vnaprej izdelane seizmografe, ki jih je potrebno kupiti. Ker smo mi seizmograf izdelali sami smo s tema dvema programoma omogočili, da je znal brati podatke tudi iz našega vezja. JamaSeis je novejši program in je napisan na osnovi Java, ima pa svoje prednosti in slabosti. Program je plod dela strokovnjakov z vsega sveta, večinoma pa so ga zasnovali v Ameriki. Namen programa je določanje razdalje epicentra s pomočjo razlike v času med prihodom P in S valov. Program omogoča shranjevanje podatkov v standardizirane formate, ki jih uporabljajo tudi profesionalni programi za seizmologijo. Omogoča tudi priključitev v mednarodno mrežo podobnih amaterskih opazovalnic. Trenutno v Sloveniji še nobena amaterska opazovalnica ni priključena v to mrežo.

3.2.3 Primerjava s sosednjimi opazovalnicami

Vedno, kadar smo zaznali zanimiv signal, ki bi lahko izviral od potresa, smo ga časovno primerjali s signali potresov, ki so jih zabeležile opazovalnice državnih mrež iz Slovenije in sosednjih držav (ARSO, ZAMG, OGS, EMSC). Če sta se oba signala časovno ujela smo sklepali, da smo zabeležili dejanski potres. Nam najbližji opazovalnici sta GORS (Slovenija, Gorjuše) in MYKA (Avstrija, Dobrač).



Slika 43: avstrijska mreža potresnih opazovalnic

[Vir: (ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, brez datuma)]



Slika 44: državna mreža potresnih opazovalnic

[Vir: (Državna mreža potresnih opazovalnic, 2021)Določanje oddaljenosti žarišča potresa]

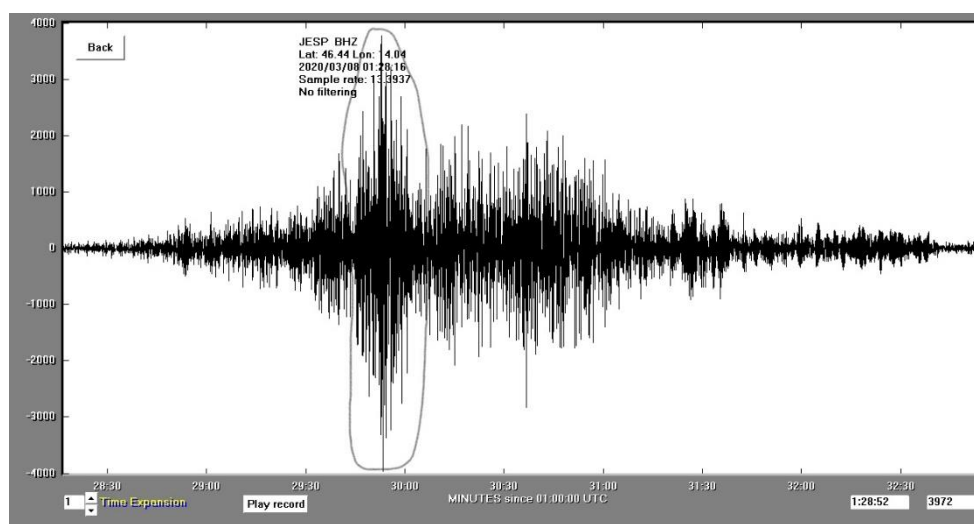
Ko signal zaznamo, ga posnamemo. Posnet seizmogram potresa prenesemo v okno za analizo in ga naravnamo po premicah hitrosti P in S valov, ki so že narisane na diagramu. Rezultat grafične analize je polmer krožnice od opazovalnice. Nekje na tej krožnici se nahaja epicenter. Če bi želeli določiti točko epicentra na zemljevidu bi potrebovali najmanj tri seizmograme iz različnih opazovalnic. Tam kjer bi se vse tri krožnice sekale, je točka epicentra. Program nam to krožnico izriše na zemljevidu in nam napiše razdaljo od epicentra do opazovalnice.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

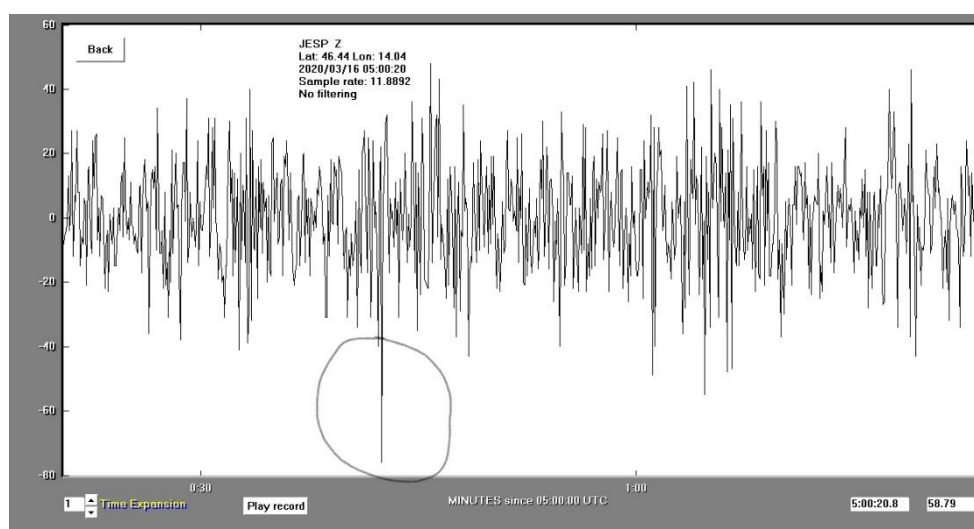
Več kot 99% vseh zabeleženih dogodkov je antropogenega izvora (cestni, železniški in zračni promet, gibanje ljudi v soseski in zgradbi, gospodinski stroji). Zato smo na začetku preučevali te, da smo jih lahko ločili od potresov.

