



Jarðskjálftagreining á samverkandi stálbitabrú

Nærsviðsáhrif við
Suðurlandsskjálftana 2000 og 2008

Jón Guðni Guðmundsson



**Umhverfis- og
byggingarverkfræðideild
Háskóli Íslands**

Jarðskjálftagreining á samverkandi stálbitabrú

Nærsviðsáhrif við
Suðurlandsskjálftana 2000 og 2008

Jón Guðni Guðmundsson

30 eininga ritgerð sem er hluti af
Magister Scientiarum gráðu í Byggingarverkfræðifræði

Leiðbeinendur
Bjarni Bessason, Háskóla Íslands
Einar Hafliðason, Vegagerðinni

Prófdómari / Fulltrúi deildar
Baldvin Einarsson

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, febrúar 2010

Jarðskjálftagreining á samverkandi stálbitabré - Nærsviðsáhrif við Suðurlandskjálftana
2000 og 2008
Jarðskjálftagreining á samverkandi stálbitabré

30 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í Byggingarverkfræði

Höfundarréttur © 2010 Jón Guðni Guðmundsson
Öll réttindi áskilin

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
VR II, Hjarðarhagi 2-6
107 Reykjavík

Sími: 525 4000

Skráningarupplýsingar:

Jón Guðni Guðmundsson, 2010, Jarðskjálftagreining á samverkandi stálbitabré -
Nærsviðsáhrif við Suðurlandskjálftana 2000 og 2008, meistararitgerð, Umhverfis- og
byggingarverkfræðideild, Háskóli Íslands, 63 bls.

Prentun: Háskólaprent ehf.
Reykjavík, febrúar 2010

ABSTRACT

In this paper a study of a composite steel-concrete arch bridge under earthquake load with special emphasis on near fault effects is presented. The new bridge over Þjórsá river, built in 2003, was chosen for the study. It is located in the South Iceland seismic zone where earthquakes of magnitude 7.0 can be expected. In this zone there are a lot of active seismic faults and the distance between them is relatively short. An effort was made to analyze near-fault effects in recorded time histories from the South Iceland earthquakes of 2000 and 2008. A simple method to add near-fault velocity pulses to far-fault time histories was introduced. A Finite Element model of the bridge was constructed, then recorded and simulated time series were used to study the effect of the near-field pulses. Work was done to study the effects of rotating the horizontal earthquake time series. This was carried out to test how much effect the direction of the earthquake fault has on the bridge. The main conclusion was that near-fault pulses greatly affected the response of the bridge and are likely to affect structures with long natural periods ($> 1s$).

ÚTDRÁTTUR

Verkefnið fjallar um greiningu á samverkandi stál-steypu bogabru með tilliti til jarðskjálftaáráunar með sérstaka áherslu á viðbótarálag sem myndast vegna nálægðar við upptök skjálfta og einkennist af sterkum hraðapúlsi. Brúin sem varð fyrir valinu sem viðfangsefni rannsóknar er nýja Þjórsárbrúin, sem var vígð árið 2003. Hún er staðsett á einu virkasta jarðskjálftasvæði Íslands, þar sem finna má mörg misgengi sem hafa hreyfst eftir landnám. Lögð var vinna í að skoða mældar tímaraðir frá Suðurlandsskjálftunum 2000 og 2008 þar sem leitað var eftir nærsviðshraðapúlsum og þeir greindir. Einnig var skoðuð einföld aðferð við að búa til nærsviðsáhrif með því að bæta við hraðpúlsi í tímaraðir sem ekki innihalda slík einkenni. Búið var til tölvulíkan af brúnni í einingaforriti og á það keyrðar mældar og tilbúnar nærsviðstímaraðir. Rannsakað var hversu mikil áhrif það hefur á svörun brúar að snúa álaginu og athuga þannig hvort það skiptir máli hvernig brú snýr miðað við stefnu misgengja í kring. Rannsóknin sýndi að nærsviðsáhrif skipta verulegu máli fyrir brýr með langan sveiflutíma ($> 1s$).

FORMÁLI

Við jarðskjálftaáráun geta brýr skemmst mikið og orðið nær ónothæfar. Það getur tekið langan tíma og verið mjög kostnaðarsamt að gera við þær. Það skiptir því miklu máli að við hönnunina sé notast við vel skilgreindar álagsforsendur. Getur það því skipt sköpum að jarðskjálftaálag á byggingarsvæðinu sé vel skilgreint í álagsforsendum.

Í þessu verkefni verður leitast við að skoða jarðskjálftaálag á brýr sem staðsettar eru nálægt virkum misgengjum. Gerð verður tilraun til að skilgreina þetta álag og athuga hvort það er nógu vel skilgreint í núgildandi stöðlum.

Verkefnið var styrkt af Rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar og fá aðstandendur sjóðsins kærar þakkir fyrir veittan stuðning.

Leiðbeinandi við gerð þessa verkefnis var prófessor Bjarni Bessason og vil ég þakka honum kærlega fyrir ómetanlega aðstoð. Einnig veitti mér góða aðstoð Einar Hafliðason hjá Vegagerðinni við verkefnið og vil ég færa honum kærar þakkir fyrir. Ég vil einnig þakka föður mínum Guðmundi Guðlaugsyni og móður minni Soffíu Björgu Sigurjónsdóttur fyrir yfirlestur, góðar ábendingar og mikinn stuðning.

EFNISYFIRLIT

1	Inngangur	1
1.1	Bakgrunnur	1
1.2	Markmið	2
1.3	Uppbygging	2
2	Almenn fræði	3
2.1	Almenn atriði um sveiflufræði	3
2.1.1	Lárétt hröðun/Jarðskjálftaálag á mannvirki	4
2.1.2	Frjáls sveifla og eigintíðni	5
2.1.3	Deyfni í frjálsri sveiflu	6
2.1.4	Rayleigh deyfni	7
2.1.5	Lausnir á hreyfijöfnunni	8
2.1.6	Hreyfijafnan fyrir fleiri en eina frelsisgráðu	9
2.1.7	Svörunarróf	12
2.2	Einingaaðferðin	13
2.3	Jarðskjálftaeinangrun	16
2.3.1	Blýfylltar gúmmílegur	18
2.4	Svörunarróf úr EC8 og UBC-97	18
2.4.1	Svörunarróf í Eurocode 8	19
2.4.2	Svörunarróf fyrir 1997 Uniform Building Code	20
2.5	Greiningar aðferðir sem notaðar voru í Sap2000	20
2.5.1	Hefðbundin ólínuleg greining	21
2.5.2	Hröð ólínuleg greining	23
3	Nærsviðsáhrif	25
3.1	Fræðikaflir	25
3.1.1	Skilgreining á nærsviðsáhrifum	25
3.1.2	Athuganir og rannsóknir	26
3.1.3	Stefnuáhrif	26
3.1.4	Tilbúnar tímaraðir með nærsviðáhrifum	27
3.2	Suðurlandsskjálftarnir 2000 og 2008	28
3.3	Staðsetning og stefna mælistöðva	30
3.4	Ákvörðun á hraðapúls í mældum tímaröðum	32

3.5	Athugun á svörunarrófum fyrir skjálftana	35
3.6	Samantekt á áhrifum	38
3.7	Hermun nærsviðsáhrifa.....	39
4	Jarðskjálfta greining í sap2000	41
4.1	Nýja Þjórsárbrúin.....	41
4.2	Uppsetning á líkaninu í Sap2000	43
4.2.1	Tímaraðir sem notaðar voru	45
4.3	Eigintíðnir og næmnigreining.....	45
4.3.1	Eigintíðnir og sveifluform líkansins.....	45
4.3.2	Samanburður á greiningaraðferðum.....	46
4.4	Tölulegar niðurstöður	48
4.4.1	Keyrslur fyrir raunveruleg gögn.....	48
4.4.2	Keyrslur fyrir raunveruleg gögn snúin um 90°	49
4.4.3	Keyrslur fyrir tilbúnar tímaraðir.....	50
4.4.4	Niðurstöður og samantekt	52
4.4.5	Samantekt.....	56
5	Lokaorð.....	57
	Heimildir.....	59
	Viðauki A: Gögn fyrir athugun á stefnuáhrifum	61

MYNDALISTI

Mynd 1-1 Nýja Þjósárbrúin	1
Mynd 2-2 Rammi með tveimur innspantum súlum og punktmassa í miðjunni	3
Mynd 2-1 Innspentur massalaus turn með punktmassa efst.....	3
Mynd 2-3 Munurinn á yfir- undir- og krítiskri deyfingu (Chopra, 2001).....	7
Mynd 2-4 Hlutfall deyfni af krítiskri deyfni sem hlutfall af tíðni	8
Mynd 2-5 Rammi á tveimur hæðum með mismunandi stífni og massa.....	9
Mynd 2-6 Tímaröð fyrir ákveðnar mældar færslur (Chopra, 2001).....	12
Mynd 2-7 Sörunrróf fyrir 2% deyfni fyrir tímaröðina hér á undan, a) er fyrir 0.5 sec, b) fyrir 1.0 sec og c) fyrir 2.0 sec. (Chopra, 2001).....	13
Mynd 2-8 Mannvirki með hliðarálagi sem búið er að skipta upp í einingar (Ottosen og Petersson, 1992)	14
Mynd 2-9 Tveggja frelsisgráðukerfi með jarðskjálftaeinangrun (Naeim og Kelly, 1999)	17
Mynd 2-10 Svörunrróf fyrir hönnun með EC8	19
Mynd 2-11 Sörunrróf fyrir hönnun með UBC-97	20
Mynd 3-1 Stefnuáhrif fyrir sniðgengi skoðað hornrétt á misgengi (Howard, o.fl., 2005) (FN: fault normal)	27
Mynd 3-2 Staðsetning og misgengi skjálftanna árið 2000 (Ragnar Stefánsson, o.fl., 2000)..	29
Mynd 3-3 Staðsetning og misgengi skjálftans árið 2008 (B. Halldórsson og R.Sigbjörnsson, 2009)	29
Mynd 3-4 Staðsetning skjálfta og mælistöðva	31
Mynd 3-5 Stefnur mælistöðva	31
Mynd 3-6 Hágildi hraðasveiflu á tímaröð hraða, tímaröðin er frá Þjósárbrú 21. júní 2000	32
Mynd 3-7 Hraða í langátt á móti hraða í þverátt og stefna hraða (Þjósárbrú, vestari stöpull 21.06.2000).....	33
Mynd 3-8 Hraðatímaröð í stefnu hraðapúlsins fyrir tímaraðirnar við Þjósárbrú	34
Mynd 3-9 Misgengi, upptök skjálfta og stefnur hraðapúlsa við athugunarstöðvar.....	34
Mynd 3-10 Stefnur mestu hraðapúlsanna í gögnunum.	35
Mynd 3-11 Svörunarróf fyrir skjálftann 21.06.00 við Þjósárbrú með hönnunarrófum.....	35
Mynd 3-12 Svörunarróf fyrir skjálftann 29.05.08 við Hveragerði með hönnunarrófum.....	36
Mynd 3-13 Svörunarróf fyrir skjálftann 29.05.08 á Selfossi með hönnunarrófum	36
Mynd 3-14 Svörunarróf fyrir skjálftann 17.06.00 við Hellu með hönnunarrófum	37
Mynd 3-15 Svörunarróf fyrir skjálftann 21.06.00 við Þjósárbrú við austari stöpul	38
Mynd 3-16 Hermun með gögnum fyrir Hellu 21. júní 2000, til vinstri eru hraða- tímaraðirnar en til hægri hröðunar-tímaraðirnar.....	40
Mynd 3-17 Hermun með gögnum fyrir Þjósárbrú 29. maí 2008, til vinstri eru hraða- tímaraðirnar en til hægri hröðunar-tímaraðirnar.....	40
Mynd 4-1 Teikning af Þjósárbrúna (Vegagerðin, 2002).....	41

Mynd 4-2 Þversnið í Þjórsárbrúna (Vegagerðin, 2002)	41
Mynd 4-3 Teikning af landstöpli austari megin (Vegagerðin, 2002).....	42
Mynd 4-4 Teikning af legum (gerð 1) sem eru á stöplunum (Vegagerðin, 2002).....	42
Mynd 4-5 Steypuþversnið brúardekksins og stálbitanna fyrir brúna (Vegagerðin, 2002)....	43
Mynd 4-6 Tölvulíkan af Nýju Þjórsárbrúnni í þrívídd tekið úr Sap2000.....	44
Mynd 4-7 Fyrsta sveifluformið (horft er ofan á brúargólfið).....	46
Mynd 4-8 Þriðja sveifluformið (horft á brúna á hlið)	46
Mynd 4-9 Færslur yfirbyggingarinnar fyrir sitthvora greininguna, horft ofan á brúna.....	47
Mynd 4-10 Færslur í y-stefnu í yfirbyggingu í vestari enda brúarinnar sem fall af tíma fyrir tímaröð 1 í töflu 4.3	48
Mynd 4-11 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðir 1-5, horft er ofan á yfirbyggingu brúarinnar	49
Mynd 4-12 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðir 1-5 búið að snúa þeim um 90°, horft er ofan á yfirbyggingu brúarinnar.....	50
Mynd 4-13 Svörunarróf fyrir skjálftann við Hellu bæði með og án hraðapúlsi.....	51
Mynd 4-14 Færslur í yfirbyggingu brúarinnar fyrir mismunandi gerðir af hraðapúlsum.....	51
Mynd 4-15 Vægisdreifing í yfirbyggingu um y-ás brúarinnar fyrir skjálftann við Selfoss.....	52
Mynd 4-16 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðir 1-5 og sömu tímaraðir snúið um 90°.....	53
Mynd 4-17 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðirnar á móti ákafastuðlinum, I _a	53
Mynd 4-18 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðirnar á móti styrkleikastuðlinum, SI	54
Mynd 4-19 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðirnar á móti hámarks jarðhröðun, PGA.....	55
Mynd 4-20 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðirnar á móti hámarks jarðarhraða, PGV	55
Mynd A-1: Stefna hraðapúlsins og hraða tímaraðir fyrir báðar átt (Hellu 17 júní 2000)	61
Mynd A-2: Tímaröð fyrir hraðapúlsinn (Hellu 17 júní 2000).....	61
Mynd A-3: Stefna hraðapúlsins og hraða tímaraðir fyrir báðar átt (Hveragerði 29 maí 2008).....	62
Mynd A-4: Tímaröð fyrir hraðapúlsinn (Hveragerði 29 maí 2008).....	62
Mynd A-5: Stefna hraðapúlsins og hraða tímaraðir fyrir báðar átt (Selfoss 29 maí 2008).....	63
Mynd A-6: Tímaröð fyrir hraðapúlsinn (Selfoss 29 maí 2008)	63

TÖFLULISTI

Tafla 3.1 Niðurstöður b-stuðla fyrir valdar stærðir	28
Tafla 3.2 Tölulegar upplýsingar um skjálftanna.....	30
Tafla 3.3 Fjarlægð mælistöðva frá sprungum og upptökum	30
Tafla 3.4 Lárétt hágildishröðun eftir staðsetningu og skjálfta.....	32
Tafla 3.5 Stefna og sveiflutími fyrir hraðapúlsanna auk hágildum og lágildum hraðans ...	33
Tafla 3.6 Styrkleikastuðull fyrir skjálfta og staðla, einnig hámarks jarðhröðun	39
Tafla 3.7 Ákafastuðull fyrir skjálfta og staðla, einnig hámarks jarðhraði.....	39
Tafla 4.1 Efnistuðlar þeirra efna sem notuð voru.....	43
Tafla 4.2 Stærðir fyrir jarðskjálftalegur.....	44
Tafla 4.3 Upplýsingar um tímaraðir	45
Tafla 4.4 Sveifluform og eiginsveiflutími þeirra ásamt summu af massanotkun.....	46

1 INNGANGUR

1.1 Bakgrunnur

Suðurlandsjarðskjálftarnir árið 2000 áttu báðir upptök sín nálægt nýju Þjórsárbrúnni, þó sérstaklega skjálftinn 21. júní. Við hönnun brúarinnar árið 2002 var tekið tillit til þessara skjálfta. Þegar skjálftarnir riðu yfir má ætla að einhver nærsviðsáhrif hafi komið fram. Nærsviðsáhrif eru lítt skoðað fyrirbæri á Íslandi og í fleiri löndum þó slík fyrirbæri hafa eitthvað verið skoðuð, til að mynda í Japan og í Bandaríkjunum. Oft er talað um að nærsviðsáhrif komi fram þegar mannvirki er innan við 15 km frá sprungum og til að mynda tekur bandaríski byggingarstaðallinn (1997 Uniform Building Code) tillit til þessa. Á jarðskjálftasvæðinu Suðurlandi, SISZ (South Iceland Seismic Zone) eru mörg misgengi og frekar stutt á milli sprunga, svo ætla má að einhverskonar nærsviðsáhrif komi fram í gögnum fyrir skjálfta á þessu svæði. Til að rannsaka nærsviðsáhrif og hvaða þýðingu þau hafa fyrir mannvirki er gagnlegt að skoða nýju Þjórsárbrúna vegna þess hversu nálægt hún er misgengjunum frá árinu 2000 og einnig sú staðreynd að til eru skráð gögn frá mælistöðvum nálægt brúnni. Hún er því kjörin í þetta verkefni. Einnig eru nokkrir aðrir mælistaðir á Suðurlandi góðir í þessu sambandi svo sem Hveragerði og Selfoss eftir skjálftann 2008. Líklegt verður að telja að nærsviðsáhrif sjáist á gögnum frá þessum stöðum vegna nálægðar þeirra við upptök skjálftans og því tilvalið að rannsaka þau með 2000 gögnunum.



Mynd 1-1 Nýja Þjórsárbrúin

1.2 Markmið

Meginmarkmið þessa verkefnis er að framkvæma jarðskjálftagreiningu á nýju Þjósárbrúnni til að rannsaka hversu íþyngjandi nærsviðsáhrif eru fyrir svörun hennar og fyrir brúarmannvirki af svipaðri gerð. Ennfremur verður athugað hvaða áhrif mismunandi stefnur jarðskjálftaáraunanna hafa á brúna. Til þess að skoða þessa þætti verða notaðar tímaraðir sem skráðar voru við gömlu Þjósárbrúna og á völdum stöðum á Suðurlandi í jarðskjálftunum 2000 og 2008. Þessir skjálftar voru valdir vegna þess hversu stórir þeir eru og hversu nýleg og áreiðanleg mæligögn eru til fyrir þá. Einnig verða nærsviðsáhrif þessara skjálfta borin saman við gögn erlendis frá, þar sem greinilegt er að nærsviðsáhrifa gætir. Markmiðið er að komast að því hversu mikil og kröftugleg þessi áhrif eru á Íslandi. Einnig verður lýst stærðfræðilegu líkani sem nota má til að bæta inn nærsviðsáhrifum í tímaraðir sem skráðar eru fjarri upptökum.

1.3 Uppbygging

Í öðrum kafla verður farið yfir ýmis fræðileg atriði sem við koma greiningu á jarðskjálftasvörun mannvirkja. Farið verður yfir helstu atriði í sveiflufræði og fræðin á bakvið svörunarróf. Skoðuð verða hönnunarrófin úr evrópska jarðskjálftastaðlinum, Eurocode 8 (European committee for standardization, 2003) hér eftir nefndur EC8 og úr bandaríska staðlinum Uniform Building Code (International Conference of Building Officials, 1997) hér eftir nefndur UBC-97. Einnig verður fjallað um einingaaðferðina, jarðskjálftalegur og þær greiningaraðferðir sem notaðar eru í verkefninu.

Í þriðja kafla eru nærsviðsáhrif skoðuð sérstaklega. Fyrirbærið verður útskýrt og helstu einkennum lýst. Athuguð verða stefnuáhrif hraða-tímaraða miðað við stefnur misgengja. Einnig verða skoðuð svörunarróf og hvernig áhrif nálægðar við upptökin hafa á þau. Settir verða fram stuðlar til að bera saman við færslur í tölvulíkaninu til að greina hvað hefur mest áhrif á mannvirkid. Í lok kaflans verður sýnd aðferð til að búa til tímaraðir með nærsviðsáhrifum með því að breyta tímaröðum, sem skráðar hafa verið í meira en 20 km fjarlægð frá upptökum. Í stuttu máli felst aðferðin í því að bæta inn í raðirnar hraðapúlsi sem er einkennandi fyrir nærsviðstímaraðir.

Í fjórða kafla er farið yfir þá greiningu sem var gerð á nýju Þjósárbrúnni með hjálp Sap2000 (CSI, 2007) einingaforrítsins. Fyrst í kaflanum er brúnni og uppbyggingu hennar lýst. Farið yfir helstu hönnunarþætti svo sem hvernig ákveðnir hlutar hennar eru færðir inn í líkanið, svo sem eins og yfirbygging hennar. Þá er fjallað um tímaraðirnar og þau gögn sem notuð voru til að keyra á líkanið. Rætt er um eigintíðnir og sveifluform sem komu fram við eiginsveiflureiningu. Einnig er skoðaður munur á greiningaraðferðum sem hægt er að nota í Sap2000 og gerð næmnigreining. Í lokin eru svo sýndar niðurstöður og farið yfir þær fyrir mismunandi skilyrði. Loks er samantekt á niðurstöðum og umræða.

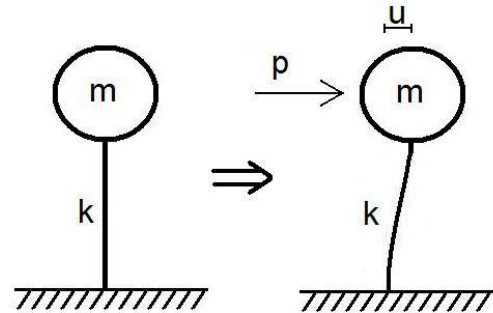
Í fimmta kafla er verkefnið rætt í heildina og ákveðin atriði greind nánar og rannsóknarniðurstöður skoðar sem merkilegar þóttu. Talað verður um hvernig þær geta komið við brúarhönnun á Íslandi og hvort og þá hvernig væri mögulega hægt að miða hönnun brúa að einhverju leyti við þær í framtíðinni.

