

<https://doi.org/10.33112/ije.29.3>

Gagnagrunnur fyrir skúfbylgjuhraða í jarðsniðum byggður á yfirborðsbylgjumælingum

Elín Ásta Ólafsdóttir^a, Bjarni Bessason^a, Sigurður Erlingsson^a

^a Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands. Hjarðarhaga 2-6, 107 Reykjavík.

Fyrirspurnir/Correspondence:

Elín Ásta Ólafsdóttir
elinasta@hi.is

Greinin barst 15. september 2022.
Samþykkt til birtingar 30. desember 2023.
Birt á vef 30. desember 2023.

Ágrip

Yfirborðsbylgjumælingar eru skilvirk leið til að ákvarða stífnieiginleika jarðvegs. MASW er aktív yfirborðsbylgjuaðferð sem byggir á tvístrunareiginleikum Rayleigh bylgna og tengslum milli útbreiðsluhraða þeirra og fjaðureiginleika jarðvegs. Með slíkum mælingum er skúfbylgjuhraði ákvarðaður sem fall af dýpi og hann síðan notaður til að reikna skúfstuðul jarðlaga. MASW mælingar hafa gefið góða raun við íslenskar aðstæður til að meta stífnieiginleika jarðlaga niður á 10–30 m dýpi, þar með talið í grófum eða samlímdu jarðvegi. Þá hafa yfirborðsbylgjumælingar þann kost að vera ódýrar í framkvæmd og valda ekki raski á yfirborði jarðar.

Á árunum 2013 til 2021 framkvæmdu höfundar MASW mælingar á nítján rannsóknarstöðum héraendis, aðallega á sunnanverðu landinu en einnig á nokkrum stöðum í Eyjafirði og við Skjálfandafliót. Þeim skúfbylgjuhraðaferlum sem fengust með þessum mælingum hefur nú verið safnað saman í gagnagrunn í opnum aðgangi, sem finna má á slóðinni <http://serice.hi.is/#/velocity-profiles>. Auk mældra skúfbylgjuhraðaferla eru niðurstöður mælinga settar fram á formi meðalskúfbylgjuhraða ($V_{s,z}$) sem fall af dýpi (z) í samræmi við notkun þeirra í Evrópustaðli, Eurocode 8. Í gagnagrunninum gefst tæknifólki og rannsakendum ekki aðeins kostur á því að nálgast fyrrgreindar mæliniðurstöður, heldur einnig að bera saman niðurstöður mælinga frá mismunandi svæðum með einföldum hætti.

Mælistöðunum er skipt í fjóra flokka eftir jarðvegsgerð, þ.e. (I) mýrlendi og mýrarkenndur jarðvegur, (II) laus sand- og/eða malarkennd setlög, (III) manngerðar fyllingar og jarðstíflur og (IV) samlímdu jarðvegur og móhella. Í greininni eru settar fram einfaldar reynslulíkingar fyrir skúfstuðul sem byggðar eru á mældum skúfbylgjuhraðaferlum fyrir hvern ofangreindra flokka. Slíkar líkingar nýtast til að meta skúfstuðul eða skúfbylgjuhraða á stöðum þar sem mælingar hafa ekki verið framkvæmdar en upplýsingar um jarðvegsgerð liggja fyrir. Þær má einnig nota til að

framreikna mæliniðurstöður í tilfellum þar sem könnunardýpi mældra skúfbylgjuhraðaferla er ekki nægjanlegt.

Lykilorð: Jarðtækni, jarðskjálftaverkfræði, skúfbylgjuhraði, skúfstuðull, yfirborðsbylgjumælingar, MASW, gagnagrunnur.

Abstract

Surface wave analysis is a non-invasive, fast, and cost-efficient approach for in-situ evaluation of soil stiffness. MASW is an active-source technique that utilizes the dispersive properties of Rayleigh waves and provides information on shear wave velocity (small-strain shear modulus) down to 10–30 m depth. MASW measurements have been found well-suited for profiling of Icelandic soil sites. These include gravelly sites and sites characterized by partly cemented materials or mixed soils containing cobbles and/or boulders.

The authors have conducted MASW measurements at 19 sites in Iceland between 2013 and 2021. Most of the surveyed sites are in South Iceland, although a few sites are located on the northern coast. Between one and seven shear wave velocity profiles have been measured at each site, with an inter-profile distance below 1.1 km in all cases. This paper introduces a database where the measurement results can be accessed. The database is available as an Open Access Webpage (<http://serice.hi.is/#/velocity-profiles>) and provides the user with an interface which allows results from different sites to be viewed simultaneously and compared. The retrieved shear wave velocity profiles are further presented as time-averaged shear wave velocity ($V_{s,z}$) as a function of depth (z) in line with the site categorization in Eurocode 8.

The sites included in the database are divided into four classes based on the encountered soil types: (I) peat and peaty soils (natural deposits), (II) sandy and gravelly soils (natural deposits), (III) engineered fills and earth dams and (IV) cemented materials (natural deposits). Simple empirical correlations, describing the relationship between the effective confining pressure and small-strain shear modulus, are presented for each class. In absence of site-specific measurements, such correlations can be of value to evaluate stiffness parameters for the specific soil types. They can further be used to extrapolate measured profiles down to a greater depth.

Keywords: Geotechnical engineering, earthquake engineering, shear wave velocity, small-strain shear modulus, surface wave analysis, MASW, database.

1. Inngangur og markmið

Jarðfræðilegar aðstæður á Íslandi eru að mörgu leyti sérstakar. Setlög héraendis eru jarðfræðilega ung og víða laus í sér og lítið samlímd (Bessason og Erlingsson, 2011; Erlingsson, 2019). Annað sérkenni er að víða liggja eitt eða fleiri stíf jarðlög, t.d. hraunlög eða kargalög, ofan á mýkri setlögum eða inni á milli þeirra (Einarsson, 1991; Bessason og Kaynia, 2002; Rahpeyma o.fl., 2016). Því er ljóst að ekki er einungis hægt að horfa til niðurstaðna erlendra rannsókna við mat á jarðtæknilegum stikum íslenskra jarðefna, heldur verður einnig að afla upplýsinga með staðbundnum mælingum og rannsóknum.

Jarðskjálftavá á Íslandi er sú mesta í Norður-Evrópu og sambærileg þeirri sem finna má í Suður-Evrópu (EFEHR, 2023). Í jarðskjálftum er sveiflumögnun á yfirborði jarðar (*site response*) mjög staðbundin. Því er þekking á staðbundnum eiginleikum jarðefna nauðsynleg við hönnun og mat á áhrifum jarðskjálfta á mannvirki. Á flatlendi, þar sem ekki gætir áhrifa frá óreglulegu landslagi (*topographic and basin effects*), orsakast mögnunaráhrif einkum af skúfbylgjuhreyfingu sem

berst frá föstum berglögum í gegnum laus jarðlög í átt að yfirborði. Upplýsingar um stífnieiginleika jarðvegs, þ.e. skúfbylgjuhraða (V_s) eða hágildi skúfstuðuls (G_{max}), lagskiptingar og dýpi niður á föst jarðlög, eru því grunnforsenda mats á staðbundinni sveiflumögnun. Slíkar upplýsingar eru enn fremur mikilvægar við greiningu á sveifluvíxlverkun milli jarðvegs og mannvirkja og sem inntaksstærðir fyrir sveiflufræðilega greiningu á manngerðum fyllingum. Einnig eru upplýsingar um skúfbylgjuhraða nauðsynlegar við flokkun jarðsniða og ákvörðun á jarðskjálftaálagi samkvæmt Evrópustaðli (Eurocode 8, EC8) (CEN, 2004). Núgildandi staðall byggir aðallega á mati á meðalskúfbylgjuhraða niður á 30 m dýpi ($V_{s,30}$). Endurskoðun staðalsins stendur yfir og mun ný útgáfa hans leggja aukna áherslu á staðbundin mögnunaráhrif. Þá er í drögum að nýrri útgáfu hans lagt til að fleiri stikar en þeir sem nú er stuðst við verði notaðir til að flokka byggingarstaði í jarðvegsflokka og skilgreina staðbundið jarðskjálftaálag. Nánar tiltekið er lagt til að dýpi niður á stíf jarðlög (*seismic bedrock*, H_{800} , það dýpi þar sem $V_s > 800$ m/s) og meðalskúfbylgjuhraði ($V_{s,z}$) ráði flokkun í jarðvegsflokka. Í tilfellum þar sem upplýsingar um H_{800} liggja ekki fyrir er lagt til að flokkunin verði byggð á $V_{s,z}$ og náttúrulegri grunntíðni jarðlagastafla (f_0) á byggingarstað (CEN/TC 250/SC 8, 2021; Paolucci o.fl., 2021).

Yfirborðsbylgjumælingar (*active-source surface wave analysis*) eru skilvirk og hagkvæm leið til þess að ákvarða stífnieiginleika jarðvegs. Skúfbylgjuhraði er mældur sem fall af dýpi og hann síðan notaður, ásamt rúmpýngd jarðvegsins, til að ákvarða skúfstuðul jarðlaga.

Yfirborðsbylgjumælingar hafa verið framkvæmdar af rannsakendum við Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands frá árinu 1996. Fyrstu árin var hin svokallaða SASW aðferð (*Spectral Analysis of Surface Waves*) notuð (t.d. Bessason, 1998; Bessason o.fl., 1998; Bessason og Erlingsson, 2011) en frá árinu 2013 hefur verið notast við MASW mælingar (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), sem er betrumbætt útgáfa fyrri aðferðar (Ólafsdóttir, 2019; Ólafsdóttir o.fl., 2019a, 2019b). MASW mælingar hafa gefið góða raun við íslenskar aðstæður, þar með talið í grófum eða samlímdum jarðvegi þar sem framkvæmd annars konar feltmælinga, s.s. kónískra prófana (t.d. *Cone Penetration Test*, CPT), hefur reynst erfið. Yfirborðsbylgjumælingar hafa einnig þann kost að við framkvæmd þeirra er ekki notast við þungar vinnuvélar eða annan búnað sem veldur raski (*non-invasive testing*). Því eru umhverfisáhrif af völdum slíkra mælinga óveruleg ef nokkur. Ólíkt borholumælingum og kónískum mælingum eru yfirborðsbylgjumælingar ekki punktmælingar, heldur gefa þær mat á meðaltalsstífnieiginleikum þess svæðis þar sem mælingarnar eru framkvæmdar. 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 láréttri lagskiptingu. Þá krefst framkvæmd mælinga þess að hægt sé að koma um 15–50 m langri röð hraðanema fyrir á yfirborði prófunarstaðarins. Framkvæmd mælinga á þröngum stöðum og í halla er því erfið.

