



Svörun Óseyrarbrúar við Suðurlandsskjálftanum 2008

Magni Hreinn Jónsson

**VERKFRÆÐI- OG NÁTTÚRUVÍSINDASVIÐ
HÁSKÓLI ÍSLANDS**

Svörun Óseyrarbrúar við Suðurlandsskjálftanum 2008

Magni Hreinn Jónsson

30 ECTS eininga meistararitgerð

Leiðbeinendur
Bjarni Bessason
Einar Hafliðason

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík febrúar 2009

Svörun Óseyrarbrúar við Suðurlandsskjálftanum 2008

30 ECTS eininga meistararitgerð

© Magni Hreinn Jónsson, 2009

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild

Verkfræði- og náttúruvísindasvið

Háskóli Íslands

Hjarðarhaga 2-6

107 Reykjavík

Sími: 525 4000

Prentun Oddi

Reykjavík, 2009

ÚTDRÁTTUR

Í maí 2008 reið jarðskjálfti að stærð 6,3 M_w yfir Suðurland með upptök á milli Selfoss og Hveragerðis. Óseyrarbrúin, sem liggur yfir ós Ölfusár, skemmdist í jarðskjálftanum og er það markmið þessa verkefnis að skoða svörun brúarinnar í skjálftanum og skoða ástæður skemmdanna.

Tölvulíkan var gert af brúnni í forritinu SAP2000. Tvær ólínulegar greiningaraðferðir voru notaðar: Annars vegar hefðbundin ólínuleg greining sem er bein tegrún jafnvægislíkinga og hins vegar hraðvirk ólínuleg greining þar sem stuðst er við sveifluform burðarvirkisins. Aðferðunum bar ágætlega saman. Einnig var framkvæmd línuleg svörunarrófsgreining á brúnni þar sem ólínuleg svörun jarðskjálftalega er nálgueð með jafngildri línulegri stífni og deyfingu. Töluverður munur var á línulegu og ólínulegu aðferðunum svo að tæplega er hægt að mæla með línulegri greiningu á brú af þessari gerð nema við forskoðun.

Niðurstöður allra aðferðanna passa vel við þær skemmdir sem urðu á brúnni. En skemmdirnar urðu á einingum sem áttu að takmarka láréttar færslur brúardekksins. Einnig sást að markmiðum um minni sniðkrafta í brúardekki nást ekki með því legukerfi sem er til staðar.

Með endurhönnun á brúnni var sýnt fram á að hægt er að nota eingöngu blýgúmmílegur til einangrunar á brúnni. Með því að stilla stífni leganna eftir áslægum krafti í legum, vegna eiginálags, hreyfist brúardekkið sem ein heild og sniðkraftar verða minni en fyrir endurhönnun.

ABSTRACT

An earthquake struck the South Iceland lowland on 29th May 2008 at 15:45. The epicenter of the earthquake was located between the towns Selfoss and Hveragerði. The base isolated bridge Óseyrarbrú which is situated 12 km from the epicenter was damaged during the earthquake. The aim of this project was to perform a nonlinear dynamic analysis of the bridge in order to back calculate the observed damage.

The bridge was modeled in the computer program SAP2000. Two different nonlinear analysis methods were used the classical direct integration approach and the so-called fast nonlinear analysis, which makes use of the natural vibration modes of the structure. Very similar results were obtained using the two methods. Linear response spectrum analysis was also performed where nonlinear behavior of the base isolation was modeled using equivalent linear stiffness and damping. Considerable difference was found between the linear and nonlinear methods indicating that linear analysis is not appropriate for bridge of this type.

Results from nonlinear analysis compared well with observed damage of the bridge. The damage was limited to elements which purpose was to prevent excessive movements of the bridge deck. The bridge deck may have been thrown off the piers and collapsed if these stoppers had not been in place

The analysis indicated that a better behavior could have been expected if the isolating lead-rubber bearings had been used on all nine piers of the bridge instead of only five of them as in the existing bridge. It would however demand larger bearings. Secondly by choosing stiffness and yield strength of the bearings as some fixed fraction of the vertical dead load, the bridge deck moved as a rigid body which results in lower internal forces and more favorable behavior.

FORMÁLI

Við jarðskjálfta verða til nýjar upplýsingar sem ekki lágu fyrir þegar mannvirki á áhrifasvæði skjálftans voru hönnuð. Þær liggja fyrst og fremst í mældu jarðskjálftaálagi en einnig í hugsanlegum skemmdum eða öðrum ummerkjum jarðskjálfta á mannvirkjum. Upplýsingarnar nýtast samt ekki nema unnið sé úr þeim að einhverju leyti.

Í þessu verkefni var svörun Óseyrarbrúar við jarðskjálftanum í maí 2008 skoðuð. Brúin, sem hvílir á jarðskjálftalegum, skemmdist í skjálftanum. Tilgangur jarðskjálftalega er að vernda mannvirki gegn skemmdum af völdum jarðskjálfta. Brúin er því kjörin til ítarlegrar jarðskjálftagreiningar. Frá því brúin var hönnuð hefur tölvutækninni fleygt fram og því hefur skapast tækifæri til að greina brúna nánar en áður hefur verið gert.

Verkefnið var styrkt af Rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar.

Leiðbeinendur í verkefninu voru Bjarni Bessason prófessor og Einar Hafliðason hjá Vegagerðinni og þakka ég þeim kærlega veitta aðstoð.

EFNISYFIRLIT

1	Inngangur	1
2	Bakgrunnur	3
2.1	Óseyrarbrúin	3
2.2	Jarðskjálftinn.....	4
2.3	Skemmdir á brúnni	6
3	Fræði	11
3.1	Tímaraðir og svörunarróf.....	11
3.2	Jarðskjálftalegur.....	12
3.2.1	Blýfylltar gúmmílegur	13
3.2.2	Viðnámslegur	15
3.2.3	Línulegt líkan jarðskjálftalega.....	16
3.3	Togstangir	17
3.4	Greiningaraðferðir.....	18
3.4.1	Sveifluformsgreining.....	18
3.4.2	Svörunarrófsgreining.....	20
3.4.3	Ólínuleg greining byggð á sveifluformum (FNA).....	22
3.4.4	Hefðbundin ólínuleg greining (DI).....	22
3.5	Evrópski jarðskjálftastaðallinn	24
3.6	Brotstyrkur	25
3.6.1	Hliðarveggur.....	25
3.6.2	Hliðarstopparar	26
3.6.3	Brúardekk	26
4	Útreikningar	29
4.1	Tímaraðir	29
4.2	Líkanið	30
4.2.1	Brúardekkið og undirstöður.....	31
4.2.2	Blýgúmmílegur.....	31
4.2.3	Viðnámslegur	32
4.2.4	Togstangir.....	33
4.2.5	Hliðarveggir og stopparar.....	34

4.3 Brotstyrkur	34
4.4 Sveifluformsgreining	35
4.5 Töluleg greining.....	36
4.5.1 Jarðskjálftagreining á Óseyrarbrú.....	36
4.5.2 Án hliðarstoppara	39
4.5.3 Samanburður líkana.....	41
4.5.4 Áreiðanleiki og næmni reiknilíkans	43
4.6 Svörunarrófsgreining	45
5 Endurhönnun.....	51
5.1 Hitapenslur, skrið og rýrnun	53
5.2 Lokahönnun	54
6 Lokaorð.....	59
Heimildir.....	61

MYNDASKRÁ

Mynd 2.1 Óseyrarbrúin í nóvember 2008.....	3
Mynd 2.2 Snið í brúardekk ofan undirstaða og á höfum. Öll mál eru í millimetrum.....	4
Mynd 2.3 Staðsetning jarðskjálftasprungna í jarðskjálftanum 2008 (Benedikt Halldórsson og Ragnar Sigbjörnsson 2009).....	5
Mynd 2.4 Staðsetning jarðskjálftans (Ragnar Sigbjörnsson o.fl. 2008)..	6
Mynd 2.5 Skemmdir á vestari landstöpli.....	6
Mynd 2.6 Skemmdir á eystri landstöpli.....	7
Mynd 2.7 Fyrsti millistöpull vestan megin (Vegagerðin).....	7
Mynd 2.8 hliðarstoppari á miðstöpli (Vegagerðin).	7
Mynd 2.9 Samskeyti vestari landstöpuls og brúardekks.....	8
Mynd 2.10 Viðnámslega á vestari landstöpli (Vegagerðin)..	8
Mynd 3.1 Hnitakerfi varpað um hornið θ	11
Mynd 3.2 Áhrif jarðskjálftalega á svörun mannvirkis sýnd með svörunarrófum.....	13
Mynd 3.3 Tvílínulegur vinnuferill blýfylltra gúmmílega.	14
Mynd 3.4 Einfaldaður vinnuferill viðnámslega.....	16
Mynd 3.5 Formbreytt togstöng og kraftar sem verka á hana.	18
Mynd 3.6 Fylgnistuðull sveifluforma.	21
Mynd 3.7 Dæmi um samsett svörunarróf.	21
Mynd 3.8 Rayleigh deyfing.	23
Mynd 3.9 Skúfbrot.....	25
Mynd 3.10 Horn brotnar af hliðarstoppurum.	26
Mynd 3.11 Streitur og spennur í uppspenntum bita.	27
Mynd 4.1 Samanburður á verstu og bestu þáttum svörunarrófa.....	30
Mynd 4.2 Brúarlíkanið í SAP2000.	31
Mynd 4.3 Samanburður á stífni blýgúmmílega og togstanga.	33
Mynd 4.4 Hliðarveggur landstöpuls.	34
Mynd 4.5 Há- og lággildi krafta í stoppurum.	37
Mynd 4.6 Færslur brúardekks og kraftar í stoppurum.	38
Mynd 4.7 Færslur brúarenda í þverátt í líkani með og án endastoppa sem hindra færslur í langátt.	39
Mynd 4.8 Mestu færslur brúardekksins fyrir allar sex tímaraðirnar.....	40

Mynd 4.9 Mestu skúfkraftar í undirstöðum fyrir Hveragerðistímaröð.....	41
Mynd 4.10 Mestu skúfkraftar í undirstöðum.....	41
Mynd 4.11 Mesta vægi um lóðréttan ás í brúardekki.....	42
Mynd 4.12 Næmnigreining á greiningaraðferðum.....	43
Mynd 4.13 Samanburður á greiningaraðferðum fyrir líkan með togstöngum.....	44
Mynd 4.14 Samanburður á greiningaraðferðum fyrir líkan án togstanga.....	44
Mynd 4.15 Samanburður reiknaðra svörunarrófa og svörunarrófs Evrópustaðalsins fyrir 5% deyfihlutfall.....	46
Mynd 4.16 Stífni og deyfing í legum.....	47
Mynd 4.17 Samanburður á svörunarrófsgreiningu og ólínulegri greiningu.....	48
Mynd 4.18 Færslur samkvæmt svörunarrófi EC8.....	49
Mynd 5.1 Samanburður á mestu færslum brúardekksins með mismunandi uppsetningu á togstöngum.....	51
Mynd 5.2 Mismunandi jarðskjálftalegur í endum.....	52
Mynd 5.3 Áhrif blýmagns á færslur brúardekksins.....	53
Mynd 5.4 Mestu færslur fyrir Hveragerðis og ráðhúsröð með stækkuðum legum.....	55
Mynd 5.5 Færslutímaraðir yfir undirstöðum 1-9 eftir endurhönnun á legukerfi.....	56
Mynd 5.6 Mesta vægi um lóðréttan ásinn í brúardekkinu.....	57

TÖFLUSKRÁ

Tafla 3-1 Mikilvægisstuðlar jarðskjálftastaðalsins.....	25
Tafla 4-1 Fjarlægðir frá skjálftamiðju.	29
Tafla 4-2 Steypugæði (Eibl 1995).	31
Tafla 4-3 Kennistærðir blýgúmmílegu (Gleit- und Lagertechnik).....	32
Tafla 4-4 Aflfræðilegir eiginleikar blýgúmmílegu.	32
Tafla 4-5 Kennistærðir og aflfræðilegir eiginleikar viðnámslega.	32
Tafla 4-6 Viðnámsstuðlar viðnámslega.	33
Tafla 4-7 Meðalbrotstyrkur steypu.	34
Tafla 4-8 Vægisþol brúardekksins.....	35
Tafla 4-9 Fjöldi sveifluforma sem þarf til þess að ná 90 % formmassa. Fjöldi Ritz vigranna er fjöldi vigra í hverja stefnu en eiginsveifluformin er heildarfjöldinn í allar stefnur. 36	
Tafla 4-10 Lóðréttar hreyfingar brúardekksins frá jafnvægisstöðu á miðju hafi.....	39
Tafla 4-11 Mestu færslur brúardekks í langátt brúar.	40
Tafla 4-12 Mesta lárétta hröðun brúardekks á hafi.....	42
Tafla 4-13 Nálgun viðnámsstuðuls.....	45
Tafla 4-14 Deyfing í legukerfi og sveiflutími sem var notaður til þess að skipta svörunarrófinu í tvennt.	48
Tafla 4-15 Niðurstöður svörunarrófsgreiningar með einnar frelsisgráðu kerfi sem samsvara færslum í langátt brúar.....	50
Tafla 5-1 Kennistærðir blýgúmmílega.....	55
Tafla 5-2 Aflfræðilegir eiginleikar einnar blýgúmmílegu á landstöpli og millistöplum.	56
Tafla 5-3 Mesta lárétta hröðun brúardekks á hafi.....	57

1 INNGANGUR

Markmið þessa verkefnis er að skoða hegðun Óseyrarbrúarinnar í jarðskjálftanum sem varð 29. maí 2008 á Suðurlandi. Brúin skemmdist töluvert og vegna þess er áhugi á að skoða ástæður skemmdanna og hvað hefði verið hægt að gera til þess að koma í veg fyrir slíkar skemmdir. Jafnframt voru greiningaraðferðir bornar saman með það að markmiði að meta áreiðanleika þeirra.

Fimmtán brýr eru með jarðskjálftalegum á Íslandi sem lítið hefur reynt á þar til nýlega. Gamla Þjórsárbrúin stendur nálægt upptökum jarðskjálftans sem varð 21. júní árið 2000. Sú brú skemmdist ekki í skjálftanum en rannsókn var gerð á hegðun brúarinnar í honum (Bjarni Bessason og Einar Hafliðason 2004). Jarðskjálftagreining var gerð á brúnni yfir Brúará hjá Efri-Reykjum (Jón Snæbjörnsson og Bjarni Bessason 2006) markmið þess verkefnis var að skoða svörun brúar á stauraundirstöðum en brúin er jafnframt með jarðskjálftalegum.

Frá því að Óseyrarbrúin var hönnuð, á miðjum níunda áratug síðustu aldar, hefur orðið mikil framför í tölvutækni og reiknigeta aukist til muna. Samhliða því hefur orðið ör þróun á hugbúnaði og aðferðum til jarðskjálftagreiningar tölvulíkana. Að því leyti er lærdómsríkt að skoða brúna og gera á henni jarðskjálftagreiningu sem hefur ekki áður farið fram.

Notaðar voru tímaraðir frá þremur mælistöðvum úr jarðskjálftanum til þess að reikna svörun brúarinnar. Þar sem færslu-krafta samband jarðskjálftalega er ólínulegt var stillt upp ólínulegu líkani af brúnni í tölvuforritinu SAP2000. Tvær aðferðir voru notaðar við ólínulega greiningu, annars vegar hefðbundin ólínuleg greining og hins vegar ólínuleg greining byggð á sveifluformum burðarvirkisins. Einnig var svörun brúarinnar reiknuð með svörunarrófum þar sem notuð var jafngild línuleg stífni og deyfing leganna. Aðferðirnar voru bornar saman til þess að meta áreiðanleika þeirra.

Áhrif þess að breyta legukerfi tölvulíkansins var einnig skoðað með það fyrir augum að koma í veg fyrir skemmdir af völdum jarðskjálfta. Prófað var að notast við samskonar legur og fyrir eru en breyta staðsetningu þeirra. Einnig var prófað að stækka legurnar og breyta þannig aflfræðilegum eiginleikum þeirra. Staðsetning og stærð leganna var skoðuð útfrá dreifingu áslægs krafts í legunum. Þá var litid til vandamála sem geta komið upp vegna hitaþenslna brúardekksins. Niðurstöðurnar sem fást við breytingarnar gilda augljóslega ekki almennt en gefa þó vísbendingar um hegðun brúa með jarðskjálftalegum.

Ritgerðin skiptist í eftirfarandi kafla:

Annar kafli: Brúnni er lýst í máli og myndum sem og þeim skemmdum sem urðu í jarðskjálftanum. Einnig er fjallað um skjálftann.

Þriðji kafli: Fjallað er um aðferðafræði og fræðilegan grundvöll verkefnisins. Aðaláherlsa er lögð á jarðskjálftalegur og þær greiningaraðferðir sem eru notaðar. Auk þess er fjallað um brotstyrk þeirra eininga sem skemmdust og evrópska jarðskjálftastaðalinn.

Fjórdi kafli: Svörun brúarinnar er reiknuð fyrir mismunandi jarðskjálftaálag og með mismunandi aðferðum bæði ólínulegum og línulegum. Niðurstöðurnar eru bornar saman og einnig settar í samhengi við brotstyrk brúarinnar.

Fimmti kafli: Áhrif þess að breyta hönnun brúarinnar skoðuð. Aðallega er litið á breytingar í legukerfinu.

Sjötti kafli: Samantekt og lokaorð

2 BAKGRUNNUR

Í Suðurlandsskjálftanum 29. maí 2008 urðu talsverðar skemmdir á Óseyrarbrúnni. Bakgrunnur verkefnis liggur í að greina þetta tjón. Því er rétt að lýsa brúnni og skemmdunum og fjalla um jarðskjálftann áður en lengra er haldið.

2.1 Óseyrarbrúin

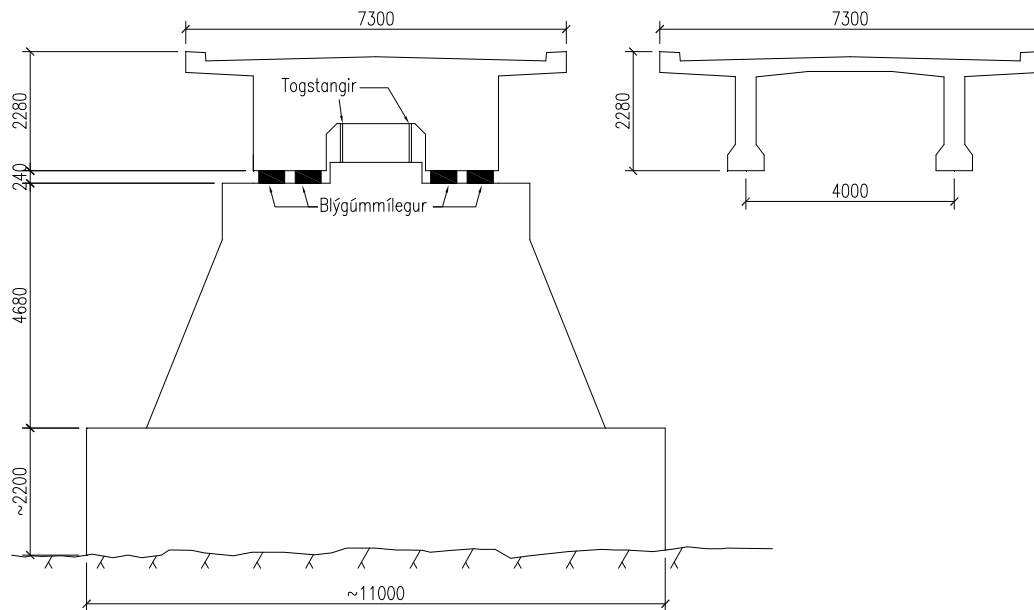
Óseyrarbrúin liggur yfir Ölfusárós og tengir saman þjóðveginn á milli Eyrarbakka og Þorlákshafnar. Brúin var tekin í notkun í byrjun september 1988 og var mikil samgöngubót (Sig. Jóns. 1988). Áður fór umferð frá Eyrarbakka og Stokkseyri yfir Ölfusárbrú við Selfoss og styttist því leiðin til Þorlákshafnar og Reykjavíkur mikið.

Brúin er 360 m að lengd með átta höfum, landhöfin eru 36 m en önnur höf 48 m. Brúardekkið er steipt og eftirspennt, myndar þversnið þess pí-forma bita eins og sést á mynd 2.2. Yfir og 8 m sitthvoru megin við milliundirstöður er brúardekkið og bitar þess með aukinni þykkt. Heildarþyngd brúardekksins er 44 MN. Stutt er á klöpp og eru stöplarnir sem eru tæpir 7 m á hæð grundaðir á henni (Vegagerð ríkisins 1986).



Mynd 2.1 Óseyrarbrúin í nóvember 2008.

Á landstöplunum og fyrstu millistöplum hvílir brúin á tveimur viðnámslegum á hverjum stöpli. Blýgúmmílegur eru á öðrum millistöplum, fjórar á hverjum stöpli, auk þeirra eru tvær togstangir sem tengja saman hvern stöpul og dekkið.



Mynd 2.2 Snið í brúardekk ofan undirstaða og á höfum. Öll mál eru í millimetrum.

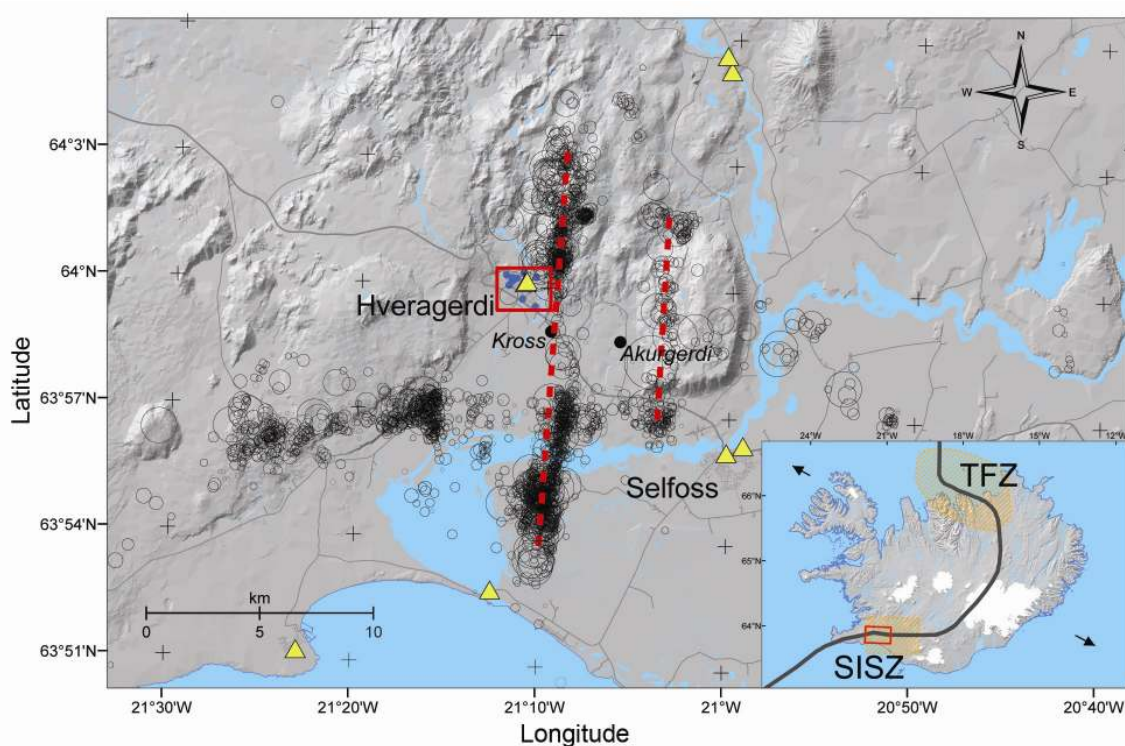
Láréttar færslur brúardekksins eru leyfðar upp að ákveðnu marki. Steyptir hliðarveggir eru sitthvoru megin við brúardekkið á landstöplum þar sem bilið að brúardekki er 50 mm. Á millistöplum er steypur hnallur á milli bitanna og eru 70 mm að hvorum bita. Þessir hnallar verða hér eftir kallaðir hliðarstopparar. Við enda brúardekksins er 50 mm þenslurauf með sérstökum gúmmíþéttingum og takmarkarkast því hreyfingar brúardekksins í langátt.

2.2 Jarðskjálftinn

Jarðskjálftinn varð 29. maí 2008 kl 15:45 og vægisstærð hans var $6,3 M_w$. Um hefðbundinn Suðurlandsskjálfta var að ræða, með svipuð einkenni og jarðskjálftarnir sem urðu árið 2000. Skjálftinn átti upptök sín grunnt í jarðskorpunni og var með hægri handar sniðgengisbrotahreyfingu (Ragnar Sigbjörnsson o.fl. 2008).

Skjálftinn var á tveimur sprungum, með norður-suður stefnu, nærri samtímis. Brotahreyfingin hófst á sprungu miðja vegu milli Hveragerðis og Selfoss, rétt vestan við Ingólfsfjall, en um einni sekúndu síðar hófst brotahreyfing á sprungu 3,5 km vestan við þá fyrri eins og sýnt er á mynd 2.3 (Ragnar Sigbjörnsson o.fl. 2008). Dreifing eftirskjálfta sýndi að eystri sprungan er um 10 km löng en sú vestari nærri 20 km. Á yfirborðinu eru hins vegar engin skýr ummerki um sprungurnar eins og algeng eru í Suðurlandsskjálftum. Ein ástæða þess gæti verið sú að þykkur jarðvegur liggur yfir berginu á þessu svæði og felur því ummerkin (Benedikt Halldórsson og Ragnar Sigbjörnsson 2009).

