

MAT Á
JARÐSKJÁLFTAÁHRIFUM
FYRIR BITRU OG HVERAHLÍÐ Á
HELLISHEIÐ

Bjarni Bessason

Desember 2006



VERKFRÆÐISTOFNUN
HÁSKÓLA ÍSLANDS

2 Mat á staðbundnum jarðskjálftaáhrifum fyrir Bitru og Hverahlíð á Hellisheiði

Skýrsla nr. VHI-05-2006, Reykjavík 2006

Bjarni Bessason, *Mat á jarðskjálftaáhrifum fyrir Bitru og Hverahlíð á Hellisheiði*, Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, Skýrsla nr. VHI-05-2006, Desember 2006

Yfirlestur: Júlíus Sólnes

Þær niðurstöður og skoðanir sem fram koma í skýrslunni eru á ábyrgð höfundar. Ekki ber að túlka þær sem yfirlýsta stefnu Verkfræðistofnunar Háskóla Íslands né Háskóla Íslands.

© Verkfræðistofnun Háskóla Íslands og höfundur

EFNISYFIRLIT

	Bls.
1 INNGANGUR	5
1.1 Bakgrunnur	5
1.2 Markmið	5
2 BAKGRUNNSUPPLÝSINGAR OG FORSENDUR	5
2.1 Afmörkun virkjunarsvæða	5
2.2 Upptakasvæði jarðskjálfta	6
2.3 Álagsforsendur og öryggiskröfur	7
3 MAT Á JARÐSKJÁLFTAÁHRIFUM	9
3.1 Aðferðafræði	9
3.2 Líkindafræðilegt mat	9
3.2.1 <i>Upptakasvæði jarðskjálfta</i>	9
3.2.2 <i>Dvínunarlíkingar</i>	10
3.2.3 <i>Útgildi yfirborðshröðunar</i>	14
3.2.4 <i>Svörunarróf</i>	15
4 HÖNNUNARÁLAG	19
5 LOKAORÐ	21
6 HEIMILDIR	23

4 Mat á staðbundnum jarðskjálftaáhrifum fyrir Bitru og Hverahlíð á Hellisheiði

1 INNGANGUR

1.1 Bakgrunnur

Við jarðskjálftahönnun mannvirkja þarf að ákvarða grunnildi jarðskjálftaálags. Fyrir venjulegar byggingar er jafnan byggt á stöðlum og tilheyrandi þjóðarskjölum. Fyrir stór og mikilvæg mannvirki er hins vegar gjarnan byggt á sérstöku mati á staðbundnum jarðskjálftaáhrifum.

Árið 2002 var lögð vinna í að meta staðbundin jarðskjálftaáhrif fyrir orkuver á Helligheiði. Þegar matið var framkvæmt lá endanleg staðsetning helstu mannvirkja orkuversins ekki fyrir, en búið var að afmarka virkjunarsvæðið með fjórum hornpunktum og út frá þeim var hægt að finna hnit einskonar miðpunkt svæðisins sem; $21,3750^{\circ}\text{W}$, $64,0345^{\circ}\text{N}$. Þessi punktur liggur mjög nærri hinu gamla bæjarstæði Kolviðarhóls. Ekki reyndist mikill munur á útreiknuðum jarðskjálftaáhrifum innan svæðisins og því voru niðurstöður matsins miðaðar við miðpunktinn. Niðurstöður matsins voru birtar í sérstakri skýrslu [1]. Í grein sem birtist í Árbók VFÍ/TFÍ 2003 [2], var sömuleiðis gerð grein fyrir matinu og jafnframt fjallað um ýmsa óvissuþætti sem hafa áhrif á mat af þessu tagi.

Fyrir dyrum stendur að stækka virkjunarsvæði á Helligheiði og hafa tvö svæði verið afmörkuð í því sambandi. Annað svæðið liggur sunnan Ölkelduháls á Helligheið og er kallað Bitrusvæðið og hitt er í svokölluðum Hverahlíðum sunna þjóðvegarins og er kallað Hverahlíðarsvæðið. Þessi svæði eru sýnd á mynd 1.

1.2 Markmið

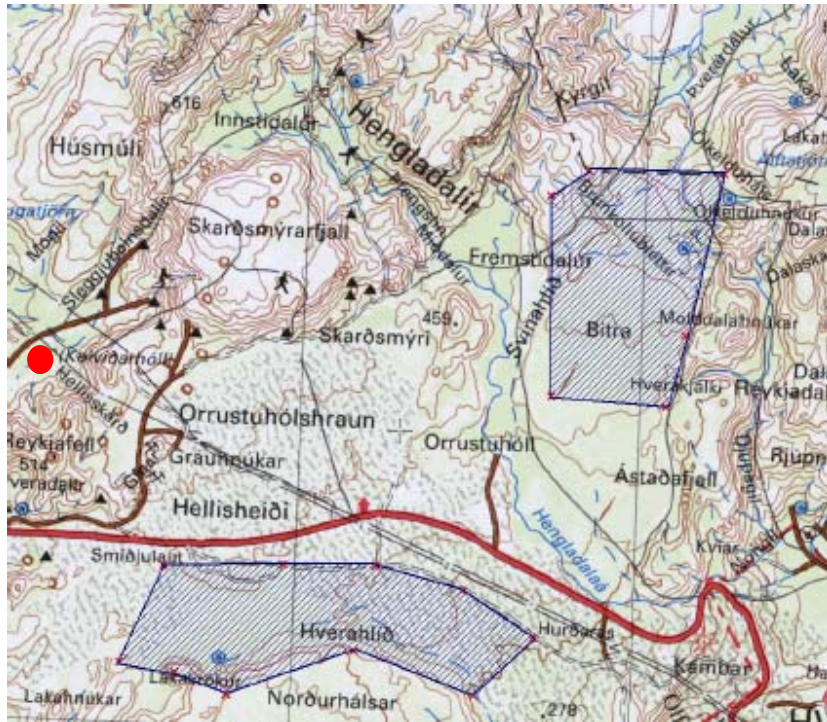
Markmið þessa verkefnis sem kynnt er í þessari greinargerð er að meta staðbundin jarðskjálftaáhrif tveggja nýrra virkjunarsvæða á Helligheiði, þ.e. Bitrusvæðið og Hverahlíðarsvæðið, með tilliti til tveggja atriða. Í fyrsta lagi að skoða hvort jarðskjálftaáhrifin séu önnur en á virkjunarsvæðinu við Kolviðarhól í ljósi þess að hér er um aðra landfræðilega staðsetningu að ræða. Í öðru lagi að fara í gegnum forsendur fyrra mats og kanna hvort ný þekking og nýjar upplýsingar gefi tilefni til að breyta forsendum og leiði til nýrra niðurstaðna. Í þessu sambandi er rétt að undirstrika að mat á jarðskjálftaáhrifum verður seint einhlítt og endanlegt.

2 BAKGRUNNSUPPLÝSINGAR OG FORSENDUR

2.1. Afmörkun virkjunarsvæða

Hin nýju virkjunarsvæði eru afmörkuð og sýnd á mynd 1. Út frá hornpunktum svæðanna má ákvarða miðpunkt svæðanna og verða þeir punktar notaðir sem viðmið við mat á jarðskjálftaáhrifum fyrir viðkomandi svæði. Í töflu 1 eru þessir punktar gefnir og til samanburðar miðpunktur virkjunarsvæðis Helligheiðarvirkjunar eins og hann var metin í skýrslunni [1] sem og hnit stöðvarhúss Nesjavallavirkjunar.

6 Mat á staðbundnum jarðskjálftaáhrifum fyrir Bitru og Hverahlíð á Hellisheiði



Mynd 1 – Afmörkun Hverahlíðarsvæðis og Bitrusvæðis á Hellisheiði. Stöðvarhús Hellisheiðarvirkjun er sýnt með rauðum punkti (•) vestast á myndinni. (Kort: Einar Guðlaugsson og Grímur Björnsson)

Tafla 1 – Hnit punkta sem notuð eru við samanburð.

Punktur	Lengd	Breidd
Nesjavellir	21,250°W	64,115°N
Hellisheiðarvirkjun – Kolviðarhóll	21,375°W	64,0345°N
Bitrusvæðið – miðpunktur	21,251°W	64,047°N
Hverahlíðarsvæðið – miðpunktur	21,333°W	64,010°N

2.2 Upptakasvæði jarðskjálfta

Fyrirhuguð virkjanasvæði liggja nálægt þremur virkum jarðskjálftasvæðum, þ.e. Reykjanesskaga, Hengilsvæðinu og skjálftasvæði Suðurlands.

Á Reykjanesskaga eru það einkum upptakasvæðin á eystri hluta hans, þ.e. á Brennisteinsfjallasvæðinu og Bláfjallasvæðinu, sem skipta mestu máli fyrir orkuverið. Á þessu svæði hafa orðið tveir skjálftar stærri en $M_w=6$ á síðustu öld. Hér stendur M_w fyrir vægisstærð. Nýlegar rannsóknir á yfirborðsjarðfræði svæðisins hafa jafnframt sýnt sniðgengi á svæðinu sem liggur til suðurs frá Kóngsfelli og myndar til samans um 11 km langt sprungukerfi [3]. Líklegt er að þetta sniðgengi sé myndað í jarðskjálfta sem hefur verið nálægt 6 til 6,5 að stærð.