Höfundar hafa sannreynt aðferðina sem hér er lýst með prófunum á sérstökum jarðtækniþrófunarstöðum (*benchmark sites*) í Noregi. Niðurstöðurnar sem þar fengust eru í góðu samræmi við niðurstöður annarra rannsóknahópa sem framkvæmt hafa mælingar á sömu þrófunarstöðum með borholumælingum, annars konar yfirborðsbylgjumælingum og tilraunastofuprófunum (Ólafsdóttir o.fl., 2019c). Takmörkuð samanburðargögn eru til fyrir þrófunarstaði hérlendis. Á þeim stöðum þar sem bæði MASW og SASW mælingar hafa verið framkvæmdar ber niðurstöðum þeirra vel saman (Ólafsdóttir o.fl., 2022). Einnig hefur aðferðin verið metin með endurteknum mælingum við Arnarbæli við bakka Ölfusár yfir sjö ára tímabil (Ólafsdóttir, 2019). Niðurstöður voru mjög sambærilegar á milli ára sem rennir enn frekari stöðum undir stöðugleika og áreiðanleika mælitækninnar (*reproducibility*).

Á árunum 2013 til 2021 framkvæmdu höfundar MASW mælingar á níttján rannsóknarstöðum hér á landi, aðallega á Suður- og Suðvesturlandi en einnig á nokkrum stöðum í Eyjafirði og við Skjálfandafliót. Mikilvægum gögnum var safnað sem talin eru gagnleg fyrir tæknifolk og

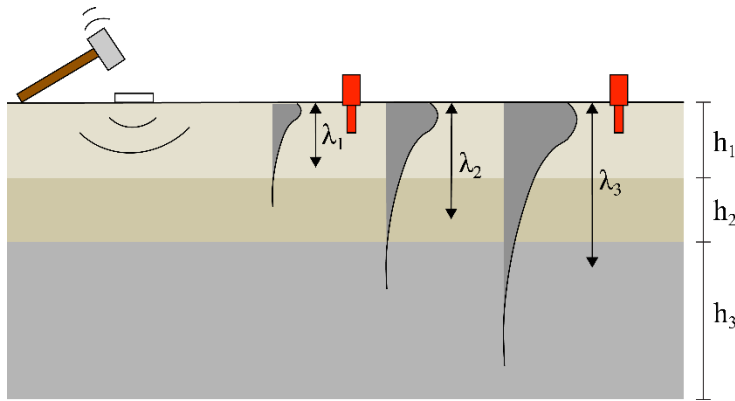
rannsakendur á sviði jarðtækni og jarðskjálftaverkfræði. Því hafa höfundar útbúið gagnagrunn í opnum aðgangi þar sem má nálgast niðurstöður MASW mælinganna. Gagnagrunnurinn inniheldur nú 30 mælda skúfbylgjuhraðaferla, því innan hvers svæðis voru einn til sjö skúfbylgjuhraðaferlar mældir. Var innbyrðis fjarlægð á milli mæliferla, þar sem við á, minni en 1100 metrar. Gagnagrunnurinn má nálgast á slóðinni <https://serice.hi.is/#/velocity-profiles>. Lagt var upp með að auðvelt væri að framkvæma samanburð milli mismunandi mælistaða. Auk mældra skúfbylgjuhraðaferla eru niðurstöður mælinga settar fram á formi meðalskúfbylgjuhraðaferla ($V_{s,z}$ ferla) í samræmi við notkun þeirra í EC8.

Með þessari grein er ætlunin að kynna gagnagrunnurinn og það hvernig MASW aðferðinni hefur verið beitt við íslenskar aðstæður. Einnig eru í greininni settar fram einfaldar reynslulíkingar fyrir skúfstuðul helstu flokka íslenskra jarðefna sem byggðar eru á mældum skúfbylgjuhraðaferlum. Slíkar líkingar nýtast við að áætla skúfstuðul eða skúfbylgjuhraða á stöðum þar sem mælingar hafa ekki verið framkvæmdar en upplýsingar um jarðvegsgerð liggja fyrir. Þær má einnig nota til að framreikna mæliniðurstöður í tilfellum þar sem mældir skúfbylgjuhraðaferlar eru til staðar en könnunardýpi þeirra er ekki nægjanlegt.

2. Skúfstuðull jarðvegs og yfirborðsbylgjumælingar

Yfirborðsbylgjumælingar byggja á því að nýta tvístrunareiginleika yfirborðsbylgna í jarðvegi til að ákvarða stífnieiginleika hans. Þegar yfirborðsbylgjur með mismunandi bylgjulengd (og tíðni) ferðast í gegnum jarðveg skiljast þær að vegna þess að útbreiðsluhraði þeirra er mismikill. Sambandi bylgjulengdar λ (eða tíðni f) og útbreiðsluhraða fyrir tiltekinn jarðlagastafla er lýst með tvístrunarferli (*dispersion curve*) staflans. Algengast er að yfirborðsbylgjumælingar séu framkvæmdar með greiningu á Rayleigh bylgjum, þó einnig sé hægt að framkvæma þær með Love eða Scholte yfirborðsbylgjum. Þær mælingar sem hér er lýst byggja á greiningu Rayleigh bylgna.

Rayleigh bylgjur einkennast af því að hreyfing bylgjunnar er mest næst yfirborði en með auknu dýpi dregur tiltölulega hratt úr styrk hennar. Rayleigh bylgja með stutta bylgjulengd (háa tíðni) berst fyrst og fremst um efstu jarðvegslögin en bylgja með lengri bylgjulengd (lægri tíðni) ristir dýpra. Í lagskiptum jarðvegi ræðst útbreiðsluhraði einstakra þátta Rayleigh bylgjunnar (V_R) af fjaðureiginleikum og rúmpýngd laganna sem hún berst um niður á um einnar bylgjulengdar dýpi. Þessu er lýst á mynd 1. MASW yfirborðsbylgjumælingar skila yfirleitt upplýsingum um stífnieiginleika jarðvegs niður á um 10–30 m dýpi (Foti o.fl., 2018; Ólafsdóttir, 2019). Könnunardýpið (z_{max}) takmarkast af bylgjulengd þeirra bylgna sem unnt er að framkalla og nema á rannsóknarstað og er það einkum háð staðbundnum aðstæðum, þ.e. jarðvegsgerð á prófunarstað, en einnig eiginleikum bylgjugjafa og eigintíðni, næmni og uppstillingu þeirra nema sem notaðir eru við gagnaöflunina.



Mynd 1: Tvístrunareiginleikar Rayleigh bylgna í lagskiptum jarðvegi. Útbreiðsluhraði bylgjunnar stjórnast af stífni og rúmþyngd laganna sem hún berst um. Útbreiðsluhraði bylgju með bylgjulengd $\lambda_1 < h_1$ ræðst af eiginleikum efsta jarðvegslagsins. Sé bylgjulengdin meiri en nemur þykkt yfirborðslagsins (λ_2 og λ_3) ræðst útbreiðsluhraðinn af veginni meðalstífni laganna sem bylgjan berst um niður á um einnar bylgjulengdar dýpi.

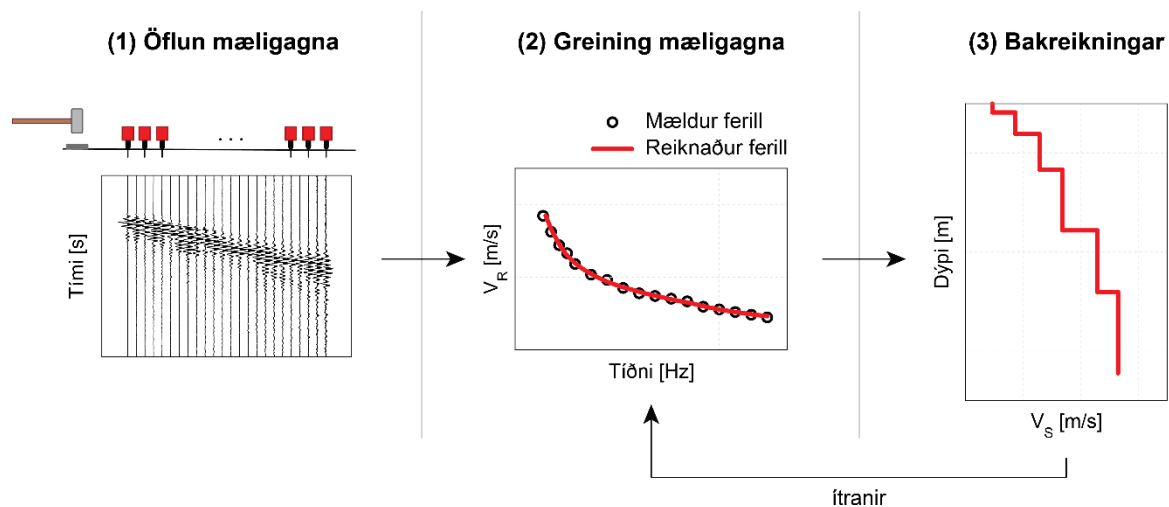
Stífni jarðvegs er gjarnan lýst með skúfstuðli (G). Stífnieiginleikar jarðvegs eru háðir streitu. Við mjög litlar formbreytingar er hegðun jarðefna nær fjaðrandi og skúfstuðull efnisins álitinn fasti (G_{max}) en við hærri streitu minnkar stífni og er þá gjarnan lýst með hlutfallinu (G/G_{max}), sem fylgir ólínulegum ferli sem er mismunandi eftir jarðefnum og þarf að ákvarða með prófunum á rannsóknastofu (Kramer, 2014). Þær bylgjur sem nýttar eru við framkvæmd yfirborðsbylgjumælinga valda mjög lítilli streitu í jarðvegi. Mæld skúfbylgjuhraðasnið gefa því hágildi skúfstuðuls sem fall af dýpi

$$G_{max} = \rho \cdot (V_s)^2 \quad (1)$$

þar sem V_s er skúfbylgjuhraði (í m/s) og ρ eðlismassi jarðvegs (í kg/m³).

