



# **YFIRBORÐSBYLGJUMÆLINGAR OG YSJUNARHÆTTA**

**Leifur Skúlason Kaldal**

**Meistaraverkefni  
15 einingar**

**Leiðbeinendur:  
Sigurður Erlingsson prófessor  
Bjarni Bessason prófessor**

**JÚNÍ 2007**

**Umhverfis- og byggingarverkfræðiskor  
Verkfræðideild Háskóla Íslands**

Yfirborðsbylgjumælingar og ysjunarhætta  
15 eininga meistaraverkefni

© Leifur Skúlason Kaldal, 2007

Umhverfis- og byggingarverkfræðiskor

Verkfræðideild  
Háskóla Íslands  
Hjarðarhaga 2-6  
107 Reykjavík  
Sími: 525 4000

Prentað í Prentsmiðjunni Gutenberg  
Reykjavík, 2007

## ÚTDRÁTTUR

Skúfbylgjuhraði jarðefna er nátengdur stífni þeirra. Stífnin er svo aftur tengd burðarþoli jarðvegs. Mælingar voru gerðar voru á skúfbylgjuhraða sands nærri yfirborði hans á tveimur stöðum á Skeiðarársandi með svokallaðri yfirborðsbylgjuaðferð. Yfirborðsbylgjuaðferðin var þróuð snemma á níunda áratugnum sem fljótleg og ódýr aðferð til að meta stífni jarðvegs nærri yfirborði. Hún felst í því að yfirborðsbylgja er framkölluð í jarðveginum með lóðréttu höggi. Hraðanemum sem komið er upp í beinni línu nema bylgjuna og er bylgjuhraðinn ákvarðaður út frá tímamismuninum á merkinu. Tíðnirófsgreining er framkvæmd á gögnunum og fást þá upplýsingar um Rayleighbylgjuhraða sem fall af dýpi. Rayleighbylgjuhraða má umbreyta í skúfbylgjuhraða.

Hægt er að meta ysjunarhættu jarðvegs út frá gögnum um skúfbylgjuhraða hans. Þetta er gert með aðferð sem kölluð er einfaldaða aðferðin. Í henni er dýnamískt skúfspennuhlutfall ákvarðað út frá mati á yfirborðshröðun eða skúfspennu og borið saman við dýnamískt mótstöðuhlutfall sem meðal annars er háð skúfbylgjuhraðanum í jarðveginum.

## ENGLISH ABSTRACT

Shear wave velocity of soil is closely related to its stiffness. The stiffness is also related to the load bearing capacity of the soil. Shear wave velocity of sand, near the surface, was measured on two locations on Skeiðarársandur outwash plain south of Skeiðarárjökull glacier in southern Iceland. This was done using a method called spectral analysis of surface waves (SASW). This method was developed in the early eighties by American scientists as a cheap and easy method to evaluate the stiffness of soil near the surface. This method consists of three main steps; generation of a surface wave in the soil with a sledge hammer, spectral analysis of the data retrieved by sensors in a straight line on the soil surface and finally generation of shear wave velocity profile using forward modeling.

To evaluate liquefaction susceptibility of the soil, a method called the simplified procedure is used. If shear wave velocity of the soil is known this method can be used to estimate the risk of liquefaction occurring in the soil. Cyclic stress ratio is determined using the estimated earthquake load either from a time history or an estimated maximum surface acceleration. This is compared with the cyclic resistance ratio, which is computed using the shear wave velocity.



## FORMÁLI

Mikilvægt er að þekkja burð jarðvegs þegar reisa skal mannvirki á lausum jarðlögum. Mannvirki sem algengt er að reist séu á lausum jarðlögum hérlendis eru meðal annars brýr, byggingar, háspennumöstur, vegir og vatnsleiðslur. Oft má líta svo á að stífni og burður séu tengd hugtök og að stífni gefi mat á burð. Sé stífni jarðvegs ekki nægjanleg getur verið hætt á að hann þoli jarðskjálfta illa og brotni. Stífni jarðvegs er einnig mikilvægt að þekkja þegar meta skal stífni og burðargetu stauraundirstöðu.

Hugtakið ysjun (e. liquefaction) er frekar illa skilgreint. Ysjun er samheiti yfir ýmis fyrirbæri sem eiga það sameiginlegt að leiða til þess að jarðvegur missir stífni og burð sinn tímabundið að einhverju eða öllu leyti vegna uppbyggingar þóruvatnsþrýstings sökum sveifluálags. Erlendis eru dæmi um að meirihluta tjóns af völdum jarðskjálfta sé hægt að rekja til ysjunar [Kramer, 1996]. Hér á landi hefur ekki mikið tjón verið rakið til ysjunar enn sem komið er en helstu skemmdir hér á landi vegna ysjunar eru á vegum og við háspennumöstur [Jón Skúlason o.fl., 2001].

Ein leið til að meta mótstöðu gegn ysjun er að taka óhreyfð sýni úti í mörkinni og prófa á rannsóknarstofu. Erfitt er þó að taka óhreyfð sýni og kostnaðarsamt. Ef notast er við hreyfð sýni getur reynst erfitt að endurskapa náttúrulegar aðstæður á rannsóknarstofu. Því er oft betra að reyna að mæla efnisstuðla úti í mörkinni sem nota má til að meta ysjunarhættu. Ýmsar aðferðir hafa verið þróaðar til þessa [Woods, D.R. o.fl., 1994]. Þær aðferðir sem mest hafa verið notaðar eru Borroboranir, Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT) og Becker Penetration Test (BPT). Töluverð vinna er við framkvæmd slíkra mælinga. Í byrjun níunda áratugarins var byrjað að þróa nýja aðferð, svokallaða yfirborðsbylgjuaðferð eða Spectral Analysis of Surface Waves (SASW). Þessi nýja aðferð gerir það kleift að mæla skúfbylgjuhraða sem fall af dýpi og meta stífni jarðvegsins á mun auðveldari og ódýrari hátt en áður. Skúfbylgjuhraðann má einnig nota beint til að meta ysjunarhættu með svokölluðum mótstöðuferlum. Í jarðskjálftastaðlinum Eurocode 8 er skúfbylgjuhraðinn í efstu 30 m jarðlaga notaður til þess að meta hvaða gerð svörunarrófs eigi að nota fyrir mannvirki sem reist eru á lausum jarðlögum [CEN, 2003]. Yfirborðsbylgjuaðferðin er talin vera ein mikilvægasta framför á sviði grunnra jarðbylgjumælinga undanfarinna ára [Kramer, 1996].

Nokkuð hefur verið gert af yfirborðsbylgjumælingum hér á landi síðustu árin og sífellt bætist við upplýsingar um skúfbylgjuhraða íslensks jarðvegs.

Þetta meistaraverkefni fjallar um yfirborðsbylgjumælingar og hvernig þeim er beitt til þess að ákvarða skúfbylgjuhraða og dýnamískan skúfstuðul fyrir þykkan íslenskan jökulársand. Einnig er fjallað um mat á ysjunarhættu út frá gögnum um skúfstuðul.

Sérstakar þakkir fær Davíð Rósenkrans Hauksson fyrir ómetanlega aðstoð við mælingar þær sem framkvæmdar voru í tengslum við verkefnið. Einnig fá leiðbeinendur mínir Sigurður Erlingsson og Bjarni Bessason prófessorar við umhverfis- og byggingarverkfræðiskor HÍ þakkir fyrir góða tilsögn varðandi verkefnið. Auk þeirra fá foreldrar mínir, Skúli Víkingsson og Ingibjörg Kaldal þakkir fyrir yfirllestur og ábendingar.



# EFNISYFIRLIT

<b>1.</b>	<b><i>Inngangur</i></b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b><i>Yfirborðsbylgjuaðferð (SASW)</i></b> .....	<b>3</b>
2.1.	Yfirborðsbylgjur .....	5
2.2.	Skúfstuðull jarðvegs .....	8
2.3.	Mælingar á skúfstuðli jarðvegs með SASW .....	10
2.3.1.	Framkvæmd yfirborðsbylgjumælinga .....	10
2.3.2.	Úrvinnsla gagna .....	12
<b>3.</b>	<b><i>Aðstæður á Skeiðarársandi</i></b> .....	<b>15</b>
3.1.	Efnisgerð.....	15
3.1.1.	Sýni við Skeiðará .....	15
3.1.2.	Sýni við Gígjukvísl .....	16
<b>4.</b>	<b><i>Yfirborðsbylgjumælingar</i></b> .....	<b>19</b>
4.1.	Mælingar við Skeiðará.....	22
4.2.	Mælingar við Gígjukvísl.....	23
4.3.	Niðurstöður mælinga .....	24
4.3.1.	Samanburður yfirborðsbylgjumælinga og Borroborana.....	28
<b>5.</b>	<b><i>Samanburður við eldri mælingar</i></b> .....	<b>31</b>
<b>6.</b>	<b><i>Ysjun</i></b> .....	<b>35</b>
6.1.	Mat á ysjunarhættu .....	35
<b>7.</b>	<b><i>Mat á ysjunarhættu með SHAKE</i></b> .....	<b>39</b>
7.1.	Forritið SHAKE.....	39
7.2.	Jarðlagalíkan í SHAKE.....	40
7.3.	Niðurstöður líkansins.....	45
<b>8.</b>	<b><i>Samantekt niðurstaðna</i></b> .....	<b>53</b>
<b>9.</b>	<b><i>Heimildir</i></b> .....	<b>55</b>





## 1. INNGANGUR

Markmið þessa verkefnis er að beita yfirborðsbylgjumælingum til þess að ákvarða skúfbylgjuhraða og dýnamískan skúfstuðul fyrir íslenskan jökulársand. Þær upplýsingar eru svo notaðar til þess að meta ysjunarhættu jarðvegsins.

Gerðar voru yfirborðsbylgjumælingar á tveimur stöðum á Skeiðarársandi, annars vegar við Skeiðarárbrú og hins vegar við Gígjukvíslarbrú. Ástæðan fyrir staðarvalinu er annars vegar sú að þarna er þykkur dæmigerður jökulársandur sem ekki hefur verið mældur með þessari aðferð áður og er því áhugavert að mæla skúfbylgjuhraðann fyrir þennan sand. Hins vegar er áhugavert að bera saman niðurstöður yfirborðsbylgjumælinga við annars konar stífnimælingar sem framkvæmdar voru á sama stað fyrir um 30 árum. Þá gerði Vegagerðin svokallaðar Borrobormælingar sem gefa annarskonar mat á stífnieiginleikum jarðvegs með því að mæla bormótsstöðu. Einnig var hægt að komast hjá því að taka efnissýni með því að gera mælingarnar þarna því Vegagerðin tók sýni á þessum stöðum í tengslum við Borrobormælingar sínar.

Prófað var að gera yfirborðsbylgjumælingar að vetrarlagi þegar frost var enn í jörðu og svo mælt aftur á sama stað til þess að kanna hvort aðferðin sé nothæf við þær aðstæður þegar sandur er frosinn í yfirborði.

Einnig var ysjunarhætta jökulársands eins og þess sem er á Skeiðarársandi metin við mikið jarðskjálftaálag. Ekki er mikil jarðskjálftahætta á staðnum sem mælingin fór fram á. Því var, við líkangerðina, gert ráð fyrir að sandurinn sem mældur var á Skeiðarársandi væri staðsettur einhvers annars staðar á Suðurlandi þar sem hætta er á miklu jarðskjálftaálagi, t.d. nærri Þjórsá. Gert var einvitt líkan af 20 m þykkum jarðlagastafli. Efniseiginleikar þeir sem fengust við yfirborðsbylgjumælingarnar voru settir inni líkanið ásamt hröðunartímaröðum sem mældar voru í austurstöpli Þjórsárbrúar í Suðurlandsskjálftanum 21. júní 2000. Niðurstöður þær sem fengust úr líkaninu voru bornar saman við erlenda mótstöðuferla gegn ysjun.

Ritgerðin skiptist í tvo megin hluta. Í fyrri hlutanum, 2., 3. og 4. kafla er fjallað um yfirborðsbylgjuaðferðina og þær mælingar sem gerðar voru fyrir verkefnið. Í síðari hlutanum, 5., 6. og 7. kafla er fjallað um ysjunarhættu í jarðvegi og lagt mat á hana fyrir jarðefnið sem mælt var.



## 2. YFIRBORÐSBYLGJUAÐFERÐ (SASW)

Yfirborðsbylgjuaðferðin (SASW) var þróuð snemma á níunda áratugnum af bandarískum vísindamönnum [Heisey o.fl., 1982, Nazarian & Stokoe, 1984]. SASW stendur fyrir Spectral Analysis of Surface Waves. Aðferðin byggir á því að hraði Rayleighbylgju er mældur og notaður til að ákvarða skúfbylgjuhraða sem fall af dýpi í jarðveginum.

Aðferðinni má skipta í þrjú meginskref:

1. Hraðanemum er komið fyrir í beinni röð á yfirborði jarðvegsins sem ákvarða skal skúfbylgjuhraðann í. Yfirborðsbylgja er því næst framkölluð með lóðréttu höggi í beinni línu við nemana. Nemarnir skrá lóðréttu hreyfingu sem fall af tíma.
2. Tíðnirófsgreining fer fram á mældu gögnunum sem gefur af sér tvístrunarferil.
3. Ítrunarferli ákvarðar síðan fræðilegan tvístrunarferil út frá gefnum skúfbylgjuhraða og lagskiptingu. Það skúfbylgjuhraðasnið sem gefur af sér fræðilegan tvístrunarferil sem fellur ofan í tvístrunarferil þann sem fékkst út frá mælingunum er niðurstaða mælingarinnar.

Aðferðin er álitin gefa ágætis mat, nærri yfirborði, á meðalstífnieiginleikum jarðvegs með ákveðna lagskiptingu.

Helstu kostir yfirborðsbylgjumælinga umfram aðrar mæliaðferðir eru:

- Yfirborðsbylgjumælingar eru mun ódýrari og fljótlegri en t.d. Borroboranir, SPT (e. Standard Penetration Test) eða CPT (e. Cone Penetration Test).
- Ekki þarf neina borholu við yfirborðsbylgjumælingar.
- Gögn fást fyrir stærra svæði en fást úr borholumælingum.
- Yfirborðsbylgjumælingar raska ekki jarðveginum sem mældur er.
- Aðferðin hentar bæði fyrir finefnaríkan jarðveg og grófari jarðveg þar sem erfitt getur verið að framkvæma annars konar próf.
- Sé mælt fyrir og eftir að þjöppun fer fram má nota aðferðina til að meta þjöppunina í manngerðum fyllingum.

Yfirborðsbylgjuaðferðin hefur einnig nokkra ókosti. Þeir helstu eru:

- Erfitt getur reynst að ákvarða lagskiptingu jarðvegs út frá yfirborðsbylgjumælingum einum saman.
- Nota þarf aðrar aðferðir til að meta aðra efniseiginleika jarðvegsins en skúfbylgjuhraðann auk þess sem þekkja þarf lagskiptingu, grunnvatnsstöðu og dýpi niður á fast.
- Þekkt er að aðferðin ræður mjög illa við þær aðstæður þegar mun stífari jarðlög liggja ofan á jarðlögum þeim sem mæla skal. Þá er nær ómögulegt að örva þau lög sem eru undir stífa laginu.

- Þekkt er að aðferðin ræður sérstaklega illa við þunn lög með eiginleika frábrugðna umliggjandi jarðlögum þar sem aðferðin mælir meðaleiginleika og slík lög „sjást“ því ekki. Þetta vandamál versnar með auknu dýpi.
- Við ákveðnar aðstæður geta mismunandi jarðvegssnið gefið sama fræðilega tvístrunarferilinn.

Til að gera yfirborðsbylgjumælingar þarf sérhæfðan mannskap. Stundum liggur mikil túlkun á bak við niðurstöður útreikninga á SASW-gögnum. Það getur reynst varasamt þar sem viss hætta er á að mælingamaður hafi gefið sér fyrirfram ákveðna hugmynd um niðurstöður og túlki því gögnin á þann veg sem hann bjóst við að yrði niðurstaðan. Stundum getur til dæmis reynst erfitt að greina yfirsveiflur í úrvinnslu gagnanna. Þetta vandamál kemur meðal annars upp þegar stífnin minnkar með auknu dýpi [Kramer, 1996].

Óheppilegt er að yfirborðsbylgjuaðferðin mælir skúfbylgjuhraðann við litlar formbreytingar en ysjun verður yfirleitt við mun meiri hreyfingar efnisagna. Þetta getur skipt miklu máli í samlímdum jarðvegi þar sem slíkur jarðvegur helst saman við litlar formbreytingar en getur losnað í sundur við jarðskjálfta og er þá stífni hans orðin allt önnur [Andrus & Stokoe, 2000].

Ekki er hægt að mæla mjög djúpt með yfirborðsbylgjuaðferðinni. Með sleggju eða hoppi er hægt að mæla niður á um 20 m dýpi við góðar aðstæður. Reyndar er hægt að mæla niður á allt að 60 m dýpi með mjög þungu lóði sem híft er upp í gálga og sleppt úr nokkurri hæð eða með því að nota einhvers konar vélarafli.

Við mat á ysjunarhættu er almennt mælt með að nota boranir samhliða yfirborðsbylgjuaðferð þar sem þær gefa nákvæmari upplýsingar. Yfirborðsbylgjuaðferðin er notuð til að fá almennar upplýsingar um stórt svæði og staðarval fyrir borun er þá byggt á þeim niðurstöðum. Síðan er borað þar sem yfirborðsbylgjumælingar þykja gefa til kynna mesta ysjunarhættu [Andrus o.fl., 1999].

Eins og áður sagði er tilgangur yfirborðsbylgjumælinga að afla upplýsinga um skúfbylgjuhraða jarðvegsins. Skúfbylgjuhraðann má nota beint til að meta ysjunarhættu með mótstöðuferlum [Andrus o.fl., 1999]. Í jarðskjálftastaðlinum EC8 er skúfbylgjuhraðinn notaður til að ákvarða jarðvegsgerð (e ground type). Þá er svokallaður meðalskúfbylgjuhraði fyrir efstu 30 metrana  $V_{S,30}$ , ákvarðaður sem

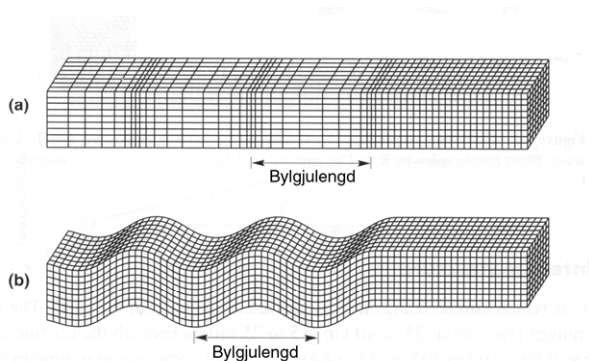
$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_i}} \quad (2.1)$$

þar sem  $h_i$  er þykkt lags númer  $i$  og  $V_i$  er skúfbylgjuhraðinn í lagi nr.  $i$  [CEN, 2003]. Jarðvegsgerðin er grundvöllur fyrir vali á svörunarrófi (e. response spectrum) sem nota á við mannvirkjahönnun.

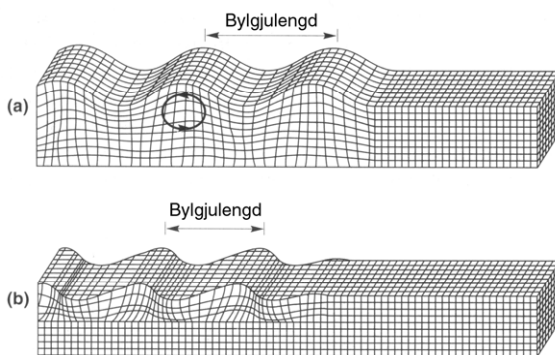
Skúfbylgjuhraðinn gefur upplýsingar um stífni jarðvegs því hann er í hlutfalli við skúfstuðulinn  $G$  en skúfstuðull er ein mikilvægasta kennistærðin til að ákvarða aflfræðilega eiginleika hans. Nánar verður fjallað um skúfstuðul í kafla 2.2.