2 ALMENN FRÆÐI

Í þessum kafla er fyrst farið yfir helstu atriði í sveiflufræðum, sem eru grunnur að því að geta gert greiningu á brúnni með þar til gerðum forritum. Einnig er fjallað um svörunarróf og hvernig þau eru uppbyggð. Farið er yfir einingaaðferðina (e. Finite element method FEM) og hvernig hægt er að beita henni. Þá er umfjöllun um jarðskjálftaróf í evrópska jarðskjálftastaðlinum EC8 og í bandaríska staðlinum UBC-97. Skoðað verður hvernig jarðskjálftaeinangrun virkar og í lokin verður farið yfir þær greiningaraðferðir sem hægt er að nota í Sap2000, einingaforrit sem notað er í verkefninu (CSI, 2007). Þar verður farið í hefðbundnu ólínulegu greininguna (e. Direct integration) og hröðu ólínulegu greininguna (e. Fast non-linear analysis, FNA).

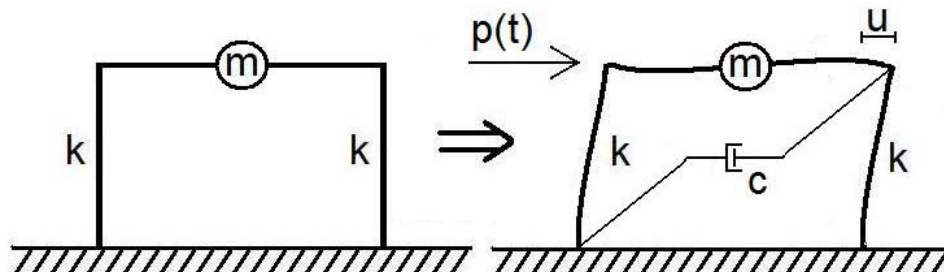
2.1 Almenn atriði um sveiflufræði

Hér verður farið yfir helstu atriði í sveiflufræðum sem snúa að jarðskjálftagreiningu burðarvirkja. Notast er að mestu leyti við efni úr (Chopra, 2001) um sveiflugreiningu. Til að byrja þessa umfjöllun verður farið yfir einnar frelsisgráðukerfi, þar sem skoðaður verður massalaus turn sem er innspenntur í annan endann og með punktmassa í hinum, sjá mynd 2-1. Slíkt kerfi er kallað sveifill. Skilgreinum stífnina k fyrir turninn og táknum punktmassann með m . Látum nú láréttan kraft verka á massann sem veldur færslunni u . Kraftajafnvægi kerfisins má tákna sem:



$$p = F_S = ku \quad (2-1) \quad \text{Mynd 2-1 Innspentur massalaus turn með punktmassa efst}$$

Hér er krafturinn sem verkar á turninn táknaður með p og stífnikraftur stangarinnar sem heldur á mótí táknaður með F_S . Til að breyta þessu í hreyfifræðilegt ástand þarf krafturinn að breytast með tíma. Til að útskýra þetta skulum við skoða ramma, sjá mynd 2-2.



Mynd 2-2 Rammi með tveimur innspenntum súlum og punktmassa í miðjunni

Ramminn er byggður upp af tveimur innspenntum súlum sem eru tengdar saman með bita sem hefur punktmassa í miðjunni. Á rammann virkar krafturinn $p(t)$ sem veldur færslunni $u(t)$. Mótstöðu kraftarnir í kerfinu eru stífnikrafturinn F_S og deyfnikrafturinn F_D . Notumst

við annað lögmál Newtons stundum kallað kraftalögmál Newtons og stillum upp kraftajafnvægi:

$$p(t) - F_S - F_D = m\ddot{u} \quad (2-2)$$

sem leiðir af sér hreyfijöfnuna með því að setja F_S úr jöfnu (2-1) inn í jöfnu (2-2):

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2-3)$$

og deyfikrafturinn $F_D = c\dot{u}$ þar sem c er svokallaður deyfnistuðull fyrir línulega deyfingu, \dot{u} er hraði og \ddot{u} hröðun. Til að útfæra þetta fyrir ólínulegt kerfi þá verður hreyfijafnan:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_S(u, \dot{u}) = p(t) \quad (2-4)$$

Þar sem fallið f_S er stífnifall fyrir ólínulegt kerfi og er bæði háð færslu og hraða (Chopra, 2001).

2.1.1 Lárétt hröðun/Jarðskjálftaálag á mannvirki

Á svæðum þar sem mikið er um jarðskjálfta er eitt aðalverkefni verkfræðinga að skoða hegðun mannvirkja m.t.t jarðskjálftaálags. Í þessum kafla verður litið stuttlega yfir það hvernig hægt er að leiða þetta álag út fyrir hreyfijöfnuna. Látum nú lárétta hröðun verka á undirstöður rammans í mynd 2-2, við þetta verður færsla bæði við undirstöðu og efst í rammanum. Færslu í undirstöðunum skulum við gefa táknið $u_g(t)$ og efst $u^t(t)$. Þessar færslur má tengja saman í jöfnunni:

$$u^t(t) = u(t) + u_g(t) \quad (2-5)$$

Hér er u^t heildarfærsla mannvirkisins í efsta punkti frá upphafsstöðu og u ef afstæð færsla rammans miðað við undirstöðu eins og áður var skilgreint. Hreyfijöfnuna fyrir rammann má rita sem:

$$m\ddot{u}^t + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2-6)$$

þar sem enginn annar utanað komandi kraftur verkar á kerfið nema jarðskjálftahröðun. Nú þarf einungis að taka aðra afleiðu af jöfnu (2-5) og setja inn í jöfnu (2-6) og af því leiðir:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2-7)$$

Er þá hægt að gefa jarðskjálftaálaginu virkan kraft p_{eff} einungis út frá gefinni hröðun fyrir jarðskjálfta:

$$p_{eff}(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2-8)$$

Þetta er svo hægt að útfæra fyrir ólínulegt kerfi með því einungis að skipta út $F_s = ku$ með fallinu f_s sem kom fram í jöfnu (2-4) þar sem fallið f_s er óháð hröðun (Chopra, 2001).

2.1.2 Frjáls sveifla og eigintíðni

Í ódeyfðri frjálstri sveiflu verður hreyfijafnan eftirfarandi:

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (2-9)$$

Frjáls sveifla verður þegar eitthvað kemur hreyfingu á kerfi sem er í stöðufræðilegu jafnvægi, eins og þegar turninn á mynd 2-1 er dreginn út og honum svo sleppt. Þ.e.a.s. kerfinu er einungis gefin upphafsútbeygja og upphafshraði:

$$u = u(0) \quad \dot{u} = \dot{u}(0) \quad (2-10)$$

svo eftir að turninum er sleppt án nokkurs álags þá leitast kerfið við að komast í jafnvægi. Leysum jöfnu (2-9) og notum upphafsskilyrðin hér að ofan:

$$u(t) = u(0) \cos \omega_n t + \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t \quad (2-11)$$

þar sem ω_n er skilgreint sem:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-12)$$

Af þessari jöfnu er svo hægt ákvarða grunnsveiflutíma virkisins:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (2-13)$$

Og af þessu má svo leiða eigintíðni virkisins sem er:

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (2-14)$$

En ω_n kallast hringeigintíðni. Í rauninni má kalla bæði f_n og ω_n eigintíðnir virkisins (Chopra, 2001).

2.1.3 Deyfni í frjálstri sveiflu

Til að innleiða deyfni inn í einar frelsisgráðukerfi í frjálstri sveiflu er skoðuð jafna (2-3) og þar sem $p(t) = 0$, verður jafnan:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2-15)$$

Ef deilt er í gegn með massanum m fæst:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad (2-16)$$

Þar sem ω_n er eigintíðni kerfisins eins og skilgreint í jöfnu (2-12) og:

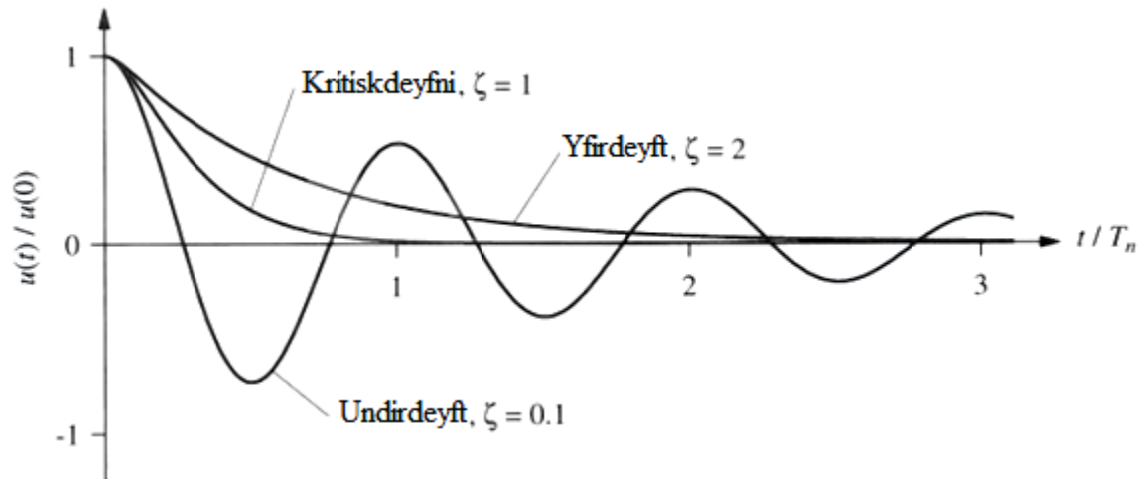
$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (2-17)$$

Þar sem c_{cr} er svokallað deyfnihlutfall kerfisins, skilgreint sem hlutfall af krítískri deyfni:

$$c_{cr} = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega_n} \quad (2-18)$$

Ef við gefum kerfinu einungis upphafsútbeygju og upphafshraða, sjá jöfnu (2-10), koma fram 3 mismunandi deyfnitilfalli (sjá einnig mynd 2-3):

- Ef $c = c_{cr}$ ($\zeta = 1$) er talað um krítískt deyfnihlutfall, þar sem kerfið nær jafnvægi með tíma hratt án sveiflu.
- Ef $c > c_{cr}$ ($\zeta > 1$) er talað um að kerfið sé yfirdeyft, þar sem kerfið nær jafnvægi strax án sveiflu en það tekur lengri tíma að ná jafnvægi en þegar kerfið er í krítísku deyfnihlutfalli.
- Ef $c < c_{cr}$ ($\zeta < 1$) er talað um að kerfið sé undirdeyft og sveiflast það þá með tíma þangað til það nær jafnvægi, kerfið er þó töluvert lengi að ná jafnvægi.



Mynd 2-3 Munurinn á yfir- undir- og krittiskri deyfingu (Chopra, 2001)

Ástæðan fyrir því að talað er um krittískt deyfnihlutfall er vegna þess að það er minnsta hlutfall sem leyfir kerfinu að fara beint í jafnvægi án sveiflu. Það skilgreinir því mörkin á milli þess að kerfið sveiflast eða sveiflast ekki. Leysum nú jöfnu (2-16) fyrir undirdeyft kerfi með sömu upphafsskilyrði og í jöfnu (2-10) og fáum:

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[u(0) \cos \omega_D t + \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \sin \omega_D t \right] \quad (2-19)$$

Þar sem ω_D er:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2-20)$$

Deygni veldur því að eigintíðni kerfisins minnkar úr ω_n í ω_D og hækkar eiginsveiflutímamann úr T_n í T_D . Þessi áhrif eru hverfandi þegar deyfnihlutfallið er undir 20% og er því hægt að gera ráð fyrir að $\omega_D = \omega_n$ þegar hlutfallið er undir því. Venjuleg mannvirki hafa deyfnihlutfall á bilinu 0-20% og má því gera ráð fyrir að eigintíðnin breytist ekki við að innleiða deygni. Við hönnun mannvirkja er algengt að nota 5% deyfnihlutfall. (Chopra, 2001)

2.1.4 Rayleigh deygni

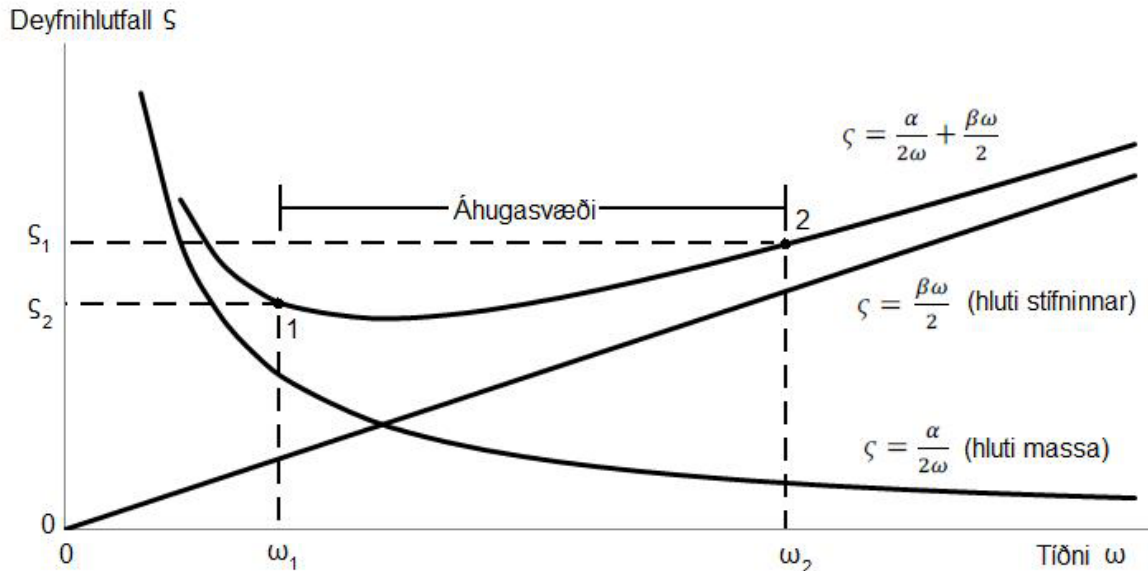
Rayleigh deygni er það kallað þegar deyfnifylkið c í margra frelsisgráðu kerfi er lýst sem hlutfalli af massafylkinu m og stífifylkinu k :

$$c = \alpha m + \beta k \quad (2-21)$$

Þessi jafna gerir deyfnina háða tíðni. skoðum þetta fyrir einnar frelsisgráðu kerfi, sem gefur:

$$\frac{1}{m}(\alpha m + \beta k) = 2\zeta\omega \quad \text{sem gefur} \quad \zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega} + \beta\omega \right) \quad (2-22)$$

Með því að velja tíðnir á því bili sem áhugi er á, er hægt að ákvarða ζ , sjá mynd 2-4



Mynd 2-4 Hlutfall deyfni af kritískri deyfni sem hlutfall af tíðni

Og nú er einfaldlega hægt að finna stuðlana með eftirfarandi jöfnum:

$$\alpha = 2\omega_1\omega_2 (\zeta_1\omega_2 - \zeta_2\omega_1)/(\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (2-23)$$

$$\beta = 2 (\zeta_2\omega_2 - \zeta_1\omega_1)/(\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (2-24)$$

Mikilvægur þáttur í þessu er að sveifluformin verða þverstöðluð miðað við C . Af þessari ástæðu er hægt að breyta jöfnuhneppinu í óháðar diffurjöfnur eins og talað er um í kafla 2.1.6. Meira um þetta má finna á bls 390 í (Cook, o.fl., 2002).

2.1.5 Lausnir á hreyfijöfnunni

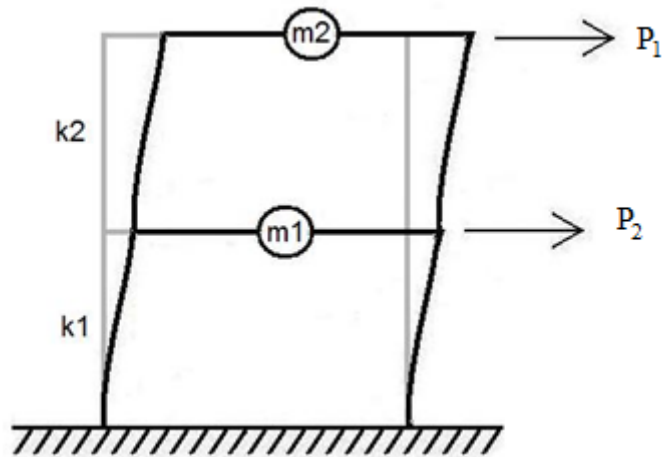
Vel þekkt lausn á hreyfijöfnunni (jafna(2-3)) er svo kallað Duhamels heildi fyrir einnar frelsisgráðu kerfi. Lausnin byggir á því að lýsa kraftinum sem verkar á kerfið sem röð óendanlega lítilla og stuttra kraftpúlsa. Svo er svörun kerfisins fyrir ákveðinn kraft $p(t)$ á tíma t fundin með því að safna saman svörunum fyrir alla púlsana upp að þeim tíma. Duhamels heildinu er lýst á eftirfarandi hátt:

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_n} \int_0^t p(\tau) \sin[\omega_n(t - \tau)] d\tau \quad (2-25)$$

Hér er ω_n eigintíðni kerfisins. Duhamels heildið gefur lausn á lokuðu formi ef að kraftinum $p(t)$ er lýst með fáguðu einföldu falli. Fyrir flókin tilfelli þar sem kraftinum $p(t)$ er lýst tölulega fyrir hvert tímaskref er hægt að leysa Duhamels heildið með tölulegum aðferðum. Til frekari útskýringar á þessu, klassísku aðferðinni og svokallaðri tíðni-rúms aðferð (e. Frequency-Domain Method) er vísað í (Chopra, 2001).

2.1.6 Hreyfijafnan fyrir fleiri en eina frelsisgráðu

Til að innleiða kerfi sem inniheldur fleiri en eina frelsisgráðu skulum við taka rammann á mynd 2-2 og bæta við hæð ofan á hann og þar með er komið tveggja frelsisgráðu kerfi. Til að einfalda kerfið eru hæðirnar sjálfar í rammanum nálgaðar sem fullkomlega stífar og síðan látum við hverja hæð einungis hafa einn stífnistuðul, þar sem k_1 er sameignleg stífni súlnanna á hæð 1 og k_2 fyrir hæð 2, sjá mynd 2-5. Sama gildir um deyfni, þar sem einnig er einn stuðull fyrir hana á hverri hæð.



Mynd 2-5 Rammi á tveimur hæðum með mismunandi stífni og massa

Innleiðum nú jöfnu (2-3) fyrir margra frelsisgráðu kerfi og verður jafnan þannig:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{f}_D + \mathbf{f}_S = \mathbf{p}(t) \quad (2-26)$$

Þar sem feitletruðu stafirnir merkja fylki eða vigra, hér er \mathbf{m} massafylkið og $\mathbf{f}_D, \mathbf{f}_S, \mathbf{p}(t)$ eru kraftavigrar. Setjum nú upp kraftajafnvægisjöfnur fyrir kerfið:

$$m_1\ddot{u}_1 + f_{D1} + f_{S1} = p_1$$

$$m_2\ddot{u}_2 + f_{D2} + f_{S2} = p_2$$

Þar sem:

$$f_{S1} = k_1 u_1 + k_2 (u_1 - u_2)$$

$$f_{S2} = k_2 (u_2 - u_1)$$

og

$$f_{D1} = c_1 \dot{u}_1 + c_2 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2)$$

$$f_{D2} = c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1)$$

Af þessu má leiða og frá jöfnu (2-26):

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}_S = \begin{bmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \mathbf{k}\mathbf{u}$$

$$\mathbf{f}_D = \begin{bmatrix} f_{D1} \\ f_{D2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}}$$

Þar sem \mathbf{m} er massafylkið, \mathbf{k} er stífufylkið og \mathbf{c} er deyfufylkið fyrir heildarkerfið. Þetta gefur að jafna (2-26) verður:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{p}(t) \quad (2-27)$$

Þar með er búið að leiða út aðferð með fylkjareikningi til að vinna úr gögnum fyrir fleiri en eina frelsisgráðu og einungis þarf að bæta við dálkum og línum við fylkin þegar frelsisgráðu er bætt við. Þetta er auðvelt að sýna fram á, sjá (Chopra, 2001). Auðséð er að ekki er hægt að leysa jöfnu (2-27) nema leysa út fyrir allar frelsisgráðurnar.

Til að nota þessa jöfnu í hreyfifræðum verðum við að geta leyst út þær eigintíðnir sem tilheyra kerfinu. Þær eru jafn margar og frelsisgráður kerfisins. Skoðum nú margra frelsisgráðu kerfi í frjálstri sveiflu og gefum því N fjölda frelsisgráða. Jafna (2-27) verður þá eftirfarandi:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (2-28)$$

Eins og sést er deyfningin sleppt og enginn kraftur verkar á kerfið. Kerfinu má gefa einhverja upphafsútbeygju og upphafshraða, til að framkalla frjálssa sveiflu:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(0) \quad \dot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{u}}(0) \quad (2-29)$$

Til að finna eigintíðnir og eiginsveifluform kerfisins verður að leysa eigingildisverkefni. Fyrst er færslu kerfisins lýst stærðfræðilega:

$$\mathbf{u} = \phi_n q_n(t) \quad (2-30)$$

Þar sem ϕ_n er sveifluform kerfisins og er fall sem er óháð tíma, $q_n(t)$ er svo tímaháð breyting færslunnar lýst með þýðu falli:

$$q_n(t) = A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t \quad (2-31)$$

Með einfaldri diffrun er hægt að leiða út og setja jöfnu (2-30) inn í jöfnu (2-28) og þá fæst:

$$[\mathbf{k}\phi_n - \omega_n^2 \mathbf{m}\phi_n]q_n(t) = \mathbf{0} \quad (2-32)$$

Með einföldum hætti er hægt að sýna fram á að jafna (2-32) getur einungis verið leyst á tvo vegu. Annað hvort er:

$$[\mathbf{k} - \omega_n^2 \mathbf{m}]\phi_n = \mathbf{0} \quad (2-33)$$

eða $q_n(t) = 0$ sem gæfi til kynna að færslurnar væru engar sem lítill áhugi er á að skoða eitthvað frekar. Nú ef $\phi_n = 0$ gefur það til kynna að um enga hreyfingu sé að ræða og þetta er líka lítt áhugaverð lausn, svo af þessu leiðir:

$$\det[\mathbf{k} - \omega_n^2 \mathbf{m}] = 0 \quad (2-34)$$

Með þessu er búið að stilla upp eigingildisverkefni til að finna eigintíðnir kerfisins Til að ákvarða eiginsveifluform er hægt að nota jöfnu (2-33), með því að setja inn fyrir eigintíðnirnar og leysa út fyrir ϕ_n . Hafa verður þó í huga að ekki er fundin bein lausn á eiginvigrunum ϕ_n heldir vitum við einungis lögum þeirra og þarf því að velja eitt gildi og hin gildin innan vigursins skalast svo samkvæmt því. Oft er fyrsta gildið valið sem einn.