3. Mælingar á skúfbylgjuhraða með MASW aðferðinni

MASW yfirborðsbylgjumælingum má í meginatriðum skipta í þrjú skref sem sýnd eru á mynd 2.



Mynd 2: Þrjú skref MASW yfirborðsbylgjumælinga. (1) Öflun mæligagna í felti. (2) Greining mæligagna. (3) Bakreikningar.

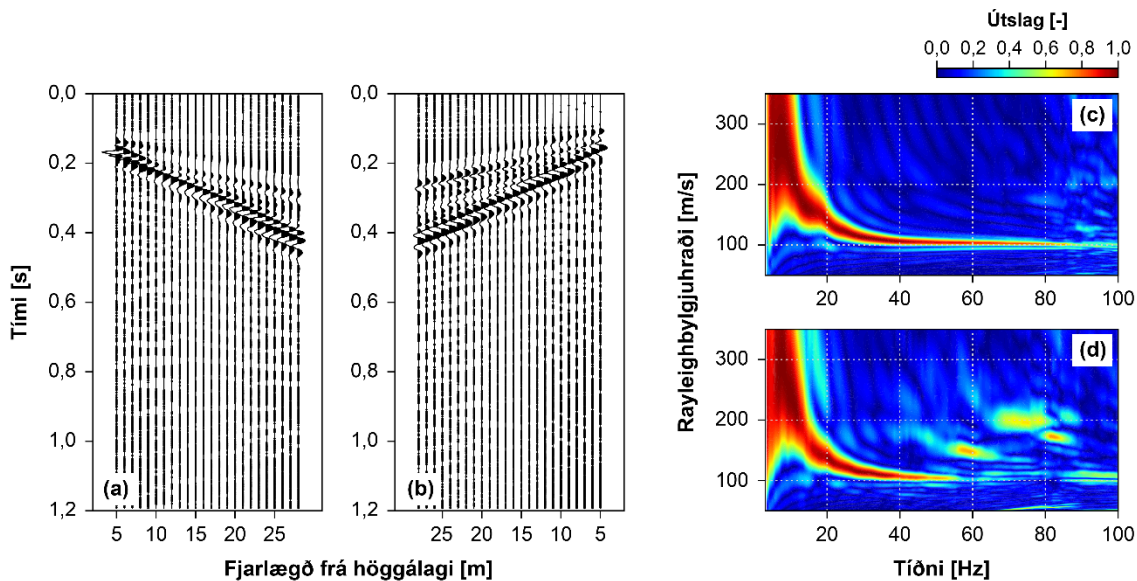
Fyrsta skrefið felst í gagnaöflun á rannsóknarstað. Hraðanemum er komið fyrir í beinni línu á yfirborði svæðisins sem kanna á. Við framkvæmd MASW mælinga hérlandis hefur mæligagna verið aflað með röð 12–24 hraðanema, af gerðinni GS-11D frá Geospace Technologies (eigintíðni 4,5 Hz), sem nema lóðréttu bylgjuhreyfingu. Nemarnir eru tengdir með sérútbúnum mælikapli við gagnaskráningarbúnað sem samanstendur af tveimur samtengdum NI USB-6218 mælikortum frá National Instruments og fartölvu sem keyrir nauðsynlegan gagnasöfnunarhugbúnað. Mælikapallinn er þannig gerður að bil á milli einstakra hraðanema getur verið allt að 2 m. Dæmigerð uppstilling mælibúnaðar er sýnd á mynd 3.



Mynd 3: Dæmi um uppstillingu mælikapals og 24 hraðanema við framkvæmd MASW mælinga. Höggálag er framkallað með því að slá með sleggju á yfirborð jarðar við enda nemaraðarinnar.

Uppstilling hraðanemanna, þ.e. bil á milli einstakra nema og þar af leiðandi lengd nemaraðarinnar í heild, ræðst einkum af því hvers konar jarðlög verið er að kanna og hve þykk þau eru. Hérlandis hafa mælingar verið framkvæmdar með 0,5 m, 1 m eða 2 m bili milli nema. Almennt gildir að því lengri sem nemaröðin er, þeim mun lengri er mesta bylgjulengd þeirra Rayleigh bylgna sem mælingarnar geta numið. Leiðir það til aukins könnunardýpis. Þá auðveldar löng nemaröð að skilja á milli grunntóns tvístrunarferilsins og yfirtóna hans. Stutt nemaröð auðveldar aftur á móti greiningu bylgna með stutta bylgjulengd (háa tíðni). Slíkar bylgjur kunna að veikjast svo mjög þegar þær ferðast um jarðveg að ekki sé hægt að greina þær við enda langrar nemaraðar. Við gagnaöflun á rannsóknarstað er því jafnan stillt upp fleiri en einni nemaröð af mismunandi lengd, með það að markmiði að skrá Rayleigh bylgjur á sem víðustu tíðnibili.

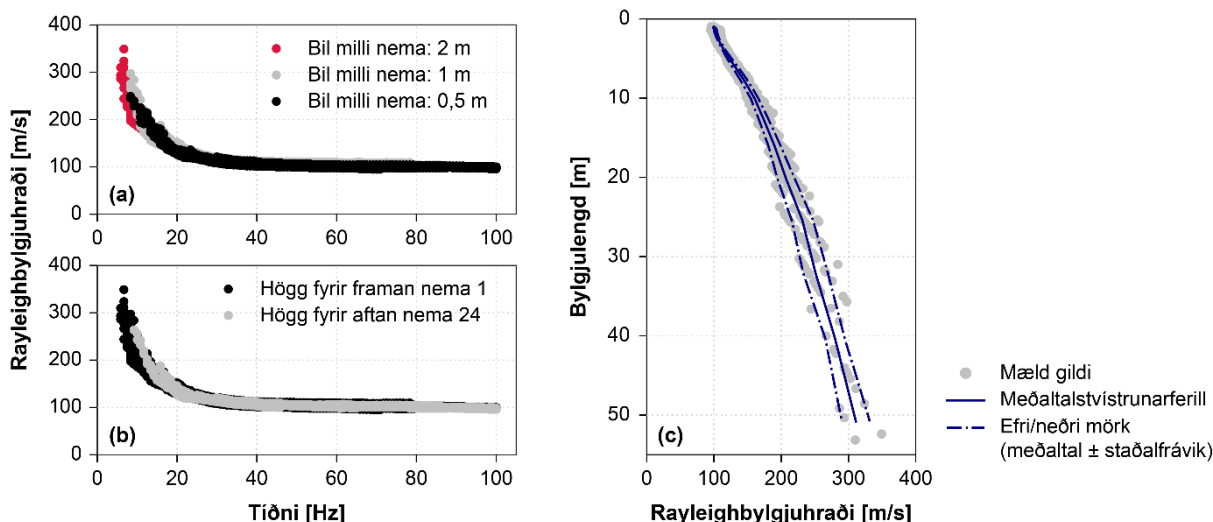
Þegar mælibúnaði hefur verið komið fyrir er bylgjuhreyfing framkölluð með höggálagi við enda nemaraðarinnar. Höfundar hafa að jafnaði framkallað höggálagið með því að slá yfirborð jarðar með um 6 kg þungri sleggju. Mælingar eru endurteknar nokkrum sinnum við báða enda hvernar nemaraðar með mismunandi fjarlægð höggálagsins frá hvorum enda. Samanburður mæligagna þar sem höggálagið er framkallað sitt hvoru megin við nemaröðina nýtist til að meta hvort breytileiki innan setlagastaflans, í þá stefnu sem er samsíða nemaröðinni, sé mikill og hvort þurfi að taka tillit til hans við gagnaúrvinnslu. Á myndum 4a og 4b má sjá dæmi um mælingar með 24 hraðanemum sem framkvæmdar voru við bakka Markarfljóts. Niðurstöður MASW mælingar sem framkvæmd var á þeim stað eru notaðar sem dæmi í þessum kafla.



Mynd 4: MASW mæling við bakka Markarfljóts. **(a,b)** Dæmi um skráðar tímaraðir. Yfirborðsbylgjur voru framkallaðar með höggi 5 m frá fyrsta nema 23 m langrar nemaraðar (mynd (a)) og 5 m fyrir aftan síðasta nema raðarinnar (mynd (b)). **(c,d)** Tvístrunarmyndir sem eru reiknaðar út frá mældum tímaröðum.