Najbolj miren čas je med 02:00 in 03:00 uro ponoči, ko je ozadje daleč najnižje. Še posebej to velja za konec tedna v poznih nočnih urah, saj takrat največ ljudi spi in mestni utrip tako rekoč zamre. Ozadje se začne večati okrog četrte ure zjutraj, ko začnejo voziti dostavna vozila v trgovske centre. Še posebej izstopata dve dnevni konici. Prva je jutranja vožnja v službo in šolo od 6. do 8. ure zjutraj, Druga konica nastopi med 13. in 15. uro, ko se ljudje vračajo domov. Razlika intenzitete ozadja med temi skrajnostmi lahko presega faktor 10. Posamezni dogodki vozil pa so še nekaj velikostnih redov nad tem. Zaradi tega se šibki potresi, ki bi jih ponoči lahko zaznali, podnevi utopijo v visokem šumu ozadja. Kot zanimivost: v času razglasitve 1. vala epidemije COVID-19, 12.3.2020, so se tresljaji ozadja tudi podnevi umirili za več kot 5-krat in močno spominjali na nočni režim.

Kmalu smo zaznali tudi naš prvi potres, ki je imel epicenter pri Kobaridu, 8.3.2020, ob 0129 UTC z magnitudo $M=2,3$.



Slika 45: potres pri Kobaridu, 8.03.2020, 0129 UTC, $M=2,3$ (skrit v motnji vlaka)



Slika 46: potres v Bohinju, 16.03.2020, 0500 UTC, $M=0,7$ (zaradi šibkosti in oddaljenosti viden samo en sunek)

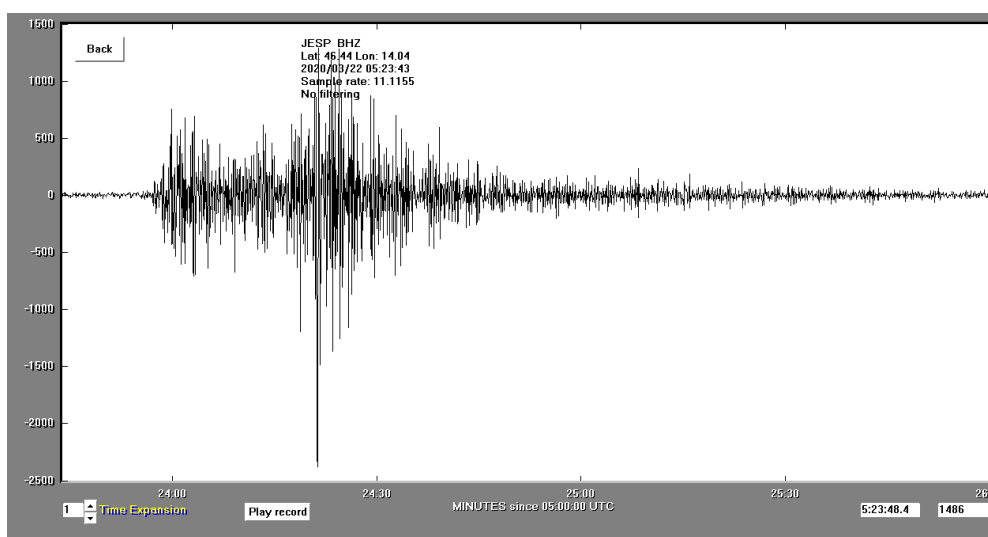
4.1 Izmerjeni dogodki in primerjava z ARSO

Glavni dogodki v naši analizi so se nanašali na močnejše potrese na Hrvaškem:

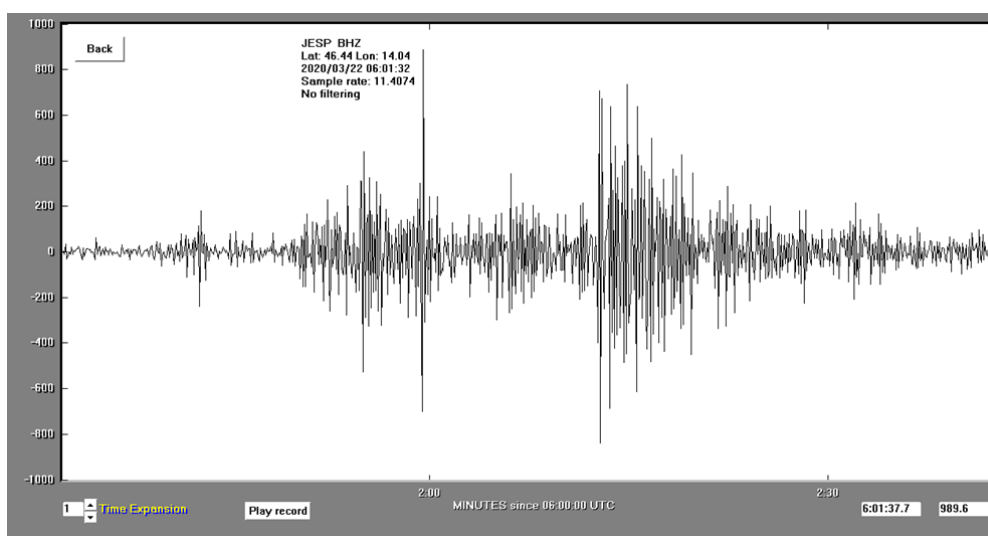
- Trije zagrebški potresi 22.3.2020 z epicentrom severno od Zagreba: glavni sunek ob 0523 UTC z magnitudo $M=5,4$ ter dva popotresna sunka ob 0601 UTC z magnitudo $M=4,9$ in ob 0641 UTC z magnitudo $M=3,7$.
- Popotresni sunek 19.3.2021 z epicentrom blizu Petrinje (Sisak) ob 0558 UTC z magnitudo $M=3,4$.
- Manjši lokalni potresi (Posočje, Gorenjska)

Da gre pri vseh teh dogodkih za potrese, smo preverili na spletnih straneh državnih opazovalnic, kot so: ARSO (Slovenija), ZAMG (Avstrija) in PMF (Hrvaška).

