



Jarðskjálftasvörun langra brúa með mörgum undirstöðum

Rannsóknarverkefni Vegagerðarinnar

Birgir Indriðason

Mái 2015

VSÓ RÁÐGJÖF

Útdráttur

Jarðskjálftagreiningar geta verið flóknar í vinnslu og nýta flestar núverandi aðferðir töluverðar einfaldanir til að minnka umfang greininganna. Ein slík einföldun er að sleppa að taka tillit til staðbundins breytileika í jarðskjálftaáraun.

Í sinni einföldustu mynd þá dreyfast jarðskjálftar út frá upptökum sínum í allar áttir með ákveðnum hraða. Þessi hraði getur verið mjög breytilegur eftir bæði jarðvegsaðstæðum og eiginleikum jarðskorpunnar. Það gefur því auga leið að fyrir mannvirki þar sem langt er á milli undirstaðna getur verið lítil fylgni og tímamismunur á því hvenær bylgjurnar dynja á sérhverri undirstöðu mannvirkis. Þessi áhrif eru oft nefnd tap í fylgni og er þessu verkefni ætlað að skoða þau áhrif sem tap í fylgni hefur á hegðun slíkra mannvirkja. Skoðuð eru áhrif fylgnitaps (e. incoherence) og framrásar jarðskjálftabylgju (e. wave passage effect). Þrjú tilvik eru skoðuð: Fullkomin fylgni, tap í fylgni og engin fylgni. Einnig eru ýmsar breytur sem hafa áhrif á fylgnina skoðaðar, s.s. útbreiðsluhraði jarðskjálftabylgna og innfallshorn þeirra. Að lokum eru áhrif breytinga í deyfingu skoðuð og velt er vöngum yfir áhrif þeirra á hönnun, auk þess eru breytingar í þversniðseiginleikum tekin fyrir.

Formáli

Árið 2013 skilaði höfundur meistararitgerð við NTNU í Noregi. Sú ritgerð fjallar um jarðskjálftaáraun á fljótandi umferðargöng. Þar eru tekin sérstaklega fyrir þau áhrif sem tap í fylgni jarðskjálftaáraunar hefur á slík mannvirki. Upp kom sú hugmynd að áhugavert væri að skoða þetta fyrir íslenskar aðstæður og þá með tilliti til langra brúa. Höfundur starfar hjá VSÓ Ráðgjöf og vinnur verkefnið fyrir Vegagerðina sem styrkti verkefnið.

Efnisyfirlit

Útdráttur	1
Formáli.....	2
Efnisyfirlit.....	3
1 Inngangur	4
2 Aðferðafræði.....	5
2.1 Lausn í tíðnirúminu	5
2.2 Fylgni jarðskjálftaálags.....	6
2.3 Líkindafræðileg lausn	8
3 Viðfangsefni rannsóknar – Óseyrarbrú	9
3.1 Gerð hreyfingarlíkans	10
3.2 Hröðunarróf jarðskjálfta.....	13
3.3 Fylgni líkön	14
4 Niðurstöður	14
5 Ályktanir	25
6 Sérstakar þakkir	26
7 Heimildir.....	27

1 Inngangur

Mannvirki sem verða fyrir jarðskjálftaáraun eru venjulega hönnuð með þeirri nálgun að allar undirstöður þess verði fyrir sams konar álagi (fullkomin fylgni). Þetta er talin góð nálgun fyrir mannvirki þar sem stutt er á milli undirstaðna. Hins vegar, hefur sama nálgun verið notuð við hönnun á lengri mannvirkjum, þar sem töluverð vegalengd er á milli undirstaðna. Þetta getur til dæmis átt við um langar brýr eins og Óseyrarbrúnna, sem er notuð sem dæmi í þessu verkefni.

Ýmsir hafa skoðað áhrif fylgnistaps á löng mannvirki. Zhang, Li et al. (2009) framkvæmdu greiningu á hengibrú þar sem þeir skoðuðu áhrif þriggja mismunandi þátta fylgni í jarðskjálftaáraun. Þeir komust að því að fyrir nákvæma greiningu á löngum mannvirkjum skuli staðbundinn breytileiki af jarðskjálftaálagi tekin með. Sigbjörnsson, Rupakhety et al. (2013) skoðuðu staðbundin breytileika á jarðskjálftaáraun af gögnum sem fengust úr jarðskjálftanum í Ölfusi árið 2008. Þeir komust að því að breytileiki í jarðskjálftahreyfingum er töluverður og breytist með tíðni og fjarlægð milli mælistöðva. Einnig komast þeir að því að breytileiki í fylgni hreyfinga í mismunandi stefnur eru umtalsverður.

Árið 2008 varð snarpur skjálfti í Ölfusi í grennd við Óseyrarbrúnna, mældist skjálftinn 6,3 M_w . Einnig hafa komið fram vísbendingar um lágtíðni-hraðapúls sem er oft tengdur við svokölluð nærsprunguáhrif (Sigbjörnsson, Snæbjörnsson et al. 2009). Slík áhrif hafa vafalaust haft mikil áhrif á svörun brúarinnar, enda skemmdist hún nokkuð við skjálftann. Þar má nefna skemmdir á landstöplum, þar sem hliðarveggir brotnuðu frá og skemmdir á miðstöplum þar sem hliðarstopparar brotnuðu (Jónsson 2009). Vísbendingar gefa til kynna að færslur brúarinnar hafi verið yfir 10 cm, mest á endunum við landsstöplana.



Mynd 1: Skemmdir á landstöpli Óseyrarbrúar (Jónsson 2009).

Aðalmarkmið þessa verkefnis er að framkvæma jarðskjálftagreiningu á einföldu brúarlíkani og skoða áhrif staðbundins breytileika í jarðskjálftaálagi. Einnig er hulti verkefnis að meta hvað mannvirkið þurfi að vera langt svo tapið í fylgni fari að hafa teljandi áhrif. Að auki verða skoðaðar aðrar breytur sem geta haft áhrif á hegðun mannvirkisins eins og deyfing, bylgjuhraði, innfallshorn jarðskjálftabylgna og þversniðseiginleika brúardekksins.

2 Aðferðafræði

Hreyfingarlíkan brúarinnar er byggt á jöfnunni:

$$M\ddot{r} + C\dot{r} + Kr = Q_s(t) \quad (1)$$

Þar sem M , C og K eru massa, deyfingar og stífniþykki kerfisins. Færslu-, hraða- og hröðunarvigrar mannvirkisins eru táknaðir með r , \dot{r} and \ddot{r} og $Q_s(t)$ stendur fyrir jarðskjálftaáráun sem leggst á kerfið og er háð hröðun, hraða og færslu undirstöðupunkta kerfisins (Langen and Sigbjörnsson 1979). Í þessu verkefni er notuð aðferð sem leysir þessa líkingu í tíðnirúminu og er henni lýst hér á eftir.

2.1 Lausn í tíðnirúminu

Hreyfingarlíkinguna (jafna 1) er hægt að leysa bæði í tíðni- og tímarúminu. Í þessari rannsókn er stuðst við lausn í tíðnirúminu. Aðferðin, í sinni einföldustu mynd, lýsir svörun mannvirkisins sem harmónísku falli $r = r_0(\omega)\exp(i\omega t)$. Með því að skeyta því inn í jöfnu 1 fæst:

$$[K(\omega) - \omega^2 M(\omega) + i\omega C(\omega)]r_0(\omega) = Q_s(\omega) \quad (2)$$

Hér táknar $Q_s(\omega)$ tiltekinn harmónískan þátt álagsins. Lausnin fæst með því að leysa jöfnuna fyrir sérhvern tíðniþátt:

$$r_0(\omega) = H(\omega)Q_s \quad (3)$$

þar sem tíðnisvörunarfallið $H(\omega)$ (e. frequency response function) er gefið sem:

$$H(\omega) = [K(\omega) - \omega^2 M(\omega) + i\omega C(\omega)]^{-1} \quad (4)$$

Rétt er að benda á að aðferðin gildir einnig þegar $Q_s(\omega)$ er Fourierróf $Q_s(t)$ sem er ákvarðað á grundvelli hröðunar, hraða og færslu undirstaðna mannvirkisins. Í þeim tilvikum þegar hröðunarþáttur áraunarinnar er ráðandi er áraunin táknuð sem:

$$Q_s(t) = -ME\alpha_g(t) \quad (5)$$

þar sem M táknar massafylki kerfisins, E er áhrifavigur og α_g er hröðun undirstöðunnar (Langen and Sigbjörnsson 1979).