Nálægt bænum Akurgerði, sem merktur er á mynd 2.3 eru ummerki um að grunnhröðunin hafi farið yfir 1g þar sem steinar höfðu snúist og færst um vegalengd sem var 1-3 sinnum breidd steinanna. Mesta mældu grunnhröðun var hins vegar á bilinu 0,38-0,88 g (Benedikt Halldórsson og Ragnar Sigbjörnsson 2009).



Mynd 2.3 Staðsetning jarðskjálftasprungna í jarðskjálftanum 2008. Svörtu punktarnir sýna staðsetningu eftirskjálfta. Gulu þríhyrningarnir sýna staðsetningu jarðskjálftamæla en mælirinn í Óseyrarbrúnni var ekki virkur í skjálftanum. Innfelda myndin sýnir legu Atlantshafshryggjarins undir Íslandi og Suðurlands- og Tjörnes-brotabeltin (Benedikt Halldórsson og Ragnar Sigbjörnsson 2009).

Heimildum ber ekki fullkomlega saman um jarðskjálftamiðjuna og er það vegna þess að skjálftinn varð á tveimur sprungum. Skjálftamiðjurnar reiknaðar af rannsóknarmiðstöð Háskóla Íslands í jarðskjálftaverkfræði (Ragnar Sigbjörnsson o.fl. 2008) og Global Centroid Moment Tensor (Larson 2006) útfra tímaröðum skjálftans, með því að nota mismunandi komutíma p og s bylgna, lenda báðar á eystri sprungunni en á sitthvorum enda hennar eins og sjá má á mynd 2.4.

Eftir Suðurlandskjálftana 2000 var gert líkan sem lýsir sambandi fjarlægðar frá skjálftamiðju og hámarks hröðunar (Ragnar Sigbjörnsson og Símon Ólafsson 2004). Með því að lágmarka skekkju þess líkans miðað við mælingar úr 2008 skjálftanum fékkst ný skjálftamiðja sem er mitt á milli sprunganna tveggja og er sýnd á mynd 2.4 (Ragnar Sigbjörnsson o.fl. 2008).



Mynd 2.4 Staðsetning jarðskjálftans. Holu stjörnurnar tvær sýna upptök skjálftans fundna út frá tímaröðum. Staðsetning Háskóla Íslands er norðar og CMT sunnar. Fyllta stjarnan sýnir staðsetningu skjálftans sem var reiknuð með aðhvarfsgreiningu á líkani 2000 skjálftanna. Líklegar staðsetningar sprungna eru sýndar með rauðum brotalínum (Ragnar Sigbjörnsson o.fl. 2008).

2.3 Skemmdir á brúnni

Í skjálftanum urðu töluverðar skemmdir á brúnni og var henni lokað fyrir umferð í stutta stund á meðan skemmdir voru kannaðar. Skemmdirnar voru bundnar við stoppara þ.e. þær einingar sem takmarka láréttar hreyfingar brúardekksins.



Mynd 2.5 Skemmdir á vestari landstöpli.

Mestu skemmdirnar urðu á vestari landstöplinum þar sem syðri hliðarveggurinn brotnaði og losnaði nánast alveg frá undirstöðunni og steypustyrktarstál fór í sundur, sjá mynd 2.5. Á nyrðri hliðarveggnum sem og á báðum hliðarveggjum eystri landstöpsulsins mynduðust einnig sprungur en formbreytingar voru minni eða innan við 1 cm, sjá mynd 2.6. Brotið á veggjunum hafa öll einkenni gegnumbrots þar sem áraun yfirstígur skúfstyrk þversniðs. Sprungurnar eru undir horni og brotflöturinn er í lítilli fjarlægð frá álagsfletinum. Það brotform er þó þekktara þar sem plötur brotna vegna álags frá súlum.



Mynd 2.6 Skemmdir á eystri landstöpli. Á myndinni sjást einnig viðnámslegurnar ágætlega en stálplöturnar renna á gúmmínu sem er teflonhúðað að ofan.

Hliðarstopparar á millistöplum, sem sjá má á myndum 2.7 og 2.8, brotnuðu mismikið. Hornin brotnuðu af flestum en sumir molnuðu algjörlega. Ekki er hægt að sjá að kerfisleg breyting sé á skemmdum hliðarstoppara eftir staðsetningu þeirra. Togstangirnar eru margar hverjar bognar, það getur bæði hafa orsakast af tognun í stöngunum og því að þær hafi togast uppúr stöplunum.



Mynd 2.7 Fyrsti millistöpull vestan megin (Vegagerðin).



Mynd 2.8 hliðarstoppari á miðstöpli (Vegagerðin).

Brúardekkið rakst í langgátt í landstöplanna og þar brotnaði upp úr steypunni. Skemmdirnar voru áberandi mestar á vestari stöplinum sunnanverðum þar sem steypan molnaði inn að járnum eins og sést á mynd 2.9. Á norðanverðum stöplinum brotnaði einnig upp úr steypunni en í mun minna mæli. Eystri endinn slapp betur og voru skemmdirnar einungis smá sprungur og flísar sem brotnuðu upp úr steypunni. Þessar skemmdir urðu þó mun minni en aðrar og hafa væntanlega verið auðveldar í viðgerð.



Mynd 2.9 Samskeyti vestari landstöpuls og brúardekks.

Legurnar voru allar óskemmdar en sjá mátti ummerki um hreyfingar þeirra. Sumar blýgúmmílegurnar fengu varnalega formbreytingu og viðnámslegur höfðu smitað lit á stálplötur sem þær liggja að eins og sjá má á mynd 2.10.



Mynd 2.10 Viðnámslega á vestari landstöpli. Sjá má svartan lit á stálplötu sem ætla má að sé tilkominn vegna mismunahreyfingar á núningsfleti legunnar (Vegagerðin).

Engar skemmdir urðu á burðarkerfi brúarinnar og var hún því opnuð fyrir umferð eftir að skemmdir höfðu verið kannaðar.

Af skemmdunum að dæma er ljóst að færslur brúardekksins hafa verið umtalsverðar. Bilið í langgátt brúarinnar að landstöplunum er 50 mm og einnig að veggjum landstöplanna. Að hliðarstoppurum millistöpla er bilið 70 mm. Eftir skjálftann var bilið út í vegginn sem

brotnaði frá orðið rúmir 300 mm. Auk þess sýnir snertiflötur viðnámslegunnar í enda, á mynd 2.10, að hreyfingarnar hafi verið meiri en 100 mm. Því er ljóst að í vestari endanum hafa færslurnar verið meiri en 100 mm og jafnvel allt að 300 mm.

Gert var við brúna þannig að allir hliðarstopparar og hliðarveggir voru hreinsaðir í burtu og steipt var upp á nýtt. Skipt var um öll járn í brotnum hlutum.

3 FRÆÐI

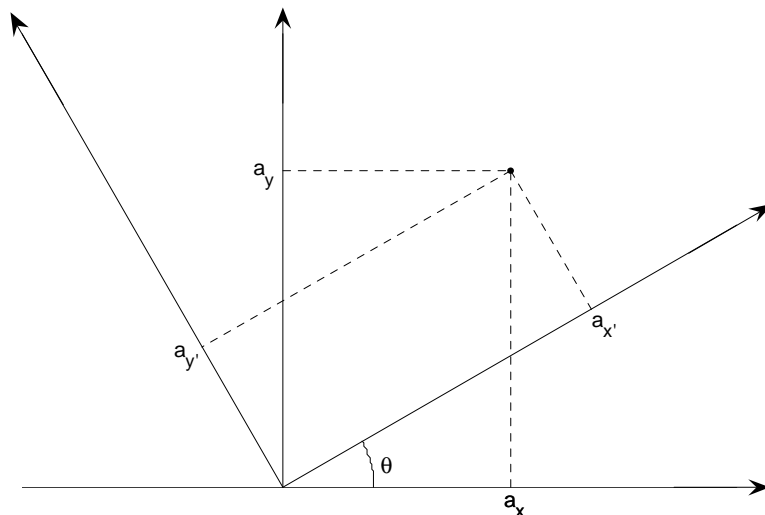
Aðferðarfræðinni má skipta í fjóra hluta: Skilgreiningu jarðskjálftaálags, gerð líkans af burðarvirkinu, greiningaraðferðir og útreikninga á brotstyrk burðareininga. Í þessum kafla verður þessum þáttum lýst. Einnig er fjallað um Evrópska jarðskjálftastaðalinn og þær aðferðir sem þar eru notaðar við jarðskjálftagreiningu.

3.1 Tímaraðir og svörunarróf

Mælingar á yfirborðshröðun jarðskjálfta eru venjulega gerðar með þríása mælum sem mæla hröðun í tvær láréttar hornréttar stefnur og eina lóðréttu. Almenn séð eru láréttu þættirnir tveir ólíkir og því hefur stefna þeirra miðað við mannvirkið áhrif á svörun þess. Það er því nauðsynlegt að geta varpað tímaraðunum í aðrar stefnur. Þegar þættirnir úr hverjum mæli eru samstíga með tilliti til tíma má varpa þeim með einfaldri hornvörpun eins og sýnd er á mynd 3.1 (Douglas 2003):

$$\begin{Bmatrix} a_{x'}(t) \\ a_{y'}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

þar sem $a_{x'}$ og $a_{y'}$ eru tímaraðirnar í hnitakerfi vörpuðu um hornið θ , a_x og a_y eru upphaflegu tímaraðirnar.



Mynd 3.1 Hnitakerfi varpað um hornið θ .

Svörunarróf lýsir mestu svörun einnar frelsisgráðu línulegs kerfis sem örvað er með yfirborðshreyfingum undirstöðu. Svörun slíks kerfis við grunnhröðun undirstöðu er lausn diffurjöfnunnar (Chopra 2001):

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + ku = -m \ddot{u}_g(t) \quad (3.2)$$

þar sem m er massi kerfisins, c er deyfing þess og k stífni. Færsla kerfisins, miðað við undirstöðu, sem fall af tíma er u , hraði þess er fyrsta afleiða færslunnar með tilliti til tíma \dot{u} og hröðunin er önnur afleiðan \ddot{u} . Grunnhröðunin er \ddot{u}_g og t er tími. Með því að deila í gegnum jöfnu 3.2 með massanum fæst:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = -\ddot{u}_g(t) \quad (3.3)$$

Þar sem ζ er deyfihlutfall kerfisins og ω_n er horntíðni kerfisins hér eftir kölluð sveiflutíðni. Samband sveiflutímans T_n og sveiflutíðninnar er:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (3.4)$$

Það er ljóst út frá jöfnu 3.3 að þegar sveiflutíðni og deyfing einnar frelsisgráðu kerfis er þekkt má reikna svörun þess fyrir gefna tímaröð grunnhröðunar. Svörunarróf er svörun kerfis sem fall af sveiflutíðni eða sveiflutíma þess fyrir gefið deyfihlutfall. Færslurófið er þannig skilgreint sem (Chopra 2001):

$$S_d \equiv u_o(T_n, \zeta) \equiv \max_t |u(t, T_n, \zeta)| \quad (3.5)$$

Til þess að búa til svörunarróf verður því að reikna svörun einnar frelsisgráðu kerfa með sveiflutíma og deyfingu á því bili sem er til skoðunar fyrir gefinn jarðskjálfta. Fyrir hvern sveiflutíma og deyfihlutfall fæst síðan eitt hágildi sem er þá rófgildi þess kerfis. Til eru fjölmargar aðferðir við að reikna svörun slíkra kerfa bæði í tíma- og tíðnirúminu sjá t.d. (Newland 1993; Chopra 2001)

Færslurófið er í raun nægjanlegt til þess að reikna hágildi innri krafta en venjan er að reikna einnig svokallað gervihröðunarróf (e. pseudo-acceleration spectra). Gervihröðunarrófið er skilgreint sem:

$$S_a = \omega_n^2 S_d \quad (3.6)$$

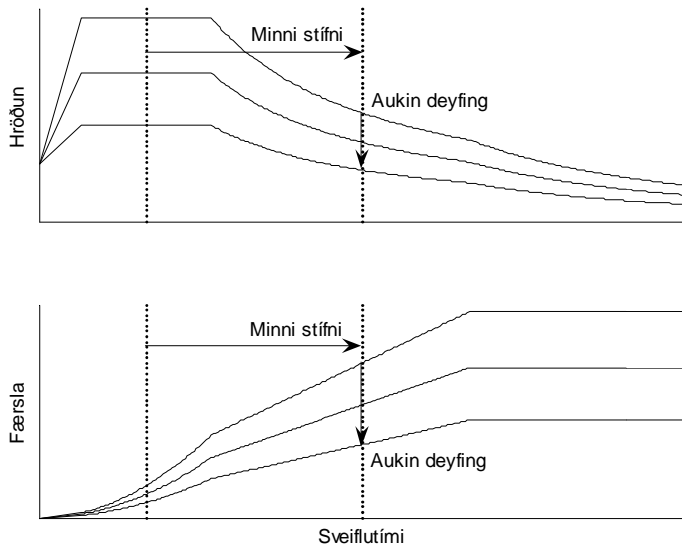
Með því að nota að $\omega_n = \sqrt{k/m}$ má finna undirstöðuskúfkrafta útfrá gervihröðuninni sem:

$$V_{bo} = kS_d = m\omega_n^2 S_d = mS_a \quad (3.7)$$

Gervihröðunarrófið er ekki jafnt hröðunarrófinu nema þegar deyfing kerfisins er núll en fyrir lítið deyfihlutfall, eins og er í flestum mannvirkjum, er munurinn lítill. Hins vegar er ekki not fyrir hröðunarrófið til þess að reikna innri krafta kerfisins og því er það yfirleitt ekki reiknað.

3.2 Jarðskjálftalegur

Jarðskjálftalegur eiga að auka jarðskjálftaþol burðarvirkja. Virkni jarðskjálftalega liggur fyrst og fremst í tvennu: Lítilli láréttri stífni og deyfingu vegna ólínulegra formbreytinga. Lítill lárétt stífni lengir sveiflutímann sem verður þá lengri en ráðandi sveiflutími í jarðskjálftahreyfingunni. Á mynd 3.2 sést hvernig burðarvirkið færirst frá því að vera nálægt hágildi í svörunarrófinu. Einnig sést að færslurnar aukast með auknum sveiflutíma en aukin deyfing vinnur á móti því. Færslur gætu verið í kringum 1 m ef ekki kæmi til aukin deyfing en eru í stað þess 50 – 400 mm (Skinner o.fl. 1993).



Mynd 3.2 Áhrif jarðskjálftalega á svörun mannvirkis sýnd með svörunarrófum.

Þó svo að virkni og kostir jarðskjálftalega hafi verið þekkt allt frá 19. öld hófst notkun þeirra ekki að ráði fyrr en á áttunda áratug síðustu aldar með tilkomu gúmmílega. Í Bandaríkjunum, Nýja Sjálandi og Japan, þar sem jarðskjálftalegurnar hafa mest verið notaðar, hefur notkunin verið fjölbreytt. Mikilvægar byggingar s.s. brýr, sjúkrahús og slökkvistöðvar hafa verið byggðar með jarðskjálftalegum, þær hafa verið notaðar í byggingar sem hýsa viðkvæman hátækniðnað og einnig hefur þeim verið komið fyrir í sögufrægum byggingum.

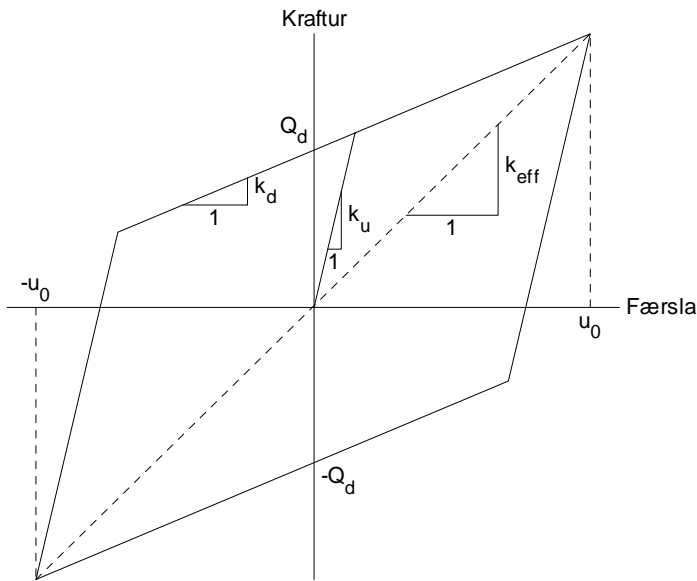
Notkun jarðskjálftalega á Íslandi hófst árið 1983 þegar byggð var brú yfir Sogið við Þrastarlund. Síðan þá hafa þrettán brýr verið byggðar með jarðskjálftalegum og jarðskjálftalegum var komið fyrir í gömlu Þjórsárbrúnni árið 1991 (Bjarni Bessason og Einar Hafliðason 2004). Það eru því alls fimmtán brýr með jarðskjálftalegum á Íslandi.

3.2.1 Blýfylltar gúmmílegur

Blýfylltar gúmmílegur, eða blýgúmmílegur, voru fundnar upp á Nýja Sjálandi á miðjum áttunda áratug síðustu aldar af W. H. Robinson (Skinner o.fl. 1993).

Legurnar eru gerðar úr gúmmílögum og á milli laganna eru þunnar stálplötur. Í legunum er blýkjarni sem gengur í gegnum þær. Gúmmíð hefur litla stífni og eykur því sveiflutíma virkisins. Stálplöturnar auka lóðréttu stífnina og gera það að verkum að legan formbreytist með skífingu. Blýið hefur lága flötpennu, legan formbreytist því ólínulega undir jarðskjálftaálagi sem leiðir til umbreytingar hreyfiorku í varma (Bjarni Bessason 1992; Skinner o.fl. 1993; Naeim og Kelly 1999).

Venjulega eru legurnar búnar til með því að þrýsta blýkjarnanum í gat á legunni sem er u.þ.b. 1% minna að rúmmáli heldur en kjarninn. Þetta er gert til þess að tryggja góða samloðun og samvirkni á milli blýsins og gúmmísins (Bjarni Bessason 1992; Naeim og Kelly 1999). Á Íslandi hafa þessar legur hins vegar verið framleiddar með því að hella bráðnu blýi í gatið á legunni (Bjarni Bessason 1992).



Mynd 3.3 Tvílinulegur vinnuferill blýfylltra gúmmílega.

Vinnuferill blýgúmmíleganna er venjulega settur fram sem tvílinulegt líkan eins og á mynd 3.3. Hann er skilgreindur með fjaðurstífninni, k_u , stífni eftir flot, k_d , og flotstyrknum í óformbreyttu legum, Q_d . Eiginleikar íslensku gúmmíleganna voru rannsakaðir 1989 (Bjarni Bessason 1992). Legurnar voru prófaðar undir endurteknu álagi og vinnuferlarnir nálgast með tvílinulegu líkani. Stuðlarnir sem fengust voru:

$$k_d = k_r = \frac{A_r G_r}{T_r} \quad (3.8)$$

$$k_u = 11,6k_r \quad (3.9)$$

$$Q_d = \sigma_{yp} A_p \quad (3.10)$$

þar sem A_r er flatarmál, G_r er skúfstuðull og T_r er heildar þykkt gúmmílega. A_p er flatarmál og σ_{yp} er flotspenna blýsins. Af þessu sést að stífni legunnar er einungis háð gúmmíinu eftir að blýið hefur flotið. Erlendar rannsóknir hafa sýnt að hlutfall upphafsstífni og stífni eftir flot sé nálægt 10. Í rannsóknunum kom í ljós að legurnar þola endurtekið álag, 10-20 lotur, með 120% skúfstreitum án teljandi skemmda. Skúfstreitir gúmmílega eru skilgreindar sem lárétt formbreyting sem hlutfall af heildarþykkt gúmmílega. Mestu leyfilegu streitur í gúmmílegum án blýkjarna er lýst sem (Skinner o.fl. 1993):

$$\gamma_w = 0,4\varepsilon_t \quad (3.11)$$

þar sem ε_t er brotstreita í hreinu togi. Stuðullinn 0,4 hefur verið fundinn með tilraunum og miðast við hönnunarskjálfta. Stuðullinn 0,7 er notaður sem viðmiðun fyrir stóra skjálfta. Togstreita við brot getur verið í kringum 350% og það þýðir því leyfilegar skúfstreitir upp á 140 – 240%. Einnig er talað um að gúmmílegur hegði sér línulega fyrir streitur upp að 100 – 150% án þess þó að það sé tengt við skemmdir á legunum (Naeim og Kelly 1999).

Út frá skilgreiningu tvílínulega líkansins er auðvelt að finna færslu við flot og flotkraftinn í legunum sem:

$$u_y = \frac{Q_d}{k_u - k_d} \quad (3.12)$$

$$Q_y = k_u u_y \quad (3.13)$$

Lóðrétt stífni gúmmílega er reiknuð sem (Priestley o.fl. 1996):

$$k_z = \frac{6G_r S^2 A_r k}{(6G_r S^2 + k) T_r} \quad (3.14)$$

Þar sem k er þjöppunarstuðull (e. bulk modulus) gúmmísins og S er formstuðull legunnar. Formstuðullinn, sem er hlutfall álagsflatar og álagslauss flatar, er fyrir réttthyrndar legur:

$$S = \frac{ab}{2t_r(a+b)} \quad (3.15)$$

Þar sem a og b eru hliðarlengdir legunnar, t_r er þykkt eins gúmmílags og gert er ráð fyrir því að svæði með breidd t_r sé álagslaust á hlið legunnar.

3.2.2 Viðnámslegur

Viðnámslegur sem samanstanda af ryðfríu stáli og tefloni, sem mynda efra og neðra byrðið í núningsfleti þeirra, hafa verið notaðar í brýr frá því á sjöunda áratugnum. Saga viðnámslega er þó mun lengri enda eru þær með fyrstu jarðskjálftalegunum sem komu fram á sjónarsviðið. Á Ítalíu komu fram hugmyndir um að nota viðnámslegur við endurbyggingu húsa eftir Messimo-Reggio jarðskjálftann þó svo að því hafi ekki orðið. Enskur læknir setti árið 1909 fram hugmynd um að einangra bygginu frá undirstöðunum með lagi af talki. Í þremur stórum jarðskjálftum, í Dhubai (1930) og Bihar (1934) á Indlandi og í Kína (1976) kom í ljós að hlaðin hús sem stóðust jarðskjálftana höfðu mörg hver sprungur neðarlega í veggjum sem leyfðu færslur í kringum 6 cm. Í kjölfarið hafa farið fram ítarlegar rannsóknir á viðnámslegum (Priestley o.fl. 1996; Naeim og Kelly 1999).

Tregðukrafturinn í viðnámslegu er fundinn sem hlutfall lóðréttis krafts sem legan ber, þetta hlutfall er kallað viðnámsstuðull. Krafturinn verkar í öfuga átt við hreyfinguna og er gefin sem:

$$R = \mu F(\text{sgn } \dot{u}) \quad (3.16)$$

Þar sem μ er viðnámsstuðullinn, F er lóðrétti krafturinn og \dot{u} er afstæður hraði snertiflatanna.

Í stál-teflon legum er viðnámsstuðull leganna háður hraða, þrýstingi og yfirborði flatanna. Fyrir mjög lítinn hraða, t.d. við hitaþenslur, er stuðullinn á bilinu 0,02 – 0,03 og eykst með auknum hraða upp í 0,10-0,15. Hann er enn fremur háður þrýstingi og minnkar með auknum þrýstingi (Constantinou o.fl. 1990; Priestley o.fl. 1996). Samband hraða og viðnáms hefur verið lýst með eftirfarandi jöfnu (Constantinou o.fl. 1990; Computer and Structures 2007):

$$\mu = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min}) e^{(-a|\dot{u}|)} \quad (3.17)$$

þar sem f_{max} og f_{min} eru há- og lággildi viðnámsstuðulsins og a er fasti sem lýsir því hver hratt viðnámsstuðullinn breytist með hraða og er fundin með tilraunum.

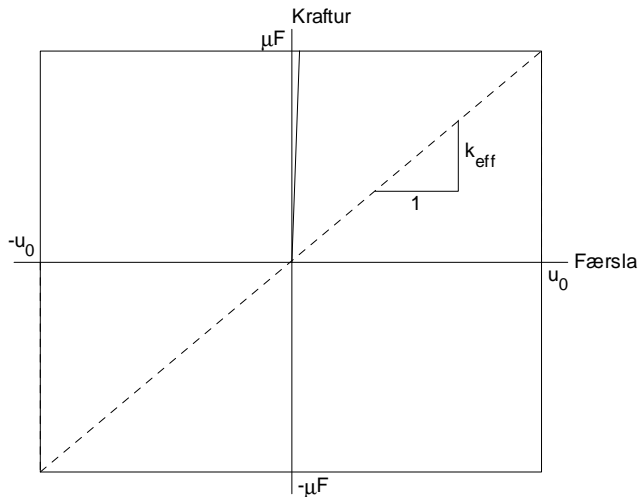
3.2.3 Línulegt líkan jarðskjálftalega

Fyrir línulega greiningu hefur verið skilgreind virk stífni, k_{eff} , sem gerir ráð fyrir að legur formbreytist línulega upp í mesta útslag eins og sýnt er á myndum 3.3 og 3.4. Stífnin er háð mesta útslaginu og því þarf að ítra svo að útslagið og stífnin passi saman. Þessi stífni er skilgreind fyrir blýgúmmilegur og viðnámslegur sem (Naeim og Kelly 1999):

$$k_{eff} = k_d + \frac{Q_d}{u_0} \quad (3.18)$$

$$k_{eff} = \frac{\mu F}{u_0} \quad (3.19)$$

Virk stífni minnkar því með auknum færslum í legum.



Mynd 3.4 Einfaldaður vinnuferill viðnámslega.

