



Stífni- og sveiflueiginleikar íslensks jarðvegs og jarðsniða

Characterization of the dynamic properties of Icelandic soil materials

Áfangaskýrsla 1 (vegna ársins 2023)

Verkefni styrkt af Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar

Verkefnisstjóri: Elín Ásta Ólafsdóttir, HÍ

Samstarfsaðilar: Bjarni Bessason, HÍ og Sigurður Erlingsson, HÍ

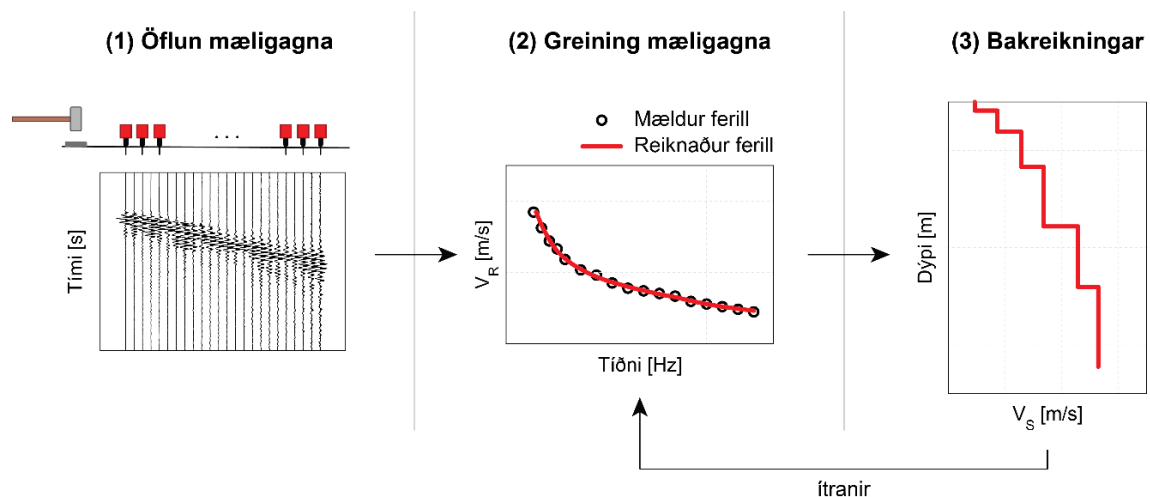
Dagsetning: 27. mars 2024

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

1. Inngangur

Jarðfræðilegar aðstæður á Íslandi eru að mörgu leyti sérstakar. Setlög hérlandis eru jarðfræðilega ung, að stórum hluta mynduð í hamfaraatburðum og oft lausþjöppuð [1]. Upplýsingar um aflfræðilega eiginleika þeirra verða því ekki eingöngu sóttar í erlendar rannsóknaniðurstöður heldur þarf að afla þeirra með staðbundnum hætti.

Yfirborðsbylgjumælingar (*surface wave methods*) eru skilvirk og hagkvæm leið til þess að ákvarða stífneiginleika (skúfbylgjuhraða og skúfstuðul) jarðvegs. Framkvæmd yfirborðsbylgjumælinga raskar ekki jarðveginum sem mældur er (*non-invasive testing*) og krefst einungis léttis mælibúnaðar. Rannsakendur við Umhverfis- og byggingarverkfræðideild HÍ hafa framkvæmt aktífar yfirborðsbylgjumælingar (*active-source surface wave analysis*) hérlandis frá árinu 1996, fyrst SASW mælingar (*Spectral Analysis of Surface Waves*) [2–3] en MASW mælingar (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) frá 2013 [4]. Framkvæmd MASW yfirborðsbylgjumælinga er lýst á mynd 1. Slíkar mælingar fara þannig fram að yfirborðsbylgjur eru framkallaðar með höggi á yfirborð jarðar og útbreiðsla þeirra skráð með röð hraðanema. MASW mælingar skila að jafnaði upplýsingum um stífneiginleika jarðvegs niður á 10–30 m dýpi. Passífar MAM yfirborðsbylgjumælingar (*Microtremour Array Measurements*) byggja á greiningu umhverfistitrings sem skráður er með neti hraðanema á yfirborði. Árið 2020 var slíkum mælingum beitt í fyrsta sinn hérlandis [5]. Í samanburði við aktífar yfirborðsbylgjumælingar skila passífar mælingar auknu könnunardýpi við mat á skúfbylgjuhraða en á kostnað nákvæmni næst yfirborði. Með samþættri greiningu á gögnum frá aktífum og passífum mælingum má nýta kosti beggja aðferðanna, þ.e. auka könnunardýpi mælingarinnar án þess að skerða nákvæmi hennar nálægt yfirborði.