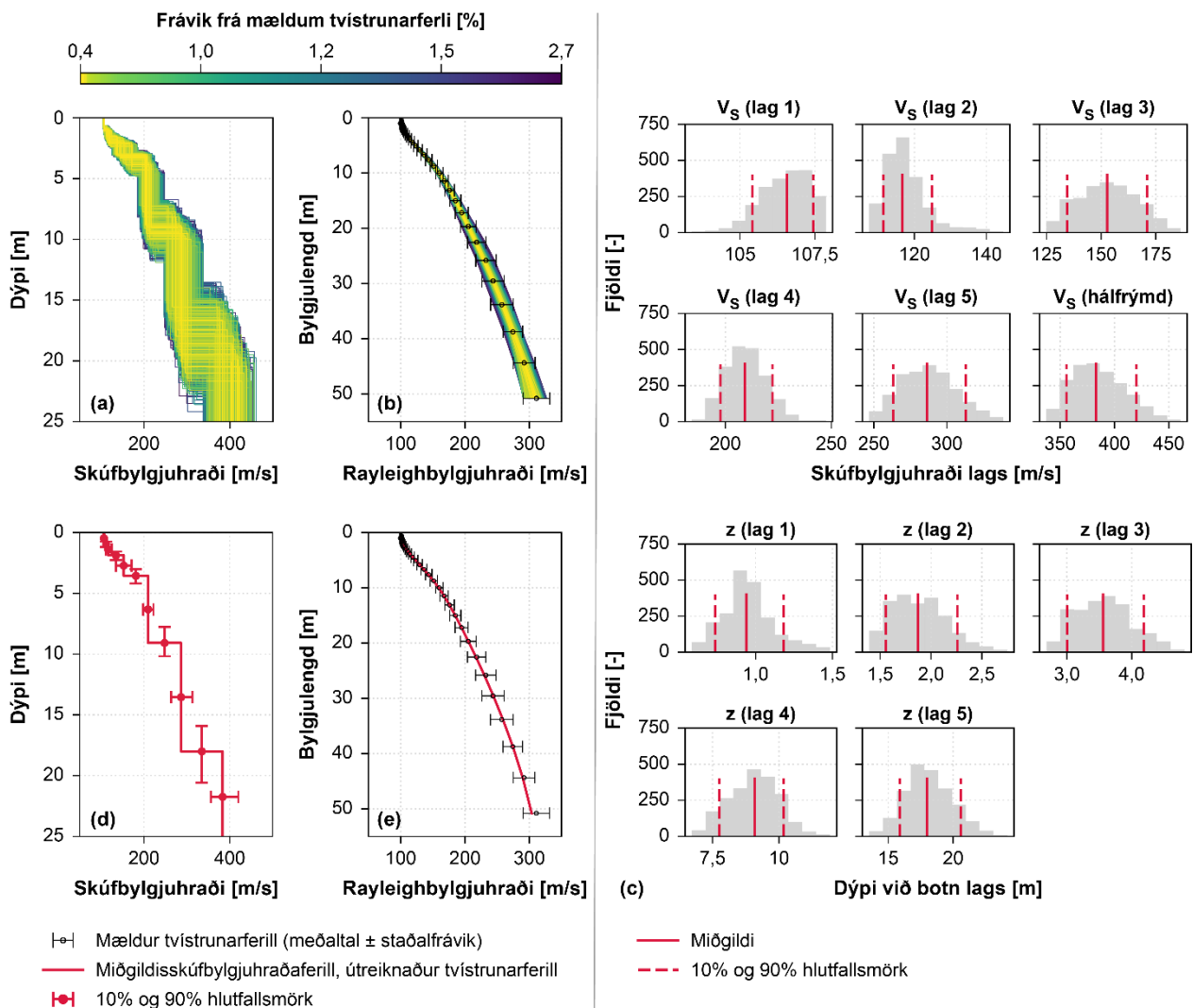
Annað skref MASW aðferðarinnar felst í greiningu mæligagnanna með það að markmiði að ákvarða tvístrunarferil mælistaðarins. Mældar tímaraðir eru fyrst tíðnigreindar með Fouriergreiningu og tvívítt róf (tvístrunarmynd, *dispersion image*) útbúið (Park o.fl., 1998; Ólafsdóttir o.fl., 2018b). Þessa framsetningu má sjá á myndum 4c og 4d. Hágildi tvístrunarmyndarinnar (dökkrauð á myndum 4c og 4d) sýna útbreiðsluhraða mældra bylgna við hverja tíðni f og gefa tvístrunarferil mælistaðarins. Í tilfellum þar sem tvö eða fleiri hágildi koma fram við tiltekna tíðni svarar það gildi sem hefur lægsta Rayleighbylgjuhraðann til grunntóns tvístrunarferilsins. Á þeim stöðum þar sem MASW mælingar hafa verið framkvæmdar hérlandis er fyrsta sveifluform (grunntónn) jafnan ráðandi, enda jarðvegsaðstæður í flestum tilfellum þannig að stífni vex með auknu dýpi. Sé gerð jarðlagastaflans óreglulegri geta yfirtónar tvístrunarferilsins einnig örvast nægjanlega mikið svo hægt sé að greina þá yfir vítt tíðnibil.

Mynd 5 sýnir safn tvístrunarferla sem fengust með úrvinnslu gagna úr endurteknum mælingum á mælistaðnum við bakka Markarfljóts. Á mynd 5a eru tvístrunarferlarnir flokkaðir eftir lengd þeirrar nemaraðar sem notuð var við gagnaöflunina. Á mynd 5b eru ferlarnir aðgreindir eftir því við hvorn enda nemaraðarinnar höggálagið var framkallað. Það að munurinn á þeim tvístrunarferlum sem fengust með höggum sitt hvoru megin við nemaröðina sé ekki mikill bendir til þess að breytileiki innan setlagastaflans (í stefnu nemaraðarinnar) sé lítil og að réttlætanagerð sé að lýsa aðstæðum með einvíðu lagskiptu líkani. Með úrvinnslu endurtekinnna mælinga fæst meðaltal og staðalfrávik tvístrunarferilsins (Ólafsdóttir o.fl., 2018a) sem lagt er til grundvallar í þriðja skrefi greiningarinnar. Mynd 5c sýnir dæmi um slíkan meðaltalsferil.



Mynd 5: MASW mæling við bakka Markarfljóts. Tvístrunarferlar sem fengnir eru með endurteknum mælingum eru flokkaðir eftir **(a)** lengd nemaraðar og **(b)** hvort höggálagið hafi verið fyrir framan fyrsta nema eða fyrir aftan síðasta nema raðarinnar. **(c)** Meðaltalstvístrunarferill sem er ákvarðaður út frá fyrirliggjandi mæligögnum. Efri og neðri mörk meðaltalsferilsins svara hér til eins staðalfráviks frá meðaltali. Mældir tvístrunarferlar (myndir (a) og (b)) eru sýndir með ljósgráum punktum á mynd (c).

Í þriðja skrefi greiningarinnar er eðlisfræðilegt reiknilíkan fyrir lagskipt jarðefni (Buchen og Ben-Hador, 1996; Ólafsdóttir o.fl., 2018b) notað til að reikna út fræðilegan tvístrunarferil sem borinn er saman við mældan feril. Helstu inntaksstæðir reiknilíkansins eru fjöldi jarðlaga, skúfbylgjuhraði og þykkt hvers lags. Aðrir stikar, sem notaðir eru til að skilgreina eiginleika einstakra laga, eru rúmpýngd og Poisson-hlutfall eða þrýstibylgjuhraði. Þessir stikar hafa þó óveruleg áhrif á útreiknaðan tvístrunarferil og eru þeir því jafnan skilgreindir sem fastar. Monte Carlo leitarreikniriti (Ólafsdóttir o.fl., 2020) er beitt til að ákvarða lagþykktir og skúfbylgjuhraða hvers lags þannig að útreiknaður tvístrunarferill falli sem best að mældum ferli. Dæmi um niðurstöður slíkra reikninga má sjá á mynd 6. Mynd 6a sýnir þá hermdu skúfbylgjuhraðaferla sem uppfylla það skilyrði að fræðilegur tvístrunarferill þeirra fellur innan skekkjumarka mælds ferils. Tvístrunarferlarnir eru sýndir á mynd 6b. Litir ferlanna á myndum 6a og 6b lýsa því hversu mikið útreiknaður tvístrunarferill vîkur frá mældum ferli. Á mynd 6c má sjá dreifingu skúfbylgjuhraða og lagskiptinga fyrir þau sex lög sem reiknilegt líkan mælistaðarins inniheldur. Niðurstaða mælingarinnar er að lokum sett fram sem miðgildi hversrar kennistærðar, samanber mynd 6d, ásamt 10% og 90% hlutfallsmörkum (lárétt og lóðrétt mörk). Þá er tvístrunarferill reiknaður út frá miðgildisferlinum og hann borinn saman við mældan feril á mynd 6e.



Mynd 6: MASW mæling við bakka Markarfljóts. Niðurstöður bakreikninga sem framkvæmdir voru með líkani sem gerir ráð fyrir sex jarðlögum (neðsta lagið er hálfrymd). **(a)** Hermdir skúfbylgjuhraðaferlar sem uppfylla það skilyrði að tilsvareandi útreiknaður tvístrunarferill **(b)** fellur innan skekkjumarka mælds ferils. **(c)** Dreifing skúfbylgjuhraða og lagskiptinga fyrir hvert jarðlag. Miðgildi stikanna eru notuð sem mat á einkennandi skúfbylgjuhraða og dýpi lagskiptingar. **(d)** Miðgildisskúfbylgjuhraðaferill (V_S ferill) fyrir mælistaðinn. Mörk miðgildisferilsins svara til 10% og 90% hlutfallsmarka fyrir skúfbylgjuhraðann (lárétt mörk) og lagskiptingar (lóðrétt mörk). **(e)** Samanburður mælds tvístrunarferils við fræðilegan tvístrunarferil sem er reiknaður út frá miðgildisferlinum.

4. Gagnagrunnur með mældum skúfbylgjuhraðaferlum

Gagnagrunnurinn sem hér er kynntur inniheldur nú niðurstöður MASW mælinga frá nítján stöðum, samtals 30 mælda skúfbylgjuhraðaferla, sem framkvæmdar voru á árunum 2013 til 2021. Greining mæligagnanna var í öllum tilfellum framkvæmd með þeirri aðferð sem lýst er hér á undan. Notendaviðmótið byggist á kortagrunni sem sýndur er á myndum 7 og 8. Rauð merki sýna þau svæði þar sem mælingar hafa verið framkvæmdar (mynd 7). Þegar þysjað er inn á kortið má sjá nánari staðsetningu mælistaðanna innan hvers svæðis (mynd 8). Höfundar áforma að halda áfram að uppfæra gagnagrunninn eftir því sem nýjar mælingar eru framkvæmdar.