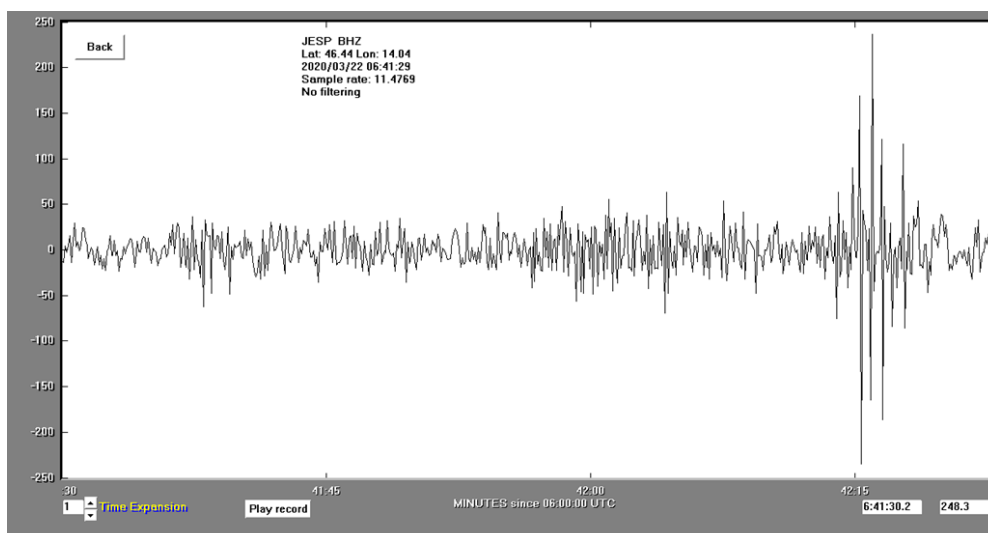
Pri teh potresih smo želeli izmeriti razdaljo njihovega epicentra od naše opazovalnice preko časovnega zamika prihodov P in S valov, relativno magnitudo in frekvenčno porazdelitev zaznanih valov.



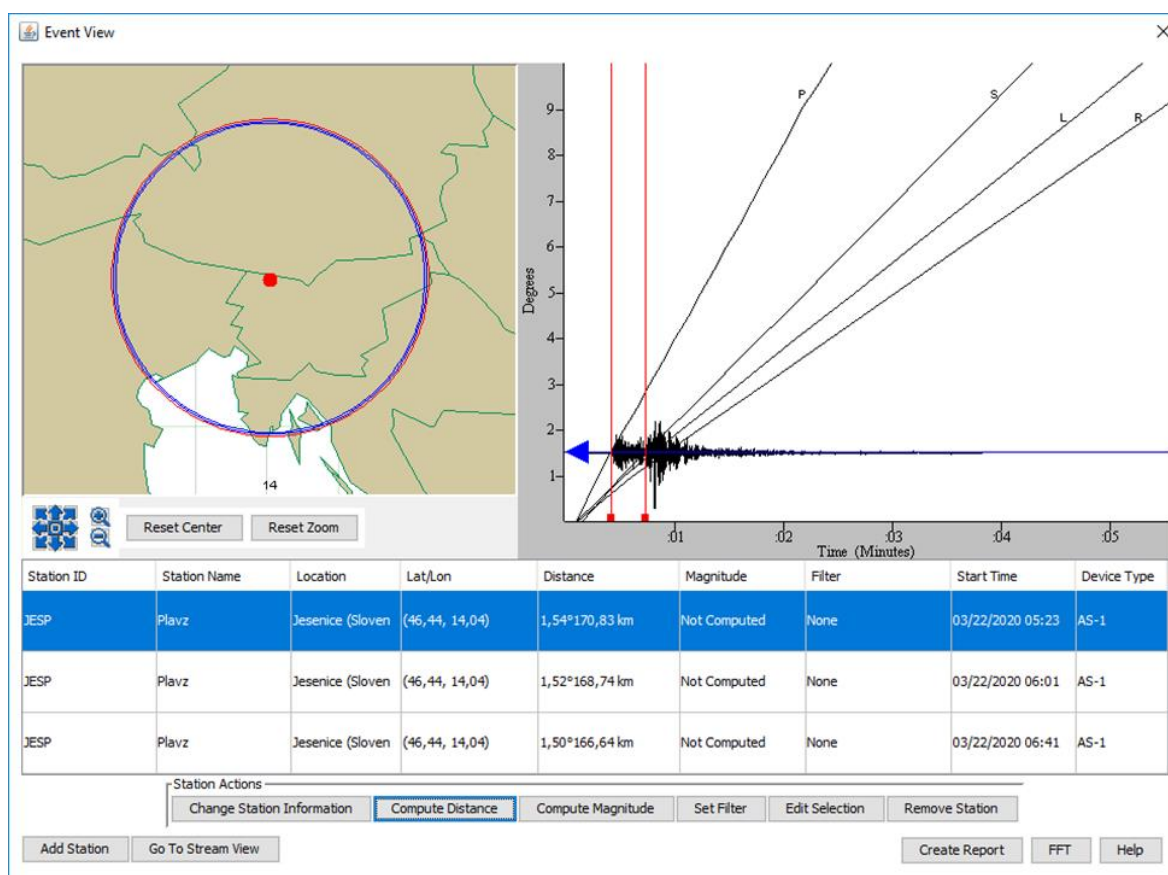
Slika 47: potres v Zagrebu, 22.03.2020, 0524 UTC, $M=5,4$



Slika 48: potres v Zagrebu, 22.03.2020, 0601 UTC, $M=4,9$



Slika 49: potres v Zagrebu, 22.03.2020, 0641 UTC, $M=3,7$



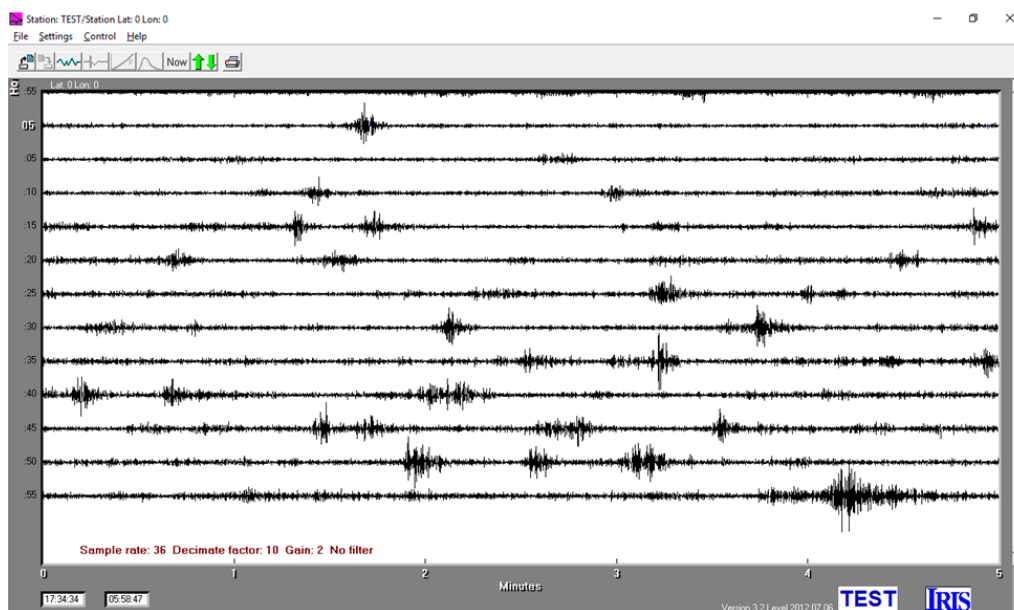
Slika 50: vsi trije zagrebški potresi, 22.3.2020 (določanje radija epicentra)