Mynd 1: Framkvæmd aktífra yfirborðsbylgjumælinga. 1) Öflun mæligagna í feldi. 2) Greining mæligagna. Mat á tvístrunarferli prófunarstaðar sem lýsir útbreiðsluhraða Rayleigh bylgna sem fall af tíðni. 3) Bakreikningar til að ákvarða skúfbylgjuhraða sem fall af dýpi. Mynd: Elin Ásta Ólafsdóttir o.fl. [6].

Yfirborðsbylgjumælingar hafa gefið góða raun við íslenskar aðstæður, þar með talið til prófana í grófum eða samlímdum jarðvegi. Ólíkt borholumælingum og kónískum mælingum (CPT, *Cone Penetration Tests*) skila yfirborðsbylgjumælingar meðaltalsstífnieiginleikum þess svæðis þar sem mælinemum er komið fyrir. Úrvinnsla og greining mæligagna byggir á lagskiptu líkani með láréttum jarðlögum. Aðferðin hentar því síður á stöðum þar sem breytileiki innan jarðlagastaflans er mikill og víkur verulega frá lárétttri lagskiptingu. Þá er þekkt að aktífar yfirborðsbylgjuaðferðir henta illa við aðstæður þar sem stíf jarðlög liggja ofan á lausum jarðlögum (með mun lægri skúfbylgjuhraða). Við slíkar aðstæður er nær ómögulegt að örva þau jarðlög sem liggja undir stífa laginu með höggálagi á yfirborði.

Meginmarkmið verkefnisins *Stífni- og sveiflueiginleikar íslensks jarðvegs og jarðsniða* eru:

- 1) Að byggja upp reynslu og þekkingu á samþættri notkun aktífra og passífra yfirborðsbylgjumælinga við íslenskar aðstæður. Áhersla er lögð á þróun aðferða sem henta til ákvörðunar á skúfbylgjuhraða og lagskiptingum á svæðum þar sem setlög eru þykk (meira en 15–30 m).
- 2) Að kortleggja náttúrulega tíðni mælistaða og þykkt setlaga með samþættri notkun HVSR-tækni og yfirborðsbylgjumælinga. Niðurstöður nýtast til að aðlagja reynslulíkingar, sem tengja saman náttúrulega tíðni setlagastafla og dýpi á fast, að eiginleikum íslenskra jarðefna.
- 3) Að meta styrk-, stífni- og dempunareiginleika íslenskra jarðefna með tilraunastofuprófunum.
- 4) Að greina staðbundna sveiflumögnun (*seismic site amplification*) valinna jarðsniða með tölulegum aðferðum.
- 5) Að byggja upp og viðhalda opnum gagnagrunni sem gerir hönnuðum, rannsakendum og öðrum mögulegt að nálgast og bera saman niðurstöður mælinga frá mismunandi stöðum.

2. Helstu niðurstöður

Framvinda verkefnisins á árinu 2023 hefur verið í samræmi við upphaflega tíma- og verkáætlun. Unnið hefur verið að eftirfarandi verkþáttum:

- Yfirborðsbylgjumælingar og þróun greiningaraðferða.
- Mat á stífni, styrk og dempunareiginleikum íslensks jarðvegs með statískum og dýnamískum prófunum.
- Uppbygging gagnagrunns með mæliniðurstöðum.
- Hugbúnaður í opnu aðgengi.