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

Mynd 7: Kortagrunnur með niðurstöðum MASW mælinga. Rauð merki sýna staðsetningu þeirra nítján staða á Suðurlandi, Suðvesturlandi og Norðurlandi þar sem mælingar voru framkvæmdar á árunum 2013–2021.



Mynd 8: Kortagrunnur með niðurstöðum MASW mælinga. Dæmi um framsetningu mældra skúfbylgjuhraðaferla í Bryggjuhverfinu í Reykjavík.

Í töflu 1 má finna almennar upplýsingar um mælistaðina. Mælistaðirnir eru einnig flokkaðir í fernt eftir jarðvegsgerð. Byggist sú flokkun á fyrirliggjandi upplýsingum um svæðin. Flokkur I: Mýrlendi og mýrarkenndur jarðvegur (óhreyfð jarðlög). Flokkur II: Sand- og/eða malarkennd

setlög (óhreyfð jarðlög). Flokkur III: Manngerðar fyllingar, jarðstíflur. Flokkur IV: Samlímdur jarðvegur og móbella (óhreyfð jarðlög). Þess má geta að grófkorna sylti og syltkenndur sandur eru talin með flokki II.

Tafla 1: Yfirlit yfir mælistaði þar sem MASW mælingar hafa verið framkvæmdar. Stikinn z_{max} sýnir áætlað könnunardýpi sem mælingarnar gefa fyrir viðkomandi mælistað.

Staðsetning	Ár	Fjöldi mælinga	Flokkur ^(*)	z_{max} [m]	$V_{S,30}$ [m/s]
Akureyrarflugvöllur	2015	1	II	20,5	200
Arnarbæli við bakka Ölfusár	2013–2019	7	II	20–27	211–242
Bakkafjara (við Landeyjahöfn)	2014, 2020	2	II	16,5–21,5	228–230
Bryggjuhverfi, Reykjavík	2020	3	II	14–16	210–236
Gásir	2015	1	II	26	240
Hella, sandnáma	2015	1	IV	25	566
Hella, við Gaddstaðaflatir	2021	1	IV	16	658
Hella, við Kjarröldu	2018	1	IV	25	440
Hrafnagil	2021	1	II	24	178
Kjalarnes, Esjuvegur	2019	1	I	16	62
Markarfljót	2014	1	II	25,5	257
Markarfljótsbrú	2020	1	II	25,5	302
Miðalda, við Þorlákshöfn	2014	1	II	32,5	222
Múlakvísl, við brú	2015	1	II	21	255
Sigöldustífla	2018	1	III	30	393
Skjálfafljót	2015	1	II	33	262
Sporðöldustífla	2018	1	III	25	-
Sultartangastífla	2018	2	III	23	-
Vetrarmýri, Garðabæ	2019	2	I	12,5–14	42–43

(*) Flokkur I: Mýrlendi og mýrarkenndur jarðvegur (óhreyfð jarðlög).

Flokkur II: Sand- og/eða malarkennd setlög (óhreyfð jarðlög).

Flokkur III: Manngerðar fyllingar, jarðstíflur.

Flokkur IV: Samlímdur jarðvegur og móbella (óhreyfð jarðlög).

Í gagnagrunninum eru upplýsingar um hvern mælistað settar fram á þrennan hátt. Í fyrsta lagi er mælt skúfbylgjuhraðasnið sett fram á formi miðgildisferils (*median shear wave velocity* á mynd 8) með 10% og 90% hlutfallsmörkum fyrir bæði skúfbylgjuhraða og lagskiptingu (*10-th and 90-th percentiles*). Hafa ber í huga að skúfbylgjuhraðaferlar í gagnagrunninum eru einungis sýndir með áætlaðri lagskiptingu jarðvegseininga. Þessari lagskiptingu er því ekki ætlað að endurspegla raunverulega skiptingu jarðvegslaga á mælistað.

Í öðru lagi er mældur tvístrunarferill hvers mælistaðar sýndur (*experimental dispersion curve, EDC*), ásamt efri og neðri mörkum (*upper and lower boundary EDC*) og útreiknuðum tvístrunarferli (*theoretical DC*). Í flestum tilfellum svara efri og neðri mörk mælds tvístrunarferils til plús/mínus eins staðalfráviks frá meðaltali. Undantekningin eru mælingar gerðar á jarðstíflum með kjarna, en þá eru efri og neðri mörk skilgreind sem 1,5 staðalfrávik frá meðaltali sökum aukinnar óvissu

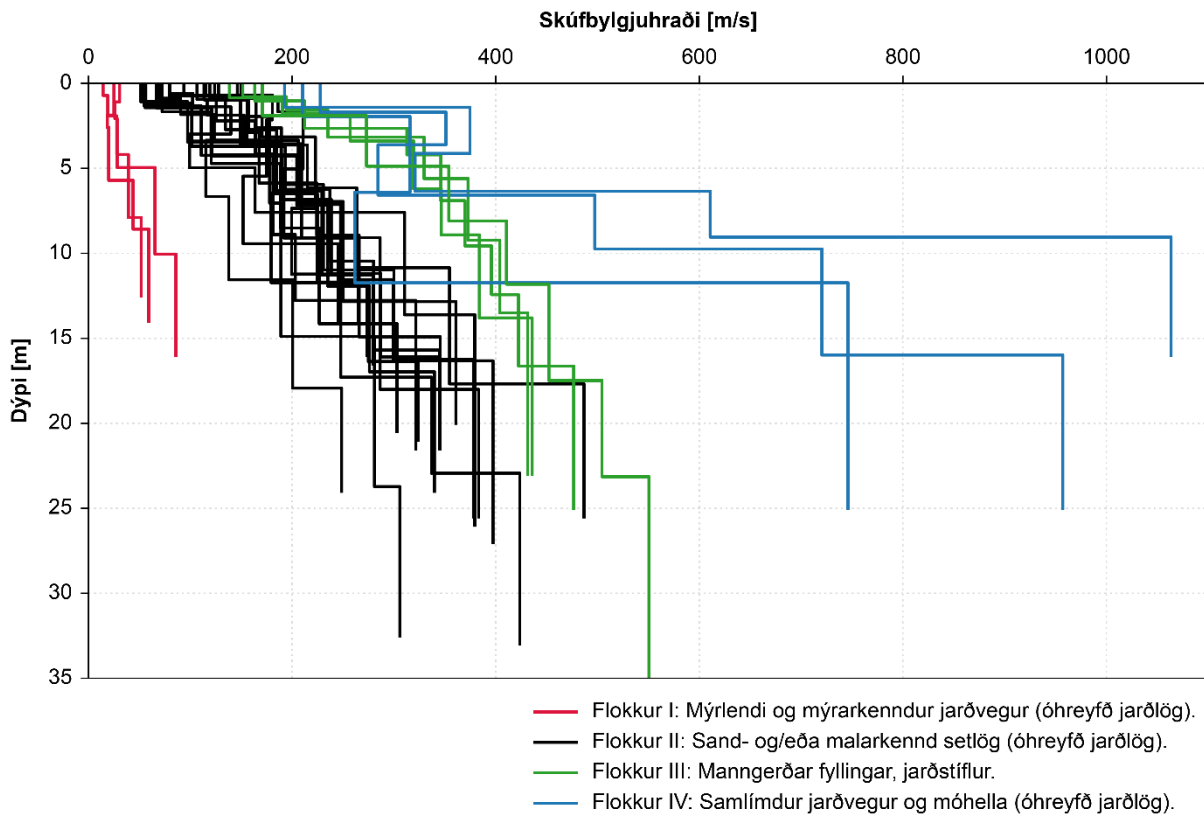
við úrvinnslu mældra tímaraða. Fræðilegi tvístrunarferillinn er reiknaður á grundvelli miðgildisferilsins og hann borinn saman við mældan tvístrunarferil. Þeim samanburði er ætlað að meta hvernig miðgildisferillinn nær að lýsa mældum gögnum. Fyrir allar mælingarnar er niðurstaðan sú að tvístrunarferill miðgildisferilsins falli vel að mældum gögnum.

Í þriðja lagi eru niðurstöður mælinga settar fram á formi meðalskúfbylgjuhraðaferils ($V_{s,z}$ ferils, *time-averaged shear wave velocity* á mynd 8) sem skilgreindur er sem

$$V_{s,z} = \frac{z}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{V_{s,i}} \right)} \quad (2)$$

þar sem $V_{s,i}$ og h_i eru skúfbylgjuhraði og þykkt lags i fyrir N lög niður á dýpi z . Sé könnunardýpi mælingar minna en z m er mældur skúfbylgjuhraðaferill framlengdur með hraða neðsta lagsins í jarðvegslíkaninu. Það er í samræmi við leiðbeiningar í 2020 NEHRP Provisions (BSSC, 2020) um mat á $V_{s,30}$ í tilfellum þar sem upplýsingar um skúfbylgjuhraða liggja fyrir niður á 15–30 m dýpi og ekki er talið líklegt að mjúk jarðlög, þ.e. jarðlög með lágan skúfbylgjuhraða, séu þar fyrir neðan.