## 2.1. Yfirborðsbylgjur

Til eru tvenns konar jarðskjálftabylgjur; annars vegar rúmbylgjur (body waves) og hins vegar yfirborðsbylgjur. Rúmbylgjur skiptast í þrýstibylgjur, einnig kallaðar P-bylgjur (e. compressive waves / primary waves), og skúfbylgjur sem einnig kallast S-bylgjur (e. shear waves / secondary waves). Efnishreyfing þrýstibylgna er samsíða útbreiðslustefnu bylgnanna en efnishreyfing skúfbylgna er hornrétt á útbreiðslustefnuna. Á mynd 2.1 er efnishreyfing rúmbylgna sýnd. Skúfbylgjur hafa láréttan og lóðréttan þátt. Þegar lárétti þáttur skúfbylgju nær yfirborði jarðar verður til yfirborðsbylgja sem kallast Lovebylgja. Þegar þrýstibylgja og lóðrétti þáttur skúfbylgju ná yfirborðinu verður til yfirborðsbylgja sem kallast Rayleighbylgja. Á mynd 2.2 er efnishreyfing yfirborðsbylgna sýnd.



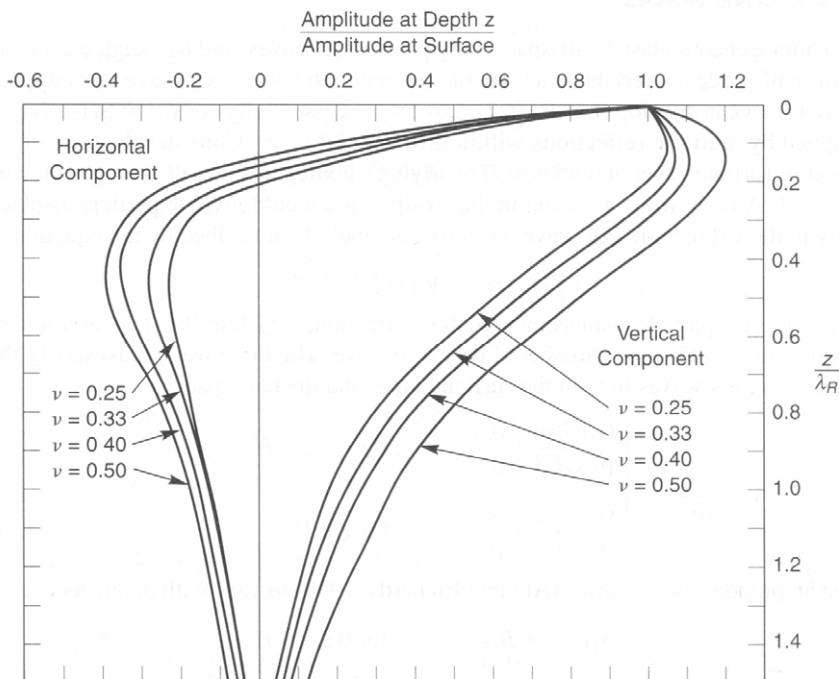
**Mynd 2.1:** Efnishreyfing rúmbylgna. a) Þrýstibylgjur, b) skúfbylgjur. Byggt á Kramer (1996).



**Mynd 2.2:** Efnishreyfing yfirborðsbylgna. a) Rayleighbylgjur, b) Lovebylgjur. Byggt á Kramer (1996).

Rayleighbylgjur verða einnig til við lóðrétt högg á yfirborðið og fara þá um tveir þriðju hlutar höggorkunnar í Rayleighbylgjunum [Donohue, 2005]. Efnishreyfing Rayleighbylgju er sporöskjulaga, svipuð ölduhreyfingu í vökva. Mynd 2.2 sýnir efnishreyfingu Rayleighbylgju. Útslag Rayleighbylgju minnkar veldislega með aukinni fjarlægð frá högggjafa. Bylgjuhreyfingin er sterkust næst yfirborðinu. Meirihluti orku

bylgjunnar er innan dýptar sem samsvarar um einni bylgjulengd hennar. Rayleighbylgjur með lága tíðni draga lengra ofan í jörðina en Rayleighbylgjur með hærri tíðni. Fyrir hverja tíðni geta myndast hærri sveifluform með hærri bylgjuhraða. Aðeins grunnhraðinn gefur upplýsingar um stífnina  $G_{max}$ . Á mynd 2.3 er efnishreyfing Rayleighbylgju sýnd með dýpi. Aðeins lóðrétti þáttur hennar (hægra megin á grafinu) er notaður við úrvinnslu SASW-gagna.



**Mynd 2.3:** Normaliseruð efnishreyfsla Rayleighbylgju sem fall af normaliseruðu dýpi. [Kramer, 1996].

Til er nálgun á sambandi Rayleighbylgjuhraða og skúfbylgjuhraða [Donohue, 2005]:

$$V_R \cong \frac{0.874 + 1.117\nu}{1 + \nu} V_S \quad (2.2)$$

þar sem  $\nu$  er Poisson's hlutfall,  $V_R$  er Rayleighbylgjuhraði og  $V_S$  skúfbylgjuhraði. Líkingin er ekki mjög næg fyrir Poisson's hlutfallinu  $\nu$  svo ekki skiptir öllu máli þótt það sé ekki ákvarðað nákvæmlega. Poisson's hlutfallið er ekki þekkt nákvæmlega fyrir staðina sem mælt var á í þessu verkefni og er því notað Poisson's hlutfallið  $\nu = 0.35$  í öllum reikningum sem framkvæmdir voru. Þá verður sambandið

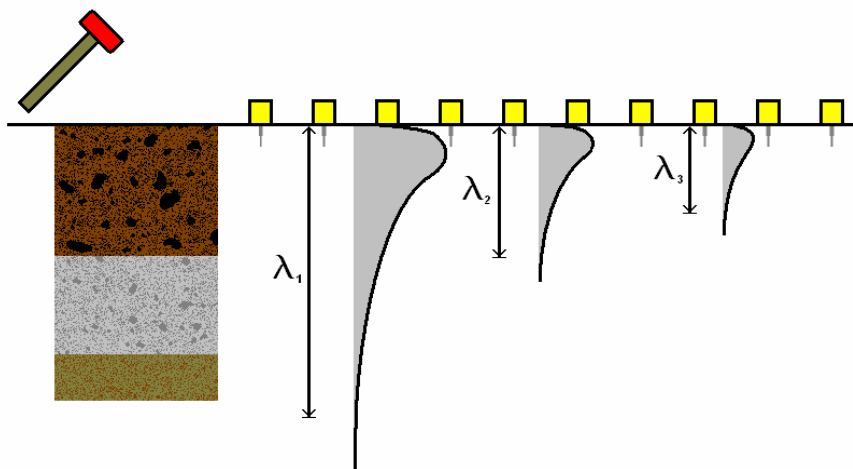
$$V_R \cong 0.937V_S \quad (2.3)$$

Einnig er til líking sem lýsir sambandi skúfbylgjuhraða  $V_S$  og þrýstibylgjuhraða  $V_P$  [Kramer, 1996]

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (2.4)$$

Hraði rúmbylgna í einsleitu (e. homogenius) efni er óháður dýpi. Þar sem til er samband á milli hraða rúmbylgna og Rayleighbylgjuhraða sem einungis er háð Poisson's hlutfalli er ljóst að Rayleighbylgjuhraði í einsleitu efni er óháður dýpi og þar af leiðandi óháður tíðni. Því er sagt að Rayleighbylgjur í einsleitu efni séu ótvísnar (e. nondispersive). Tvístrun er það nefnt þegar bylgjur með mismunandi bylgjulengd aðskiljast vegna mismunandi útbreiðsluhraða. Nærri yfirborði jarðar eykst stífni jarðvegs hratt og er jarðvegurinn því ekki einsleitur. Því eru Rayleighbylgjur í raunverulegu efni tvísnar.

Grundvöllur yfirborðsbylgjuaðferðarinnar er þessi tvístrunareiginleiki Rayleighbylgna. Útbreiðsluhraði bylgjunnar er háður stífni og eðlismassa laganna sem bera bylgjuna. Mældur er lóðréttur þáttur Rayleighbylgjunnar. Eftir því sem bylgjulengdin eykst nær efnishreyfingin dýpra niður í jörðina og því eru yfirborðsbylgjur með lengri bylgjulengd háðar efnisstuðlum á meira dýpi en bylgjur með styttri bylgjulengd. Þetta veldur bylgjuaðskilnaðnum. Útbreiðsluhraði Rayleighbylgna ákvarðast að mestu af efnisstuðlum jarðvegsins niður á um einnar bylgjulengdar dýpi [Donohue, 2005]. Sé bylgjulengd styttri en þykkt efsta jarðvegslags hefur einungis stífni þess lags áhrif á bylgjuhraðann. Sé bylgjulengdin lengri en dýpt eins lags ákvarðast bylgjuhraðinn af meðalstífni laganna sem hún örvar, veginni með tilliti til þykktar þeirra. Þetta má sjá á mynd 2.4.



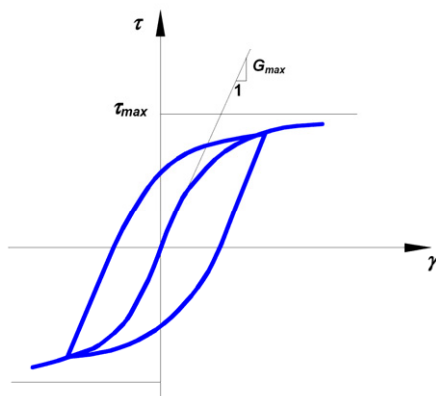
**Mynd 2.4:** Aðskilnaður yfirborðsbylgju með mismunandi útbreiðsluhraða. Hraði bylgjunnar með lengstu bylgjulengdina á myndinni ákvarðast af stífni allra þriggja laganna en hraði bylgjanna með styttri bylgjulengd ákvarðast einungis af stífni efsta lagsins. Lóðrétt efnishreyfing er mest nærri yfirborði.

Ferillinn sem lýsir sambandinu á milli bylgjulengdar og útbreiðsluhraða nefnist tvístrunarferill (e. dispersion curve).

## 2.2. Skúfstuðull jarðvegs

Meðal þeirra þátta sem hafa áhrif á stífni jarðvegs eru virk meðalspenna (e. volumetric stress), lotubundin streita, holrýmd (e. void ratio), þjálmi (e. plasticity index) og konsólíðering (e. overconsolidation, OCR) [Kramer, 1996]. Þar sem hér er aðeins fengist við sand er þjálmin engin og konsólíðeringin,  $OCR = 1$  [Das, 2002].

Í jarðskjálfta verður jarðvegurinn fyrir breytilegu skúfálagi. Hægt er að lýsa álaginu með álagsferli (e. hysteresis loop) [Sigurður Erlingsson, 1993]. Halli ferilsins er háður stífni jarðvegsins en breidd hans og þar af leiðandi flatarmál undir ferlinum er háð orkunni sem færslan eyðir. Á mynd 2.5 sést dæmi um álagsferil.



**Mynd 2.5:** Álagsferill við lotubundið álag [Atli G. Arnórsson, 2005].

Meðalskúfstuðullinn má lesa úr ferlinum á mynd 2.6 sem

$$G_{\text{sec}} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (2.5)$$

Skúfstuðullinn á hverjum tíma  $G_{\text{tan}}$  er lesinn beint af mynd 2.6 sem hallatala ferilsins. Stífni jarðvegs er mest við litlar formbreytingar. Út frá flatarmáli innan ferilsins er eydd orka fundin (e. dissipated energy). Í raunveruleikanum hagar jarðefni sér reyndar sjaldnast svona fyrir meira en eina álagslotu. Eftir því sem álagslotunum fjölga breikkar álagsferillinn venjulega [Kramer, 1996]. Dempunarhlutfallið má reikna sem

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (2.6)$$

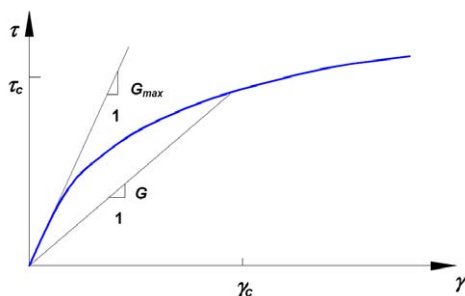
þar sem  $W_D$  er eydda orkan og  $W_S$  er streituorkan. Streituorkan er gefin sem

$$W_S = \frac{1}{2} \gamma_c \tau_c \quad (2.7)$$

Þessar tvær kennistærðir, þ.e. skúfstuðull og dempunarhlutfall eru með mikilvægustu inntaksstærðum í flest töluleg líkön sem meta jarðskjálftaáhrif.



Á mynd 2.6 er sýndur hjúperill (e. locus) nokkurra álagslota (e. backbone curve). Við mjög litlar formbreytingar hagar jarðvegur sér nánast fjaðrandi og er stífni hans þá óháð dýpi. Þar sem bylgjur þær sem til verða við yfirborðsbylgjumælingu valda mjög lítilli streitu geta þær gefið upplýsingar um hágildi skúfstuðulsins  $G_{max}$ .



**Mynd 2.6:** Dýnamískur skúfstuðul  $G$ . Við litlar formbreytingar fæst  $G_{max}$  [Atli G. Arnórsson, 2005].

Skúfstuðullinn er í réttu hlutfalli við eðlismassa jarðvegs og skúfbylgjuhraðann í öðru veldi

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (2.8)$$

þar sem  $G_{max}$  er dýnamískur skúfstuðull fyrir litlar formbreytingar (e. small strain modulus),  $\rho$  er eðlismassi og  $V_s$  er skúfbylgjuhraðinn [Kramer, 1996]. Skúfstuðullinn má meta með empirísku líkingunni

$$G_{max} = 625 \cdot \frac{1}{e^{1.3}} \cdot OCR^k \cdot P_a^{1-n} \cdot (\sigma'_m)^n \quad (2.9)$$

þar sem  $e$  er holrýmistalan,  $OCR$  er konsólíderingin,  $k$  er konsólíderingarstuðull,  $P_a = 100$  kPa er loftþrýstingurinn og  $\sigma'_m$  er virk meðalspenna. Fyrir sand er  $OCR = 1$  og  $k = 0$ . Yfirleitt er  $n = 0.5$  [Kramer, 1996].

Virk meðalspenna [Wood, 1990] er

$$\sigma'_m = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (2.10)$$

Fyrir sand og önnur gróf efni er skúfstuðull því aðeins háður holrým og spennuástandi. Fyrir sand er einnig stundum notuð líkingin

$$G_{max} = 1000 \cdot K_{2,max} \cdot (\sigma'_m)^{0.5} \quad (2.11)$$

þar sem  $K_{2,max}$  er háð holrým [Seed & Idriss, 1970]. Fyrir  $e = 0.4$  er  $K_{2,max} = 70$  og fyrir  $e = 0.9$  er  $K_{2,max} = 34$  sem dæmi.

Eins og sést á mynd 2.6 lækkar skúfstuðullinn með aukinni streitu. Þetta sést einnig á mynd 7.2.

Fjaðurstuðullinn er háður skúfstuðlinum með sambandinu

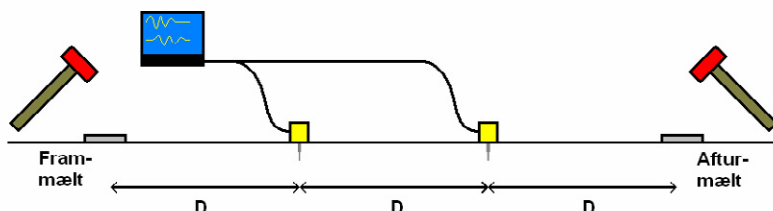
$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2.12)$$

## 2.3. Mælingar á skúfstuðli jarðvegs með SASW

### 2.3.1. Framkvæmd yfirborðsbylgjumælinga

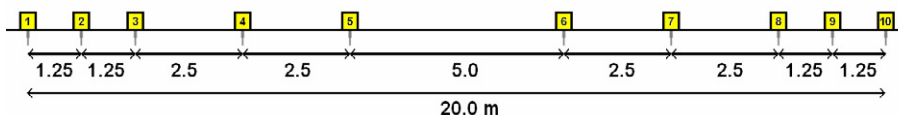
Yfirborðsbylgjumæling fer þannig fram að hraðanemum (e. geophones) er stillt upp í beina línu á yfirborði. Yfirleitt er notast við tvo til tólf hraðanema. Fasamunurinn á milli tveggja nema er notaður til að reikna Rayleighbylgjuhraðann. Fjarlægðin á milli þessara tveggja nema er höfð þannig að annar neminn sé mitt á milli hins nemans og höggins. Sé nemunum raðað skynsamlega er hægt að nota gögn úr mörgum nemapörum fyrir hvert högg. Höggið er svo fært til þess að fá meiri upplýsingar. Þegar lengra er á milli nemana mælast bylgjur sem náð hafa lengra ofan í jörðina.

Á mynd 2.7 má sjá eitt nemapar sem gefur af sér gögn þegar höggið er jafn langt frá öðrum nemanum og bilið er breitt á milli þeirra. Frekari gögn fást svo þegar högg er framkallað aftan við nemabilið. Tölvun skrárir hröðunartímaröð fyrir hvorn nemann um sig. Við úrvinnslu gagnanna er hægt að ákvarða bylgjuhraðann þar sem fjarlægð milli nema er þekkt.

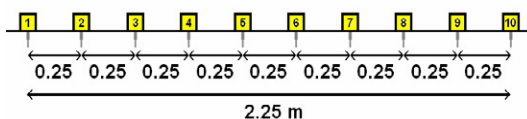


*Mynd 2.7: Tilhögun mælinga. Fjarlægðin á milli nema  $D$  er höfð jöfn fjarlægð höggs frá þeim nema sem nær er. Högg eru gefin framan og aftan við mæliferilinn.*

Í þessu verkefni voru notaðir tíu nepar og var notast við tvenns konar uppstillingu; annars vegar 20 m langan mæliferil með breytilegu millibili og hins vegar þéttari mæliferil, með jöfnu 25 cm bili á milli nema, til þess að freista þess að ná grynri mælingum, sjá myndir 2.8 og 2.9.