4.1.1 Vrsta zaznanih valov

Potresi se razlikujejo po magnitudah, globini nastanka in trajanju tresenja tal. Bližnje potrese zaznamo tudi, če so magnitude manjše, bolj oddaljene pa le, če so magnitude večje. Potrese na severozahodu Hrvaške (Zagreb, Petrinja) z našim merilnikom zaznamo, če je magnituda večja kot 3. Potrese v Posočju z magnitudo nad 1,5 – 2, lokalne potrese v radiju 10 km pa z magnitudo nad 0,5 – 1.

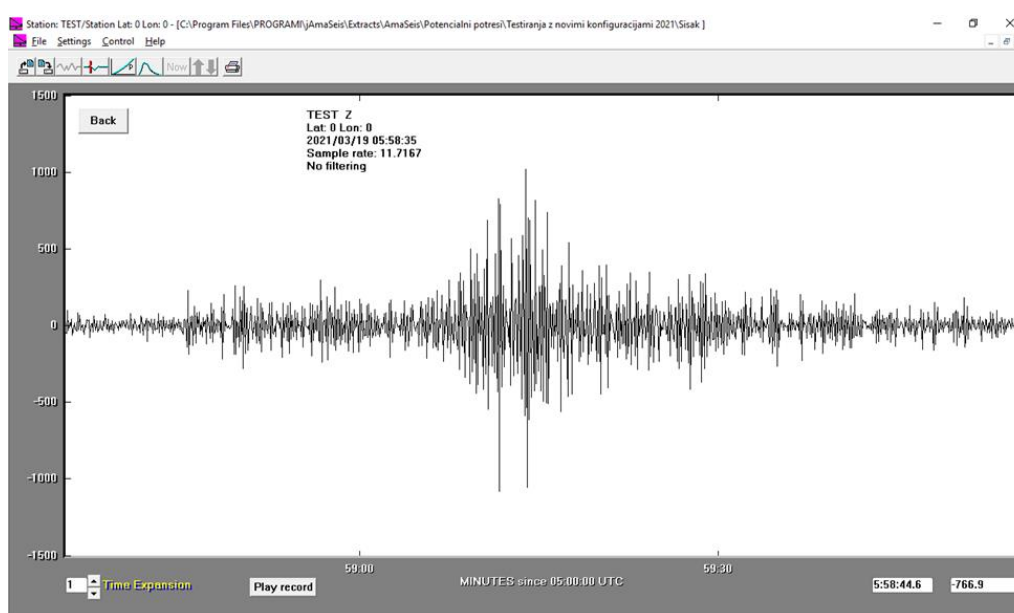
Prvi kriterij, ki ga mora izpolnjevati zabeležen signal potresa, je jasno vidna razlika med prihodom P in S valov (razen če je epicenter zelo blizu). Drugi kriterij: P valovi imajo praviloma manjšo amplitudo in bolj izrazit začetek nihanja, S valovi pa imajo večjo amplitudo in praviloma bolj razmazan začetek nihanja. Tretji kriterij: v frekvenčnem spektru potresa praviloma ni izrazitih frekvenc, ampak je frekvenčni spekter zvezen. Če merilnik zazna izrazite frekvence, je to lahko zaradi lastnega nihanja stavbe, v kateri je merilnik, ali pa to ni potres, temveč antropogeni signal (največkrat promet).

Na sliki 35 vidimo prikaz enournega zapisa 19.3.2021 med 6:00 in 7:00 zjutraj po lokalnem času. Na zapisu prevladujejo signali mimo vozečih avtomobilov. V skrajnem desnem kotu spodaj pa je viden signal, ki ima nekatere značilnosti potresa.



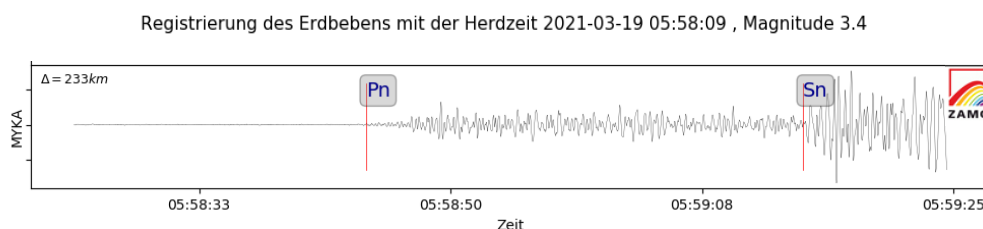
Slika 51: zapisi dogodkov na našem seizmografu, 19.3.2021, 0500-0600 UTC

Če zadnji signal povečamo, lahko jasno vidimo P in S valove. Prehod iz P v S valove je časovno razmazan in neznačilen.



Slika 52: potres v Petrinji, 19.3.2021, 0558 UTC, $M=3,4$; posnet z našim seizmografom