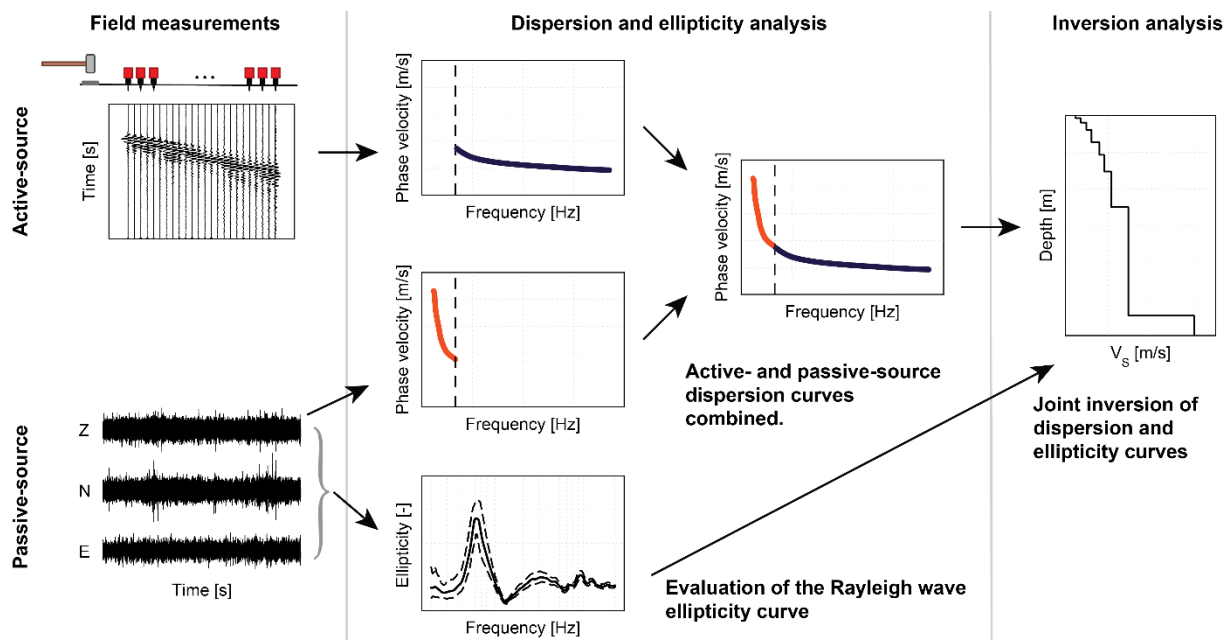
Hér er stuttlega greint frá framvindu hvers verkþáttar og afrakstri verkefnisins á árinu 2023.

2.1. Yfirborðsbylgjumælingar og þróun greiningaraðferða

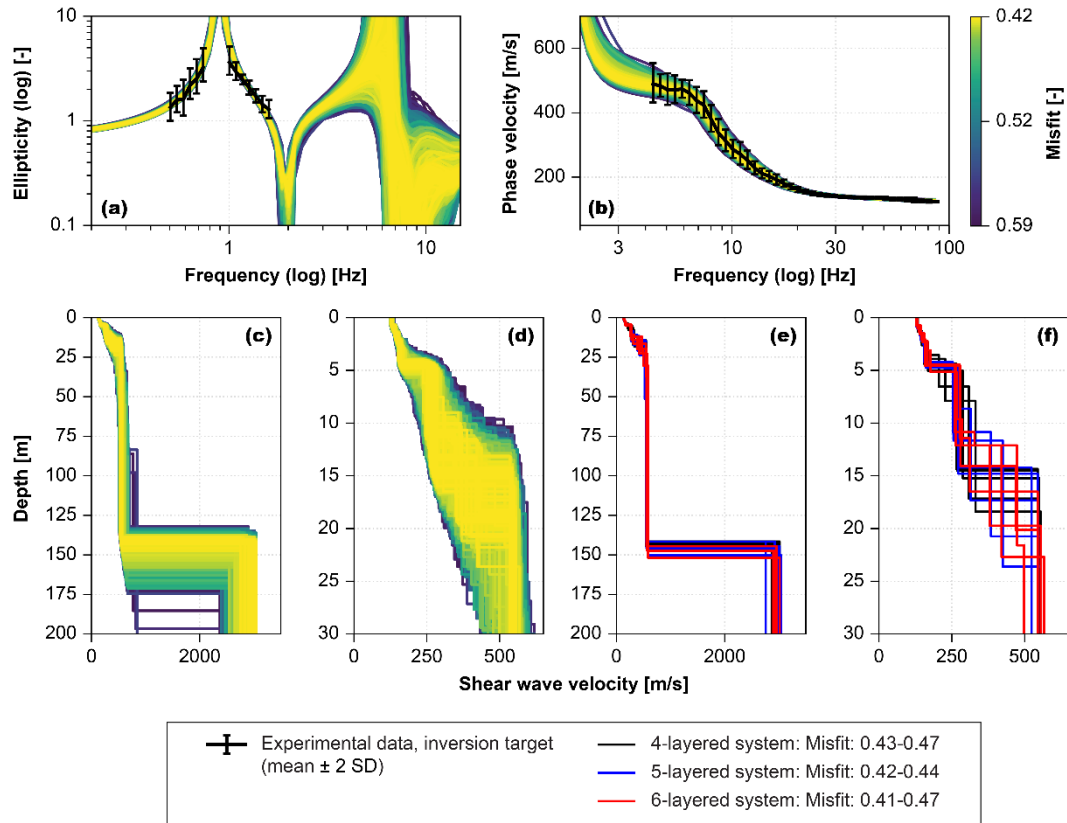
Þróun verklags við feltmælingar og greiningartækni til að ákvarða stífni jarðlaga á svæðum þar sem setlög eru þykk (dýpi á fast > 30 m) stendur yfir. Fyrsta hluta þeirrar vinnu er lýst í