Hengillinn og nágrenni hans er mjög virkt jarðskjálftasvæði. Einkenni jarðskjálftavirkinnar þar er að skjálftarnir koma í hrinum. Stærstu jarðskjálftar sem vitað er um á þessu svæði eru í kringum 5,5. Á árunum 1997 og 1998 urðu nokkrir stórir jarðskjálftar á miðri Hellisheiði. Stærð stærsta atburðarins, frá 4. júní 1998, var fundin sem $M_w=5,5$ [4].

Á Suðurlandi eru það einkum jarðskjálftar með upptök á vesturhluta svæðisins, þ.e. í Öflusi og Flóa, sem geta haft áhrif á orkuverið. Í Ölfusi eru skjálftar að jafnaði minni en þegar austar dregur. Síðan 1700 eru þekktir þrír stórir jarðskjálftar í Ölfusi, sem hafa verið metnir með stærðina 6,0.

2.3 Álagsforsendur og öryggiskröfur

Virkjanir heyra ekki undir byggingarreglugerð (nr. 441 frá 1998) samkvæmt 2. grein reglugerðarinnar. Það er því í höndum eigenda að skilgreina álagsforsendur, öryggiskröfur og staðla sem nota skal við hönnun. Hér er mælt með að hafa Evrópustaðlana til hliðsjónar á hliðstæðan hátt og gert var við hönnun Hellisheiðarvirkjunar. Framsetning álags miðist við tvö hönnunarstig, þ.e. hönnunarstig 1 og 2 sem jafngilda notmarkaástandi og brotmarkaástandi í Evrópustöðlunum:

- **Hönnunarstig 1 – Normarkaástand.** Gerð er krafa um að mannvirki og vélbúnaður geti staðist áraun af völdum jarðskjálfta án þess að rekstur orkuvers raskist.
- **Hönnunarstig 2 – Brotmarkaástand.** Gerð er krafa um að mannvirki og vélbúnaður geti staðist áraun af völdum jarðskjálfta þannig að skemmdir verði óverulegar.

Samkvæmt Evrópustaðlinum er í notmarkaástandi stuðst við grunngildi jarðskjálftaálags þar sem 10% líkindi eru fyrir því, að álagið verði meira á 10 ára tímabili. Þetta jafngildir jarðskjálftaálagi með 95 ára meðalendurkomutíma. Í brotmarkaástandi er miðað við að grunngildi jarðskjálftaálags sem hefur 10% líkindi á að verða yfirstigið á 50 ára tímabili. Þetta jafngildir jarðskjálftaálagi með 475 ára meðalendurkomutíma. Þessi grunngildi miðast við mikilvægisflokk III, þ.e. venjulegar byggingar, sjá nánar töflu 2. Álagið er svo aukið eða minnkað fyrir önnur mannvirki eftir mikilvægi þeirra.

Tafla 2 - Mikilvægisflokkar og mikilvægisstuðlar samkvæmt Evrópustaðli 1998-1.

Flokkur	Mannvirki	Mikilvægi- stuðull
I	Byggingar sem mikilvægt er að séu nothæf í kjölfar jarðskjálfta, t.d. spítalar, slökkvistöðvar, orkuver o.fl.	1,4
II	Byggingar þar sem afleiðingar þess að bygging hrynur eru miklar, t.d. skólar, samkomusalir, menningarstofnanir o.fl.	1,2
III	Venjulegar byggingar sem falla ekki undir aðra flokka.	1,0
IV	Byggingar sem eru þýðingarlitlar, t.d. landbúnaðarmannvirki o.fl.	0,8

Við fyrstu sýn gefur Evrópustaðallinn vísbendingu um að raða beri orkuverum í mikilvægisflokk I, en eins og fram hefur komið heyrir virkjanir þó ekki undir byggingarreglugerð né Evrópustaðlana þannig að málið er í höndum eigenda. Eigandi orkuvers verður því að skoða málið í víðu samhengi þegar hann leggur mat á hvaða öryggiskröfur eigi að gera eða í hvað mikilvægisflokk tiltekið mannvirki eigi að fara, ef notast á við slíka flokkun.

Í fyrsta lagi er eðlilegt að velta fyrir sér afleiðinum tjóns af völdum jarðskjálfta með tilliti til:

- líf og heilsu fólks,
- efnahagslegra og félagslegra þátta.
- umhverfis- og menningarlegra verðmæta.

Varðandi fyrirhugaðar virkjanir á Hellisheið verður að telja að litlar líkur séu á manntjóni þótt mannvirki eyðileggist í jarðskjálftum. Sömuleiðis er umhverfi eða menningarverðmæti ekki í hættu. Loks ætti félagslegt tjón að vera í lágmarki ef gengið er út frá þeirri forsendu að aðrar virkjanir sem eru tengdar inn á landsnet geti sinnt neyðarþjónustu og almenningi í kjölfar jarðskjálfta. Eftir stendur að líklegt verður að telja að umtalsvert efnahagslegt tjón geti orðið fyrir eiganda og stóra orkukaupendur ef raforkuframleiðsla stöðvast. Hér hafa tryggingar einnig ákveðið vægi sem taka þarf tillit til.

Í öðru lagi skiptir líka máli kostnaðaraukinn sem felst í því að auka öryggi mannvirkis. Ef kostnaðaraukinn er óverulegur má hugsa sér að auka öryggið þótt væntanlegar afleiðingar tjóns kalli í sjálfum sér ekki á það. Í því tilfelli sem hér um ræðir er ljóst að jarðskjálftaálagið er mikið og íþyngjandi fyrir hönnunina og því má segja að það sé dýrt að auka öryggið umfram það sem nauðsynlegt er af öðrum faglegum ástæðum.

Í ljósi framangreindra atriða og með hliðsjóna af mikilvægisflokkunum í Evrópustöðlunum mælir skýrsluhöfundur með að tekið sé mið af mikilvægisflokk II þegar öryggiskröfur fyrir virkjanasvæðin tvö eru ákvörðuð. Þetta er samhljóma niðurstöðunni fyrir Hellisheiðarvirkjun [1]. Næst skref er því að skilgreina betur en gert er í Evrópustöðlunum öryggiskröfurnar í mikilvægisflokkunum.

Það er velþekkt að mikilvægisstuðlar eins og þeir eru framsettir í töflu 3 tyggja ekki samræmi í áhættu (e. *risk consistent*) á milli svæða eins og æskilegt er. Það verður því að teljast eðlilegra og rökréttara við skilgreiningu á jarðskjálftaálagi fyrir mikilvægisflokka að miða sömuleiðis við tiltekin líkindi líkt og gert er fyrri mikilvægisflokk III. Í þessu samhengi má benda á að bandaríska í byggingarstaðlinum; 2000 *International Building Code (IBC)*, er grunngildi jarðskjálftaálags miðað 2500 ára meðalendurkomutíma og hönnunarskjálfti fyrir venjulegar byggingar miðaður við 2/3 af því, sem er andhverfan af 1,5. Þetta gefur önnur viðmið en sett eru fram í Evrópustaðlinu. Í töflu 3 er sett fram tillaga sem mælt er með að miða við þegar öryggismörk mikilvægisflokkananna eru skilgreind.

Tafla 3 - Mikilvægisflokkar og mikilvægisstuðlar sem mælt er með að nota við skilgreiningu á jarðskjálagi. Mælt er með að virkjunarsvæðin sem kennd eru við Bitru og Hverahlíð miði við mikilvægisflokk II.

Mikilvægis- Flokkur	Normarkaástand Hönnunarstig 1		Brotmarkaástand Hönnunarstig 2	
	Viðmiðunarmörk	Meðal- endurkomutími (ár)	Viðmiðunarmörk	Meðal- endurkomutími (ár)
I	2% líkindi á 10 árum	495	2% líkindi á 50 árum	2475 (~2500)
II	5% líkindi á 10 árum	195	5% líkindi á 50 árum	975 (~1000)
III	10% líkindi á 10 árum ¹	95	10% líkindi á 50 árum	475 (~500) ¹

1) Sömu líkindi og öryggiskröfur og notast er við í Evrópustöðlunum.

Það að miða við framangreind líkindi fyrir mikilvægisflokk II eru svipaðar kröfur og notast var við álagsforsendur fyrir Hellisheiðarvirkjun [1]. Þar var byggt á aðeins örðuvísi forsendum sem skilaði sér í því að stuðst var við 165 ára meðalendurkomutíma fyrir notmarkaástand og 820 ára meðalendurkomutíma fyrir brotmarkaástand miðað við mikilvægisflokk II.