2.2 Fylgni jarðskjálftaálags

Jarðskjálftabylgjurnar ferðast um jarðskorpuna með ákveðnum hraða og tíðni. Fyrir mannvirki þar sem stutt er á milli undirstaðna, þá mæta bylgjurnar um það bil á sama tíma á öllum undirstöðum. Í því tilviki er góð nálgun að segja að fullkomin fylgni sé á milli jarðskjálftaálagsins fyrir hverja undirstöðu mannvirkisins. En hvað gerist ef fjarlægðin lengist á milli undirstaðna? Þá er hægt að búast við örlítilli seinkun á mætingu bylgnanna til þeirra undirstaðna sem eru fjær upptökum jarðskjálftans. Þetta getur orsakað minni fylgni álags á undirstöðurnar. Einnig geta aðrir þættir haft áhrif, eins og hegðun jarðskjálftabylgnanna í jarðskorpunni sem og breytilegir staðarhættir, t.d. mismunur í jarðlögum.

Fylgni jarðskjálftaálags milli undirstaðna í mannvirkinu má tákna með krossrófi (e. cross-spectral density). Ef gert er ráð fyrir að mannvirkið hafi alls n undirstöður má tákna krossrófið sem:

$$S(\omega, \xi) = [S_{jk}] = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega, 0) & S_{12}(\omega, \xi) & \dots & S_{1n}(\omega, \xi) \\ S_{21}(\omega, \xi) & S_{22}(\omega, 0) & \dots & S_{2n}(\omega, \xi) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(\omega, \xi) & S_{n2}(\omega, \xi) & \dots & S_{nn}(\omega, 0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Hér táknar ω tíðni og ξ fjarlægð.

Hver liður í fylkinu hér að ofan hefur að geyma tíðniróf jarðskjálftalags fyrir þrjár höfuðstefnur kerfisins. Einnig má finna krossróf fylgninnar á jarðskjálftaálagi á milli höfuðstefnanna þriggja (e. inter-component coherency) í undir-fylki fylgnifylkisins hér að ofan:

$$S_{jk}(\omega) = [S_{mn}] = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Hver liður í undir-fylkinu lýsir fylgni jarðskjálftaálags á milli ása m og n í undirstöðum j og k. Fylkið lýsir bæði áhrifum frá framrás jarðskjálftabylgjunnar (e. wave passage) og fylgnitapi í undirstöðum (e. incoherence). Fylgni jarðskjálftaáraunar er lýst með eftirfarandi jöfnu (Zerva 2009):

$$\gamma_{jk}(\omega, \xi) = \frac{S_{jk}(\omega, \xi)}{\sqrt{S_{jj}(\omega)S_{kk}(\omega)}} \quad (8)$$

Einnig er hægt að rita fylgnina sem:

$$\gamma_{jk}(\omega, \xi_{jk}) = |\gamma_{jk}(\omega, \xi_{jk})| \exp\left[-i \frac{\omega \xi_{jk}}{c}\right] \quad (9)$$

Þar sem $|\gamma_{jk}(\omega, \xi)|$ táknar fylgnitap og $\exp\left[-i \frac{\omega \xi_{jk}}{c}\right]$ táknar framrás jarðskjálftabylgjunnar. Hér er ξ_{jk} fjarlægð milli undirstaðna j og k, c er s-bylgjuhraðinn og $i = \sqrt{-1}$. Jarðskjálftahreyfingarnar eru aðeins lagðar á undirstöður brúarinnar. Þess vegna er heppilegt að endurskrifa hreyfingarlíkinguna fyrir mannvirki með margar undirstöður (e. multi-support system). Það má gera með því að aðskilja frelsisgráður mannvirkisins í tvennt, annars vegar frelsisgráður fyrir undirstöður í mannvirki, r_e og hins vegar innri frelsisgráður þess, r_i , þ.e. með því að skrifa:

$$r = [r_i + r_e] \quad (10)$$

Hreyfingarlíkingin sem lýst er í jöfnu 1 er þá hægt að rita sem:

$$\begin{bmatrix} M_{ii} & M_{ie} \\ M_{ei} & M_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{r}_i \\ \ddot{r}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ii} & C_{ie} \\ C_{ei} & C_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{r}_i \\ \dot{r}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ie} \\ K_{ei} & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_i \\ r_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ Q_e \end{Bmatrix} \quad (11)$$

sem leiðir til:

$$M_{ii}\ddot{r}_i + C_{ii}\dot{r}_i + K_{ii}r_i = -(M_{ii}B + M_{ie})\ddot{r}_e - (C_{ii}B + C_{ie})\dot{r}_e \quad (12)$$

Þetta lýsir jarðskjálftahreyfingunum í kerfishnitum, þar sem $B = K_{ii}^{-1}K_{ie}$. En þegar jarðskjálftabylgjurnar koma með horni β á mannvirknið er þetta leiðrétt með því að umbreyta jarðskjálftahreyfingunum með áhrifafylkinu E_{mN} , sem gefur formið:

$$M_{ii}\ddot{r}_i + C_{ii}\dot{r}_i + K_{ii}r_i = -(M_{ii}B + M_{ie})E_{mN}\ddot{u}_g - (C_{ii}B + C_{ie})E_{mN}\dot{u}_g \quad (13)$$

Jafna 13 er það form hreyfingarlíkingarinnar sem verður leyst í þessu verkefni. Lausnaraðferðin sem er notuð er svokölluð PSD-aðferð (e. power spectral density solution). Hægri hliðin á jöfnu 13 lýsir jarðskjálftaáráuninni Q_s , þéttleiki jarðskjálftarófsins (e. spectral density) má reikna á eftirfarandi hátt:

$$S_q(\omega) = A_a S_{\ddot{u}_g}(\omega) A_a^T + A_v S_{\dot{u}_g}(\omega) A_v^T + A_a S_{\ddot{u}_g \dot{u}_g}(\omega) A_v^T + A_v S_{\dot{u}_g \ddot{u}_g}(\omega) A_a^T \quad (14)$$

þar sem $A_a = -(M_{ii}B + M_{ie})E_{mN}$ og $A_v = -(C_{ii}B + M_{ie})E_{mN}$ eru fylki sem umbreyta hröðunarrófinu og hraðarófinu í álagsrófið $S_q(\omega)$. Svörunuarrófið $S_r(\omega)$ má svo finna með því að margfalda $S_q(\omega)$ með tíðnisvörunarfylkinu $H(\omega)$:

$$S_r(\omega) = H(\omega)Q_s H^{T*}(\omega) \quad (15)$$

Í því sem segir hér fyrir ofan þá hefur ekki verið tekið tillit til „statískrar“ hreyfingar kerfisins, heldur eingöngu þeirrar dýnamísku. Statíska hreyfingin tengist m.a. varanlegum hreyfingum yfirborðs jarðar, þ.e. staða yfirborðs þegar jarðskjálftinn er um garð genginn. Statíska færslan er ákvörðuð á eftirfarandi hátt:

$$r_i^{\text{static}}(t) = B r_e(t) = -K_{ii}^{-1}K_{ie}r_e(t)$$

Í þessu tilviki vísar statísk lausn til þess að tregðukraftar skipta ekki máli. Lausnin getur hins vegar verið háð tíma.

2.3 Líkindafræðileg lausn

Eins og gefur að skilja hefur svörunarrófið $S_r(\omega)$ að geyma upplýsingar um svörun mannvirkisins, þar með talið færslu, hraða og hröðun. Með því að skoða líkindafræðilegar upplýsingar sem fylkið hefur að geyma er hægt að finna væntigildi svörunar fyrir hreyfingar brúarinnar. Dreifni svörunarinnar vegna jarðskjálftahreyfingarinnar má finna á eftirfarandi hátt:

$$\sigma_r^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_r(\omega) d\omega \quad (16)$$

$$\sigma_{\dot{r}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_r(\omega) d\omega \quad (17)$$

$$\sigma_{\ddot{r}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^4 S_r(\omega) d\omega \quad (18)$$

Væntigildi hámarks svörunar finnst með því að margfalda staðalfrávik með hágildisstuðlinum p :

$$E[z_{\max}] = p \times \sigma_r \quad (19)$$

Hágildisstuðullinn er fundin með (Cartwright and Longuet-Higgins 1956):

$$p = \sqrt{2 \ln(2n_+ T_d)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(2n_+ T_d)}} \quad (20)$$

þar sem T_d er lengd jarðskjálftans í tíma og n_+ er mælikvarði á það hversu oft tímaröðin sker núllásinn:

$$n_+ = \frac{1}{2\pi} \sigma_{\dot{r}} / \sigma_r \quad (21)$$

Faktorinn 2 er notaður til þess að velja tölulega stærsta hágildið. Fyrir stuttar tímaraðir gildir nálgun Vanmarckes (sjá Jöfnu 24).