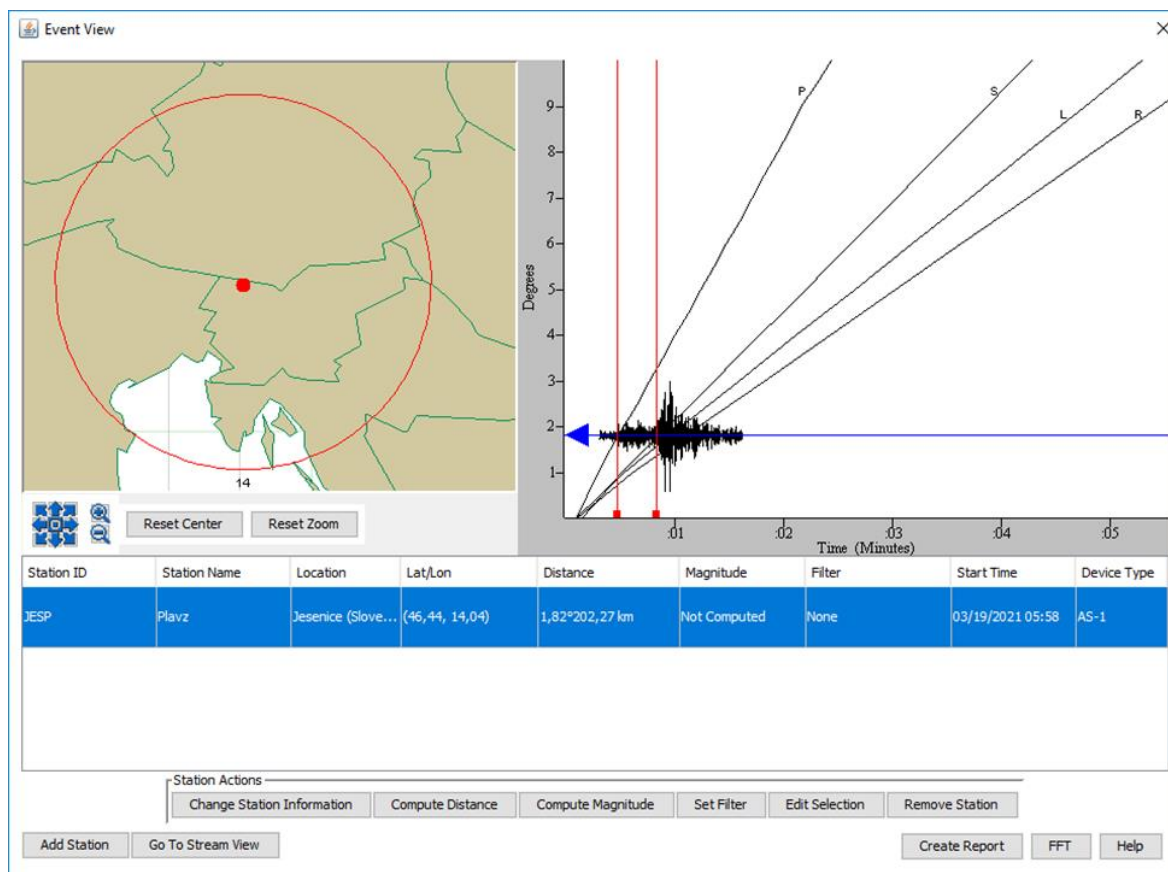
Zato smo opravili primerjavo s časom zabeleženega potresa na opazovalnici avstrijske seizmološke mreže (ZAMG) MYKA, ki je od Jesenic oddaljena le 20 km (slika 37). Časi prihodov P in S valov se med obema opazovalnicama razlikujejo le za nekaj sekund. Naša opazovalnica ga je zaznala prej kot avstrijska, kar pomeni da se je potres zgodil južno od nas. Vse to se sklada s predpostavko, da gre za isti seizmični dogodek.



Slika 53: potres v Petrinji, ki ga je zabeležila avstrijska opazovalnica MYKA, 19.3.2021

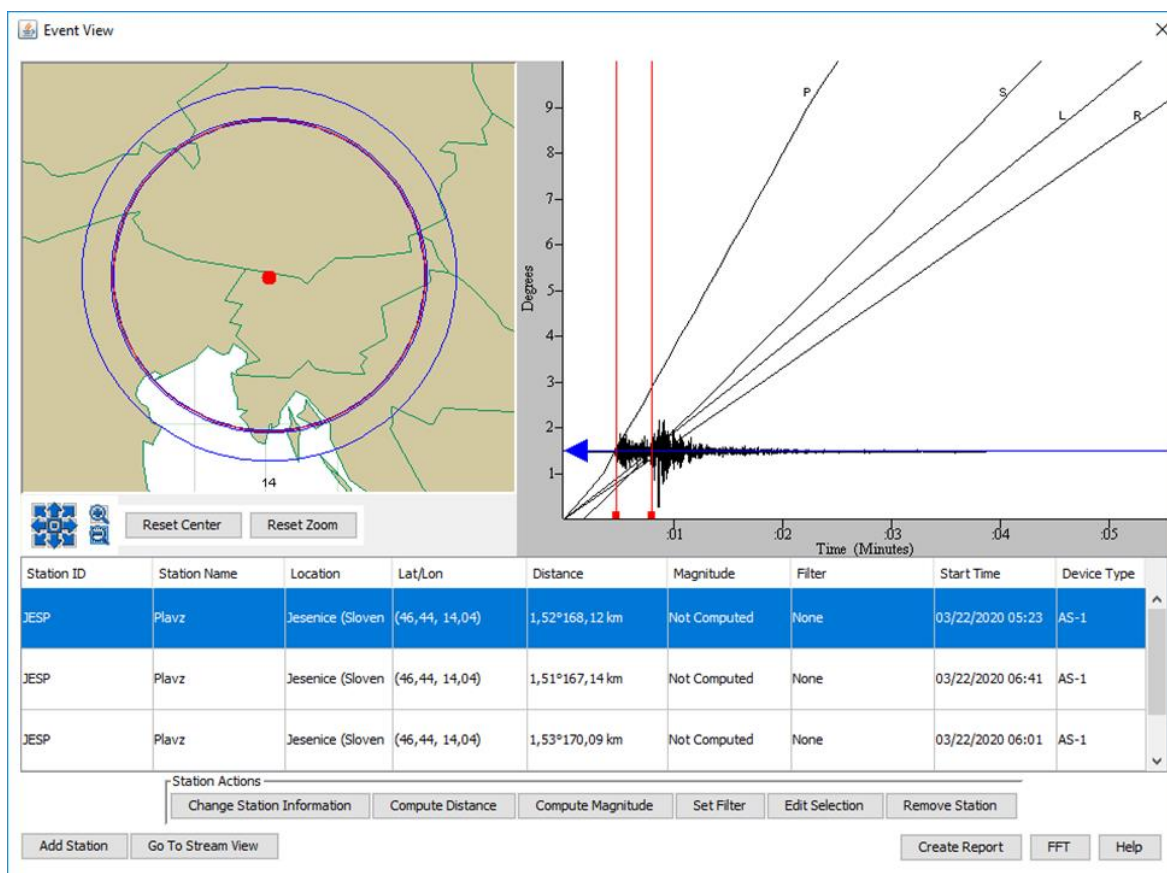
[Vir: (Erdbeben - Karten und Listen, brez datuma)]

Opravili smo še analizo oddaljenosti epicentra od naše opazovalnice. Analiza temelji na razliki časov prihodov P in S valov. To smo naredili s pomočjo programa JamaSeis.