Deyfingin í þessu línulega líkani hefur verið sett fram sem jafngild seigjudeyfung (e. viscous damping). Orkutap í línulegu kerfi, með seigjudeyfinguna c_{eq} og horn tíðnina ω , í einni lotu er (Langen og Ragnar Sigbjörnsson 1979):

$$W_d = \pi c_{eq} \omega u_0^2 \quad (3.20)$$

Orkutapið er einnig jafnt flatarmáli vinnuferilsins og því auðvelt að ákvarða. Fyrir blýgúmmilegur og viðnámslegur er orkutapið:

$$W_d = 4Q_d(u_0 - u_y) \quad (3.21)$$

$$W_d = 4\mu F u_0 \quad (3.22)$$

Ef viðnámslegurnar hvíla á öðrum legum með stífina k minnkar flatarmálið sem nemur línulegum færslum og verður:

$$W_d = 4 \left(\mu F u_0 - \frac{(\mu F)^2}{k} \right) \quad (3.23)$$

Með því að umrita jöfnu 3.20 fæst að deyfistuðulinn er:

$$c_{eq} = \frac{W_d}{\pi \omega u_0^2} \quad (3.24)$$

Deyfihlutfallið er reiknað sem hlutfall deyfistuðulsins af krítísku deyfingunni. Krítíska deyfingin er (Chopra 2001):

$$c_{cr} = \frac{2k_{eff}}{\omega} \quad (3.25)$$

Nú sést að deyfihlutfallið er:

$$\zeta_{eq} = \frac{c_{eq}}{c_{cr}} = \frac{W_d}{2\pi k_{eff} u_0^2} = \frac{W_d}{4\pi U} \quad (3.26)$$

þar sem U er streituorkan við mesta útslag. Þessa jöfnu má svo nota til þess að reikna út jafngilt deyfihlutfall fyrir kerfi af jarðskjálftalegum þar sem heildar orkuveitingin og streituorkan er notuð eða:

$$\zeta_{eq} = \frac{\sum W_{d,i}}{4\pi \sum U_i} \quad (3.27)$$

Deila má um réttmæti þess að nota seigjudeyfingu til þess að lýsa deyfingunni í kerfinu, sérstaklega fyrir viðnámslegur þar sem hin raunverulega deyfing er svokölluð coulomb deyfing. Einnig er ljóst að þegar jafngild deyfing er reiknuð fyrir kerfi af legum þá er gert ráð fyrir að deyfingin sé sú sama í öllum legunum. Þegar mismunandi legur eru í sama kerfinu er hins vegar ólíklegt að þær hafi sömu deyfingu.

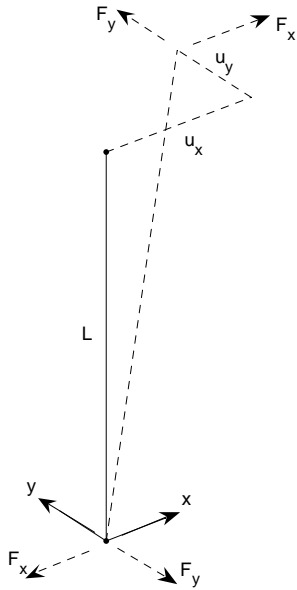
3.3 Togstangir

Áslægur kraftur í lóðréttri stöng af lengdinni L sem er liðtengd í báða enda og sem endar færast í lárétu plani er:

$$F = \frac{EA}{L} \left(\sqrt{L^2 + u_x^2 + u_y^2} - L \right) \quad (3.28)$$

þar sem E er fjaðurstuðull og A er þversniðsflatarmál stangarinnar og u_x og u_y eru innbyrðis hreyfing endanna eins og sést á mynd 3.5. Lárétti krafturinn sem vinnur gegn hreyfingunni er því:

$$F_{x,y} = \frac{EA u_{x,y}}{L} \left(1 - \frac{L}{\sqrt{L^2 + u_x^2 + u_y^2}} \right) \quad (3.29)$$



Mynd 3.5 Formbreytt togstöng og kraftar sem verka á hana.

3.4 Greiningaraðferðir

Þrjár aðferðir voru notaðar við jarðskjálftagreiningu á brúnni: Svörunarrófsgreining, ólínuleg greining byggð á sveifluformum og hefðbundin ólínuleg greining. Aðferðirnar byggjast að undanskildri hefðbundnu ólínulegu greiningunni á sveifluformum sem fundin eru með sveifluformsgreiningu.

3.4.1 Sveifluformsgreining

Farnar voru tvær leiðir í sveifluformsgreiningunni. Annarsvegar voru notuð eiginsveifluform og hins vegar voru notaðir Ritz vigrar.

Eiginsveifluformin og eigintíðnirnar eru lausn á eigingildisverkefninu:

$$(\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M})\varphi_n \quad (3.30)$$

þar sem \mathbf{K} og \mathbf{M} eru stífni- og massafylki kerfisins, ω_n eru eigintíðnir og φ_n eru eiginsveifluform þess. Eigingildin og sveifluformin eru fundin með ítrun, sveifluform með lægstu tíðnina eru fundin fyrst og síðan koll af kalli.

Sveifluformin eru ekki eingöngu notuð í jarðskjálftagreininguna heldur eru þau einnig notuð í upphafsreikninga vegna eiginálags brúarinnar. Til þess að tryggja sé að sveifluformin geti lýst formbreytingu brúarinnar vegna stöðuálags er bætt við sveifluformi sem reiknað er út frá eiginálaginu. Sveifluformið er þá það sveifluform sem þarf að bæta við til þess að formbreytingar vegna stöðuálagsins séu réttar. Massinn sem upp á vantar er reiknaður sem (Computer and Structures 2007):

$$m_{x0} = m_x - \sum_{n=1}^{n-M} f_{xn} \varphi_n \quad (3.31)$$

Þar sem m_x er stöðuálagið sem sveifluformin eiga að geta lýst og f_{x_n} er þátttökustuðull (e. participation factor) hvers sveifluforms. Sveifluformið er lausn á:

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi}_{x0} = m_{x0} \quad (3.32)$$

Eigintíðni sveifluformsins er reiknuð samkvæmt Rayleigh's quotient (Chopra 2001; Computer and Structures 2007):

$$\omega_n^2 = \frac{\boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi}}{\boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}} \quad (3.33)$$

Sýnt hefur verið fram á að Ritz vigrar séu í flestum tilvikum hentugri heldur en eiginsveifluform til þess að reikna hreyfifræðilega svörun mannvirkis (Cook o.fl. 2002; Wilson 2002). Ritz vigrarnir taka ekki eingöngu mið af burðarvirkinu sjálfu heldur eru þeir reiknaðir út frá því álagi sem verkar á það. Fyrsti vigurinn er formbreyting vegna álagsins (Chopra 2001):

$$\mathbf{K}\mathbf{y}_1 = \mathbf{s} \quad (3.34)$$

Þar sem \mathbf{s} er álagið sem verkar á burðarvirkið. Vigurinn er síðan gerður að þverstöðluðum grunni:

$$\boldsymbol{\psi}_1 = \frac{\mathbf{y}_1}{\sqrt{\mathbf{y}_1^T \mathbf{M} \mathbf{y}_1}} \quad (3.35)$$

Næsti vigur er síðan fundinn sem formbreyting vegna tregðukrafta frá fyrri vigri:

$$\mathbf{K}\mathbf{y}_n = \mathbf{M}\boldsymbol{\psi}_{n-1} \quad (3.36)$$

Þessi vigur inniheldur venjulega þætti úr fyrri vigri og því er honum skipt upp svo að hann sé hornréttur og línulega óháður hinum fyrri. Þetta er gert með:

$$y_n = \hat{\psi}_n + \sum_{j=1}^{n-1} a_{jn} \psi_j \quad (3.37)$$

$$a_{in} = \boldsymbol{\psi}_i^T \mathbf{M} \mathbf{y}_n \quad (3.38)$$

Vigurinn $\hat{\psi}_n$ er síðan þverstaðlaður samkvæmt jöfnu 3.35. Eigingildin, sem eru sveiflutíðnirnar í öðru veldi, eru fundin með því að leysa eigingildisverkefnið:

$$\tilde{\mathbf{k}}\mathbf{z} = \boldsymbol{\Omega}^2 \tilde{\mathbf{m}}\mathbf{z} \quad (3.39)$$

þar sem:

$$\tilde{\mathbf{k}} = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\psi} \quad (3.40)$$

$$\tilde{\mathbf{m}} = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\psi} \quad (3.41)$$

$$\boldsymbol{\psi} = [\psi_1 \quad \psi_2 \quad \cdots \quad \psi_n] \quad (3.42)$$

Fylkin $\tilde{\mathbf{k}}$ og $\tilde{\mathbf{m}}$ eru af stærð $(n \times n)$ þar sem n er fjöldi sveifluforma. Fjöldi sveifluforma sem er fundinn er yfirleitt mun minni heldur en fjöldi frelsisgráða. Auk þess sést, þar sem vigrarnir eru þverstaðlaðir með jöfnu 3.35, að $\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{I}$ þar sem \mathbf{I} er einingafylkið. Einnig er $\tilde{\mathbf{k}} = \boldsymbol{\Omega}^2$ þar sem $\boldsymbol{\Omega}^2$ er fylki með sveiflutíðnirnar í öðru veldi sem hornalínustök. Eigingildisverkefnið verður því hefðbundið:

$$(\tilde{\mathbf{k}} - \omega^2 \mathbf{I})\mathbf{z} = 0 \quad (3.43)$$

Sveifluformin eru að lokum fundin sem:

$$\boldsymbol{\phi} = \boldsymbol{\psi} \mathbf{z} \quad (3.44)$$

Vert er að benda á að engin ítrun er notuð til þess að finna sveifluformin með Ritz aðferðinni og er hún því töluvert hraðvirkari heldur en eiginsveifluforms aðferðin.

Virkur massi sveifluforms er sá massi sem undirstöðu skúfkraftar vegna þess eru reiknaðir útfra. Virki massinn fyrir sveifluform i er reiknaður sem (Chopra 2001):

$$M_i^* = \frac{\{\mathbf{r}\}^T [\mathbf{M}] \{\boldsymbol{\phi}_i\} \{\boldsymbol{\phi}_i\}^T [\mathbf{M}] \{\mathbf{r}\}}{\{\boldsymbol{\phi}_i\}^T [\mathbf{M}] \{\boldsymbol{\phi}_i\}} \quad (3.45)$$

Þar sem $\{\mathbf{r}\}$ eru færslur vegna grunnhröðunar jarðar í þá stefnu sem er til skoðunar. Summa alls virks massa sveifluformanna fyrir eina stefnu ætti að vera jöfn heildar massa burðarvirkisins séu öll sveifluform kerfisins reiknuð. Hlutfall sveifluformsmassanna af heildarmassanum er mat á hversu vel sveifluformin geta lýst svörun virkisins vegna jarðskjálftaálags en gefa ekki mat á svörun vegna annarra krafta.

3.4.2 Svörunarrófsgreining

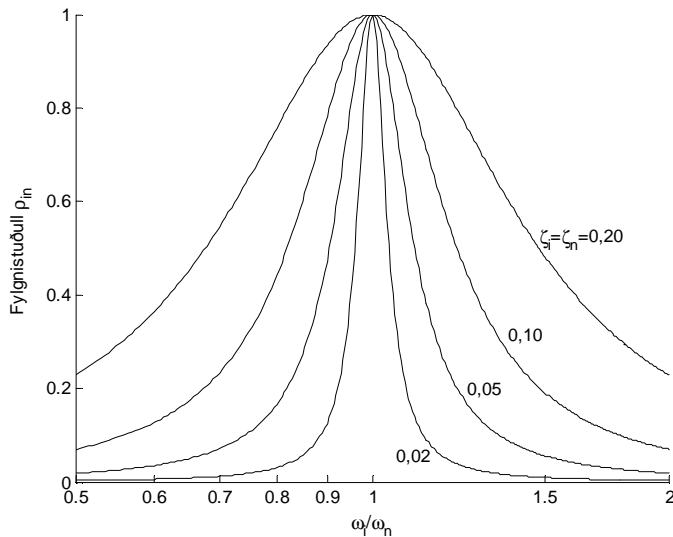
Svörunarrófsgreining byggist á því að finna svörun hvers sveifluforms útfra svörunarrófi. Svörun mannvirkisins er síðan fundin með því að flétta saman svörun allra sveifluformanna. Almennt séð verða hágildi svörunar hvers sveifluforms á mismunandi tíma og því er ekki hægt að finna nákvæmt hágildi fyrir burðarvirkið í heild þegar notast er við svörunarrófsgreiningu. Ýmsar aðferðir hafa verið settar fram til þess að meta heildarsvörunina. Sú aðferð sem verður notuð hér og er almennt talin skila góðum niðurstöðum (Chopra 2001; Wilson 2002; Computer and Structures 2007) er CQC aðferðin. Heildarsvörunin reiknuð með CQC aðferðinni er (Chopra 2001):

$$r_o \approx \left(\sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_{in} r_{io} r_{no} \right)^{1/2} \quad (3.46)$$

Þar sem r_{io} og r_{no} eru svörun sveifluforms i og n . ρ_{in} er fylgnistuðull á milli sveifluforms i og n og er reiknaður sem (Wilson o.fl. 1981):

$$\rho_{in} = \frac{8\sqrt{\zeta_i \zeta_n} \omega_i \omega_n (\zeta_i \omega_i + \zeta_n \omega_n) \omega_i \omega_n}{(\omega_i^2 - \omega_j^2)^2 + 4\zeta_i \zeta_n \omega_i \omega_n (\omega_i^2 + \omega_j^2) + 4(\zeta_i^2 + \zeta_n^2) \omega_i \omega_n} \quad (3.47)$$

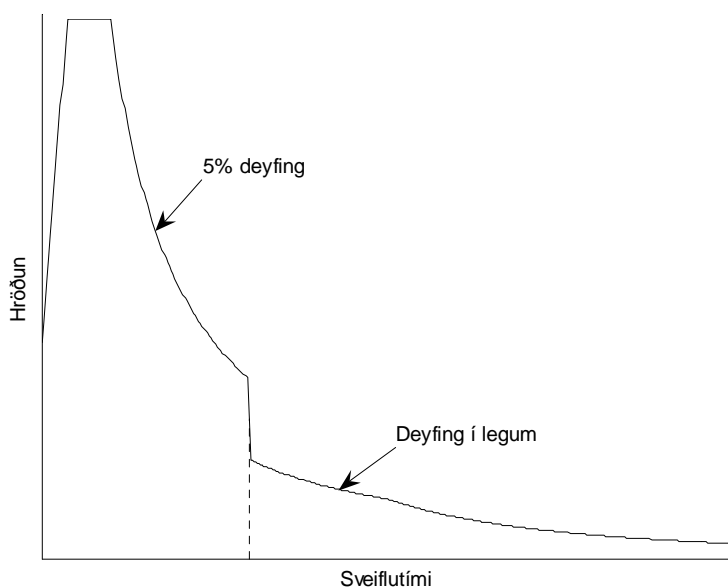
Þar sem ζ er deyfing og ω er sveiflutíðni viðkomandi sveifluforma. Fylgnistuðullinn er 1 ef $\omega_i = \omega_n$ eins og sést á mynd 3.6 og deyfingin er ekki núll en lækkar þegar munur tíðnanna eykst og stefnir á núll. Fylgnistuðullinn eykst einnig með aukinni deyfingu og er núll óháð tíðnum ef deyfingin er núll. Önnur aðferð sem hefur verið notuð er SRSS aðferðin. Hún er eins og CQC aðferðin nema að fylgnistuðullinn er núll nema fyrir $i=n$, það er því ekki gert ráð fyrir neinni fylgni milli ólíkra sveifluforma.



Mynd 3.6 Fylgnistuðull sveifluforma.

Svörunarrófin eru gerð fyrir línuleg einnar frelsisgráðu kerfi og gert er ráð fyrir því að svörun heildarkerfisins sé línuleg þegar svörun sveifluformanna er tekin saman. Til þess að nota svörunarrófsgreiningu fyrir ólínulegt kerfi verður því að nota aðferðir kafla 3.2.3 til þess að lýsa jafngildu línulegu kerfi.

Deyfingin sem er reiknuð með jöfnu 3.27 lýsir hins vegar ekki deyfingunni í burðarvirkinu í heild. Deyfing jarðskjálftaleganna er bundin við færslur í þeim og er því fyrst og fremst í fyrstu sveifluformunum. Sveifluform með hærri tíðni hafa svo deyfingu sem er nær deyfingu mannvirkis án jarðskjálftalega. Því hefur sú leið verið farin að hafa rófið samsett úr rófum með jafngilda deyfingu lega annars vegar og deyfingu mannvirkisins hins vegar (Priestley o.fl. 1996). Dæmi um slíkt samsett róf má sjá á mynd 3.7. Það er erfitt að ákveða við hvaða tíðni rófinu er skipt en til dæmis má nota sveiflutíma mannvirkisins sem einnar frelsisgráðu kerfi sem útgangspunkt og skipta þá rófinu við sveiflutíma sem er örlítið lægri en sá sveiflutími.



Mynd 3.7 Dæmi um samsett svörunarróf.

3.4.3 Ólínuleg greining byggð á sveifluformum (FNA)

Ólínulega sveifluformsgreiningin sem byggir á sveifluformum (e. fast nonlinear analysis), hér eftir nefnd FNA, var þróuð af Edward Wilson með það fyrir augum að reikna burðarvirki þar sem ólínuleg hegðun er bundin við afmarkaða staði. Aðferðin er í flestum tilfellum töluvert hraðvirkari heldur en hefðbundin ólínuleg greining þar sem lausn jafnvægislíkingarinnar er fundin með beinni tegrun skref fyrir skref. Jafnvægislíkingin er (Wilson 2002):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \mathbf{R}(t)_{NL} = \mathbf{R}(t) \quad (3.48)$$

þar sem \mathbf{M} er massafylkið, \mathbf{C} deyfingarfylkið og \mathbf{K} er stífni fylkið, en stífni ólínulegra eininga er undanskilin. $\mathbf{R}(t)$ eru kraftar sem verka á burðarvirkið og $\mathbf{R}(t)_{NL}$ eru kraftar í ólínulegum einingum. Til þess að koma í veg fyrir að línulegi hluti virkisins verði óstöðugur er bætt við jafngildri línulegri stífni ólínulegra eininga:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_e)\mathbf{u}(t) = \mathbf{R}(t) - \mathbf{R}(t)_{NL} + \mathbf{K}_e\mathbf{u}(t) \quad (3.49)$$

Kraftarnir í ólínulegu einingunum eru síðan fundnir með ítrun. Ef að \mathbf{K}_e er vel valið verður liðurinn $-\mathbf{R}(t)_{NL} + \mathbf{K}_e\mathbf{u}(t)$ lítill og samleitnin verður hröð. Sveifluformin sem eru notuð eru reiknuð með stífni fylkinu $(\mathbf{K} + \mathbf{K}_e)$. Það er því ekki nóg að tryggja hraða samleitni, rétt sveifluform verða einnig að vera til staðar til þess að tryggja rétta lausn.

Sambandi ólínulegra formbreytinga og færslna burðarvirkisins er lýst sem:

$$\mathbf{d}(t) = \mathbf{b}\mathbf{u}(t) \quad (3.50)$$

þar sem \mathbf{d} eru ólínulegar formbreytingar og \mathbf{b} er vörpunarfylkið sem getur verið fall af færslum burðarvirkisins. Í kafla 3.4.1 var sýnt að:

$$\Psi^T \mathbf{M} \Psi = \mathbf{I} \quad (3.51)$$

$$\Psi^T \mathbf{K} \Psi = \Omega^2 \quad (3.52)$$

Með því að skilgreina vörpunina:

$$\mathbf{u}(t) = \Phi \mathbf{Y}(t) \quad (3.53)$$

setja inn í jöfnu 3.49 og margfalda í gegn með Ψ^T fást línulegu óháðu jöfnurnar:

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{Y}}(t) + \Lambda\dot{\mathbf{Y}}(t) + \Omega^2\mathbf{Y}(t) = \Phi^T\mathbf{R}(t) - \Phi^T\mathbf{R}(t)_{NL} + \Phi^T\mathbf{b}^T\mathbf{k}_e\mathbf{b}\mathbf{u}(t) \quad (3.54)$$

þar sem Λ er deyfifylkið með $2\zeta_i\omega_i$ á hornalínustökunum og \mathbf{k}_e er jafngilda línulega stífni í kerfishnitum ólínulegra eininga. Jöfnurnar sem þannig fást eru síðan leystar hver af fætur annarri fyrir hvert tímaskref.

Deyfingin sem notuð er í deyfifylkið er deyfing mannvirkis án jarðskjálftalega. Orkuveiting í jarðskjálftalegunum er sjálfkrafa innifalinn í útreikningunum þar sem þeir gera ráð fyrir ólínulegri hegðun þeirra.

3.4.4 Hefðbundin ólínuleg greining (DI)

Hefðbundin ólínuleg greining (e. direct integration), hér eftir nefnd DI, er töluleg lausn á jafnvægislíkingunni, jöfnu 3.48, sem fundin er fyrir hvert tímaskref. Margar aðferðir eru til sem leysa jafnvægislíkinguna en sú aðferð sem er notuð hér er svokölluð Newmark aðferð.

Aðferðirnar eiga það sameiginlegt að vera mjög viðkvæmar fyrir lengd tímaskrefs og frekar á reiknitíma.

Deyfingin sem notuð er í DI er lýst með deyfifylkinu. Hefð er fyrir því að deyfifylkið sé skilgreint sem hlutfall af massa- og stífifylkiunum (Chopra 2001):

$$\mathbf{C} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{K} \quad (3.55)$$

Þetta er kallað Rayleigh deyfing en helsti kostur og ástæða fyrir notkun hennar er að hún er þægileg í útreikningum. Hún lýsir raunverulegri deyfingu hins vegar ekki vel. Hlutfallslega deyfingin er háð sveiflutíðninni og er:

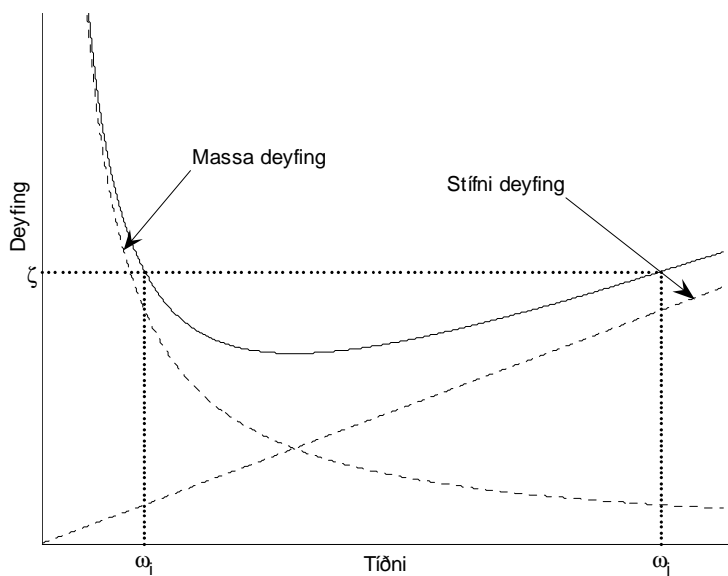
$$\zeta = \frac{a_0}{2\omega} + \frac{a_1}{2} \omega \quad (3.56)$$

Á mynd 3.8 má sjá hvernig Rayleigh deyfing er háð tíðni. Stuðlarnir a_0 og a_1 eru reiknaðir út frá hlutfallslegu deyfingunni sem gefin fyrir einhverjar tvær tíðnir. Lausnir fyrir stuðlana eru:

$$a_0 = \zeta \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (3.57)$$

$$a_1 = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (3.58)$$

Ljóst er að deyfingin getur því aldrei verið jöfn fyrir öll sveifluform sé henni lýst með Rayleigh deyfingu. Mikilvægt er að velja aðra tíðnina nógu lága þannig að fyrstu sveifluformin séu ekki of deyfð. Einnig skal þess gætt að sveifluformin með hæstu tíðnirnar séu ekki yfirdeyfð. En rannsóknir hafa sýnt fram á að yfirdeyfð sveifluform geti leitt til ójafnvægis í lausninni, þ.e. sniðkraftar í líkaninu eru ekki í samræmi við undirstöðukrafta (Carr 2001). Orkueyðing í jarðskjálftalegunum er eins og í FNA sjálfkrafa innifalin í reikningunum.



Mynd 3.8 Rayleigh deyfing.

3.5 Evrópski jarðskjálftastaðallinn

Í Evrópska jarðskjálftastaðlinum eru það fyrst og fremst tveir hlutar sem snúa að þessu verkefni. Í fyrsta hluta staðalsins (prEN 1998-1 2003) er fjallað almennt um jarðskjálfta og greiningaraðferðir, meðal annars um greiningu á burðarvirkjum með jarðskjálftalegum. Annar hlutinn (ENV 1998-2 1994) fjallar svo sérstaklega um jarðskjálftahönnun brúa.

Gert er ráð fyrir að nota megi línuleg líkön eins og þau í kafla 3.2.3 til þess að greina brýr að ákveðnum skilyrðum uppfylltum. Legur eiga að vera gúmmílegur eða aðrar legur með tvílínulegum vinnuferli. Hér er í raun óvíst hvort viðnámslegur falli í seinni flokkinn þrátt fyrir að hægt sé að lýsa þeim með tvílínulegum vinnuferli. Önnur skilyrði sem þurfa að vera uppfyllt eru:

- Virk stífni legukerfisins við hönnunarfærslu sé að minnsta kosti 50% af stífni kerfisins við færslu sem er 20% af hönnunarfærslu.
- Deyfingarhlutfallið sé ekki meira en 30%
- Krafta-færslusamband legukerfisins breytist ekki meira en 10% með hraða álags og lóðréttum kröftum.
- Kraftaukningin í legunum á að vera að minnsta kosti 2,5% af þyngd burðarvirkisins ofan lega þegar færslur aukast úr 50% upp í 100% af hönnunarfærslu.