3 MAT Á JARÐSKJÁLFTAÁHRIFUM

3.1 Aðferðafræði

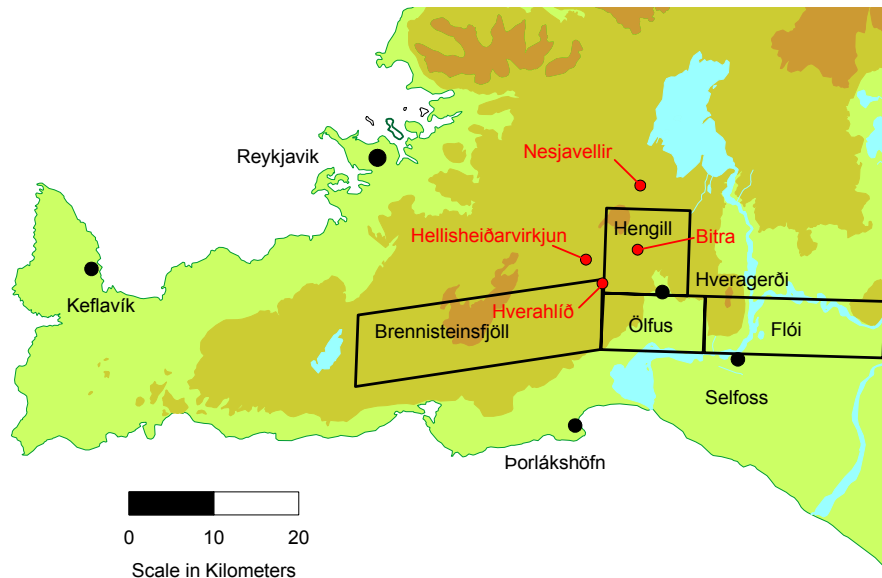
Við mat á jarðskjálftaáhrifum fyrir Hellisheiðarvirkjun var stuðst aðgengileg vákort fyrir svæðið, sviðsetta atburði og líkindafræðilegt mat. Forsendur aðferðanna sem voru notaðar eru tíundaðar í skýrslunni [1] og verða ekki endurteknar hér, sjá einnig [5].

Samkvæmt hröðunarkort Verkfræðistofnun Háskóla Íslands [6] og hröðunarkorti í þjóðarskjölunum með Evrópustöðlunum [7] liggja bæði virkjanasvæðin á stöðum þar sem búast má við meiri yfirborðshröðun 0,4 g miðað við 475 ára meðalendurkomutíma. Í þessari skýrslu verða ekki skoðuð sérstaklega áhrif sviðsettra atburða, en til samanburðar við fyrri virkjunarstaði, þ.e. Nesjavelli og Hellisheiði verður beitt líkindafræðilegu mati á útgildi hröðunar.

3.2 Líkindafræðileg mat

3.2.1 Upptakasvæði jarðskjálfta

Á mynd 2 eru sýnd fjögur upptakasvæði jarðskjálfta sem líkleg eru til vera ráðandi varðandi jarðskjálftaáhrif á hinum nýju virkjunarsvæðum. Hnit stöðvarhúss Nesjavallavirkjunar og Hellisheiðarvirkjunar sem og miðpunktur Bitru- og Hverahlíðarsvæðisins úr töflu 1 eru jafnframt sýnd á myndinni.



Mynd 2 – Upptakasvæði jarðskjálfta sem notuð eru til að meta staðbundin jarðskjálftaáhrif á Hverahlíðarsvæðinu og Bitrusvæðinu. Einnig eru sýndir miðpunktir svæðanna sem og hnit stöðvarhúss Nesjavallavirkjunar og Hellsheiðarvirkjunar, sjá nánar töflu 1.

Eiginleikar upptakasvæðanna á mynd 2 eru sýndir í töflu 4. Þeir eru óbreyttir frá því sem notast var við í skýrslunni um Hellsheiðarvirkjun [1]. Eins og sést liggja nýju virkjunarsvæðin nær virkum upptakasvæðum jarðskjálfta en bæði Nesjavallavirkjun og Hellsheiðarvirkjun og því má búast við meiri jarðskjálftaáhrifum.

Tafla 4 – Kennistærðir fyrir upptakasvæði jarðskjálfta.

Svæði	Lægri stærðarmörk $M_{w,min}$	Árleg tíðni skjálfta stærri en $M_{w,min}$	Beta-stuðull í Gutenberg-Richter líkingunni	Efri stærðarmörk $M_{w,max}$
Brennisteinsfjöll	5,0	0,0339	1,52	6,5
Hengill	5,0	0,0415	2,12	5,75
Ölfus	5,5	0,0235	0,72	6,25
Flói	5,5	0,0365	0,70	6,75

3.2.2 Dvínunarlíkingar

Dvínunarlíkingar lýsa því hvernig jarðskjálftaáhrif dvína með fjarlægðum frá upptökum. Ýmsar kennistærðir eru notaðar til að lýsa áhrifunum. Algengast er að lýsa dvínun útgildi hröðunar en einnig eru velþekktar líkingar sem sýna dvínun lóðhnita í svörunarrófum. Sumar líkingar byggja á stórum gagnasöfnum frá mörgum stöðum á meðan aðrar byggja

á færri en staðbundnari gögnum. Í kjölfar Suðurlandsskjálftanna 2000 var lögð vinna í að endurmeta kennistærðir í dvínunarlíkingu fyrir Ísland [8]. Dvínunarlíkingin byggir á rannsóknum og niðurstöðum sem birtar voru í doktorsritgerð Símonar Ólafssonar [9]. Hér að neðan er dvínunarlíkingin úr heimild [8] SORS-02. endurrituð á einfölduðu formi, sjá einnig [1]:

$$\log_{10}(PGA) = -2,165 + 0,5 \cdot M_w - 1,5 \cdot \log_{10}(R) + 0,243 \cdot P \quad (1)$$

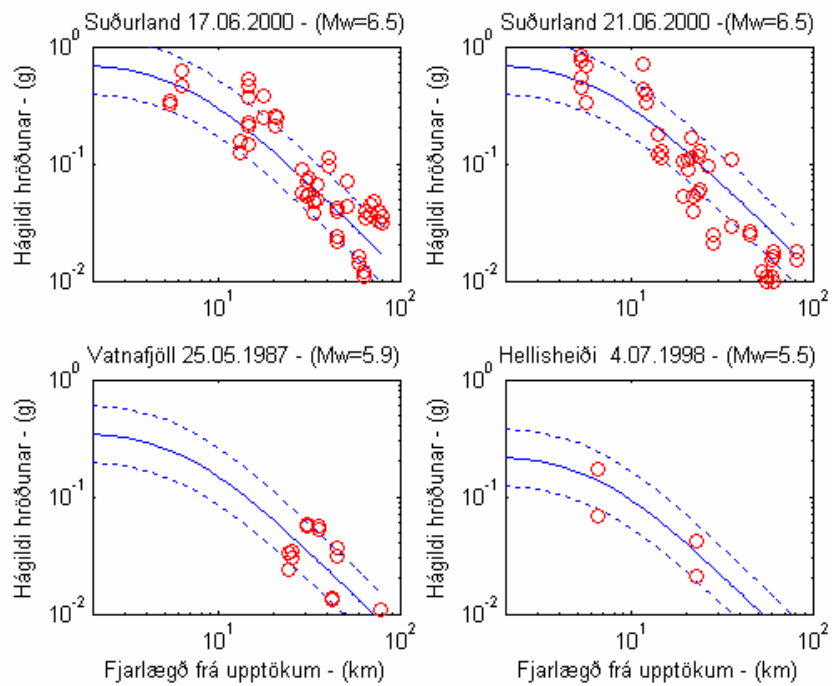
Hér er PGA (g) hágildi hröðunar, M_w er vægisstærð jarðskjálfta (*e. moment magnitude*) og R er fjarlægð frá skjálftaupptökum (*e. hypocenter*) og er skilgreint sem:

$$R = \sqrt{D^2 + h^2} \quad R < 100 \text{ km} \quad (2)$$

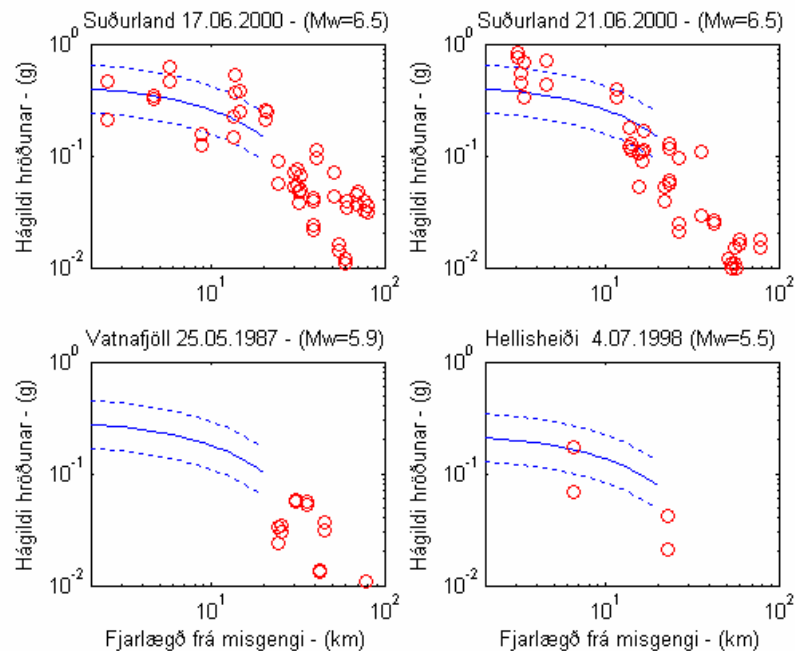
þar sem D (km) er fjarlægð til skjálftamiðju (*e. epicentre*) og h er skjálftadýpi. Í þessari skýrslu er valið að notast við $h=6,5$ km. Síðasti liðurinn í jöfnu (1) er skekkjuliður þar sem gera má ráð fyrir að P sé normaldreifð stærð með meðalgildið 0 og staðalfrávikid 1, þ.e. $P \in N(0,1)$. Á mynd 3 er sýnd mæld útgildi hröðunar úr fjórum íslenskum jarðskjálftum og þau borin saman við dvínunarlíkingu 1. Þetta eru gögn úr stóru Suðurlandsskjálftum 17. og 21. júní 2000, úr Vatnafjallaskjálftanum 25. maí 1987 og Hellisheiðarskjálftanum 4. júlí 1998. Eins og sést ber gögnum ágætlega saman við líkinguna. Rétt er þó að undirstrika að íslensk nærsviðsgögn eru takmörkuð en ljóst er að á virkjunarsvæðinu á Hellisheið verða það einkum nærsviðsjarðskjálftar sem ráða ríki. Til viðbótar má nefna að enn sem komið er eru ekki til aðgengilegar íslenskar dvínunarlíkingar sem lýsa dvínun lóðhnita í svörunarrófi.