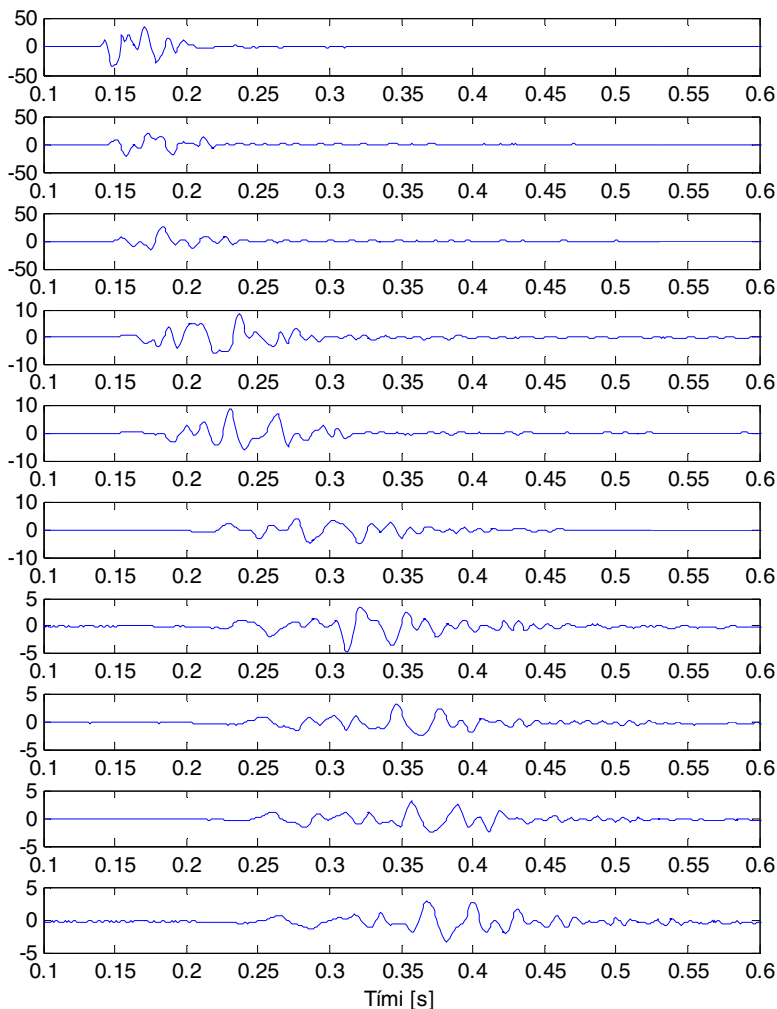
*Mynd 2.8: 20 m langur mæliferill.*



*Mynd 2.9: 2.25 m langur mæliferill.*

Nemarnir eru af gerðinni SM-6/U-B frá Sensor Netherlands með eigintíðni 4.5 Hz og dempunarhlutfall 0.70. Söfnunartækið er af gerðinni NI-USB-6218 frá National Instruments. Því er stýrt með fartölvu með hugbúnaði sem forritaður var í LabView.

Þrenns konar álag var notað; léttur slaghamar, hopp og 6 kg sleggja. Hoppið gaf að jafnaði bestar niðurstöður en erfitt reyndist að láta högg frá hoppi ná fulla 40 m að hinum enda mæliferilsins þegar mælt var í frosti. Við þær aðstæður reyndist 6 kg sleggjan best. Einnig er algengt að nota þung lóð sem sleppt er úr ákveðinni hæð. Slik högg ná venjulega að örva dýpri lög en högg með minni þunga. Ekki var notast við lóð við mælingar þær er gerðar voru í tengslum við þetta verkefni.



**Mynd 2.10:** Dæmi um frumgögn sem fást úr nemunum. Hér er höggið hopp í 1.25 m fjarlægð frá enda mæliferils. Greinilegt er hvernig bylgjan tvístrast.

Nánar er fjallað um framkvæmd mælinganna í 4. kafla.

### 2.3.2. Úrvinnsla gagna

Við úrvinnslu gagnanna er víxlrófsþéttni (e. cross spectral density)  $P_{xy}$  ákvörðuð fyrir hvert nemapar. Til þess er notað innbyggða fallið cpsd í MATLAB [MathWorks, 2004]. Gefa þarf fallinu söfnunartíðni og tvo dálkvigra fyrir viðkomandi nemapar. Söfnunartíðnin er 1000 Hz. Fallið varpar gögnunum úr nemunum tveimur,  $x(t)$  og  $y(t)$ , yfir í tíðnirúmið með Fourierummyndun.

Víxlrófsþéttin eða víxlrófið er fengið með því að margfalda  $X$ -vigurinn við samokataölu  $Y$ -vigursins í tíðnirúminu [Donohue, 2005]

$$\left. \begin{array}{l} x(t) \rightarrow FFT \rightarrow X(f) \\ y(t) \rightarrow FFT \rightarrow Y(f) \end{array} \right\} P_{xy}(f) = X(f) \cdot \overline{Y(f)} \quad (2.13)$$

þar sem  $t$  er tími og  $f$  er tíðni. Víxlrófið er tvinngilt (ef  $x$  og  $y$  eru ekki sami vigurinn). Tölugildi víxlrófsins myndar róf sem er einnig kallað magnróf (e. magnitude spectrum).

$$M_{xy}(f) = P_{xy}(f) \cdot \overline{P_{xy}(f)} \quad (2.14)$$

Út frá víxlrófinu  $P_{xy}$  er fasaróf (e. phase spectrum)  $\Phi$  nemanna fundið [Donohue, 2005].

$$\Phi_{xy}(f) = \arctan\left(\frac{\text{Im}(P_{xy}(f))}{\text{Re}(P_{xy}(f))}\right) \quad (2.15)$$

Það er gert með innbyggða fallinu angle í MATLAB [MathWorks, 2004].

Út frá magnrófinu og fasarófinu er ákvarðað það tíðnibil sem talið er gefa rétt gögn. Margir toppar magnrófs eða skyndileg breyting hallatölu magnrófs eða fasarófs gefa til kynna að gögn hærrí tíðna gefi ekki rétta Rayleighhraða. Stundum er þar um að ræða yfirsveiflur eða einhverjar truflanir í gögnunum. Einnig getur verið truflun í gögnunum fyrir allra lægstu tíðnirnar. Hér er möguleiki á mannlegum mistökum í úrvinnslunni þar sem erfitt getur reynst að átta sig á hvort gögnin séu tæk. Sennilega er ómögulegt að skrifa reiknirit sem ákvarðar það. Flest bendir þó til að vaxi stífni nokkuð jafnt með auknu dýpi sé fyrsta sveifluform ráðandi en séu stífar lög inn á milli geti hærrí sveifluform orðið ráðandi [Donohue, 2005].

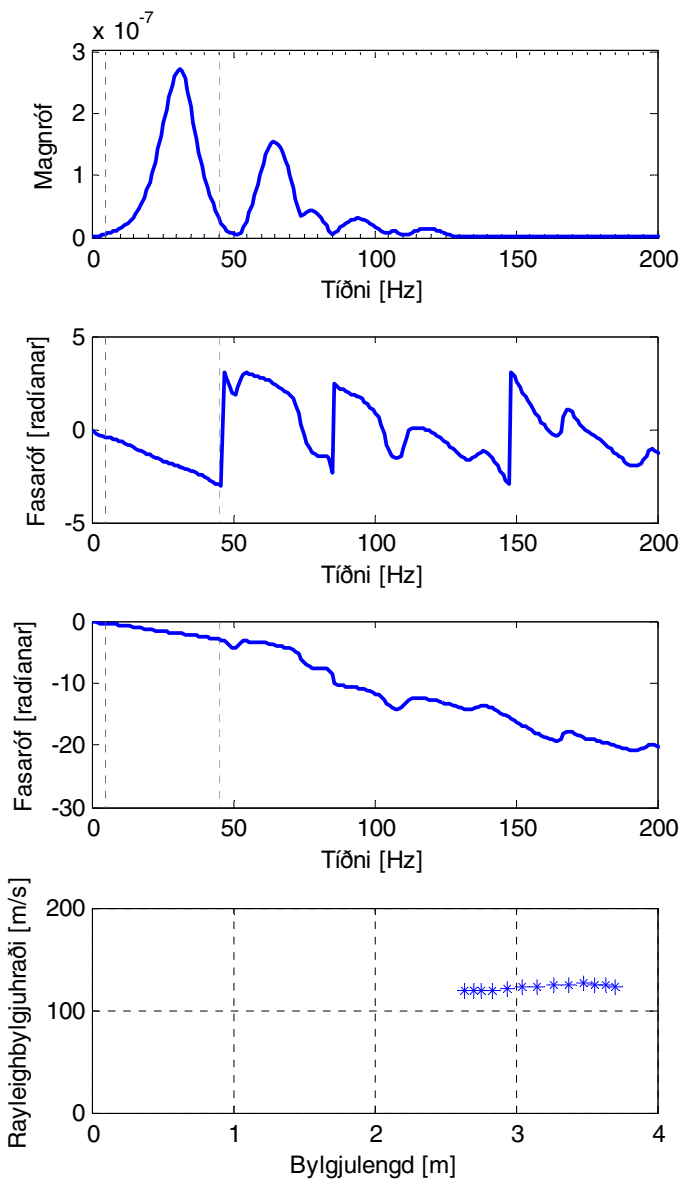
Rayleighbylgjuhraði er reiknaður fyrir öll stök fasarófsins sem eru innan tíðnimarkanna sem gefin voru [Jón Skúlason o.fl., 2001]. Hann er reiknaður með líkingunni

$$V_{R,ij} = \frac{D_{ij}}{t_{ij}(f)} = \frac{D_{ij}}{\left(\frac{-\Phi_{ij}(f)}{2\pi f}\right)} \quad (2.16)$$

þar sem  $D_{ij}$  er fjarlægð á milli nema  $i$  og  $j$ . Bylgjulengdin er

$$\lambda = \frac{V_R}{f} \quad (2.17)$$

Sé Rayleighbylgjuhraðinn teiknaður upp sem fall af  $\lambda$  fæst tvístrunarferill.



**Mynd 2.11:** Dæmi um úrvinnslu gagna úr yfirborðsbylgjumælingu. Efsta grafið sýnir magnrófið. Fyrsti toppurinn er stærstur sem þýðir að fyrsta sveifluform er ráðandi. Annað grafið sýnir fasarófið. Þriðja grafið sýnir fasarófið eftir að búið er að rétta úr því með því að hliðra stökkum niður um  $2\pi$ . Neðsta grafið sýnir tvístrunarferilinn sem fæst fyrir gefið tíðnibil. Tíðnibilið sem reiknað er fyrir er sýnt á efstu þremur gröfunum sem grá punktalína.

Búnaðurinn er aðeins fær um að mæla hraða fyrir bylgjulengdir í ákveðnu hlutfalli við fjarlægðina á milli nemanna. Venjan er að nota aðeins gögn fyrir bilið

$$\frac{D}{3} \leq \lambda \leq 3D \quad (2.18)$$

Þessir reikningar eru svo endurteknir fyrir hvert nemapar sem skoða skal. Hvert nemapar er valið þannig að fjarlægð höggs frá öðrum nemanum er jöfn bilinu á milli þeirra [Bjarni Bessason & Gunnar I. Baldvinsson, 1998].

Þegar búið er að reikna tvístrunarferla fyrir öll höggin og öll nemapörin eru þeir lagðir saman og meðaltalstvístrunarferill fundinn. Þetta er gert með því að skipta bylgjulengdum niður í þriðjaparts-áttundir (e.  $\frac{1}{3}$  octave-band) og reikna meðalhraða Rayleighbylgju og staðalfrávik fyrir hvert bil [Bjarni Bessason, 1998]. Áttund er það kallað þegar tíðni tvöfaldast (sbr. hljóðfræði) og þriðjaparts-áttund er því

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot 2^{1/3} \quad (2.19)$$

Því næst er tilgátudýptarsnið útbúið þar sem gerð er tilgáta um lagskiptingu jarðvegs og skúfbylgjuhraða í hverju lagi. Hverju lagi eru gefnir ákveðnir efniseiginleikar. Gott er að geta tekið sýni á mælistað til þess að fá upplýsingar um efnisgerð og lagskiptingu jarðvegsins. Tilgátusniðið er bakreiknað til þess að fá fræðilegan tvístrunarferil (e. theoretical dispersion curve). Það er gert með reiknilíkani sem reiknar stífnifylki fyrir röð jafna fjaðrandi óendanlegra láréttra laga [Kausel & Rosset, 1981]. Stífnifylkið er reiknað út frá upplýsingum um þykkt, Poisson's hlutfall, skúfbylgjuhraða og eðlismassa hvers lags. Þetta tilgátusnið er svo lagfært með ítrun (e. forward modeling) þar til fræðilegi tvístrunarferillinn fellur saman við tvístrunarferilinn sem fékkst með mælingum.

### 3. AÐSTÆÐUR Á SKEIÐARÁRSANDI

Skeiðarársandur nær frá Lómagnúpi í vestri að Örafajökli í austri. Norðan hans er Skeiðarárjökull. Á Sandinum eru þrjár stórar jökulár. Vestust þeirra eru Núpsvötn, nokkru austar er Gígjukvísl og austust er Skeiðará. Sandurinn er myndaður í hlaupum sem koma reglulega á um fimm til tíu ára fresti úr Grímsvötnum [Sigurður Þórarinnsson, 1974]. Á síðustu öld hefur Skeiðarárjökull hörfað um 2-3 km. Eftir að Jökullinn hörfaði síðast hafa jökulhlaup ekki skilað af sér neinu efni að ráði á Sandinn heldur hafa árnar grafið sig niður og skilað efninu af sér út í sjó. Árin 1997 og 1999 gerði Raunvísindastofnun Háskóla Íslands, í samstarfi við Orkustofnun og Louis Pasteur háskólann í Strasbourg, jarðeðlisfræðilegar mælingar á Skeiðarársandi til að ákvarða dýpi niður á fastann berggrunn. Gerðar voru svokallaðar bylgjubrotsmælingar (e. seismic refraction). Niðurstaða þessara mælinga er að við brúna yfir Gígjukvísl er dýpi niður á fast að minnsta kosti 80 m en við Skeiðarárbrú er dýpi niður á fast að minnsta kosti 180-210 m. Talið er að undir Skeiðará sé jökulsorfinn dalur. Þessi dalur er framhald af neðansjávargljúfri sem nefnist Skeiðarárdjúp [Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2002]. Niðurstöður bylgjubrotsmælinganna sýndu einnig að neðan við u.þ.b. 20-50 efstu metrana eru skýr mörk þar sem stífni eykst verulega. Ofan við þessi mörk var álitnið að væri illa pakkaður vatnsmettaður sandur. Ekki er vitað hvers vegna stífnin eykst svo skyndilega en annaðhvort er um að ræða finefnaríkari jarðveg eða mun þjappaðri sand með svipaða kornadreifingu.

#### 3.1. Efnisgerð

##### 3.1.1. Sýni við Skeiðará

Á árunum 1973-1974 framkvæmdi Vegagerð Ríkisins Borroboranir í brúarstæði Skeiðarárbrúar og austan hennar [Jón Skúlason, 1975]. Borroboranir fara þannig fram að stöng sem er 32 mm í þvermál er rekin niður í jarðveg með því að láta 67 kg lóð falla úr 50 cm hæð. Fjöldi högga sem þarf til að reka stöngina niður á lengdareiningu er notaður sem mælikvarði á stífni jarðvegsins. Sýni var einnig tekið á einum stað um 200 m vestan við brúarenda og 170 m sunnan vegar. Sýnið var tekið niður á 16.3 m dýpi. Rök rúmþyngd mældist  $2.25 \text{ t/m}^3$  á þriggja metra dýpi en  $1.9 \text{ t/m}^3$  á 16 m dýpi. Raki mældist 15-27 %. Sýnið var tekið á þann hátt að opinn 54 mm hólkur var rekinn 80 cm niður til að safna sýnunum og má því ætla að þau hafi þjappast nokkuð við sýnatökuna. Rúmþyngdin gæti því verið ofmetin. Ekki er heldur hægt að treysta rakagildi.

Hægt er þó að nýta þessar upplýsingar til að gefa gróft mat á holrýmd með líkingunni

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} \quad (3.1)$$

þar sem  $G_s$  er kornarúmþyngd,  $\gamma_w$  er rúmþyngd vats og  $\gamma_d$  er þurr rúmþyngd sem gefin er með líkingunni

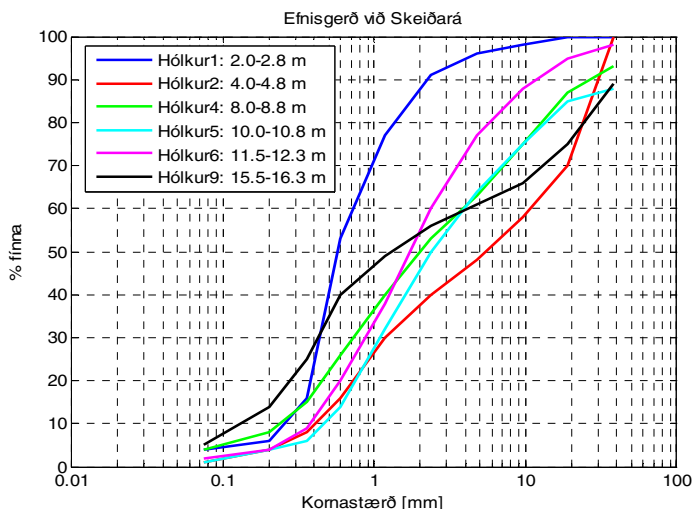
$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} \quad (3.2)$$

þar sem  $\gamma$  er rök rúmþyngd og  $\omega$  er rakainnihald.

**Tafla 3.1:** Gróft mat á holrýmd með formúlu 3.1 og skúfstuðli með formúlu 2.9.

Mælt				Reiknað				
dýpi [m]	$\omega$ [%]	$G_s$ [-]	$\rho$ [tonn/m <sup>3</sup> ]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$e$ [-]	$\sigma$ [kPa]	$G_{max}$ [MPa]
2.25	24	2.9	2.25	22.07	17.80	0.598	22.1	57.3
15.5	27	2.8	1.90	18.64	14.68	0.872	152.1	92.1

Hafa verður í huga að holrýmdin er sennilega vanmetin þar sem sýnin eru talin hafa þjappast við sýnatökuna. Því er dýnamíski skúfstuðullinn sennilega ofmetinn.



**Mynd 3.1:** Kornakúrfur úr borholu Vegagerðarinnar vestan Skeiðarárbrúar. Teknir voru 9 hólkar á mismunandi dýpi. Þrír mistókust og náðust því gögn úr sex hólkum. Byggt á Vegagerð Ríkisins (1975).

Eins og sést á mynd 3.1 er efnið finast efst og er þar frekar einskornóttur sandur. Neðan við 4 metra dýpi verður efnið malarkenndara. Neðst er efnið orðið tvíkornótt, sandur og möl. Þetta passar ágætlega við það að þegar efnið settist til var jökullinn að hörfa. Þegar neðsta lagið settist til var jökuljaðarinn nálægt sýnatökustaðnum og jökulvatnið frá honum gat því flutt gróft efni (möl). Þegar efstu lögin settust til hafði jökullinn hörfað lengra frá og hafði Skeiðará því sett mölina af sér næst jöklinum en finna efni settist til á sýnatökustaðnum [Sigurður Þórarinnsson, 1974]. Fínefnainnihald, þ.e. korn sem eru smærri en 0.075 mm, allra sýnanna er á bilinu 2 til 6 %. Athygli er vakin á því að yfirborðsbylgjumælingarnar voru gerðar austan brúarinnar um 1300 m frá sýnatökustaðnum og er því ekki öruggt að kornadreifingin sé nákvæmlega eins og á mælistaðnum.

### 3.1.2. Sýni við Gígjukvísl

Á árunum 1973-1974 framkvæmdi Vegagerð Ríkisins Borroboranir við brúarstæði Gígjukvíslar á Skeiðarársandi [Jón Skúlason, 1974]. Sýni var einnig tekið á einum



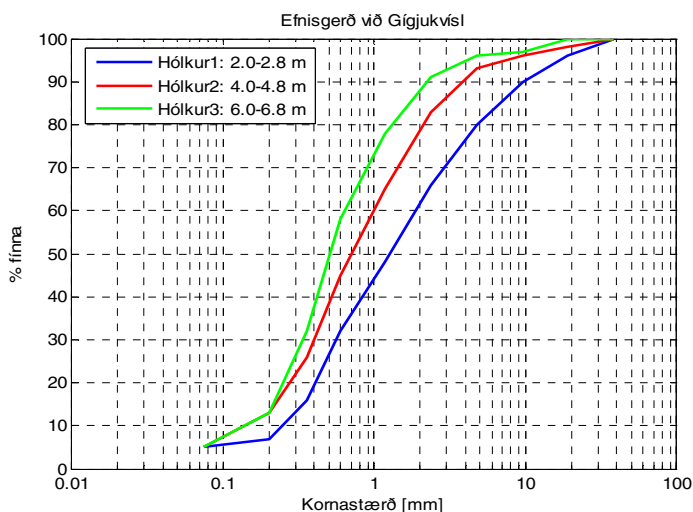
stað um 80 m vestan við vestasta stólpa gömlu brúarinnar og um 100 m norðan vegarins. Sýni voru tekin á 2, 4 og 6 m dýpi, sjá mynd 3.2. Rök rúmþyngd mældist  $1.8 \text{ t/m}^3$  á tveggja metra dýpi en  $1.85 \text{ t/m}^3$  á 6.5 m dýpi. Raki mældist 25%. Sýnið var tekið á sama hátt og við Skeiðará og því ekki hægt að treysta rúmþyngd eða raka fyllilega.