Reikna má kerfið sem einnar frelsisgráðu kerfi ef lengd mannvirkisins er ekki meiri en 50 m, fjarlægð í skjálftasprungu er meiri en 15 km auk nokkurra fleiri skilyrða. Þetta á ekki við um Óseyrarbrúna. Í þeim tilvikum þar sem ekki má notast við einnar frelsisgráðu kerfi er gert ráð fyrir að notuð sé svörunarrófsgreining eins og í kafla 3.4.2. Í staðlinum er tekið fram að deyfing legukerfisins skuli notuð fyrir viðeigandi sveifluform en fyrir önnur sveifluform skal notuð deyfing óeinangraðs kerfis. Þessu er ekki lýst frekar en það að skipta svörunarrófinu upp eins og lýst hefur verið ætti að skila tilætluðum árangri.

Svörunarróf staðalsins eru af tveimur gerðum sem fara eftir stærð skjálfta á því svæði sem við á. Rófunum er skipt í fjóra hluta sem hafa: Fasta hröðun, fastann hraða og fasta færslu. Fyrsti hlutinn tengir síðan hlutann með föstu hröðunina við grunnhröðun jarðar. Rófið er skalað til eftir grunnhröðun, deyfingu kerfisins og jarðvegsflokki fyrir þann stað sem er til skoðunar.

Ef mannvirkið sem er til skoðunar er langt þarf að taka tillit til mismunahreyfinga undirstaða. Í brúarhlutanum eru gefnar upp vegalengdir þar sem jarðskjálftahreyfing er óháð á milli tveggja staða. Þessi vegalengd er á bilinu 300-600 m eftir jarðvegi og er 600 m fyrir klöpp. Ekki þarf að taka tillit til mismunandi hreyfinga ef lengd mannvirkisins er minni en fyrnefnd vegalengd deilt með 1,5. Óseyrarbrúin er fyrir innan þessi mörk þar sem hún er grunduð á klöpp og viðmiðunarlengdin því 400 m.

Álag svörunarrófanna er skalað til með svokölluðum mikilvægisstuðlum sem taka tillit til mikilvægi mannvirkisins. Fyrir brýr eru þessir flokkar þrír og eru tilgreindir í töflu 3-1.

Jarðskjálftastaðallinn gerir einnig ráð fyrir því að hægt að sé að nota mældar eða tilbúnar tímaraðir til hönnunar sem eru þá skalaðar til. Geta má þess að í hluta eitt er lýst einni kvörðunaraðferð og svo annarri í hluta tvö, þ.e. brúarhlutanum. Nokkur munur er á þessum tveimur aðferðum.

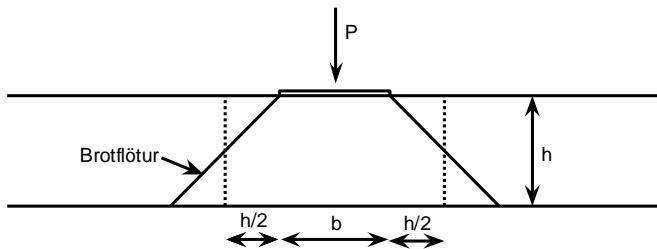
Tafla 3-1 Mikilvægisstuðlar jarðskjálftastaðalsins.

Mikilvægi	Flokkur	Mikilvægisstuðull
Yfir meðallagi	III	1,3
Í meðallagi	II	1,0
Undir meðallagi	I	0,85

3.6 Brotstyrkur

3.6.1 Hliðarveggur

Hliðarveggur landstöplanna brotnaði í svokölluðu skúfbroti (e. shear failure) þar sem brotið liggur u.þ.b. 45° skáhalt í gegnum þversniðið. Brotsvæðið sem sýnt er á mynd 3.9 umliggur álagssvæðið en brotstyrkurinn er reiknaður á sama hátt óháð því hvort sú sé raunin eða ekki.



Mynd 3.9 Skúfbrot.

Skúfstyrkurinn vegna stöðuálags má finna sem (Nielsen 1999):

$$P = \tau_u u h \quad (3.59)$$

þar sem τ_u er meðalskúfstyrkur steypunnar, u er ummál brotflatarins og h er þykkt þversniðsins. Þegar meðalfjarlægð brotflatarins er $h/2$ frá álagssvæðinu hefur skúfstyrkurinn verið fundinn með tilraunum sem:

$$\tau_u = 0,08 \nu f_c \quad (3.60)$$

þar sem f_c er brotstyrkur steypu og ν er gefið sem:

$$\nu = \frac{1,47}{\sqrt{f_c}} \left(1 + \frac{0,48}{\sqrt{h}} \right) (1 + 0,125r) \leq 1 \quad (3.61)$$

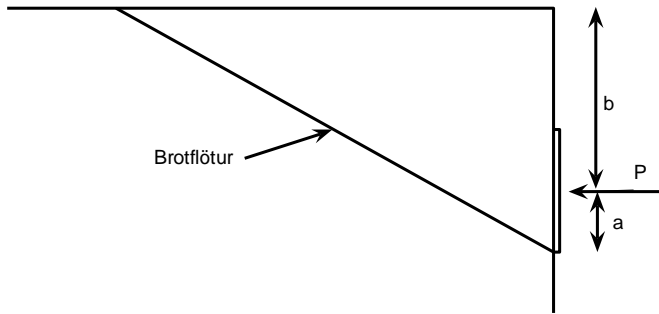
Brotspenna steypunnar er hér í MPa og þykkt þversniðsins er í metrum. r er hlutfall járna í togi og er gefið í %. Brotstyrkurinn er að öðru leyti óháður járnþvingu sem er hornrétt á álagið. Sú járnþvingun hefur þó áhrif eftir að veggurinn hefur brotnað og formbreytingar verða miklar.

3.6.2 Hliðarstopparar

Ef að álag er nálægt enda á vegg getur hornið brotnað af veggnum eins og sést á mynd 3.10. Efri marka lausn á brotstyrknum er (Nielsen 1999):

$$P = \alpha(a + b)tf_c \quad (3.62)$$

þar sem t er þykkt veggjarins og α er stuðull sem tekur tillit til hlutfalls a og b . Ef álagssvæðið nær út að brún veggjarins, og a þar með jafnt b , er α jafnt og einn.



Mynd 3.10 Horn brotnar af hliðarstoppurum.

Stífni innspennts bita þar sem skúfformbreytingar eru ráðandi, eins og í hliðarstoppurum á millistöplum, er (Megson 2000):

$$k = \frac{Ght}{\beta L} \quad (3.63)$$

þar sem β er formstuðull og er fyrir rétthyrnd þversnið 5/6. Lengd bitans er L .

3.6.3 Brúardekk

Vægisþol uppspennts bita má reikna á tvo vegu. Annars vegar má líta á kraftinn í spenniköplum sem ytra álag og hins vegar sem innri mótstöðu (Sørensen 2005). Þegar allir spennikaplarnir eru í togsvæðinu er litið á krafta í þeim sem innri mótstöðu. Þá er hægt að reikna vægisþolið með því að nota kraftajafnvægi. Út frá gefnu streituástandi við brot á mynd 3.11 má finna að krafturinn í þrýstisvæði steypu er:

$$T_c = 0,8 f_c \alpha bd \quad (3.64)$$

þar sem f_c er brotspenna steypu. Vægisarmurinn er:

$$z = (1 - 0,4\alpha)d \quad (3.65)$$

Vægisþolið er margfeldi kraftsins í þrýstisvæðinu og vægisarmsins:

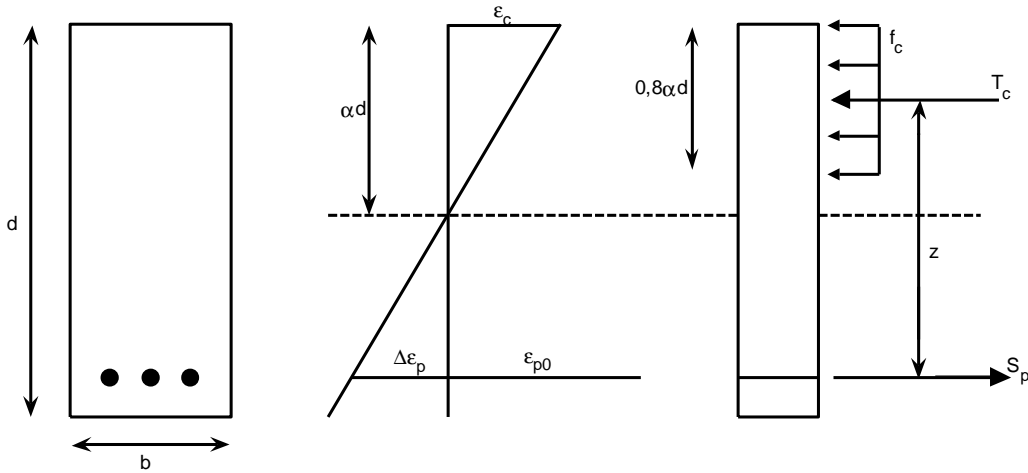
$$M_c = T_c z = 0,8(1 - 0,4\alpha)\alpha bd^2 f_c \quad (3.66)$$

Hæð þrýstisvæðisins er óþekkt en hana má finna þar sem kraftar þversniðsins eru í jafnvægi. Ef þversniðið er ekki yfirjárnað og stálið því komið á flot áður en brotstreitu steypunnar er náð gildir:

$$T_c = S_p = f_p A_p \quad (3.67)$$

Þar sem f_p er flotspenna spennistálsins og A_p er flatarmál þess. Með jöfnum 3.64 og 3.67 fæst hæðin sem:

$$\alpha = \frac{f_p A_p}{0,8 f_c b d} \quad (3.68)$$



Mynd 3.11 Streitur og spennur í uppspenntum bita.

Þegar litið er á uppspennukraftana sem ytra álag er þversniðið undir bæði þrýsti- og vægisáraun þá verður að finna samband áslægs krafts og vægisstyrk. Það er gert með því að gefa ákveðið streituástand við brot. Streitan í þrýstibrún er þá jöfn brotstreitu steypunnar en streitubreyting stálsins er höfð á milli flot- og brotstreitu þess. Krafturinn og vægið eru síðan reiknuð út fyrir streituástandið og þá fæst einn punktur á vægis- þrýsti ferlinum. Haldið er áfram þar til punktar sitthvoru megin við þann áslæga kraft sem verkar á þversniðið eru fundnir. Krafturinn í þrýstisvæðinu er reiknaður samkvæmt jöfnu 3.64 þar sem hæð svæðisins er:

$$\alpha = \frac{\epsilon_{cu}}{\Delta\epsilon_p + \epsilon_{cu}} \quad (3.69)$$

ϵ_{cu} er brotstreita steypu en $\Delta\epsilon_p$ er streitubreytingin í stálinu vegna ytra álags. Krafturinn í stálinu er reiknaður útfrá streitunni sem:

$$T_p = \Delta\epsilon_p E_s A_p \quad (3.70)$$

þar sem E_s er fjaðurstuðull stálsins.

4 ÚTREIKNINGAR

Í þessum kafla verður jarðskjálftaálagið skilgreint, líkaninu lýst og svörun brúarinnar reiknuð. Allar þrjár greiningaraðferðirnar verða notaðar og niðurstöður þeirra bornar saman.

4.1 Tímaraðir

Jarðskjálftamælingar frá þeim þremur mælistöðvum sem eru næst brúnni eru notaðar í þessu verkefni, tvær frá Selfossi og ein frá Hveragerði. Engar hröðunarmælingar eru til staðar frá syðri enda sprungunnar s.s. frá Eyrarbakka, Stokkseyri eða brúnni sjálfri. Allir jarðskjálftamælarnir eru þrjáa tímaraðirnar eru því tveir láréttir þættir og einn lóðréttur. Mælarnir eru staðsettir í byggingum grunduðum á klöpp og að því leyti eiga mælingarnar vel við brúna sem einnig er grunduð á klöpp. Tímaraðirnar voru sóttar í evrópska jarðskjálftagagnagrunninn ISES (Ambraseys o.fl. 2001)

Í töflu 4-1 má sjá fjarlægðir mælistöðvanna frá skjálftamiðjunni. Miðað er við skjálftamiðjuna sem fengin er með aðhvarfi líkans sem lýsir grunnhröðun sem falli af fjarlægð frá skjálftamiðju (Ragnar Sigbjörnsson o.fl. 2008). Eðlilegt þótti að miða við þá skjálftamiðju þar sem tilgangurinn með því að bera saman fjarlægðirnar er að meta hvaða mæling á best við aðstæður við Óseyrarbrú.

Ef miðað er við fjarlægðirnar er það mælingin úr sjúkrahúsinu á Selfossi sem kemst næst aðstæðum á Óseyrarbrúnni. Einnig sést á mynd 2.3 að fjarlægð frá Selfossi og Óseyrarbrúnni að jarðskjálftasprungunum er ekki ósvipuð. Hins vegar eru áhrif jarðskjálfta yfirleitt meiri í stefnu jarðskjálftasprungunnar heldur en þvert á hana (Ragnar Sigbjörnsson o.fl. 2007). Því er erfitt að segja hvaða tímaröð á best við og þá hversu vel.

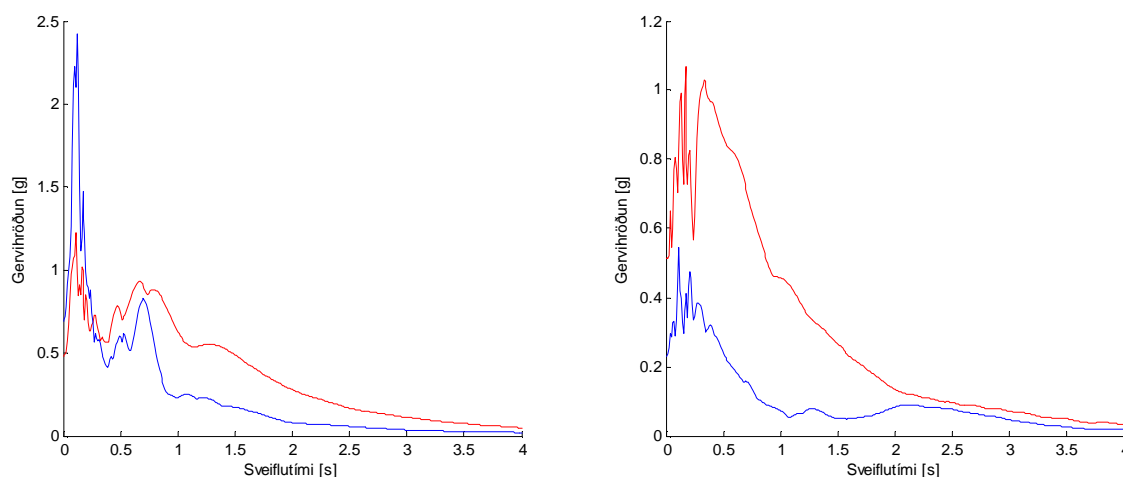
Tafla 4-1 Fjarlægðir frá skjálftamiðju.

Staður	Fjarlægð frá skjálftamiðju [km]
Hvergerði	3,5
Selfoss ráðhús	8,0
Selfoss sjúkrahús	8,5
Óseyrarbrú	12

Láréttu þættir tímaraðanna eru ólíkir og hafa því mismunandi áhrif á burðarvirki. Það er háð því hvaðan mælingarnar eru hvaða þættir eru verstir. Mælingarnar eru ekki gerðar í grennd við brúna og afstaða Óseyrarbrúarinnar til upptaka skjálftans er önnur en Hveragerðis og Selfoss. Það er því erfitt að meta hvaða stefnuþættir ættu best við Óseyrarbrúna og því er erfitt að ákvarða hvaða stefnur á að nota úr mælingunum.

Farin var sú leið að finna verstu stefnur hvernar tímaraðar út frá svörunarrófum raðanna. Með verstu stefnu er átt við þá stefnu sem gefur orkuríkustu hreyfinguna og því mestu áraunina á viðkomandi mannvirki. Hreyfiorka stefnuþátta dreifist þá á mismunandi hátt á milli tíðna sem endurspeglast í svörunarrófum þeirra og því er það háð grunneigintíðnum mannvirkja hvaða stefnuþáttur er verstur. Svörunarróf fyrir stefnur með 10° mun voru borin saman sjónrænt og þannig var versta stefnan fundin. Tvö deyfihlutföll voru prófuð og höfðu þau lítil áhrif á val á verstu stefnu.

Á mynd 4.1 er samanburður á verstu og bestu rófum frá Hveragerði og Selfossi. Athygli vekur að þátturinn sem er verstur fyrir sveiflutíma undir 0,4 s er bestur fyrir sveiflutíma yfir 0,4 s. Þar sem ráðandi sveifluform brúarinnar hafa sveiflutíma um og yfir 1 s er ekki ástæða til þess að skoða þetta nánar. Mesta grunnhröðun tímaraðanna er frá 19% af þyngdarhröðun jarðar fyrir betri þátt sjúkrahúsaðarinnar og upp í 69% fyrir betri þátt Hveragerðisraðarinnar. Verri þættir tímaraðanna hafa allir grunnhröðun í kringum 50%.



Mynd 4.1 Samanburður á verstu og bestu þáttum svörunarrófa fyrir Hveragerði vinstra megin og Sjúkrahúsið á Selfossi hægra megin. Svörunarrófin eru reiknuð fyrir 5% deyfihlutfall.

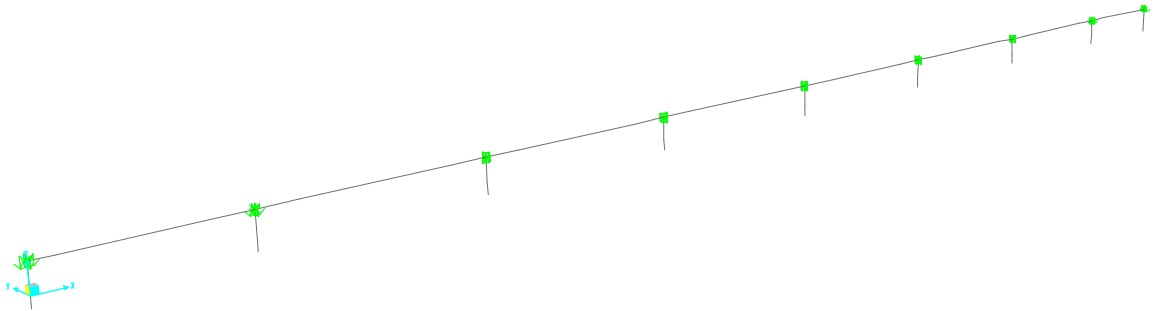
Verstu þættir tímaraðanna frá Hveragerði og Selfossi stefna í u.þ.b. austur vestur. Óvissan á stefnunum er nokkur þar sem rófin voru borin saman fyrir 10° stefnumun. Auk þess var ekki alltaf ljóst hvaða róf var verst þar sem róf sem var verra fyrir 1,0 s var það ekki endilega fyrir 1,5 s.

4.2 Líkanið

Líkani brúarinnar var stillt upp í einingarforritinu SAP2000. Ákveðið var að notast við bitaeiningar frekar en kubbaeiningar. Bitaeiningar eru umtalsvert léttari í öllum reikningum auk þess sem auðveldara er að stilla upp líkaninu og vinna úr niðurstöðum. Einnig má ætla að munur verði lítill á niðurstöðum en við jarðskjálftagreiningu á brú yfir Brúará kom í ljós að lítill munur er á notkun bitaeininga og kubbaeininga (Jón Snæbjörnsson og Bjarni Bessason 2006). Tengieiningar voru notaðar fyrir jarðskjálftalegur, togstangir og stoppara. Tengieiningarnar geta lýst ólínulegri hegðun og bjóða upp á ólínulega greiningu með FNA.

4.2.1 Brúardekkið og undirstöður

Þrjú mismunandi þversnið voru notuð til þess að lýsa brúardekkinu. Tvö þversnið voru notuð fyrir millistöplana og eitt fyrir landstöpla. Eiginleikar þversniðanna voru reiknaðir í SAP2000. Fjöldi eininga er 318 og hnútpunkta 319. Nánar tiltekið voru endahöf mynduð með 23 einingum, önnur höf með 26 einingum og hver stöpull með 10 einingum. Fjöldinn réðst af því að ef mikið færri einingar voru notaðar varð eiginsveiflugreiningin óstöðug og fleiri einingar skiluðu sér ekki í öðrum eða betri niðurstöðum.



Mynd 4.2 Brúarlíkanið í SAP2000 grænu punktarnir eru tengieiningar.

Gert var ráð fyrir því að klöpp væri allstaðar á sama dýpi og var hæð stöpla höfð um 7 m.

Steypugæðin fyrir brúna voru gefin upp sem brotþolsflokkur. Þeim var breytt yfir í jafngildan flokk í evrópska steypustaðlinum (EC2) og meðalfjaðurstuðullinn miðaður við staðalinn.

Tafla 4-2 Steypugæði (Eibl 1995).

Byggingarhluti	Brotþolsflokkur	Flokkur skv. EC2	Fjaðurstuðull [MPa]
Landstöplar	S40	C35/45	33500
Millistöplar	S35	C30/37	32000
Brúardekk	S40	C35/45	33500

4.2.2 Blýgúmmílegur

Blýgúmmílegurnar sem eru notaðar í brúna eru tilbúnar gúmmílegur sem var breytt í blýgúmmílegur hér á landi. Eiginleikar leganna eru háðir stærð þeirra sem er lýst í töflu 4-3. Lárétt stífni og flotstyrkur ræðst af skúfstuðli gúmmís sem er 1 MPa (Gleit- und Lagertechnik) og flotspennu blýs sem er 8 MPa (Bjarni Bessason og Einar Hafliðason 2004). Lóðrétt stífni er háð þjöppunarstuðli gúmmís sem er um 2000 MPa (Skinner o.fl. 1993).

Tafla 4-3 Kennistærðir blýgúmmílegu (Gleit- und Lagertechnik).

Lengd	500 mm	Þykkt eins gúmmílags	11 mm
Breidd	400 mm	Fjöldi gúmmíлага	8
Hæð	156 mm	Þvermál blýkjarna	125 mm

Eiginleikar blýgúmmílegunnar voru reiknaðir samkvæmt aðferðum kafla 3.2.1. Afifræðilegir eiginleikar einnar legu eru sýndir í töflu 4-4 en útrá þeim má finna flotfærslu legunnar sem er 4 mm.

Tafla 4-4 Afifræðilegir eiginleikar blýgúmmílegu.

Upphafsstífni, K_u	24,74 MN/m	Flotstyrkur, Q_d	98,18 kN
Stífni eftir flot, K_d	2,133 MN/m	Lóðrétt stífni, K_v	1000 MN/m

4.2.3 Viðnámslegur

Viðnámslegurnar eru gúmmílegur sem liggja að stálplötu, snertiflötur gúmmísins við stálplötuna er teflonhúðaður. Ekki fengust nákvæmar tæknilegar upplýsingar um viðnámslegurnar. Miðað var við að hlutfall gúmmíþykktar og hæðar legunnar væri það sama og fyrir blýgúmmílegurnar þó svo að það sé ekki endilega raunin. Kennistærðir gúmmíleganna og afifræðilega eiginleika miðað við gefnar forsendur má sjá í töflu 4-5.

Tafla 4-5 Kennistærðir og afifræðilegir eiginleikar viðnámslega.

	Lengd	Breidd	Hæð	Heildarþykkt gúmmíлага	Lárétt stífni	Lóðrétt stífni
	mm	mm	mm	mm	MN/m	MN/m
Landstöpull	400	300	118	67	1,8	550
Millistöpull	600	450	84	47	5,7	3300

Viðnámsstuðlarnir eru háðir þrýstingi og eiginleikum snertiflatanna. Þrýstingurinn er þekktur en eiginleikar snertiflatanna ekki. Notaðar voru tilraunaniðurstöður til þess að ákvarða eiginleika viðnámsleganna (Constantinou o.fl. 1990). Fjórar mismunandi teflon gerðir voru notaðar í þessari tilraun og notast var við meðaltal viðnámsstuðla fyrir þessar fjórar gerðir en hágildi og lágildi eru einnig skráð í töflu 4-6. Einnig er stuðullinn sem lýsir því hversu hratt viðnámsstuðullinn breytist með hraða, a , skráður í töflunni en eftir því sem a er stærri því næmari er viðnámsstuðullinn fyrir breytingum í hraða.

Tafla 4-6 Viðnámsstuðlar viðnámslega.

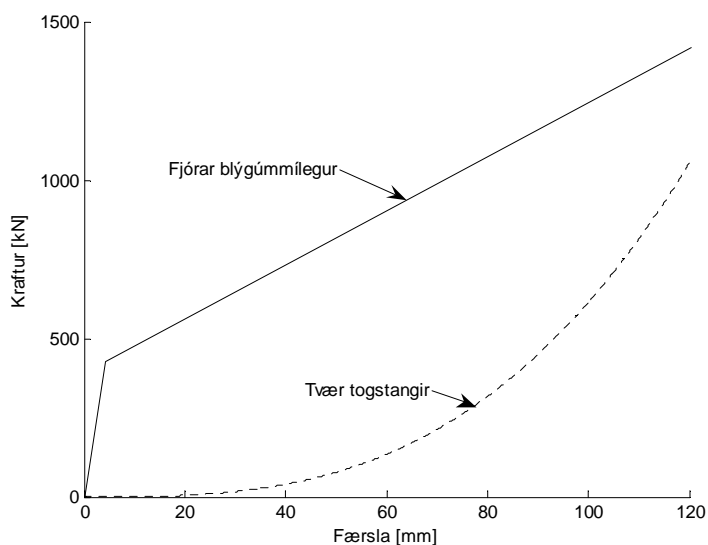
	Hágildi	Meðaltal	Lágildi
f_{\max} [%]	14,6	13,5	11,9
Landstöpull f_{\min} [%]	5,5	3,7	2,4
a [s/m]	26	23	18
f_{\max} [%]	12,1	11,6	10,1
Millistöpull f_{\min} [%]	5,2	3,4	2,0
a [s/m]	26	24	23

Samkvæmt viðnámsstuðlunum og stífni gúmmíleganna verður formbreyting gúmmísins 13 mm áður en færslur verða á landstöpli og 17 mm á millistöpli.