tímaritsgrein sem birtist í *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* [7]. Aðferðin byggir á samþætti greiningu gagna sem aflað er með MASW og MAM yfirborðsbylgjumælingum, auk mælinga á umhverfisóróa með frístandandi jarðskjálftamæli (eða þríása hröðunarnema). Þessu er lýst á mynd 2. MASW og MAM mælingar skila upplýsingum um tvístrunarferli prófunarstaðar (*dispersion curve*) á mismunandi tíðnibilum. Þá gefa þríása mælingar á umhverfisóróa mat á ellipsuferli (*Rayleigh wave ellipticity curve*) prófunarstaðarins [8] en lögun hans stjórnast af skúfbylgjuhraða og heildarþykkt setlaga. Í framhaldi er bakreikningum (*joint inversion of dispersion and ellipticity curves*) beitt til þess að meta skúfbylgjuhraða frá yfirborði og niður á klöpp. Þessi greiningaraðferð hefur gefið góða raun þar sem setlög eru þykk og gert kleift að ákvarða skúfbylgjuhraða niður á allt að 200 m dýpi. Mynd 3 sýnir dæmi um niðurstöður mælingar sem framkvæmd var í námunda við Markarfljótsbrú. Niðurstöður gefa til kynna þykk setlög (heildarþykkt 140–155 m) þar sem mældur skúfbylgjuhraði eykst með dýpi frá 130–160 m/s nálægt yfirborði upp í um 600 m/s.

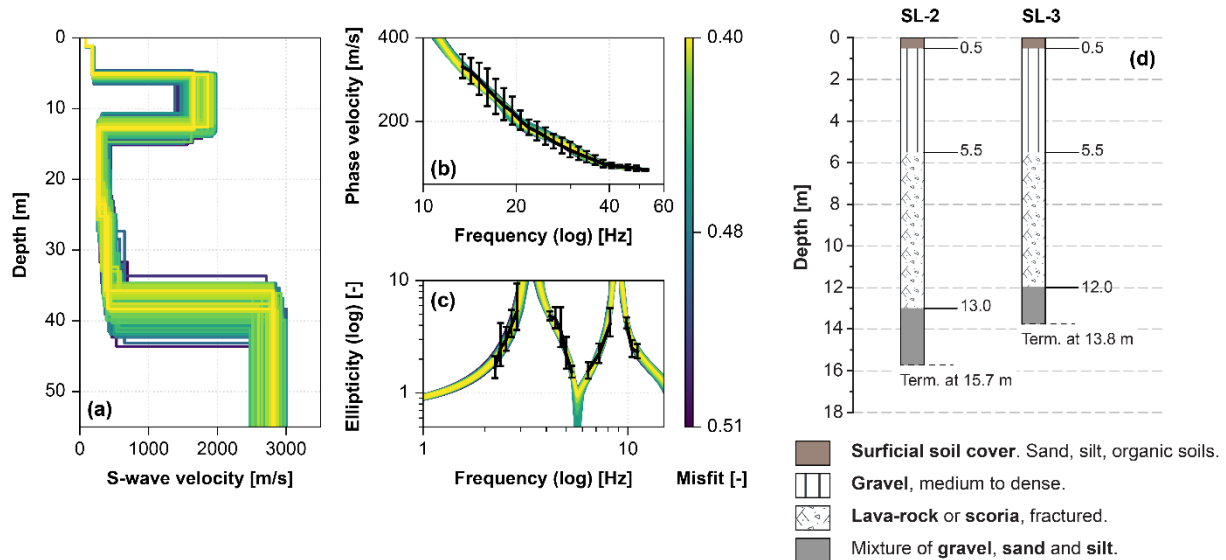
Enn fremur hefur slík samþætt greining aktífra og passífra yfirborðsbylgna gert það mögulegt að meta skúfbylgjuhraða og mörk jarðlaga á stöðum þar sem stíft lag (t.d. hraunlag eða kargalag) er klemmt á milli mýkri setlaga (mynd 4). Eykur það notkunarmöguleika yfirborðsbylgjuaðferða til muna. Mynd 4 sýnir niðurstöður mælinga sem framkvæmdar voru við norðausturenda brúarinnar yfir Stóru-Laxá. Boranir (mynd 4d) sýna stíft lag við dýpi á milli um 5,5 m og 12–13 m. Ber því vel saman við mælda skúfbylgjuhraðaferla sem sýna mikla aukningu á skúfbylgjuhraða á því dýptarbili.