Skilgreinum nú NxN fylki sem inniheldur alla eiginvigna:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \cdots & \phi_{NN} \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

Hér skilgreinist hver dálkur sem einn eiginvigur, það er að segja eitt eiginsveifluform og hver lína er fyrir hverja frelsisgráðu. Með einföldum hætti er hægt að búa til hornalínu fylki með því að nota þetta fylki og normalfallaaðferð þar sem:

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{r=1}^N \phi_r q_r(t) = \Phi \mathbf{q} \quad (2-36)$$

Farið er betur yfir þetta í (Chopra, 2001) en hornalínufylkin eru skilgreind þannig:

$$\mathbf{K} \stackrel{\text{def}}{=} \Phi^T \mathbf{k} \Phi \quad \mathbf{M} \stackrel{\text{def}}{=} \Phi^T \mathbf{m} \Phi \quad (2-37)$$

Einnig er hægt að gera þetta við deyfnifylkið og verður það einnig hornalínufylki, skilgreint:

$$\mathbf{C} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{\Phi}^T \mathbf{c} \mathbf{\Phi} \quad (2-38)$$

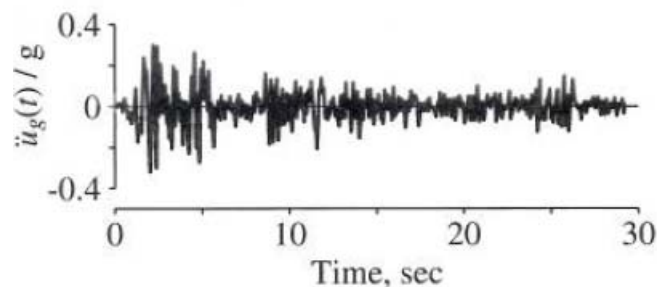
Ef síðustu þrjár jöfnur eru svo settar inn í jöfnu (2-27) kemur út:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{\Phi}\mathbf{p}(t) \quad (2-39)$$

Þessa jöfnu er svo tiltölulega auðvelt að leysa með þar til gerðum aðferðum, sjá kafla 2.1.5, þar sem öll fylkin eru hornalínufylki (Chopra, 2001).

2.1.7 Svörunarróf

Svörunarrófið var fyrst sett fram af M. A. Biot árið 1932 sem hagnýt aðferð við að skoða áhrif jarðhreyfingar á mannvirki. Svörunarrófið gefur góða mynd af því hver áhrif skjálfta á mannvirki eru þar sem það gefur mestu útsveiflu sem fall af eigintíðni fyrir einnar frelsisgráðu kerfi. Þetta má skoða nánar með því að taka útgangspunkt í færslutímaröð, sjá mynd 2-6.

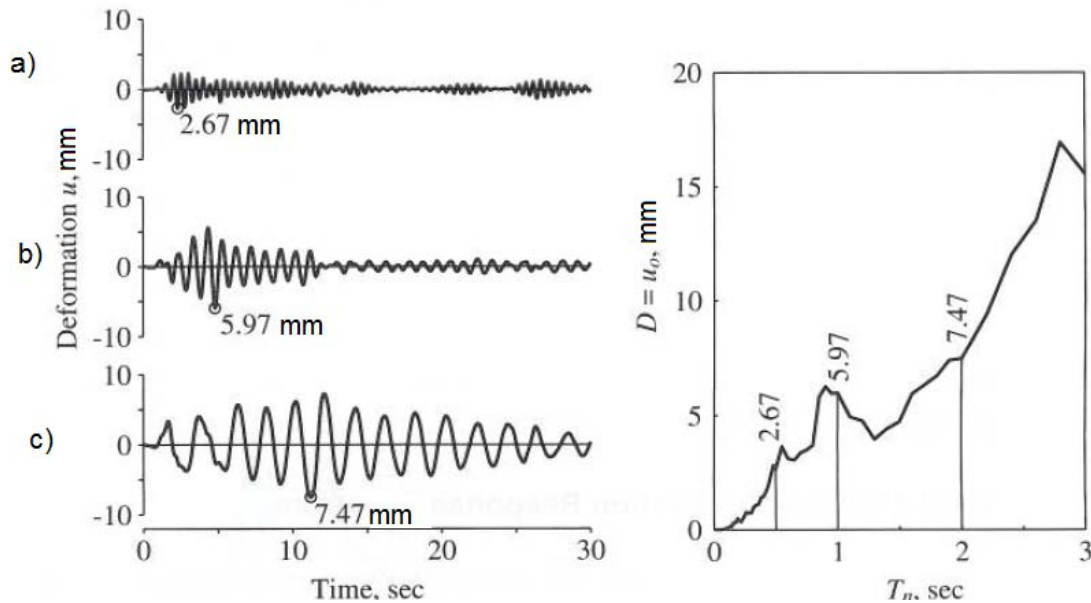


Mynd 2-6 Tímaröð fyrir ákveðnar mældar færslur (Chopra, 2001)

Notum þessa tímaröð og finnum hver svörun einnar frelsisgráðu kerfis er fyrir þessa jarðhreyfingu. Notaðar eru þar til gerðar aðferðir og færslurnar leystar út úr jöfnu (2-3). Talað er um lausnir á henni í kafla 2.1.5. Hægt er að nota ýmsar aðferðir til að leysa jöfnuna, til að mynda er hægt að nota tölulega tegrún, sjá nánar í kafla 5 í (Chopra, 2001). Einhverjar stærðir fyrir eigintíðni og deygni eru valdar, hér mætti t.d. velja að nota deyfnina 2% en láta eigintíðnina breytast við myndun svörunarrófsins. Fyrir hvert einnar frelsisgráðu kerfi er hámarksfærsla fundin:

$$u_0(T_n, \zeta) \stackrel{\text{def}}{=} \max_t |u(t, T_n, \zeta)| \quad (2-40)$$

Á mynd 2-7 er aðferðin sýnd myndrænt.



Mynd 2-7 Svörunarróf fyrir 2% deyni fyrir tímaröðina hér á undan, a) er fyrir 0.5 sec, b) fyrir 1.0 sec og c) fyrir 2.0 sec. (Chopra, 2001)

Þetta er hægt að gera á líkan hátt fyrir hraða og hröðunar tímaraðir, og svipar til jöfnu (2-40)

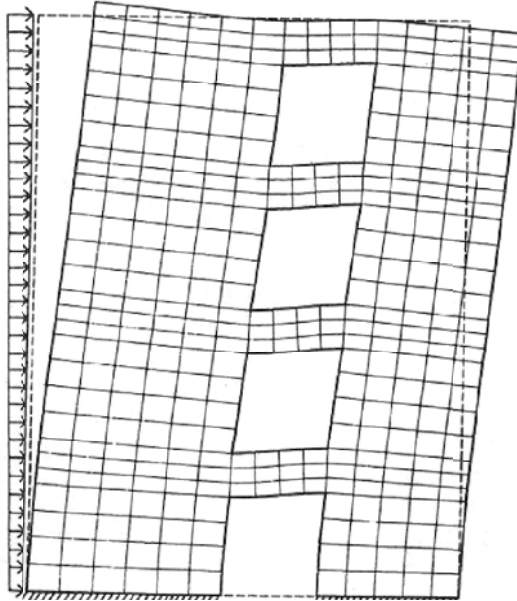
$$\dot{u}_0(T_n, \zeta) \stackrel{\text{def}}{=} \max_t |\dot{u}(t, T_n, \zeta)| \quad (2-41)$$

$$\ddot{u}_0^t(T_n, \zeta) \stackrel{\text{def}}{=} \max_t |\ddot{u}_0^t(t, T_n, \zeta)| \quad (2-42)$$

Út frá þessu er svo hægt að búa til svörunarróf fyrir bæði hraða og hröðun. (Chopra, 2001)

2.2 Einingaaðferðin

Öllum eðlisfræðilegum fyrirbærum sem finnast í verkfræðilegri aflfræði er lýst með mismunandi jöfnum og oft eru verkefni sem leysa á of flókin fyrir klassískar aðferðir. Einingaaðferðin (e. Finite element method) byggir á tölulegri greiningu og skilar af sér nálgun á raunverulegu lausninni. Aðferðin byggir á því að deila hlutum sem er verið að skoða upp í marga minni hluta, svokallaðar einingar. Hver eining er afmörkuð með enda / hornpunkti sem kallaðir eru hnútpunktur. Þessir hnútpunktur hafa ákveðna hreyfinguleika sem kallast frelsisgráður. Þetta geta verið færslu- eða snúningsfrelsisgráður. Brúað er á milli frelsisgráða með sérstæðum formföllum til að ákvarða formbreytingar innan eininga.



Mynd 2-8 Mannvirki með hliðarálagi sem búið er að skipta upp í einingar (Ottosen og Petersson, 1992)

Áður en áfram er haldið er rétt að fara stuttlega yfir þessi einingaformföll sem lýsa hvernig dreifing þess sem skoðað er yfir eininguna. Þessi föll geta verið margskonar til dæmis parabóla en algengast er að nota bara línulegt fall. Hér eru föllin táknuð með N . Eitt fall er fyrir hvern hnútpunkt í einingunni og er gildi fallsins 1 fyrir sinn hnútpunkt, en núll í öllum hinum. Fyrir hverja einingu fáum við eitt fylki sem inniheldur öll formföll þessara einingar. Til að gefa dæmi skulum við skoða einingu með tveimur hnútpunktum i og j , þá er einingaformfallafylkið:

$$N^e = [N_i^e \quad N_j^e] \quad (2-43)$$

Hægt er að setja þessi einingaformföll saman í eitt stórt formfall fyrir allt verkefnið sem er skilgreint með N , og svo er skilgreint fallið B sem er afleiðan af N sem þýðir að það lýsir breytingum í einingunni. Sjá nánar (Ottosen og Petersson, 1992). Til að lýsa því hvernig einingaaðferðin virkar verða skoðaðar einingar í tvívídd fyrir línulegt verkefni. Jafnvægi innrænna og útrænna krafta fyrir eina einingu má lýsa með jöfnunni:

$$\tilde{\mathbf{V}}^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (2-44)$$

þar sem:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (2-45)$$

og

$$\tilde{\mathbf{V}}^T = \begin{bmatrix} \frac{\delta}{\delta x} & 0 & 0 & \frac{\delta}{\delta y} & \frac{\delta}{\delta z} & 0 \\ 0 & \frac{\delta}{\delta y} & 0 & \frac{\delta}{\delta x} & 0 & \frac{\delta}{\delta z} \\ 0 & 0 & \frac{\delta}{\delta z} & 0 & \frac{\delta}{\delta x} & \frac{\delta}{\delta y} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

Hér er \mathbf{b} svokallaður innrikræftavigur og lýsir hann innri kröftum í einingunni, t.d. þyngd; $\boldsymbol{\sigma}$ táknar þær spennur sem virka á eininguna og $\tilde{\mathbf{V}}^T$ er stigull sem lýsir í hvaða röð er diffráð. Með jöfnu (2-44) er hægt að lýsa ástandi hvernar einingar en til að geta lýst því hvernig margar einingar virka saman er hér með sýnt svokallað sterkt form einingaaðferðarinnar fyrir þetta verkefni:

$$\int_V \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \int_S \mathbf{N}^T \mathbf{t} dS + \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV \quad (2-47)$$

Þessi jafna lýsir hegðun kerfisins stærðfræðilega. Hér er:

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

kræftvigur fyrir randskilyrði sem verða rædd seinna. Tekið skal fram að í þessu tilviki er \mathbf{N} $3 \times 3n$ fylki þar sem n er fjöldi hnútpunkta alls kerfisins.

Skilgreinum nú fylkið \mathbf{D} sem lýsir sambandi spennu og streitu, sjá nánar skilgreiningar í (Ottosen og Petersson, 1992).

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}_0 \quad (2-49)$$

Hér er $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ er upphafstreita eininganna. Áður en haldið er áfram skulum við fyrst skilgreina hvernig færslurnar tengjast einingaformföllunum:

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{a} \quad (2-50)$$

Nú vitum við að streita er breyting í færslu og hana má því ákvarða sem:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \tilde{\mathbf{V}}\mathbf{u} = \mathbf{B}\mathbf{a} \quad (2-51)$$

Þetta er svo sett inn í jöfnu (2-49) og það svo inn í jöfnu (2-47) og þá fæst:

$$\left(\int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \right) \mathbf{a} = \int_S \mathbf{N}^T \mathbf{t} dS + \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV + \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dV \quad (2-52)$$

Til að lýsa þessari jöfnu skulum við fyrst skilgreina tvö randskilyrði. Fyrsta er þegar við þekkjum kraftvektorinn $\mathbf{t} = \mathbf{h}$ yfir svæðið S_h og hitt er þegar við þekkjum færsluna $\mathbf{u} = \mathbf{g}$ yfir svæðið S_g .

Skilgreinum nú ákveðnar stærðir í jöfnu (2-52):

$$\begin{aligned} \mathbf{k} &= \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \\ \mathbf{f}_b &= \int_{S_h} \mathbf{N}^T \mathbf{h} dS + \int_{S_g} \mathbf{N}^T \mathbf{t} dS \\ \mathbf{f}_l &= \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV \\ \mathbf{f}_0 &= \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dV \end{aligned} \quad (2-53)$$

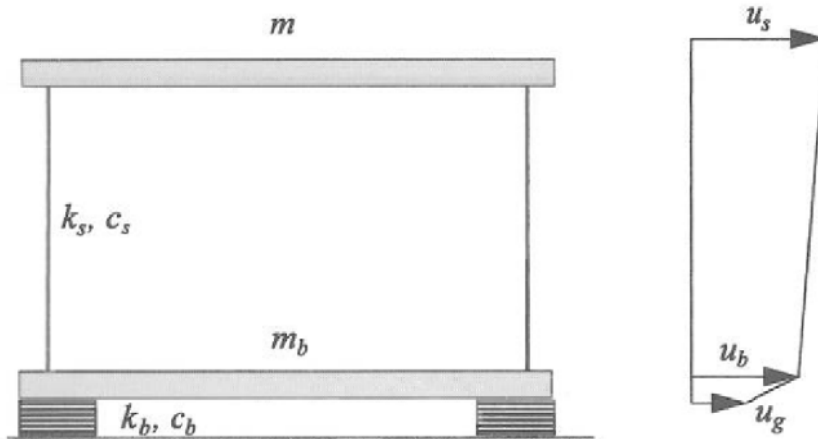
Nú er jafnan orðin:

$$\mathbf{k} \mathbf{a} = \mathbf{f}_b + \mathbf{f}_l + \mathbf{f}_0 \quad (2-54)$$

Er jafnan því orðin tiltölulega auðleysanleg. Þannig virkar einingaaðferðin til einföldunar á flóknum verkefnum. Hér verður samt að hafa í huga að einingaaðferðin er einungis nálgun, þannig að því fleiri einingar sem maður notar því nær kemst maður raunverulegu lausninni. Ekki verður farið frekar í það hvernig á að reikna upp úr þessu og er vísað í (Ottosen og Petersson, 1992) fyrir frekari upplýsingar.

2.3 Jarðskjálftaeinangrun

Hugmyndin að baki jarðskjálftaeinangrun (e. base isolation) er frekar einföld. Hún byggir á því að einangra mannvirkið frá láréttri jarðskjálftahreyfingu með því að setja sérstaka einingar á milli mannvirkisins og grunnsins sem hafa litla lárétta stífni miðað við mannvirkið. Við þetta minnkar eigintíðni kerfisins og færir frá ríkjandi (e. predominated) tíðni jarðhreyfingarinnar yfir á tíðniband þar sem hreyfiorkan er minni. Þetta hefur þau áhrif að fyrsta sveifluform byggingarinnar er einungis hreyfing í einangruninni á meðan mannvirkið er nánast alveg stíft. Samhliða þessu eykst deyfni kerfisins vegna einangrunarinnar. Til að lýsa því hvernig jarðskjálftaeinangrað kerfi virkar skulum við skoða það í einföldustu mynd, eða sem tveggja frelsisgráðukerfi. Á mynd 2-9 sést þetta kerfi og þær stærðir sem tengjast því.



Mynd 2-9 Tveggja frelsisgráðukerfi með jarðskjálftaeinangrun (Naeim og Kelly, 1999)

Skilgreinum nú færsluvigurinn:

$$\mathbf{v} = \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_b - u_g \\ u_s - u_b \end{Bmatrix} \quad (2-55)$$

Færslurnar eru útskýrðar á mynd 2-9, þar sem u_g er færsla grunnsins eða í reynd jarðskjálftahreyfing yfirborðsins, u_b er færsla botnplötunnar og u_s er færsla hæðarinnar. Á einfaldan hátt er hægt að fá eftirfarandi með því að nota hreyfijöfnuna:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{k}\mathbf{v} = -\mathbf{m}\mathbf{r}\ddot{u}_g \quad (2-56)$$

Hér er:

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m + m_b & m \\ m & m \end{bmatrix} \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \quad \mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \quad \mathbf{r} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Út frá þessu má skilgreina eftirfarandi fasta:

$$\gamma = \frac{m}{m+m_b} \quad \omega_b^2 = \frac{k_b}{m+m_b} \quad \omega_s^2 = \frac{k_s}{m} \quad \epsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2}$$

Með því að ákvarða eiginsveifluform út frá jöfnu (2-56) með hefðbundnum hætti, er auðveldlega hægt að sýna fram á að:

$$\Phi^1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ \epsilon \end{Bmatrix} \quad \Phi^2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{\gamma}(1 - (1 - \gamma)\epsilon) \end{Bmatrix} \quad (2-57)$$

Þar sem:

$$\Phi^i = \begin{Bmatrix} \Phi_b^i \\ \Phi_s^i \end{Bmatrix} \quad i = 1, 2$$

Hér stendur Φ^1 og Φ^2 fyrir sveifluform 1 og 2 fyrir mannvirkið. Fyrir frekari útskýringu á þessu sjá (Naeim og Kelly, 1999). Út frá þessu er auðvelt að sjá að því minni sem stuðullinn ϵ er því meira af jarðhreyfingunni er tekin upp í einangruninni fyrir fyrsta sveifluformið. Mesta orkan er venjulega tekin upp af fyrsta sveifluforminu, þar af leiðandi er gott að stuðullinn ϵ sé lágur og er leitast við að hafa hann af stærðargráðunni $\epsilon = O(10^{-2})$ við hönnun á jarðskjálftaeinangrun. Fyrir seinna sveifluformið má sjá að meiri hreyfing er á sjálfu virkinu en í einangruninni. Af þess má sjá hvernig hreyfingin er skipt á milli forma og hversu mikið stífnin í einangruninni skiptir máli. Hægt er að leiða þetta út fyrir jarðskjálftaeinangrað kerfi með fleiri frelsisgráðum og koma sveiflurnar fyrir einangrunina fram í fyrstu sveifluformunum. Þannig er auðvelt að sjá hvernig jarðskjálftalegur hafa beint áhrif á það hvernig mannvirkið hegðar sér við jarðhreyfingu. (Naeim og Kelly, 1999)

2.3.1 Blýfylltar gúmmilegur

Sú gerð af jarðskjálftalegum sem notuð hefur verið í nokkrar brýr á Íslandi eru svokallaðar blýfylltar gúmmilegur. Þessar legur voru fundnar upp á Nýja Sjálandi árið 1975 og hafa verið notaðar víða eftir það svo sem í Japan og í Bandaríkjunum. Legurnar eru lagskiptar með gúmmilögum og stálþynnum á víxl. Til að auka deyfningetu þeirra eru settir í einn eða fleiri blýskjarnar í þar til gerðar holur (Naeim og Kelly, 1999). Almenna aðferðin við að setja þá í er að bora gat í leguna og þrýsta svo blýkjarna sem er stærra en gatið inn. Á Íslandi er sú óhefðbundna aðferð notuð að bora gat og svo er blýið steipt beint í það. Þessi aðferð hefur verið prófuð hreyfifræðilega, sú rannsókn fór fram við Tækniháskólann í Þrándheimi árið 1989 (Bessason og Haflidason, 2004). Rannsóknarniðurstöðurnar voru svo sniðnar að tvílinulegum vinnuferilli og eftirfarandi jöfnur settar fram:

$$K_d = K_r = \frac{A_r G_r}{T_r} \quad (2-58)$$

$$K_u = 11.6 K_r \quad (2-59)$$

$$Q_d = \sigma_{yp} A_p \quad (2-60)$$

Þar sem K_d er eftirstífnin, K_u er upphafsstífnin og parametrarnir A_r , G_r og T_r eru þverskurðarflatarmál, skúfstuðull og heildarþykkt gúmmísins. Það skal samt tekið fram að talan 11.6 í jöfnu (2-59) er töluvert hærri en almennt er talað um í öðrum fræðiritum. Stærðin Q_d er flotspenna við núll skúfstreitu fyrir hysteresu-vinnuferilinn, A_p er þverskurðarflatamál blýkjarnans og σ_p er áætluð virk flotspenna kjarnans. Þessi flotspenna er um 20% minni en almennt er talað um. Þetta skýrist af því að blýkjarninn er ekki settur í undir þrýstingi (Bessason og Haflidason, 2004).