4.2.4 Togstangir

Togstangirnar eru lóðréttar stangir sem tengja brúardekkið við millistöpla að undanskildum fyrsta millistöpli. SAP2000 býður ekki upp á að kraftar í ólínulegum tengieiningum séu háðir hreyfingum í aðrar stefnur en þeir virka í. Láréttur kraftur í togtöngunum er hins vegar háður láréttum hreyfingum bæði samsíða og hornrétt á kraftinn. Í SAP2000 þarf að líta fram hjá því þegar togstangirnar eru settar í líkanið. Kraftur í x stefnu er því óháður færslu í y stefnu og öfugt. Einnig er litið fram hjá því að endar eru innsteyptir enda eru kraftar vegna endavægis þegar flotliðir myndast í endum innan við 15 kN.

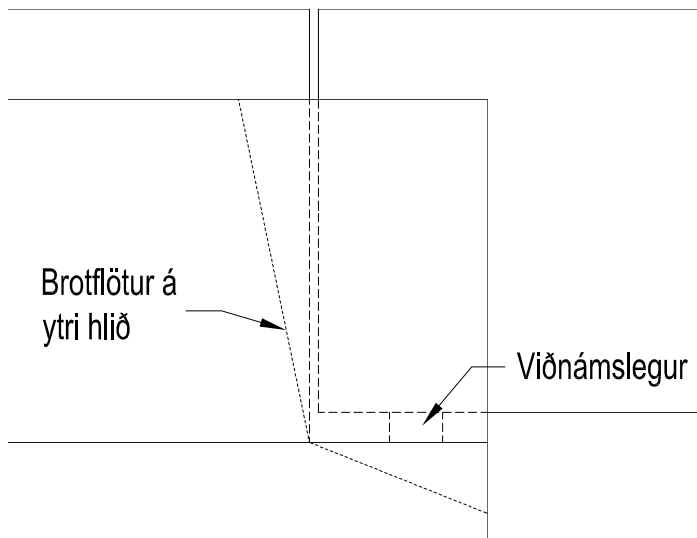
Á mynd 4.3 sést að áhrif togstanganna eru lítil þegar færslur eru litlar. Við 70 mm, sem er bilið að hliðarstoppurum, er kraftur í togtöngum rétt rúmlega 20% af krafti í blýgúmmílegum. Reyndar er ferillinn ekki réttur þar sem stálið flýtur við 35 mm lárétta færslu. Kraftarnir vaxa reyndar áfram, þar sem hornið sem togstangirnar mynda við lárétta flötinn minnkar, en ekki jafn mikið og sýnt er. Í SAP2000 er ekki hægt að líkja eftir jafn flóknum plastískum vinnuferli og þarf til að lýsa togtöngunum rétt og því var litið fram hjá floti í stáli.



Mynd 4.3 Samanburður á stífni blýgúmmílega og togstanga.

4.2.5 Hliðarveggir og stopparar

Stífni hliðarveggs á landstöplunum var metin í SAP2000 með því að stilla upp einingalíkani af veggnum. Skeljaeiningar voru notaðar sem taka bæði tillit til skúf- og vægisformbreytinga. Erfitt er að meta álagsmiðjuna á veggnum án þess að stilla upp flóknu kubbalíkani af brúardekkinu og veggnum. Prófað var að dreifa álaginu jafnt yfir snertiflöt dekks og veggs og einnig að setja álagið á neðri og innri fjórðung snertiflatarins. Stífnin sem þannig fékkst var 7,4 GN/m þegar álagið var jafndreift og 21 GN/m þegar álagið var einungis á fjórðungi snertiflatarins.



Mynd 4.4 Hliðarveggur landstöplum.

Stífni hliðarstoppara á millistöplum var reiknuð eins og stífni hárra og stuttra innspenntra bita. Samkvæmt jöfnu 3.63 fæst að stífnin er 32 GN/m.

4.3 Brotstyrkur

Brotstyrkurinn er reiknaður samkvæmt meðalstyrk steypunnar en ekki kenni- eða hönnunarstyrk hennar. Gert er ráð fyrir því að staðalfrávikið sé 10% af meðalgildinu, þ.e. að dreifnistuðullinn væri 0,1. Meðalstyrkurinn er reiknaður út frá kennigildi brotstyrks, sem í EC2 er skilgreindur við 5% mörkin.

Tafla 4-7 Meðalbrotstyrkur steypu.

Brotþolsflokkur	Flokkur skv. EC2	Meðal brotstyrkur [MPa]
S35	C30/37	36
S40	C35/45	42

Gengið var útfrá því að horn hliðarstoppa á millistöplum brotni af og brotstyrkurinn metinn útfrá því sem 3200 kN. Í aðferðinni sem var kynnt í kafla 3.6.2 er litið fram hjá járnbindingu í stoppurunum svo að styrkurinn gæti verið meiri.

Hliðarveggir landstöpla brotna í skúfbroti. Brotstyrkurinn ræðst meðal annars af lengd brotferilsins sem er sýndur á mynd 4.4. Lengdin var áætluð 3 m útfrá teikningum og ljósmyndum af skemmdum. Brotstyrkur hliðarveggjanna er 1700 kN

Vægisþol brúardekksins var reiknað á tveimur stöðum um bæði lárétta og lóðrétta ásinn: Yfir undirstöðum þar sem þversnið dekkisins er stærst og á miðju hafi þar sem þversniðið er minnst.

Vægisþol um lárétta ásinn var reiknað með því að líta á spennikaplana sem innri mótstöðu þar sem þeir liggja þá í togsvæði þversniðsins. Þá er hægt að reikna vægisþolið beint út. Um lóðrétta ásinn var litið svo á að spennukaplarnir væru ytra álag þar sem þeir liggja þá bæði í tog- og þrýstisvæði bitans sjá nánar kafla 3.6.3. Vægisþolið er sýnt í töflu 4-8.

Tafla 4-8 Vægisþol brúardekksins.

	Vægisþol um lóðrétta ásinn [MNm]	Vægisþol um lárétta ásinn [MNm]
Á miðju hafi	110	55
Yfir undirstöðum	190	100

Vægisþol á hafi um lóðrétta ásinn sýnir neðri mörk þess þar sem spennikaplarnir eru alltaf á sama stað í lárétta planinu og þversnið dekkisins er minnst þar. Kaplarnir fylgja hins vegar vægisferlinum um lárétta ásinn vegna stöðuálags og styrkurinn er því minnstur nálægt vægisnúllpunktinum. Vægisþol brúardekksins er því minni við vægisnúllpunktinn heldur en gefið er upp í töflunni fyrir mitt haf.

4.4 Sveifluformsgreining

Samkvæmt evrópska jarðskjálftastaðlinum á summa formmassa sem notaðir eru við greiningu að vera meiri en 90% af heildar massa burðarvirkisins (prEN 1998-1 2003). Þessu markmiði þarf að vera náð fyrir allar stefnur. Það var því notað sem útgangspunktur við val á fjölda sveifluforma.

Eiginsveiflugreiningin finnur sveifluformin eftir röð eigintíðna og heldur áfram að leita að sveifluformum í ákveðna stefnu þó svo að markmiðum um formmassann sé náð. Þetta veldur því að illa gekk að finna nægjanlega mörg lóðrétt sveifluform fyrir brúna. Að auki var bætt við sveifluformi byggt á þyngd brúarinnar til þess að auðvelda útreikninga á svörun vegna stöðuálags eins og lýst var í kafla 3.4.1. En án þessa sveifluforms var svörun vegna eiginþyngdar vitlaust reiknuð.

Ritz vigrarnir eru fundir út frá álagi sem sett er á mannvirkið. Notuð voru þrjú álagstílfelli sem voru einingarhröðun í þrjár stefnur. Hægt er að stýra því hversu mörg sveifluform eru fundin fyrir hvert upphafsálag og því hægt að mæta kröfum um formmassa í hverja stefnu fyrir sig.

Í töflu 4-9 er borin saman fjöldi sveifluforma sem þarf til þess að ná kröfum um 90% formmassa. Þó svo að fjöldinn sé að einhverju leyti háður virkri stífni lega þá gefur þessi fjöldi ágætis hugmynd um stærðargráðuna. Eiginsveiflugreiningin var keyrð fyrir 400 sveifluform og þá var formmassinn í lóðréttu stefnu aðeins 86%. Sú keyrsla tók tæpar fjórar mínútur. Ritz greiningin fyrir þau 80 sveifluform sem þurfti tók 4 sekúndur.

Tafla 4-9 Fjöldi sveifluforma sem þarf til þess að ná 90 % formmassa. Fjöldi Ritz vigranna er fjöldi vigra í hverja stefnu en eiginsveifluformin er heildarfjöldinn í allar stefnur.

	Eiginsveifluform	Ritz vigrar
Langátt	290	10
Þverátt	295	20
Lóðrétt	-	50

Það er því ljóst að þegar horft er til formmassa og reiknitíma hefur Ritz greiningin vinninginn.

Ástæða þess hve formmassinn er lengi upp fyrir 90% gæti verið að stöplar brúarinnar taka lítinn þátt í hreyfingum hennar. Það má því deila um hvort að nauðsynlegt sé fyrir þetta tilfelli að ná 90% formmassa þar sem áhuginn er fyrst og fremst á láréttum hreyfingum brúardekksins. Prófað var að reikna svörun brúarinnar með 80 eiginsveifluformum og 80 Ritz vigrum. Munurinn var óverulegur sem bendir til þess að það séu fyrstu sveifluformin sem eru ráðandi og óþarfi sé að ná 90% formmassa. Hins vegar er Ritz greiningin umtalsvert hraðvirkari og því var valið að nota hana.

4.5 Töluleg greining

Líkan brúarinnar var keyrt fyrir sex álagstílfelli. Verstu og bestu þættir hvarrar mælistöðvar voru látnir verka þvert á brúna. Allir þrír þættir hvarrar mælistöðvar voru keyrðir samtímis á líkanið. Þegar versti þátturinn var settur þvert á brúna var betri þátturinn settur í langátt brúarinnar og öfugt. Eiginþyngd brúarinnar var einnig ávallt tekinn með í útreikninganna til þess að viðnámslegurnar væru virkar.

Hreyfingar í hornréttar stefnur geta haft áhrif hver á aðra vegna viðnámsleganna því bæði láréttur afstæður hraði brúardekksins og stöplanna og sú þyngd sem hvílir á legunum hefur áhrif á mótstöðu þeirra. Það kom svo reyndar í ljós að það hafði lítil áhrif hvort allir þættirnir væru keyrðir samhliða eða ekki.

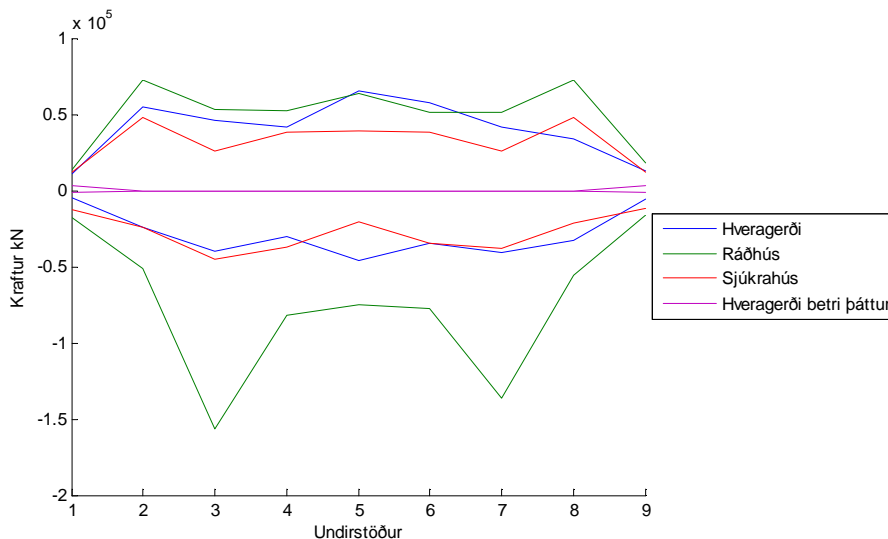
4.5.1 Jarðskjálftagreining á Óseyrarbrú

Þegar snerting á sér stað við hliðarstoppara varir hún aðeins stutta stund, því þurfti að keyra líkanið með mjög stuttum tímaskrefum til þess að finna hágildi krafta í stoppurunum. Tímaskrefið var valið $5 \cdot 10^{-4}$ s sem gerir 20000 tímaskref fyrir 10 s tímaröð. FNA greiningin var notuð þar sem hún er umtalsvert hraðvirkari, eða innan við 10 mínútur fyrir eina tímaröð, en DI tók fjóra tíma. Auk þess hefur verið bent á að notkun á Rayleigh deyfingu, sem er notuð í DI, henti ekki við högggreiningar eins og þessa (Wilson 2002).

Það kom líka í ljós þegar Hvergerðisröðin var keyrð með DI að kraftar í hliðarstoppurum voru um 50% af kröftum úr FNA greiningunni. Þó er ekki hægt að útiloka að munurinn sé tilkominn vegna annarra þátta.

Óstöðugleiki kom fram í FNA greiningunni eftir árekstur stopparanna sem lýsti sér í því að hreyfing brúarinnar var ekki samhverf um miðju eins og sjá má á mynd 4.5. Munurinn var hins vegar óverulegur þegar litið er á færslur brúardekksins og lítill þegar litið er til krafta í stoppurum. Það var helst fyrir Hveragerðisröðina þar sem munur á kröftum var mikill eða allt að 25% eftir því hvor endinn er skoðaður. Þessi óstöðugleiki virðist vera vegna þess hve stífir stoppararnir eru og því mikill munur á stífni virkisins fyrir og eftir að snerting verður í stoppurunum. Það er þekkt að vandamál geti komið upp ef stífni stoppara er of mikil og varað við því í SAP2000 (Computer and Structures 2007). Prófað var að minnka stífnina niður í 1000 MN/m á öllum stoppurum og þá kom enginn óstöðugleiki fram sem styður þá kenningu að stífnin sé vandamálið. Samt sem áður var líkanið keyrt með reiknaðri stífni stoppara enda er áhugi á að skoða krafta í stoppurunum sem eru háðir stífni þeirra.

Skemmst er frá því að segja að kraftar í öllum stoppurum, þ.e. hliðarveggjum og hliðarstoppurum, fara yfir brotstyrk þeirra, eins og sést á mynd 4.5, þegar verstu þættir tímaraðanna eru keyrðir á brúna. Kraftarnir verða 10-20 faldur brotstyrkur og á það við um hreyfingar í báðar áttir. Hins vegar verður að athuga það að stoppararnir í tölvulíkaninu brotna ekki heldur eru þeir línulega fjaðrandi. Engin orkueyðing á sér því stað við brotið og því má gera ráð fyrir að brúardekkið fari hraðar og lengra til baka heldur en ella. Í raun má segja að niðurstöðurnar séu ómarktækar eftir að brotmarki er náð.

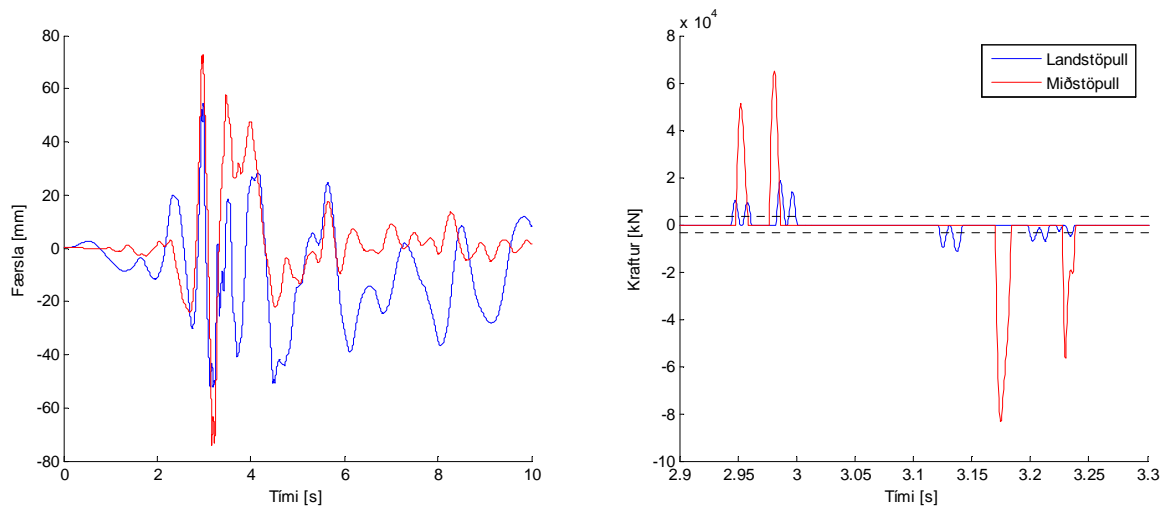


Mynd 4.5 Há- og lággildi krafta í stoppurum. Stífni hliðarveggja er 7400 MN/m.

Á mynd 4.6 sést sá hluti tímaraðarinnar þar sem snerting á sér stað í stoppurum. Dekkið virðist skoppa á stoppurum en ljóst er að stoppararnir eru löngu brotnir þegar sú hegðun kemur fram og verður því að skoðast í því ljósi.

Stífni hliðarveggjanna er ekki ákvörðuð með mikilli nákvæmni. Áhrif þess að breyta stífninni á því bili sem búið var að áætla, 7400-21000 MN/m, hefur ekki mikil áhrif á krafta í stoppurum. Mestu kraftarnir eru að breytast 10-20% en hins vegar eru áhrifin ekki bundin við hliðarvegginn heldur koma fram á öllum stoppurunum. Munur á hreyfingum

endanna jókst með aukinni stífni hliðarveggja og kemur í raun ekki á óvart þar sem þessi mikla stífni er orsök óstöðugleikans.

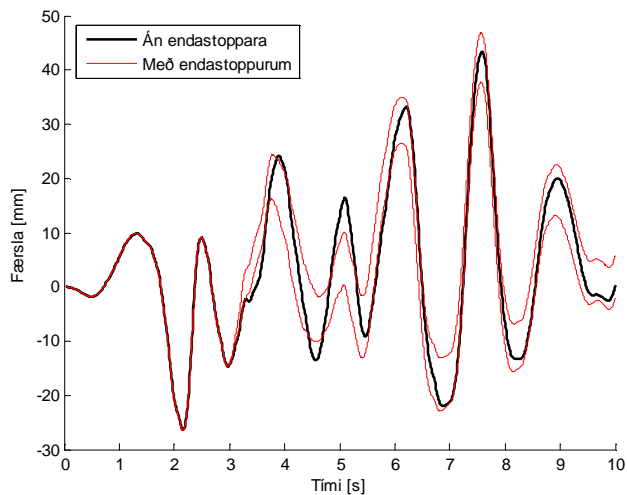


Mynd 4.6 Færslur brúardekks og kraftar í stoppurum fyrir versta þátt sjúkrahúsráðarinnar. Brotstyrkur stoppara á millistöplum er merktur með punktalínunum.

Þegar betri þættir tímaráðanna voru keyrðir þvert á brúna rakst það aðeins í stoppara fyrir Hveragerðistímaröðina. Snertingin var aðeins við hliðarveggi en kraftarnir í hliðarveggjunum eru mjög háðir því hvaða stífni er notuð á þá og tvöfölduðust kraftarnir við það auka stífnina úr 7400 MN/m í 21000 MN/m. Þegar minni stífnin var notuð fór krafturinn einungis yfir brotmörkin á annarri hlið brúarinnar en þegar stífnin var aukin brotnuðu veggirnir báðum megin.

Endar brúardekksins rekast ekki í landstöpulinn þegar bestu þættir tímaráðanna verka í langátt brúarinnar. Færslurnar fyrir Selfoss ráðirnar eru þá einungis 17-30 mm en eru mest um 40 mm fyrir Hveragerðisröðina. Þegar verstu þættirnir verka í langátt brúarinnar rekst hún hins vegar utan í beggja vegna fyrir allar tímaráðirnar. Það má því ímynda sér að versti þáttur tímaráðanna hafi hvorki verkað þvert á dekkið né samsíða því þar sem í raunveruleikanum komu fram skemmdir vegna hreyfinga í báðar áttir. Kraftarnir í endunum voru í öllum tilfellum mun meiri í öðrum endanum. Það kom í ljós, og þarf ekki að koma á óvart sé litið á sveifluform brúarinnar, að dekkið hreyfðist sem stíf eining í langstefnu brúarinnar.

Þegar endar brúardekksins rákust í landstöpla í langátt hætti brúin að hreyfast samhverft í þverátt brúardekksins. Einnig kom í ljós að munur varð á mestu færslum í þverátt eftir því hvort endastopparar væru í líkani eða ekki. Á mynd 4.7 má sjá hvernig þessi munur kemur fram fyrir sjúkrahúsröðina. Mesti munur var í kringum 10% svo ljóst er að það þarf að líta niðurstöðurnar gagnrýnum augum þegar stopparar með mikla stífni eru notaðir í líkaninu. Frávikið er hins vegar ekki það mikið að ekki sé hægt að treysta niðurstöðunum sem koma úr FNA greiningunni á líkani með stoppurum.



Mynd 4.7 Færslur brúarenda í þverátt í líkani með og án endastoppa sem hindra færslur í langátt.

Lóðréttar hreyfingar brúarinnar eru augljóslega óháðar því hvernig láréttu tímaraðirnar snúa. Hreyfingar brúardekksins eru litlar yfir undirstöðum og eru í raun einnig litlar á miðjum höfum eins og sést í töflu 4-10. Hreyfingarnar voru skoðaðar á hafi við enda og á fjórða hafi og voru hreyfingarnar meiri á því síðarnefnda. Taflan sýnir jafnframt hröðun á miðju hafi. Það er athyglisvert að hún fer yfir eitt g sem þýðir að stífir hlutir á brú myndu kastast upp. Hröðunin gæti hugsanlega truflað umferð á brúnni þegar jarðskjálfti riði yfir.

Tafla 4-10 Lóðréttar hreyfingar brúardekksins frá jafnvægisstöðu á miðju hafi.

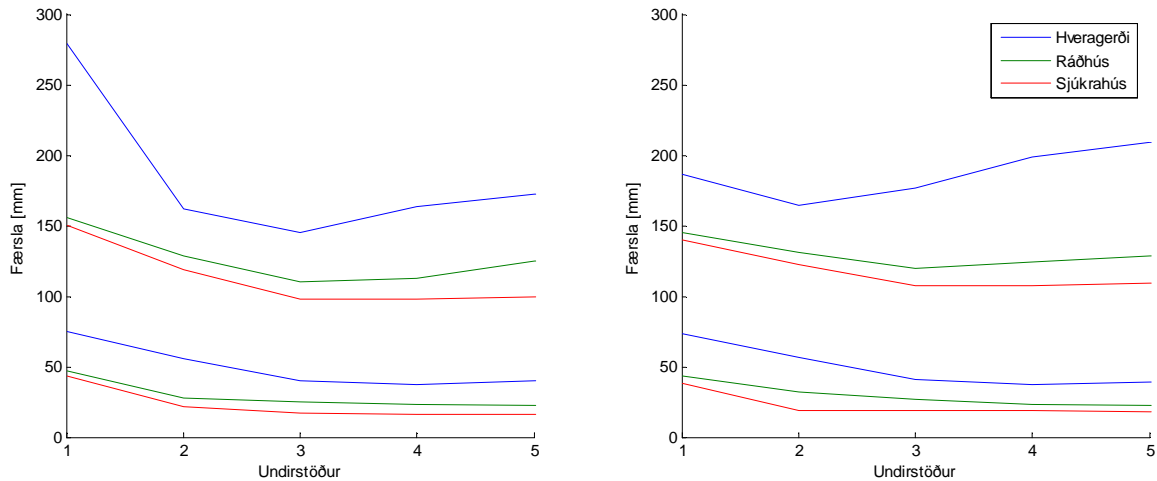
Staður	Færsla [mm]	Hröðun [g]
Hveragerði	10	1,2
Ráðhús	8,8	0,72
Sjúkrahús	5,0	0,39

4.5.2 Án hliðarstoppara

Áhugavert er að skoða líkanið án allra stoppara þannig að færslur séu ekki hindraðar. Þannig má sjá hvaða áhrif stoppararnir hafa og hvort að þeir hafi í raun verið nauðsynlegir. Togstangirnar fljóta við láréttar færslur uppá 35 mm. Það er því nokkuð ljóst að togstangirnar fljóta þar sem að brúardekkið rekst í hliðarstoppara. Eðlilegt er því að keyra brúarlíkanið bæði með og án togstanga og rétt niðurstaða ætti að liggja einhversstaðar á milli niðurstaðna úr þeim líkönum.

Athyglisvert er að sjá hvað færslurnar í enda brúarinnar eru miklar fyrir Hveragerðis tímaröðina með togstöngum eins og sést á Mynd 4.8. Togstangirnar leiða til meira hreyfinga í endum en áhrifin koma fyrst og fremst fram þegar færslur eru miklar. Það skýrist af því að stífni togstanganna eykst með auknum færslum. Stífni legukerfisins eykst því fyrir miðri brú með auknum færslum en ekki í endum. Að örðu leyti eru áhrif togstanganna ekki mikil.