**Tafla 3.2:** Gróft mat á holrýmnd með formúlu 3.1 og skúfstuðli með formúlu 2.9.

Mælt				Reiknað				
dýpi	$\omega$	$G_s$	$\rho$	$\gamma$	$\gamma_d$	$e$	$\sigma$	$G_{max}$
[m]	[%]	[-]	[tonn/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[-]	[kPa]	[MPa]
2.5	26	2.7	1.8	17.66	14.01	0.890	24.5	36.0

Hafa verður í huga að holrýmndin er sennilega vanmetin þar sem sýnin eru talin hafa þjappast við sýnatökuna. Því er dýnamíski skúfstuðullinn sennilega ofmetinn.

Eins og sést á mynd 3.2 er finefnainnihald um 5-6 %.



**Mynd 3.2:** Kornakúrfur úr borholu Vegagerðarinnar vestan Gígjukvíslar. Teknikir voru þrjár hólkar. Byggt á Vegagerð Ríkisins (1974).

Eins og sést á mynd 3.2 breytist efnisgerð ekki mikið með dýpi, enda voru ekki tekin sýni jafn djúpt og við Skeiðará. Um er að ræða sand og fína mól. Ekkert er vitað um efnisgerð neðan við 7 m dýpi. Sýnatökustaðurinn sópaðist í burtu í Skeiðarárhlaupinu 1996. Yfirborðsbylgjumælingarnar voru gerðar um 1600 m vestan við sýnatökustaðinn og er því ekki öruggt að kornadreifingin þar sé eins og á sýnatökustað Vegagerðarinnar.



## 4. YFIRBORÐSBYLGJUMÆLINGAR

Þann 16. febrúar 2007 voru gerðar yfirborðsbylgjumælingar á Skeiðarársandi á tveimur stöðum, annars vegar við Gígjukvísl og hins vegar við Skeiðará. Eftir nokkuð langan hlýindakafli var vonast til að frost væri farið úr jörðu að mestu leyti en þegar á staðinn var komið reyndist sandurinn gaddfreðinn á um 10 cm dýpi. Reynt var að höggva í gegnum frostlagið til að kanna þykkt þess en það tókst ekki. Vatnsstaða var þarna mjög há og því mikill klaki í jörðu sem ekki hafði náð að bráðna þrátt fyrir undangengin hlýindi. Vatnsósa sandinum var mokað ofan af frostlaginu. Hóla var gerð í frostlagið með því að reka niður skrúffjárn og nemunum stungið í holurnar. Einnig var mokað ofan af álagspunktunum og slegið þar beint á frostið án þess að hafa plötu á milli.

Þann 16. apríl sama ár voru mælingarnar endurteknaðar á nákvæmlega sömu stöðum. Byrjað var á að sannreyna að allt frost væri farið úr jörðu. Mun betri aðstæður voru að þessu sinni til mælinga. Ekki þurfti eins þung högg og áður til þess að nemarnir næmu höggin. Prófað var að slá beint á sandinn auk þess sem prófað var að slá á 20x20 cm þykka álplötu. Á mynd 4.1 sést þegar stutta nemaferlinum er komið fyrir og nemarnir tengdir.



*Mynd 4.1: Stuttu mæliferlinum stillt upp við Gígjukvísl í apríl 2007. Í bakgrunninum sést 6 kg sleggjan sem notuð var til þess að framkalla högg. Ljósmynd: Davíð Rósenkrans Hauksson.*

Ekki reyndist vel að slá á plötuna. Merkið varð þá óhreinna, þ.e. fasarófið varð mjög flóktandi og erfiðara var að vinna úr gögnunum heldur en þegar slegið var beint á sandinn.

Á mynd 4.2 sést þar sem búið er að koma langa mæliferlinum fyrir við Gígjukvísl.



**Mynd 4.2:** Mælt með langa mæliferlinum við Gígjukvísl í febrúar 2007. Fyrir miðri mynd sjást gulu nemarnir. Snúra liggur inn í bílinn þar sem fartölva skráir mælingarnar. Hér er 6 kg sleggjan notuð til þess að framkalla högg. Ef vel er að gáð sést að búið er að moka lausum sandi ofan af frostlaginu. Slegið er beint á frostlagið og engin plata notuð á milli. Ljósmynd: Davíð Rósenkrans Hauksson.

Högg voru framkvæmd á þrennan hátt, með léttri sleggju, þungri sleggju (6 kg) og með því að hoppa. Á hvorum stað voru tvö snið mæld. Fyrst var mælt með 20 m löngum mæliferli með minnsta nemabil 1.25 m en síðan var mælt með 2.25 m löngum mæliferli, á sama stað, með jafnt nemabil 0.25 m. Högg voru framkölluð í beinni línu frá nemum á völdum stöðum í 1.25 m, 2.5 m, 12.5 m og 20 m fjarlægð frá fyrsta nema í langa ferlinum og í 0.25 m fjarlægð frá fyrsta nema í stutta ferlinum. Þetta var endurtekið á sama hátt í hina áttina. Í töflu 4.1 er tilgreint hvaða höggfjarlægðir voru notaðar og hvaða nemapör voru notuð fyrir hverja höggfjarlægð.

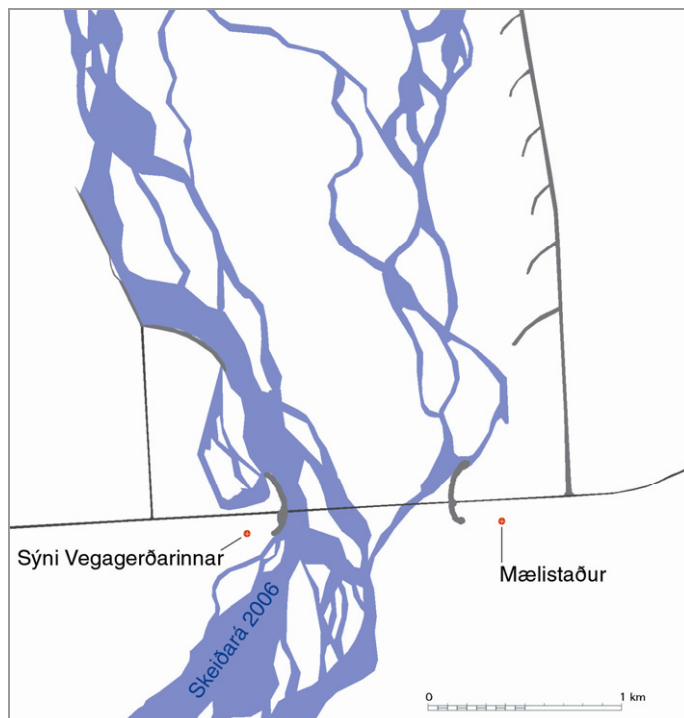
*Tafla 4.1: Nemapör sem uppfylla skilyrðið um jafna fjarlægð frá höggi í annan nemann og fjarlægðina á milli nemanna. Nemarnir eru númeraðir á myndum 2.8 og 2.9. Fram-mæling er þegar högg eru staðsett framan við nema 1 en aftur-mæling er þegar högg eru staðsett aftan við nema 10.*

Langi mæliferillinn (20 m)			Stutti mæliferillinn (2.25 m)		
Fjarlægð höggs frá endanema	Nemapör skoðuð		Fjarlægð höggs frá endanema	Nemapör skoðuð	
	Fram mæling	Aftur mæling		Fram mæling	Aftur mæling
1.25 m	1&2	10&9	0.25 m	1&2 2&4	10&9 9&7
2.5 m	1&3 2&4 3&5 4&6 5&8	10 8 9&7 8&6 7&5 6&3		3&6 4&8 5&10	8&5 7&3 6&1
12.5 m	1&6 2&7 3&8	10&5 9&4 8&3			
20 m	1&10	10&1			

Ekki náðust mikil gögn úr stutta mæliferlinum vegna næráhrifa og er því hæpið að það borgi sig að mæla með auka ferli.

#### 4.1. Mælingar við Skeiðará

Niðurstöður Borroborananna 1974 sýndu óbreytta bormótstöðu niður á um 15 m dýpi en þaðan jókst hún með dýpi. Boranir og sýnataka bentu til þess að jarðvegur væri gerður úr lagskiptum sandi og mól og hann væri ekki mjög grýttur. Ekki var veruleg breyting á aðstæðum frá einum stað til annars [Jón Skúlason, 1975].



**Mynd 4.3:** Staðsetning yfirborðsbylgjumælingarinnar og sýnatökustaður Vegagerðar Ríkisins frá 1974. Núverandi farvegur Skeiðarár ásamt þjóðvegi og varnargörðum. Tilraunastaurar Vegagerðarinnar voru reknir niður á sama stað og yfirborðsbylgjumælingin fór fram. Mynd unnin uppúr óútgefnu korti eftir Skúla Víkingsson (2007).

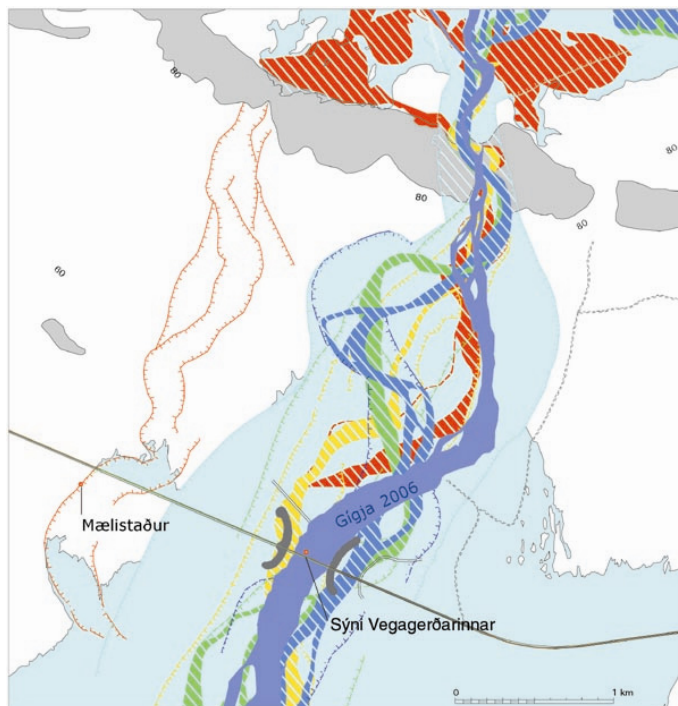
Ákveðið var að gera yfirborðsbylgjumælingar þar sem tilraunastaurar Vegagerðarinnar voru reknir niður árið 1974. Töluvert rask er á svæðinu. Stórir samkvæmleir burðarbitar úr stáli liggja þar sem Borrobórhola 12 frá 1973 var staðsett. Annaðhvort hefur því Skeiðarárhlaupið 1996 raskað gamla maelistaðnum eða þessir burðarbitar hafa verið dregnir þangað. Síðari skýringin er líklegri þar sem loftmyndir úr Skeiðarárhlaupinu gefa til kynna að aðeins bakvatn hafi flætt yfir maelistaðinn. Því er líklegast að efnisgerð jarðlaga sé nærri eins og fyrir var. Annað rask þarna nærri er jarðstrengur og uppýttur vegslóði. Ekki er talið að þær framkvæmdir hafi raskað maelistaðnum. Mælt var um 215 m austan við brúarendu og 100 m sunnan þjóðvegur. Maelistaðurinn er ca. 20-30 m frá þeim stað sem Vegagerð Ríkisins rak niður tilraunastaura 1974. Í fyrri maeliferðinni sem farin var í febrúar



Þegar frost var ekki farið úr jörðu var þessi staður mjög blautur og sandurinn ofan frostlagsins var vatnsmettaður. Í seinni ferðinni voru góðar aðstæður til mælinga.

## 4.2. Mælingar við Gígjukvísl

Niðurstöður Borroboranna 1974 sýndu nær óbreytta mótstöðu niður á um 10 m dýpi en þaðan jókst hún með dýpi. Út frá sýnunum var álitid að jarðvegurinn þarna væri gerður úr lauspökkuðum sandi niður á um 7.5 m dýpi en síðan tekur við malarkenndur sandur og nær niður á um 15 m dýpi [Jón Skúlason, 1974].



**Mynd 4.4:** Staðsetning yfirborðsbylgjumælingarinnar og sýnatökustaður Vegagerðar Ríkisins frá 1974. Núverandi farvegur Gígjukvíslar er dökkblár. Lituðu farvegirnir eru gamlir farvegir. Ljósblái liturinn sýnir hlaupfarveg Skeiðarárhlaupsins 1996. Þjóðvegurinn og varnargarðar eru dökkgráir. Ljósgráir flekkir eru jökulgarðar. Rauðu línurnar vinstra megin á kortinu sýna gamlan farveg en yfirborðsbylgjumælingar voru framkvæmdar uppi á vesturbrún hans. Mynd unnin upp úr korti eftir Ingibjörgu Kaldal (1997).

Sýnatökustaður Vegagerðarinnar frá 1974, á vesturbakka Gígjukvíslar, skolaðist í burtu í hlaupinu 1996. Gerðar voru yfirborðsbylgjumælingar um 40 m vestan við vestasta rofbakkann (um 1.5 km vestan brúarenda) og um 200 m sunnan vegar. Staðurinn var valinn vegna þess að hann er örugglega óhreyfður eftir flóð síðustu aldar. Því ætti jarðvegsgerð þar að vera svipuð þeirri sem Vegagerðin rannsakaði 1974. Einnig var vonast til að það væri ívið þurrara uppi á rofbökkunum og því auðveldara að mæla ofan á frostlaginu þar. Engin ummerki eftir framkvæmdir eru þarna nærri nema jarðstrengur sem er þar nokkra tugi metra frá.

### 4.3. Niðurstöður mælinga

Í töflum 4.2 og 4.3 má sjá niðurstöður yfirborðsbylgjumælinganna sem unnar voru í tengslum við þetta verkefni á Skeiðarásandi.

*Tafla 4.2: Niðurstöður yfirborðsbylgjumælinga á Skeiðarásandi fyrir frosna jörð.*

Skeiðará 20070216 - Frosið					
Lag nr.	Lagþykkt [m]	Þrýstibylgju-hraði [m/s]	Skúfbylgju-hraði [m/s]	Poisson's hlutfall [-]	Eðlismassi [tonn/m <sup>3</sup> ]
1	0.10	41.6	20.0	0.35	2.00
2	0.20	145.7	70.0	0.35	2.00
3	0.20	187.3	90.0	0.35	2.00
4	0.40	353.9	170.0	0.35	2.00
5	2.60	458.0	220.0	0.35	2.00
6	3.50	385.1	185.0	0.35	2.00
7	8.00	333.1	160.0	0.35	2.00

Gígjukvísl 20070216 - Frosið					
Lag nr.	Lagþykkt [m]	Þrýstibylgju-hraði [m/s]	Skúfbylgju-hraði [m/s]	Poisson's hlutfall [-]	Eðlismassi [tonn/m <sup>3</sup> ]
1	0.20	187.3	90.0	0.35	2.00
2	0.30	312.2	150.0	0.35	2.00
3	10.00	322.7	155.0	0.35	2.00
4	10.00	312.2	150.0	0.35	2.00

*Tafla 4.3: Niðurstöður yfirborðsbylgjumælinga á Skeiðarásandi fyrir ófrosna jörð.*

Skeiðará 20070416 - Ófrosið					
Lag nr.	Lagþykkt [m]	Þrýstibylgju-hraði [m/s]	Skúfbylgju-hraði [m/s]	Poisson's hlutfall [-]	Eðlismassi [tonn/m <sup>3</sup> ]
1	0.02	16.7	8.0	0.35	2.00
2	0.28	166.5	80.0	0.35	2.00
3	1.70	249.8	120.0	0.35	2.00
4	16.00	385.1	185.0	0.35	2.00

Gígjukvísl 20070416 - Ófrosið					
Lag nr.	Lagþykkt [m]	Þrýstibylgju-hraði [m/s]	Skúfbylgju-hraði [m/s]	Poisson's hlutfall [-]	Eðlismassi [tonn/m <sup>3</sup> ]
1	0.02	31.2	15.0	0.35	2.00
2	0.18	166.5	80.0	0.35	2.00
3	0.40	208.2	100.0	0.35	2.00
4	0.40	239.4	115.0	0.35	2.00
5	1.00	281.0	135.0	0.35	2.00
6	2.00	301.8	145.0	0.35	2.00
7	11.00	281.0	135.0	0.35	2.00

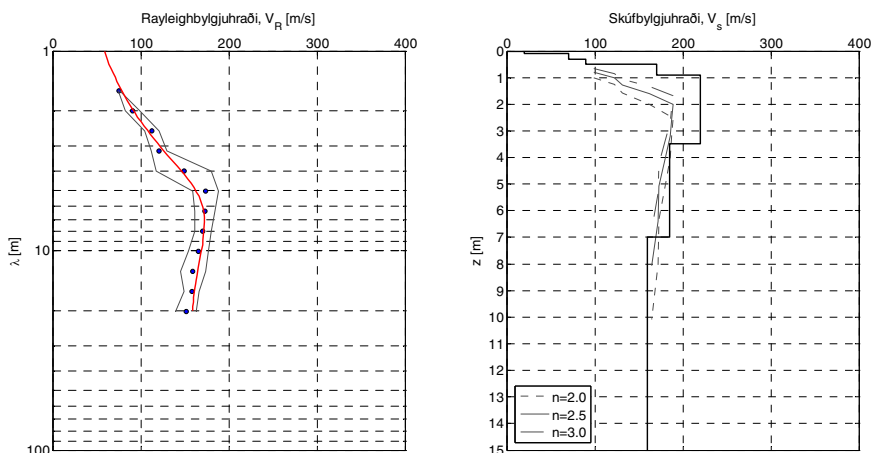


Í töflum 4.2 og 4.3 er búið að breyta Rayleighbylgjuhraðanum í þrýstibylgjuhraða og skúfbylgjuhraða fyrir hvert lag. Einnig kemur fram í töflunum Poisson's hlutfallið sem notað var og eðlismassinn.