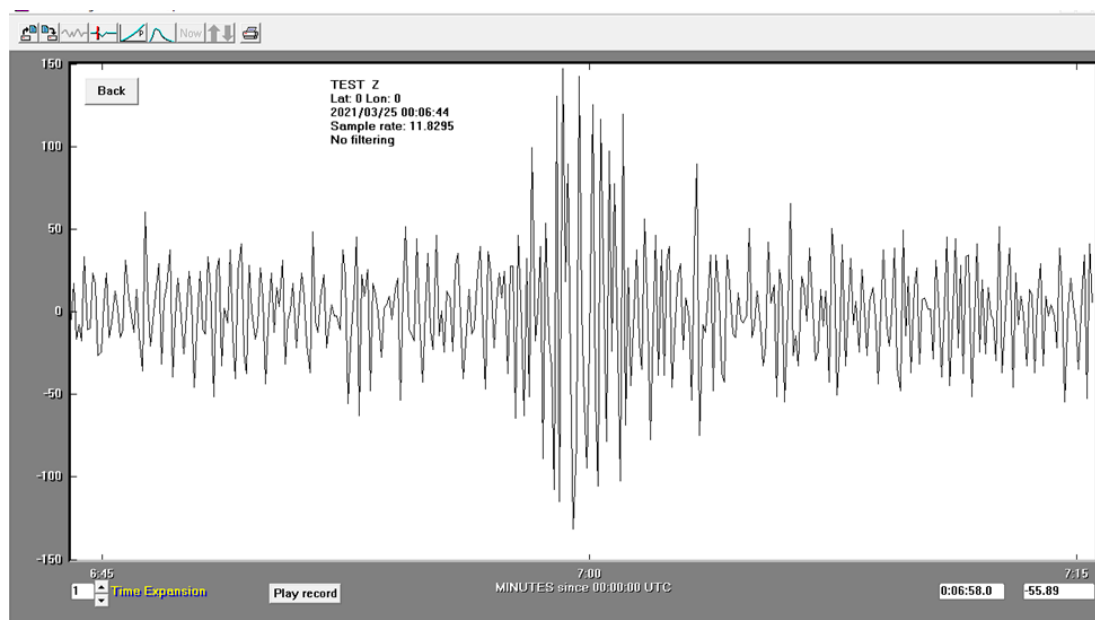


Slika 54: določitev razdalje epicentra potresa Petrinja, 19.3.2021, 0558 UTC, M=3,4

Analiza je pokazala, da se je potres zgodil v radiju 200 km, Petrinja je od naše opazovalnice oddaljena 203 km zračne črte. Pri zabeleženem dogodku je na strani ZAMG navedeno da je imel potres epicenter blizu Petrinje. Glede na to, da se naši podatki in podatki iz strani ZAMG ujemajo po času, razdalji in značilnosti seizmograma, lahko z gotovostjo trdimo, da smo zabeležili enega od popotresnih sunkov iz Petrinje.



Slika 55: primerjava oddaljenosti treh Zagrebških in enega Petrinjskega potresa

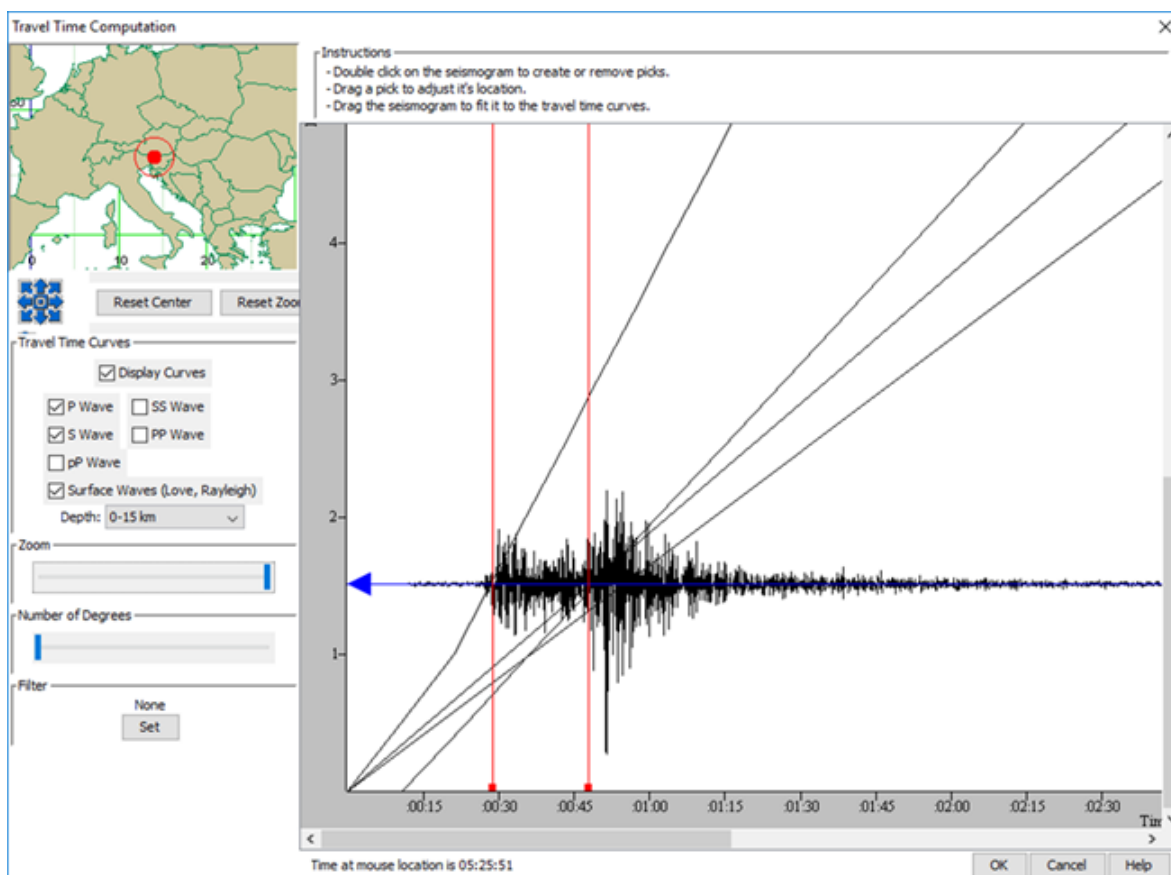


Slika 56: manjši lokalni potres, epicenter Bled, 25.03.2021, 0659 UTC, M=0,6

4.2 Vrednotenje napak

Glavni viri napak, ki se lahko pojavijo:

- Netočna ura v računalniku, ki jo uporablja tudi program Amaseis. To lahko preverimo na enem od časovnih strežnikov s podatki o natančnem času (Time.is, NIST, PTB, Windows...).
- Nenatančnost pri ročnem določanju časov prihodov P in S valov na seizmogramih. To zahteva veliko natančnost in izkušnje, kar je za laike velik izziv. Seizmologi imajo za to programe in izkušnje. Če meje med P in S valovi ne določimo natančno, pride do napak pri izračunu oddaljenosti od žarišča potresa.
- Nenatančnost pri ročnem določanju presečišč s hitrostnimi premicami P in S valov na diagramu za določanje razdalje epicentra.



Slika 57: pozicioniranje seizmograma na premici P in S valov za določanje oddaljenosti epicentra

- Občasno so možni tudi problemi s časovnimi oznakami Amaseis, vendar jih lahko hitro prepoznamo.
- Šibke potrese je zaradi drugih motenj težko izluščiti, vendar obstajajo programi, ki nam omogočajo razločiti med motnjami in potresom. Mi se pri tem zanašamo na izkušnje, kako izgledajo ne potresni dogodki.
- Problem je tudi pri analizi bolj oddaljenih potresov, ker ne vemo točne sestave tal, kar vpliva na hitrost P in S valov.

4.3 Izboljšave, možnosti za naprej

- **kvalitetna lokacija za meritve**
Poiskati bi bilo potrebno mirno lokacijo, na kateri bi bilo malo vpliva motenj iz okolja (brez antropogenih in drugih motenj). Izkaže se, da je tako lokacijo težko najti. Na lokaciji bi si želeli tudi povezavo do interneta in električni priključek. Kot vir napetosti bi lahko uporabili tudi solarno napajanje, vendar bi v takem primeru na dani lokaciji morale skozi vse leto sijati sonce.
- **geofon z nižjo mejno frekvenco ali drugačen tip seizmografa z daljšo periodo**
Poiskati bi morali tudi geofon z nižjo mejno frekvenco, vendar so taki geofoni za nas predragi. Za zaznavanje bolj oddaljenih potresov bi potrebovali drugačen seizmograf in sicer z daljšo periodo, ker geofoni tako nizkih frekvenc ne zaznavajo. Tak seizmograf je možno narediti tudi v lastni režiji in ga nameravamo izdelati tudi sami.
- **kalibracija/primerjava z umerjenim inštrumentom**
Za primerjavo bi morali imeti profesionalni seizmograf (npr. Vegik 01). Sprožili bi neko nihanje in na profesionalnem seizmografu bi točno videli, kakšna napetost ustreza amplitudi ali danemu pospešku tega nihanja, ki smo ga sprožili. Pri našem seizmografu bi to nihanje povzročilo drugačen napetostni odziv. Na podlagi primerjave bi dobili nek kalibracijski faktor.
- **konstanten izvor nihanja**
Če bi naš seizmograf še izboljševali oziroma spreminjali, bi nam bilo v veliko pomoč, če bi imeli nek konstanten izvor nihanja (konstantna frekvenca in amplituda). Na ta način bi meritve vedno lahko primerjali med seboj.
- **temperaturna stabilizacija vezja**
Dobro bi bilo, če bi seizmograf imeli v nekem toplotno izoliranem zaboju, kjer bi bila temperaturna nihanja čim manjša. Ta zaboj bi prav tako morali postaviti nekam, kjer bi bilo čim manj toplotnih nihanj. Najbolj primerno je v kleti, kjer je temperatura konstantna.
- **zajem z višjo frekvenco (Nyquistov kriterij)**
Frekvenca vhodnega signala je navzgor omejena na 5,5 Hz zaradi nastavitve v programski opremi, ki jih sami še ne moremo spremeniti. Zaradi tega ne moremo točno določiti frekvenc nekaterih dogodkov, kar pa je pomemben podatek pri analizi njihovega izvora (antropogeni ali geogeni - seizmični).
- **vklučitev v mednarodno mrežo amaterskih opazovalnic**
Razmišljamo o tem, da bi v prihodnosti naš seizmograf priključili v mrežo amaterskih seizmografov preko programa AmaSeis. Če bi nam to uspelo, bi bila to prva v sistem priključena amaterska opazovalnica v Sloveniji.
- **natančna samodejna sinhronizacija računalniškega časa**
Natančna določitev časa je ključnega pomena, saj le tako lahko izmerjene signale primerjamo z drugimi meritvami. Trenutno se ura v računalniku posodablja le enkrat dnevno, če je računalnik seveda priključen na internet. Za to obstaja rešitev v administratorskih nastavitvah v Windowsu, kot tudi namenski programi za pogostejšo sinhronizacijo.
- **postavitev merilnika v bližino Petrinje**
Tla v bližini Petrinje se še vedno praktično vsakodnevno tresejo. Za kalibracijo bi bilo smiselno postaviti naš merilnik bliže Petrinji (npr. v Novo mesto) in bi lahko vsakodnevno spremljali zabeležene signale ter jih primerjali z uradno izmerjenimi.

5 ZAKLJUČEK

Uspelo nama je doseči cilje, ki sva si jih zastavila:

1. S poceni in dostopnimi komponentami nama je uspelo izdelati občutljiv seizmometer (bolj občutljiv od človeka).
2. S seizmometrom sva uspela izmeriti potrese v bližnji okolici. Seizmometer je zaznal tudi druge geogene in antropogene motnje v bližini (promet, miniranje, zračna plovila, dnevni utrip urbane okolice, gradbena dela, grom).
3. Z izdelano napravo sva uspela določiti oddaljenost potresov, ki so se zgodili na večjih razdaljah (Hrvaška, Posočje). Zaznala sva potrese iz Zagreba in Petrinje ter določila tudi njihovo pravilno oddaljenost. Določevala in zaznavala pa sva tudi različne manjše potrese iz Posočja in Gorenjske.