Mynd 2: Samþætt greining aktífra og passífra yfirborðsbylgna við mat á skúfbylgjuhraða þykkra setlaga. 1) Öflun mæligagna í folti (field measurements). 2) Greining mæligagna (dispersion and ellipticity analysis). Mat á tvístrunarferli prófunarstaðar með aktífum MASW og passífum MAM mælingum. Mat á ellipsuferli prófunarstaðar með þríása mælingum á umhverfisóróa. 3) Bakreikningar til að ákvarða skúfbylgjuhraða sem fall af dýpi (inversion analysis).



Mynd 3: Dæmi um samþætta greiningu aktífra og passífra yfirborðsbylgna. Niðurstöður mælinga á skúfbylgjuhraða og dýpi á fast sem framkvæmdar voru í nánunda við Markarfljótsbrú.



Mynd 4: (a-c) Niðurstöður mælinga á skúfbylgjuhraða og mörkum jarðlaga við norðausturenda brúarinnar yfir Stóru-Laxá. (d) Borholusnið fyrir mælistaðinn. Mynd: Elín Ásta Ólafsdóttir o.fl. [9].

Greining á staðbundnum jarðvegsaðstæðum (*seismic site characterization*) var gerð á svæði meðfram Markarfljóti, frá Markarfljótsbrú að Landeyjahöfn, en þar er að finna þykk setlög. Samþætt greining aktífra og passífra yfirborðsbylgna var notuð til að ákvarða skúfbylgjuhraða og heildarþykkt setlaga. Þá var náttúruleg tíðni jarðlagastafla metin með HVSR mælingum (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*) [10]. Þessar mælingar voru jafnframt liður í því að safna gögnum til að unnt sé að aðlaga líkingar, sem tengja saman náttúrulega tíðni setlagastafla (f_0) og dýpi á fast (H), að eiginleikum íslenskra jarðefna. Markmið þeirrar vinnu er að nýta megi HVSR mælingar á f_0 til að fá gróft mat á dýpi á fast berg. Fyrstu niðurstöður benda til þess að jafna 1 geti hentað til að lýsa aðstæðum á því svæði í Landeyjum nú þegar hefur verið tekið til skoðunar.

$$H = \frac{\bar{V}_s}{4f_0} \quad (1)$$

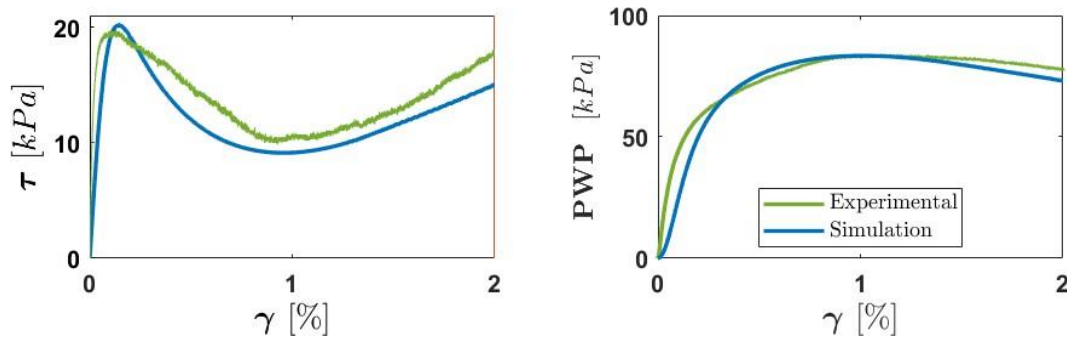
þar sem $\bar{V}_s$ (meðaltals skúfbylgjuhraði setlaga) er skilgreindur bilinu 300–500 m/s.