Eins og sést á mynd 4.8 eru færslur brúardekksins án hliðarstoppara töluverðar. Mestu færslurnar eru fyrir Hveragerðistímaröðina eða 280 mm í enda brúarinnar. Áhugavert er að skoða færslurnar þegar haft er í huga að yfirleitt er gert ráð fyrir að blýgúmmílegur þoli 100-120% streitu án þess að skemmast. Það þýðir færslur uppá 90-105 mm. Versti þáttur sjúkrahúsraðarinnar rétt fellur innan þeirra marka. Mestu streitur í blýgúmmílegum á miðstöplinum eru 200% fyrir Hveragerðisröðina og þá fara streiturnar tvisvar yfir 120% mörkin og einu sinni að þeim. Þrátt fyrir að álagið sé ekki endurtekið jafn oft og við prófanir á blýgúmmílegum er ekki hægt að útiloka að þær hefðu skemmst. Að því leyti er hægt að réttlæta tilvist stopparanna.



Mynd 4.8 Mestu færslur brúardekksins fyrir allar sex tímaröðirnar. Vinstra megin er líkan með togstöngum en til hægri án.

Sjá má í töflu 4-11 að lítil munur er á hreyfingum brúardekksins í langátt eftir því hvort togstangirnar eru hafðar með í líkaninu eða ekki. Mestu færslur í langátt eru ekki langt frá mestu færslum í blýgúmmílegum. Brúardekkið rekst ekki í landstöpla fyrir betri þætti tímaröðanna og er nokkuð ljóst að áhrif þess hvernig brúin snýr eru þónokkur.

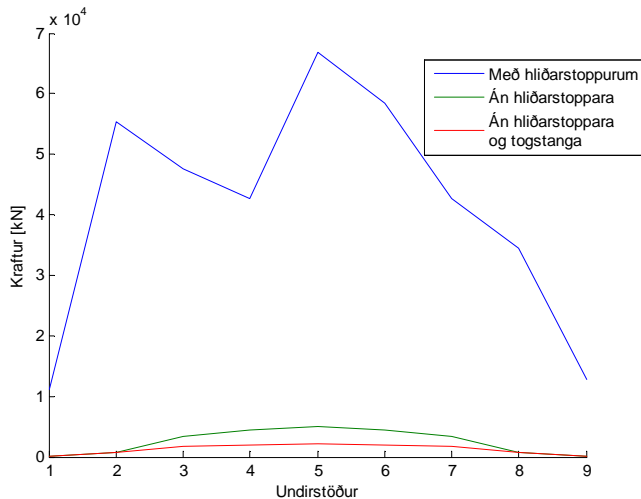
Tafla 4-11 Mestu færslur brúardekks í langátt brúar.

	Með togstöngum [mm]		Án togstanga [mm]	
	Verri þættir	Betri þættir	Verri þættir	Betri þættir
Hveragerði	180	42,0	194	41,6
Ráðhús	123	29,0	129	28,5
Sjúkrahús	108	16,8	114	18,1

Mismunur færslna eftir tímaröðum passar ágætlega við fjarlægð mælistöðva frá upptökum skjálftans. Færslurnar eru mestar fyrir Hveragerðistímaröðina en minni fyrir Selfosstímaröðirnar.

4.5.3 Samanburður líkana

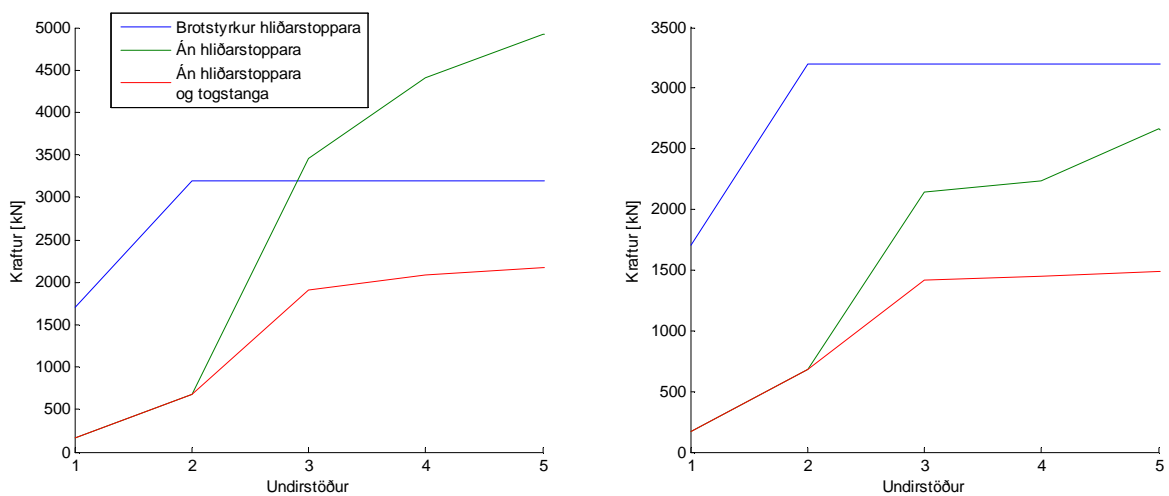
Auk þess að taka upp hreyfingar vegna hitaþenslna eiga jarðskjálftalegur að minnka sniðkrafta í brúardekkinu og stöplum. Því er áhugavert að skoða sniðkrafta í brúardekkinu og undirstöðum í líkönum með og án stoppara. Á mynd 4.9 má sjá samanburð á skúfkröftum í undirstöðum.



Mynd 4.9 Mestu skúfkræftar í undirstöðum fyrir Hveragerðistímaröð.

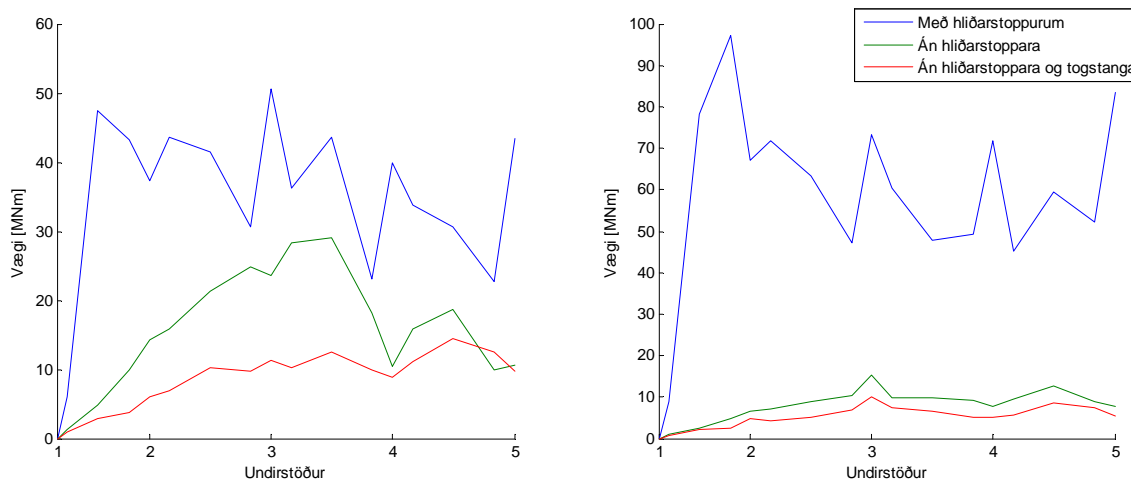
Það verður að hafa það í huga að líkanið með stoppurum gerir ekki ráð fyrir því að þeir brotni. Kraftarnir geta því vaxið óendanlega í þeim. Þess vegna er kannski heppilegra að bera skúfkræfta í undirstöðum, úr líkönum af brúnni án stoppara, saman við brotstyrk hliðarstoppara. Þar sem það er augljóst að framlag stoppara til skúfkræfta í undirstöðum verður ekki meiri en brotstyrkur þeirra.

Á mynd 4.10 sést að skúfkræftar í undirstöðum eru meiri fyrir líkanið án hliðarstoppara heldur en brotstyrkur hliðarstoppara þegar litið er á Hveragerðisröðina. Fyrir aðrar tímaröðir kom þetta ekki fram og brotstyrkur hliðarstoppara var meiri.



Mynd 4.10 Mestu skúfkræftar í undirstöðum fyrir Hveragerðistímaröð vinstra megin og ráðhústímaröð hægra megin á myndinni.

Vægið í brúardekkinu var skoðað yfir undirstöðum og í þremur punktum á milli undirstaða og eru vægisferlarnir sýndir á mynd 4.11. Sama fyrirvara verður að hafa á niðurstöðum líkans með stoppurum og áður þar sem kraftar í þeim takmarkast ekki við brotstyrk. Einnig má búast við að vægisferlarnir séu ekki samhverfir um miðju fyrir tilfallið með stoppurum.



Mynd 4.11 Mesta vægi um lóðréttan ás í brúardekki fyrir Hveragerðis- og ráðhústímaröð.

Vægið er mest þegar hliðarstopparnir eru hafðir með. Vægið í brúardekkinu í líkani án hliðarstoppa er fyrst og fremst tilkomið vegna mismunar á hreyfingum þess yfir undirstöðum. Vægisferillinn bendir til þess að endinn hangi á brúardekkinu yfir undirstöðu þrjú, þar sem vægið er mest. Þetta á sérstaklega við ef litið er til Hveragerðisraðarinnar sem stemmir ágætlega sé litið á færslurnar á mynd 4.8. Vægisþol brúardekksins á miðju hafi er 110 MNm og er því reiknað vægi fyrir ráðhústímaröðina í líkani með stoppurum farið að nálgast vægiþolið. Hins vegar er líklegt að reiknaða vægið sé töluvert meira heldur en raunverulegt vægi vegna þess að hliðarstopparnir brotna ekki í tölvulíkaninu. Fyrir önnur tilfalli er vægið mun minna en vægisþolið.

Töluverður munur er á láréttri hröðun brúardekksins eftir því hvort skoðað er líkan með eða án stoppara. Mesta hröðunin kemur hins vegar fram eftir árekstur stoppara svo hafa verður fyrirvara á því. Hröðunin í líkani án stoppara er einnig töluverð og gæti, eins og lóðrétt hröðun brúardekksins haft áhrif á umferð sem hugsanlega væri á brúnni í jarðskjálfa.

Tafla 4-12 Mesta lárétta hröðun brúardekks á hafi.

Staður	Með stoppurum [g]	Án stoppara [g]
Hveragerði	5,3	0,84
Ráðhús	8,3	0,46
Sjúkrahús	7,2	0,33

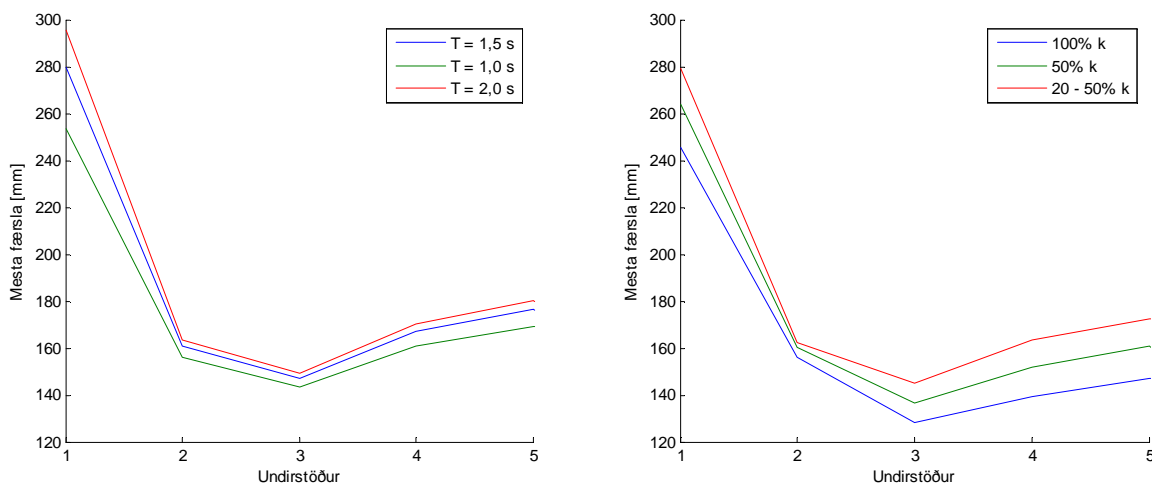
4.5.4 Áreiðanleiki og næmni reiknilíkans

Tímaskrefsstærðin getur verið umtalsvert meiri þegar stoppararnir eru ekki hafðir í líkaninu án þess að það hafi áhrif á niðurstöðurnar. Tímaskrefið var haft 0,01 s og þannig fengust nægjanlega mörg gildi nálægt hágildum. Með lengri tímaskrefum er raunhæft að nota DI til þess að reikna svörunina og bera saman við FNA.

Það er fyrst og fremst tvennt í reikniaðferðunum sem ekki er ákvarðað af öryggi og getur haft áhrif á niðurstöðurnar. Fyrir DI er deyfingarlíkanið þess eðlis að einungis er hægt að hafa valda deyfingu fyrir tvær sveiflutíðnir, aðrar sveiflutíðnir hafa aðra deyfingu. FNA greiningin notast við virka stífni á ólínulegum einingum (jarðskjálftalegum). Þessi virka stífni ætti, samkvæmt höfundum SAP2000, að vera á milli núll og upphafsstífni eininganna (Computer and Structures 2007).

Sveiflutímarnir sem deyfing DI var skilgreind út frá voru 1,5 s og 0,1 s. Þegar sveiflur dekksins vegna jarðskjálftans voru skoðaðar kom í ljós að lota hreyfingarinnar var í kringum 1,0-1,5 s, í örfáum tilvikum nálægt 2 s. Þannig má rökstyðja valið á efri mörkum sveiflutíma en neðri mörkunum var haldið óbreyttum og notað staðalgildið í SAP2000 þar sem ekki voru forsendur til þess að breyta því.

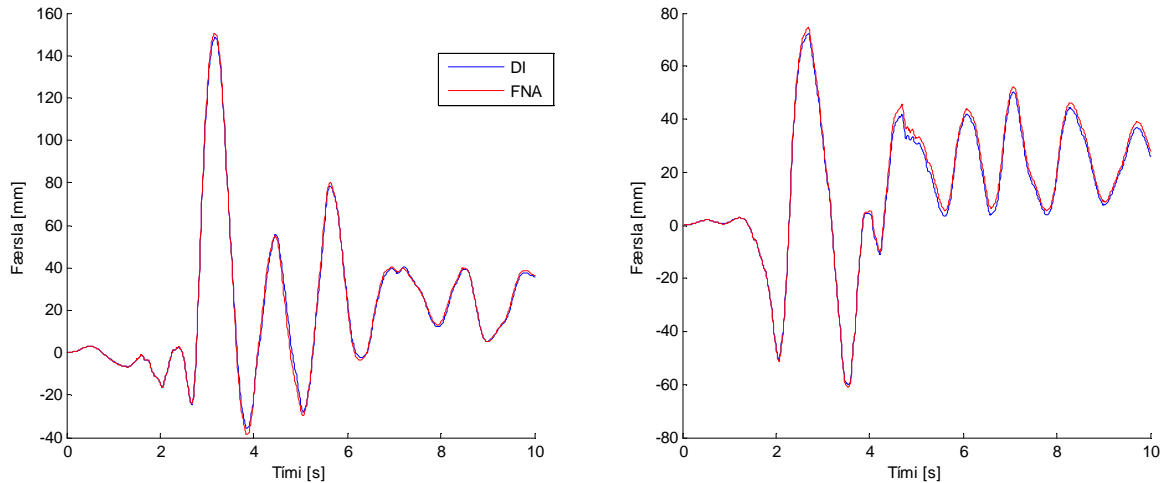
Prófað var að skilgreina deyfihlutfallið fyrir mismunandi sveiflutíma í kringum 1,5 s til þess að sjá hvaða áhrif sú breyting hefur. Eins og sést á mynd 4.12 eru áhrifin ekki stórvægileg, breytingin er mest 10% í enda en annars er hún minni. Einnig var gerð næmnigreining á virkri stífni lega með FNA greiningu. Niðurstöðurnar eru einnig á mynd 4.12. Áhrifin eru nokkur og mun meiri heldur en áhrif deyfingar á DI.



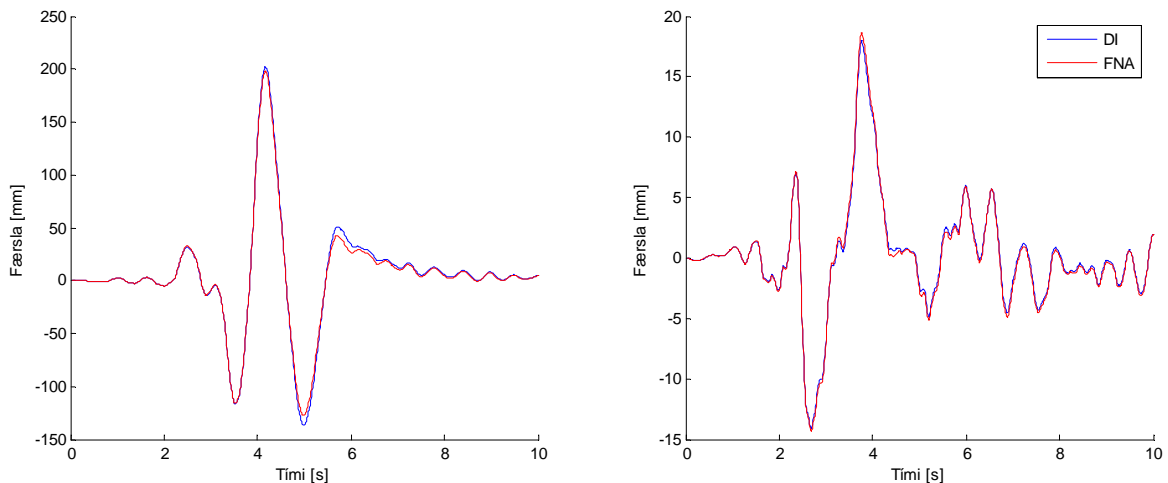
Mynd 4.12 Næmnigreining á greiningaraðferðum með verri þætti Hveragerðisraðarinnar. Vinstra megin er notuð DI og deyfihlutfallið skilgreint fyrir mismunandi efri mörk sveiflutíma. Hægra megin er notuð FNA með virka stífni sem mismunandi hlutfall af upphafsstífni.

Virk stífni leganna var valin þannig að niðurstöður úr FNA pössuðu sem best við DI. Valið var að nota helming af upphafsstífni viðnámslega og fimmtung af upphafsstífni blýgúmmílega. Það var sú stífni sem gaf besta niðurstöðu miðað við DI og var það óhád því hvaða tímaráðir voru notaðar eins og sjá má á mynd 4.13.

Þegar togstöngunum var sleppt þurfti að minnka virka stífni blýgúmmíleganna í 10% af upphafsstífni svo niðurstöður FNA pössuðu við DI. Virkri stífni viðnámslega þurfti ekki að breyta enda ekki togstangir í endum og legukerfið því óbreytt þar. Niðurstöður FNA pössuðu vel við DI fyrir allar tímaráðirnar eins og fyrir líkanið með togstöngum.



Mynd 4.13 Samanburður á greiningaraðferðum fyrir líkan með togstöngum. Til vinstri er verri þáttur sjúkrahúsraðarinnar en hægra megin er betri þáttur Hveragerðisraðarinnar. Færslurnar eru yfir landstöplum.



Mynd 4.14 Samanburður á greiningaraðferðum fyrir líkan án togstanga. Til vinstri er verri þáttur Hveragerðisraðarinnar en hægra megin er betri þáttur sjúkrahúsraðarinnar. Færslurnar eru yfir fjórða stöpli.

Það myndi ekki í öllum tilfellum þjóna tilgangi að stilla FNA greininguna af svo að hún passaði við DI. Aðferðirnar skila sömu upplýsingum svo að munur aðferðanna er enginn að því leyti. En í þessu tilfalli er FNA greiningin notuð í fleira, bæði til þess að skoða líkanið með stoppum og mismunandi legum. Í þeim tilfellum er FNA greiningin keyrð með þeirri stífni lega sem fékkst hér en DI ekki notuð.

4.6 Svörunarrófsgreining

Hægt er að reikna svörun brúarinnar út frá svörunarrófum. Þá er notuð jafngild línuleg stífni og seigjudeyfing sem er reiknuð með aðferðum í kafla 3.4.2. Margar nálganir eru gerðar í þessari aðferð og því er fróðlegt að sjá hversu vel niðurstöðurnar passa við ólínulegu aðferðirnar.

Það veldur vandkvæðum að viðnámsstuðull viðnámsleganna er háður afstæðum hraða á undirstöðum legunnar og brúardekki ofan lega. Undir venjulegum kringumstæðum er hraði mannvirkisins ekki þekktur þegar svörunarrófsgreining fer fram. Væri hann það myndu aðrar stærðir sem fást með svörunarrófsgreiningu líklega einnig vera þekktar. Hér var þó farið í nánari skoðun á viðnámsstuðlinum þar sem þegar var búið að keyra ólínulegar greiningar sem skila hraða í hverju tímaskrefi. Hraði viðnámsleganna í þverátt brúarinnar var skoðaður og viðnámsstuðullinn reiknaður samkvæmt jöfnu 3.17. Meðalviðnámsstuðullinn var síðan reiknaður fyrir það tímabil þar sem færslur voru mestar. Þegar versti þáttur tímaraðanna var notaður var meðalviðnámsstuðullinn 91-95% af viðnámsstuðlinum fyrir mikinn hraða. Meiri dreifni var fyrir betri þættina en þá var viðnámsstuðullinn á bilinu 69%-81% af hágildinu. Lítil munur reyndist á viðnámsstuðli landstöpluls og millistöpluls. Viðnámsstuðlana má sjá í töflu 4-13.

Viðnámslegur með föstum viðnámsstuðli voru prófaðar með FNA greiningu. Notaðir voru viðnámsstuðlar nálægt meðalgildum viðnámsstuðlanna eða 70, 80, 95 og 100% af hágildi viðnámsstuðulsins. Niðurstöðurnar voru bornar saman við greiningu með réttu viðnámslíkani. Besta nálgunin er tilgreind í töflu 4-13.

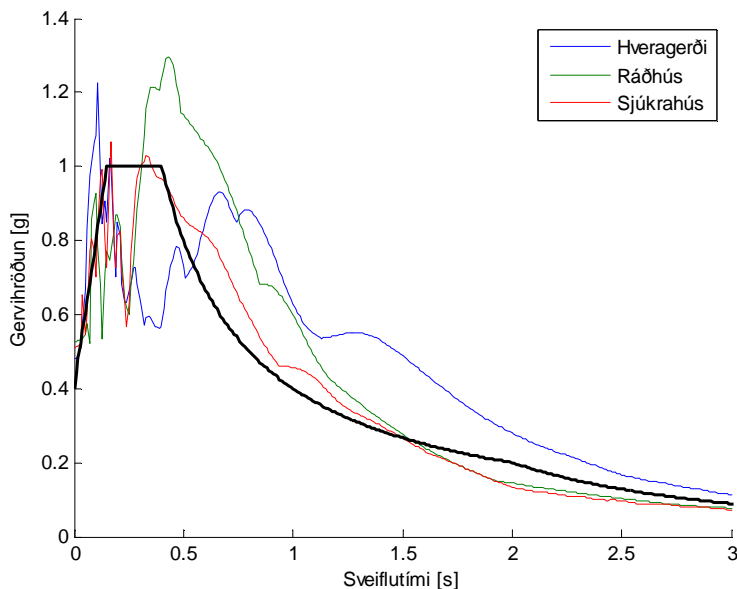
Erfitt er að draga ályktun af niðurstöðunum. Þrátt fyrir að besti fasti viðnámsstuðullinn sé nálægt meðalgildinu fyrir verri stefnuþættina þá gildir það ekki um þá betri. Frekar virðist um það að ræða að betra sé að viðnámsstuðullinn sé hár.

Tafla 4-13 Nálgun viðnámsstuðuls.

Tímaröð	Meðalviðnámsstuðull á landstöpli úr FNA	Meðalviðnámsstuðull á millistöpli úr FNA	Besta nálgun viðnámsstuðuls
Hveragerði - versti þáttur	95 %	92 %	95 %
Selfoss ráðhús - versti þáttur	93 %	91 %	95 %
Selfoss sjúkrahús - versti þáttur	93 %	91 %	95 %
Hveragerði - besti þáttur	79 %	80 %	100 %
Selfoss ráðhús - besti þáttur	71 %	69 %	80-95 %
Selfoss sjúkrahús - besti þáttur	80 %	81 %	100 %

Færslur brúardekksins í þverátt voru skoðaðar með svörunarrófsgreiningu. Ferlið krefst ítrunar þar sem bæði deyfing og stífni leganna er háð færslum. Tvö deyfihlutföll voru notuð, annars vegar 5% fyrir mannvirkið í heild og svo deyfing leganna. Rófinu var skipt eins og lýst er í kafla 3.4.2. Skipt var við sveiflutíma sem svarar til þess að brúardekkið væri óformbreytanlegt. Notast var við líkan með togstöngum og það látið nægja enda eru niðurstöður aðferðarinnar sjálfrar ekki svo áhugaverðar heldur miklu frekar samanburður við aðrar aðferðir.