Izdelan seizmometer bi lahko še nadgradili: povečanje občutljivosti in podaljšanje periode. Na ta način bi bilo možno zaznavati še bolj oddaljene potrese, ki imajo daljše periode in šibkejšo amplitudo na mestu opazovalnice.

Če bi imela več časa, bi bilo smiselno izdelati več enakih ali podobnih seizmometrov in z metodo triangulacije poskušati z njimi določiti epicenter. Poleg tega bi bilo smiselno seizmometer za dlje časa postaviti na mirno lokacijo in v daljšem časovnem obdobju spremljati, katere signale iz okolja je zaznal.

6 VIRI

- Alagić, M. R. (2019). *Seizmologija kot izbirna vsebina v osnovni šoli*. Pridobljeno iz http://pefprints.pef.uni-lj.si/6006/1/Radoncic_Alagic_mag.pdf
- Amplitude modulation*. (3. 11 2004). Pridobljeno iz https://en.wikipedia.org/wiki/Amplitude_modulation
- Carter, B. (12 2001). *Filter Design in Thirty Seconds*. Pridobljeno iz Texas Instruments: <https://www.changpuak.ch/electronics/downloads/FilterDesignIn30Seconds.pdf>
- Cebokli, M. (brez datuma). *CheapChop: measuring DC with a sound card*. Pridobljeno iz <http://lea.hamradio.si/~s57uuu/scdsp/CheapChop/cheapchop.htm>
- Cheap seismometer using sound card and Amaseis – now running under Windows*. (19. 4 2012). Pridobljeno iz Kids' Resource Center: <http://motivationtolearn.org/wordpress/?p=1100>
- Državna mreža potresnih opazovalnic*. (6. 3 2021). Pridobljeno iz <http://potresi.arso.gov.si/potresne-opazovalnice>
- Erdbeben - Karten und Listen*. (brez datuma). Pridobljeno iz ZAMG: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/erdbeben/aktuelle-erdbeben/karten-und-listen/bebendetails/europa/quakes/evid52991368>
- Geophones*. (2020). Pridobljeno iz Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY: <https://vibration.desy.de/equipment/geophones/>
- Goetsch, S. (8. 11 2013). *Seismic Waves*. Pridobljeno iz <https://www.youtube.com/watch?v=9fyvxl6HajE>
- Ground vibrations*. (brez datuma). Pridobljeno iz DESY Deutsches Elektronen-Synchrotron: <https://vibration.desy.de/equipment/geophones/>
- How does Earthquake occur with explanation*. (5. 9 2012). Pridobljeno iz <https://www.youtube.com/watch?v=T0AEtX-uPLA>
- INA163*. (11 2000). Pridobljeno iz BB - Burr-Brown Products from Texas Instruments: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina163.pdf?ts=1615454243219&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA163
- Kop, B. (28. 4 2015). *Kako nastane potres?* Pridobljeno iz <http://bostjankop.eu/kako-nastane-potres/>
- Marjana K. Serša, K. J. (24. 8 2016). *Geografija 1*. Pridobljeno iz <https://eucbeniki.sio.si/geo1/2490/index2.html>
- Markert, C. (9. 1 2013). *Earth's Interior - Seismic Evidence Explanation*. Pridobljeno iz <https://www.youtube.com/watch?v=aY6SG7GPAIo>
- Mosbrucker, M. (12 2014). *Potresi*. Pridobljeno iz http://www.facka.si/gradiva/geo/geomorfologija/endogene_sile/potresi.html
- National geographic. (2017). *Causes of Earthquakes*. Pridobljeno iz <https://courses.lumenlearning.com/geo/chapter/reading-causes-of-earthquakes/>

- O'Brien. (10. 5 2015). *Earthquake Shadow Zones*. Pridobljeno iz <https://www.youtube.com/watch?v=2K6k9I9LCrY>
- Određivanje epicentra – triangulacija*. (21. 9 2009). Pridobljeno iz Geo Class: <https://geoclass.wordpress.com/2009/09/21/odredivanje-epicentra-triangulacija/>
- Petelin, M. (20. 2 1999). *Merjenje potresov*. Pridobljeno iz <http://www.fizika.si/seminarji/potresi/potresi.html>
- Ponoči se je streslo: Kje so čutili potres?* (14. 4 2019). Pridobljeno iz <https://www.regionalgoriska.si/novica/ponoci-se-je-streslo-kje-so-cutili-potres->
- RC Low-pass Filter Design Tool*. (2004-2021). Pridobljeno iz OKAWA Electronic Design: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/CRLowkeisan.htm>
- Seizmografi*. (5. 2 2014). Pridobljeno iz http://www2.arnes.si/~oskrpre2s/FLL_2013_2014/seizmograf.html
- Stergar, I. (6 2014). *Seizmograf in njegova uporaba v osnovni šoli*. Pridobljeno iz http://pefprints.pef.uni-lj.si/2205/1/Diplomsko_delo_Ian_Stergar_Seizmograf_in_njegova_uporaba_v_O%C5%A0.pdf
- Šmigoc, K. (1975/76). Kaj je zanimivo vedeti o potresih. *Presek*, 34-39. Pridobljeno iz <http://www.presek.si/3/3-1-Smigoc.pdf>
- Tasič, I. (2003/2004). Kako merimo potrese. *Ujma*, 251-256. Pridobljeno iz <http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2004/meritve.pdf>
- Tektonske plošče*. (brez datuma). Pridobljeno iz http://178.172.26.133/egw/GOS_T09_P02b/index.html
- Vasović, S. (3. 9 2019). *Pot v središče Zemlje*. Pridobljeno iz <https://insajder.com/magazin/pot-v-sredisce-zemlje-zakaj-so-rusi-izvrtali-najglobljo-luknjo-na-svetu-vodnjak-do-pekla>
- ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*. (brez datuma). Pridobljeno iz https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/erdbeben/erdbebendienst/copy2_of_stationsnetz-erdbebendienst
- Zvočna kartica USB 2.0*. (brez datuma). Pridobljeno iz ceneje.si: <https://www.ceneje.si/lzdelek/7860528/racunalnistvo/komponente/zvocne-kartice/zvocna-kartica-usb-20>