Greint er frá fyrirbyggjandi niðurstöðum í grein sem samþykkt hefur verið til birtingar á ráðstefnu evrópskra jarðtæknifélagsins ECSMGE 2024. Áframhaldandi mælingar- og greiningarvinna er fyrirhuguð sumarið 2024.

2.2. Mat á stífni, styrk og dempunareiginleikum íslensks jarðvegs með statískum og dýnamískum prófunum

Jarðvegssýnum var safnað við Arnarbæli við bakka Ölfusár og statísk og dýnamísk DSS skúfboxpróf (*static and cyclic direct simple shear tests*) framkvæmd á þeim á jarðtæknitilraunastofu Deltares í Delft í Hollandi. Gagnasettið inniheldur sex statískar mælingar og 32 dýnamískar mælingar fyrir mismunandi álagstílfelli og mismunandi þjöppun jarðvegssýna. Í tengslum við þennan verkþátt voru feltmælingar, þ.e. CPT mælingar og passífar yfirborðsbylgjumælingar, einnig framkvæmdar í Arnarbæli. Meginmarkmið skúfbox-prófananna var að meta ysjunareiginleika efnisins með *stress-based* og *energy-based* greiningaraðferðum. Einnig var mótstaða efnisins gegn ysjun (þ.e. dýnamískt mótstöðuhlutfall, CRR) metið með aðferðum sem grundvallast á CPT mælingum og mældum skúfbylgjuhraðaferlum. Greint verður frá niðurstöðum í tímaritsgrein sem verður send til ritrýningar á fyrri hluta árs 2024.

Samhliða því hófst vinna við að kvarða töluleg líkön sem lýsa spennu-streitu sambandi jarðvegs (*element scale constitutive soil material models*) og aðlaga þau að eiginleikum íslenskra jarðefna. Byggir fyrsti fasi þeirrar vinnu á fyrrnefndum DSS skúfboxprófunum. Dæmi um niðurstöður er sýnt á mynd 5. Þar eru bornar saman mæliniðurstöður úr statísku DSS prófi (hlutfallslegur þéttleiki sýnis $D_r = 60\%$ og lóðrétt upphafsspenna $\sigma'_{v,o} = 100$ kPa) og reiknaðir ferlar sem fengnir eru með kvarðaðri útgáfu UBC3D-PLM jarðvegslíkansins [12].



Mynd 5: Samanburður á mæliniðurstöðum úr statisku DSS skúfboxprófi (constant volume conditions) og niðurstöðum tölulegs líkans sem byggir á kvaðaðri útgáfu UBC3D-PLM líkansins. Mynd: Seyed Javad Fattahi o.fl. [11].

Haustið 2023 var nýr búnaður Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar til statískra og dýnamískra DSS skúfboxprófana og Bender Element mælinga tekinn í notkun. Stefnt er að því að sá búnaður verði nýttur til skúfboxprófana á jarðvegssýnum frá fleiri stöðum á Suðurlandi á síðari stigum verkefnisins.

2.3. Uppbygging gagnagrunns með mæliniðurstöðum

Gagnagrunnur með niðurstöðum MASW yfirborðsbylgjumælinga var gerður aðgengilegur á slóðinni <https://serice.hi.is/#/velocity-profiles>. Alls inniheldur hann nú niðurstöður mælinga frá nítján stöðum, samtals 30 skúfbylgjuhraðasniða. Notendaviðmót gagnagrunnsins byggist á kortagrunni sem sýndur er á myndum 6 og 7.