Til að ráða bót á þessu bæði hvað varðar nærsviðsáhrif og svörunarróf var í skýrslunni fyrir Hellisheiðarvirkjun stuðst við eina erlendu nærsviðslíkinu frá Ambraseys og Douglas [10] AD-03. Líkingin miðast við upptakafjarlægðir sem eru minni en 15 km. Á mynd 4 er dvínunarlíkingin borin saman við íslensku gögnin. Eins og sést ber íslensku mæligögnum ekki eins vel við erlendu líkinguna og þá íslensku. Rétt er að undirstrika að AD-03 líkingin er grundvölluð á aðhvarfsgreiningu að stærri lárétta stefnuþættinum, en erlendar rannsóknir hafa sýnt að rúmfræðilegt meðaltal (*e. geometrical mean*) stefnuþáttanna er að jafnaði um 12% minna en stærri stefnuþátturinn. Á mynd 5 eru sömu gögn borin saman við aðra þekkta dvínunarlíkingu sem var þróuð af Boore, Joyner og Fumal [11], BJKF-97. Líkingin er grundvölluð á rúmfræðilegu meðaltali lárétta stefnuþáttanna. Á mynd 6 eru loks gögnin borin saman við nærsviðslíkingu Campbell [12], CAMP-97 sem einnig er grundvölluð á rúmfræðilegu meðaltali stefnuþátta. Áberandi er að fyrir stuttar upptakafjarlægðir er þokkalegt samræmi á milli erlendu dvínunarlíkinganna og íslensku gagnanna. Fyrir lengri vegalengdir verður ósamræmið meira og meira áberandi.

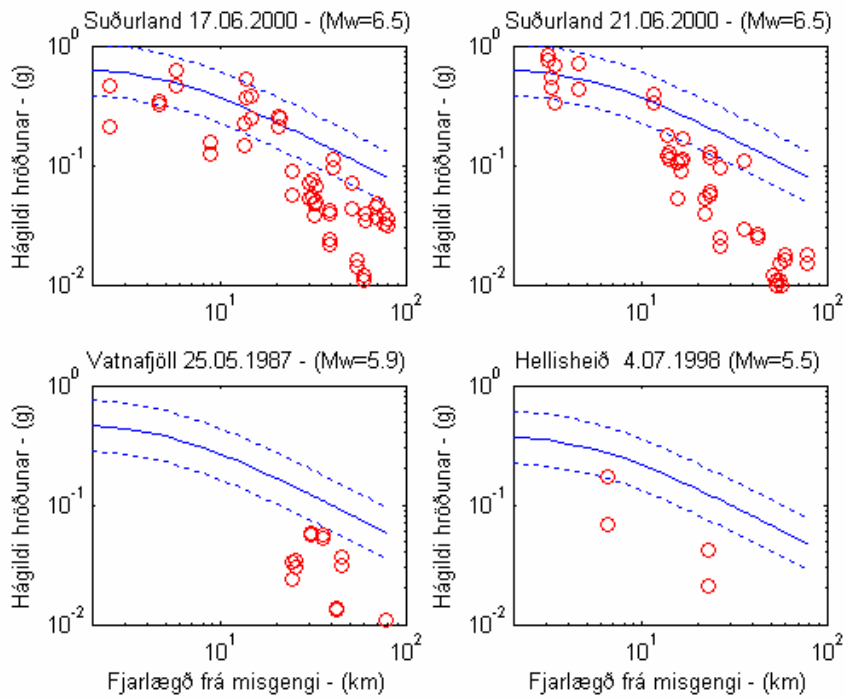
12 Mat á staðbundnum jarðskjálftaáhrifum fyrir Bitru og Hverahlíð á Hellisheiði



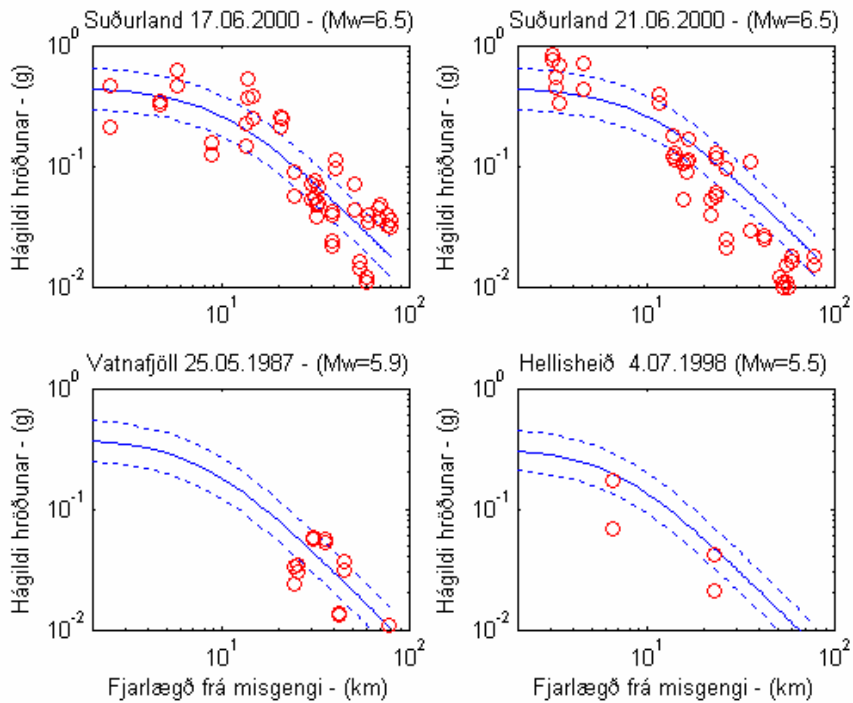
Mynd 3 – Mæld útgildi hröðunar borin saman við íslenska dvínunarlíkingu [8].



Mynd 4 – Mæld útgildi hröðunar borin saman við nærsviðsdvínunarlíkingu [10].



Mynd 5 – Mæld útgildi hröðunar borin saman við dvínunarlíkingu [11].



Mynd 6 – Mæld útgildi hröðunar borin saman við nærsviðsdvínunarlíkingu [12].

3.2.3 Útgildi yfirborðshröðunar

Í töflu 5 eru sýnd reiknuð útgildi hröðunar (*PGA – Peak Ground Acceleration*) með ofangreindum fjórum dvínunarlíkingum, fyrir Nesjavelli, Hellisheiðarvirkjun, Bitru og Hverahlíðar. Miðað er við punktana sem skilgreindir eru í töflu 1 og sýndir á mynd 2. Byggt er á líkindafræðilegu mati og Monte Carlo hermun sem nánar er lýst í skýrslunni um Hellisheiðarvirkjun [1]. Útgildi hröðunar eru reiknuð á öllum stöðunum fyrir þrjá mismunandi meðalendurkomutíma. Í fyrsta lagi fyrir 475 ár sem nota má beint til samanburðar við hröðunarkortið sem fylgir þjóðarskjölunum með Evrópustöðlunum sem og hröðunarkort Verkfræðistofnunar HÍ. Í öðru lagi fyrir 195 ár, þ.e. hönnunarstig 1 og notmarkaástand og í þriðja lagi fyrir 975 ára meðalendurkomutíma, þ.e. hönnunarstig 2 og brotmarkaástand. Í aftasta dálk er reiknað meðaltal fyrir dvínunarlíkingarnar fjórar þó þannig að útgildi hröðunar fyrir AD-03 er lækkað með stuðlinum 0,9 til að leiðrétta fyrir því að sú líking miðast við stærri lárétta stefnuþáttinn. Af töflu 5 má lesa eftirfarandi:

- Allar dvínunarlíkingarnar eru að gefa meiri jarðskjálftaáhrif á nýju virkjunarsvæðunum samanborið við Nesjavelli og Hellisheiðarvirkjun við Kolviðarhól. Aukningin er um 10% samanborið við Hellisheiðarvirkjun.
- Reiknuð jarðskjálftaáhrif eru svipuð á Hverahlíðarsvæðinu og Bitrusvæðinu, þó ívið meiri í Hverahlíðinni.
- Íslenska dvínunarlíkingin SORS-02, er að gefa hæstu hröðunargildin við 975 ára meðalendurkomutíma. Ástæðan fyrri þessu er í fyrsta lagi að skekkjuliðurinn í íslensku jöfnunni er mun meiri en bæði í formúlu AD-03 og BJF-97. Velþekkt er að skekkjuliðurinn hefur afgerandi áhrif á niðurstöður þegar líkindafræðilegum aðferðum er beitt, sjá nánar [5]. Í öðru lagi verður að hafa í huga að fyrir þetta langan meðalendurkomutíma er einkennandi upptakafjarlægð fyrir ráðandi jarðskjálfta orðin mjög lítil (~3,5 til 5 km) og í raun komin út fyrir gildissvið líkingarinnar. Þessi háu hröðunargildi verður því að taka með varúð.
- Samanburður á AD-03, BJF-97, CAMP-97, sýnir nokkurn mun. AD-03 dvínunarlíkingin byggir á aðhvarfsgreiningu á stærri lárétta stefnuþáttinum (*larger horizontal component*) á meðan seinni formúlurnar tvær miðast við rúmfræðilegt meðaltal lárétta þáttanna (e. *geometrical mean*). Með öðrum orðum þetta eru ekki sömu kennistærðirnar þótt náskyldar séu. Eins og áður hefur komið fram er rúmfræðilegt meðaltal beggja lárétta stefnuþáttanna um 12% lægra en stærri lárétti þátturinn. Spyrja má við hvað kennistærð er eðlilegast að miða. Svarið er ekki einhlítt og ræst m.a. af því hvort unnið sé með tvívítt eða þrívítt líkan. Meginreglan er þó sú að styðjast við annaðhvort dvínunarlíkingar sem miða við báða stefnuþættina (e. *arbitrary direction*) eða þá rúmfræðilega meðaltalið, [13]. Í skýrslunni um Hellisheiðarvirkjun [1] var stuðst við AD-03 dvínunarlíkingin ásamt þeirri íslensku en ekki var notast við BJF-97 eða CAMP-97 líkingarnar. Ef taka á mið af rúmfræðilegu meðaltali eins og mælt er með í [13] má því segja að um ákveðið ofmat hafi verið að ræða á yfirborðshröðun í Hellisheiðarskýrslunni.

Tafla 5 – Útgildi yfirborðshröðunar (g) byggt á líkindafræðilegum reikningum.

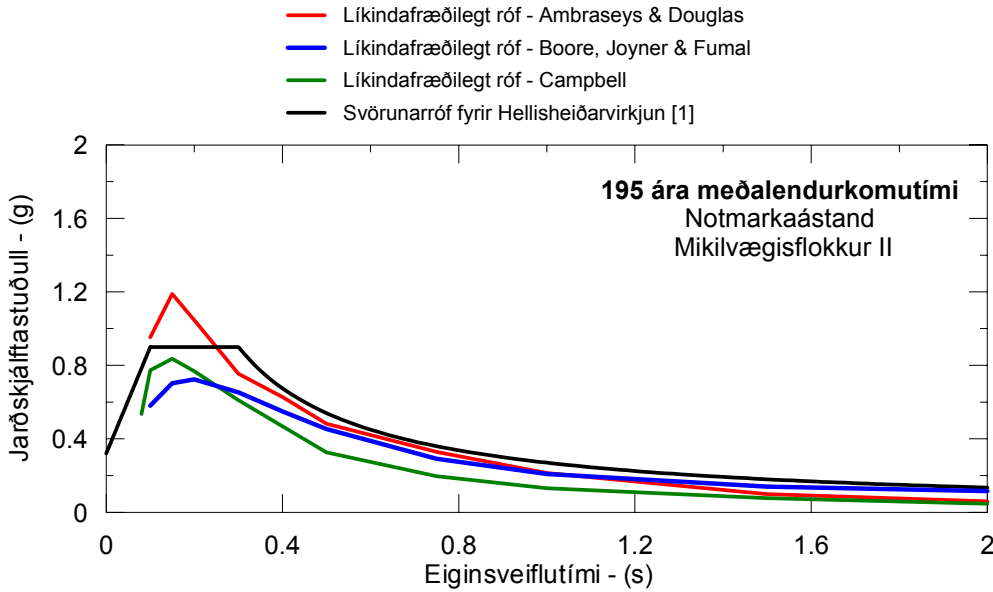
Staður	Ástand	Mikil- vægis- flokkur	Meðal- endur- komutími	Dvínunarlíking				
				SORS-02	AD-03	BJF-97	CA-97	Meðaltal
Nesjavellir	Brotmarka	III	475	0,30	0,34	0,30	0,33	0.31
Hellisheiðarvirkjun	Brotmarka	III	475	0,42	0,42	0,35	0,41	0.39
Bitrusvæðið	Brotmarka	III	475	0,48	0,46	0,39	0,48	0.44
Hverahlíðarsvæðið	Brotmarka	III	475	0,51	0,46	0,39	0,47	0.45
Nesjavellir	Notmarka	II	195	0,24	0,28	0,24	0,26	0.25
Hellisheiðarvirkjun	Notmarka	II	195	0,32	0,34	0,29	0,33	0.31
Bitrusvæðið	Notmarka	II	195	0,37	0,37	0,32	0,40	0.36
Hverahlíðarsvæðið	Notmarka	II	195	0,38	0,37	0,32	0,39	0.36
Nesjavellir	Brotmarka	II	975	0,36	0,40	0,35	0,38	0.36
Hellisheiðarvirkjun	Brotmarka	II	975	0,52	0,48	0,41	0,47	0.46
Bitrusvæðið	Brotmarka	II	975	0,57	0,52	0,45	0,54	0.51
Hverahlíðarsvæðið	Brotmarka	II	975	0,63	0,53	0,45	0,54	0.52

3.2.4 Svörunarróf

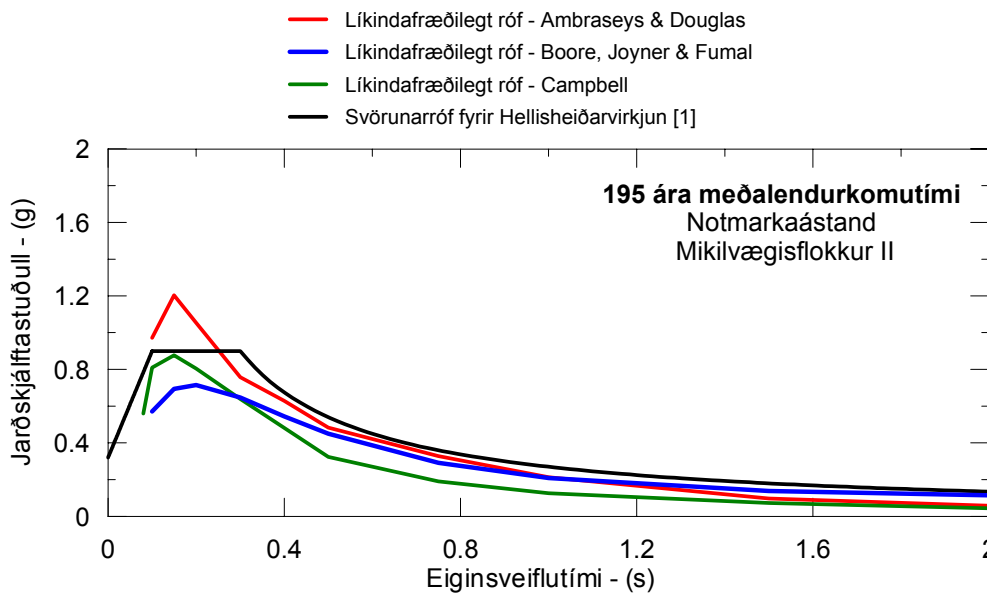
Dvínunarlíkingar sem lýsa lóðhnitum í svörunarrófi henta betur til að lýsa jarðskjálftaáhrifum m.t.t. mannvirkjagerðar en dvínunarlíkingar sem lýsa útgildum hröðunar. Á móti kemur að ekki hafa verið settar fram íslenskar dvínunarlíkingar á aðgengilegu formi sem lýsa dvínun lóðhnita í svörunarrófum með áreiðanlegum hætti. Því verður að taka mið af erlendum dvínunarlíkingum fyrir lóðhnit svörunarrófa en einnig má hafa til hliðsjónar stöðluð svörunarróf Evrópustaðlanna sem kvörðuð eru með útgildi hröðunar. Í mat á jarðskjálftaáhrifum fyrir Hellisheiðarvirkjun var notast við dvínunarlíkingu fyrir lóðhnit í svörunarrófi frá Ambraseys og Douglas [10]. Um var að ræða sérstaka nærsviðslíkingu sem hentar þegar upptakafjarlægðin er minni en 15 km. Það sem mælir á mót líkingunni er hins vegar að hún miðast við stærri lárétta stefnuþáttinn sem líkt og fyrir útgildi hröðunar gefur ofmat ef miða á álagið við meðaltal stefnuþáttanna. Hér hafa erlendar rannsóknir sýnt [12] að rúmfræðilega meðaltal lárétta stefnuþáttanna er um 17% lægra en stærri stefnuþátturinn. Einnig er dreifnin í rófsgildunum sem aðhvarfsgreiningin byggist á meiri heldur en fyrir útgildi hröðunar. Þetta endurspeglast í stærri skekkjulið en fyrir útgildi hröðunar og þetta hefur áhrif á niðurstöðurnar í líkindafræðilega matinu.