Á myndum 4.5 til 4.8 eru niðurstöðurnar birtar í gröfum. Á vinstri myndinni er fræðilegi tvístrunarferillinn (rauður ferill) teiknaður upp ásamt meðaltali tvístrunarferla úr mælingum (bláir punktar) auk staðalfráviks mælinga. Á hægri myndinni er skúfbylgjuhraði teiknaður upp sem fall af dýpi. Þykki ferillinn er sú tilgáta sem gaf af sér fræðilega tvístrunarferilinn og er það niðurstaða mælinganna. Til samanburðar eru skúfbylgjuhraðar einkennandi bylgjulengdar (þunnu ferlarnir þrír) teiknaðir upp fyrir þrjú mismunandi gildi á  $n$  skv. líkingunni:

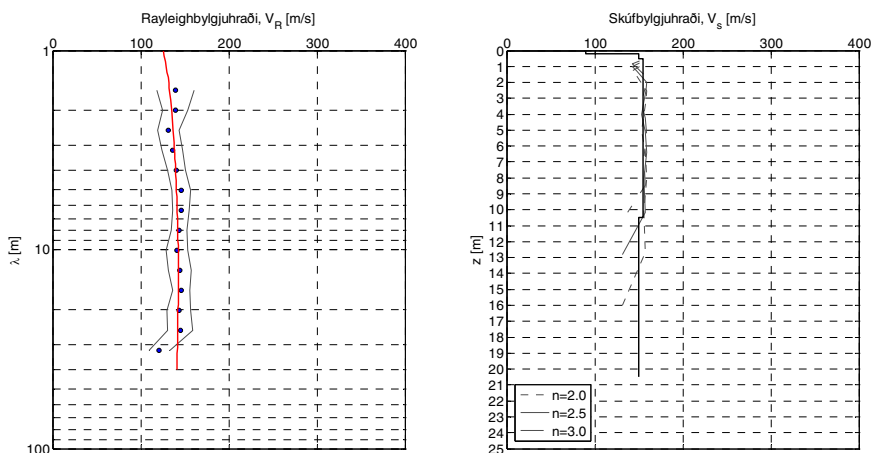
$$z = \frac{\lambda}{n} \quad (4.1)$$

en algengast er að  $n$  sé á bilinu 2.0 - 3.0 [Donohue, 2005]. Eins og sést á myndunum fellur tilgátuferillinn yfirleitt ágætlega við ferilinn sem fæst fyrir  $n = 2.0$ .



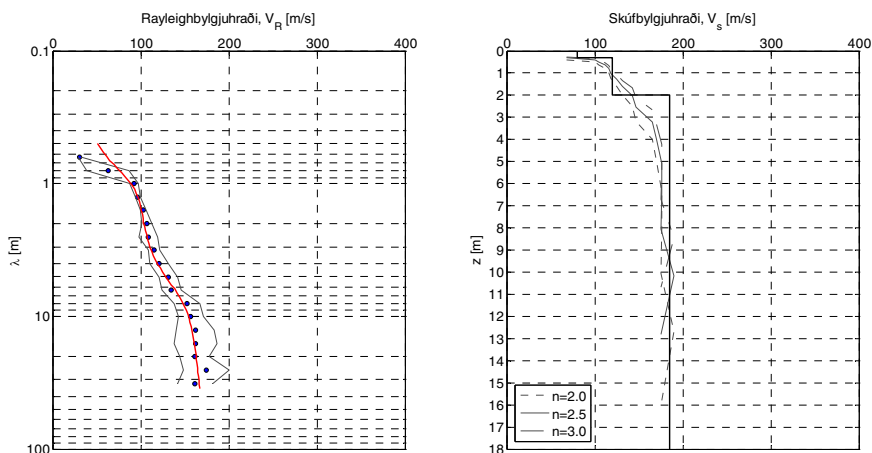
**Mynd 4.5:** Yfirborðsbylgjumæling við Skeiðará 16. febrúar 2007. Frost í yfirborði. Á vinstri myndinni er fræðilegi tvístrunarferillinn (rauður) ásamt mældum gildum (meðaltal og staðalfrávik). Á hægri myndinni er skúfbylgjuhraði sem fall af dýpi (skúfbylgjuhraðar einkennandi bylgjulengda ásamt tilgátulagskiptingunni).

Eins og sést á mynd 4.5 hækkar skúfbylgjuhraðinn við Skeiðará nokkuð hratt upp í 220 m/s nærri yfirborðinu með auknu dýpi en lækkar svo þaðan í frá. Það verður að teljast nokkuð óvenjulegt. Á mynd 4.6 má sjá niðurstöðuna úr febrúarmælingunni við Gígjukvísl. Þar sést einnig óvenjuleg niðurstaða því fyrir utan efstu sentimetrana er skúfbylgjuhraðinn óháður dýpi.

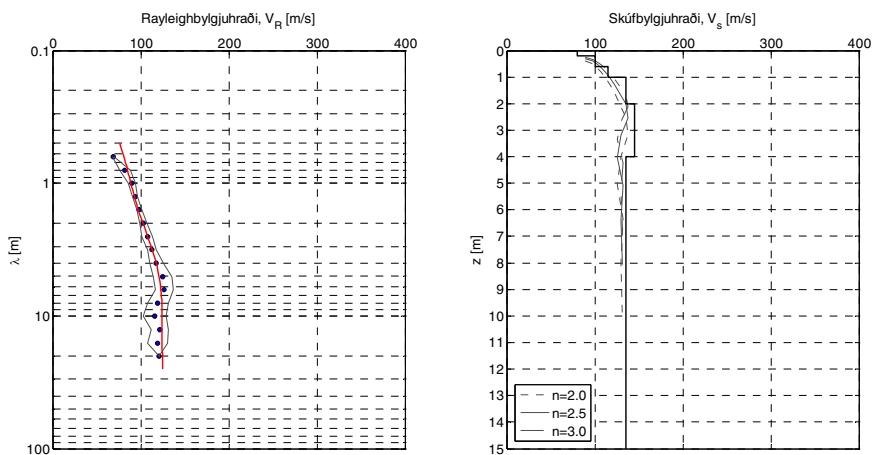


**Mynd 4.6:** Yfirborðsbylgjumæling við Gigjukvísl 16. febrúar 2007. Frost í yfirborði. Á vinstri myndinni er fræðilegi tvístrunarferillinn (rauður) ásamt mældum gildum (meðaltal og staðalfrávik). Á hægri myndinni er sküfbylgjuhraði sem fall af dýpi (sküfbylgjuhraðar einkennandi bylgjulengda ásamt tilgátulagskiptingunni).

Á mynd 4.7 sést niðurstaðan úr aprilmælingu við Skeiðará. Niðurstöður þessarar mælingar eru örlítið nær því sem vænta mátti. Þó hættir stífnin að aukast með auknu dýpi neðan við efstu tvo metrana. Ekki var hægt að láta fræðilega ferilinn falla ofan í mælingar fyrir efstu tvo gagnapunktana.



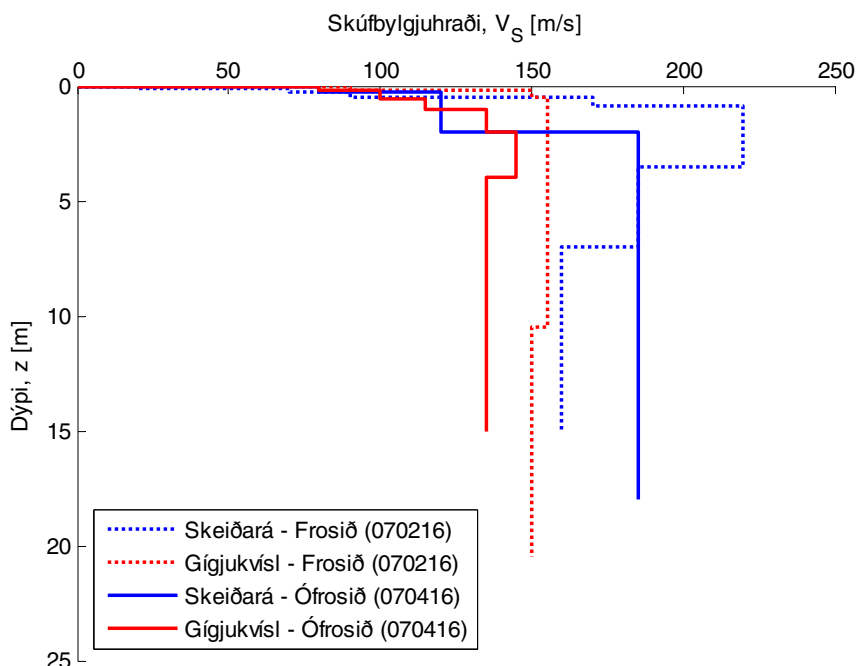
**Mynd 4.7:** Yfirborðsbylgjumæling við Skeiðará 16. apríl 2007. Frostlaus mæling. Á vinstri myndinni er fræðilegi tvístrunarferillinn (rauður) ásamt mældum gildum (meðaltal og staðalfrávik). Á hægri myndinni er sküfbylgjuhraði sem fall af dýpi (sküfbylgjuhraðar einkennandi bylgjulengda ásamt tilgátulagskiptingunni).



**Mynd 4.8:** Yfirborðsbylgjumæling við Gígjukvísl 16. apríl 2007. Frostlaus mæling. Á vinstri myndinni er fræðilegi tvístrunarferillinn (rauður) ásamt mældum gildum (meðaltal og staðalfrávik). Á hægri myndinni er skúfbylgjuhraði sem fall af dýpi (skúfbylgjuhraðar einkennandi bylgjulengda ásamt tilgátulagskiptingunni).

Á mynd 4.8 eru niðurstöður aprílmælingar við Gígjukvísl. Fræðilegi ferillinn fellur vel ofan í mælingarnar. Skúfbylgjuhraðinn eykst fyrstu metrana en helst svo nær óbreyttur með auknu dýpi.

Á mynd 4.9 eru niðurstöður mælinganna sýndar saman. Heilar línur tákna niðurstöður mælinga í ófrosinni jörð en punktalínur tákna niðurstöður mælinga sem framkvæmdar voru í frosinni jörð.



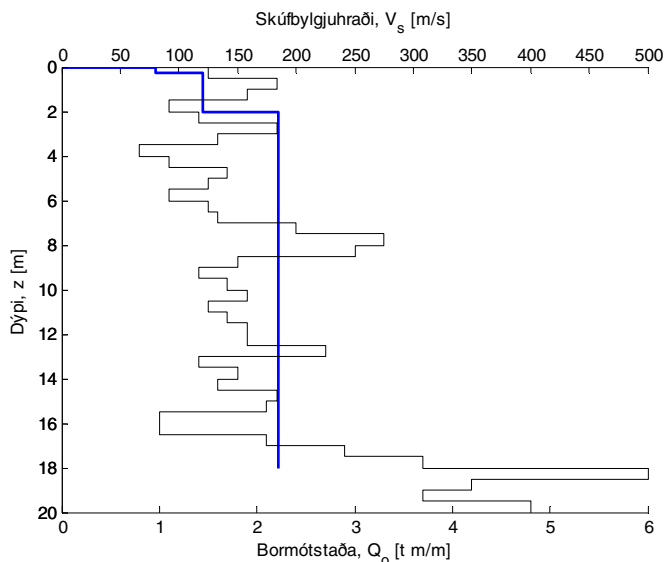
**Mynd 4.9:** Samantekt á mæliniðurstöðum. Skúfbylgjuhraði teiknaður upp sem fall af dýpi. Heilar línur tákna niðurstöður mælinga í ófrosinni jörð en punktalínur tákna niðurstöður mælinga sem framkvæmdar voru í frosinni jörð.

Eins og sést á grafinu er nokkur munur á niðurstöðum mælinga sem framkvæmdar voru í frosinni og ófrosinni jörð þrátt fyrir að þær hafi verið framkvæmdar á nákvæmlega sama stað. Þetta bendir til þess að það skipti máli hvort frosið lag sé í yfirborði eða ekki. Frosna lagið hefur sennilega truflað niðurstöður mælinga djúpt niður en ekki aðeins nærri yfirborði þar sem efnið var frosið. Einungis er stuðst við þær mælingar sem framkvæmdar voru á ófrosinni jörð við mat á ysjunarhættu hér síðar.

### 4.3.1. Samanburður yfirborðsbylgjumælinga og Borroborana

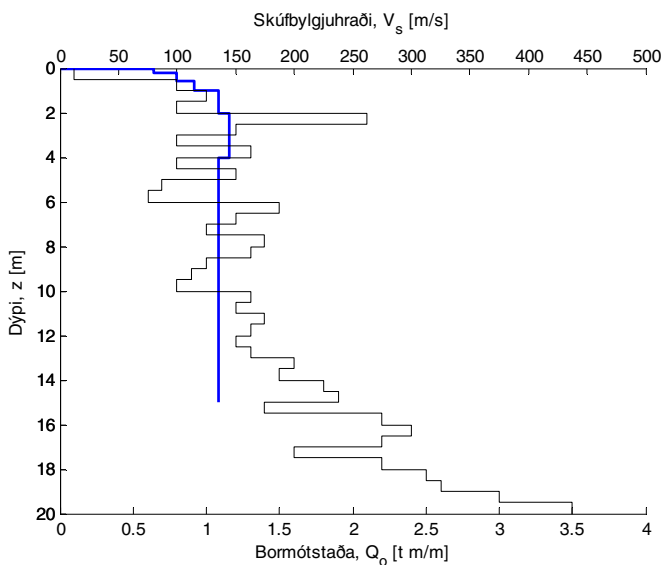
Á myndum 4.10 og 4.11 er niðurstaða yfirborðsbylgjumælinganna teiknuð ásamt bormótstöðunni sem Vegagerðin mældi á áttunda áratugnum. Eins og sést á gröfunum er bormótstaðan mjög breytileg en yfirborðsbylgjumælingarnar mæla ekki slíkan breytileika, enda mælir hún meðaleiginleika og er alls ekki næm fyrir lagskiptingu eins og áður var fjallað um.

Við Skeiðará eykst Borrobormótstaðan lítið með dýpi niður á 17 m dýpi en eykst svo nokkuð hratt þegar neðar dregur eins og sést á mynd 4.10. Hægt var að mæla niður á 18 m dýpi með yfirborðsbylgjuaðferðinni. Með henni var ekki hægt að nema nein lagskipti neðan við 2 m.



**Mynd 4.10:** Bormótstaða og skúfbylgjuhraði við Skeiðará.

Við Gígjukvísl eykst Borrobormótstaðan lítið niður á um 10 m dýpi en eykst svo nokkuð hratt þegar neðar dregur eins og sést á mynd 4.11. Hægt var að mæla niður á 15 m dýpi með yfirborðsbylgjuaðferðinni. Sú aðferð nam ekki nein lagskipti neðan við 4 m. Mjög fáir mælipunktar liggja til grundvallar mælingu á skúfbylgjuhraða fyrir neðstu metrana. Þar er upplausnin í gögnunum slæm. Ef hægt hefði verið að ná mælingum dýpra niður með yfirborðsbylgjuaðferðinni er allt eins víst að hún hefði numið aukna stífni eins og Borrobóranimar gáfu til kynna að væri neðan við 10 m dýpi.

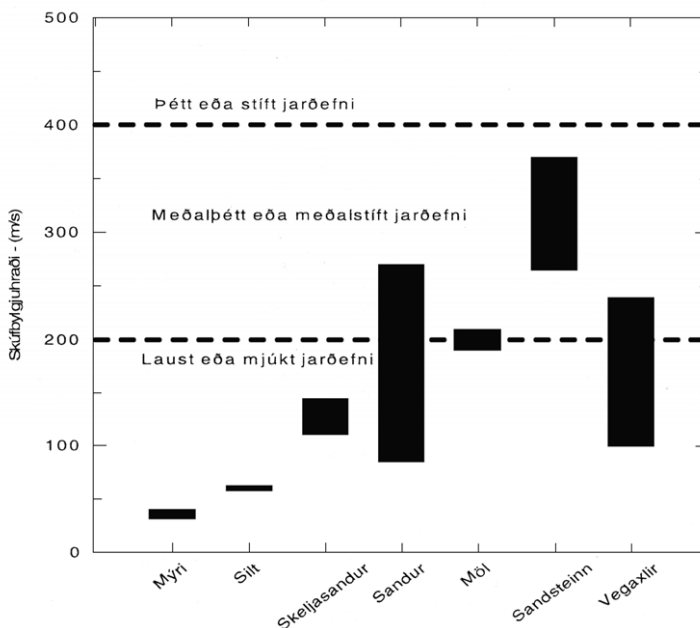


**Mynd 4.11:** Bormótstaða og skúfbylgjuhraði við Gígjukvísl.



## 5. SAMANBURÐUR VIÐ ELÐRI MÆLINGAR

Gerðar hafa verið yfirborðsbylgjumælingar víðs vegar um Ísland síðustu áratugina. Stöðugt bætist við upplýsingar um skúfbylgjuhraða í íslenskum jarðefnum. Á mynd 5.1 má sjá á hvaða bili algengt er að skúfbylgjuhraði mælist hér á landi [Jón Skúlason o.fl. 2001]. Myndin er aðeins til viðmiðunar og þýðir ekki að skúfbylgjuhraði hafi ekki mælst utan við gildin sem hún sýnir.



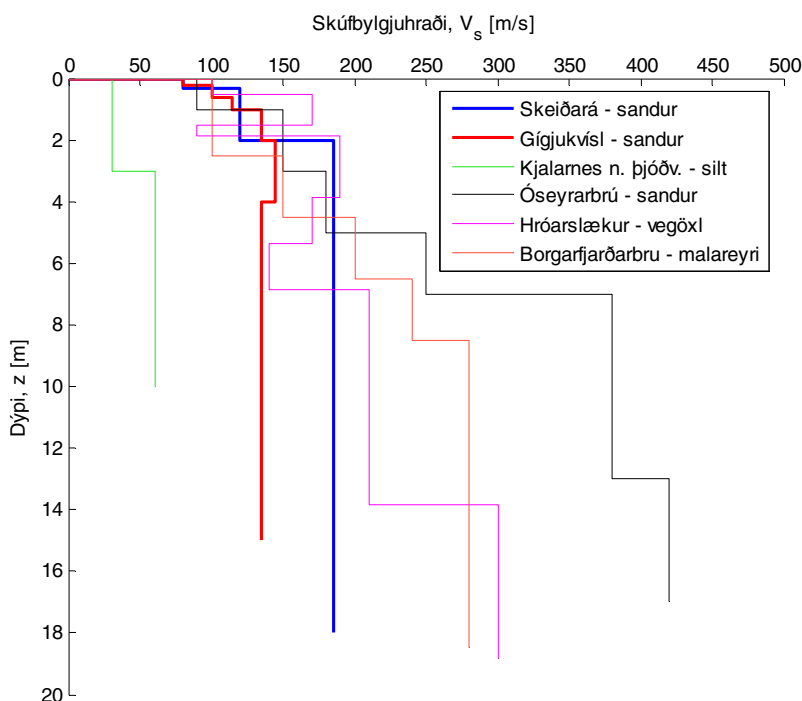
**Mynd 5.1:** Samanburður á mældum skúfbylgjuhraða í mismunandi jarðefnum. [Jón Skúlason o.fl. 2001a].

Á mynd 5.2 eru niðurstöður nokkurra yfirborðsbylgjumælinga sem framkvæmdar hafa verið hér á landi settar fram með niðurstöðum mælinganna sem gerðar voru í tengslum við þetta verkefni á Skeiðarársandi.

Valdir voru nokkrir staðir sem þóttu gefa dæmigerðar niðurstöður yfirborðsbylgjumælinga hér á landi og áhugavert væri að bera saman við mælingarnar sem gerðar voru á Skeiðarársandi.

Mælingarnar sem birtar eru á mynd 5.2:

- Austan Skeiðarárbrúar, sunnan við veg – sandur og fin möl.
- Vestan Gígjukvíslarbrúar, sunnan við veg – sandur.
- Kjalarnes norðan Þjóðvegur – silt [Jón Skúlason o.fl., 1998].
- Eyri vestan Óseyrarbrúar – meðalgrófur sandur [Jón Skúlason o.fl., 1998].
- Vegöxl austan við brú á Hróarslæk – finn sandur og silt [Jón Skúlason o.fl., 1997].
- Malareyri norðan við Borgarfjarðarbrú, vestan við veg – sandur og möl [Jón Skúlason o.fl., 1997].



**Mynd 5.2:** Samanburður á skúfbylgjuhraða á nokkrum stöðum á Íslandi.

Áberandi er hve lágur skúfbylgjuhraði mælist í silti miðað við hin efnin. Í mælingunni á Kjalarnesi er skúfbylgjuhraðinn á bilinu 30-60 m/s sem er reyndar minni hraði en mynd 5.1 spáir til um fyrir silt.