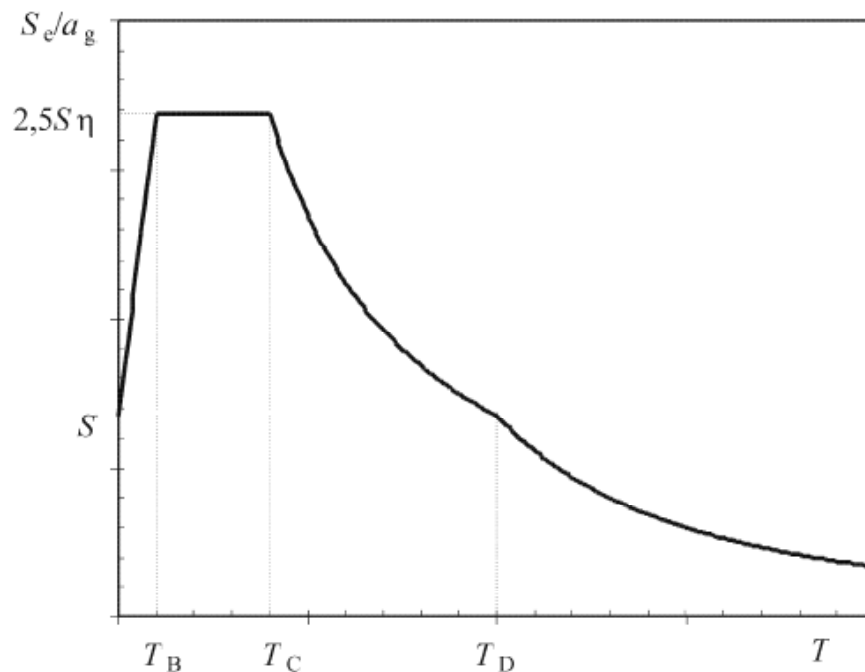
2.4 Svörunarróf úr EC8 og UBC-97

Í þessum kafla verður farið yfir helstu atriði til að búa til svörunarróf. Bæði verða skoðuð róf Evrópustaðalsins EC8 og bandaríska staðalsins UBC-97. Svörunarrófum er ætlað að vera lýsandi fyrir þær aðstæður sem mannvirki býr við m.t.t. jarðskjálfta, þau eiga að lýsa

efri mörkum svörunar sem eiga að geta komið fram þegar jarðskjálfti með tiltekinn meðalendurkomutíma ríður yfir á svæðinu.

2.4.1 Svörunarróf í Eurocode 8

Þau svörunarróf sem skilgreind eru í EC8 byggja á gögnum frá mörgum tímaröðum. Þannig á ferillinn sem sýndur er á mynd 2-10 að taka tillit til allra mögulegra svörunarrófa, svo að ef það kemur til jarðhreyfingar þá lendir svörunarróf hennar undir ferlinum. Lögun ferilsins stjórnast að mestu af fjórum stuðlum; S , T_B , T_C og T_D . Þessir stuðlar ákvarðast af jarðfræðilegum aðstæðum á þeim stað þar sem reisa á mannvirkið. Hæð ferilsins stjórnast einnig af stuðlinum η sem er háður deyfni og er $\eta = 1$ fyrir 5% deyfnihlutfall. Grunnildi hröðunar a_g hækkar eða lækkar ferilinn en hefur ekki áhrif á lögun hans.



Mynd 2-10 Svörunarróf fyrir hönnun með EC8

Jöfnurnar sem lýsa ferlinum eru eftirfarandi:

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T)/a_g = S \left[1 + \frac{T}{T_B} (2,5\eta - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T)/a_g = 2,5\eta S$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T)/a_g = 2,5\eta S \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T)/a_g = 2,5\eta S \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

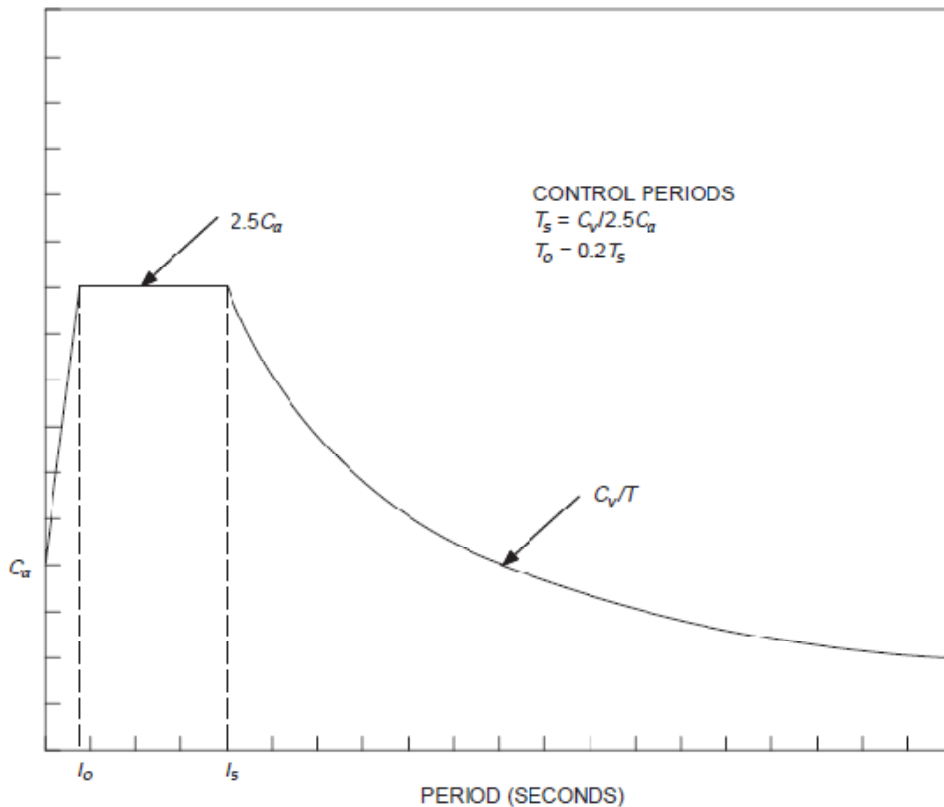
Stuðullinn η er fundinn með eftirfarandi jöfnu:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \zeta)} \geq 0,55$$

Þar sem ζ er deyfnihlutfall rófsins. Þessu rófi má svo varpa yfir í hönnunarróf með því að velja viðeigandi hegðunarstuðul (European committee for standardization, 2003).

2.4.2 Svörunarróf fyrir 1997 Uniform Building Code

Svörunarrófið í UBC-97 byggja á sömu forsendum og EC8 rófin og eru þannig háð tegund jarðvegs þar sem mannvirkið kemur til með að standa. Hér er þó notuð önnur aðferð og meðal annars tekið tillit til fjarlægðar mannvirkisins frá virkri sprungu. Lögum ferilsins stjórnast af tveimur stuðlum, C_a og C_v sem eru ákvarðaðir út frá jarðvegsgerð, tegund jarðskjálftasvæðis og hversu mannvirkið stendur nálægt virkri sprungu. Jarðvegsaðstæður skipta mestu og er hægt að finna skilgreiningu á þeim í sérstökum töflum. Ekki er tekið tillit til nálægra sprunga nema svæðið sem til athugunar er sé á svæði 4, þar að segja á versta svæðinu m.t.t. jarðskjálfta.



Mynd 2-11 Svörunarróf fyrir hönnun með UBC-97

Sjá má á mynd 2-11 hvernig C stuðlarnir stjórna lögum ferilsins (1997 Uniform Building Code, 2007).

2.5 Greiningar aðferðir sem notaðar voru í Sap2000

Við ólínulega tímaraðgreiningu með Sap2000 er hægt að nota tvær aðferðir, annars vegar svokallaða hefðbundna ólínulega greiningu (DI) og hins vegar hraðvirka ólínulega greiningu (FNA). Í þessum kafla verður örstutt farið í fræðilegan bakgrunn þessara aðferða.

2.5.1 Hefðbundin ólínuleg greining

Hefðbundin ólínuleg greining (e. Direct integration, DI) er notuð til að reikna svörun líkansins með því að nota tölulega ítrun, án þess þó að breyta formi hreyfijafnanna fyrst. Svörunin er áætluð yfir tímabilið Δt þannig að reiknuð er færsla fyrir hvert tímaskref, fyrst fyrir Δt og svo $2\Delta t, 3\Delta t$ upp í $n\Delta t$. Fyrir tímaskref n er hreyfijafnan:

$$m\ddot{\mathbf{u}}_n + c\dot{\mathbf{u}}_n + \mathbf{R}_n^{int} = \mathbf{R}_n^{ext} \quad (2-61)$$

$$m\ddot{\mathbf{u}}_n + c\dot{\mathbf{u}}_n + \mathbf{k}\mathbf{u}_n = \mathbf{R}_n^{ext} \quad (2-62)$$

Hér er \mathbf{m} , \mathbf{c} og \mathbf{k} fylki fyrir hreyfijöfnuna og \mathbf{u} er færsluvigurinn fyrir tímaskref n og \mathbf{R} eru kraftvigrar fyrir hvert tímaskref. Fyrri jafnan hér að ofan hentar betur til ólínulegrar greiningar þar sem að \mathbf{k} fylkið getur breyst á milli skrefa.

Með hefðbundinni ólínulegri greiningu er hægt að ákvarða \mathbf{u} fyrir skrefið $n + 1$ með mismunandi aðferðum, þar sem mismunnandi upphafsskilyrði eru þekkt fyrir ákveðin tímaskref. Þessi reiknirit (e. algorithm) skiptast í bein (e. explicit) og fólgin (e. implicit). Beinum reikniritum má lýsa með eftirfarandi hætti:

$$\mathbf{u}_{n+1} = f(\mathbf{u}_n, \dot{\mathbf{u}}_n, \ddot{\mathbf{u}}_n, \mathbf{u}_{n-1}, \dots) \quad (2-63)$$

Lausnin inniheldur einungis liði sem koma fram í tímaskrefunum á undan. Fyrir fólgin reiknirit er lausnin hins vegar:

$$\mathbf{u}_{n+1} = f(\dot{\mathbf{u}}_{n+1}, \ddot{\mathbf{u}}_{n+1}, \mathbf{u}_n, \dot{\mathbf{u}}_n, \ddot{\mathbf{u}}_n, \dots) \quad (2-64)$$

Liðir hreyfijöfnunnar eru hér teknir saman við tímaskref $n + 1$. Munurinn á þessum aðferðum felst aðallega í því hversu stöðugar lausnirnar eru, hversu mörg tímaskref þarf að taka og hversu nákvæm lausnin er. Fyrir bein reiknirit þarf að varast það að tímaskrefin verði ekki of stór, ef þau fara yfir eitthvað ákveðið gildi Δt_{cr} þá verður lausnin óstöðug og stefnir ekki á neitt. Þetta þýðir að oft þarf að nota mörg tímaskref sem getur verið tímafrekt. Fyrir fólgnu reikniritin er lausnin ávalt stöðug og er því hægt að nota stærri skref en þetta kemur niður á nákvæmni. Fólgin reiknirit eru þó oftast notuð við gerð líkana í burðarþolsfræðum. Munurinn á ítrunarhraðs reikniritanna er 1.8 fyrir hvert tímaskref, þar sem lausnin er hraðvirkari fyrir beinu aðferðina. Þetta er til komið að mestu leyti af því það er hægt að gera fylkin að hornalínufylkjum. Beinu reikniritin henta ekki vel við greiningu á burðarþolsfræðilegum verkefnum en henta betur í bylgjufræðum. Því verður ekki farið meira yfir þau fræði og er vísað í kafla 11.12 í (Cook, o.fl., 2002) fyrir nánari upplýsingar um reikniritið.

Til að útskýra fólgin reiknirit aðeins betur skulum við skoða einnar frelsisgráðu kerfi. Tvær þekktar aðferðir við lausn slíks kerfis með hefðbundinni ólínulegri greiningu, er að nota annað hvort meðalhröðun eða línulega hröðun. Fyrir meðalhröðun sem er oft kölluð trapisregla eru jöfnurnar eftirfarandi:

$$\ddot{u}(\tau) = \frac{1}{2}(\ddot{u}_{n+1} + \ddot{u}_n) \quad (2-65)$$

Og lausn fyrir þau skref sem nota á, þar sem jafnan hér að ofan er heilduð og eftirfarandi jöfnur leiddar út:

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{1}{2}\Delta t(\ddot{u}_{n+1} + \ddot{u}_n) \quad (2-66)$$

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t\dot{u}_n + \frac{1}{4}\Delta t^2(\ddot{u}_{n+1} + \ddot{u}_n) \quad (2-67)$$

Þar sem $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ og $\tau = \Delta t$. Og fyrir línulega hröðun gildir:

$$\ddot{u}(\tau) = \ddot{u}_n + \frac{\tau}{2}(\ddot{u}_{n+1} + \ddot{u}_n) \quad (2-68)$$

Lausnin verður þá:

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{1}{2}\Delta t(\ddot{u}_{n+1} + \ddot{u}_n) \quad (2-69)$$

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t\dot{u}_n + \Delta t^2\left(\frac{1}{6}\ddot{u}_{n+1} + \frac{1}{3}\ddot{u}_n\right) \quad (2-70)$$

Þar sem sömu gildi eru á tímaskrefunum og fyrir meðalhröðunaraðferðina.

Til að bæta þessa aðferð og til að útfæra hana fyrir margra frelsisgráðu kerfi verður nú skoðuð svokölluð *Newmark*-aðferð. Jöfnurnar hér á undan eru þá settar fram á forminu:

$$\dot{\mathbf{u}}_{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_n + \Delta t[\gamma\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + (1 - \gamma)\ddot{\mathbf{u}}_n] \quad (2-71)$$

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \Delta t\dot{\mathbf{u}}_n + \frac{1}{2}\Delta t^2[2\beta\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + (1 - 2\beta)\ddot{\mathbf{u}}_n] \quad (2-72)$$

Þar sem meðalhröðunaraðferðin gefur stuðlana $\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{4}$ og fyrir línulega hröðunaraðferðina eru stuðlarnir $\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{6}$. Með því að leysa $\dot{\mathbf{u}}_{n+1}$ og \mathbf{u}_{n+1} út úr jöfnu (2-72) og setja það inn í hreyfijöfnuna, jafna (2-62), fæst eftirfarandi niðurstaða:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}^{eff}\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{R}_{n+1}^{ext} + \mathbf{m}\left\{\frac{1}{\beta\Delta t^2}\mathbf{u}_n + \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_n + \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{\mathbf{u}}_n\right\} \\ + \mathbf{c}\left\{\frac{\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{u}_n + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right)\dot{\mathbf{u}}_n + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)\ddot{\mathbf{u}}_n\right\} \end{aligned} \quad (2-73)$$

Þar sem:

$$\mathbf{k}^{eff} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}\mathbf{m} + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{c} + \mathbf{k} \quad (2-74)$$

Hægt er að nota báðar þessar jöfnur til að leysa verkefnið með hefðbundinni ólínulegri greiningu. Gott er að hafa í huga að \mathbf{k}^{eff} er ekki hornalínufylki og verður því alltaf flókið og tímafrekt að leysa úr jöfnuhneppunum. Nú er hægt að nota γ og β stuðlana til að kvarða jöfnurnar og til frekari útskýringa á þeim er vísað í bls 419 í (Cook, o.fl., 2002). Taka má fram að hægt er að búa til deyfni fylkið \mathbf{c} með svokallaðri Rayleigh deyfingu sem farið var yfir í kafla 2.1.4.

2.5.2 Hröð ólínuleg greining

Hröð ólínuleg greining (e. Fast non-linear analysis, FNA) er einföld aðferð sem byggir á grunnjöfnum aflfræðinnar (jafnvægis, kraft-færslu og samrýmanleika). Hægt er að leiða út frá hreyfijöfnunni (jöfnu (2-3)) jöfnu þar sem nákvæmt kraftajafnvægi er fyrir tölvumódelið á tímanum t og lýsir sér þannig:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{k}\mathbf{u}(t) + \mathbf{R}(t)_{NL} = \mathbf{R}(t) \quad (2-75)$$

Hér eru \mathbf{m} , \mathbf{c} og \mathbf{k} massafylkið, hlutfallsleg deyfni fylkið og stífni fylkið. Stærð þeirra miðast við fjölda frelsisgráða N_d . $\mathbf{R}(t)$ er utanaðkomandi kraftur í sérhverri frelsisgráðu og $\mathbf{R}(t)_{NL}$ er kraftvigur sem tekur tillit til þeirra krafta sem koma fram í einingum sem eru ólínulegar. Til að reikna kraftvigur fyrir ólínulega hegðun er notuð ítrun í sérhverjum punkti.

Ef módelið er óstöðugt án ólínulegra eininga er hægt að bæta við svokölluðu virku elastísku stífni fylki \mathbf{k}_e , með stífni sem er ekki núll. Margfeldi af þessu stífni fylki og færslu er svo bætt við sitt hvoru megin jafnaðarmerkisins í jöfnu (2-75), og kemur út:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}}(t) + (\mathbf{k} + \mathbf{k}_e)\mathbf{u}(t) = \mathbf{R}(t) - \mathbf{R}(t)_{NL} + \mathbf{k}_e\mathbf{u}(t) \quad (2-76)$$

Til að einfalda eru liðir teknir saman og kemur út:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}}(t) + \bar{\mathbf{k}}\mathbf{u}(t) = \bar{\mathbf{R}}(t) \quad (2-77)$$

Nú vitum við að línulega stífni fylkið $\bar{\mathbf{k}}$ er þekkt en virki utanaðkomandi krafturinn $\bar{\mathbf{R}}(t)$ er óþekktur og verður að vera reiknaður með ítrun. Ef nálgunin á virku línulegu stífni er góð verður samleitni ítrunarinnar góð, því liðurinn $-\mathbf{R}(t)_{NL} + \mathbf{k}_e\mathbf{u}(t)$ verður lítill.

Til að reikna ólínulegu krafta hvernar ólínulegrar einingar þarf að finna ólínulegu færslurnar. Þessar færslur er hægt að reikna með eftirfarandi jöfnu og jafnan fyrir hraðabreytinguna er eining sýnd:

$$\mathbf{d}(t) = \mathbf{b}\mathbf{u}(t) \quad \dot{\mathbf{d}}(t) = \mathbf{b}\dot{\mathbf{u}}(t) \quad (2-78)$$

Þar sem \mathbf{b} er óháð tíma. Hægt er að reikna ólínulega kraftinn $\mathbf{f}(t)$ fyrir ólínulegu einigarnar ef við þekkjum tímaraðir færslna og hraða þeirra. Það er samt ljóst að á hverju tímastigi er einungis hægt að gera þetta með ítrun.

Til að geta leyst jöfnu (2-77) þarf að finna fyrst svokallaða Ritz vigr. Fylkið Φ (sjá jöfnu (2-35)) inniheldur N fjölda slíkra vigr og eru vigrarnir háðir álagi. Til að finna þessa vigr er notast við eftirfarandi jöfnur:

$$\Phi^T m \Phi = I \qquad \Phi^T \bar{k} \Phi = \Omega^2 \qquad (2-79)$$

Hér er I einingarfylkið og Ω^2 er hornalínufylki sem inniheldur eigintíðnirnar í öðru veldi eftir hornalínunni. Nú er hægt að lýsa svörun kerfisins á eftirfarandi hátt:

$$\mathbf{u}(t) = \Phi \mathbf{Y}(t) \qquad \dot{\mathbf{u}}(t) = \Phi \dot{\mathbf{Y}}(t) \qquad \ddot{\mathbf{u}}(t) = \Phi \ddot{\mathbf{Y}}(t) \qquad (2-80)$$

Setjum þetta núna inn í jöfnu (2-77) og margföldum í gegn með Φ^T sem gefur:

$$I \ddot{\mathbf{Y}}(t) + \Lambda \dot{\mathbf{Y}}(t) + \Omega^2 \mathbf{Y}(t) = \mathbf{F}(t) \qquad (2-81)$$

Jafnan lýsir nú mörgum óháðum jöfnum, vegna þess að öll fylkin eru núna hornalínufylki. Af þessari ástæðu ætti að vera auðvelt að leysa jöfnurnar þegar búið er að finna kraftinn $\mathbf{F}(t)$ sem hægt er að finna með ítrun:

$$\mathbf{F}(t) = \Phi^T \bar{\mathbf{R}}(t) = \Phi^T \mathbf{R}(t) - \Phi^T \mathbf{R}(t)_{NL} + \Phi^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}(t) \qquad (2-82)$$

Nú skilgreinum við:

$$\mathbf{B} = \mathbf{b} \Phi \qquad (2-83)$$

Af þessu má svo leiða á nokkuð einfaldan hátt að:

$$\Phi^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}(t) = \mathbf{B}^T \mathbf{K}_e \mathbf{d}(t) \qquad \Phi^T \mathbf{R}(t)_{NL} = \mathbf{B}^T \mathbf{f}(t) \qquad (2-84)$$

Fyrir betri útskýringu á þessu er vísað í 18. kafla í (Wilson, 2008).

Til að leysa verkefnið með FNA þarf því fyrst að finna Ritz vigrana og fylkið \mathbf{B} . Svo er bara ítrað fyrir hvert tímaskref og til dæmis hægt að nota Taylor röð til að nálga lausn (Wilson, 2008).

3 NÆRSVIÐSÁHRIF

Í þessum kafla verður rætt um nærsviðsáhrif (e. Near-source effects) jarðskjálfta. Fyrst verður leitast við að lýsa fyrirbærinu sem einkennist af lágtíðni hraðapúls sem myndast nálægt upptökum skjálfta og breiðist út í stefnu misgengis. Næst verður farið nokkrum orðum um skjálftana 2000 og 2008, þar á meðal tölulegar upplýsingar og staðsetningu. Að því búnu verður athugað hvort finna megi stefnuháða hraðapúlsa í gögnum þeirra. Einnig verða svörunarróf skjálftanna skoðuð á völdum mælistöðvum. Rófin verða svo borin saman við hönnunarróf tveggja þekktra jarðskjálftastaðla til að sjá hversu mikið staðlarnir taka tillit til nærsviðsáhrifa. Jafnframt verða þau skoðuð sérstaklega fyrir sveiflutíma á bilinu 0,9-1,8 sek sem eru mikilvægir fyrir brýr sem nánar verður fjallað um í kafla 4. Í lok kaflans verður síðan stuttlega farið yfir það hvernig hægt er að herma nærsviðsáhrif með þar til gerðum aðferðum.