Á myndum 7 og 8 eru sýnd líkindafræðileg róf með 195 ára meðalendurkomutíma sem byggja á dvínunarlíkingum [10], [11] og [12] fyrir annars vegar Bitru- og hins vegar Hverahlíðarvirkjunarsvæðið. Til samanburðar er sýnt svörunarrófið fyrir Hellisheiðarvirkjun [1]. Líkindafræðilegu rófin eru sem fyrr reiknuð fyrir miðpunkta svæðanna. Eins og sést er mikill munur á rófunum við eiginsveiflutíma undir 0,4 s. Sérstaklega sker AD-03 rófið sig úr. Í fyrsta lagi skýrist munurinn af mismunandi skilgreiningum á

rófsgildunum, þ.e. rúmfræðilegt meðaltal í BJT-97 og CAMP-97 líkingunum á móti stærri stefnuþættinum í AD-03 líkingunni. Í öðru lagi eru stærð skekkjuliðarins mismunandi en hann er mestur í AD-03 líkingunni sem líka eykur muninn á milli rófanna. Á mynd 9 er búið að taka meðaltal af líkindafræðilegu rófunum þremur en þó þannig að rófið sem byggir á AD-03 dvínunarlíkingunni hefur verið lækkað með stuðlinum 0,85 til að leiðrétta fyrir því að það rófið byggir á stærri lárétta stefnuþættinum.

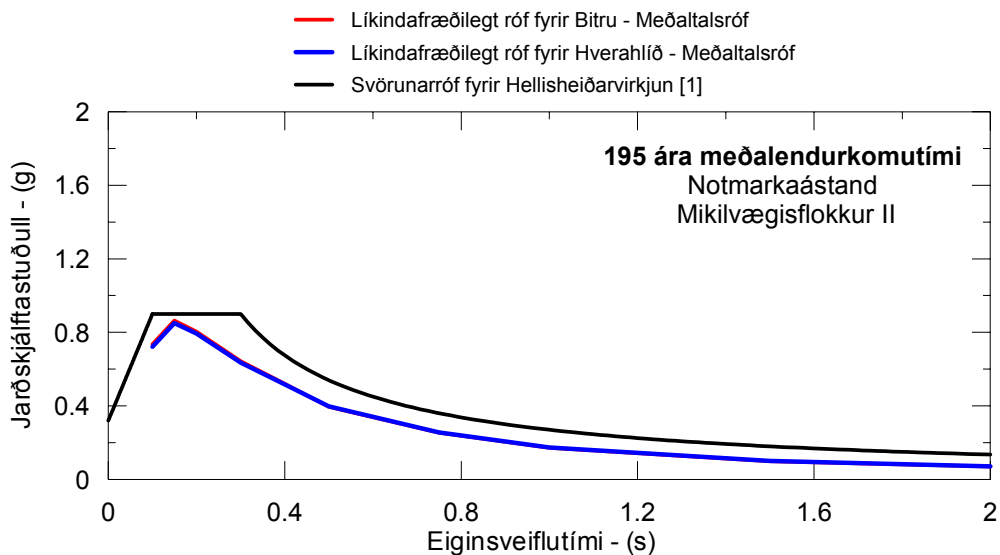


Mynd 7 – Samanburður á líkindafræðilegum rófum fyrir Bitrusvæðið og svörunarrófinu sem notað var fyrir Helligheiðarvirkjun fyrir Hönnunarstig 1.

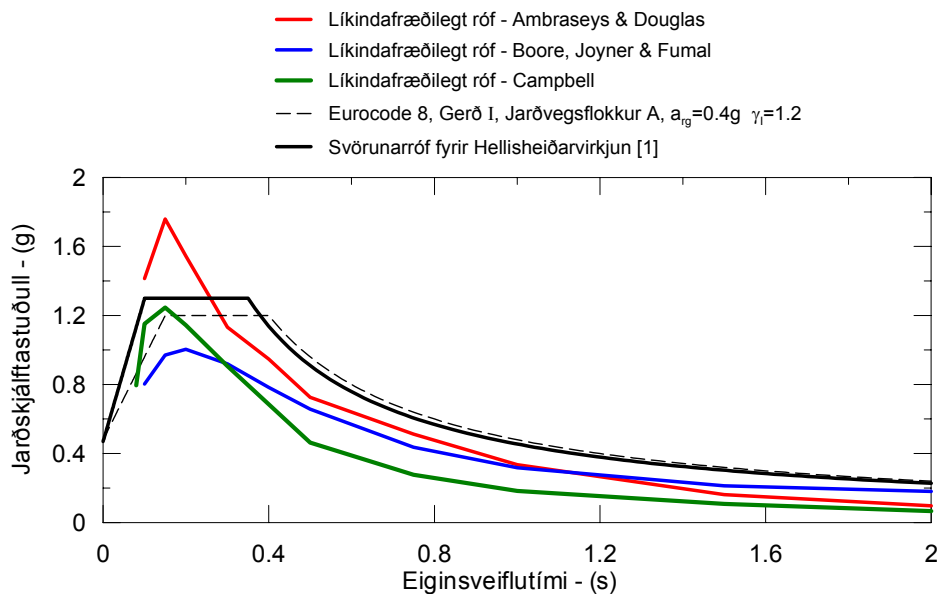


Mynd 8 – Samanburður á líkindafræðilegum rófum fyrir Hverahlíðarsvæðið og svörunarrófinu sem notað var fyrir Helligheiðarvirkjun fyrir Hönnunarstig 1.

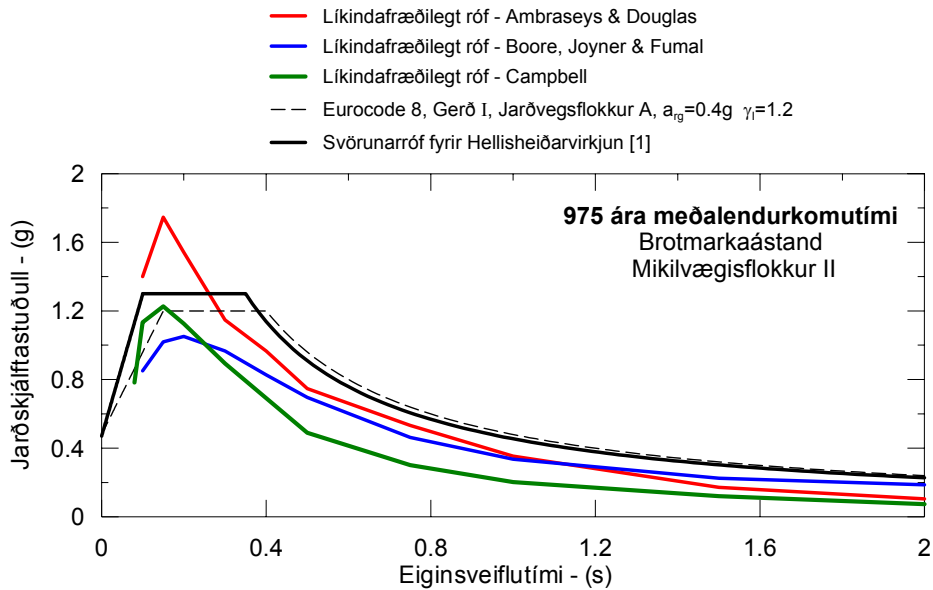
Á myndum 10 og 11 eru á tilsvarandi hátt sýnd líkindafræðileg róf með 975 ára meðalendurkomutíma sem byggir á sömu dvínunarlíkingunum fyrir annars vegar Bitru- og hins vegar Hverahlíðarvirkjunarsvæðið. Á mynd 12 er sömuleiðis sýnt meðaltalsróf byggt á hinum þremur líkindafræðilegu rófum og með sömu leiðréttingu og að framan á AD-03 rófínu.



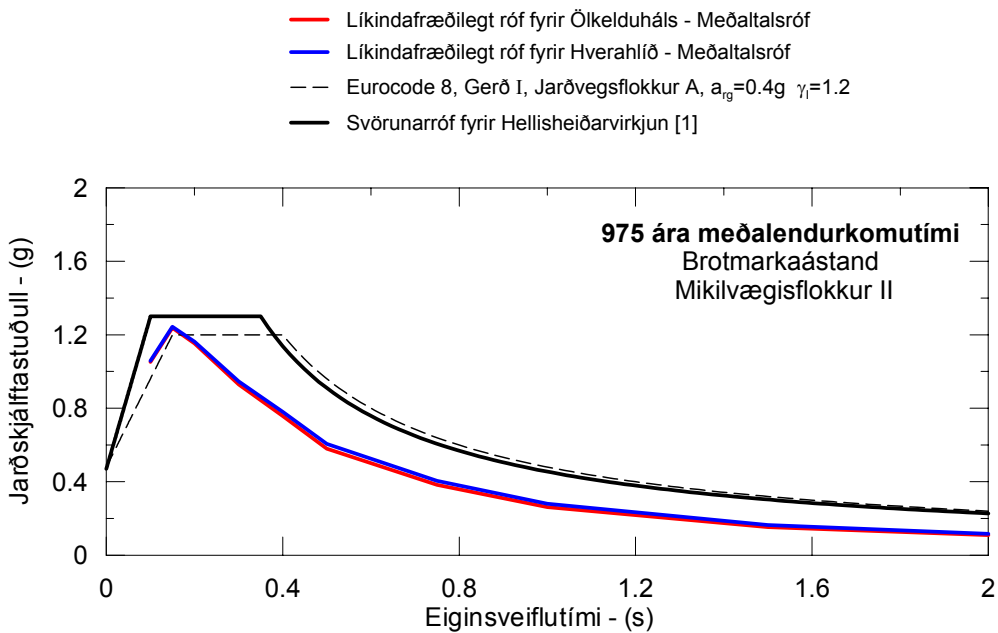
Mynd 9 – Samanburður á líkindafræðilegum meðaltalsrófum fyrir Bitru og Hverahlíð og rófínu sem notað var fyrir Hellsheiðarvirkjun fyrir Hönnunarstig 1.