3 Viðfangsefni rannsóknar – Óseyrarbrú

Óseyrarbrúin varð fyrir valinu sem viðfangsefni þessarar rannsóknar þar sem hún er bæði löng og staðsett á virku jarðskjálftasvæði. Brúin er um það bil 360 m löng með breytilegu þversniði yfir lengd brúarinnar. Brúin hefur þurft að þola þónokkra skjálfta til þessa. Stærsti skjáltin var Suðurlandskjálftinn 2008. Auk brúardekksins, er brúin uppbyggð af 7 stöplum (hver u.þ.b. sjö metrar á hæð) sem auk endanna tveggja mynda undirstöður mannvirkisins. Á stöplunum eru legur sem brúardekkið hvílir á. Brúin er grunduð á klöpp svo ekki er talin þörf á að skoða áhrif jarðvegs við jarðskjálftagreininguna. Undirstöðurnar eru örvaðar með jarðskjálftaálagi og fylgni jarðskjálftaálags skoðuð. Þrjú tilvik voru valin, full fylgni ($\gamma=1$), tap í fylgni og engin fylgni ($\gamma=0$). Útbreyðsluhraði jarðskjálftabylgjunnar (þ.e. yfirborðsbylgjunnar) er áætlaður 500m/s en einnig var skoðað tilvik þegar bylgjuhraðinn er látinn vera

1000m/s. Þetta hefur áhrif á þann hluta líkansins sem lýsir framrás jarðskjálftabylgna (e. wave passage). Þá er jarðskjálftabylgjan látin koma undir mismunandi horni β á mannvirknið, sem getur einnig haft mikil áhrif á framrás jarðskjálftabylgna. Helstu athuganirnar gera þó ráð fyrir því að jarðskjálftin komi undir horni $\beta = 0$, sem sagt bylgjunar dreifa sér í lengdarstefnu brúarinnar.



Mynd 2: Óseyrarbrúin í nóvember 2008 (Jónsson 2009).

Megin áhersla verður lögð á að skoða hreyfingar mannvirkisins í þessari rannsókn, þ.e. færslur hraða og hröðun. Þar sem þær lýsa hegðun mannvirkisins. Krafta mannvirkisins má einnig finna ef hreyfingarnar eru þekktar.

3.1 Gerð hreyfingarlíkans

Hreyfilíkanið var gert með því að nota þrívíð ramma-element í reikniforritinu MATLAB. Þar var greiningin framkvæmd með tíðnirófsaðferðinni sem lýst er hér að ofan. Áætlað er að allir miðstöplarnir séu innspenntir í klöpp. Hins vegar, voru þær undirstöður sem eru við enda brúarinnar áætlaðar sem einfalt undirstuddar í líkaninu. Það er töluverð einföldun frá raunveruleikanum, enda liggja endarnir báðir á legum og eru skorðaðir af steiptum hliðarveggjum beggja vegna, sem brotnuðu í skjálftanum 2008 (Mynd 1). Þessi rannsókn leggur hins vegar ekki mikla áherslu á að búa til líkan sem er nákvæm eftirmynd brúarinnar, heldur fyrst og fremst að búa til raunhæft líkan sem lýsir hegðun brúa á trúverðugan hátt.

Allir þversniðseiginleikar eru fyrst reiknaðir með þeirri nálgun að steypa í brúnni sé ósprungin, þar sem brúin er eftirspennt. Þá er kerfið í upphafi skoðað með fullnýttum gildum af hverfitregðu þversniðanna (þ.e. ósprungið þversnið), stífniúðulinn $E_c = 33.500 \text{ N/mm}^2$ og eðlismassann $\rho_c = 2.550 \text{ kN/m}^3$. Hins vegar, eru einnig skoðuð áhrif taps í hverfitregðu vegna sprungna í steypu sem myndast við mikla álagstoppa eins og í jarðskjálftum. Þess má geta að eiginleikar brúarinnar geta einnig

breyst með tíma vegna fyrirbrigða eins og spennutaps í eftirspennuköplum. Þetta eykur áhættuna á sprungum í steypunni. Skoðað er hvernig dvínun í stífnieiginleikum brúarinnar, við aðstæður sem þessar, hefur áhrif á svörun.

Brúin hvílir á legum sem einangra mannvirkið að hluta frá hreyfingum í jarðskorpunni. Tvær gerðir af legum eru notaðar í brúnni, viðnámslegur eru við enda brúarinnar og blýgúmmilegur á miðstöplum. Til einföldunar eru allar legurnar teknar sem blýgúmmilegur. Þær eru þeim eiginleikum gæddar að hafa ólínulegan stífiferil þ.e. þær hafa ákveðna upphafsstífni, en við mikið álag fer kjarninn í flot (Mynd 3). Í þessu verkefni er gert ráð fyrir því að legurnar séu alltaf í floti, og kerfið nálgæð sem jafngilt línulegt kerfi. Eftirfarandi stífngildi eru notuð í verkefninu:

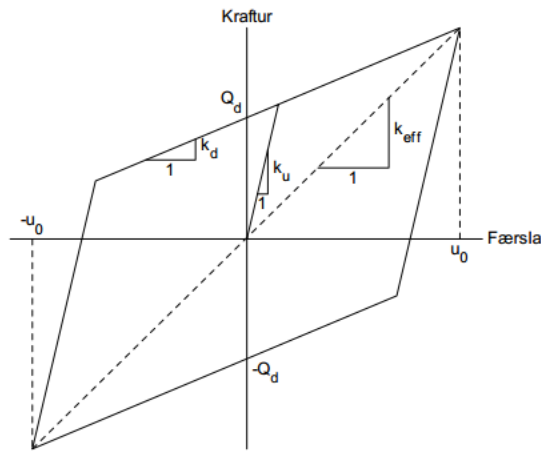
Tafla 1:

Þáttur	Stífngildi (N/m)
U1	$3,81 \times 10^7$
U2	$3,81 \times 10^7$
U3	$1,0 \times 10^{10}$
R1	$1,0 \times 10^{10}$
R2	$6,01 \times 10^5$
R3	$8,54 \times 10^6$

Þar sem U tákna færslur og R snúning um ása 1-3. Þess má geta að upphafsstífnin var reiknuð og flotstífnin fundin með eftirfarandi nálgun:

$$k_{lr} = 10 k_r \quad (22)$$

Þar sem k_{lr} er upphafsstífnin og k_r er stífnin við flot blýkjarnans.



Mynd 3: Ólínulegur stífiferill blýgúmmílegana (Jónsson 2009).

Með þessum upplýsingum er hægt að finna eiginsveiflutíma og form brúarinnar. Eftirfarandi gildi fengust út við eigintíðnisgreiningu mannvirkisins:

Tafla 2:

Nr. sveifluforms	Stefna	Sveiflutími, T (s)
1	Lárétt	0,817
2	Lárétt	0,790
3	Lárétt	0,699
4	Lóðrétt	0,562
5	Lárétt	0,554
6	Lóðrétt	0,497
7	Lóðrétt	0,425
8	Lárétt	0,415
9	Lóðrétt	0,361
10	Lárétt	0,361
11	Lóðrétt	0,308
12	Lóðrétt	0,269
13	Lárétt	0,238
14	Lóðrétt	0,236
15	Lóðrétt	0,232

Dempun í mannvirkinu var tekin inn með beinni nálgun sem er lýst af (Wilson and Penzien 1972). Dempunarstuðullinn var tekinn sem $\zeta = 2\%$, en einnig er skoðað

hvaða áhrif það hefur á svörun mannvirkisins ef því gildi er breytt. Í því sambandi var dempunarstuðull frá 1- 5% skoðaður.

3.2 Hröðunarróf jarðskjálfta

Hröðunarrófið er byggt á jöfnum frá (Langen and Sigbjörnsson 1979) og stuðlarnir ákvarðaðir út frá þéttum jarðvegi.

$$S_{\ddot{u}_g}(\omega) = S_0 \frac{1 + 4\xi_{gk}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{gk}}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{gk}}\right)^2\right]^2 + 4\xi_{gk}^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{gk}}\right)^2} \times \frac{(\omega/\omega_{fk})^4}{\left[1 - (\omega/\omega_{fk})^2\right]^2 + 4\xi_{fk}^2 (\omega/\omega_{gk})^2} \quad (23)$$

Sama hröðunarróf er notað fyrir allar undirstöðurnar sem er einföldun. Nær raunveruleikanum væri að skilgreina einstakt róf fyrir hverja undirstöðu. Hins vegar, fylgir því mikil óvissa og þess vegna er sama róf notað fyrir allar undirstöður. Þetta þurrkar ekki út áhrif fylgnitaps, þar sem þetta er einungis uppbyggingin á hröðunarrófinu sjálfu. T.d. er sama hröðunarróf notað fyrir hreyfingar í lárétta og lóðrétta stefnu. Hámarkshröðun (PGA) jarðskjálftarófsins er svo fundin með því að margfalda staðalfrávik rófsins við hágildisstuðli p (Vanmarcke and Lai 1980):

$$p \cong \sqrt{2\ln(2.8T_d f_0/2\pi)} \quad (24)$$

Þar sem T_d er lengd skjálftans og f_0 eigintíðni kerfisins. Þetta verkefni miðar við að hámarkshröðun jarðskjálftarófsins sé (PGA = 0,5g).