Á vegöxl austan við brúna á Hróarslæk mældist skúfbylgjuhraðinn 100-280 m/s.

Malareyri við Borgarfjarðarbrú mældist með skúfbylgjuhraða 100-190 m/s og sandur við Óseyrarbrú mældist með skúfbylgjuhraða 90-420 m/s sem á við um stíft efni. Reyndar er þekkt erlendis frá að skúfbylgjuhraði fyrir blautan sand geti farið allt upp í 600 m/s [Jaeger o.fl., 2007].



Eins og sést á mynd 5.2 falla niðurstöður mælinganna á Skeiðarársandi vel við eldri mælingar fyrir sendin efni efstu 6 metrana. Mælingarnar á Skeiðarársandi skera sig frá öðrum mælingum að því leyti að ekki mældist aukin stífni með auknu dýpi neðan við efstu metrana eins og búast hefði mátt við. Skýringin á þessu kann að felast í því að efnið á Skeiðarársandi settist til í jökulhlaupum þar sem áin skilaði af sér miklu magni af sandi á stuttum tíma og hefur ekkert getað átt við það síðan [Magnús T. Guðmundsson, 2002]. Efnið liggur eins og það var þegar áin skilaði því af sér og ekkert náttúruafl hefur getað pakkað því síðan nema þyngdaraflið. Á áreyrum þar sem ár flæmast um er aðra sögu að segja. Þar fær áin tækifæri til að endurraða kornunum aftur og aftur eftir að þeim var fyrst skilað í vatnavöxtum. Kornin leggjast því betur til og þjöppun verður meiri. Sömu sögu er að segja um sand sem fellur til í fjöru. Þá fær sjórinn mörg tækifæri til að endurraða kornunum þannig að þjöppunin eykst.

Ástæða er því til að ætla að sandurinn á Skeiðarársandi sé verr pakkaður en sandur sem myndaður er á annan hátt þrátt fyrir að kornastærðardreifing þeirra sé áþekkt. Þetta gæti skýrt hversu frábrugðnar niðurstöðurnar eru fyrri mælingum.

Í töflu 5.1 eru gildi skúfstuðuls úr töflum 3.1 og 3.2 borin saman við niðurstöður skúfbylgjumælinganna.

**Tafla 5.1:** Samanburður á skúfstuðli sem fenginn er með empirísku formúlunni (jöfnu 2.9) og yfirborðsbylgjumælingunum með jöfnu 2.8.

Staðsetning	dýpi [m]	$\rho$ mælt [tonn/m <sup>3</sup> ]	$V_s$ [m/s]	jafna 2.9 $G_{max}$ [MPa]	jafna 2.8 $G_{max}$ [MPa]
Skeiðará	2.25 m	2.25	185	57.3	77.0
Skeiðará	15.5 m	1.90	185	92.1	65.0
Gígjukvísl	2.5 m	1.75	145	33.4	36.8

Hér sést að gildin eru alls ekki svo frábrugðin. Eðlismassi sá sem fékkst við sýnatökuna var notaður í báðum tilfellum. Hafa þarf í huga að sýnin voru ekki tekin á sama stað og skúfbylgjumælingarnar fóru fram á.

Í töflu 5.2 er skoðað hver eðlismassinn þyrfti að vera til þess að fá sömu gildi á empirísku skúfstuðlana (jafna 2.9) og skúfstuðlana sem fengust út frá yfirborðsbylgjumælingum ef raka er haldið óbreyttum.

**Tafla 5.2:** Reiknaður eðlismassi sem gefur sama skúfstuðul og fæst úr yfirborðsbylgjumælingum borinn saman við eðlismassa sýna Vegagerðarinnar.

Staðsetning	dýpi [m]	$\rho$ mælt [tonn/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ reiknað [tonn/m <sup>3</sup> ]	$V_s$ [m/s]	$G_{max}$ [MPa]
Skeiðará	2.25 m	2.25	2.43	185	77.0
Skeiðará	15.5 m	1.90	1.66	185	65.0
Gígjukvísl	2.5 m	1.75	1.81	145	36.8



## 6. YSJUN

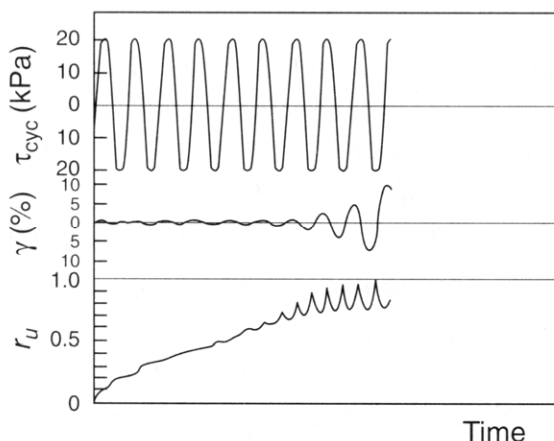
Einn mikilvægasti þátturinn í hönnun undirstöðu mannvirkis sem grundað er á lausum jarðlögum er að gera sér grein fyrir hvort hætta sé á að ysjun geti átt sér stað við jarðskjálftaáraun.

Ysjun (e. liquefaction) á sér stað þegar aukinn vatnsþrýstingur byggist hratt upp og veldur verulegri lækun á stífni og burði (skúfstyrk) jarðvegs. Þegar skúfstyrkurinn tapast algerlega er talað um fullkomna ysjun (e. complete liquefaction). Venjulega þegar talað er um ysjun er átt við fullkomna ysjun sem leiðir af sér brot.

Hlutfallslegur þóruvatnsþrýstingur (e. pore pressure ratio)  $r_u$  er skilgreindur sem

$$r_u = \frac{u_{ex}}{\sigma'_{3c}} \quad (6.1)$$

þar sem  $u_{ex}$  er þóruvatnsþrýstingur (e. excess pore pressure) og  $\sigma'_{3c}$  er virk lóðrétt spenna (e. effective confining pressure). Á mynd 6.1 er sýnt hvernig lotubundið álag veldur uppbyggingu þóruvatnsþrýstings þar til ysjun á sér stað ( $r_u = 1$ ).



**Mynd 6.1:** Dýnamískt þríásapróf. Efst er virkt skúfálag, svo er skúfstreyta og neðst er hlutfallslegur þóruvatnsþrýstingur [Kramer, 1996].

### 6.1. Mat á ysjunarhættu

Seed og Idriss (1970) settu fram aðferð til að meta ysjunarhættu. Þessi aðferð kallast einfaldaða aðferðin (e. simplified procedure). Upphaflega var aðferðin þróuð til að meta ysjunarhættu út frá SPT (e. Standard Penetration Test) prófunarniðurstöðum. Á níunda áratugnum var aðferðin aðlöguð að BPT (e. Becker Penetration Test), CPT (e. Cone Penetration Test), SASW aðferðinni og nokkrum bylgjuaðferðum skyldum SASW. Nokkuð traust þykir að nota einfölduðu aðferðina með skúfbylgjuhraða því skúfbylgjuhraði og ysjunarmótstaða eru háð mörgum sameiginlegum breytum svo sem holrýmd, spennuástandi, spennusögu og jarðsögulegum þáttum [Andrus o.fl., 1999].

Aðferðin leggur annars vegar mat á áraun frá jarðskjálfta á jarðlög og hins vegar á mótstöðu gegn ysjun.

Áraun frá jarðskjálfta er metin með því að reikna dýnamískt skúfspennuhlutfall,  $CSR$  (e. cyclic stress ratio)

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \sigma_v r_d \quad (6.2)$$

þar sem  $\tau_{cyc}$  er jafngild skúfspenna vegna jarðskjálfta,  $\sigma'_{v0}$  virk lóðrétt spenna á viðkomandi dýpi,  $a_{max}$  mesta yfirborðshröðun jarðskjálfta,  $g$  þyngdarhröðun,  $\sigma_v$  lóðrétt spenna og  $r_d$  dempunarstuðull háður dýpi (e. stress reduction factor).  $CSR$  er sem sagt hægt að reikna beint út frá yfirborðshröðun eða út frá jarðskjálftahreyfingu sem skilgreind er sem tímaröð í berginu undir jarðveginum eins og gert er með forritinu SHAKE í þessu verkefni.

Einfaldaða aðferðin notast við leiðrétta skúfbylgjuhraða þar sem hann er leiðréttur með tilliti til lóðréttrar spennu (overburden pressure) [Andrus, o.fl., 1999].

$$V_{s1} = V_s \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25} \quad (6.3)$$

þar sem  $P_a$  er loftþrýstingur (100 kPa).

Í einfölduðu aðferðinni er notast við svokallaða mótstöðuferla til að meta mótstöðu gegn ysjun. Til þess er reiknað dýnamískt mótstöðuhlutfall  $CRR$  (e. cyclic resistance ratio), sem fundið er á eftirfarandi hátt [Andrus o.fl., 1999]

$$CRR = \left\{ a \left( \frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + b \left( \frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) \right\} MSF \quad (6.4)$$

þar sem  $a$  og  $b$  eru ferilaðlögunarstuðlar. Mótstöðuferlarnir byggja á athugunum á jarðskjálftasvæðum þar sem ysjun hefur ýmist átt sér stað eða ekki. Mótstöðuferlarnir eru hugsaðir sem efri mörk ysjunar og eiga að umlykja um 95% ysjunartilfella í þekktum gögnum. Til þess að svo megi verða er  $a = 0.022$  og  $b = 2.8$  [Andrus o.fl., 1999]. Mælipunktur þar sem ekki verður ysjun geta því lent ofan mótstöðuferilsins.  $V_{s1}^*$  er aðfella mótstöðuferilsins, þ.e. sá skúfbylgjuhraði þar sem dýnamíska mótstöðuhlutfallið verður óháð skúfbylgjuhraða.  $V_{s1}^*$  er háður fínafnhlutfalli,  $FC$ , efnisins [Jón Skúlason o.fl., 2001a]

$$V_{s1}^* = \begin{cases} 215 \text{ m/s} & \text{fyrir sand og möl með } FC \leq 5\% \\ 215 - 0.5(FC - 5) \text{ m/s} & \text{fyrir sand og möl með } 5\% \leq FC < 35\% \\ 200 \text{ m/s} & \text{fyrir sand og möl með } FC \geq 35\% \end{cases} \quad (6.5)$$

þar sem fínafnhlutfall við mælistaðina er um og undir 5% [Jón Skúlason, 1974 og 1975] er  $V_{s1}^* = 215$  m/s.

Mikilvægustu eiginleikar jarðskjálfta fyrir hönnun mannvirkja eru útslag, tíðni-innihald og varandi (e. duration).

Jarðskjálftabylgjur geta magnast þegar þær berast úr berggrunnum upp í gegnum laus jarðlög. Þessi mögnun er háð þykkt, efnisgerð og lagskiptingu jarðvegsins.

Í jarðskjálfta er hreyfing yfirborðsins óregluleg og útgildi geta verið mjög staðbundin. Þegar skúfspanna sem nota skal við mat á áhrifum jarðskjálfta er ákvörðuð er venja að skilgreina jafngilda skúfspannu vegna jarðskjálfta  $\tau_{cyc}$  sem 65% hæstu skúfspannu [Kramer, 1996]

$$\tau_{cyc} = 0.65 \cdot \tau_{max} \quad (6.6)$$

Stærð jarðskjálfta er mæling á orkunni sem losnar í upptökum skjálftans. Stærð skjálfta er nátengd varanda hreyfingar jarðskjálfta og því einnig fjölda álagslota sem jarðefnið verður fyrir.

Síðasti liðurinn í jöfnu 6.4 kallast styrkleikastuðull, *MSF* (e. magnitude scaling factor). Hann gefur mat á fjölda virkra álagslota og notar til þess vægisstærð skjálftans

$$MSF = \left( \frac{M_w}{7.5} \right)^N \quad (6.7)$$

þar sem  $M_w$  er vægisstærð jarðskjálftans (e. moment magnitude) og  $N$  er veldisvísir sem til eru ýmsar aðferðir til að ákvarða. Fyrir jarðskjálfta sem eru minni en  $M_w = 7.5$  fæst neðrimarkslausn (e. lower bound) þegar  $N$  er -2.56 og efrimarkslausn fæst þegar  $N = -3.3$ . Fyrir stærri jarðskjálfta er mælt með að nota  $N = -2.56$  [Andrus, o.fl., 1999]. Til eru fleiri aðferðir til að ákvarða *MSF* og ber nokkuð á milli þeirra fyrir litla skjálfta. Hér er ákveðið að nota neðrimarkslausnina  $N = -2.56$  sem gefur *MSF* öruggu megin.

Öryggi fyrir ysjun er metið á eftirfarandi hátt:

$$FS = \left( \frac{CRR}{CSR} \right) \quad (6.8)$$

þar sem *CRR* er dýnamískt mótstöðuhlutfall og *CSR* er dýnamískt skúfspannuhlutfall.



## 7. MAT Á YSJUNARHÆTTU MEÐ SHAKE

### 7.1. Forritið SHAKE

Við útreikninga á svörun jarðvegsins var notast við tölvuforritið SHAKE [Schnabel o.fl., 1970]. Forritið leysir öldujöfnuna fyrir einvíða ölduútbreiðslu. Forritið gerir ráð fyrir láréttum jarðlögum sem ná óendanlega langt í lárétu plani. Hvert þeirra hefur ákveðna efniseiginleika. Ef ákveðin jarðlög eru sérstaklega þykk er hægt að skipta þeim frekar upp til að auka upplausn reikninganna. Neðsta lagið er óendanlega djúpt. Nálgun forritsins hentar því vel á Skeiðarársandi þar sem jarðlög eru lárétt og víðfeðm.

Greiningin er gerð í tíðnirúminu þar sem tímaóháða öldujafnan er leyst. Forritið notar Fouriervarpanir til að umbreyta tímaröðinni sem því er gefið í tíðnirúmið. Reiknuð eru svokölluð yfirfærsluföll (e. transfer functions) sem reikna svörunarstuðla svo sem færslu, hraða, hröðun, skúf spennu og skúfstreitu. Hver og einn liður Fourierráðar álagsins er svo margfaldaður með yfirfærslufallinu til að fá svörunarröð. Að lokum er síðustu svörunarröðinni varpað til baka í tímarúmið með öfugri Fouriervörpun. Hægt er að reikna slíka svörunarröð hvar sem vera skal á lagmótum [Kramer, 1996].

Forritiðið leysir öldujöfnuna línulega. Stífni og dempun jarðvegs eru hins vegar ólínulegir eiginleikar. SHAKE þarf því að nota jafngilda línulega reikninga og ítrun til að reikna streituna.

Hægt er að rita öldujöfnuna á forminu:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (7.1)$$

þar sem  $G$  er skúfstuðullinn og  $\eta$  er seigja. Kritiska dempunarhlutfallið  $\beta$  er fengið út frá seigjunni sem

$$\beta = \frac{\omega \eta}{2G} \quad (7.2)$$

Öldujafnan hefur lausn á forminu:

$$u(z, t) = A e^{i(\omega t + kz)} + B e^{i(\omega t - kz)} \quad (7.3)$$

þar sem  $k$  er tvinngild bylgjutala

$$k = \sqrt{\frac{\rho \omega^2}{G + i \omega \eta}} \quad (7.4)$$

Jaðarskilyrðin vegna yfirborðsins eru

$$\tau(0, t) = G \gamma(0, t) = G \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = 0 \quad (7.5)$$

Þegar lausn öldujöfnunnar er sett inn í jaðarskilyrðin og svo diffráð fæst yfirfærslufall sem lýsir hlutfalli formbreytinga

$$u(z,t) = 2A \cos kz e^{i\omega t} \quad (7.6)$$

Þetta fall lýsir standandi bylgju með fastan botnpunkt. Ódempað yfirfærslufall fyrir lag sem hvílir á stjörfu (e. rigid) bergi með þykkt  $H$  er

$$F_1(\omega) = \frac{u_{\max}(0,t)}{u_{\max}(H,t)} = \frac{1}{\cos(\omega H / V_s)} \quad (7.7)$$

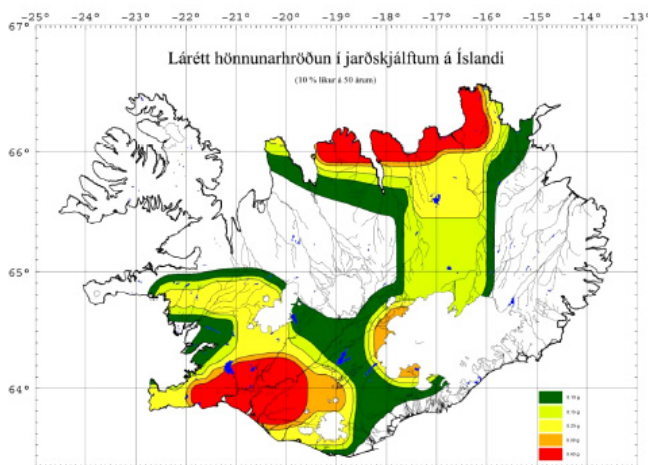
Yfirfærsluföllin flækjast nokkuð þegar dempun er tekin með í reikninginn og enn frekar þegar litið er á berggrunninn sem fjaðrandi en ekki stjarfan. Yfirfærsluföllin sem SHAKE notar má öll finna í Kramer (1996).

Hæsta hröðunargildi í jarðskjálftatimaröð lýsir illa álaginu frá jarðskjálftanum þar sem varandi þess er mjög stuttur. Því er algengt að lýsa jarðskjálftaálaginu sem virkri skúfstreitun sem er oft höfð 65% af hæsta hröðunargildinu [Kramer, 1996].

## 7.2. Jarðlagalíkan í SHAKE

SHAKE voru gefnar niðurstöðurnar úr yfirborðsbylgjureikningunum. Úr þeim fékkst jarðlagaskiptingin út frá breytilegum skúfbylgjuhraða niður á 18 m dýpi við Skeiðará og 15 m dýpi við Gígjukvísl. Ekki fengust neinar upplýsingar um stífni jarðlaganna neðan við þá dýpt sem hægt var að mæla með yfirborðsbylgjuaðferðinni. Þar sem aðeins eru notuð gögn úr yfirborðsbylgjumælingunum er gert ráð fyrir því að sömu efniseiginleikar gildi alveg niður á fast.

Þar sem jarðskjálftahætta er ekki mikil á Skeiðarársandi var valið að nota efniseiginleikana sem fengust úr mælingunum fyrir sand, með sömu eiginleika, sem staðsettur er einhvers annars staðar Suðurlandi þar sem jarðskjálftahætta er meiri, t.d. nærri Þjórsá. Eins og sést á mynd 7.1 er grunngildi hröðunar þar sem mælingarnar voru gerðar á mörkunum að vera 0 g og 0.1 g.

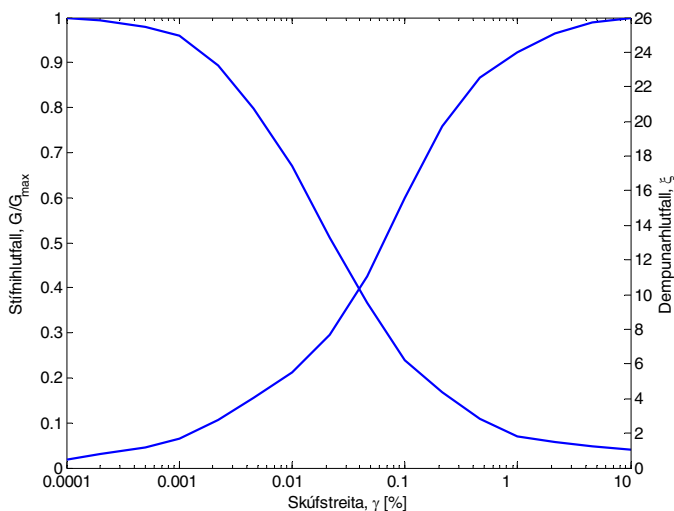


Mynd 7.1: Grunngildi hröðunar skv. þjóðarskjali með EC8.