Mynd 10 – Samanburður á líkindafræðilegum rófum fyrir Bitrusvæðið og rófi úr Evrópustöðlunum og svörunarrófínu sem notað var fyrir Hellsheiðarvirkjun. Hönnunarstig 2 – Meðalendurkomutími 975 ár.



Mynd 11 – Samanburður á líkindafræðilegum rófum fyrir Hverahlíðarsvæðið og rófi úr Evrópustöðlunum og svörunarrófinu sem notað var fyrir Hellsheiðarvirkjun. Hönnunarstig 2 – Meðalendurkomutími 975 ár.



Mynd 12 – Samanburður á líkindafræðilegum meðaltalsrófum fyrir Bitru og Hverahlíð og rófi úr Evrópustöðlunum og rófinu sem notað var fyrir Hellsheiðarvirkjun fyrir Hönnunarstig 2.

4 HÖNNUNARÁLAG

Byggt á framangreindum forsendum og útreikningum er hér lagt til að fyrir hin nýju virkjunarsvæði verði útgildi hröðunar miðað við meðaltal hröðunargilda úr töflu 5 fyrir viðkomandi hönnunarstig, þ.e.a.s að notast við aftasta dálkinn í töflunni. Þar sem lítil munur er á útgildi hröðunar fyrir annars vegar Bitru og hins vegar Hverahlíð er því lagt til að miða útgildi hröðunar við 0,36 g fyrir hönnunarstig 1 á báðum svæðum og 0,52 g fyrir hönnunarstig 2 á báðum svæðunum.

Línulegt svörunarróf til grunvallar við hönnun byggir sömuleiðis á vegnu meðaltalsrófunum sem sýnd eru á myndum 9 og 12 hér að framan. Rófin miðast við að mannvirki séu grunduð á klöpp eða tilsvareandi stífar jarðvegsaðstæður, þar sem einkennandi skúfbylgjuhraði í efstu 30 m er $V_{s,30} \geq 760 \text{ m/s}$. Einnig er miðað við að raf- og vélbúnaður verði á jarðhæð stöðvarhúss eða á stífri undirstöðu og áraun á búnaðinn því hin sama og væri hann staðsettur á jörðu niðri. Með tilvísan til Evrópustaðals miðast álagið við mikilvægisflokk II. Líkindin sem lögð eru til grundvallar eru aðeins betrubætt frá því sem gert var fyrir Hellisheiðarvirkjun og er það m.a. gert til að einföldunar horft til lengri tíma. Tvö svörunarróf, $S_a(T)$ eru gefin, þ.e. eitt fyrir hönnunarstig 1 sem miðast við meðalendurkomutímann 195 ár og eitt fyrir brotmarkaástand sem miðast við meðalendurkomutímann 950 ár. Framsetning rófanna er með þeim hætti að ekki þarf að nota mikilvægisstuðul til að kvarða þau. Ennfremur á ekki að nota álagsstuðla á jarðskjálftaálagið í samræmi við EC8. Undirstrikað skal að ekki hefur verið tekið tillit til hegðunarstuðla. Að lokum er mælt með því að ákvarða hönnunarróf fyrir lóðréttu áraun með þeim aðferðum sem gefnar eru í EC8-staðlinum. Rófin og tilheyrandi útgildi hröðunar eru gefin sem:

Hönnunarstig 1, Notmarkaástand - mikilvægisflokkur II:

PGA=0,36 g

$$S_a(T) = \begin{cases} 0,36 \cdot \left(1 + \frac{T}{0,1} \cdot 1,36\right) g & T < 0,1s \\ 0,85 g & 0,1s \leq T \leq 0,25s \\ 0,85 \cdot \left(\frac{0,25}{T}\right) g & T > 0,25s \end{cases} \quad (10)$$

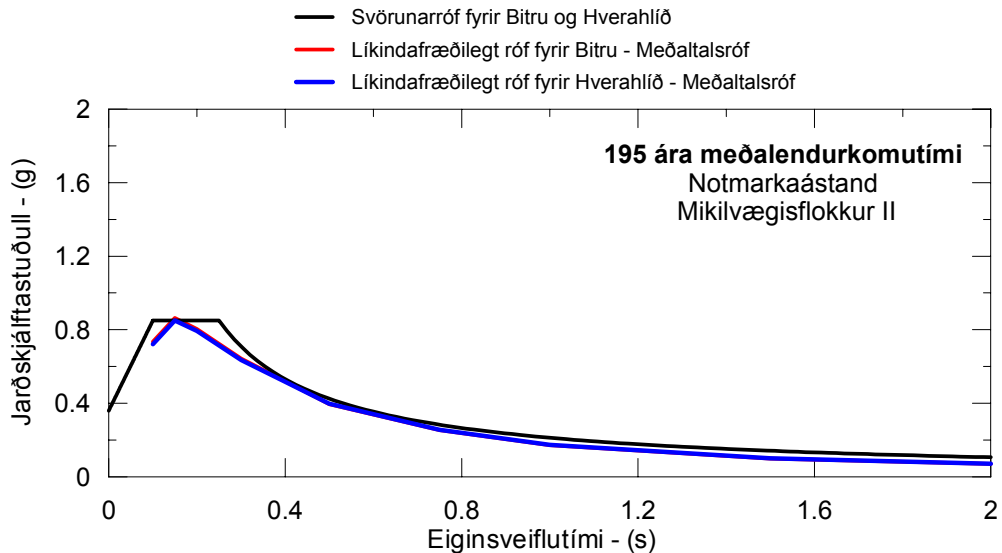
Hönnunarstig 2, Brotmarkaástand - mikilvægisflokkur II:

PGA=0,52 g

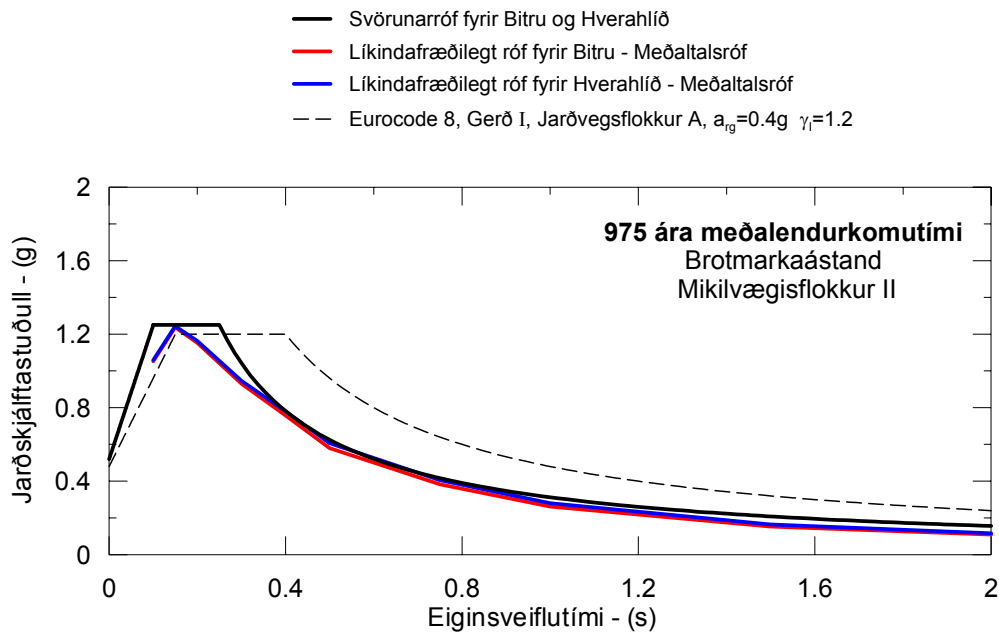
$$S_a(T) = \begin{cases} 0,52 \cdot \left(1 + \frac{T}{0,1} \cdot 1,4\right) g & T < 0,1s \\ 1,25 g & 0,1s \leq T \leq 0,25s \\ 1,25 \cdot \left(\frac{0,25}{T}\right) g & T > 0,25s \end{cases}$$

Á mynd 13 og 14 er svörunarrófin fyrir hönnunarstig 1 og 2 borin saman við meðaltalsrófin fyrir Bitru- og Helligshéiðarvirkjun.