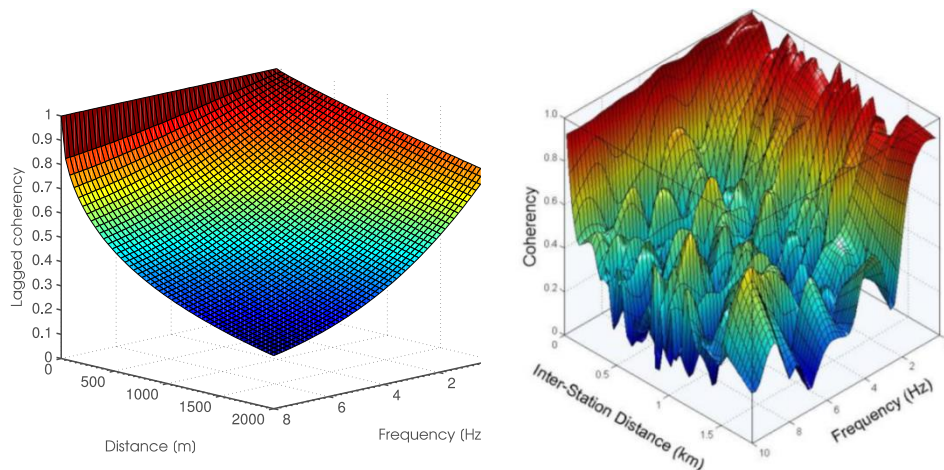
Tafla 3:

Breytur	Gildi
S_0	0,0017
ω_{gk}	15,6
ξ_{gk}	0,7
ω_{fk}	4
ξ_{fk}	0,5

3.3 Fylgni líkön

Til þess að meta tap í fylgni jarðskjálftaálagsins var stuðst við líkan frá (Oliveira, Hao et al. 1991). Til eru nokkur samsvarandi líkön og byggja þau flest á svipaðri aðferðarfræði. Eins og sjá má á (Mynd 4) þá tapast fylgni jarðskjálfta bæði með aukinni tíðni og með aukinni fjarlægð milli einstakra undirstaða.

Þess má geta að þessi líkön lýsa aðeins fylgnistapi á milli stöðva (sjá jöfnu 8). Framrás jarðskjálftabylgjunnar, sem er hinn hlutinn af jöfnu 8 bætist við þau gildi sem fást úr líkaninu. Áhugavert er að bera þetta saman við mælingar frá (Sigbjörnsson, Rupakhety et al. 2013), sem má sjá hér að neðan (Mynd 4).

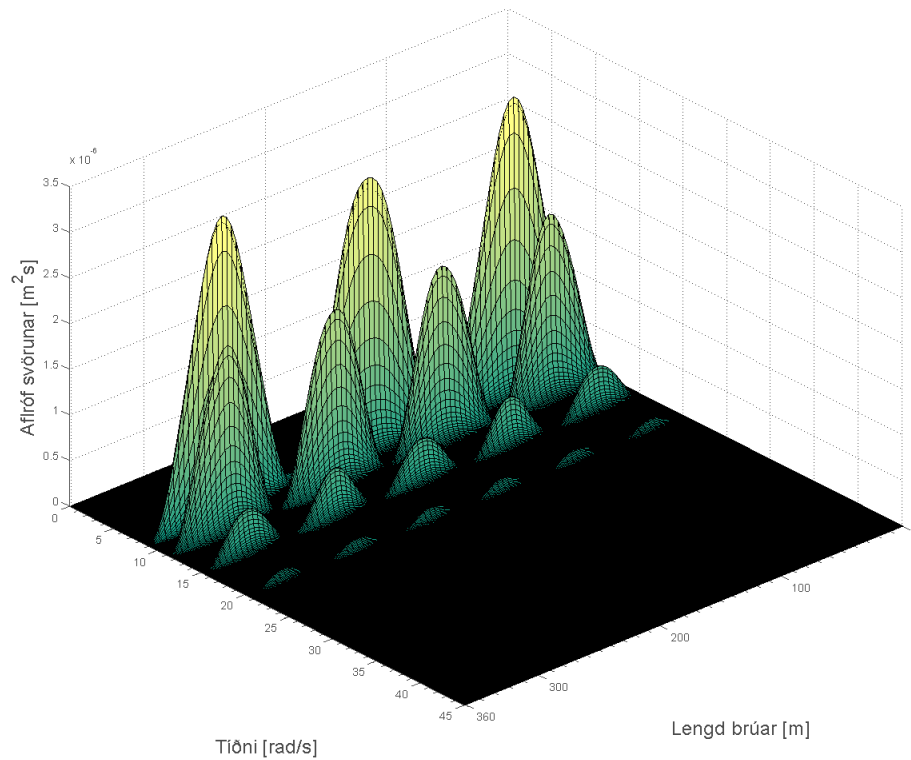


Mynd 4: Til vinstri: Líkan af fylgnistapi samkvæmt (Oliveira, Hao et al. 1991). Til hægri: Fylgnistap eftir tíðni og fjarlægð á milli stöðva, fundið út frá gögnum úr jarðskjálftanum í Ölfusi 2008 (Sigbjörnsson, Rupakhety et al. 2013).

Hér sést að mælingunum ber ágætlega saman við líkan Oliveira, þó líkanið sé augljóslega einföldun á raunveruleikanum. Óreglan í mælingunum getur stafað af ýmsum staðbundnum aðstæðum.

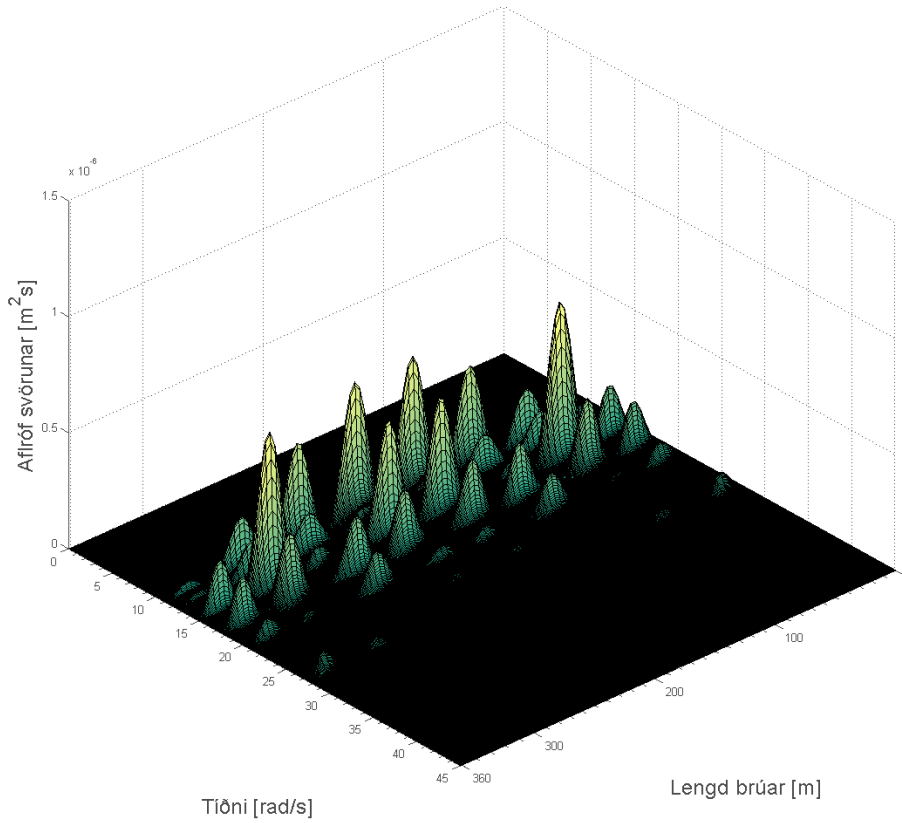
4 Niðurstöður

Upplýsingarnar sem fram koma í köflunum hér að framan voru notaðar til þessa að framkvæma greininguna. Þess má geta að leitast var við að hafa greininguna sem einfaldasta og auðveldasta í keyrslu. Með því móti er auðveldara að sjá áhrif hinna ýmsu breytistærða. Hér á eftir má sjá nokkrar myndir sem lýsa hegðun mannvirkisins.