3.1 Fræðikafli

Jarðhreyfing nálægt jarðskjálftasprungu eða brotgengi getur verið töluvert ólík þeim sem eru í meiri fjarlægð frá upptökum. Nærsviðsáhrifa gætir oftast í innan við 20 km fjarlægð frá upptöku (Sommerville, o.fl., 1997). Það hefur áhrif á hreyfinguna hvernig brotmyndun sprungunnar er og hver brotstefnan er. Á þessu svæði geta líka orðið töluverðar varanlegar færslur (Bray og Rodriguez-Marek, 2004). Jarðhreyfing nálægt upptökum skjálfta getur orðið fyrir áhrifum frá skúfbylgjupúls sem myndast þegar misgengi rifnar upp og verður kröftugri eftir því sem sprungan er lengri. Áhrifin eru mest á stað sem stendur nálægt misgenginu en þó sem lengst frá upptökum þannig að sprunga sem rifnar upp að athugunarstað sé sem lengst. Þetta kallast stefnuáhrif. Annað fyrirbæri sem hefur áhrif á jarðhreyfingu kallast „fling“ eða hrökkáhrif og tengist varanlegum færslum misgengis. Bæði þessi fyrirbæri kalla fram stóra hraðapúlsa, en lotulengd „fling“ er $T_{fling} \geq 2 \text{ sec}$ fyrir skjálfta yfir $M_w \geq 6,5$ á stærð sem tengist lægri tíðni og höfum við því ekki mikinn áhuga á því. Stefnuáhrifin koma fram fyrir sveiflutíma á bilinu 0,5-3 sek (Howard, o.fl., 2005) og geta oft aukið svörun talsvert. Það hefur sýnt sig í mörgum gögnum um jarðhreyfingar nálægt upptökum að stefnuáhrifin koma fram með hraðapúlsi snemma í gögnunum sem getur verið um eða yfir 100 cm/sek. Mikið af því sem vitað er um nærsviðsáhrif í dag er byggt á gögnum byggðum á rannsóknum á framreiknuðum gögnum sterkra skjálfta, þar sem gögnin eru skráð í meira en 20 km fjarlægð (Ambraseys og Douglas, 2003), sjá einnig (Sommerville, o.fl., 1997).

3.1.1 Skilgreining á nærsviðsáhrifum

Til að skilgreina hvað nærsviðsáhrif eru er hægt að skoða m.a. þá staðla sem til eru sem taka tillit til þeirra. Til að mynda hefur verið talað um að nærsviðsáhrif séu til staðar þegar staðsetning mannvirkis er innan þeirrar fjarlægðar sem samsvarar lengd sprungunnar. Í Eurocode 8 (European committee for standardization, 2003) er kveðið á um að ef byggingin er í mikilvægisflokki IV (mesta krafa) og er innan við 15 km frá virku misgengi skuli sérstaklega tekið tillit til nærsviðsáhrifa. Þetta á þó einungis við ef mögulegur skjálfti frá sprungunni er stærri en $M_s = 6,5$. Ekki er skilgreint beint hvernig taka skal tillit til nærsviðsáhrifanna sérstakleg nema að gera skuli líkan fyrir þau til hönnunar (European committee for standardization, 2003).

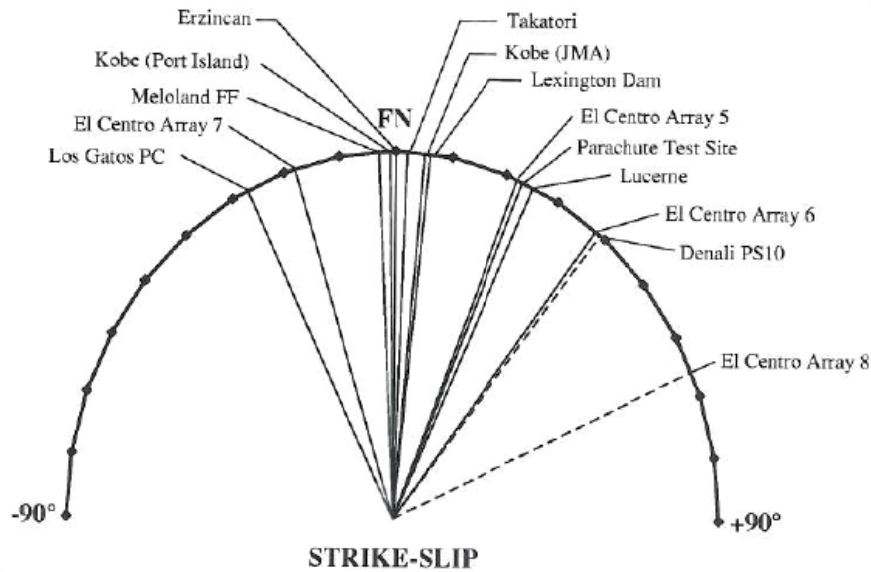
Í ameríska byggingarstaðlinum UBC-97 er tekið tillit til nærsviðsáhrifa með stuðlunum N_a og N_v sem notaðir eru til að móta staðbundið svörunarróf. Fyrri stuðullinn N_a tekur fyrir þann hluta rófsins sem er fyrir stuttan sveiflutíma (hröðun) og seinni stuðullinn N_v er fyrir langan sveiflutíma (hraða). Þessir stuðlar byrja að hafa áhrif þegar mannvirkið er innan við 15 km frá misgengi og er gerður greinarmunur á þremur gerðum sprungna sem lúta að væntanlegri stærð skjálfta og árlegum rekhraða. Þessir stuðlar miðast við meðaltal af hraðahlutanum sem er í stefnu sprungunnar og þættinum sem er þvert á sprunguna. Staðallinn tekur þó ekki á því þegar þverþátturinn er mjög hár eins og við púlshögðun (Bray og Rodriguez-Marek, 2004).

3.1.2 Athuganir og rannsóknir

Nærsviðsáhrif hafa komið fram í gögnum margra skjálfta, þau sást t.d. í Northridge skjálftanum árið 1994 í Kaliforníu, Kobe skjálftann árið 1995 í Japan og Chi-Chi skjálftann árið 1999 í Tævan. Stór púls í jarðhreyfingunum leysir út mikla orku á stuttum tíma sem getur valdið umtalsverðum skemmdum (Shen, o.fl., 2004). Kröftugar jarðhreyfingar og mikill skaði hefur oft átt sér stað í nokkurra km fjarlægð frá sögulegum jarðskjálftasprungum. Til dæmis í Kobe skjálftanum árið 1995 í Japan en þar er talað um að 90% af ónýtum eða alvarlega skemmdum byggingum hafi verið staðsettar innan við 5 km frá misgenginu. Af þeirri ástæðu eru verkfræðingar sammála um að ráðleggja notkun hærri hönnunarhröðunar við hönnun bygginga sem liggja nálægt virkum sprungum (Wang, o.fl., 2002). Sterk jarðhreyfing nálægt stórum jarðskjálftum er versta jarðskjálftaálag sem bygging getur lent í. Ekki eru alltaf til nærsviðsgögn fyrir þessa jarðskjálfta. Því hefur oft þurft að nota gögn sem skráð eru í nokkurri fjarlægð frá upptökum. Það hefur komið í ljós að ákveðnar tegundir misgengja hafa meiri áhrif en aðrar á jarðhreyfingu í nærsviði (Ambraseys, o.fl., 2005). Niðurstaðan er því sú að jarðhreyfing nálægt upptökum getur verið töluvert frábrugðin þeirri sem er langt í burtu. Þetta kemur kannski ekki berlega í ljós í hröðunartímaröðum þeirra, heldur frekar í hraða og færslutímaröðum. Má sjá þessi áhrif sem ákveðna púlshögðun sem kemur fram í tímaröðunum, af völdum stefnuáhrifa. Mesti jarðhraði fyrir nærsviðsáhrif getur þannig verið eitthvað hærri en jarðhraði við upptökin og getur þessi munur haft töluverð áhrif á álagið sem mannvirkin geta orðið fyrir (Bray og Rodriguez-Marek, 2004).

3.1.3 Stefnuáhrif

Þegar skoðaðar eru tímaraðir sem mældar eru nálægt upptökum skjálfta til að kanna nærsviðsáhrif er leitað að lágtíðnipúlssi sem sést gjarnan á röðunum. Erfitt getur verið að sjá nákvæmlega hvar þessi púls er, en til að fara yfir þetta er gott að athuga hæstu sveifluna þar sem mesta orkan er í gögnunum og ákvarða stefnu hennar. Stefnan sem fundin er með þessum hætti er svo borin saman við stefnu misgengja. Til að finna stefnuna er hægt að teikna upp hraða fyrir báðar áttir mælisins og sjá hver helsta stefnan verður fyrir ákveðna sveiflu í tímaröðinni (Howard, o.fl., 2005).



Mynd 3-1 Stefnuáhrif fyrir sniðgengi skoðað hornrétt á misgengi (Howard, o.fl., 2005) (FN: fault normal)

Á mynd 3-1 má sjá stefnu mesta púls miðað við stefnu sniðgengisins fyrir tímaraðir frá nokkrum velþekktum jarðskjálftum, sem lýst er í grein eftir (Howard, o.fl., 2005). Þar kemur í ljós að fyrir sniðgengi, sem algengust eru á Íslandi, er stefnan oftast nánast í stefnu sem er þvert á misgengin. Til að bera kennsl á orkuna sem kemur fram í gögnum eru skoðuð svörunarrófin og reiknaður eftirfarandi stuðull:

$$SI = \int_{0,5}^{3,0} S_a(t) dt \quad (3-1)$$

Þennan stuðul er svo hægt að nota til að bera saman niðurstöður. (Howard, o.fl., 2005).

3.1.4 Tilbúnaar tímaraðir með nærsviðáhrifum

Til að búa til hermanir sem lýsa nærsviðsáhrifum í tímaröðum er hægt að nota margar mismunandi aðferðir. Í þessari ritgerð verður notast við einfalda aðferð sem lýst er í (Shen, o.fl., 2004). Þekkt er mun þróaðri aðferð sem byggir á svokölluðum Specific Barrier Model sem má t.d. finna í grein eftir (Halldórsson, o.fl., 2007) sem aðlöguð hefur verið að íslenskum gögnum. Í aðferðinni hér er hraðapúlsinum bætt við tímaröð sem er mæld í meira en 20 km fjarlægð, eða búin til hermun út frá eldri gögnum. Þessum tilbúna hraðapúls má skipta upp í tvær tegundir, annars vegar tegund A sem er lýst með kósínus falli og tegund B sem lýst er með sínus falli:

$$\dot{u}_{g,A}(t) = \frac{V_p}{2} [1 - \cos(\omega_p t)], \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (3-2)$$

$$\dot{u}_{g,B}(t) = V_p \sin(\omega_p t), \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (3-3)$$

Þar sem T_p er sveiflutími púlsins og V_p er mesti jarðhraði fyrir tímaröðina. Samkvæmt þeirri rannsókn sem birt er í (Halldórsson, o.fl., 2007) er T_p á bilinu 1,49-2,60 sek og hraðinn á bilinu 24,0-95,3 cm/s í Suðulandskjálftunum. Tilbúna hraðtímaröðin er svo búin til með eftirfarandi jöfnum:

$$\dot{u}_{g,SA}(t) = \dot{u}_g(t) + \frac{aV_p}{2} [1 - \cos(\omega_p t)] \quad (3-4)$$

$$\dot{u}_{g,SB}(t) = \dot{u}_g(t) + aV_p \sin(\omega_p t) \quad (3-5)$$

Hér er a valið eftir því hvað hraðapúlsinn á að vera ríkjandi. Til að finna hröðunar-tímaraðirnar er einfaldlega hægt að diffra hraðann. Þannig er auðveldlega hægt að herma nærsviðsáhrif með því að bæta við hraðapúlsi framarlega í hröðunar-tímaröðinni (Shen, o.fl., 2004).

Í (Mavroeidis og Papageorgiou, 2003) er sýnd jafna sem tengir saman stærð skjálfta (M_w) og tíðni hraðapúlsins T_p :

$$\log T_p = -2,9 + 0,5M_w \quad (3-6)$$

Þannig að t.d. ef $M_w = 6,5$ er $T_p = 2,24s$.

Til að herma ákveðin gildi fyrir mesta hraða jarðhreyfingar sem verður nálægt upptökum skjálfta er hægt að nota dvínunarlíkan sem byggir á skráðum nærsviðstímaröðum. Best er ef hægt er að nota staðbundna dvínunarlíkan, en í mörgum tilfellum eru þær ekki til. Dæmi um slíkar líkingar má finna í grein eftir (Ambraseys og Douglas, 2003):

$$\log y = b_1 + b_2M_s + b_3d + b_4S_A + b_5S_S \quad (3-7)$$

Hér er M_s stærð skjálftans miðað við yfirborðsbylgjur, d er fjarlægðin á yfirborðinu frá sprunguplaninu (sprungunni sjálfri). S_A er 1 ef um stífan jarðveg er að ræða, annars 0, S_S er 1 fyrir mjúkan jarðveg en annars 0. Fyrir berg eru báðir stuðlarnir 0. Stuðlarnir sem eru fundnir út frá rannsóknargögnum fyrir 186 skjálfta eru táknaðir með b . Hér getur y táknað margar mismunandi stærðir svo sem hámarks yfirborðshröðun bæði lárétt og lóðrétt, orkuhlutfall og fleira. Þegar y breytist breytast b -stuðlarnir í samræmi við það. Niðurstöður fyrir stuðla b má sjá í töflu 3.1 fyrir hágildi lárétrar og lóðrétrar hröðunar, a_h og a_v .

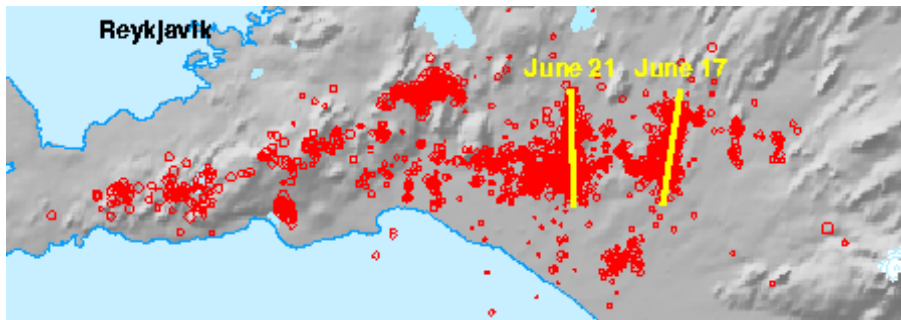
Tafla 3.1 Niðurstöður b -stuðla fyrir valdar stærðir

Log stærðir	b_1	b_2	b_3
$\log(a_h)$	-0,659	0,202	-0,0238
$\log(a_v)$	-0,959	0,226	-0,0312

Stuðla fyrir aðrar kennistærðir má finna í (Ambraseys og Douglas, 2003).

3.2 Suðurlandsskjálftarnir 2000 og 2008

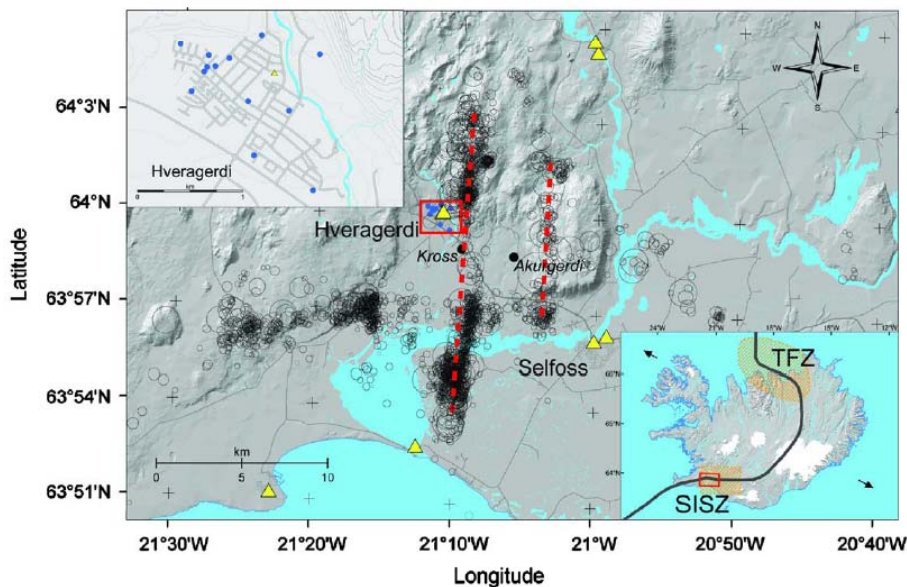
Árið 2000 riðu yfir Suðurland tveir stórir jarðskjálftar, annar þann 17. júní og hinn 21. júní. Upptök þeirra voru í hinu þekktu brothalla Suðurlands (SISZ) en á þessu svæði hafði verið frekar lítil hreyfing í tæplega 100 ár. Í gegnum söguna hafa skjálftar af stærð allt að 7.1 M_s verið tíðir á SISZ svæðinu og hafa oft valdið miklum skemmdum. Síðasta jarðskjálftahrina á þessu svæði var á árunum 1896 og 1912, en eftir skjálftahrinuna árið 1912 var svæðið nánast laust við stóra jarðskjálfta allt til ársins 2000.



Mynd 3-2 Staðsetning og misgengi skjálftanna árið 2000 (Ragnar Stefánsson, o.fl., 2000)

Skjálftarnir árið 2000 voru af svipaðri stærð ($M_W = 6,5$) og fundust í allt að 200 km fjarlægð frá upptökum. Engin hús hrundu í skjálftunum en engu að síður skemmdust sum þeirra svo illa að það þurft að lýsa þau ónothæf. Einnig urðu nokkrar skemmdir á lagnakerfum og vegum. Jörð opnaðist sumstaðar um allt að einn metra við misgengin. Í skjálftanum þann 17. júní mældist mesta hröðun 47% af þyngdarhröðun og í skjálftanum þann 21. júní 84% af þyngdarhröðun (Ragnar Sigbjörnsson, o.fl., 2000).

Skjálfti reið aftur yfir á Suðurlandi þann 29. maí árið 2008. Stærð hans var 6.3 M_W og upptökin voru nálægt Hveragerði. Skjálftans varð víða vart, og sögðust jafnvel íbúar á Ísafirði hafa fundið fyrir honum. Mestu áhrifa gætti í Hveragerði og á Selfossi, og urðu þar töluverðar skemmdir af hans völdum sem og víða annars staðar á svæðinu. Fyrstu mælingar bentu til að skjálftinn hafði átt upptök um það bil 6,5 km suðaustur af Hveragerði í vestur hlíðum Ingólfsfjalls, á sprungu sem liggur nærri því í norður-suður stefnu. Við nánari úrvinnslu á mæligögnum virðist atburðurinn hafa verið þannig að skjálfti við rætur Ingólfsfjalls hafi ræst annan jarðskjálfta u.þ.b. 1 sek síðar, á misgengi við bæinn Kross rétt austan Hveragerðis (sjá mynd 3-3). Misgengið hefur verið kortlagt eftir mörgum eftirskjálftum sem áttu upptök sín á um það bil 20 km langri sprungu í norður-suður stefnu í minna en 2 km fjarlægð frá Hveragerði. Stærð hröðunar í gögnunum við Hveragerði var á bilinu 44% til 84% af þyngdarhröðun og komu fram lágtíðni hraðapúlsar sem eru tengdir nærsviðsáhrifum (B. Halldórsson og R.Sigbjörnsson, 2009).



Mynd 3-3 Staðsetning og misgengi skjálftans árið 2008 (B. Halldórsson og R.Sigbjörnsson, 2009)

Í Hveragerði er staðsett hröðunarmælanetið „ICEARRAY“ sem inniheldur meðal annars 11 þríása mæla. Mesta jarðhröðunin mældist í austur og vesturhluta bæjarins. Var stundum nokkur munur á mældum tímaröðum og skýrist þetta að mestu af aðstæðum á hverjum stað. (B. Halldórsson og R.Sigbjörnsson, 2009)

Tafla 3.2 Tölulegar upplýsingar um skjálftanna

	Skjálfti 17.06.00	Skjálfti 21.06.00	Skjálfti 29.05.08
Lengdargráða	63,97°	63,97°	64,01°
Breiddargráða	20,36°	20,71°	21,01°
Stærð (M_S/M_W)	6,6/6,5	6,6/6,4	6,2/6,3

Skjálftarnir árið 2000 og 2008 verða notaðir við greiningu á nærsviðsáhrifum. Upptök og stærð þessara skjálfta er sýnd í töflu 3.2. Mældar tímaraðir frá þessum skjálftum verða einnig keyrðir á tölvulíkanið af Þjórsárbrúnni sem er til skoðunar í kafla 4.

3.3 Staðsetning og stefna mælistöðva

Til að skoða nærsviðsáhrif voru valdir mælistaðir sem eru tiltölulega nálægt upptökum þeirra skjálfta sem til athugunar eru. Staðirnir eru sýndir í töflu 3.3 sem og fjarlægð þeirra frá upptökum.

Tafla 3.3 Fjarlægð mælistöðva frá sprungum og upptökum

Staðsetning / Skjálfti	Frá sprungu [km]	Frá upptökum [km]
Þjórsárbrú - eldri / 21.06.00	3,0	5,0
Selfoss - ráðhús /29.05.08	4,0/8,0*	8,0
Hveragerði - dvalarheimilli /29.05.08	6,0/1,0*	9,0
Hella / 17.06.00	10,0	15,0

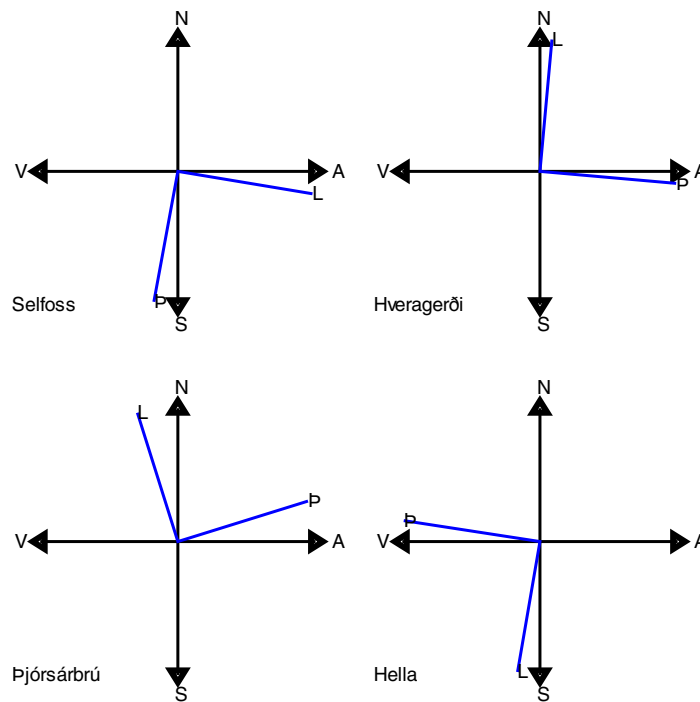
*Áætlað út frá mynd 3-4, og er fyrri fyrir eystri sprunguna og seinni fyrir vestari sprunguna

Á mynd 3-4 má sjá upptök skjálftanna og þær mælistöðvar sem eru til athugunar.