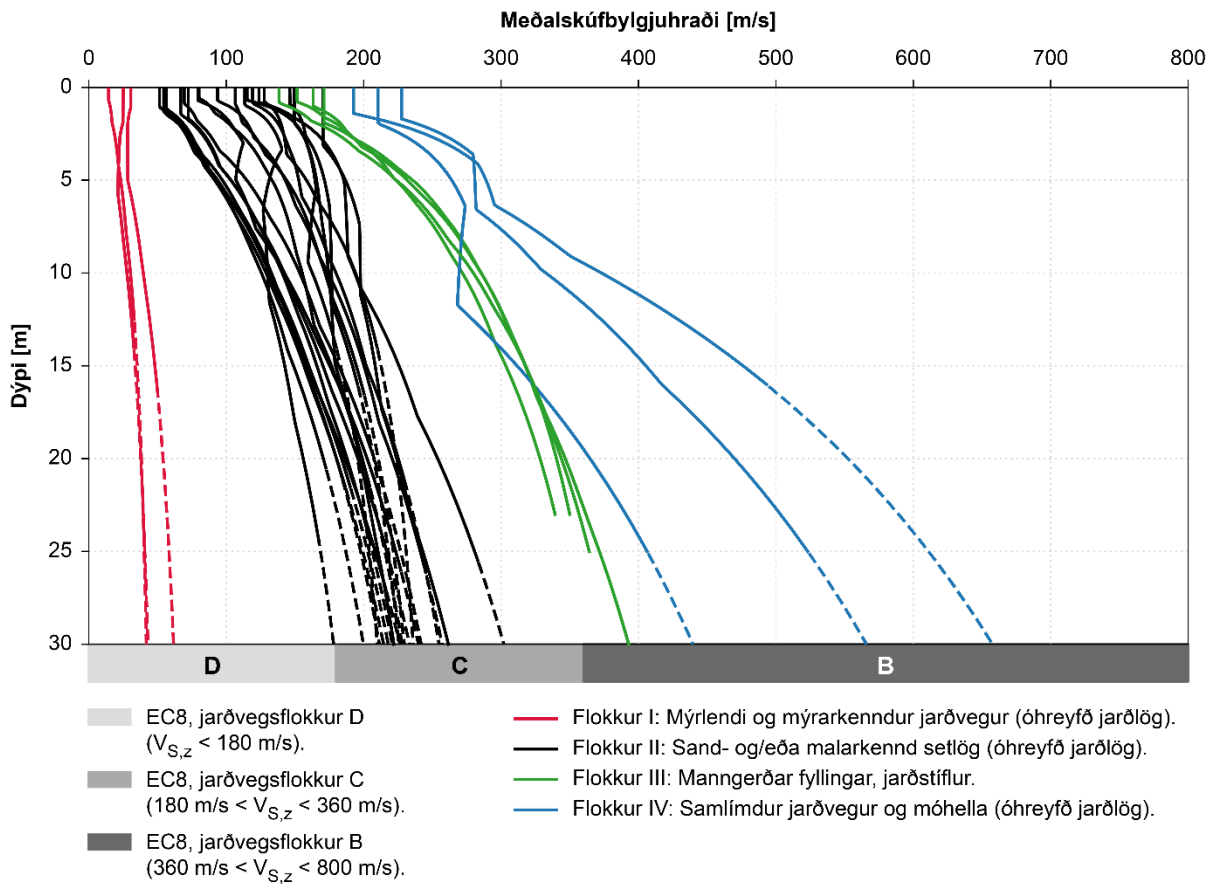
Mynd 9 sýnir mælda skúfbylgjuhraðaferla (miðgildisferla) sem eru flokkaðir eftir jarðvegsgerð á prófunarstað (sjá töflu 1). Eins og sjá má á mynd 9 eru talsverð líkindi meðal skúfbylgjuhraðaferlanna innan hvers flokks, á meðan greinilegur munur er milli flokka. Fyrir þá staði sem einkennast af sand- og/eða malarkenndum jarðvegi (flokkur II) eykst V_s að jafnaði með dýpi frá um 50–150 m/s nálægt yfirborði og til 250–400 m/s á 15–25 m dýpi. Mælingar sem framkvæmdar voru í mýrlendi (flokkur I) sýndu mun lægri gildi á V_s eða á bilinu 15–30 m/s nálægt yfirborði og 50–85 m/s á 12,5–16 m dýpi. Niðurstöður MASW mælinga á Sigöldu-, Sporðöldu- og Sultartangastíflum (flokkur III) eru áþekkar, gildi á V_s aukast jafnt og þétt frá um 150 m/s nálægt yfirborði og verða 430–550 m/s við botn stíflanna. Þá hafa mælingar verið gerðar á þremur stöðum við Hellu sem einkennast af samlímdum jarðvegi, þ.e. móhellu (flokkur IV). Sýna niðurstöður þeirra V_s á bilinu 190–230 m/s fyrir yfirborðslagið og $V_s > 700$ m/s á 9–12 m dýpi. Mælistaðirnir í flokki IV eru fáir og breytileiki innan svæðisins við Hellu virðist vera allnokkur, eins og mynd 9 gefur til kynna. Frekari mælinga er því þörf til þess að geta dregið frekari ályktanir um algeng gildi á V_s fyrir móhellu.



Mynd 9: Mældir skúfbylgjuhraðafærslur (miðgildisferlar) fyrir þá mælistaði sem nú er að finna í gagnagrunninum. Stöðunum er skipt í fjóra flokka eftir jarðvegsgerð.

Á mynd 10 eru mældir skúfbylgjuhraðafærslur settir fram á formi $V_{S,z}$ (jafna 2). Fyrir þá mælistaði þar sem jarðlög eru óhreyfð (þ.e. staðir í flokkum I, II og IV) er $V_{S,z}$ stikinn reiknaður niður á $z = 30$ m dýpi. Áætluð gildi á $V_{S,30}$ fyrir hvern þeirra eru tekin saman í töflu 1. Fyrir þá mælistaði þar sem könnunardýpi MASW mælingar er minna en 30 m eru útreiknuð gildi á $V_{S,z}$ við dýpi $z > z_{max}$ sýnd með punktalínunum. Aðstæður á mælistöðunum einkennast almennt af aukinni stífni með dýpi. Því má álykta að þeir hlutar $V_{S,z}$ ferlanna sem sýndir eru með punktalínunum séu að einhverju leyti vanmetnir. Þetta á sér í lagi við fyrir mælistaðina í flokki I þar sem könnunardýpi mælinganna er einungis 12,5–16 m. Fyrir mælingar sem voru framkvæmdar á toppi jarðstífla er $V_{S,z}$ stikinn einungis reiknaður niður á það dýpi sem nemur botni stíflunnar.

Í nógildandi Evrópustaðli (EC8) eru skilgreindir fimm jarðvegsflokkar, auðkenndir með bókstöfunum A til E, auk tveggja aukaflokka, S_1 og S_2 (CEN, 2004). Flokkun byggingarstaða í jarðvegsflokka A til E byggir á $V_{S,30}$ (meðalskúfbylgjuhraða í efstu 30 m jarðvegs) eins og sýnt er í töflu 2. Á mynd 10 eru útreiknuð gildi á $V_{S,30}$ notuð til að flokka mæld jarðsnið í flokka B, C og D samkvæmt nógildandi EC8. Þar sést að þeir mælistaðir sem einkennast af þykkum sand- og/eða malarlögum falla nær allir í jarðvegsflokk C. Þeir staðir sem einkennast af samlímdum jarðvegi (móhellu) falla í jarðvegsflokk B. Flokkun þeirra þriggja staða sem einkennast af mýrarjarðvegi er óljósari, enda gætu þeir einnig fallið í jarðvegsflokk E eða í einhverjum tilfellum í flokk S_1 eða S_2 .



Mynd 10: Áætlaðir $V_{S,z}$ ferlar (meðalskúfbylgjuhraði) fyrir þá mælistaði sem nú er að finna í gagnagrunninum. Mælistöðunum er skipt í fjóra flokka eftir jarðvegsgerð. Útreiknuð gildi á $V_{S,30}$ ($V_{S,z}$ við dýpi $z = 30$ m) eru notuð til að flokka mælistaðina í jarðvegsflokkka B, C og D í samræmi við núgildandi útgáfu EC8 (tafla 2). Fyrir þá mælistaði þar sem könnunardýpi MASW mælingar (z_{max}) er minna en 30 m eru útreiknuð gildi á $V_{S,z}$ við dýpi $z > z_{max}$ sýnd með punktalínunum.

Tafla 2: Skilgreining á jarðvegsflokkum A–E og S_1 , S_2 skv. núgildandi EC8 (CEN, 2004).

Ground type	Description of stratigraphic profile	$V_{S,30}$ [m/s]
A	Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface.	> 800
B	Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least several tens of metres in thickness, characterized by a gradual increase in mechanical properties with depth.	360–800
C	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of metres.	180–360
D	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil.	<180
E	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with V_S values of type C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with $V_S > 800$ m/s.	
S_1	Deposits consisting, or containing a layer at least 10 m thick, of soft clays/silts with a high plasticity index ($PI > 40$) and high water content	<100 (indicative)
S_2	Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A – E or S_1	

5. Reynslulíkingar fyrir G_{max} fyrir meginflokkka íslenskra jarðefna

Almennt er ákjósanlegast að meta hágildi skúfstuðuls, G_{max} , með beinum mælingum á skúfbylgjuhraða, eins og lýst er með jöfnu 1. Séu slíkar mælingar ekki fyrir hendi er hægt að styðjast við ýmsar reynslulíkingar til að tengja saman þekkta eða áætlaða stika jarðvegs og stífni hans (t.d. Seed og Idriss, 1970; Hardin og Drnevich, 1972; Kokusho o.fl., 1982; Seed o.fl., 1986; Jamiolkowski o.fl., 1991; Kalliglou o.fl., 2008; Carlton og Pestana, 2016). Sökum einkenna íslenskra setlaga er þó mikilvægt að aðlaga slíkar líkingar, sem þróaðar hafa verið fyrir erlendar aðstæður, að eiginleikum íslenskra jarðefna. Fyrir viðnámsefni er G_{max} einkum háð spennuástandi jarðvegs og holrýmistölu (e). Vel þekkt samband var þróað af Seed, Idriss, Wong og Tokimatsu (Seed og Idriss, 1970; Seed o.fl., 1986) en þeir notuðu dýnamísk þríasapróf til þess að kanna samband skúfstuðuls og virkrar meðalspennu (σ'_m). Vinna þeirra leiddi til eftirfarandi líkingar fyrir G_{max}

$$G_{max} = K_{2,max} \cdot (\sigma'_m)^{0,5} \quad (3)$$

þar sem G_{max} er í MPa og $K_{2,max}$ er stuðull sem er einkum háður holrýmistölu. Virk meðalspenna er reiknuð

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3} \quad (4)$$

þar sem σ'_v (í kPa) er lóðrétt virk spenna, $\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$ (í kPa) er lárétt virk spenna og K_0 er hvíluþrýstingsstuðull. Hann er hér metinn með jöfnu Jaky (1944)

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (5)$$

þar sem ϕ' er virkt viðnámshorn jarðvegsins.