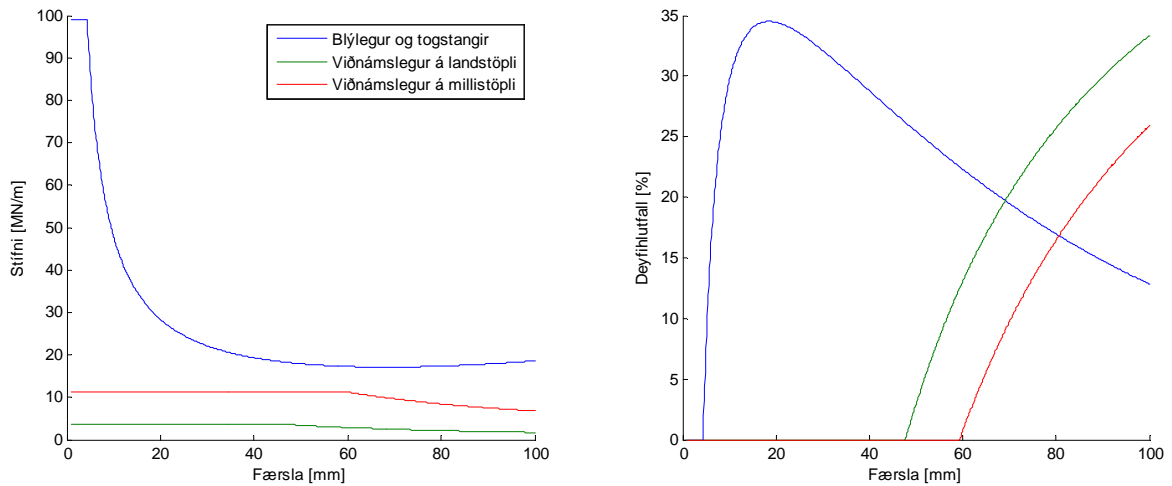
Svörunarróf jarðskjálftans voru reiknuð með tíðnirúmslausn á jöfnu 3.3. Svörunarróf Evrópustaðalsins er einnig notað og er það róf af gerð 1, sem er fyrir skjálfta stærri en 5,5 M_w , og miðað var við jarðvegsflokk A, sem gildir fyrir mannvirki grunduð á klöpp. Rófið var skalað miðað við að grunnhröðunin væri 0,4 g sem er grunnhröðun Evrópustaðalsins á Suðurlandi. Eins og sést á mynd 4.15 gefa svörunarrófin frá Hveragerði og ráðhúsinu á Selfossi mestu áraunina en fyrir mismunandi sveiflutíma.



Mynd 4.15 Samanburður reiknaðra svörunarrófa og svörunarrófs Evrópustaðalsins fyrir 5% deyfihlutfall.

Deyfingin í viðnámslegum er 64% óháð hreyfingu sé hún öll á mörkum núningsflata. Viðnámslegur brúarinnar eru gerðar úr gúmmílegu sem hefur teflon núningsflöt. Hreyfingar í gúmmílegunum eru það miklar að deyfingin er mun minni. Eins og sést á mynd 4.16 byrjar hreyfing í viðnámslegunum sjálfum ekki fyrr en hreyfing í gúmmíinu er orðin 50 – 60 mm. Hins vegar verður að hafa það í huga að sú færsla miðast við hæsta mögulega viðnámsstuðul. Í raunveruleikanum er viðnámsstuðullinn í lágmarki þegar hreyfing byrjar í viðnámslegunni og er það við 13 – 17 mm. Þetta lýsir ágætlega þeim miklu nálgunum sem eru gerðar í línulega líkaninu.

Deyfingin í blýgúmmílegunum er háð færslu eins og sést á mynd 4.16. Heildardeyfingin í kerfinu er yfirleitt nær deyfingu blýgúmmíleganna en viðnámslega þar sem blýgúmmílegurnar hafa mun meiri streituorku og þar af leiðandi meira vægi.



Mynd 4.16 Stífni og deyfing í legum.

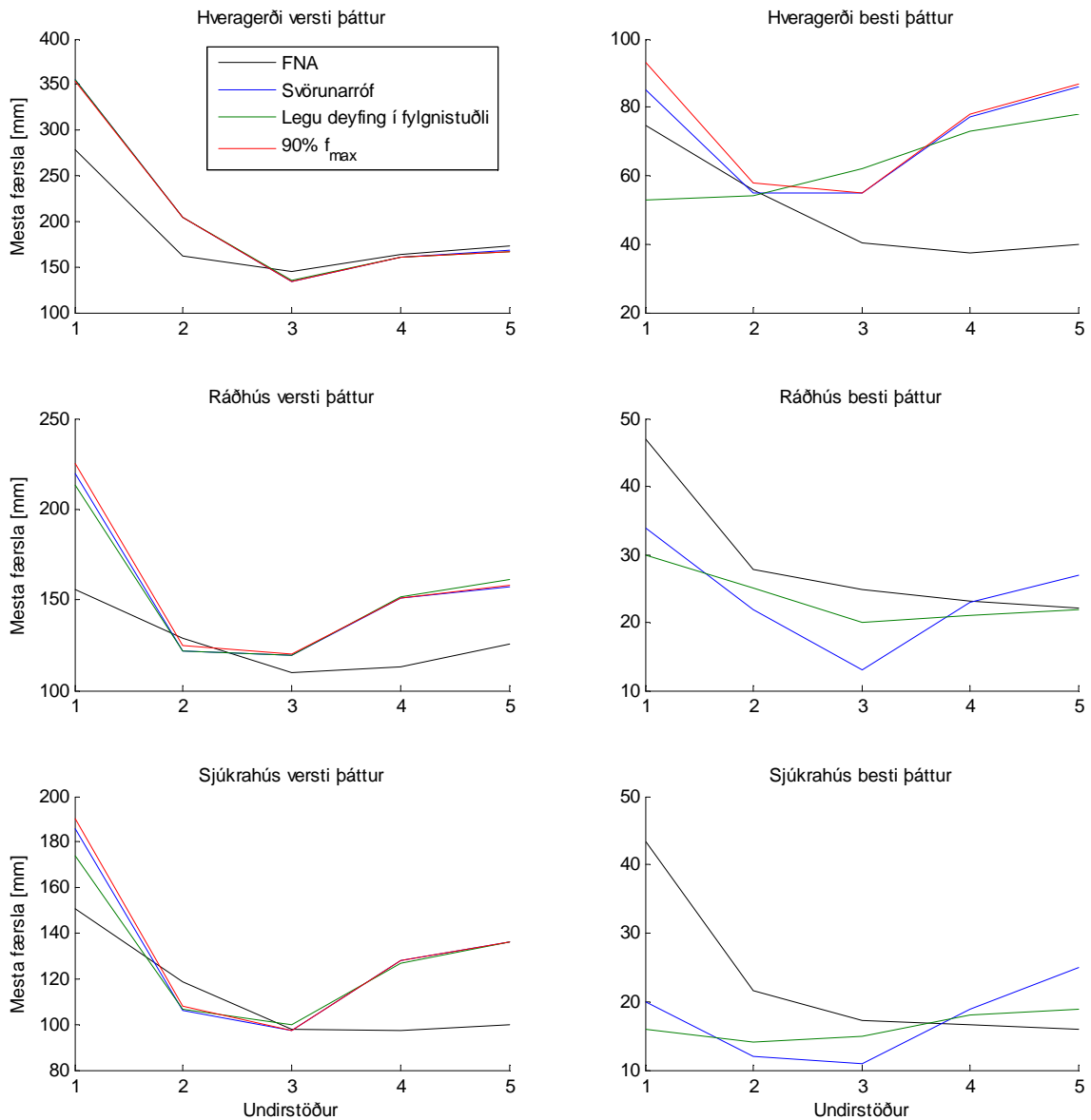
Svörunarrófsgreiningin var notuð til þess að reikna færslu fyrir verstu og bestu þætti tímaraðanna þriggja, niðurstöðurnar má sjá á mynd 4.17. Notaður var hæsti viðnámsstuðullinn fyrir keyrslurnar en einnig var prófað að nota 90% af viðnámsstuðlinum, sú breyting hafði óveruleg áhrif. Ekki var gert ráð fyrir því að virk stífni lega yrði meiri en upphafsstífni þeirra. Þegar bestu þættirnir frá Selfossi voru skoðaðir var stífni viðnámsleganna jöfn upphafsstífniinni enda urðu ekki hreyfingar á viðnámsfleti leganna.

Svörun frá mismunandi sveifluformum var fléttuð saman með CQC aðferð. Fylgnistuðull sveifluforma, sem aðferðin byggir á, er háður deyfingu eins og sjá má á mynd 3.6. Notuð var kerfisdeyfingin, 5%, til þess að reikna fylgnistuðulinn. Fyrir öll tilfellin voru tvö sveifluform sem lenda á legudeyfihluta svörunarrófsins. Fylgnistuðull þeirra er því vanmetinn og að auki er stutt á milli sveiflutíma þeirra þannig að fylgnistuðullinn gæti haft töluverð áhrif. Vegna þessa var einnig prófað að nota deyfingu í legum til að ákvarða fylgnistuðlana. Áhrif þess voru misjöfn en eðlilega meiri eftir því sem deyfingin, sem sýnd er í töflu 4-14, var meiri. Það að nota 5% deyfingu gerir það verkum að fylgnistuðullinn er á milli rétt gildis og þess gildis sem fæst með því að nota SRSS aðferðina. Ef kerfisdeyfingin er notuð er fylgnistuðullinn ofmetinn fyrir öll sveifluform nema fyrstu tvö.

Samanburður svörunarrófsgreiningarinnar við ólínulegu greininguna á mynd 4.17 kemur ekki vel út. Hveragerðisröðin kemur best út þar sem eru um 30% skekkja í endanum en mun minni nær miðju. Færslurnar fyrir miðju eru í flestum tilfellum ofátlaðar. Annars virðist það vera sem svo að skekkjurnar séu háðar færslunum, í það minnsta eru þær mjög svipaðar fyrir verri þætti Selfoss raðanna.

Kröfur Evrópustaðalsins eru uppfylltar fyrir öll tilfelli nema þegar færslur eru í kringum 10-30 mm. Þá er krafa um að virk stífni legukerfisins skuli vera að minnsta kosti 50% af stífni kerfisins við 20% af hönnunarfærslu ekki uppfyllt enda vex stífni blýgúmmílega þá hratt eins og sést á mynd 4.16. Á sama færslubili er skekkjurnar einnig mestar.

Það hvernig fylgnistuðullinn er reiknaður og hvaða viðnámsstuðull er notaður virðist ekki hafa veruleg áhrif á niðurstöðuna. Allavega er munurinn á að breyta fylgni- eða viðnámsstuðli mun minni en skekkjan í aðferðinni.

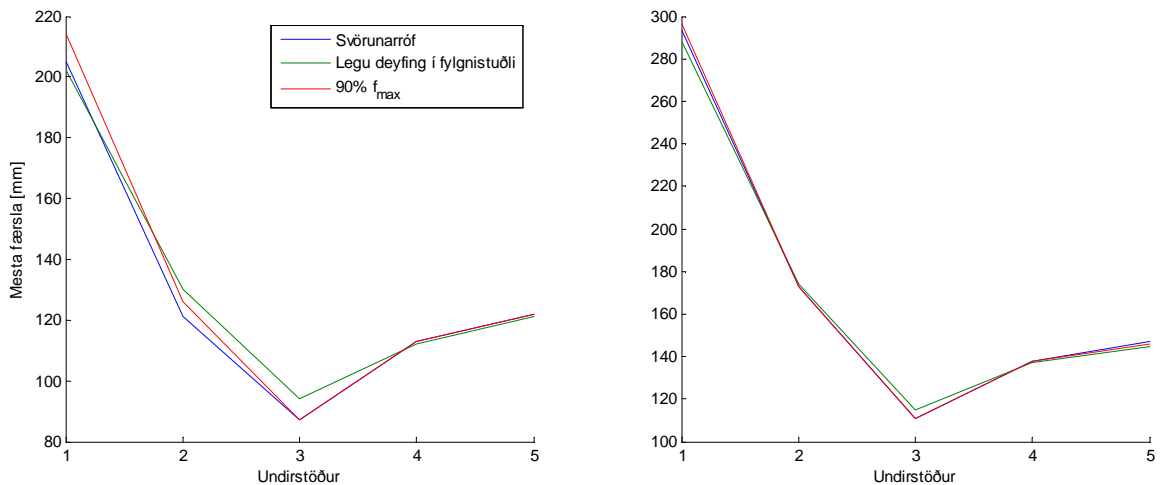


Mynd 4.17 Samanburður á svörunarrófsgreiningu og ólínulegri greiningu.

Tafla 4-14 Deyfing í legukerfi og sveiflutími sem var notaður til þess að skipta svörunarrófinu í tvennt.

Staður	Verri þættir / mikilvægisstuðull 1,3		Betri þættir / mikilvægisstuðull 1,0	
	Sveiflutími [s]	Deyfing [%]	Sveiflutími [s]	Deyfing [%]
Hveragerði	1,2	11	1,3	17
Ráðhús	1,2	10	1,0	25
Sjúkrahús	1,2	13	0,90	30
EC8	1,2	14	1,3	17

Svörunarróf evrópska jarðskjálftastaðalsins var einnig notað til þess að reikna mestu færslur. Sömu aðferðir voru notaðar og fyrir þ.e. reiknað var með fullum viðnámsstuðli og kerfisdeyfing höfð 5%, en einnig var notað 90% viðnámsstuðull og deyfing í legum. Það má svo deila um það í hvaða mikilvægisflokk Óseyrarbrúin fellur. Þó er hægt að útiloka að hún lendi í flokki með brúm með lítið mikilvægi. En eftir standa þá tveir flokkar: Meðal mikilvægi og mikið mikilvægi. Svörun brúarinnar var reiknuð fyrir báða flokka með mikilvægisstuðul 1,0 og 1,3.



Mynd 4.18 Færslur samkvæmt svörunarrófi EC8. Vinstra megin er mikilvægisstuðullinn 1,0 en hægra megin 1,3.

Færslurnar samkvæmt EC8 með mikilvægisstuðulinn 1,0 eru svipaðar og færslur Selfoss raðanna svo að búast má við svipuðum skekkjum. Með mikilvægisstuðulinn 1,3 eru færslurnar mitt á milli færslna úr Selfoss- og Hveragerðisrófum.

Færslur brúarinnar í langátt má reikna með einnar frelsisgráðu kerfi. Formbreytingarnar eru nær eingöngu í jarðskjálftalegunum og brúardekkið formbreytist ekki. Því er hægt að nota einnar frelsisgráðu kerfi og deyfing legukerfisins er þá notuð í svörunarrófið og hreyfingin er þá lesinn beint af viðkomandi færslurófi.

Fyrir verri þættina passa niðurstöðurnar vel við ólínulega líkanið en þegar færslurnar eru litlar eru niðurstöðurnar ekki jafn góðar. Færslur samkvæmt jarðskjálftastaðlinum eru þá svipaðar og fyrir Selfoss rófin og má því búast við svipuðum skekkjum.

Einnar frelsisgráðukerfið kemur betur út í samanburði við ólínulegu greininguna heldur en færslur í þverátt brúarinnar. Þegar færslur í þverátt eru reiknaðar er gert ráð fyrir að deyfingin sé sú sama í öllum legunum þó að svo sé alls ekki raunin eins og sést á mynd 4.16. Þetta vandamál er ekki til staðar í einnar frelsisgráðu kerfinu og gæti að hluta til skýrt mun aðferðanna.

Tafla 4-15 Niðurstöður svörunarrófsgreiningar með einnar frelsisgráðu kerfi sem samsvara færslum í langátt brúar.

	Færsla samkvæmt svörunarrófi [mm]	Færsla úr ólínulegu líkani [mm]	Skekkja [%]
Hveragerði - versti þáttur	158	180	-12
Ráðhús - versti þáttur	118	123	-4,1
Sjúkrahús - versti þáttur	96,8	108	-10
Hveragerði – besti þáttur	48,1	42,0	16
Ráðhús – besti þáttur	13,2	29,0	-54
Sjúkrahús – besti þáttur	10,0	16,8	-40
EC8 mikilvægisstuðull 1,0	86,2	-	-
EC8 mikilvægisstuðull 1,3	119	-	-

Svörunarrófsaðferðin er tímafrek og krefst töluverðar vinnu. Reikna þarf nýja stífnir og deyfingu eftir hverja keyrslu, búa til nýtt svörunarróf og breyta stífnir jarðskjálftalega í líkani. Sérstaklega á þetta við þegar upphafsgildin eru illa valin. Auk þess krefst aðferðin undirbúningsvinnu við að gera forrit til þess að reikna stífnina, deyfinguna og búa til samsett svörunarróf. Eftir að undirbúningsvinnan hefur verið framkvæmd tekur hver keyrsla um 10 – 15 mínútur á meðan FNA er hægt að keyra á innan við mínútu.

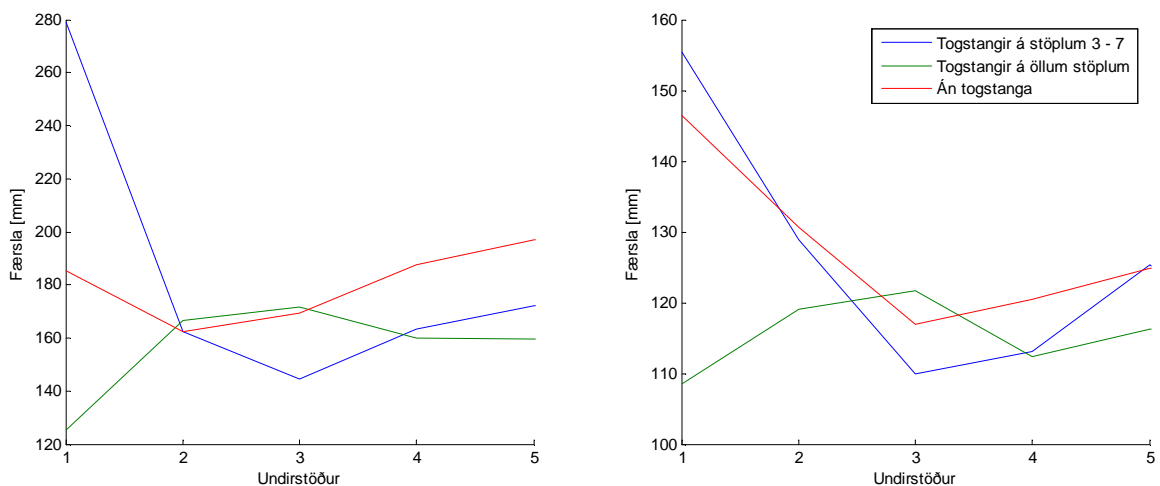
5 ENDURHÖNNUN

Tilgangur endurhönnunar er ekki sá að koma fram með breytingartilögur á brúnni. Enda þjónar brúin hlutverki sínu og hefur sýnt að hún stenst kröftuga jarðskjálfta án skemmda á aðal burðarkerfi. Markmiðið er frekar að kanna hvort annað val á jarðskjálftalegum og önnur hönnun á stoppurum og hliðarveggjum hefði getað leitt til minni skemmda á brúnni en raunin varð í Suðurlandsskjálftanum 2008. Til þess verða notaðar þær aðferðir sem áður hafa verið settar fram og líkanið úr fyrri kafla að því leyti sem það á við. Ákveðið var að notast við verstu stefnuþætti Hveragerðis- og Ráðhústímaraðar.

Hreyfingar jarðskjálftaleganna verða of miklar ef að stoppurunum er sleppt eins og áður hefur komið fram. Stoppararnir sem eru til staðar koma í veg fyrir að færslurnar verði það miklar að legurnar skemmist en óhjákvæmilegt er að stoppararnir verði fyrir skemmdum. Þrátt fyrir að brúin sé örugg með brotna stoppara, þar sem þeir eru ekki partur af burðarkerfinu, er það kostnaðarsamt að þurfa að gera við þá.

Færslur brúardekksins eru, fyrir þær tímaraðir sem hafa verið skoðaðar, mestar í brúarendunum. Þrátt fyrir að viðnámslegurnar þoli meiri færslur heldur en blýgúmmílegur er eðlilegt að reyna að draga úr hreyfingum brúarendans til þess að hlífa brúardekkinu við miklum sniðkröftum. Sérstaklega þegar litið er til Hveragerðistímaraðarinnar sem gefur mestar færslur í endanum.

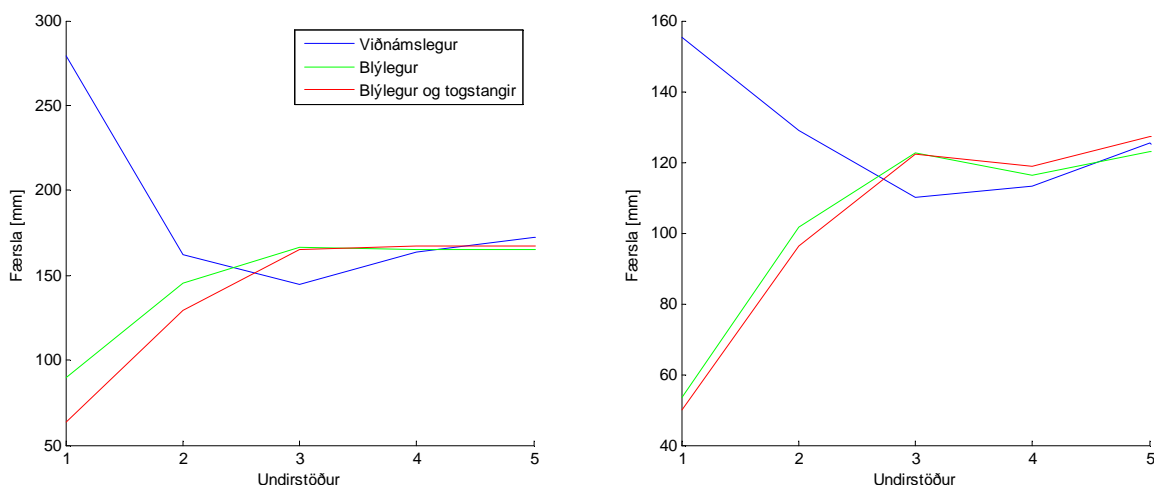
Brúardekkið hvílir einungis á viðnámslegum á fyrstu tveimur stöplunum en annars á blýgúmmílegum og togstöngum. Forvitnilegt er að skoða hvaða áhrif togstangirnar hafa á færslur brúardekksins.



Mynd 5.1 Samanburður á mestu færslum brúardekksins með mismunandi uppsetningu á togstöngum. Hveragerðisröðin er vinstra megin og ráðhúsröðin hægra megin.

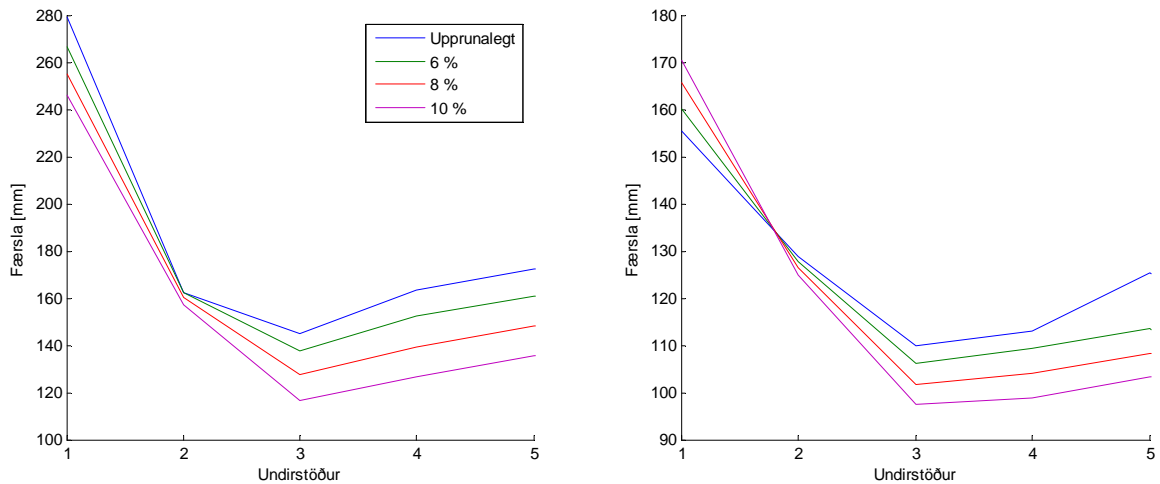
Eins og sést á mynd 5.1 hefur það töluverð áhrif að setja togstangir í endann. Þó er hreyfingin það mikil að togstangirnar fara á flot og líkanið því ómarktækt þar sem það gerir ekki ráð fyrir floti í togstöngum. Eins og áður hefur komið fram minnka færslur í endum við það að sleppa togstöngunum en aukast á öðrum stöðum. Færslurnar eru þó fyrir öll tilfelli meiri en sú færsla sem íslensku blýgúmmílegurnar eiga að þola sem er í kringum 105 mm. Aðrar heimildir segja gúmmílegur þola 140% og allt að 240% skúfstreitu sem þýðir færslur á bilinu 120 – 215 mm (Skinner o.fl. 1993). Reyndar eru efri mörkin miðuð við stóra skjálfta og þá eru skemmdir leyfðar að einhverju leyti svo réttara er að horfa á neðri mörkin, þ.e. 140%.

Það að setja blýgúmmílegur í endann hefur mun meiri áhrif heldur en að setja togstangir eins og sést á mynd 5.2. Auk þess eru áhrif þess að hafa togstangir auk blýleganna lítil. Áhrifanna gætir þó einungis í endum svo að það hlífir ekki öðrum blýgúmmílegum, en í endunum gætu þær sloppið án skemmda.



Mynd 5.2 Mismunandi jarðskjálftalegur í endum. Hveragerðisröðin er vinstra megin og ráðhússtöðin hægra megin.

Blýmagnið hefur fyrst og fremst áhrif á flotstyrk legunnar. Einhverjar breytingar verða þó á stífni legunnar þar sem flatarmál gúmmísins minnkar ef blýkjarninn er stækkaður. Blýið í brúnni hefur flotstyrk sem jafngildir 4,4% af þyngd brúardekksins. Með því að auka blýmagnið minnka færslur í brúardekksins eins og sést á mynd 5.3. Með því að auka flotstyrkinn upp í 10% af þyngdinni eru færslurnar farnar að nálgast 120 mm mörkin fyrir færslur í blýgúmmílegum. Þegar litið er á báðar tímaraðirnar sést að áhrifin eru mest við blýgúmmílegurnar en í endum geta áhrifin verið á hvorn veginn sem er.



Mynd 5.3 Áhrif blýmagns á færslur brúardekksins. Flotstyrkur blýsins er gefin upp sem hlutfall af þyngd brúardekksins. Hveragerðisröðin er vinstra megin og ráðhúsröðin hægra megin.