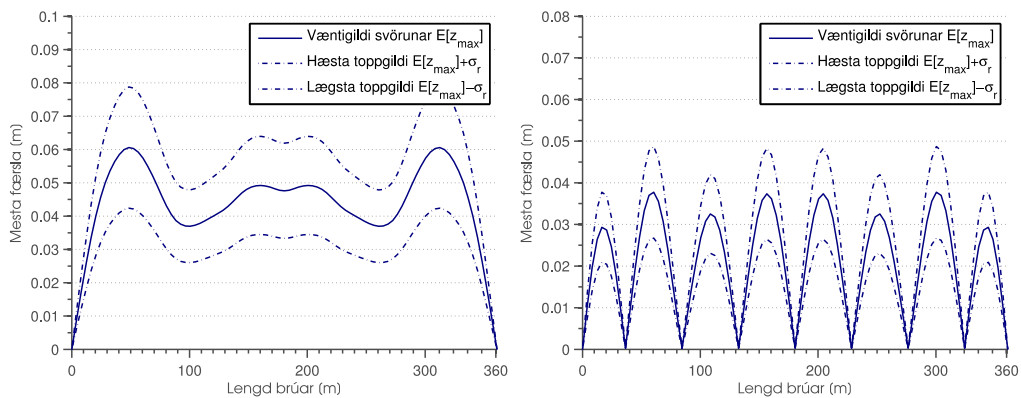
Mynd 5: Aflróf svörunar fyrir láréttar frelsisgráður brúarinnar, sem fall af tíðni og lengdar hnit brúar.

Aflróf svörunar er mælikvarði sem lýsir svörun brúarinnar bæði með hliðsjón til tíma og staðsetningar undirstaðna á brúnni. Þessi mælikvarði er hentugur til þess að skoða hvaða eiginsveifluform eru örvuð við jarskjálftann. Eins og sjá má á Mynd 5 þá eru láréttu eiginsveifluform 3-6 að örvast (sjá töflu 2). Höfundur nær ekki alveg að skýra hvers vegna lágstu tvö formin láta ekki sjá sig.



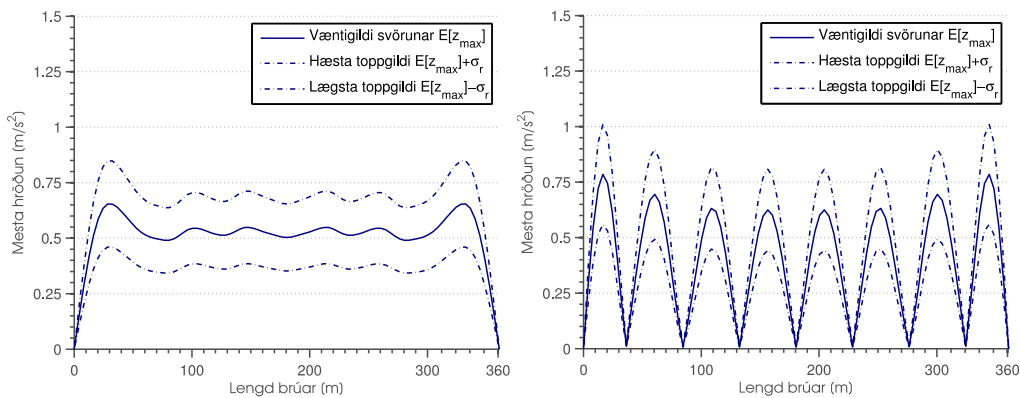
Mynd 6: Aflróf svörunar fyrir lóðréttar frelsisgráður brúarinnar.

Fyrir lóðréttu færslunar þá koma þau eiginsveifluform fram sem búist var við, þ.e. lægstu lóðréttu eigintíðnirnar. Eins og sjá má þá eru engar hreyfingar á þeim stöðum sem að undirstöðurnar eru staðsettar, en á milli þeirra sveiflast brúardekkið.



Mynd 7: Til vinstri: Mesta lárétta færsla yfir lengd brúarinnar. Til hægri: Mesta lóðréttu færsla yfir lengd brúarinnar.

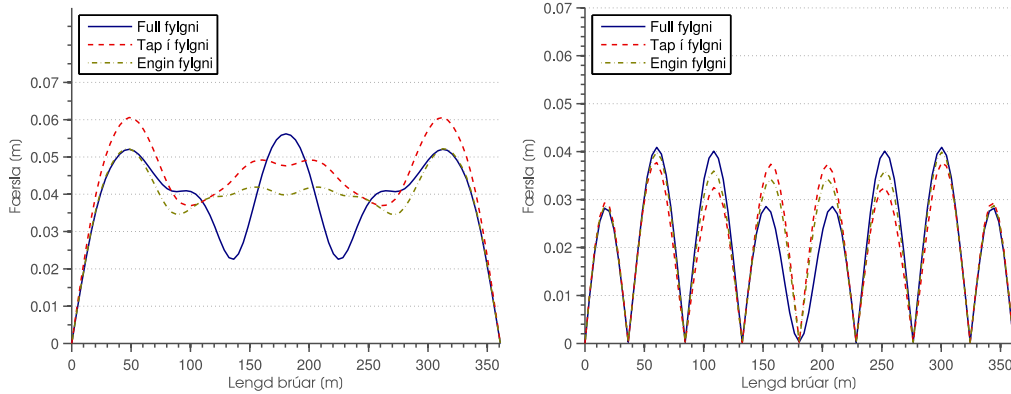
Væntigildi mestu færslu (sjá Mynd 7) er um 60mm og er það töluvert lægra en færslurnar sem vísbendingar voru um í skjálftanum 2008, en þar voru merki um færslur sem voru allavega 100-200mm (Jónsson 2009). Þess má þó geta að ýmsar einfaldanir hafa verið gerðar í þessu verkefni. Í raunveruleikanum liggja báðir endar á viðnámslegum og getur brúin því hreyft sig töluvert í endunum. Einnig er hugsanlegt að fyrstu tvö eiginsveifluformin sem ekki tókst að örva í þessari greiningu, hafi gert það í raunveruleikanum. Þær gefa augljóslega mestu færslunar.



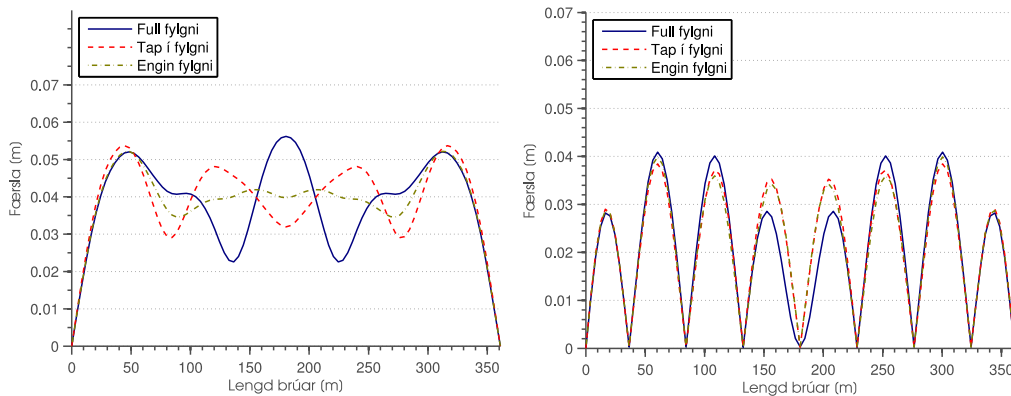
Mynd 8: Til vinstri: Mesta lárétta hröðun yfir lengd brúarinnar. Til hægri: Mesta lóðrétta hröðun yfir lengd brúarinnar. Athugið að um er að ræða relatíva hröðun.

Eins og sjá má á Mynd 8, er hröðun og færsla mannvirkisins í samræmi. Um er að ræða relatíva hröðun sem þýðir að gildin bætast við hröðun skjálftans, svo unnt sé að finna þá hröðun sem ökumaður yfir brúna yrði var við. Það þýðir að mesta hröðunin gæti magnast um allt að 0,1 g sem gæti valdið öikumönnum óþægindum.

Þó fyrstu tvær eigintíðnirnar hafi ekki komið fram í greiningunni, getur samanburður á áhrifum fylgnitaps jarðskjálftaáráunar engu að síður vel verið marktækur. Vegna þess að sem sama greining er keyrð með mismunandi uppbyggðu fylgnifylki (sjá kafla 2.2). Eins og sjá má á (Mynd 9), er töluverður munur á hegðun og svörun brúarinnar eftir því hvaða tilvik er skoðað. Athygli vekur að mesta svörunin er þegar reiknað er með tapi í fylgni. Einnig er áhugavert að sjá hegðunarbreytinguna í færslum eftir því hvort fylgnin er fullkomin eða engin.