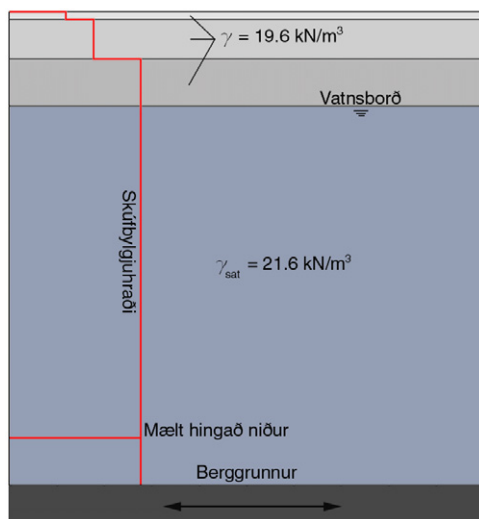
Við Gígjukvísl er dýpi niður á fast um 80 m og við Skeiðará er það um 180-210 m [Magnús T. Guðmundsson, 2002]. Þar sem tilgangurinn með ysjunargreiningunni er ekki að kanna raunverulega ysjunarhættu á Skeiðarársandi heldur aðeins að kanna ysjunarhættu svipaðs sands á jarðskjálftasvæði og með hliðsjón af því að aðeins náðust gögn fyrir efstu metrana var ákveðið að setja berggrunninn í líkaninu á 20 m dýpi.

Dempun jarðefna eykst með skúfstreitu. Öll jarðlög fengu stífni og dempunar-eiginleika sands skv. niðurstöðum Seed og Idriss, en berggrunnurinn var látinn fá elastíska eiginleika [Seed & Idriss, 1970].

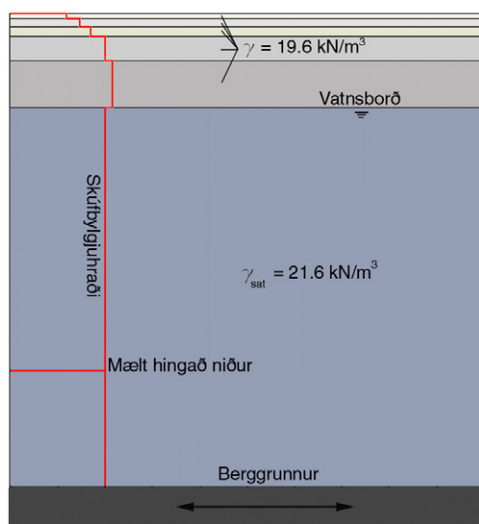


**Mynd 7.2:** Stífni og dempun sands sem SHAKE er gefin. Byggt á Seed & Idriss (1970).

Sandinum ofan vatsborðs var gefinn eðlismassinn  $2.0 \text{ tonm}^3$ , sandinum neðan vatsborðs  $2.2 \text{ tonm}^3$  en berginu  $2.4 \text{ tonm}^3$ . Þessi gildi eru ekki byggð á mælingu. Forritið þarf að þekkja grunnvatnsstöðu. Hún var mjög nærri yfirborði þegar mælt var í febrúar. Ekki er þekkt hver grunnvatnsstaða er þarna við venjulegar aðstæður. Í þessu verkefni var grunnvatnsstaðan fyrst sett 1 m undir yfirborð við útreikninga. Síðar var því breytt þannig að grunnvatnsstaða væri 4 m undir yfirborði. Þessi ákvörðun var tekin til að athuga hvort dæmigerður jökulársandur eins og sá sem mældur var eigi á hættu að ysast við raunhæfar, nokkuð óhagstæðar, aðstæður væri hann staðsettur á jarðskjálftasvæði. Á myndum 7.3 og 7.4 má sjá hvernig líkanið var sett upp í SHAKE.



**Mynd 7.3:** Líkanið í SHAKE fyrir Skeiðará. Neðsta laginu þar sem skúfbylgjuhraðinn er orðinn fastur var skipt upp í undirlög. Lagþykktir og skúfbylgjuhraða má sjá í töflu 4.2.



**Mynd 7.4:** Líkanið í SHAKE fyrir Gígjukvísl. Neðsta laginu þar sem skúfbylgjuhraðinn er orðinn fastur var skipt upp í undirlög. Lagþykktir og skúfbylgjuhraða má sjá í töflu 4.3.

Hægt er að setja inn dýnamískt álag hvar sem er á lagmótum. Sumarið 2000 urðu tveir stórir jarðskjálftar á Suðurlandi. Sá fyrri varð 17. júní og sá seinni 21. júní. Stærð þess fyrri var  $M_w = 6.6$  og þess síðari  $M_w = 6.5$ . Upptök þeirra voru skammt frá gömlu Þjórsárbrúnni við Þjórsártún. Sprunguhreyfing var í báðum tilfellum í norður-suður stefnu á rúmlega 20 km löngu svæði. Jarðskjálftanemar eru í stöplum Þjórsár-

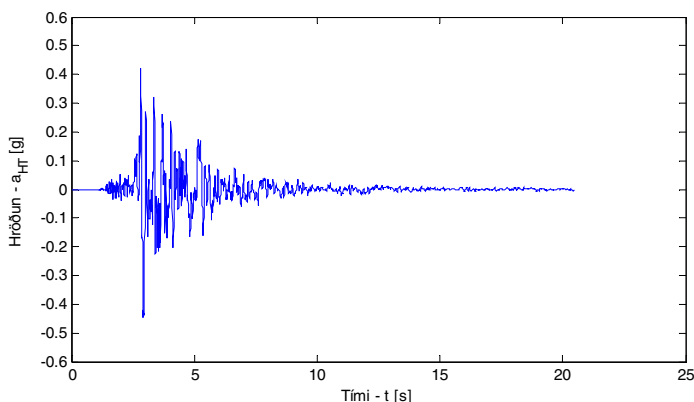
brúarinnar. Vesturstöpullinn hvílir á hrauni sem þekur um 20 m þykkt árset en austurstöpullinn hvílir á berggrunnum [Bjarni Bessason & Einar Hafliðason, 2004]. Forritið var keyrt með tímaröðum úr Suðurlandsskjálftanum 21. júní 2000 sem mældar voru í austurstöpli Þjórsárbrúarinnar. Notuð var ein tímaröð fyrir lárétta langstefnu og önnur fyrir lárétta þverstefnu [Ambraseys o.fl., 2002]. Álagið var sett á mótum berggrunnins og neðsta sandlagsins sem yfirborðsberghreyfing (e. rock outcropping motion), þ.e.a.s. tímaröðin lýsir hegðun bergsins ef jarðlögin væru fjarlægð ofan af því.

Upplausn tímaraðanna sem notaðar voru er 0.005 s. Tíðnibilið sem notað var við reikningana var 0-40 Hz. Báðar tímaraðirnar innihalda sömu orku en mesta hröðun er nokkuð hærri í langstefnu. RMS-gildið (e. Root Mean Square) er herra í langstefnu. Austurstöpull Þjórsárbrúarinnar stendur á berggrunnum og er tímaröðin því ómögnuð og nothæf sem yfirborðshreyfing í líkaninu.

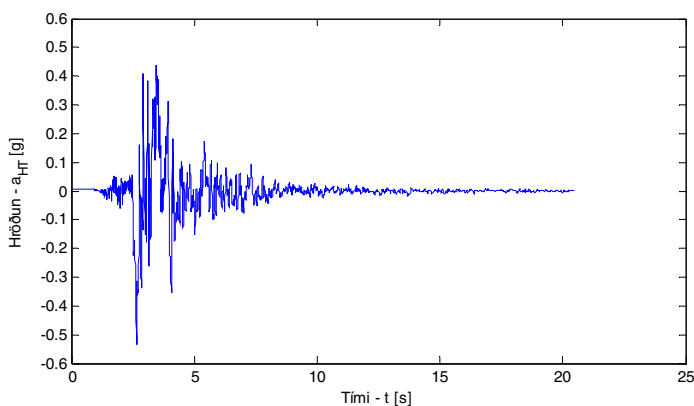
Virk mesta jarðskjálftahröðun (e. effective peak ground acceleration) eða EPGA er ein leið til að meta áhrif skjálfta. EPGA er skilgreint sem meðalgildi hröðunarrófs (e. spectral acceleration) yfir sveiflutíma 0.1-0.5 sekúndur deilt með 2.5. Virk mesta jarðskjálftahröðun er sú sama fyrir báðar tímaraðirnar, RMS-gildið er eilítið herra fyrir þverstefnu en mesta hröðunin er hærri í langstefnu.

**Tafla 7.1:** Jarðskjálftinn 21. júní 2000. Austurstöpull Þjósárbrúar.

Suðurlandsskjálftinn – 21. júní 2000				
Mælistaður	Stefna	Mesta hröðun	RMS	EPGA
Þjósárbrú – austurstöpull	þverstefna	0.449 g	0.0672 g	0.31 g
Þjósárbrú – austurstöpull	langstefna	0.537 g	0.0501 g	0.31 g



**Mynd 7.5:** Mæld svörun í Suðurlandsskjálftanum 21. júní 2000. Austurstöpull Þjósárbrúar – þverstefna.



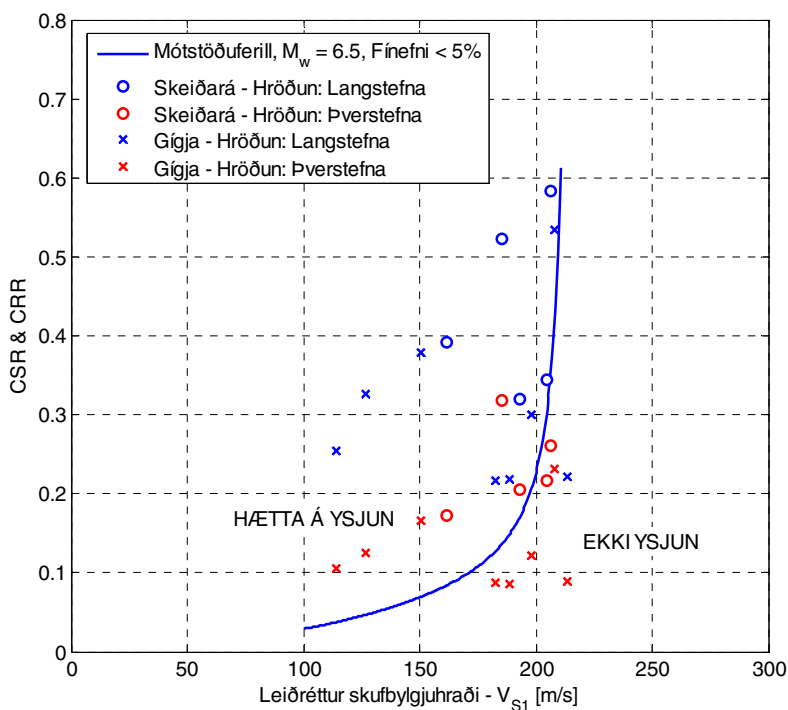
**Mynd 7.6:** Mæld svörun í Suðurlandsskjálftanum 21. júní 2000. Austurstöpull Þjósárbrúar – langstefna.

Forritið SHAKE var keyrt fyrir fjögur tilfelli:

- Skeiðará – Hröðun: Langstefna Þjósárbrúar.
- Skeiðará – Hröðun: Þverstefna Þjósárbrúar.
- Gígjukvísl – Hröðun: Langstefna Þjósárbrúar.
- Gígjukvísl – Hröðun: Þverstefna Þjósárbrúar.

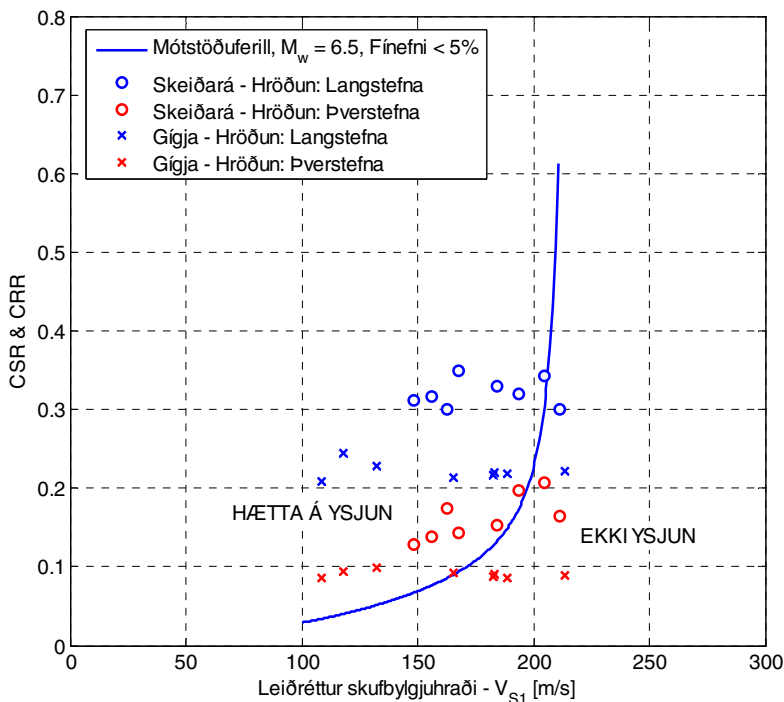
### 7.3. Niðurstöður líkansins

Á myndum 7.7 og 7.8 má sjá niðurstöður líkansins í SHAKE ásamt mótstöðuferlum einfölduðu aðferðarinnar. Fyrst var prófað að keyra líkanið með grunnvatnsstöðu einum metra undir yfirborði jarðvegsins. Þær niðurstöður eru sýndar á mynd 7.7. Eins og sjá má á myndinni er ysjunarhætta töluverð. Ákveðið var að færa grunnvatns-yfirborðið niður í fjóra metra undir jarðvegsyfirborð til þess að freista þess að fá aðeins raunhæfari niðurstöður. Þær niðurstöður má sjá á mynd 7.8. Ákveðið var að halda sig við lægra grunnvatnsyfirborðið (-4 m).



**Mynd 7.7:** Niðurstæða ysjunarreikninganna fyrir grunnvatnsborð einum metra neðan við jarðvegsyfirborð.

Eins og sjá má af mynd 7.7 er mikil hætta á að ysjun eigi sér stað á báðum stöðum. Greinilega sést að hröðunarröðin sem mæld var í langstefnu Þjórsárbrúar veldur mun meiri ysjunarhættu en hröðunarröðin sem mæld var í þverstefnu Þjórsárbrúar, enda er hæsta hröðunargildi hennar hærra.



**Mynd 7.8:** Niðurstaða ysjunarreikninganna fyrir grunnvatnsborð fjórum metrum neðan við jarðvegysfirborð.

Ástæðan fyrir fleiri gagnapunktum á mynd 7.8 en á mynd 7.7 er einungis sú að lögunum var fjölgað í líkaninu þar sem sum þeirra þóttu full þykk í upphafi.

Þegar leiðrétti skúfbylgjuhraðinn fer yfir 200 m/s hættir dýnamíska skúfspennuhlutfallið, CSR, næstum að skipta máli fyrir ysjunarhættuna.

Niðurstöður líkansins eru birtar ítarlega í töflum 7.2 til 7.5. Dýpið sem þar er gefið er meðaldýpi hvers lags.

**Tafla 7.2:** Niðurstöður SHAKE fyrir Skeiðará. Notuð var hröðunartímaröð í langstefnu Þjorsárbrúar. Grunnvatnsstaða: -4m.

Dýpi [m]	$\gamma_{max}$ [%]	$\tau_{max}$ [kPa]	$\tau_{cyc}$ [kPa]	$\sigma'$ [kPa]	$V_s$ [m/s]	$V_{SI}$ [m/s]	$G_{max}$ [MPa]	CSR [-]	CRR [-]	FS [-]
0.15	0.0176	1.45	0.94	2.94	80.0	193.1	12.8	0.320	0.175	0.55
0.60	0.0513	6.22	4.04	11.77	120.0	204.9	28.8	0.343	0.305	0.89
1.50	0.2407	13.67	8.89	29.43	120.0	162.9	28.8	0.302	0.086	0.28
3.00	0.1743	27.21	17.69	58.86	185.0	211.2	68.5	0.300	0.708	2.36
6.00	0.5622	51.84	33.70	102.02	185.0	184.1	75.3	0.330	0.132	0.40
10.00	1.4576	79.91	51.94	149.11	185.0	167.4	75.3	0.348	0.093	0.27
14.00	1.9180	95.56	62.11	196.20	185.0	156.3	75.3	0.317	0.077	0.24
18.00	2.5273	116.80	75.92	243.29	185.0	148.1	75.3	0.312	0.067	0.21

**Tafla 7.3:** Niðurstöður SHAKE fyrir Skeiðará. Notuð var hröðunartímaröð í þverstefnu Þjorsárbrúar. Grunnvatnsstaða: -4m.

Dýpi [m]	$\gamma_{max}$ [%]	$\tau_{max}$ [kPa]	$\tau_{cyc}$ [kPa]	$\sigma'$ [kPa]	$V_s$ [m/s]	$V_{SI}$ [m/s]	$G_{max}$ [MPa]	CSR [-]	CRR [-]	FS [-]
0.15	0.0092	0.89	0.58	2.94	80.0	193.1	12.8	0.197	0.175	0.89
0.60	0.0218	3.75	2.44	11.77	120.0	204.9	28.8	0.207	0.305	1.47
1.50	0.0780	7.91	5.14	29.43	120.0	162.9	28.8	0.175	0.086	0.49
3.00	0.0515	14.82	9.63	58.86	185.0	211.2	68.5	0.164	0.708	4.33
6.00	0.1061	24.07	15.65	102.02	185.0	184.1	75.3	0.153	0.132	0.86
10.00	0.2044	32.76	21.29	149.11	185.0	167.4	75.3	0.143	0.093	0.65
14.00	0.3347	41.77	27.15	196.20	185.0	156.3	75.3	0.138	0.077	0.55
18.00	0.4938	48.05	31.23	243.29	185.0	148.1	75.3	0.128	0.067	0.52

**Tafla 7.4:** Niðurstöður SHAKE fyrir Gígjukvísl. Notuð var hröðunartímaröð í langstefnu Þjórsárbrúar. Grunnvatnsstöða: -4m.

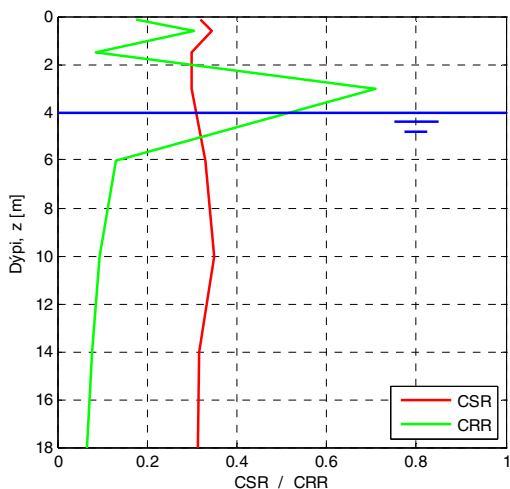
Dýpi [m]	$\gamma_{max}$ [%]	$\tau_{max}$ [kPa]	$\tau_{cyc}$ [kPa]	$\sigma'$ [kPa]	$V_s$ [m/s]	$V_{SI}$ [m/s]	$G_{max}$ [MPa]	CSR [-]	CRR [-]	FS [-]
0.10	0.0064	0.67	0.44	1.96	80.0	213.8	12.8	0.222	2.113	9.52
0.40	0.0224	2.65	1.72	7.85	100.0	188.9	20.0	0.219	0.150	0.68
0.80	0.0438	5.24	3.41	15.70	115.0	182.7	26.5	0.217	0.128	0.59
1.50	0.0653	9.98	6.49	29.43	135.0	183.3	36.5	0.220	0.129	0.59
3.00	0.1902	19.33	12.56	58.86	145.0	165.5	42.1	0.213	0.090	0.42
6.50	1.0455	37.78	24.56	107.91	135.0	132.5	40.1	0.228	0.052	0.23
12.00	2.6887	65.01	42.26	172.66	135.0	117.8	40.1	0.245	0.040	0.16
17.50	3.3808	76.35	49.63	237.40	135.0	108.8	40.1	0.209	0.034	0.16

**Tafla 7.5:** Niðurstöður SHAKE fyrir Gígjukvísl. Notuð var hröðunartímaröð í þverstefnu Þjórsárbrúar. Grunnvatnsstöða: -4m.