Mynd 3-4 Staðsetning skjálfta og mælistöðva

Til að geta notað gögnin frá þessum mælistöðvum þarf að vita stefnur hröðunarrásanna á sérhverjum stað. Í Þjórsárbrúnni ráðast stefnurnar af legu hennar, þ.e. láréttu þættirnir fylgja annars vegar langátt og hinsvegar þverátt hennar. Mælarnir á hinum stöðvunum eru einnig í stefnu mannvirkjanna og má sjá á mynd 3-5 hverjar þessar stefnur eru miðað við norður.



Mynd 3-5 Stefnur mælistöðva

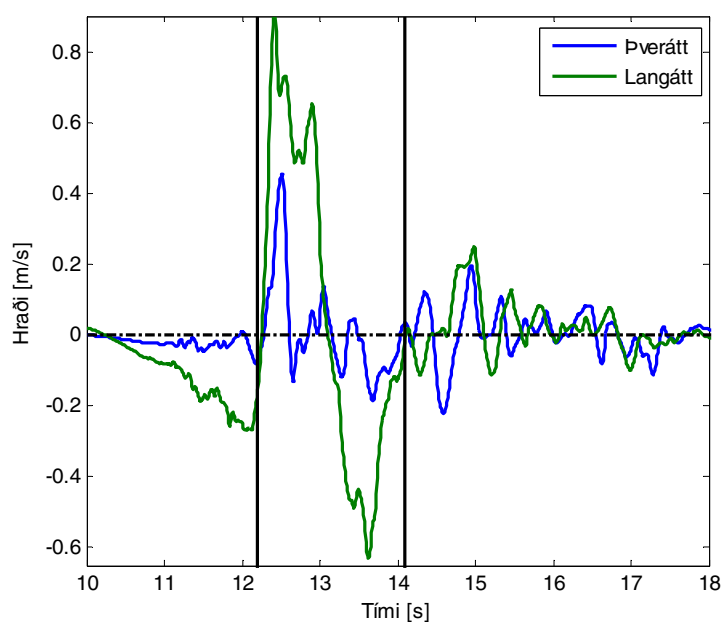
Til að fá einhverja tilfinningu á því hversu sterk áhrif skjálftanna voru á hverjum mælistað er í töflu 3.4 sýnt hágildi jarðhröðunar fyrir mælipunktana. Eins og vænta mátti er hágildishröðunin há þegar upptök skjálftans eru nálægt mælistöðvunum.

Tafla 3.4 Lárétt hágildishröðun eftir staðsetningu og skjálfta

Staðsetning / PGA [m/s^2]	Skjálfti 17.06.00	Skjálfti 21.06.00	Skjálfti 29.05.08
Þjórsárbrú – vestari stöpull	5,08	8,22	0,95
Þjórsárbrú – austari stöpull	2,16	5,27	-
Selfoss – ráðhús	0,71	1,25	5,26
Hveragerði - dvalarheimilli	1,07	1,11	6,51
Hella	4,68	1,62	0,47

3.4 Ákvörðun á hraðapúls í mældum tímaröðum

Til að athuga hvar nærsviðsáhrif koma fram þarf að fara yfir gögnin fyrir skjálftana við þær mælistöðvar sem áður var talað um. Fyrst þarf að ákvarða á hvaða tímabili mesta útsveifla hraðans verður, þ.e. hvar hraðapúls er í viðkomandi tímaröðum. Þetta er gert sjónrænt og er stundum augljóst en í öðrum tilvikum erfiðara. Til að áætla stefnu hraðans, þarf að teikna upp hraða í langátt á móti hraða í þverátt, en þannig er hægt að sjá í hvaða átt útgildið er mest. Á mynd 3-6 eru teiknaðar saman hraðatímaraðir sem skráðar voru við vestari stöpul Þjórsárbrúarinnar í skjálftanum 21. júní 2000. Þar má greina hvar mesta sveiflan kemur fram og ákvarða hvaða tímabil er best til að skoða stefnuna.

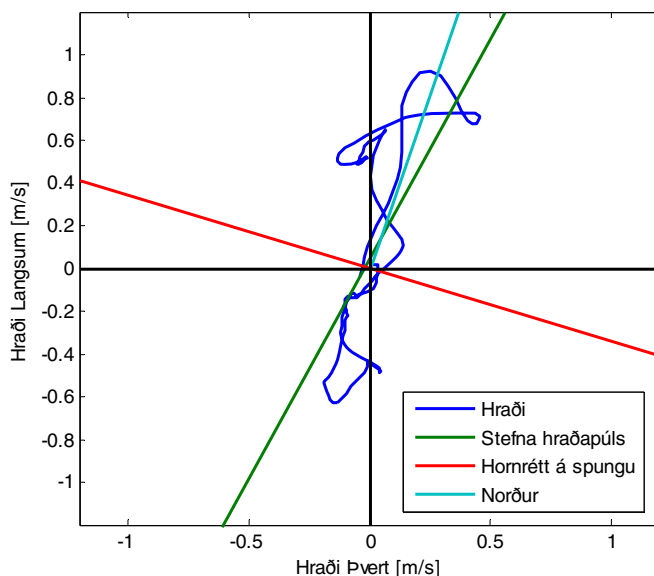


Mynd 3-6 Hágildi hraðasveiflu á tímaröð hraða, tímaröðin er frá Þjórsárbrú 21. júní 2000

Tafla 3.5 Stefna og sveiflutími fyrir hraðapúlsana auk hágilda og lágilda hraðans

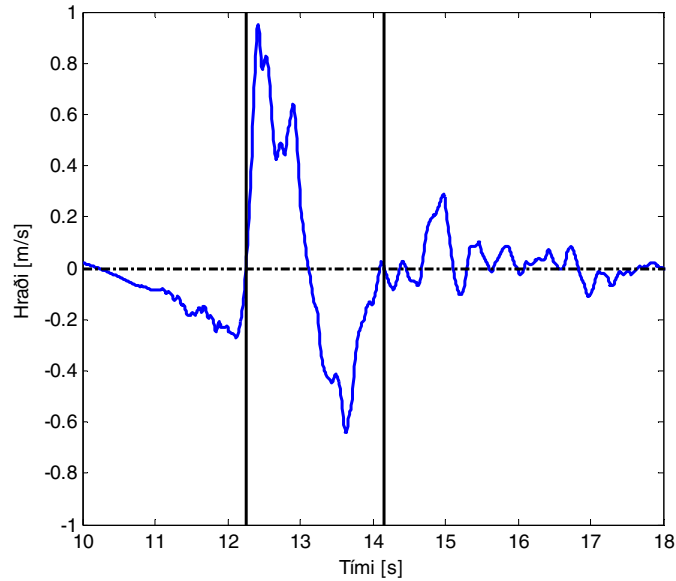
Mælistaður	Skjálfti	Stefna púls* [°]	Sveiflutími púls [s]	Hágildi hraða [m/s]	Lágildi hraða [m/s]
Þjórsárbrú	21/06'00	-8,9	1,90	0,95	0,64
Selfoss	29/05'08	22,5	1,20	0,59	0,26
Hveragerði	29/05'08	28,1	1,65	0,59	0,28
Hella	17/06'00	31,0	1,20	0,48	0,33

*stefnan frá norðri



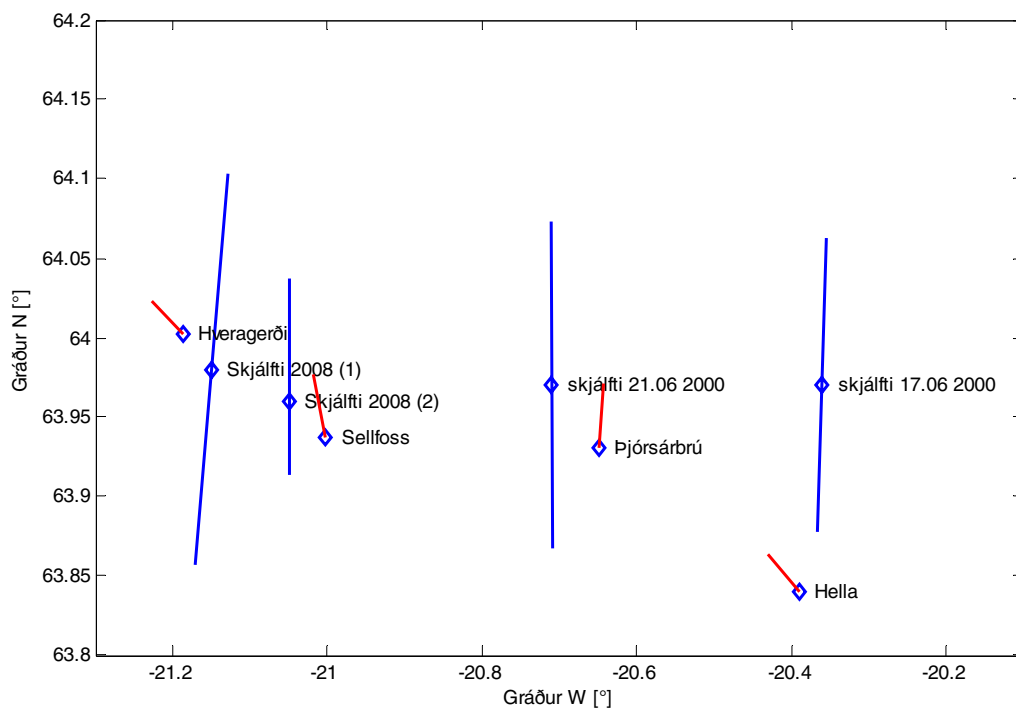
Mynd 3-7 Hraða í langátt á móti hraða í þverátt og stefna hraða (Þjórsárbrú, vestari stöpull 21.06.2000)

Eins og sést er greinilegur púls á bilinu ca. 12,2-14,1 sek. Þetta bil er því valið og á mynd 3-7 er hraði fyrir langátt teiknaður á móti hraða í þverátt. Með því að draga bestu línu í gegnum punktastafið sem myndar óreglulega ferilinn þar sem báðir stefnuþættirnir eru teiknaðir á móti hvor öðrum (mynd 3-7) er hægt að meta þá stefnu sem hefur mest hraðaútslag. Eins og sjá má á myndinni er hraðapúlsinn $\sim 9^\circ$ frá norður-stefnu (mælt réttisælis) og þar með í svipaða stefnu og sprungan liggur. Þegar búið er að finna stefnuna fyrir mesta hraðapúlsinn má nota velþekktar hnitaskiptajöfnur til að varpa mældum hraðatímaröðunum í hraðaröð með stefnu mesta hraðapúls, þessi tímaröð er sýnd á mynd 3-8. Nú má nota myndina til að ákvarða sveiflutíma hraðapúlsins sem er $T_p = 1,9s$ og hágildi og lágildi sveifluútslagsins, $V_{max} = 95,4 \text{ cm/s}$ og $V_{min} = 64,4 \text{ cm/s}$. Sömu aðferðafræði má beita fyrir hina athugunarstaðina þrjá. Niðurstöður eru sýndar í töflu 3.5 og á mynd 3-9 eru stefnurnar sýndar ásamt legu misgengja. Við Þjórsárbrú hefur púlsinn svipaða stefnu og misgengin í skjálftanum 21.06.00, en við Hveragerði, Selfoss og á Hellu er stefnan ca. 30° frá norður-stefnu sem er nokkurn veginn mitt á milli langáttar og þveráttar sprungnanna, í hvoru tilfelli fyrir sig.

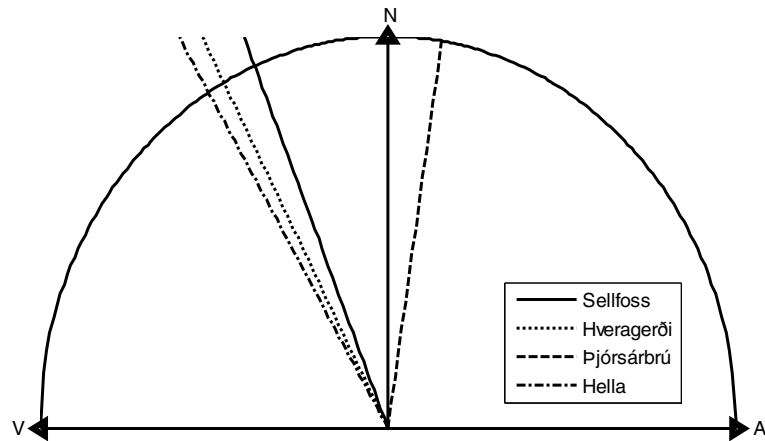


Mynd 3-8 Hraðatímaröð í stefnu hraðapúlsins fyrir tímaraðirnar við Þjórsárbrú

Af þeim gögnum sem hér hafa verið skoðuð sést að T_p er á bilinu 1,2-1,9 sek og að mestu hraðapúlsarnir eru með sveifluútslag á bilinu 0,26-0,95 m/s.



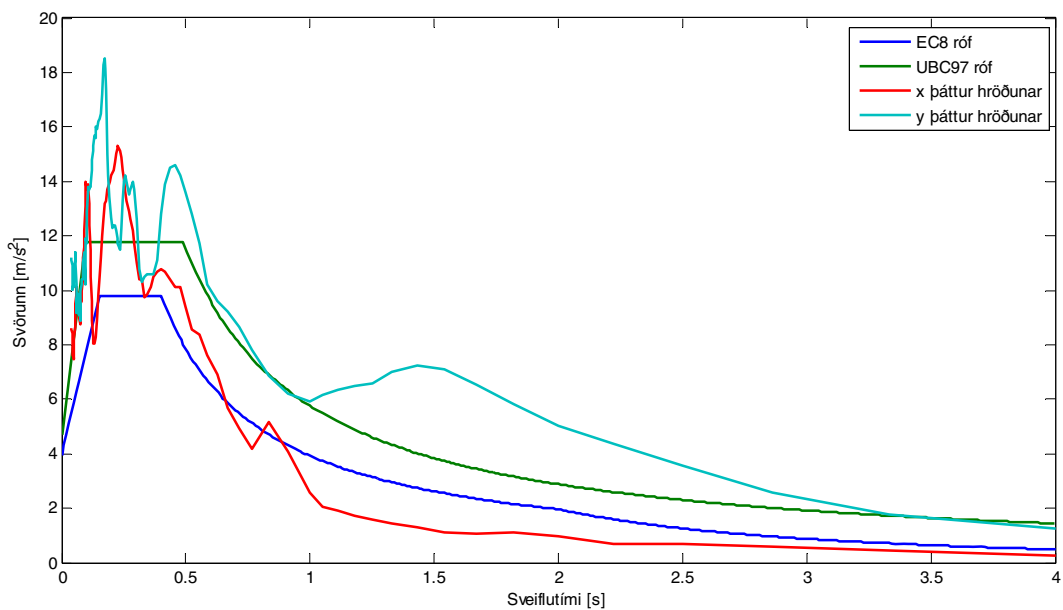
Mynd 3-9 Misgengi, upptök skjálfta og stefnur hraðapúlsa við athugunarstöðvar



Mynd 3-10 Stefnur mestu hraðapúlsanna í gögnunum.

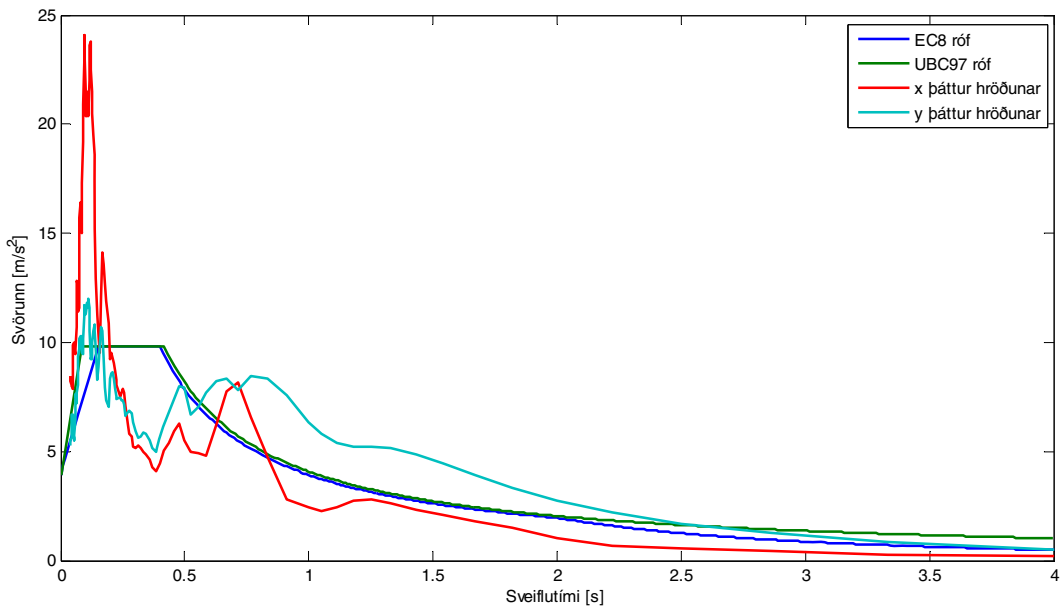
3.5 Athugun á svörunarrófum fyrir skjálftana

Til að kanna enn frekar nærsviðsáhrif er gott að skoða svörunarróf fyrir skjálftana sem um ræðir. Gagnlegt er að bera þessi róf saman við bæði EC8 og UBC-97 svörunarrófin. Fyrst er athugað svörunarrófið fyrir skjálftann þann 21. Júní 2000 við Þjórsárbrúna. Á mynd 3-11 sést að rófið fer hærra en bæði EC8 og UBC-97 rófin. Öll rófin miðast við 5% deyfihlutfall. Eins og sjá má er rófið fyrir UBC-97 töluvert hærra en EC8 rófið en ástæðan fyrir þessu er aðallega sú að nærsviðsstuðlarnir N_a og N_v hækka ferilinn þegar tekið er tillit til nálægðar við sprungu. Einnig má sjá að fyrir y-þáttinn (stefna í langátt brúar) kemur fram ákveðinn toppur í kringum 1,5 sek, sem fer töluvert upp fyrir hönnunarrófin bæði. Þarna er óæskileg svörun að koma fram miðað við staðla en er þó einkennandi fyrir nærsviðsáhrif með hraðapúls. Ennfremur er greinilega nokkuð um toppa sem fara yfir staðalrófin fyrir lægri sveiflutíma eða í kringum 0,1-0,5 sek. Vegna þess að hér á eftir verða skoðuð áhrif á brúarmannvirki sem að hafi hlutfallslega langa sveiflutíma verður þetta ekki sérstaklega skoðað.

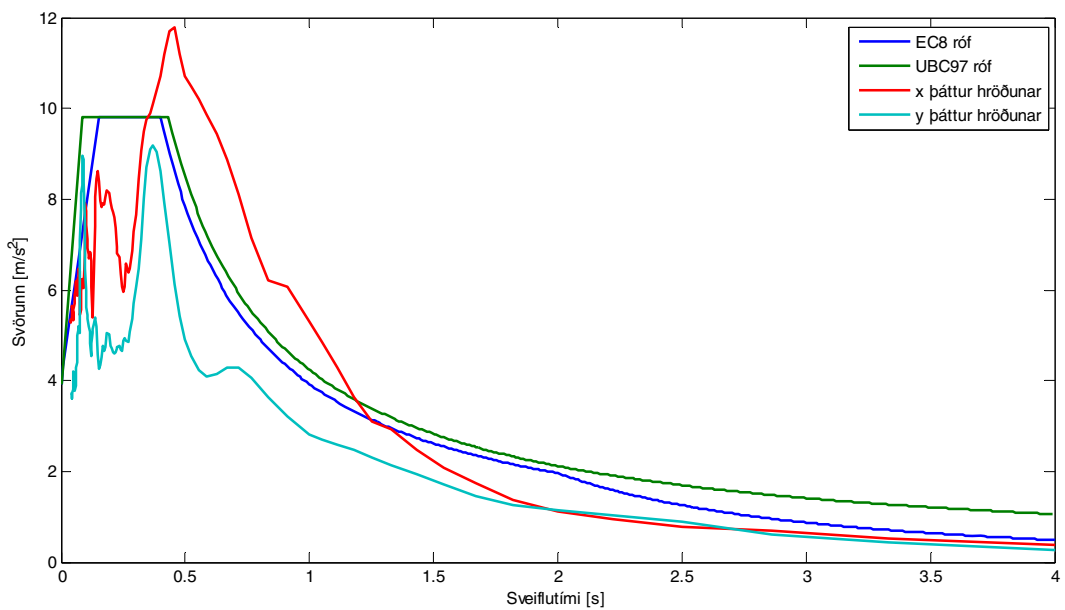


Mynd 3-11 Svörunarróf fyrir skjálftann 21.06.00 við Þjórsárbrú með hönnunarrófum

Á mynd 3-12 er sýnt svörunarrófið fyrir skjálftann 29. maí 2008 við Hveragerði ásamt EC8 og UBC-97 rófunum. Eins og sjá má liggja staðlarófin nokkuð vel saman og er það vegna þess að nærsviðsstuðlarnir fyrir UBC-97 hafa minni áhrif þar sem fjarlægð mælistöðvarinnar frá upptökum er meiri en í tilfellinu fyrir Þjórsárbrú (tafla 3.3). Þetta svörunarróf sýnir svipaðar niðurstöður og í svörunarrófinu fyrir skjálftann árið 2000 við Þjórsárbrú. Þar koma nokkrir toppar fyrir stuttan sveiflutíma og svo aftur við lengri sveiflutíma fyrir bæði langátt (y-þáttur) og þverátt (x-þáttur). Þessir toppar koma fram eins og sjá má í kringum 0,6-1,6 sek fyrir y-þáttinn og 0,6 sek fyrir x-þáttinn.