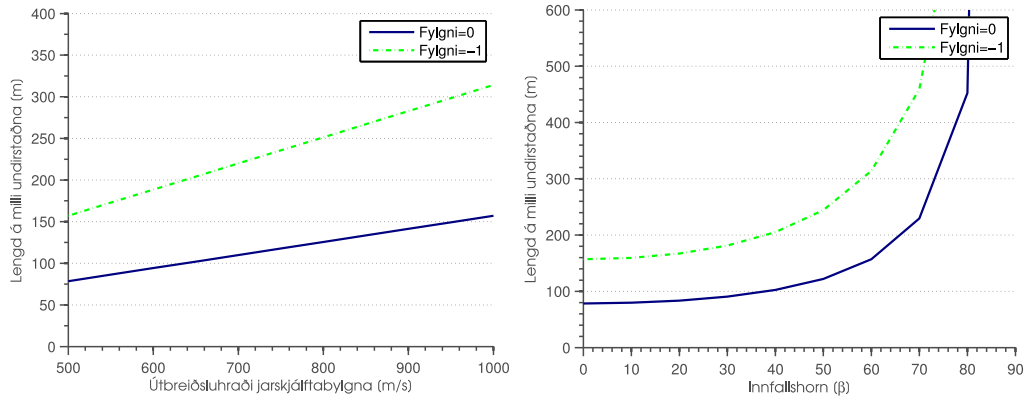


Mynd 9: Samanburður á svörun fyrir mismunandi fylgni á milli undirstaða mannvirkis. Jarðskjálftabylgjur koma með 500 m/s í lengdarstefnu brúarinnar ($\beta=0$). Til vinstri: Mesta lárétta færsla í mannvirki yfir lengd brúarinnar. Til hægri: Mesta lóðrétta hröðun í mannvirki yfir lengd brúarinnar.



Mynd 10: Samanburður á svörun fyrir mismunandi fylgni á milli undirstaða mannvirkis. Jarðskjálftabylgjur koma með 1000 m/s í lengdarstefnu brúarinnar ($\beta=0$). Til vinstri: Mesta lárétta færsla í mannvirki yfir lengd brúarinnar. Til hægri: Mesta lóðrétta hröðun í mannvirki yfir lengd brúarinnar.

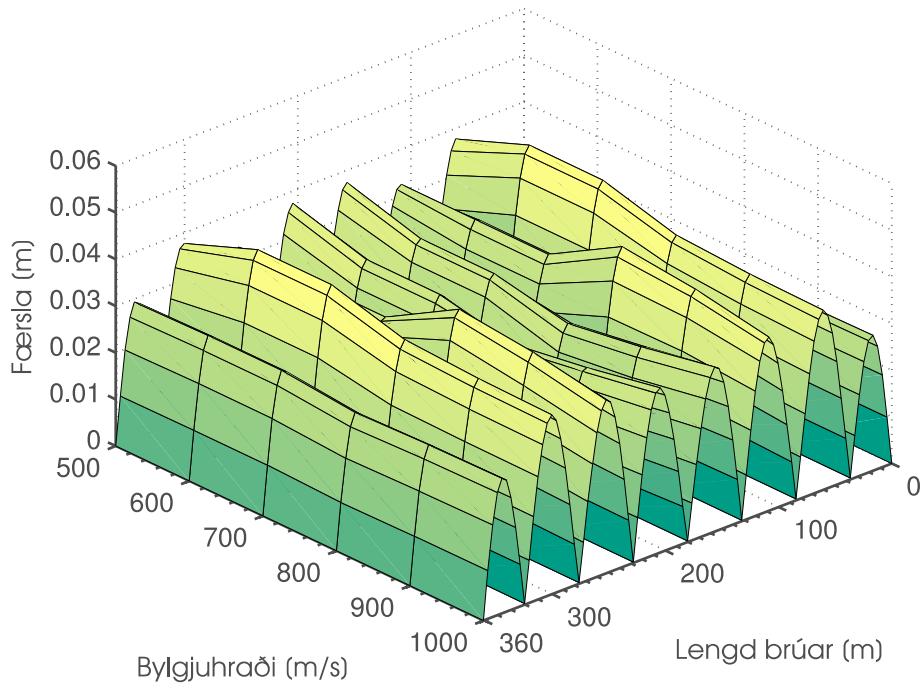
Áhugavert er að skoða muninn á niðurstöðunum úr greiningunni fyrir mismunandi bylgjuhraða. Á Mynd 10 má sjá samanburð á svörun fyrir mismunandi mikið fylgnitap þegar bylgjuhraðinn er 1000 m/s. Þar er einnig töluverður munur á hegðun mannvirkisins með breytingum í fylgni. Hins vegar má greina töluverðan mun á rauðu línunum á Mynd 9 og Mynd 10 (til vinstri), á meðan grænu línurnar eru svo gott sem eins. Þetta bendir til þess að áhrif framrásar jarðskjálftabylgjunnar sé ráðandi. Vegna þess að breyttur bylgjuhraði hefur aðeins áhrif á þann þátt af fylgninni.



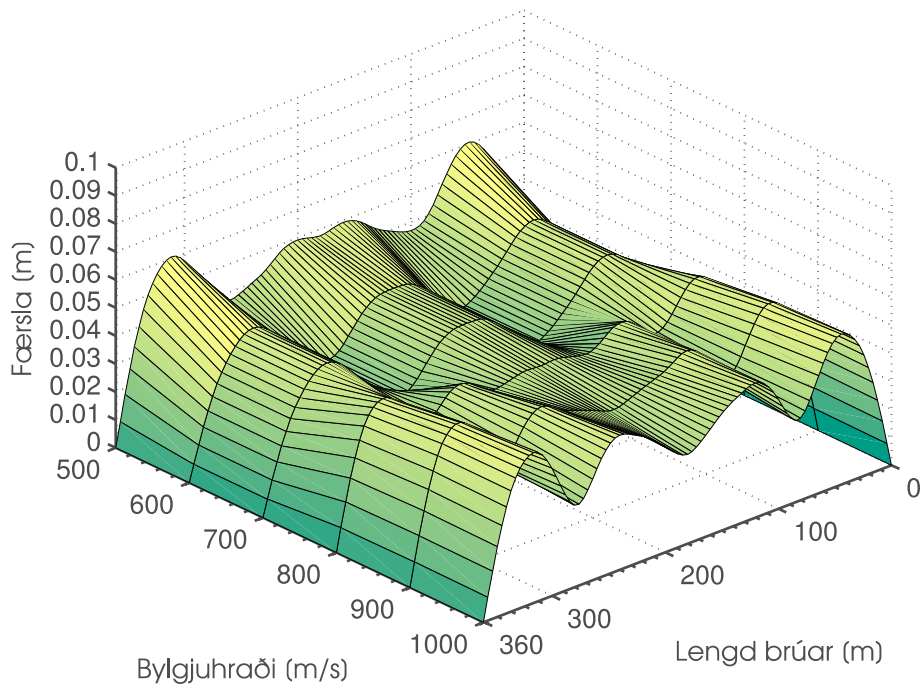
Mynd 11: Fjarlægð sem þarf til þess að fá tiltekna fylgni (0 eða -1) út frá framrás jarðskjálftabylgna. Ef fylgnin er -1 þá er jarðskjálftaáraunin alveg úr fasa við áraunina á viðmiðunarundirstöðunni, en ef hún er 0 þá er hún hálfpartinn úr fasa. Til vinstri má sjá línurit sem skoðar þetta sem fall af bylgjuhraða, miðað við innfallshorn $\beta=0^\circ$. Til hægri má sjá línurit sem skoðar þetta sem fall af innfallshorni β , miðað við bylgjuhraða = 500 m/s. Athugið að þessi línurit eru breytileg eftir tíðni, sjá jöfnu 9, hér var miðast við tíðnina $\omega=12$ rad/s.

Ef við gerum ráð fyrir að framrás jarðskjálftabylgna hafi ráðandi áhrif á fylgni í mannvirkinu er hægt að skoða það gróflaga hversu langt þarf að vera á milli undirstaðna þess til þess að fylgnin tapist, sjá Mynd 11. Grænu línurnar lýsa því hvar jarðskjálftaáraunin er alveg úr fasa við viðmiðunarundirstöðuna. Þess ber að geta að framrás jarðskjálftabylgna er breytileg eftir tíðni og því var valin viðmiðunartíðni sem er dæmigerð fyrir hröðunarrófið, $\omega=12$ rad/s. Hægt er að lesa út frá línuritunum að brúin þarf ekki að vera löng til þess að fá umtalsverðan breytileika í fylgni. Bylgjuhraðinn hefur að sjálfsögðu mikil áhrif og hægt er að finna hann út frá staðbundnum aðstæðum eins og jarðvegi og fleira. Út frá því er hægt að áætla hvort nauðsynlegt sé að taka mið af breytileika í fylgni við hönnun.

Niðurstöðurnar hér að ofan gera ráð fyrir að jarðskjálftabylgjurnar komi eftir lengdarstefnu brúarinnar, líklegt er þó að bylgjurnar komi undir einhverju horni á brúna. Þess vegna er áhugavert að skoða áhrif mismunandi innfallshorna á mannvirkið (sjá Mynd 12 og Mynd 13).