Í töflu 3 eru tekin saman gildi á stuðlinum $K_{2,max}$ sem hafa verið áætluð í erlendum rannsóknum fyrir nokkra flokka viðnámsefna. Þau eru hér nýtt til samanburðar við áætluð gildi á $K_{2,max}$ fyrir meginflokka íslenskra jarðefna.

Tafla 3: Áætluð gildi fyrir stuðulinn $K_{2,max}$ í jöfnu 3 fyrir nokkra flokka viðnámsefna (Gazetas, 1991).

	$K_{2,max}$
Lítt þjappaður sandur	8
Vel þjappaður sandur	12
Mjög vel þjappaður sandur	16
Mjög vel þjappaður sandur og mól	25–40

Jafna 3 hefur þann kost að vera einföld og krefjast fárra inntaksstærða. Á undanföllum árum hefur verið unnið að því að meta hvernig líkingin hentar til að áætla G_{max} fyrir þá fjóra flokka íslenskra jarðefna sem skilgreindir eru hér að framan og hvaða gildi $K_{2,max}$ eiga best við fyrir hvern þeirra (Erlingsson o.fl., 2022). Á mynd 11 má sjá helstu niðurstöður þeirrar vinnu. Forsendur útreikninga á σ'_m eru teknar saman í töflu 4. Nauðsynlegar kennistærðir hvers flokks (γ , γ_{sat} og ϕ') eru skilgreindar út frá fyrri rannsóknum (Skúlason og Rögnvaldson, 1972; RB, 1980; Erlingsson, 2019). Til einföldunar eru gildi þeirra nálgúð sem fastar óháðir dýpi. Tekið skal fram að takmarkaðar upplýsingar um jarðtæknilega stika íslenskra mýra og mýrarjarðvegs eru fyrir hendi.

Tafla 4: Yfirlit yfir áætlaðar kennistærðir hvers jarðvegsflokks.

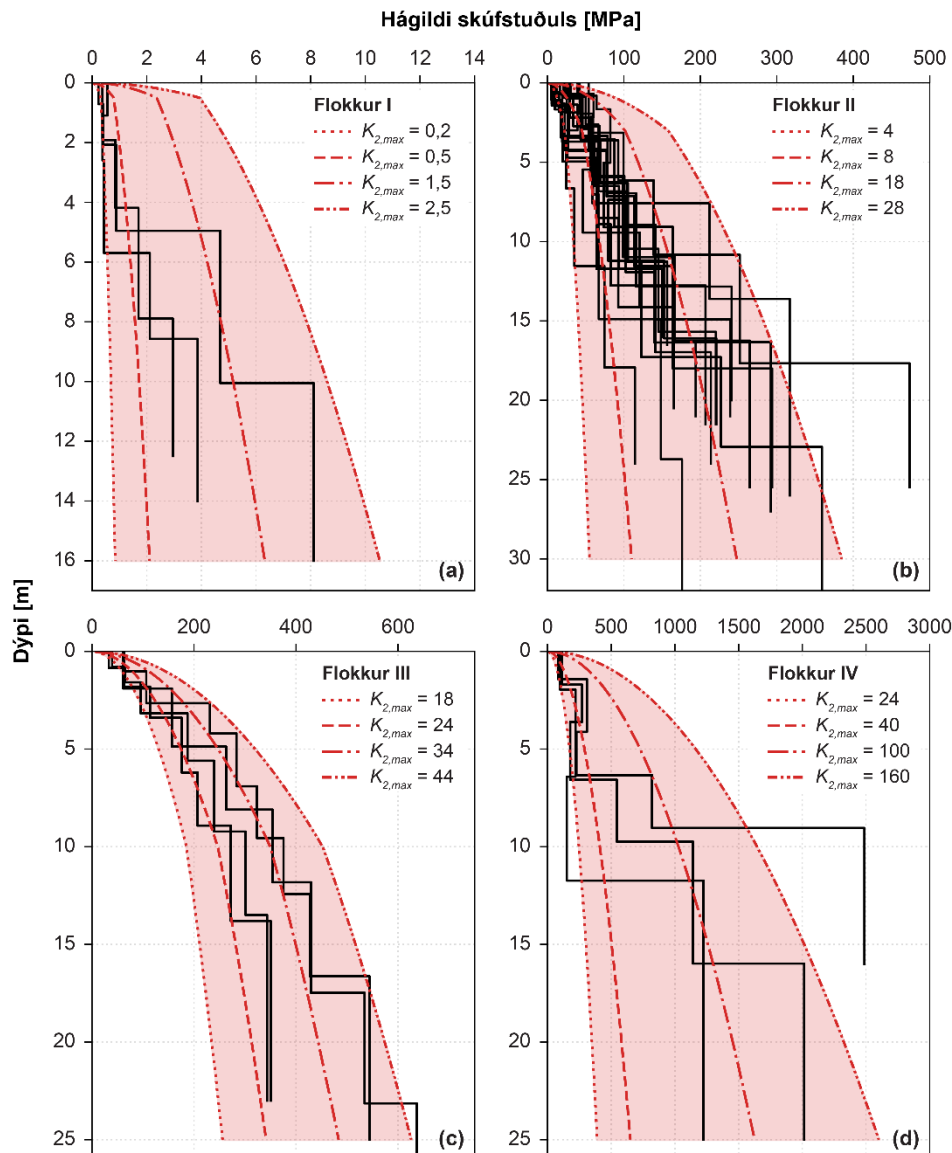
Flokkur	Áætluð staðsetning grunnvatnsborðs [m]	Rúmpýngd, γ / γ_{sat} [kN/m ³]	Viðnámshorn, ϕ' [°]
I Mýrlendi og mýrarkenndur jarðvegur (óhreyfð jarðlög)	0,5	6 / 11	15
II Sand- og/eða malarkennd setlög (óhreyfð jarðlög)	3,0	18,5 / 20	40
III Manngerðar fyllingar, jarðstíflur	10,0	20 / 22	45
IV Samlímdu jarðvegur og móhella (óhreyfð jarðlög)	-	20	45

Jafna 3, auk áætlaðra kennistærða í töflu 4, var notuð til þess að meta gildi G_{max} fyrir hvern flokk jarðefna með mismunandi gildum á hlutfallsstuðlinum $K_{2,max}$. Mynd 11 sýnir samanburð útreiknaðra gilda á G_{max} og þeirra G_{max} ferla sem MASW mælingarnar skiluðu (jafna 1). Sá samanburður gefur til kynna að einfaldar líkingar sem tengja saman G_{max} og σ'_m henti vel til þess að meta skúfstuðul fyrir helstu flokka íslenskra jarðefna, hvort sem um er að ræða óhreyfð jarðlög eða jarðstíflur. Í töflu 5 eru tekin saman þau gildi á $K_{2,max}$ sem falla best að mældum ferlum.

Niðurstöðurnar á mynd 11 benda enn fremur til þess að besta gildi $K_{2,max}$ aukist jafnan með dýpi. Þetta sést sér í lagi fyrir mælistaðina í flokki II (mynd 11b). Lág gildi á $K_{2,max}$, sem áður hafa verið áætluð fyrir lausþjappaðan sand (tafla 3), falla vel að mældum G_{max} ferlum nálægt yfirborði. Aftur á móti falla þau gildi á $K_{2,max}$ sem áður hafa verið áætluð fyrir vel þjappað efni betur að niðurstöðum MASW mælinganna á meira dýpi. Endurbætt útgáfa jöfnu 3 fyrir þann flokk gæti því

tekið tillit til þess að $K_{2,max}$ sé líklega háð dýpi. Sömu tilhneingingu má sjá innan hinna þriggja flokkanna (myndir 11acd). Þó ber að hafa í huga að fáir mælistaðir falla í flokka I, III og IV. Því er meiri óvissa um áætluð gildi á $K_{2,max}$ fyrir þá flokka.

Áætlaðar kennistærðir hvers flokks (tafla 4) eru annar óvissuþáttur í greiningunni. Að jafnaði hafa rúmpýngd og viðnámshorn (þ.e. hvíluþrýstingsstuðull) jarðefnisins tiltölulega lítil áhrif á útreiknuð gildi á G_{max} . Því er talið ásættanlegt, a.m.k. á fyrstu stigum þessarar vinnu, að nota áður ákvörðuð gildi fyrir γ , γ_{sat} og ϕ' í stað mældra gilda fyrir einstaka staði, ásamt því að nota jöfnu 5 til að meta hvíluþrýstingsstuðulinn. Í því samhengi er þó rétt að taka fram að takmarkaðar upplýsingar liggja fyrir um eiginleika jarðefna á einstökum prófunarstöðum. Þá er staðsetning grunnvatnsborðs óvissuþáttur við mat á $K_{2,max}$ fyrir alla flokkana.



Mynd 11: Samanburður á mældum G_{max} ferlum og áætluðum gildum á G_{max} . Fyrir hvern flokk jarðefna er hágildi skúfstuðuls G_{max} reiknað skv. jöfnu 3 með því að nota mismunandi gildi á hlutfallsstuðlinum $K_{2,max}$ og áætlaðar kennistærðir í töflu 4. **(a)** Flokkur I: Mýrlendi og mýrarkenndur jarðvegur (óhreyfð jarðlög). **(b)** Flokkur II: Sand- og/eða malarkennd setlög (óhreyfð jarðlög). **(c)** Flokkur III: Manngerðar fyllingar, jarðstíflur. **(d)** Flokkur IV: Samlímduð jarðvegur og móhella (óhreyfð jarðlög).

Tafla 5: Áætluð gildi á hlutfallsstuðlinum $K_{2,max}$ í jöfnu 3 fyrir hvern flokk íslenskra jarðefna byggt á samanburði við niðurstöður MASW mælinga.