Í gagnagrunninum eru niðurstöður frá hverjum stað settar fram á formi mældra tvístrunarferla og skúfbylgjuhraðasniða (*median shear wave velocity*). Enn fremur eru niðurstöður sýndar á formi meðalskúfbylgjuhraða ($V_{S,z}$, *time-averaged shear wave velocity*) í samræmi við hagnýtingu mælinga á skúfbylgjuhraða í núgildandi útgáfu Evrópustaðals (Eurocode 8). Gagnagrunninum er lýst í grein sem birt var í *Verktækni – Tímariti verkfræðingafélags Íslands* [6]. Einnig er greint frá honum í ráðstefnugrein sem samþykkt hefur verið til birtingar á ráðstefnu evrópskra jarðtæknifélagsins ECSMGE 2024.



Click on a marker on the map to view the measurements!

Mynd 6: Kortagrunnur með niðurstöðum MASW mælinga. Rauð merki sýna þau svæði þar sem mælingar hafa verið framkvæmdar. Mynd: Elin Ásta Ólafsdóttir o.fl. [6].



Mynd 7: Kortagrunnur með niðurstöðum MASW mælinga. Dæmi um framsetningu mæliniðurstaðna. Mynd: Elin Ásta Ólafsdóttir o.fl. [6].

2.4. Hugbúnaður í opnu aðgengi

MASWavesPy, hugbúnaður til greiningar á MASW mæligögnum og mati á skúfbylgjuhraða með bakreikningum, sem skrifaður er í Python, var gerður aðgengilegur á pakkavefnum PyPI (<https://pypi.org/project/maswavespy/>) ásamt notendaleiðbeiningum. Mynd 8 sýnir flæðirit

með helstu hlutum MASWavesPy pakkans og virkni þeirra. Uppbyggingu hugbúnaðarins er nánar lýst í grein sem samþykkt hefur verið til birtingar í *Geotechnical Testing Journal* [13].



Mynd 8: Yfirlit yfir helstu hluta MASWavesPy hugbúnaðarins. Mynd: Elin Ásta Ólafsdóttir o.fl. [13].

3. Birtingar

Birtar tímaritsgreinar og ráðstefnugreinar

Elin Ásta Ólafsdóttir, Bjarni Bessason og Sigurður Erlingsson. (2023). Gagnagrunnur fyrir skúfbylgjuhraða í jarðsniðum byggður á yfirborðsbylgjumælingum. *Icelandic Journal of Engineering // Verktækni*, 29(1). doi:10.33112/ije.29.3

Elin Ásta Ólafsdóttir, Sigurður Erlingsson og Bjarni Bessason. (2023). Hybrid non-invasive characterization of soil strata at sites with and without embedded lava rock layers in the South Iceland Seismic Zone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(4), 146. doi:10.1007/s10064-023-03136-0

Sayed Javad Fattahi, Yaser Jafarian, Maria Konstadinou, Elin Ásta Ólafsdóttir, Sigurður Erlingsson, Bjarni Bessason og Rajesh Rupakhety. (2023). Model calibration and nonlinear site response analysis for medium compacted saturated volcanic sand. *Proceedings of the 9th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2023)*, bls. 4189–4196.

Tímaritsgreinar og ráðstefnugreinar samþykktar til birtingar

Elín Ásta Ólafsdóttir, Bjarni Bessason, Sigurður Erlingsson og Amir M. Kaynia. (2024). A Tool for Processing and Inversion of MASW Data and a Study of Inter-Session Variability of MASW. Samþykkt til birtingar í *Geotechnical Testing Journal*.

Elín Ásta Ólafsdóttir, Sigurður Erlingsson og Bjarni Bessason. (2024). Database of measured shear wave velocity profiles for Icelandic soil sites. Samþykkt til birtingar í *Proceedings of the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.

Elín Ásta Ólafsdóttir, Sigurður Erlingsson og Bjarni Bessason. (2024). Geotechnical seismic site characterization of deep alluvial sand sites in the South Iceland Lowland. Samþykkt til birtingar í *Proceedings of the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.

Elín Ásta Ólafsdóttir, Bjarni Bessason og Sigurður Erlingsson. (2024) Non-invasive seismic site characterization of sandwiched lava-rock/sedimentary sites in Iceland. Samþykkt til birtingar í *Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering*.