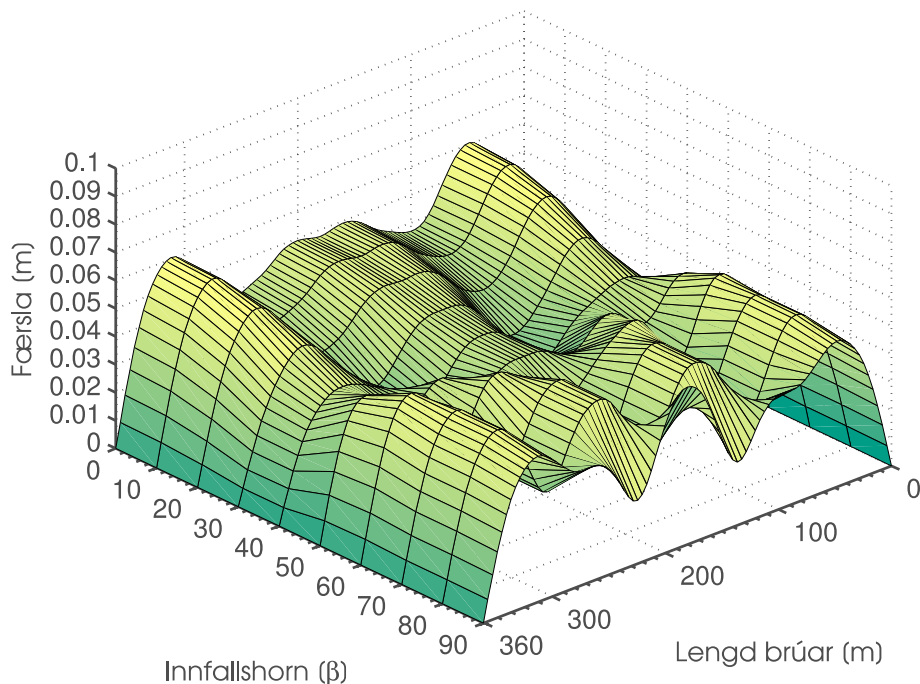
Mynd 12: Mesta lóðrétta færsla yfir lengd brúarinnar þegar jarðskjálftabylgjurnar koma með mismunandi bylgghraða, undir horni ($\beta=0$).



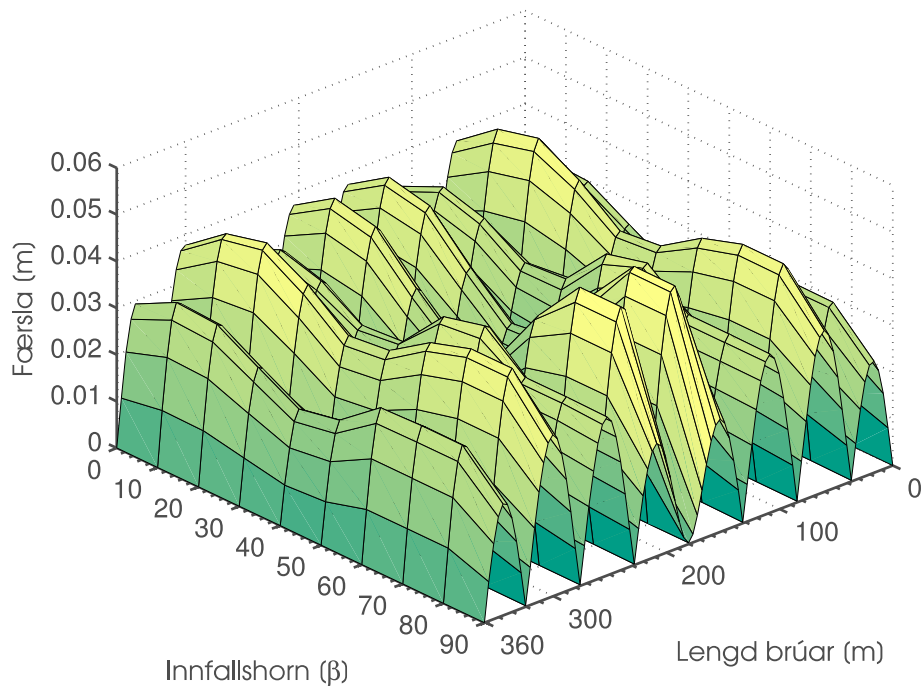
Mynd 13: Mesta lárétta færsla yfir lengd brúarinnar þegar jarðskjálftabylgjurnar koma með mismunandi bylgghraða, undir horni ($\beta=0$).

Af Mynd 12 og Mynd 13 að dæma verður töluverð breyting á hegðun brúarinnar með mismunandi bylgjuhraða. Athyglisvert er að sjá að fyrir lárétta færslurnar (Mynd 13) gefa lágir bylgjuhraðar 3 toppa í svörun, en hærri hraðar fjóra. Það bendir til þess að jarðskjálftaárunin sé farin að virkja fjórðu lárétta eigintíðni mannvirkisins, þ.e. hún verði ráðandi í greiningunni. Þetta má einnig sjá á Mynd 10 og gæti gefið til kynna að breytileiki í fylgni áraunarinnar hafi áhrif á hvaða eiginsveifluform verða ráðandi. Sem þarf ekki að koma svo mikið á óvart, miðað við að undirstöðurnar eru allar að hreyfast á mismunandi hátt.

Eins og með bylgjuhraðan þá er innfallshorn jarðskjálftabylggnanna einnig áhugavert. Þar sem innfallshornið hefur bein áhrif á fylgnifylkið, t.d. ef bylgjurnar koma þvert á brúnna ($\beta=90^\circ$) þá mæta þær á sama tíma á öllum undirstöðum og ætti fylgnin því að vera nálægt því fullkomin. Ef Mynd 14 er skoðuð, þá má sjá að þegar innfallshornið er $\beta=90^\circ$ er hegðun brúarinnar eins og þegar greiningin er gerð fyrir fullkomna fylgni. Það kemur heim og saman við þær ályktanir sem voru gerðar í upphafi. Einnig vekur athygli hversu örar breytingar eru á hegðun brúarinnar með mismunandi horni og bylgjuhraða.

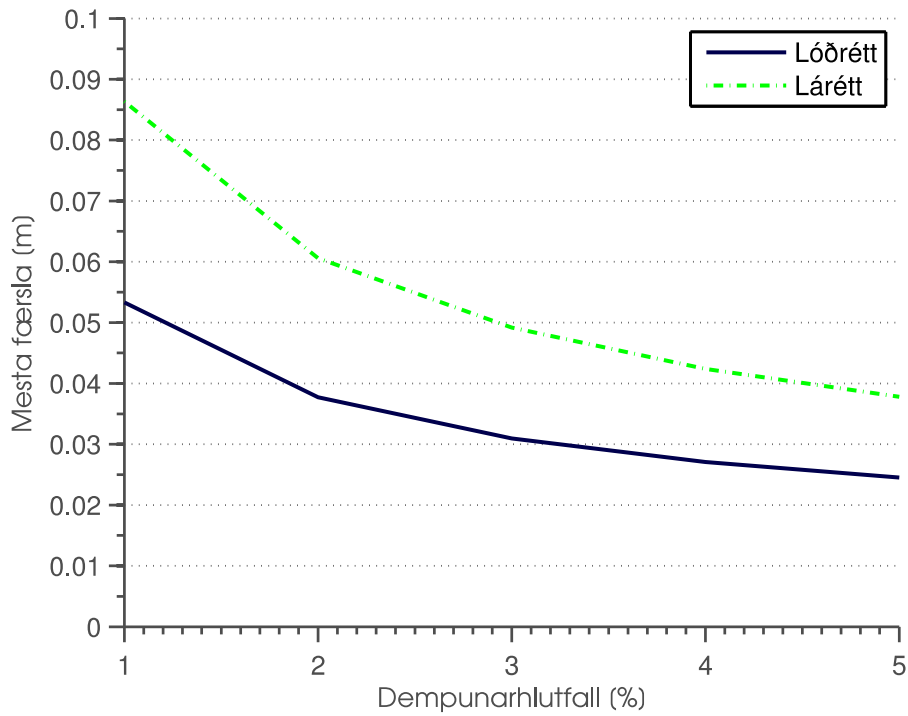


Mynd 14: Mesta lárétta færsla yfir lengd brúarinnar þegar jarðskjálftabylgjurnar koma með mismunandi innfallshorni β og bylgjuhraða $c=500$ m/s.