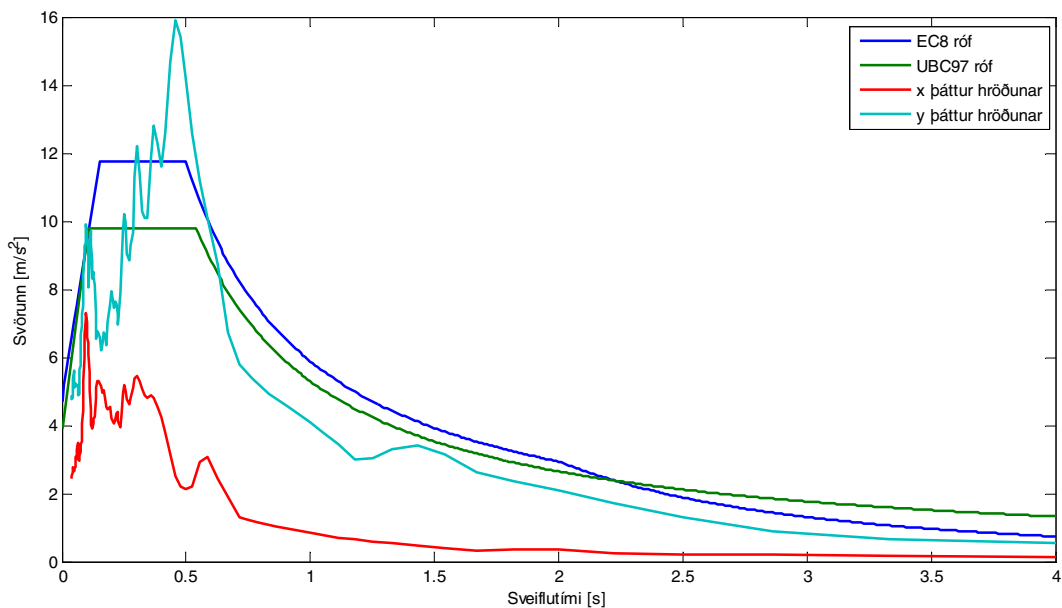
Mynd 3-12 Svörunarróf fyrir skjálftann 29.05.08 við Hveragerði með hönnunrrófum



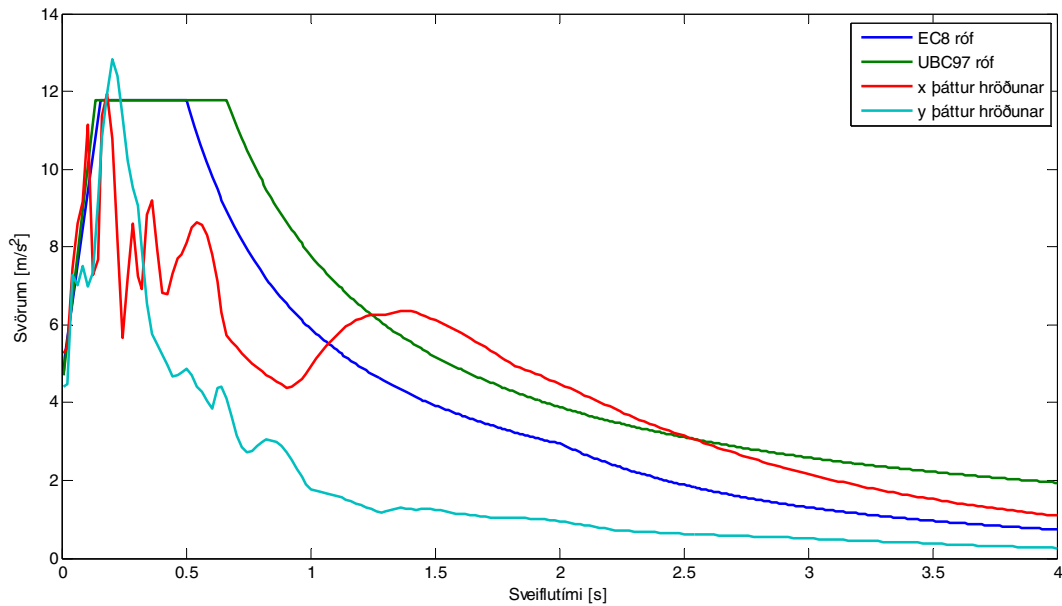
Mynd 3-13 Svörunarróf fyrir skjálftann 29.05.08 á Selfossi með hönnunrrófum

Einnig voru skoðuð svörunarrófin fyrir 2008 skjálftann við Selfoss og 17 júní 2000 skjálftann við Hellu. Rófið fyrir y-þáttinn á Selfossi (sjá mynd 3-13) liggur vel undir staðalrófunum. Þverátt (x-þáttur) er hins vegar orkuríkari og er fyrir ofan viðmiðunarrófin á bilinu 0,5 og 1,3 sek. Hönnunarrófin voru mjög svipuð og fylgdust nokkuð vel að og toppuðu þau við sömu svörun. Langátt (y-þátturinn) svörunarinnar var alltaf undir hönnunarrófinu. Fyrir svörunarrófið á Hellu fylgdust hönnunarrófin ekki að en þetta skýrist af því að á Hellu er um annan jarðvegsflokk að ræða og staðlarnir taka öðruvísi á þessum þætti. Á Hellu flokkast jarðvegur sem stífur jarðvegur í stað þess að vera fast berg eins og fyrir hinar mælistöðvarnar. Einn toppur fyrir svörunina fór vel yfir Staðalrófin og var það fyrir langátt (y-þátt) svörunarinnar sem toppaði í u.þ.b. 0,55 sek.

Svörunarróf fyrir eystri stöpul gömlu Þjósárbrúarinnar má sjá á mynd 3-15. Eins og sést hafa rófin svipað form og þau frá vestari stöplinum (mynd 3-11) en eru þó orkuminni. Ástæðan fyrir þessu er sú að stöplarnir eru á mismundi jarðvegi. Að austan stendur stöpullinn á gamalli grágrýtismyndun (klöpp) en sá vestari stendur á hraunlögum sem hvíla á setlögum (Bessason og Kaynia, 2002). Eins og sjá má er UBC-97 rófið svipað EC8 rófinu og sést að þau eru líkari fyrir austari en fyrir vestari stöpulinn. Sjá má á myndinni að sami toppur fyrir svörunina kemur fram við um 1,5 sek og má ætla að hér séu að koma fram sömu nærsviðsáhrifin eins og talað hefur verið um. Á myndinni má sjá að UBC-97 rófið tekur betur tillit til þessa topps.



Mynd 3-14 Svörunarróf fyrir skjálftann 17.06.00 við Hellu með hönnunarrófum



Mynd 3-15 Svörunarróf fyrir skjálftann 21.06.00 við Þjórsárbrú við austari stöpul

3.6 Samantekt á áhrifum

Í köflunum hér á undan voru skoðaðar tímaraðir, stefna þeirra og svörunarróf fyrir þær mælistöðvar sem til athugunar voru. Í sumum tilvikanna voru greinileg nærsviðsáhrif með hraðapúls en í öðrum tilvikum voru þessi áhrif óljósari. Áhugavert hefði verið að skoða fleiri mælistaði. Nærsviðsáhrifin birtast einnig í svörunarrófunum í kafla 3.5, þar sem í ljós kom að róf skjálftanna fór yfir staðalröfin við ákveðinn sveiflutíma. Til þess að lýsa staðbundnum áhrifum með svörunarrófum má líka styðjast við ýmsa stuðla sem skilgreindir eru með mismunandi hætti. Í kafla 3.1 var skilgreindur stuðull í jöfnu (3-1) sem má kalla styrkleikastuðull. Til að skoða áhrifin innan þrengra tíðnisviðs verður skilgreindur nýr stuðull og er hann nefndur ákafastuðull:

$$I_a = \int_{0,9}^{1,8} S_a(t) dt \quad (3-8)$$

Hér stendur a fyrir hröðun, fallið S_a er svörunarróf skjálftans sem fall af sveiflutímanum t . Bilið $0,9 \leq t \leq 1,8$ er valið þar sem brúin, sem við skoðum í kafla 4, hefur fyrstu eigintíma 0,92 sek á fjaðursviði og við ólínulegar formbreytingar getur sveiflutíminn hækkað og er 1.8 sek áætlað gildi fyrir breytta eigintíma við slíka hegðun. Gildi fyrir þessa stuðla má sjá í töflu 3.6 og 3.7. Til að hafa samanburð er sett inn í töflurnar hágildi hröðunar og hraða (PGA og PGV) skjálftanna, sjá töflu 3.6 og 3.7. Þessir stuðlar verða svo notaðir síðar við greiningu á brúnni í kafla 4, til að ákvarða hversu mikil áhrif þetta hefur.

Tafla 3.6 Styrkleikastuðull fyrir skjálfta og staðla, einnig hámarks jarðhröðun

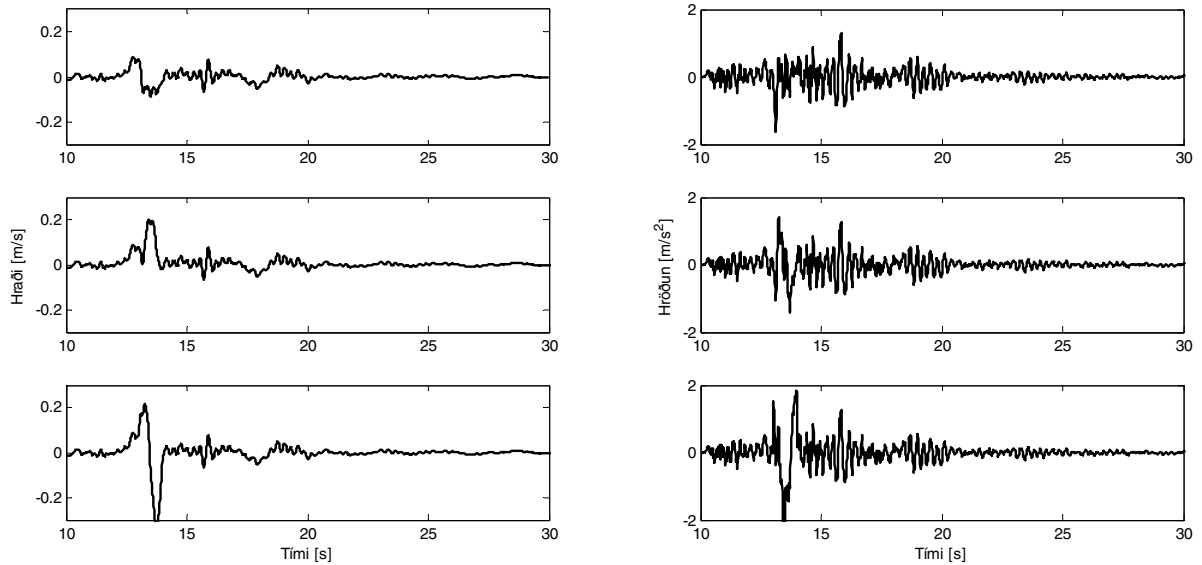
Staðsetning / Skjálfti	SI - Þverátt [m/s]	SI - Langátt [m/s]	SI - EC8 / UBC-97	PGA [m/s ²]
Þjórsárbrú - vestari s. / 21.06.00	4,80	14,90	6,79 / 11,61	8,22
Þjórsárbrú - austari s./ 21.06.00	3,5	11,76	10,19 / 14,19	5,27
Selfoss / 29.05.08	7,80	5,10	6,79 / 8,47	5,26
Hveragerði / 29.05.08	5,60	11,00	6,79 / 8,09	6,51
Hella / 17.06.00	1,60	7,80	10,19 / 10,59	4,68

Tafla 3.7 Ákafastuðull fyrir skjálfta og staðla, einnig hámarks jarðhraði

Staðsetning / Skjálfti	Ia - Þverátt [m/s]	Ia - Langátt [m/s]	Ia - EC8 / UBC-97	PGV [m/s]
Þjórsárbrú - vestari s. / 21.06.00	1,53	6,84	2,75 / 4,49	0,92
Þjórsárbrú - austari s./ 21.06.00	1,27	5,35	4,13 / 6,42	-
Selfoss / 29.05.08	3,48	2,28	2,75 / 3,27	0,50
Hveragerði / 29.05.08	2,52	5,36	2,75 / 3,13	0,55
Hella / 17.06.00	0,54	3,22	4,13 / 4,26	0,48

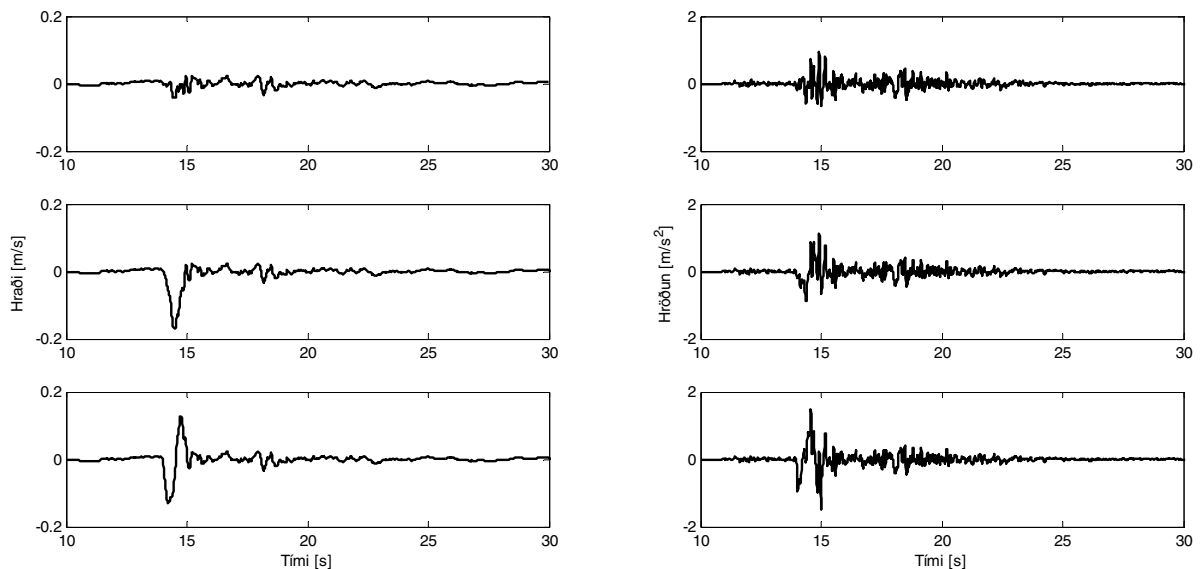
3.7 Hermun nærsviðsáhrifa

Til eru nokkrar aðferðir við að herma nærsviðsáhrif með sérstökum upptaka líkönum, sjá (Halldórsson, o.fl., 2007). Með því að bæta inn hraðapúlsi í tímaröðir sem skráðar eru „langt“ frá upptökum. Hér verður notast við einfalda aðferð sem var skilgreind í kafla 3.1.4. Aðferðin miðast við að notaðar séu tímaröðir sem skráðar eru í meira en 20 km fjarlægð frá upptökum. Notast er við jöfnur (3-4) og (3-5), þar sem púlsinn hefur ákveðna lotu T_P , sjá töflu 3.5. Hér er valið að nota $T_P = 1,0$ sek. Fastinn a er valinn sem 3. Á mynd 3-16 má sjá hermun fyrir skjálftann 21. júní árið 2000 við Hella. Þessi tímaröð var valin vegna þess að hún er í um 20 km fjarlægð og hentar því ágætlega til að prófa aðferðina. Til vinstri má sjá hraðatímaröð og til hægri má sjá hröðunartímaröð. Efstu tímaröðirnar eru fyrir upprunalegu tímaröðina, í miðjunni er jafna (3-4) (tegund A hrökkáhrif) notuð til að búa til hraðapúlsinn og neðst er jafna (3-5) (tegund B framvirk stefnuáhrif) notuð. Einnig var gerð hermun fyrir skjálftann 29. maí árið 2008 við Þjórsárbrú, vestari stöpul, og má sjá hana á mynd 3-17. Þessar tímaröðir verða svo keyrðar á tölvulíkanið í fjórða kafla til þess að sjá hversu góð aðferðin er og hvernig áhrif það hefur að bæta þessum púlsi við. Hér ber þess að geta að í þessari keyrslu er stefna hraðans sett í stefnu þvert á misgengin til þess að ná fram áhrifum sem líkjast nærsviðsáhrifum eins og talað er um í fræðikaflanum hér á undan.



Mynd 3-16 Hermun með gögnum fyrir Hellu 21. júní 2000, til vinstri eru hraða-tímaraðirnar en til hægri hröðunar-tímaraðirnar

Rétt er að undirstrika að gildin sem hér voru valin á T_p og a eru ekki vel grunduð og í reynd þarf að rýna í mæligögn (sbr. Töflu 3.5) og meta jarðskjálftavána út frá fyrirliggjandi upplýsingum hverju sinni. Hér er því meira verið að sýna að stærðfræðilega er hægt að bæta hraðapúlsi inn í tímaraðir sem mældar eru fjarri upptökum en eftir stendur að rannsaka hvaða kennistærðir er skynsamlegt að leggja til grundvallar.



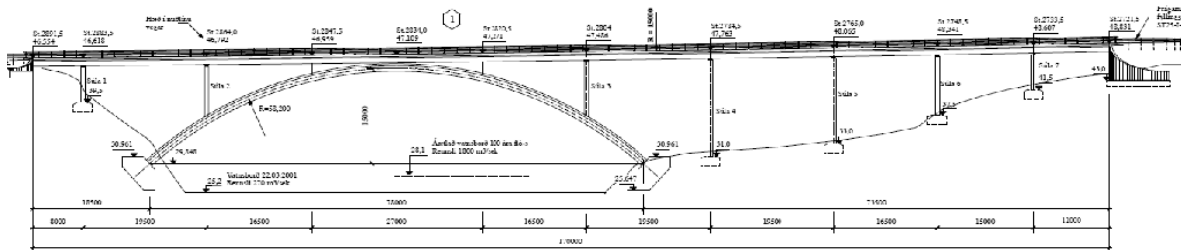
Mynd 3-17 Hermun með gögnum fyrir Þjórsárbrú 29. maí 2008, til vinstri eru hraða-tímaraðirnar en til hægri hröðunar-tímaraðirnar

4 JARÐSKJÁLFTA GREINING Í SAP2000

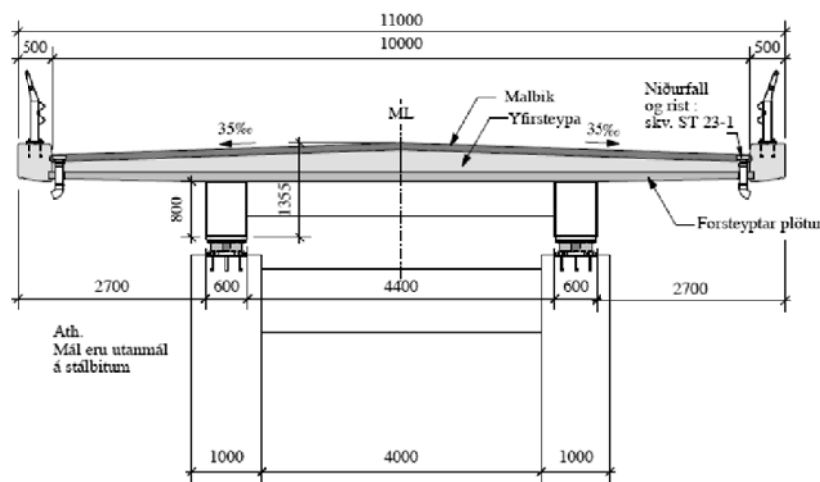
Í þessum kafla verður farið yfir greiningu sem gerð var á nýju Þjórsárbrúnni. Keyrðar verða sérvaldar tímaraðir til að skoða hvernig brúin hegðar sér við ákveðin tilfelli. Í kaflanum verður fyrst farið yfir hvernig brúnni var stillt upp í Sap2000 forritinu. Skoðuð verða þau randskilyrði sem þurfti að hafa í huga og hvernig einingar brúarinnar voru upp settar. Því næst verður ákvarðað hvaða gögn skal keyra á brúna og uppsetningu þeirra í Sap2000 lýst. Í lokinn verður farið yfir þær niðurstöður sem komu í kjölfar greiningarinnar og samantekt.

4.1 Nýja Þjórsárbrúin

Í nóvember árið 2002 var hafist handa við að byggja nýja brú yfir Þjórsá. Ákveðið var að hafa nýju brúna neðar í ánni heldur en þá eldri eftir að ábúendur í kring báðu eindregið um það. Við gerð nýju brúarinnar var leitast við að hafa sama jarðgrunn beggja vegna árinna og fannst staðsetninga sem uppfyllir þessi skilyrði u.þ.b. 700 metrum neðar en eldri brúin. Við hönnun brúarinnar var notast við EC8 (European committee for standardization, 2003) og í honum er einmitt minnst á nauðsyn þess að taka tillit til breytileika í jarðskjálfta áraun þegar jarðlög eru ósamfelld og/eða mismunandi í undirstöðum. Nýja Þjórsárbrúin er 170 m löng samverkandi stálbitabrá með steypu gólfi á níu höfum og jafnframt er undir henni 78 m langur steypdur samverkandi stálbogi yfir farveg árinna. Akbraut brúarinnar er 10 m breið og heildar breidd hennar er 11 m.