4. Lokaorð

Rannsóknir undanfarinna ára á þessu fagsviði hafa skilað greiningartækni og hugbúnaði til að ákvarða skúfbylgjuhraða setlaga sem fall af dýpi. Slíkar mælingar gagnast meðal annars við hönnun á undirstöðum mannvirkja, við ákvörðun á jarðskjálftaálagi og við mat á staðbundnum jarðskjálftaáhrifum. Frekari þróun greiningartækninnar hefur gert það mögulegt að greina mýkri setlög sem eru klemmd á milli stífari laga (t.d. hraun- eða kargalaga) ofarlega í jarðsniði, sem og gert kleift að áætla þykkt setlaga og þar með dýpi niður á fast berg eða jafngildi þess (*engineering bedrock*). Greiningartæknin byggir á yfirborðsmælingum með léttum mælíbúnaði og notar ekki bortæki eða annan þungan vélbúnað sem skilur eftir sig umhverfisspor.

Vinnu við að safna niðurstöðum mælinga á skúfbylgjuhraða saman í gagnagrunn í opnum aðgangi miðar vel, en tilgangur þess er að hönnuðir, rannsakendur og aðrir geti nálgast mæliniðurstöður og borið saman ólíka mælistaði með einföldum hætti. Enn fremur er vinna hafin við að ákvarða sveiflufræðilega eiginleika íslenskra jarðefna með sértækum prófunum á tilraunastofu.

5. Heimildir

- [1] Sigurður Erlingsson. (2019). Geotechnical challenges in Iceland. *Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE-2019*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-1109>
- [2] Bjarni Bessason. (1998). Yfirborðsbylgjumælingar við ákvörðun á skúfbylgjuhraða í jarðvegi. *Árbók VFÍ/TFÍ 1997/98*, 10, 293–303.
- [3] Bjarni Bessason og Sigurður Erlingsson. (2011). Shear wave velocity in surface sediments. *Jökull*, 61, 51–64.
- [4] Elín Ásta Ólafsdóttir. (2019). *Multichannel analysis of surface waves for soil site characterization* [Doktorsritgerð]. Háskóli Íslands.
- [5] Elín Ásta Ólafsdóttir, Bjarni Bessason og Sigurður Erlingsson. (2022). Non-invasive active- and passive-source stiffness characterization at a loose sand site. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 501–506.
- [6] Elín Ásta Ólafsdóttir, Bjarni Bessason og Sigurður Erlingsson. (2023). Gagnagrunnur fyrir skúfbylgjuhraða í jarðsniðum byggður á yfirborðsbylgjumælingum. *Icelandic Journal of Engineering // Verktækni*, 29(1). <https://doi.org/10.33112/ije.29.3>.
- [7] Elín Ásta Ólafsdóttir, Sigurður Erlingsson og Bjarni Bessason. (2023). Hybrid non-invasive characterization of soil strata at sites with and without embedded lava rock layers in the South Iceland Seismic Zone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(4), 146. doi:10.1007/s10064-023-03136-0
- [8] Hobiger, M., Bard, P. Y., Cornou, C. og Le Bihan N. (2009). Single station determination of Rayleigh wave ellipticity by using the random decrement technique (RayDec). *Geophysical Research Letters*, 36: L14303. <https://doi.org/10.1029/2009GL038863>
- [9] Elín Ásta Ólafsdóttir, Bjarni Bessason og Sigurður Erlingsson. Non-invasive seismic site characterization of sandwiched lava-rock/sedimentary sites in Iceland. Samþykkt til birtingar í *Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024)*.
- [10] SESAME. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing, and interpretations*. SESAME European research project (WP12 – Deliverable D23.12).
- [11] Sayed Javad Fattahi, Yaser Jafarian, Maria Konstadinou, Elín Ásta Ólafsdóttir, Sigurður Erlingsson, Bjarni Bessason og Rajesh Rupakhety. (2023). Model calibration and nonlinear site response analysis for medium compacted saturated volcanic sand. *Proceedings of the 9th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2023)*, bls. 4189–4196.
- [12] Petalas, A. og Galavi, V. (2013). *Plaxis liquefaction model UBC3D-PLM*. Plaxis report.
- [13] Elín Ásta Ólafsdóttir, Bjarni Bessason, Sigurður Erlingsson og Amir M. Kaynia. (2024). A Tool for Processing and Inversion of MASW Data and a Study of Inter-Session Variability of MASW. Samþykkt til birtingar í *Geotechnical Testing Journal*.