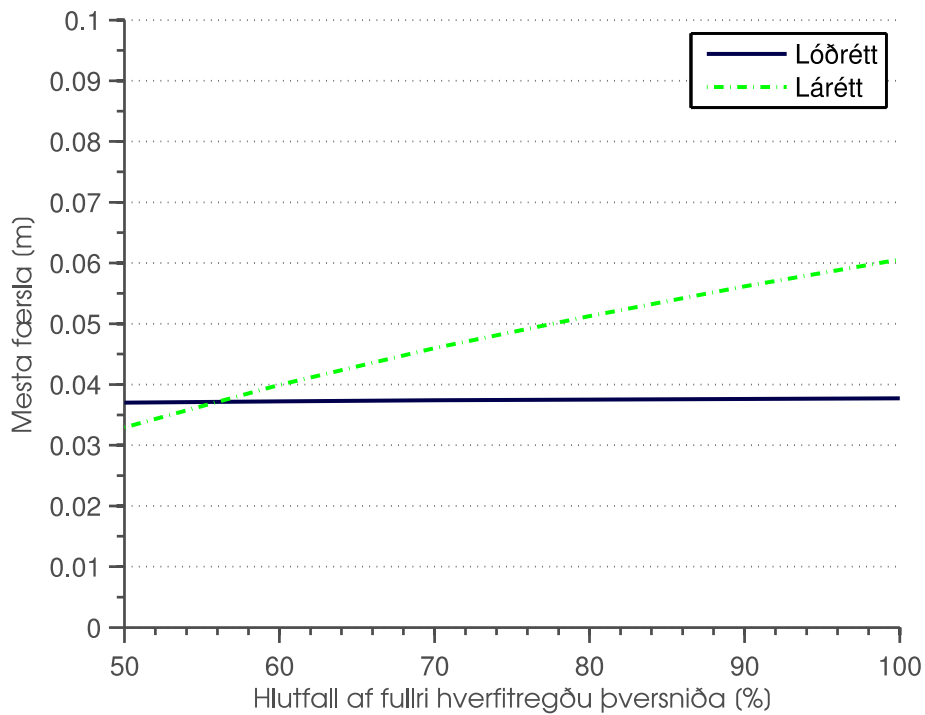


Mynd 15: Mesta lóðrétta færsla yfir lengd brúarinnar þegar jarðskjálftabylgjurnar koma með mismunandi innfallshorni β og bylgjhraða $c=500$ m/s.

Að auki er dempun í kerfinu skoðuð. Eftir því var tekið að mismunur í dempun frá 1% til 5% hafði engin áhrif á hegðun mannvirkisins, heldur skalaði hún aðeins svörunarferilinn. Þess vegna var aðeins hámarks útslag yfir lengd brúarinnar skoðuð fyrir ofangreind dempunarhlutföll. Þar kemur í ljós að svörun eykst ólínulega eftir því sem dempunarhlutfallið lækkar.



Mynd 16: Mesta færsla fyrir mismunandi dempunarhlutföll í mannvirki



Mynd 17: Mesta færsla í brúnni fyrir ólík gildi á hverfitregðu fyrir þversnið brúarinnar.

Þetta þýðir að ákvörðun á dempun í mannvirki getur reynst gríðarlega mikilvæg við hönnun. Eurocode hefur mælt með dempunarhlutfalli upp á 5% fyrir allar gerðir mannvirkja. Færa má auðveldlega rök fyrir því að annað gildi fyrir grönn mannvirki eins og brýr.

Að lokum eru áhrif hverfitregðu þversniða skoðuð. Við því er búist að þversniðið sé að einhverju leyti spurngið, þá sérstaklega eftir atburði eins og Suðurlandsskjálftann 2008. Því er athuguð svörun mannvirkisins miðað við mismunandi hlutföll af hverfitregðu þversniðsins. Athygli vekur að lægri svörun fæst út úr greiningunni við minnkandi hverfitregðu þversniðsins. Augljósasta skýringin við þessu er að með lækkanði stífni sem veldur því að eigintíðnir mannvirkisins minnka og fara að hluta til út af tíðnirófi jarðskjálftans. Einnig sést að lóðrétt svörun er nálægt því óháð breytingum í hverfitregðu. Þetta þýðir að ekki er endilega varkárari lausn að reikna með sprungnu þversniði við jarðskjálftagreiningu á steiptum brúum eins og þessari. Mikilvægt er að eiginsveiflugreiningin sé sem næst raunveruleikanum.

5 Ályktanir

Nokkur atriði í niðurstöðum greininngarinnar komu á óvart. Niðurstöðurnar sýna engu að síður að staðbundinn breytileiki á jarðaskjálftaáraun hefur töluverð áhrif á svörun langra mannvirkja. Einnig má draga þá ályktun að fylgnitap hefur klárlega áhrif á mannvirki sem eru 300 m og lengri. Áhrifana gætir einnig fyrir styttri mannvirki en það, en það fer einnig eftir útbreiðsluhraða jarðskjálftabylgna. Niðurstöðurnar benda til þess að svörun geti bæði aukist og minnkað eftir því hvaða breytur eru notaðar. Þetta má t.d. sjá á Mynd 14 og Mynd 15.

Hvað varðar dempun, er augljóst af niðurstöðunum að mikilvægt er að vanda valið á dempunarhlutfallinu eins vel og hægt er við hönnun. Sérstaklega ef það er fyrirséð að dempunarhlutfallið geti verið lágt, því þar hækkar svörunin hratt eftir því sem hlutfallið lækkar. Sem þýðir að mannvirkið þarf að vera í stakk búið til að taka á móti auknum færslum.

Einnig má draga þá ályktun að framrás jarðskjálftabylgna hafi meira að segja en fylgnitap, fyrir þessa tilteknu brú. Hins vegar, ef við hugsum okkur mjög langt mannvirki, þá fer fylgnitapið að deyfa áhrif framrásar jarðskjálftabylgna. Að sama skapi fyrir stutt mannvirki, þá líður styttri tími á milli þeirra augnablika sem jarðskjálftabylgjurnar örva hverja undirstöðu og því nálgast mannvirkið fullkomna fylgni áraunar á milli undirstaðna. Ef Mynd 9 er skoðuð, sést glögglega að þegar reiknað er með tap í fylgni, fæst mest svörun. Það ætti að vera nákvæmasta líkanið fyrir brúna. Hin tilvikin eru fullkomin fylgni sem er góð nálgun fyrir styttri brýr og svo engin fylgni sem er góð nálgun fyrir ennþá lengri brýr, þá sérstaklega brýr með langt haf á milli undirstaðna. Þar hafa áhrif framrásar jarðskjálftabylgna tapast, vegna þess að minna samhengi er á milli áraunarinnar.

Helstu niðurstöður verkefnis eru því:

- Áhrif fylgnitaps á löng mannvirki geta verið umtalsverð og eru atriði sem hönnuður þarf að skoða. Fyrir langar brýr getur hönnuður þó engu ráðið um fylgnitap eða framrás sjálfta. Hins vegar getur hann stjórnað lengd á milli undirstaðna og því hversu miklum færslum mannvirkið getur tekið við án þess að verða fyrir skaða.
- Mælt er til þess að alltaf sé reiknað með sem raunverulegastu dempun í mannvirki og hægt er. Það má t.d. byggja á mælingum og reynslutölum fyrir svipuð mannvirki. Sú nálgun að öll steipt mannvirki skulu reiknast með 5% dempun er ófullkomin.

- Fylgnitap getur haft töluverð áhrif á mannvirki sem eru jafn löng og jafnvel styttri en Óseyrarbrúin.

6 Sérstakar þakkir

Vegagerðin fær sérstakar þakkir fyrir að hafa styrkt verkefnið. Einnig lögðu þeir Ragnar Sigbjörnsson og Rajesh Rupakhety frá Jarðskjálftamiðstöð Háskóla Íslands gögn og fagþekkingu sína til verkefnisins. Auk þeirra ber að þakka þeim Gylfa Magnússyni og Sigurði Björnssyni hjá VSÓ Ráðgjöf fyrir sitt framlag til verkefnisins.

7 Heimildir

Cartwright, D. E. and M. S. Longuet-Higgins (1956). "The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function." Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 237(1209): 212-232.

Jónsson, M. H. (2009). Svörun Óseyrarbrúar við Suðurlandsskjálftanum 2008. Umhverfis- og byggingarverkfræðideild. Reykjavík, Háskóli Íslands. M.Sc.

Langen, I. and R. Sigbjörnsson (1979). Dynamisk Analyse av Konstruksjoner. Trondheim, Tapir.

Oliveira, C. S., et al. (1991). "Ground motion modeling for multiple-input structural analysis." Structural Safety 10(1-3): 79-93.

Sigbjörnsson, R., et al. (2013). "The May 2008 Ölfus Earthquake in South Iceland: Modelling incoherence of strong ground motion." Proceedings of the International Conference on Earthquake Engineering (SE-50EEE), 29 to 31 May 2013.

Sigbjörnsson, R., et al. (2009). "A note on the M w 6.3 earthquake in Iceland on 29 May 2008 at 15:45 UTC." Bulletin of Earthquake Engineering 7(1): 113-126.

Vanmarcke, E. H. and S.-S. P. Lai (1980). "Strong-motion duration and RMS amplitude of earthquake records." Bulletin of the Seismological Society of America 70(4): 1293-1307.

Wilson, E. L. and J. Penzien (1972). "Evaluation of orthogonal damping matrices." International Journal for Numerical Methods in Engineering 4(1): 5-10.

Zerva, A. (2009). Spatial variation of seismic ground motions : modeling and engineering applications. Boca Raton, CRC Press.

Zhang, Y. H., et al. (2009). "Random vibration analysis of long-span structures subjected to spatially varying ground motions." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 29(4): 620-629.