Svörunarrófin vaxa línulega frá PGA-gildi við eiginsveiflutímann $T=0$ s að hágildi rófs, S_{max} við eiginsveiflutímann $T=0,1s$. Stíf burðarvirki, t.d. undirstaða undir vélarsamstæðu, fær þannig mun minni áraun en ef hönnunarrófið hefði byrjað í, S_{max} , við $T=0$. Hins vegar má benda á að burðareiningar sem eru stífar við lítið álag geta myndað plastíska flotliði við mikið álag og þannig lengt grunnsveiflutíma mannvirkis og eða búnaðar og fært það inn á orkuríkara tíðniband. Með öðrum orðum í hönnun sem byggir á eiginsveiflugreiningu og útreikningum á fjaðursviði er álagið vanmetið ef plastískar formbreytingar verða í jarðskjálfta og sveiflutími lengist. Þessi atriði verður hönnuður að hafa í huga þegar álagið er skilgreint.



Mynd 11 – Tillaga að línulegu svörunarrófi (deyfihlutfall=0,05) fyrir hönnunarstig 1 fyrir virkjanasvæðin við Bitru og í Hverahlíðum á Helligshéiði. Til samanburðar eru sýnd líkindafræðileg róf fyrir Bitru og Hverahlíð.



Mynd 12 – Tillaga að línulegur svörunarrófi (deyfihlutfall=0,05) fyrir hönnunarstig 2 fyrir virkjanasvæðin við Bitru og í Hverahlíðum á Hellsheiði. Til samanburðar eru sýnd líkindafræðileg róf fyrir Bitru og Hverahlíð sem og svörunarróf byggt á Evrópustöðlunum.

5 LOKAORÐ

Í þessari skýrslu hafa verið sett fram mat á áætluðu útgildi yfirborðshröðunar sem og jarðskjálftasvörunarróf fyrir virkjanasvæðin við Bitru og í Hverahlíð á Hellsheiði. Við mat á jarðskjálftaáhrifum var beitt líkindafræðilegum aðferðum þar sem tekið er tillit til skekkju- og óvissuliða í samræmi við hefðbundnar og viðurkenndar aðferðar á þessu sviði.

Lagt er til að miða hönnunina á virkjunarsvæðunum við mikilvægisflokk II í Evrópustöðlunum. Öryggiskröfurnar fyrir þennan flokk verði skilgreindar þannig að álagið miðast við að 5% líkindi á 50 árum fyrir brotmarkaástand. Fyrir venjulegt íbúðarhúsnæði er til samanburðar samkvæmt staðli miðað við 10% líkindi á 50 árum sem samsvarar mikilvægisflokk III. Þetta byggir á þeim forsendum að litlar líkur eru á manntjóni eða slysum á fólki þótt virkjunarmannvirki eyðileggist í jarðskjálftum. Sömuleiðis er umhverfi eða menningarverðmæti ekki í hættu. Loks ætti félagslegt tjón að vera í lágmarki ef gengið er út frá þeirri forsendu að aðrar virkjanir sem eru tengdar inn á landsnet geti sinnt neyðarþjónustu og almenningi í kjölfar jarðskjálfta. Eftir stendur að líklegt verður að telja að umtalsvert efnahagslegt tjón geti orðið fyrir eiganda og stóra orkukaupendur ef raforkuframleiðslan stöðvast.

Það skal undirstrikað að það er mikilvægt og eðlilegt að eigendur velti öryggi orkuvers fyrir sér og horfi annars vegar á afleiðingar þess að tjón verði á orkuverinu og raforkuframleiðsla stöðvist og hins vegar því hversu mikið það kostar í hönnun, stofnkostnaði og rekstri að auka öryggi mannvirkjanna og vélbúnaðar gagnvart jarðskjálftaáraun.

Sett eru fram tvö hönnunarstig fyrir raf- og vélbúnað í samræmi við það sem gert var fyrir Nesjavallavirkjun og Hellisheiðarvirkjun. Hönnunarstigun eru tengd saman við annars vegar notmarkaástand og hins vegar brotmarkaástand. Varðandi búnaðinn er þó spurning hvort gera eigi sömu kröfur til hans og bygginga orkuversins í ljósi þess að væntanlega er líftími búnaðarins mun styttri en líftími byggingar. Ljóst er að ekki eru líkur á dauðsföllum og slysum þó vélbúnaður bili í kjölfar jarðskjálfta og aftur er það því spurningin hversu alvarlegt það sé ef orkuvinnsla stöðvist tímabundið eftir skjálfta. Ennfremur má í þessu samhengi spyrja um viðbótarkostnað við að auka öryggi vélbúnaðar.

Gert er ráð fyrir að lengd mannvirkis sé það lítil að gera megi ráð fyrir sömu yfirborðshreyfingum undir öllu mannvirkinu. Þessi forsenda er góð og gild fyrir venjulegar byggingar. Fyrir hlutfallslega löng mannvirki eins og t.d. pípulagnir verður að huga að breytileika yfirborðshreyfingar í rúmi og tíma. Í hinum nýju Evrópustöðlunum er sérstaklega bent á þessa þætti (*e. spatial variation*).

Fróðlegt er að bera framkomnar niðurstöður saman við jarðskjálfta-hönnunarforsendur sem ákvarðaðar voru fyrir stækkun Nesjavallavirkjunar árið 1996 sem og fyrir Hellisheiðarvirkjun. Fyrir Nesjavelli var hágildi hönnunarrófs skilgrein sem $S_{max}=1,1g$ fyrir hönnunarstig 2, sem má líta á sem brotmarkaástand með mikilvægisstuðli. Sambærilegt gildi fyrir Hellisheiðarvirkjun var $S_{max}=1,3g$. Hér er niðurstaðan hins vegar $S_{max}=1,25g$ eða ívið lægri gildin en fyrir Hellisheiðarvirkjun. Eðlilegt hefði verið að búast við meira jarðskjálftaálagi á Bitru og í Hverahlíð en fyrir Hellisheiðarvirkjun vegna þess að nýju svæðin liggja nær upptakasvæðum jarðskjálfta en Hellisheiðarvirkjun. Meginástæðan er sú að við líkindafræðilegt mat á svörunarrófi fyrir Hellisheiðarvirkjun var byggt á einni nærsviðslíkingu sem byggði á aðhvarfsgreiningu að stærri lárétta hröðunarstefnuþættinum. Við skilgreiningu á hönnunarálagi er hins vegar meiri hefð að nota aðhvarfsgreiningu að rúmfræðilegu meðaltali eða þá að báðum lárétta stefnuþáttunum. Rannsóknir hafa sýnt að rúmfræðilegt meðaltal í lóðhnitum svörunarrófs er í kringum 17% lægra en ef lóðhnitin byggja eingöngu á stærri stefnuþættinum. Í þessari skýrslu var stuðst við fyrrgreinda dvínunarlíkingu en gildin sköluð niður um 15% en auk þess var notast við tvær aðrar dvínunarlíkingar sem byggja aðhvarfsgreiningu að rúmfræðilegu meðaltali. Í matinu var svo fundið meðaltalsróf byggt á öllum þremur líkingunum.

6 HEIMILDIR

- [1] Bjarni Bessason og Páll Einarsson, 2003. *Mat á staðbundnum jarðskjálftaáhrifum fyrir orkuver á Hellisheiði*, Skýrsla nr. 03002, Rannsóknarmiðstöð í jarðskjálftaverkfræði, Háskóli Íslands, 32 bls.
- [2] Bjarni Bessason, 2003, Mat á staðbundnum jarðskjálftaáhrifum, *Árbók VFÍ- TFÍ 2003*, bls. 227-236.
- [3] Páll Einarsson o.fl., 1999. *Sniðgegni við Bláffjöll á Reykjaneskaga*, Erindi á vorráðstefnu Jarðfræðifélags Íslands, 20. apríl 1999.
- [4] Ragnar Sigbjörnsson, Símon Ólafsson, Bjarni Bessason, Gunnar I. Baldvinsson, Benedikt Halldórsson, Jónas Þór Snæbjörnsson og Óðinn Þórarinnsson, 1998. *Jarðskjálftar með upptök í Hellisheiði 4. júní 1998*, Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, skýrsla nr. 98001, Reykjavík.
- [5] Bjarni Bessason, 1992. *Assessment of Earthquake Loading and Response of Seismically Isolated Bridge*, Dr. thesis, Norges Tekniske Høgskole.
- [6] Júlíus Sólnes, Ragnar Sigbjörnsson og Jónas Eliasson, 2004. Probabilistic Seismic Hazard Mapping of Iceland, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, Paper no. 2337.
- [7] Björn Ingi Sveinsson og Páll Halldórsson, 2002. *Hröðunarkort fyrir Ísland*, Kynnt á fundi Byggingarstaðlaráðs, 5. desember 2002.
- [8] Símon Ólafsson & Ragnar Sigbjörnsson, 2002. Attenuation of Strong-Motion in the South Iceland Earthquakes of June 2000, *Proc. of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, Geisladiskur: Paper 412, London, Elsevier.
- [9] Símon Ólafsson, 1999. *Estimation of Earthquake-Induced Response*, Doktoringeniöravhandling 1999:75, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- [10] Ambraseys, N, & J. Douglas, 2003. Near-field horizontal and vertical earthquake ground motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **23**, 1-18
- [11] Boore, D. M, W.B. Joyner & T.E. Fumal, 1997. Equations for estimating Horizontal Response Spectra and Peak Accelerations from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 128-153.
- [12] Campbell, K, 1997. Empirical Near-Source Attenuation Relationship for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 154-179.
- [13] Baker, J.W & C.A. Cornell, 2006. Which Spectral Acceleration Are You Using?, *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 2, bls. 293-312.