Flokkur	$K_{2,max}$
I Mýrlendi og mýrarkenndur jarðvegur (óhreyfð jarðlög)	0,2–2,5
II Sand- og/eða malarkennd setlög (óhreyfð jarðlög)	4–28
III Manngerðar fyllingar, jarðstíflur	18–44
IV Samlímdu jarðvegur og móhella (óhreyfð jarðlög)	24–160

6. Samantekt

MASW er aðferð til að ákvarða skúfbylgjuhraða jarðvegs, sem byggir á tvístrunareiginleikum Rayleigh yfirborðsbylgna og tengslum milli útbreiðsluhraða þeirra og fjaðureiginleika jarðvegs. Hér er kynntur gagnagrunnur sem hýsir niðurstöður MASW mælinga sem framkvæmdar voru hérlandis á árunum 2013 til 2021. Auk skúfbylgjuhraðaferla eru niðurstöður birtar á formi $V_{s,z}$ (meðalskúfbylgjuhraða), sem og $V_{s,30}$ gildi fyrir alla mælistaðina nema stíflurnar. Er það í samræmi við hagnýtingu mælinga á skúfbylgjuhraða við flokkun byggingarstaða í jarðvegsflokka samkvæmt Evrópustaðli (EC8). Mælistöðunum er skipt í fjóra meginflokka eftir gerð þeirra jarðlaga sem þar er að finna, þ.e. (I) mýrlendi og mýrarkenndur jarðvegur, (II) laus sand- og/eða malarkennd setlög, (III) manngerðar fyllingar og jarðstíflur og (IV) samlímdu jarðvegur og móhella. Niðurstöður MASW mælinganna sýna að umtalsverð líkindi eru meðal skúfbylgjuhraðaferlanna innan hvers flokks, á meðan greinilegur munur er á milli flokka. Þá voru mældir skúfbylgjuhraðaferlar nýttir til þess að setja fram einfaldar reynslulíkingar fyrir hvern fyrrgreindra flokka, sem tengja saman hágildi skúfstuðuls og virka meðalspennu í jarðvegi. Gætu þær m.a. nýst til þess að meta G_{max} (eða V_s) á stöðum þar sem beinar mælingar liggja ekki fyrir.

MASW mælingar skila að jafnaði upplýsingum um stífneiginleika jarðvegs niður á um 10–30 m dýpi. Unnið er að því að þróa aðferðir til að auka könnunardýpið en vonir standa til að með samþættri greiningu gagna sem fengin eru með MASW mælingum og annars konar yfirborðsbylgjumælingum megi ákvarða skúfbylgjuhraða setlaga niður á allt að 100–200 m dýpi. Enn fremur er unnið að því að þróa og prófa aðferðir sem nota má til að meta dýpi niður á fast (eða dýpi niður á skörp skil í stífni).

Þegar þetta er skrifað er í gagnagrunninum að finna niðurstöður mælinga frá nítján mismunandi svæðum, flestum á Suður- og Suðvesturlandi, alls 30 mælda skúfbylgjuhraðaferla. Stefnt er að því að halda áfram að byggja upp gagnagrunninn og birta þar jafnóðum niðurstöður mælinga frá fleiri mælistöðum. Þá er einnig stefnt að því að birta meiri upplýsingar um hvern mælistað eftir því sem þær liggja fyrir, svo sem dýpi á föst jarðlög og náttúrulega tíðni (sveiflutíma) setlaga á mælistað, sem hvoru tveggja eru stíkar sem allt útlit er fyrir að verði innleiddir sem kennistærðir við flokkun í jarðvegsflokka í endurbættri útgáfu EC8.

Þakkir

Þetta verkefni var styrkt af Rannsóknasjóði Rannís [styrkir nr. 206793-053 og 218149-051], Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar og Orkurannsóknasjóði Landsvirkjunar.

Heimildaskrá

- Bessason, B. (1998). Yfirborðsbylgjumælingar við ákvörðun á skúfbylgjuhraða í jarðvegi. *Árbók VFÍ/TFÍ 1997/98*, 10, 293–303.
- Bessason, B., Baldvinsson, G. I. og Pórarinsson, Ó. (1998). SASW for evaluation of site-specific earthquake excitation. *Proc. of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France*.
- Bessason, B. og Erlingsson, S. (2011). Shear wave velocity in surface sediments. *Jökull*, 61, 51–64.
- Bessason, B. og Kaynia, A. M. (2002). Site amplification in lava rock on soft sediments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(7), 525–540. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00035-0)
- BSSC. (2020). *NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-2082-1) 2020 Edition. Volume 1. Part 1: Provisions and Part 2: Commentary*. Building Seismic Safety Council (BSSC).
- Buchen, P. W. og Ben-Hador, R. (1996). Free-mode surface-wave computations. *Geophysical Journal International*, 124(3), 869–887. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb05642.x>
- Carlton, B. D. og Pestana, J. M. (2016). A unified model for estimating the in-situ small strain shear modulus of clays, silts, sands, and gravels. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 345–355. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.01.019>
- CEN. (2004). *EN1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. European Committee for Standardization (CEN).
- CEN/TC 250/SC 8. (2021). *prEN 1998-1-1:2021 ENQ 2022-01-11. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-1: General rules and seismic action*.
- EFEHR. (2023). *European Hazard model*. Sótt 15. nóvember 2023 af <http://www.hazard.efehr.org/>
- Einarsson, P. (1991). *Myndun og mótun lands*. Mál og menning.
- Erlingsson, S. (2019). Geotechnical challenges in Iceland. *Proc. of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE-2019, Reykjavík, Iceland*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-1109>
- Erlingsson, S., Ólafsdóttir, E. Á. og Bessason, B. (2022). Soil site stiffness categorization based on MASW field testing. *Proc. of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney, Australia*.
- Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M., Bard, P.-Y., Comina, C., Cornou, C., Cox, B., Di Giulio, G., Forbriger, T., Hayashi, K., Lunedei, E., Martin, A., Mercerat, D., Ohrnberger, M., Poggi, V., Renalier, F., Sicilia, D. og Socco, V. (2018). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(6), 2367–2420. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7>
- Hardin, B. O. og Drnevich, V. (1972). Shear modulus and damping in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(6), 603–624.
- Gazetas, G. (1991). Foundation Vibrations. Í Fang, H.-Y. (ritstjóri), *Foundation engineering handbook, 2. útgáfa* (bls. 553–593). Van Nostrand Reinhold.
- Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. *Journal for the Society of Hungarian Architects and Engineers*, 355–358.
- Jamiolkowski, M., Leroueil, S. og Lo Presti, D. C. (1991). Design parameters from theory to practice. *Proc. of International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development, Geo-Coast '91*, 877–917.
- Kallioglou, P., Tika, Th. og Pitilakis, K. (2008). Shear modulus and damping ratio of cohesive soils. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(6), 879–913. <https://doi.org/10.1080/13632460801888525>
- Kokusho, T., Yoshida, Y. og Esashi, Y. (1982). Dynamic properties of soft clay for wide strain range. *Soils and Foundations*, 22(4), 1–18. https://doi.org/10.3208/sandf1972.22.4_1
- Kramer, S. L. (2014). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education Limited.
- Ólafsdóttir, E. Á., Bessason, B. og Erlingsson, S. (2018a). Combination of dispersion curves from MASW measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 473–487. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.025>

- Ólafsdóttir, E. Á., Erlingsson, S. og Bessason, B. (2018b). Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(2), 217–233. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0302>
- Ólafsdóttir, E. Á. (2019). *Multichannel analysis of surface waves for soil site characterization* [Doktorsritgerð]. Háskóli Íslands.
- Ólafsdóttir, E. Á., Bessason, B. og Erlingsson, S. (2019a). Application of MASW in the South Iceland Seismic Zone. Í Rupakhety, R., Ólafsson, S., Bessason, B. (ritstjórar), *Proc. of the International Conference on Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Vol. 47* (bls. 53–66). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78187-7_5
- Ólafsdóttir, E. Á., Erlingsson, S. og Bessason, B. (2019b). Open source MASW software and results from Icelandic soil sites. *Proc. of the 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavík, Iceland*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0771>
- Ólafsdóttir, E. Á., Bessason, B., Erlingsson, S., L'Heureux, J. S. og Bazin, S. (2019c). Benchmarking of an open-source MASW software using data from three Norwegian GeoTest Sites. *Proc. of the 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavík, Iceland*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0772>
- Ólafsdóttir, E. Á., Erlingsson, S. og Bessason, B. (2020). Open-source MASW inversion tool aimed at shear wave velocity profiling for soil site explorations. *Geosciences*, 10(8), 322. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080322>
- Ólafsdóttir, E. Á., Bessason, B. og Erlingsson, S. (2022). Non-invasive active- and passive-source stiffness characterization at a loose sand site. *Proc. of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 501–506.
- Paolucci, R., Aimar, M., Ciancimino, A., Dotti, M., Foti, S., Lanzano, G., Mattevi, P., Pacor, F. og Vanini, M. (2021). Checking the site categorization criteria and amplification factors of the 2021 draft of Eurocode 8 Part 1–1. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 4199–4234. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01118-9>
- Park, C. B., Miller, R. D. og Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998*, 1377–1380. <https://doi.org/10.1190/1.1820161>
- Rahpeyma, S., Halldórsson, B., Olivera, C., Green, R. A. og Jónsson, S. (2016). Detailed site effect estimation in the presence of strong velocity reversals within a small-aperture strong-motion array in Iceland. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.07.001>
- RB. (1980). *Grundun húsa*. Rannsóknarstofa byggingariðnaðarins.
- Seed, H. B. og Idriss, I. M. (1970). *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, report no. EERC 70-10*. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. og Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11), 1016–1032.
- Skúlason, J. og Rögnvaldsson, J. (1972). *Jarðvegsrannsóknir á Þórustaðamýri í Ölfusi og samanburður á reiknuðu og mældu sigi vegfyllingar*. Verkfræðistofa Dr. Gunnars Sigurðssonar.