5.1 Hitapenslur, skrið og rýrnun

Vegna þess hve brúin er löng geta hitapenslur haft töluverð áhrif á brúna. Sérstaklega á þetta við um legur í endum þar sem formbreytingar eru mestar. Með því að hafa viðnámslegur í endum er komist hjá því að miklir kraftar byggist upp í legunum. En við litlar hreyfingar er viðnámsstuðull leganna nálægt 2%. Miðað við það verður formbreyting gúmmís undir viðnámslegum aldrei meiri en 7 – 10 mm. Skrið og rýrnun í brúardekkinu valda því að dekkið styttist með tíma og eru breytingarnar á sömu stærðargráðu og vegna hitabreytinga. Legurnar verða þó ekki fyrir þreytuskemmdum vegna skriðs og rýrnunar þar sem álagið er ekki endurtekið.

Lengdarbreytingar brúarinnar miðast við hitastig á byggingartíma. Miðað við að brúin hafi að mestu verið steipt að sumri til má gera ráð fyrir því að meðal hitastig á byggingartíma hafi gróflega áætlað verið í kringum 10°C. Lengdarbreytingar vegna mikils hita verða því tæplega til vandræða en í miklum kuldum geta formbreytingar orðið miklar. Við -15°C hita verður hreyfing í endum frá jafnvægisstöðu:

$$\Delta L = \frac{360 \cdot 10^3 \text{ mm}}{2} \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C} \cdot 25^\circ\text{C} = 45 \text{ mm}$$

Þar sem hitapansstuðull steypu er $10^{-5} / ^\circ\text{C}$ og er margfaldaður með lengd frá miðju og hitabreytingu. Ekki er gert ráð fyrir því að legurnar hafi áhrif á formbreytingarnar. Brúin styttist því í heild um 90 mm miðað við gefnar forsendur. Hitabreytingin sem miðað er við er reyndar mikil en 5°C breyting dugir til þess að lengdin breytist um 9 mm og breyting umfram það hefur ekki áhrif á krafta í viðnámslegum.

Almenn fræði um þreytuþol blýgúmmílega er ekki til staðar. Hins vegar hafa einstaka legur verið prófaðar undir endurteknu álagi. Blýgúmmílega var prófuð af W. Robinson fyrir 50% skúfstreitir í 215 lotur (Skinner o.fl. 1993). Sama lega var einnig prófuð í 11000 lotur með hreyfingum upp á 3 mm. Þessar prófanir áttu að lýsa hitapenslum á þrjátíu ára tímabili. Legan stóðst allar þessar prófanir. 11000 lotur jafngilda einni lotu á dag í þrjátíu ár. Dægursveifla hita í júní, þegar dægursveifla er með mesta móti, í nágrenni brúarinnar er

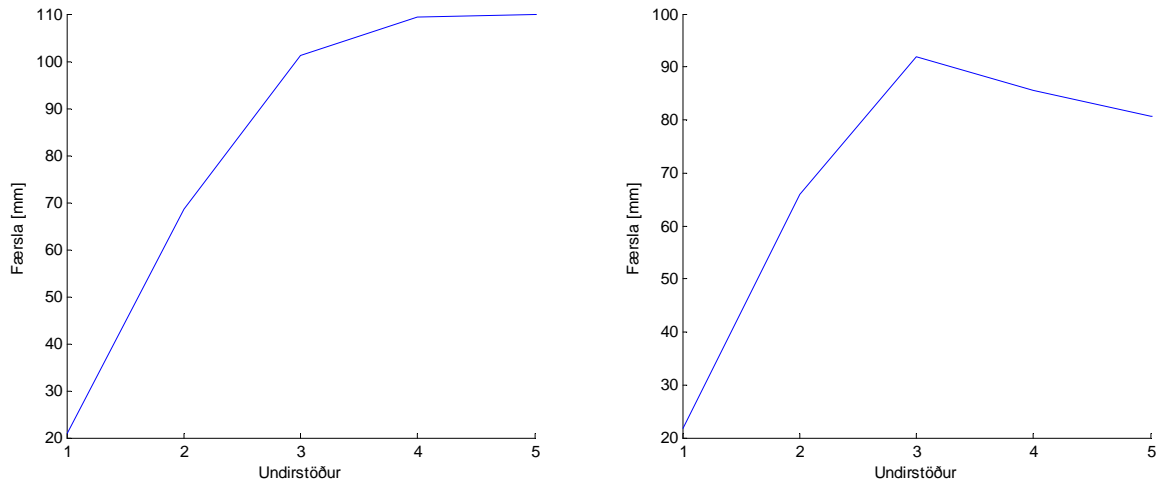
3-4°C (Veðurstofa Íslands 2008). Færslur yfir sólarhringinn væru því 5 – 7 mm eða nærri því tvöfalt meiri en í prófuninni. Ekki var gefið upp hvað gúmmíð var þykkt í legunni en legan er 140 mm á hæð.

Þolmörk blýgúmmíleganna vegna hitahreyfinga má meta með þrennum hætti. Í fyrrnefndum prófunum á blýgúmmílegu undir endurteknu álagi var miðað við 50% streitu fyrir miklar færslur og 3 mm vegna dægursveiflna. Ef miðað er við 50% streitu og að 25°C séu miklar hitabreytingar þyrfti gúmmíþykktin að vera 90 mm. Í tilraunarniðurstöðunum var ekki gefið upp hver gúmmíþykktin var í legunni sem var prófuð svo að þessir 3 mm segja ekkert um streitur í legunni. Hæð legunnar var 140 mm og hreyfing vegna dagshitabreytinga getur verið 6 mm í brúarendanum samkvæmt því þyrfti legan að vera 280 mm á hæð. Hlutfall gúmmís og stáls er samt mismunandi milli lega og það segir því ekki mikið. Þriðji valkosturinn er að skoða blýgúmmílegurnar á öðrum millistöpli Óseyrarbrúarinnar. Þær blýgúmmílegur eru lengst frá miðju og hreyfingar vegna hitabreytinga eru því mestar þar. Legurnar hafa staðið þar í rúm 20 ár án skemmda. Ætla má að ef skúfstreita í blýgúmmílegum í brúarendanum verði ekki meiri en streitur í gömlu legunum skemmist þær ekki. Þá verður líka óþarfi að skoða hitann vegna þess að hreyfingarnar í brúardekkinu eru í beinu hlutfalli við fjarlægð frá miðju brúarinnar. Minnsta gúmmíþykkt á fyrsta millistöpli miðað við það væri 132 mm og í enda 165 mm.

5.2 Lokahönnun

Hægt er að hækka blýgúmmílegurnar og stækka þær í réttu hlutfalli svo að aflfræðilegir eiginleikar haldist óbreyttir en þolmörkin aukist og fari upp fyrir reiknaðar færslur. Viðnámslegunum er ekki hægt að breyta svo að færslur minnki. Viðnámsstuðullinn er reyndar háður þrýstingi og þar af leiðandi flatarmáli leganna en áhrifin af að breyta því eru óveruleg. Togstangir geta minnkað hreyfingar í endunum töluvert en þær þola takmarkaðar færslur. Það er því freistandi að setja einnig blýgúmmílegur í endana en þær eru þá útsettar fyrir hitaþenslum sem verður að taka tillit til.

Blýgúmmílegurnar voru stækkaðar í líkaninu og settar á alla stöpla. Togstöngunum var sleppt. Miðað var við legur frá framleiðanda upprunalegu leganna. Legurnar voru hækkaðar þannig að gúmmíþykktin væri 105 mm í stað 88 mm. Leyfilegar færslur miðað við 120% streitur er því um 125 mm. Legurnar voru einnig stækkaðar þannig að stífni leganna var töluvert meiri en áður. Eins og sést á mynd 5.4 eru færslur minni 125 mm.



Mynd 5.4 Mestu færslur fyrir Hveragerðis og ráðhúsröð með stækkuðum legum. Hveragerðisröðin er vinstra megin og ráðhúsröðin hægra megin.

Færslur í endum haldast ekki í hendur með hreyfingum yfir millistöplum. Það getur valdið vandræðum þar sem kraftar geta byggst upp á milli undirstaða þar sem hreyfingar eru mismiklar. Einnig þarf að huga að hitaþenslum í endum.

Prófað var að hafa stífni leganna í enda og flotkraft í sama hlutfalli við áslægan kraft og í legum á millistöplum. Einnig var miðað við að gúmmíþykktin væri 165 mm svo að legurnar þoli hitaþenslur. Það gaf góða raun og hreyfingar verða þá jafnar í brúardekkinu eins og sést á mynd 5.5. Sama saga var fyrir aðrar tímaraðir og munur á mestu færslum á milli undirstaða var hverfandi eða 1 – 2 mm.

Fjórar legur voru notaðar á hvern millistöplum eins og áður en aðeins tvær á hvorn landstöplum þar sem þar þarf ekki jafn stífar legur. Sömu legur voru notaðar á öllum millistöplum og því gæti verið að legur á fyrstu millistöplum væru í hættu vegna hitaþenslna. Hægt er að fá hærri legur með sömu aflfræðilegu eiginleikum svo að jarðskjálftagreiningin myndi ekki endilega breytast þó legurnar yrðu hækkaðar.

Tafla 5-1 Kennistærðir blýgúmmílega.

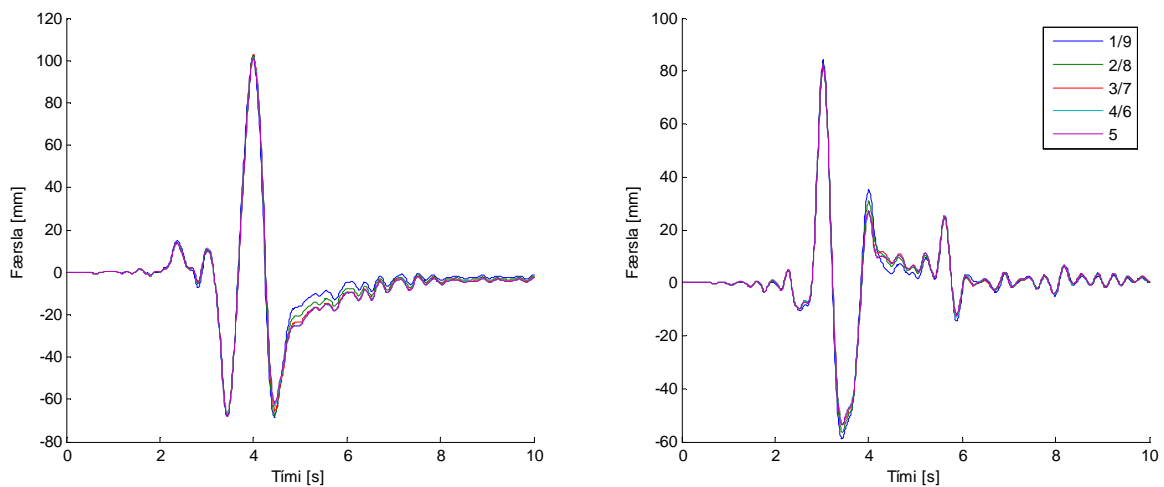
	Legur á millistöplum	Legur á landstöpli
Fjöldi lega	4	2
Lengd [mm]	800	700
Breidd [mm]	700	600
Hæð [mm]	175	255
Heildar þykkt gúmmís [mm]	105	165
Fjöldi gúmmíлага	7	11
Þvermál blýkjarna [mm]	175	100

Áslægur kraftur er nálægt því að vera fimm sinnum meiri á millistöplum heldur en landstöpli. Munurinn er svo mikill af þremur ástæðum: Þar sem brúardekkið er samfellt

yfir mörg höf er eðlilegt að undirstöðukraftar séu minni í endum en á millistöplum; fyrsta hafið er einungis 75% af lengd annarra hafa og þversnið deksins er stærra yfir millistöplum en á höfum. Stífni leganna á landstöpli er um fjórum sinnum stífni lega á landstöpli sé miðað við að fjölda lega. Flotstyrkurinn er hins vegar sex sinnum meiri og virðist það vinna hvort annað upp.

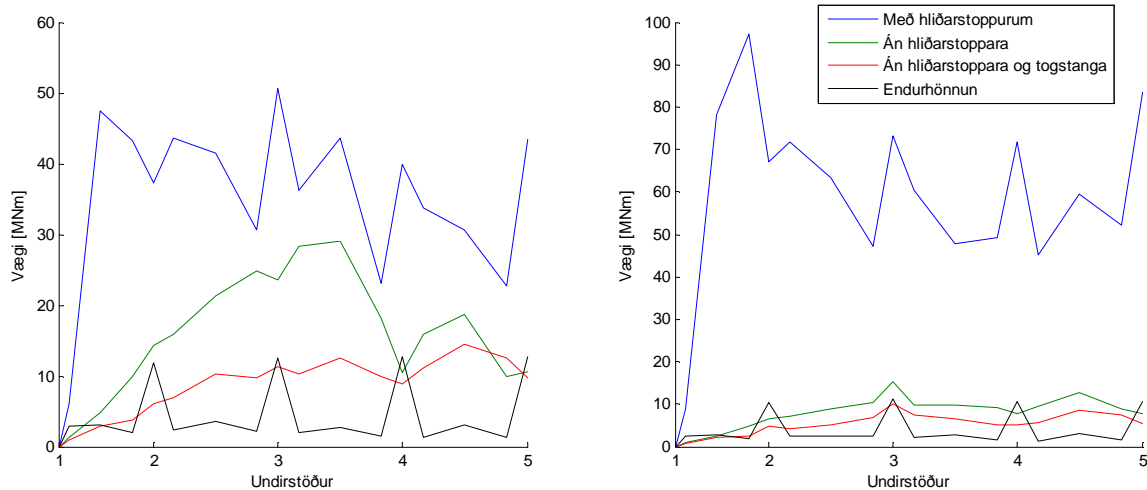
Tafla 5-2 Afþræðilegir eiginleikar einnar blýgúmmílegu á landstöpli og millistöplum.

	Upphafsstífni [MN/m]	Stífni eftir flot [MN/m]	Flotstyrkur [kN]
Legur á millistöplum	59,2	5,10	192
Legur á landstöpli	29,0	2,50	62,8



Mynd 5.5 Færslutímaraðir yfir undirstöðum 1-9 eftir endurhönnun á legukerfi fyrir Hveragerðis og ráðhús tímaraðir. Hveragerðisröðin er vinstra megin og ráðhúsröðin hægra megin.

Þar sem færslur eru samstíga í dekkinu má búast við að sniðkraftar séu litlir. Sú er líka raunin eins og sést á mynd 5.6 þar sem mesta vægið í brúardekkinu er borið saman við vægið úr brúnni með upprunalegt legukerfi. Vægið er minna eftir endurhönnun og sérstaklega á höfum en þar sem það er mest, yfir undirstöðum, er brúardekkið sterkast. Einnig sést að vægið er fyrst og fremst til komið vegna tregðukrafta og vægisdreifingin er þess vegna eins og vægisferill bita sem spannar mörg höf.



Mynd 5.6 Mesta vægi um lóðréttan ásinn í brúardekkinu fyrir Hveragerði og ráðhús. Hveragerðisröðin er vinstra megin og ráðhússtöðin hægra megin.

Virk stífni blýgúmmílega í FNA greiningunni var höfð 10% af upphafsstífni eins og kom í ljós að hentaði fyrir líkan án togstanga. Fyrir Hveragerðisröðina var munur á færslum reiknuðum með DI innan við 5% en DI skilaði meiri færslum en lægri sniðkröftum.

Færslur í langátt brúarinnar minnka við endurhönnunina. Þegar verri þættir Hveragerðis og ráðhúsraðar eru keyrðir í langátt brúarinnar verða mestu færslur 120 og 90 mm í stað 180 og 123 mm áður. Þar sem skemmdir urðu litlar vegna hreyfinga í langátt í jarðskjálftanum má gera ráð fyrir að þær yrðu það líka miðað við nýja legukerfið.

Lárétt hröðun brúardekksins er eftir breytingar ekki ósvipuð og með upprunalegu legunum en án stoppara eins og sést í töflu 5-3. Það er helst fyrir Hveragerðisröðina þar sem munurinn er mikill.

Tafla 5-3 Mesta lárétt hröðun brúardekks á hafi.

Staður	Með stoppum [g]	Án stoppara [g]	Endurhönnun [g]
Hveragerði	5,3	0,84	0,48
Ráðhús	8,3	0,46	0,42
Sjúkrahús	7,2	0,33	0,38

6 LOKAORÐ

Þrjár reikniaðferðir voru notaðar til þess að reikna svörun brúarinnar. Hefðbundin ólínuleg greining er sú aðferð sem talinn hefur verið áreiðanlegust og var lengi vel eina ólínulega greiningaraðferðin. Ólínuleg greining byggð á sveifluformum burðarvirkisins var einnig prófuð og bar aðferðunum ágætlega saman. Aðferðin er mun hraðvirkari sem er sérstaklega hentugt við hönnun þar sem hægt er að keyra líkanið oft á skömmum tíma. Virka stífni ólínulegra eininga þarf að velja og getur stífnin haft áhrif á niðurstöðurnar og verður að hafa það í huga. Höfundar SAP2000 hafa ekki sett fram neinar skýrar reglur um val á virkri stífni eininga en við greiningu á Óseyrarbrúnni kom í ljós að ef stífnin var valinn innan þeirra marka sem þeir þó setja eru skekkjur ásættanlegar.

Svörunarrófsgreining sem byggir á jafngildu línulegu líkani jarðskjálftalega var borin saman við ólínulegu greiningarnar. Einnar frelsisgráðu kerfi var notað til að ákvarða hreyfingar brúardekksins í langátt. Niðurstöður beggja greininganna voru mjög svipaðar, því er hægt að meta svörun brúarinnar í langátt með svörunarrófi. Við hreyfingar þvert á stefnu brúarinnar formbreytist dekkið og ekki er hægt að notast við einnar frelsisgráðu kerfi. Svörunarrófsgreiningin var þá framkvæmd með sveifluformum og svörunarrófinu var skipt upp eftir deyfingu sveifluformanna. Niðurstöðum þess bar ekki vel saman við ólínulegu greininguna.

Hröðunartímaraðir sem skráðar voru í Hveragerði og á Selfossi í Suðurlandsskjálftanum 29. maí 2008 voru notaðar við greiningu á brúnni. Þegar verstu stefnuþættir tímaraðanna voru settir þvert á brúarlíkanið komu reikningslega fram þær skemmdir sem urðu í jarðskjálftanum, þar sem hliðarveggir við enda brúardekks og stopparar á millistöplum brotnuðu. Betri stefnuþættirnir voru einnig settir þvert á brúna en þá urðu hreyfingar í þverátt mun minni. Skemmdir komu aðeins fram á hliðarveggjum landstöpla þegar Hveragerðisröðin var notuð. Líklegt er að verstu þættirnir hafi verkað á brúardekkið undir einhverju horni en án mælinga nær brúnni er erfitt að segja til um hvað það horn er.

Óstöðugleiki kom fram í líkaninu við árekstur stoppara líklega vegna mikillar breytingar í stífni kerfisins. Formbreytingar í brúnni urðu, eftir árekstur, ekki samhverfar um miðju eins og búast hefði mátt við fyrir samhverft líkan. Þetta sést ágætlega á mynd 4.7 þar sem einnig sést að lausnin er samt sem áður nálægt „réttri lausn“.

Tölvulíkanið var einnig keyrt án stoppara. Færslur urðu þá mestar um 280 mm í brúarendanum fyrir Hveragerðisröðina og alls staðar yfir 100 mm fyrir verstu þætti tímaraðanna. Mestu skúfstreitir í blýgúmmílegunum urðu nálægt 200% en blýgúmmílegurnar þola takmarkaðar formbreytingar og líklegt er að þær hefðu orðið fyrir skemmdum hefðu stoppararnir ekki takmarkað hreyfingar brúardekksins.

Kannað var hvað þyrfti að koma til svo að brúin gæti staðið af sér jarðskjálfta án þess að þurfa að treysta á stoppara til þess að takmarka hreyfingar. Útreikningar sýndu að minnka má hreyfingar brúarendans með því að skipta viðnámslegunum út fyrir blýgúmmílegur eða setja togstangir í enda. Formbreytingar í öðrum blýgúmmílegum minnkuðu hins vegar ekki við það og voru því yfir leyfilegum mörkum.

Leyfilegar formbreytingar í blýgúmmílegum eru háðar gúmmíþykkt þeirra. Með því að hækka legurnar má því auka leyfilegar formbreytingar. Blýgúmmílegunum var skipt út fyrir

hærri og stærri legur þannig að stífnin ykist jafnframt því að leyfilegar formbreytingar jukust. Færslurnar urðu þá innan leyfilegra marka fyrir þær tímaráðir sem voru notaðar í verkefninu. Með því að hafa stífni og flotstyrk blýgúmmíleganna alls staðar í sama hlutfalli við áslægan kraft vegna eiginþyngdar hreyfðist brúardekkið sem ein heild. Brúardekkið formbreytist því lítið og sniðkraftarnir urðu lægri og vægisdreifing í brúardekkinu betri en fyrir brúna með upprunalegu legukerfi.

HEIMILDIR

- Ambraseys, N., P. Smit, R. Sigbjörnsson, P. Suhadolc og B. Margaris 2001, „Internet-Site for European Strong-Motion Data.“, sótt 01.09 2008, <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk>.
- Benedikt Halldórsson og Ragnar Sigbjörnsson 2009, „The Mw 6.3 Earthquake at 15:45 UTC on 29 May 2008 in South Iceland: ICEARRAY strong-motion recordings“, *Soil dynamics and Earthquake Engineering*, DOI: 10.1016/j.soildyn.2008.12.006
- Bjarni Bessason 1992, „Assessment of Earthquake Loading and Response of Seismically Isolated Bridges“, Doktor Ingeniør, The University of Trondheim.
- Bjarni Bessason og Einar Hafliðason 2004, „Recorded and numerical strong motion response of base-isolated bridge“, *Earthquake Spectra*, 20, 309-332.
- Carr, A. J. 2001, *RUAMOKO, Program for inelastic dynamic analysis, 3-dimensional version, user manual*, University of Canterbury, New Zealand.
- Chopra, A. K. 2001, *Dynamics of Structures*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Computer and Structures, Inc., 2007, *CSI analysis reference manual*, Computer and Structures, Inc., Berkeley.
- Constantinou, M., A. Mokha og A. Reinhorn 1990, „Teflon bearings in base isolation. II: modelling“, *Journal of Structural Engineering*, 116, 2, 455-474.
- Cook, R. D., D. S. Malkus, M. E. Plesha og R. J. Witt 2002, *Concept and Application of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons. Inc.
- Douglas, J. 2003, „Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates.“, *Earth-Science Reviews*, 63, 43-104.
- Eibl, J. 1995, *Concrete Structures Euro-Design Handbook*, Ernst & Sohn.
- ENV 1998-2 1994, *Eurocode 8 - Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 2: Bridges*, European committee for standardization, Brussel.
- Gleit- und Lagertechnik *GLT Bauteile sicher auflagern*, Velbert.
- Jón Snæbjörnsson og Bjarni Bessason 2006, „Jarðskjálftagreining brúa á stauraundirstöðu“, *Árbók VFÍ/TFÍ*.
- Langen, I. og Ragnar Sigbjörnsson 1979, *Dynamisk analyse av konstruksjoner*, SINTEF, Trondheim.
- Larson, E. 2006, „Global centroid tensor moment catalog“, sótt 18. nóvember 2008, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- Megson, T. H. G. 2000, *Structural and stress analysis*, Butterworth Heinemann, Oxford.
- Naeim, F. og J. M. Kelly 1999, *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

- Newland, D. E. 1993, *An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis*, Longman, Harlow and Wiley, New York.
- Nielsen, M. P. 1999, *Limit analysis and concrete plasticity*, CRC Press, New York.
- prEN 1998-1 2003, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, European committee for standardization, Brussel.
- Priestley, M. J. N., F. Seible og G. M. Calvi 1996, *Seismic design and retrofit of bridges*, John Wiley & Sons, New York.
- Ragnar Sigbjörnsson, Jónas Þ. Snæbjörnsson, Benedikt Halldórsson og Símon Ólafsson 2008, Suðurlandskjálfti 29. maí 2008, Rannsóknarmiðstöð Háskóla Íslands í jarðskjálftaverkfræði.
- Ragnar Sigbjörnsson, Jónas Þ. Snæbjörnsson, S. M. Higgins, Benedikt Halldórsson og Símon Ólafsson (2008) "A note on the Mw 6.3 earthquake in Iceland on 29 May 2008 at 15:45 UTC." *Bull Earthquake Engineering*, 10.1007/s10518-008-9087-0: 10.1007/s10518-008-9087-0
- Ragnar Sigbjörnsson og Símon Ólafsson 2004, „On the south Iceland earthquakes in June 2000: strong-motion effects and damage“, *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 45, 131-152.
- Ragnar Sigbjörnsson, Símon Ólafsson og Jónas Þ. Snæbjörnsson 2007, „Macroseismic effects related to strong ground motion: a study of the South Iceland earthquakes in June 2000“, *Bull Earthquake Engineering*, 591-608.
- Sig. Jóns. 1988, Óseyrarbrú skal hún heita. *Morgunblaðið*. Reykjavík.
- Skinner, R. I., W. H. Robinson og G. H. McVerry 1993, *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Sørensen, S. I. 2005, *Betongkonstruksjoner*, Tapir akademisk forlag, Trondheim.
- Veðurstofa Íslands 2008, „Dægursveifla í júní“, sótt 13. janúar 2009, http://vedur.is/vedur/vedurfar/kort/ymis_gogn/daegursveifla/.
- Vegagerð ríkisins 1986, *Ölfusárós byggingarteikningar*.
- Wilson, E. L. 2002, *Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*, Computers and Structures, Berkley.
- Wilson, E. L., A. D. Kiureghian og E. P. Bayo 1981, „A replacement for the srss method in seismic analysis“, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 9, 187-192.