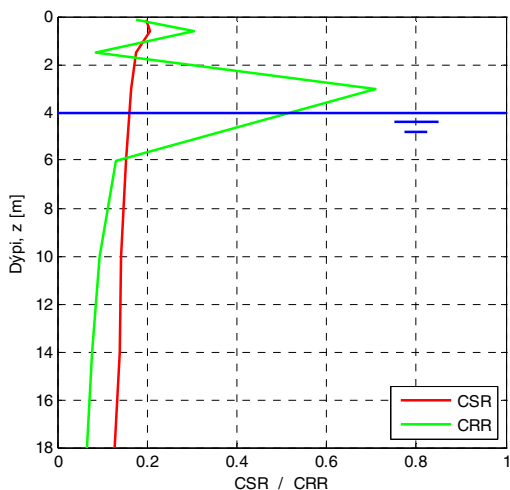
Dýpi [m]	$\gamma_{max}$ [%]	$\tau_{max}$ [kPa]	$\tau_{cyc}$ [kPa]	$\sigma'$ [kPa]	$V_s$ [m/s]	$V_{SI}$ [m/s]	$G_{max}$ [MPa]	CSR [-]	CRR [-]	FS [-]
0.10	0.0022	0.27	0.18	1.96	80.0	213.8	12.8	0.089	2.113	23.63
0.40	0.0064	1.04	0.68	7.85	100.0	188.9	20.0	0.086	0.150	1.74
0.80	0.0109	2.10	1.37	15.70	115.0	182.7	26.5	0.087	0.128	1.47
1.50	0.015	4.06	2.64	29.43	135.0	183.3	36.5	0.090	0.129	1.44
3.00	0.0374	8.38	5.45	58.86	145.0	165.5	42.1	0.093	0.090	0.97
6.50	0.1852	16.50	10.73	107.91	135.0	132.5	40.1	0.099	0.052	0.52
12.00	0.4569	24.91	16.19	172.66	135.0	117.8	40.1	0.094	0.040	0.43
17.50	0.716	31.54	20.50	237.40	135.0	108.8	40.1	0.086	0.034	0.39



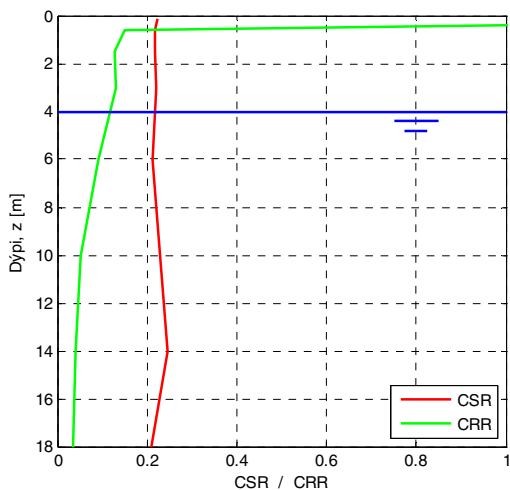
Hér að neðan eru dýnamískt skúfspennuhlutfall  $CSR$  og dýnamískt mótstöðuhlutfall,  $CRR$ , teiknuð saman sem fall af dýpi. Þar sem rauða línan er hægra megin við grænu línuna ( $CSR > CRR$ ) er hætta á ysjun. Ysjun getur þó að sjálfstöðu ekki orðið ofan grunnvatnsborðsins sem er á 4 m dýpi.



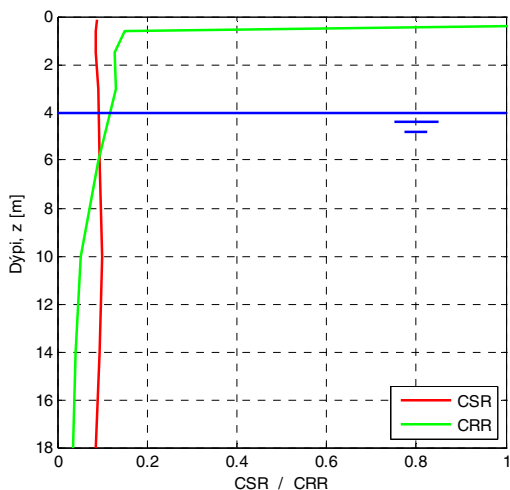
**Mynd 7.9:** Ysjunarhætta með dýpi. Skeiðará – Hröðun: Langstefna. Vatsborð er blátt.



**Mynd 7.10:** Ysjunarhætta með dýpi. Skeiðará – Hröðun: Þverstefna. Vatsborð er blátt.



**Mynd 7.11:** Ysjunarhætta með dýpi. Gígjukvísl – Hröðun: Langstefna. Vatsborð er blátt.



**Mynd 7.12:** Ysjunarhætta með dýpi. Gígjukvísl – Hröðun: Þverstefna. Vatsborð er blátt.

Eins og sést á gröfunum að ofan er ysjunarhættan mest neðst en minni ofar. Niðurstöðurnar komu nokkuð á óvart. Reynslan hefur sýnt að venjulega er ysjunarhætta mest nærri yfirborði en vegna aukinnar stífni með vaxandi dýpi minnkar ysjunarhættan vanalega eftir því sem neðar dregur.

Þar sem niðurstöður yfirborðsbylgjumælinganna eru að skúfbylgjuhraðinn eykst ekki með vaxandi dýpi, nærri yfirborðinu, lækkar leiðrétti skúfbylgjuhraðinn með auknu dýpi. Venjulega eykst skúfbylgjuhraðinn nægjanlega til þess að leiðrétti skúfbylgjuhraðinn lækki ekki þrátt fyrir hærri spennur.

Eins og áður sagði er alls ekki víst að jarðefnið ysjist þrátt fyrir að það lendi ofan við mótstöðuferilinn. Mótstöðuferillinn gefur aðeins til kynna að hætta sé á yjsun fyrir þá punkta sem lenda ofan ferilsins. Þau lög sem lenda neðan mótstöðuferilsins ysjast hins vegar örugglega ekki með 95% vissu [Andrus o.fl., 1999].

Niðurstöður benda til þess að það gæti verið varasamt að reisa mannvirki á þessum lausa sandi sem fyrirfinnst á Skeiðarársandi ef hann væri staðsettur á jarðskjálftasvæði þar sem búast mætti við stórum skjálftum á borð við Suðurlandsskjálftana 2000. Ef sú væri raunin væri eðlilegt að taka sýni til þess að kanna betur holrýmd og kornakúrfu sandsins til að getað áttað sig betur á lektareiginleikum hans. Þá væri hægt að gera athugun á rúmþyngd fyrir óhreyft efni á staðnum, t.d. með Troxler geilsa-þéttleikamæli. Slík próf ná þó ekki að mæla nema nokkra tugi sentimetra niður. Einnig væri eðlilegt að framkvæma þríasapróf á sýnum á rannsóknarstofu til að skoða betur uppbyggingu þóruvatnsþrýstings.



## 8. SAMANTEKT NIÐURSTAÐNA

Í verkefni þessu hefur skúfbylgjuhraði verið mældur í tveimur sniðum við Skeiðará og Gígjukvísl. Gerðar hafa verið athuganir á ysjunarhættu slíks sands, væri hann staðsettur á svæði þar sem vænta mætti stórra jarðskjálfta.

Mælingar þær sem framkvæmdar voru í frosinni jörð gáfu nokkuð aðra niðurstöðu en þær sem framkvæmdar voru eftir að frost fór úr jörðu. Munurinn liggur ekki bara í efstu tveimur metrunum heldur einnig neðar sem gefur til kynna að aðferðin sé ekki örugg við þessar aðstæður.

Eins og áður sagði var prófað að bæta þéttari mæliferli við hefðbundna 20 m langa ferilinn til þess að freista þess að ná gögnum ofar heldur en grófi mæliferillinn getur gefið. Mjög erfitt var að fá einhver nothæf gögn nær höggstað en um hálfum metra, þrátt fyrir mjög laus högg, vegna næráhrifa. Niðurstaðan af þessu er sú að það borgar sig því varla að setja upp nýjan mæliferil fyrir svo takmarkaðar upplýsingar sem hann getur bætt við þau gögn sem fást með grófa mæliferlinum.

Prófað var að slá á litla álplötu auk þess sem slegið var beint á sandinn. Tilgangurinn var að athuga hvort hægt væri að minnka næráhrif og suð í gögnunum. Ekki varð vart við neinn mun á gögnum þeim sem fengust fyrir högg sem staðsett voru lengra frá enda mæliferils en 2.5 m. Fyrir þau högg sem gefin voru nær en 2.5 m náðust heldur verri gögn þegar slegið var á plötuna. Niðurstaða þessarar tilraunar er því að platan er einungis til óþurftar.

Almennt tókust mælingarnar nokkuð vel en heppilegt hefði verið að geta mælt skúfbylgjuhraðann dýpra. Yfirborðsbylgjumælingar þær sem framkvæmdar voru í tengslum við þetta verkefni gáfu til kynna að skúfbylgjuhraðinn breyttist mjög lítið með auknu dýpi neðan við um tvo metra. Þetta er nokkuð óvenjulegt þar sem venjulega eykst stífnin nokkuð jafnt með auknu dýpi. Borroboranir Vegagerðarinnar frá áttunda áratugnum benda til þess að stífnin byrji að aukast nokkuð hratt neðan við 16 m dýpi við Skeiðará og neðan við 10 m dýpi við Gígjukvísl. Yfirborðsbylgjumælingarnar náðu reyndar gögnum niður fyrir það dýpi á báðum stöðum en aðferðin mældi ekki aukna stífni þar. Ef þungt lóð og gálgi hefðu verið notuð við mælingarnar hefði eflaust verið hægt að örva jarðveginn á auknu dýpi og fá nákvæmari gögn neðar. Því er ljóst að ekki er nægjanleg orka í höggi frá hoppi eða sleggju til þess að mæla dýpra en um 15 m í sendnum jarðvegi, að minnsta kosti ekki ef hann er svo laus í sér sem raunin er á Skeiðarársandi.

Skúfbylgjuhraði mældist 80-185 m/s við Skeiðarárbrú en 80-145 m/s við Gígjukvísl. Þessi gildi falla ágætlega við fyrri mælingar á skúfbylgjuhraða í íslenskum sandi. Það sem er óvenjulegt við þessar mælingar er að ekki mældist aukinn skúfbylgjuhraði með aukinni dýpt. Hugsanleg skýring á þessu er að sandurinn á Skeiðarársandi sé verr pakkaður en sandur sem áður hefur verið mældur á Íslandi vegna þess að hann myndaðist í stórum flóðum.

Þetta olli því að niðurstöður ysjunarútreikinganna voru svolítið frábrugðnar því sem venjulegt er. Niðurstaða ysjunarútreikinganna er að ysjunarhætta nær alveg niður á ímyndaðan botn í líkaninu.

Þar sem sambærilegan sand væri að finna á jarðskjálftasvæðum á Íslandi mætti vel búast við því að hluti hans gæti ysjað í stórum jarðskjálfta. Þó þyrfti að skoða betur

eiginleika eins og holrýmd, kornadreifingu og lekt sandsins. Einnig þyrfti að gera þríasapróf til að skoða uppbyggingu póruvatsþrýstings til að meta hvort raunveruleg hætta sé á ysjun.

Því mætti hugsa sér að væri gert framhald af þessu verkefni þyrfti að fara aftur á Skeiðarársand með þungt lóð og gálga og gera þar fleiri mælingar til þess að reyna að ná gögnum dýpra. Þá væri æskilegt að taka sýni og gera á þeim athuganir á rannsóknarstofu til að meta þá þætti sem hafa áhrif á ysjunarhættu.

Hvort sem hættan á ysjun er jafn mikil og niðurstöðurnar gefa til kynna eða ekki er allavega ljóst að full ástæða er til að skoða ysjunarhættu áður en mannvirki eru reist á lausum jarðlögum þrátt fyrir að alvarlegar skemmdir af völdum ysjunar séu ekki algengar hér á landi.

Vitneskjan um skúfbylgjuhraða sandsins er einnig áhugaverð til annara nota en við mat á ysjunarhættu svo sem til ákvörðunar á láréttri stífni jarðvegs í jarðskjálfta og burðarþoli staura. Skúfbylgjuhraðinn er einnig notaður í EC8 til þess að ákvarða svörunarróf sem notað er við hönnun mannvirkja.

Mælingarnar á skúfbylgjuhraða nærri yfirborði á Skeiðarársandi munu nýtast sem viðbót við ört stækkandi gagnasafn sem til er að verða með upplýsingum um skúfbylgjuhraða íslensks jarðvegs.

## 9. HEIMILDIR

1. Ambraseys, N.N., Douglas, J., Margaris, B., Sigurbjörnsson, R., Smit, P. og Suhadolc, P., 2002: Internet Site for European Strong-Motion Data, *12th European Conference on Earthquake Engineering*, Elsevier Science, Paper Reference 837.
2. Andrus, R.D. Stokoe II, K. H. & Chung, R.M., 1999: *Draft Guidelines for Evaluating Liquefaction Resistance Using Shear Wave Velocity Measurements and Simplified Procedures*, NISTIR 6277, National Institute of Standards and Technology.
3. Andrus, R.D., Stokoe II, K. H., 2000: Liquefaction Resistance of Soils From Shear-Wave Velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, novemer 2000 issue.
4. Atli Gunnar Arnórsson, 2005: *Stíflugarðar á Neðra Þjórsársvæði. Virkni og hagkvæmni með tilliti til jarðskjálftaáraunar*. Meistaraverkefni, Háskóli Íslands.
5. Bjarni Bessason, 1998: Yfirborðsbylgjumælingar við ákvörðun á skúfbylgjuhraða í jarðvegi. *Árbók VFÍ/TFÍ*, árg. 10, bls. 293-303, Verkfræðingafélag Íslands og Tæknifræðingafélag Íslands.
6. Bjarni Bessason og Einar Hafliðason, 2004: Recorded and Numerical Strong Motion Responce of a Base-Isolated Bridge, *Earthquake Spectra*, vol. 20, no. 2, bls. 309-332, Earthquake Engineering Research Institute.
7. Bjarni Bessason & Gunnar I. Baldvinsson, 1998: *Kárahjúkar Hydro Project, SASW measurements*, Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, skýrsla nr. 98006.
8. Bjarni Bessason & Kaynia, A. M., 2002: Site Amplification in Lava Rock on Soft Sediments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22 (2002) bls. 525-540.
9. Das, B.M., 2002: *Principles of geotechnical engineering – 5th ed.*, Brooks/Cole.
10. Donohue, S., 2005: *Assessment of Sample Disturbance in Soft Clay using Shear Wave Velocity and Suction Measurements*. A PhD. thesis, University Collage Dublin.
11. European Committee for Standardization, CEN, 2003: *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, prEN 1998-1, final draft*, CEN.
12. Heseý, J.S., Stokoe, K.H. and Meyer, A.H., 1982: *Moduli of pavement systems from Spectral Analysis of Surface Waves*. Transportation Research Board, Record, No. 852, pp. 22-32.
13. Ingibjörg Kaldal, 1997: *Breytingar á farvegi Gigjukvíslar*. Greinargerð IK-9702 645.797, Orkustofnun.
14. Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W., 2007: *Fundamentals of Rock Mechanics, 4th. ed.*, Blackwell Publishing.

15. Jón Skúlason, Bjarni Bessason, Eyjólfur Árni Rafnsson og Haraldur Sigursteinsson, 2001a: *Ysjun setlaga í Suðurlands skjálftum 2000*, Vegagerðin og Landsvirkjun.
16. Jón Skúlason, Bjarni Bessason, Eyjólfur Árni Rafnsson, Haraldur Sigursteinsson og Sigfinnur Snorrason, 1997: *Ysjun í setlögum við brýr og vegi*, Vegagerðin.
17. Jón Skúlason, Bjarni Bessason, Eyjólfur Árni Rafnsson, Haraldur Sigursteinsson og Sigfinnur Snorrason, 1998: *CPT borun og SASW mæling á Kjalarnesi og Óseyrartanga*, Vegagerðin.
18. Jón Skúlason, Bjarni Bessason, Eyjólfur Árni Rafnsson, Haraldur Sigursteinsson og Sigfinnur Snorrason, 1999: *Túlkun CPT borana og SASW mælinga við íslenskar aðstæður*, Vegagerðin.
19. Jón Skúlason, Einar Júlíusson, Oddur Þórðarson, Hafsteinn Hilmarsson, 2001b: *Eiginleikar íslenskra jarðefna gagnvart sveifluálagi – Ysjunarhætta í íslenskum jarðefnum – Venjulegur sjávarsandur og skeljasandur. Skýrsla nr. 01-04*, Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins.
20. Jón Skúlason & Jón Helgason, 1974: *Athuganir á burðarþoli staura vegna brúargerðar yfir Sandgígjukvísl*, Vegagerð Ríkisins.
21. Jón Skúlason & Jón Helgason, 1975: *Athuganir á burðarþoli staura vegna brúargerðar yfir Skeiðará*, Vegagerð Ríkisins.
22. Kausel, E. & Roesset, J.M., 1981: *Stiffness Matrices for Layered Soils*, Bul. of the Seism. Soc of America, 71: 6:1743-1761.
23. Kramer, S.L., 1996: *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc.
24. Magnús Tumi Guðmundsson, Arélie Bonnel og Karl Gunnarsson, 2002: *Seismic Soundings of Sediment Thickness on Skeiðarársandur, SE-Iceland*, *Jökull* 51, 53-64.
25. MathWorks, Inc. *MATLAB – The Language of Technical Computing, Version 7.0*, MathWorks, 2004.
26. Nazarian, S. & Stokoe II, K.H., 1984: *In Situ Shear Wave Velocities From Spectral Analysis of Surface Waves*, *Proc. of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering*. Vol. 3, pp. 31-38.
27. Prakash, S., 1981: *Soil Dynamics*, Rolla Missouri.
28. Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B., 1970: *SHAKE – A Computer Program for Earthquake Responce Analysis of Horizontal Layered Sites*. Report No. EERC-72-12, University of California Berkeley, 1970.
29. Seed, H.B., Idriss, I.M., 1970: *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Responce Analyses*. Report No. EERC-70-10, University of California, Berkeley.



30. Sigurður Erlingsson., 1993: *Dynamic Soil Analysis with an Application to Rock Music Induced Vibrations in Ullevi Stadium – Doctoral Thesis*, Royal Institute of Technology Stockholm.
31. Sigurður Þórarinnsson, 1974: *Vötnin stríð*. Menningarsjóður.
32. Skúli Víkingsson, 2007: Óútgefið kort af Skeiðará, ÍSOR.
33. Wood, D.M., 1990, *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press.
34. Woods, R.D. (ritstjóri), 1994: *Geophysical Characterization of Sites*, Volume Prepared by ISSMFE Technical Committee #10.
35. Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Cristian, J.T. Dobry, R., Finn, W.d.L., Harder Jr., L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson III, W.F., Martin, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed R. and Stokoe II, K.H., 2001: Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, *J. Geotech and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, 127(10), 817-833.