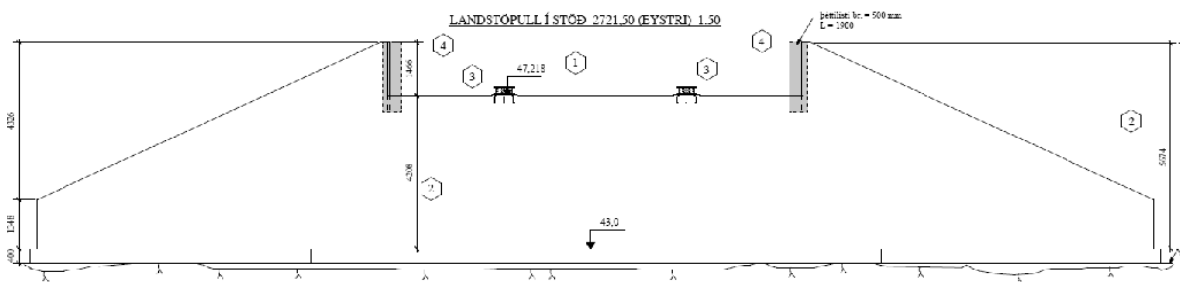
Mynd 4-1 Teikning af Þjórsárbrúnni (Vegagerðin, 2002)



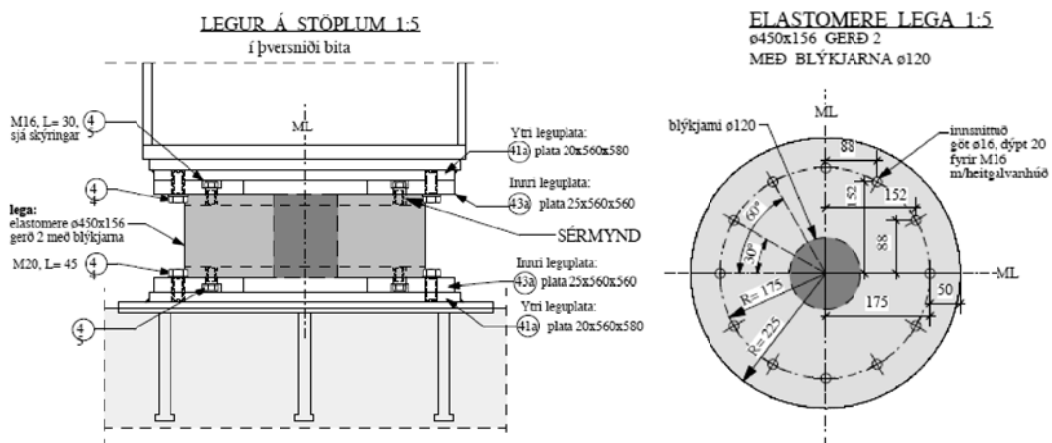
Mynd 4-2 Þversnið í Þjórsárbrúnni (Vegagerðin, 2002)

Langbitar brúarinnar eru tveir soðnir lokaðir stálkassar (breidd: 600 mm og hæð: 800 mm). Ofan á stálbitana voru settar 10,1 m breiðar forsteyptar plötur sem mynda neðri hluta steypa brúargólfsins og voru einnig notaðar sem steypumót við byggingu brúarinnar. Stálboginn er gerður úr tveimur soðnum lokuðum kössum (breidd: 800 mm og hæð: 900 mm), smíðaðir í 10 m lengdum. Ofan á stálbogann voru settar 4,4 m breiðar steypar plötur sem mynda neðri hluta steypa hluta bogans. Á langbita, stálboga og þverbíta voru soðnir skúfboltar sem tengja stálið við aðliggjandi steypa hluta. Yfirbygging brúarinnar var steypst föst við miðhluta bogans en á aðrar undirstöður voru settar sérstakar jarðskjálftalegur. Allar undirstöður brúarinnar eru steypst og grundaðar á bergi. Við hönnun var tekið tillit til jarðskjálftaáráunar skv. gildandi stöðlum og þurfti að koma fyrir bergfestum í allar milliundirstöður brúarinnar ásamt bogaundirstöðunum og bergboltum í undirstöður landstólpa (Einar Hafliðason og Kristján S. Baldursson, 2003).

Jarðskjálftalegur voru settar ofan á allar súlur til að bera yfirbygginguna og einnig ofan á landstöplanna, á mynd 4-3 má sjá landstöpullinn vestan megin og einnig má sjá legurnar sem á hann voru settar. Eins og áður sagði er yfirbyggingin föst í miðjum boganum sem spannar ána sjálfa. Bilið sem er á milli yfirbyggingarinnar og landstöpsins er 200 mm til beggja hliða og einnig við enda yfirbyggingarinnar og er sett þar til gerð fylling á milli. Er þetta bil aðallega til þess að taka upp færslur vegna hitabenslu og skriðs. Getur því yfirbygging færst um tæplega 200 mm án þess að skemma landstöplana. Á mynd 4-4 má sjá jarðskjálftalegurnar sem notaðar voru milli stöpla og yfirbyggingar. Í töflu 4.2 má sjá helstu stærðir þeirra.



Mynd 4-3 Teikning af landstöpli austari megin (Vegagerðin, 2002)



Mynd 4-4 Teikning af legum (gerð 1) sem eru á stöplunum (Vegagerðin, 2002)

4.2 Uppsetning á líkaninu í Sap2000

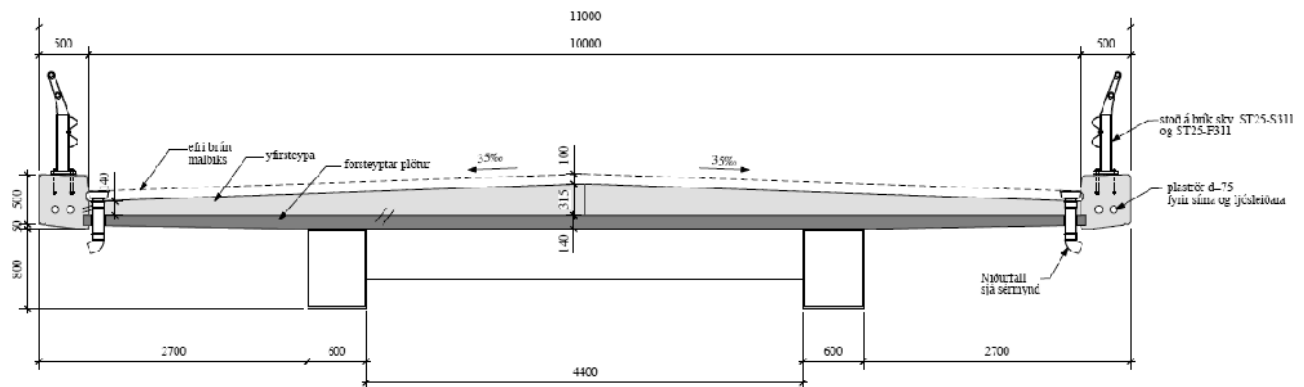
Við uppsetningu líkansins í Sap2000 var fyrst skoðað hvernig brúin skiptist upp í hluta og svo ákveðið hvernig byggja skyldi þessa hluti inn í líkanið. Fyrst voru efnistuðlar skilgreindir fyrir steypuna, þeir eru sýndir í töflu 4.1. Töflugildin miðast við lármarksgildi samkvæmt teikningum. Einnig kemur fram hvaða kennistærðir voru notaðar fyrir stálið við gerð líkansins. Ákveðið var að nota enga hlutstuðla (öryggisstuðla) fyrir efniseiginleika úr hönnunarstöðlunum (Eurocode). Ástæðan er sú að ætlunin er að skoða sem raunverulegastar aðstæður fyrir brúna. Það mætti deila um hvort ekki ætti að nota einhverja lækkunarstuðla fyrir steypuna til að taka tillit til rifins þversnið. Það verður þó ekki gert heldur miðað við heilt órifið þversnið.

Tafla 4.1 Efnistuðlar þeirra efna sem notuð voru

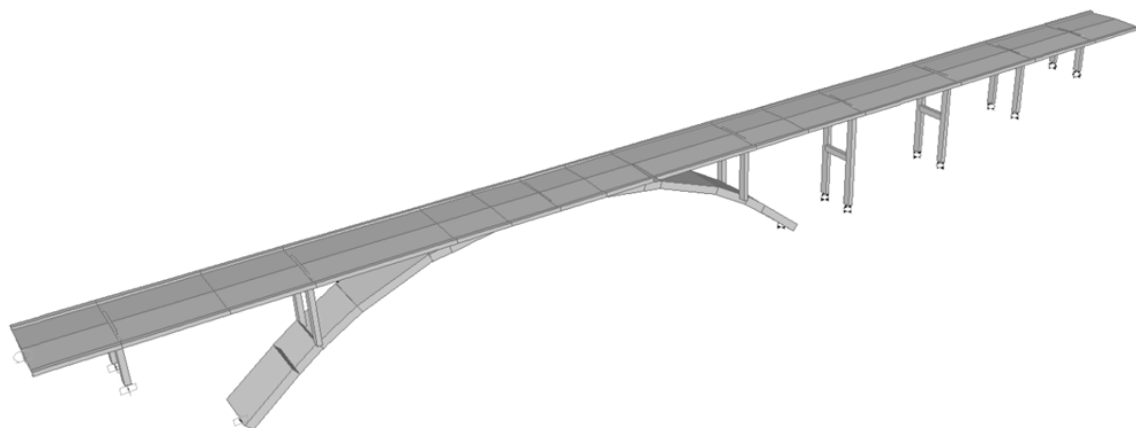
Efni	Young-stuðull, E [GPa]	Poisson- hlutfall [-]	Flotstyrkur, fy [MPa]
Steypa C35*	33,5	0,2	35,0
Stál*	200,0	0,3	245,0
Steypustyrktar stál*	200,0	0,3	400,0

*Heimild: (European committee for standardization, 1997)

Við gerð líkansins var ákveðið að notast við þrívíddar líkan og er ástæða þess að sumir hlutar brúarinnar greinast betur þannig, svo sem hæstu stöplarnir sem eru myndaðir úr tveimur súlum með tengibita á milli (sjá mynd 4-6). Súlurnar voru því settar upp í þrívídd en yfirbyggingin sjálf og boginn eru hinsvegar myndað með bitaeiningum. Ástæðan fyrir þessu er sú að bæði boginn og yfirbyggingin eru samverkandi einingar af steypu og stáli. Þannig var fyrst reiknaður steypuflötur eininganna og voru svo stálbitunum bætt við, því næst þversniðsstærðir reiknaðar fyrir einingarnar og þversniðin skilgreind í Sap2000. Við reikningana á samverkandi þversniðunum var notast við Matlab. Mynd 4-5 sýnir steypuþversnið og stálbitanna fyrir yfirbyggingu brúarinnar.



Mynd 4-5 Steypuþversnið brúardekksins og stálbitanna fyrir brúna (Vegagerðin, 2002)



Mynd 4-6 Tölvulíkan af Nýju Þjórsárbrúnni í þrívídd tekið úr Sap2000

Súlupversniðin voru skilgreind í Sap2000 ásamt þeim bitapversniðum sem skilgreina þurfti. Þessi þversnið voru svo notuð til að búa til súluundirstöður brúarinnar og þær súlur sem tengja bogann við yfirbygginguna, þetta má t.d. sjá á mynd 4-6. Þegar þessi þversnið voru skilgreind í Sap2000 var reynt að nálgast járnun þeirra eins vel og mögulegt var, ekki var þó hægt að taka tillit til þeirrar aukabendingar sem kemur fram þegar súlur og bitar koma saman. Boginn er tengdur við yfirbygginguna með steiptum veggjum sitt hvoru megin á honum, þessir veggir eru ekki sérstaklega settir inn í líkanið en tekið er tillit til þeirra. Í líkaninu er boginn festur við hreyfingar brúardekksins á ákveðnu millibili á því svæði sem veggirnir eru og svo er massi veggjanna reiknaður og bætt inn sem punktmassa á sömu stöðum. Þetta er sett inn til að taka tillit til stífniáhrifa veggjanna og áhrifa aukins massa á eiginsveiflutíma.

Tafla 4.2 Stærðir fyrir jarðskjálftalegur

Stærð	Gúmmí Gerð 1	Blýkjarni Gerð 1	Gúmmí Gerð 2	Blýkjarni Gerð 2
Hæð, T [mm]	156	156	156	156
Ytri radíus, r [mm]	225	120	250	120
Þverskurðarflatarmál, A [mm ²]	113.804	45.239	151.111	45.239
Upphafsstífni, K_r [N/mm]		730		970
Eftirstífni, K_u [N/mm]		8.460		11.240
Flotspenna, Q_d [N]		361.912		361.912

Brúin er á jarðskjálftalegum, eins og áður hefur verið talað um, sem tengja saman yfirbygginguna við stöplana og landstöplana. Stöplarnir milli boga og yfirbyggingar hafa legur af gerð 2 og einnig tveir hæstu stöplarnir (súlurnar hægramegin við boga á mynd 4-6). Við báða landstöplana og hina þrjá stöplana var notast við gerð 1. Til að taka tillit til ólínulegra formbreytinga og hysteresu áhrifa voru notaðar ólínulegar tengieiningar („link element“). Helstu kennistærðir fyrir legurnar eru sýndar í töflu 4.2, stuðst var við jöfnur (2-58), (2-59) og (2-60) til að reikna sumar þessara stærða. Tengieiningar hafa sömu lengd og legurnar í z-stefnu og ákveðna stífni í lárétta stefnu (sjá töflu 4.2) en eru gerðar fullkomlega stífar í lóðrétta stefnu. Þetta er gert til einföldunar þar sem lóðréttar færslur í legunum hafa óveruleg áhrif á líkanið. Legurnar eru stuttar og stífni þeirra í þessa stefnu töluvert hærri en í lárétta stefnu og þar með hefðu færslurnar orðið mjög litlar. Til að festa líkanið var ákveðið að gera allar undirstöður innspenntar og voru tengieiningarnar festar við innspennuna í endunum á yfirbyggingunni. Stöplarnir og boginn voru sömuleiðis höfð

innspennt þar sem bæði er fest með bergfestur. Til að skipta líkaninu upp í FEM einingar var notast við sjálfvirka skiptingu sem forritið bíður upp á. Var ákveðið að þetta myndi duga til þessar nálgunar, ekki var notast við stærri einingar en 1 m og var hverjum bita skipt upp í a.m.k. 3 einingar. Gerð var samleitnigreining og athugað hvort þetta val á stærðum væri nógu gott og kom í ljós að líkanið er mjög samleitið. Þar með voru þessar stærðir ásættanlegar. Ákveðið var að sleppa því að bæta inn massa bæði fyrir malbik og vegrið þar sem áhrifin ættu að vera óveruleg.

4.2.1 Tímaraðir sem notaðar voru

Við gerð jarðskjálftagreiningarinnar voru notaðar tímaraðir úr ISESD-gagnagrunninum (Ambraseys, o.fl., 2002). Tilbúnum hraðapúls var bætt við tvær tímaraðir sem skráðar voru í meiri en 20 km fjarlægð (sjá kafla 3.1.4). Þessar tímaraðir voru keyrðar á líkanið, sjá töflu 4.3. Frá hverjum mælistað voru notaðar báðir lárétta þættina, þ.e. annar var keyrður í langátt og hinn í þverátt brúarinnar. Ennfremur var prófað að víxla stefnuþáttum. Þetta var gert til að sjá hvaða afleiðingar það hefur að breyta stefnu þessara skjálfta. Til að taka þessi gögn inn í Sap2000 var notast við textaskrár sem settar voru upp MatLab og úr þeim búið til tímaraðafall. Einungis voru notaðar ólínulegu tímaraðagreininguna og ekki notuð svörunarrófsaðferð.

Tafla 4.3 Upplýsingar um tímaraðir

Nr.	Mælistaður	Skjálfti	ATH
1	Vestari stöpull eldri Þjórsárbrú	21. júní 2000	
2	Ráðhúsið á Selfossi	29. Maí 2008	
3	Öldrunarheimilið í Hveragerði	29. Maí 2008	
4	Hellu	17. júní 2000	
5	Austari stöpull eldri Þjórsárbrú	21. júní 2000	
6	Hellu	29. Maí 2008	Búið að bæta við hraðapúlsi
7	Ráðhúsið á Selfossi	21. júní 2000	Búið að bæta við hraðapúlsi

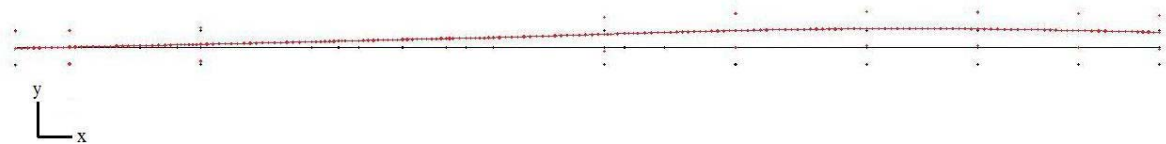
4.3 Eigintíðnir og næmnigreining

Hér verður farið yfir hverjar eru eigintíðnir brúarinnar og hversu mörg sveifluform er nauðsynlegt að nota við greininguna. Einnig verður fjallað um þær tvær greiningaaðferðir sem hægt er að nota í Sap2000. Annars vegar hraðvirka ólínulega tímaraðagreiningu sem byggir á notkun sveifluforma (FNA-greining) og hins vegar hefðbundinni ólínulegri tímaraða greiningu (Direct integration) þar sem unnið er með hreyfilíkingu kerfisins í upprunalegri mynd. Þessi seinni aðferð er fræðilega réttust og hana má nota til að sannreyna aðrar nálgunarlausnir eins og FNA-greiningu. Tölulegar niðurstöður frá báðum aðferðum verða bornar saman og áræðaleiki FNA-greininga skoðuð.

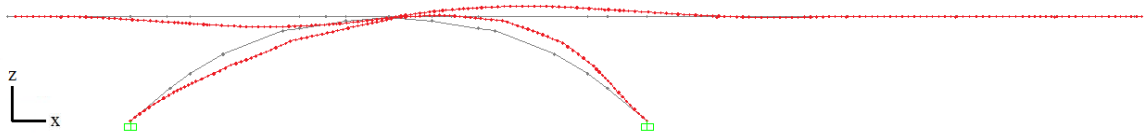
4.3.1 Eigintíðnir og sveifluform líkansins

Til að ákvarða eigintíðnir og sveifluform líkansins var keyrð svokölluð eiginsveiflugreining (model analysis) í Sap2000. Fundin voru 36 sveifluform og kom í ljós að fyrsti eigintíminn var 0,922 sek og sveiflumassi þess forms var 61,4% af heildar massanum í y-stefnu en nánast enginn í hinar stefnurnar. Þegar notast er við 36 sveifluform nást 90,8% massans (summa fyrir öllu sveifluformin) í y-stefnu (þverstefnu), 83,3% í x-stefnu (langstefnu) og 65,8% í z-stefnu. Í töflu 4.4 má sjá eignsveiflutíma fyrir

sveifluformin og hlutfall massans sem kominn er fram fyrir líkanið. Almennt þykir gott að við greiningu náist 90% massans en eins og sjá má nást minna en 90% hans fyrir stefnu x og z. Ætla verður að þetta sé nægjanlegt þar sem að við greininguna verður y-stefna mest skoðuð. Til að sannreyna þetta var bætt við sveifluformum þannig að fyrir allar stefnur sé massinn yfir 90%. Kom í ljós að nauðsynlegi fjöldi af sveifluformum var 94 og til að athuga hver munurinn yrði á því að nota 36 eða 94 var gerð lítil næmnigreining. Út úr henni kom að lítil sem engin breyting varð á færslum í bæði x og z stefnur. Fyrir færslur í y-stefnu er munurinn innan við fjórðung úr sentímetra. Þetta má teljast ásættanlegt og var því ákveðið að notast við 36 sveifluform. Fyrsta sveifluformið má sjá á mynd 4-7 það kemur fram þegar hreyfing kemur á jarðskjálftalegurnar og þær formbreyttast, þetta passar við þau fræði sem talað hefur verið um. Eru fyrstu sex sveifluformin að mestu háð færslum í legunum og það sýnir að þær eru að virka eins og skyldi. Eins og sést í töflu 4.4 fer sveifla í z-stefnu ekki af stað almennilega fyrr en í sjöunda sveifluformi og er þetta að öllum líkindum vegna þess að legurnar voru skilgreindar, fullkomlega stífar í þá stefnu. Á mynd 4-8 er sýnt þriðja sveifluform líkansins. Hér er hreyfing líkansins lítil sem engin í y-stefnu. Þetta sveifluform er fyrst og fremst virkt í x-stefnu og byggir að mestu á færslum í legum, þetta er einnig hægt að sjá út frá töflu 4.4. Líkanið virðist því hegða sér eðlilega.



Mynd 4-7 Fyrsta sveifluformið (horft er ofan á brúargólflið)



Mynd 4-8 Þriðja sveifluformið (horft á brúnna á hlið)

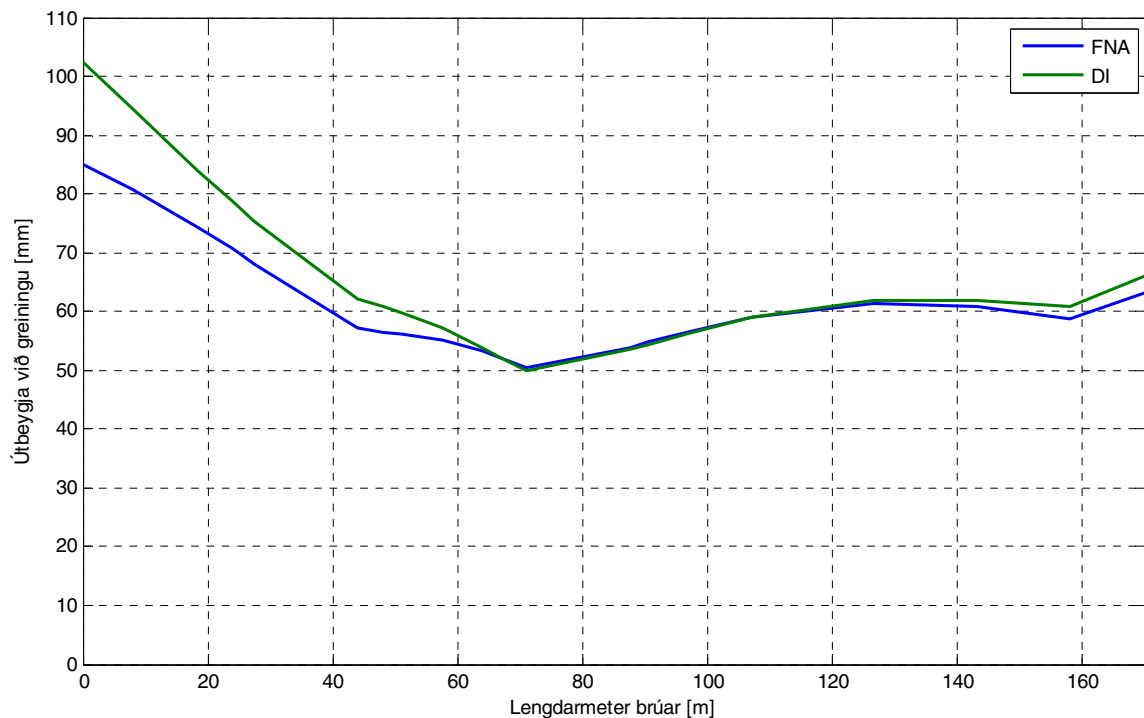
Tafla 4.4 Sveifluform og eiginsveiflutími þeirra ásamt summu af massanotkun

Nr.	Sveiflutími [sek]	x-stefna	y-stefna	z-stefna
1	0,922	~0%	61,4%	~0%
2	0,751	1,6%	61,4%	~0%
3	0,681	55,1%	61,4%	~0%
4	0,641	55,1%	78,9%	~0%
5	0,426	56,6%	78,9%	~0%
6	0,425	56,6%	81,4%	~0%
7	0,300	56,6%	81,4%	4,6%
:	:	:	:	:
36	0,099	83,3%	90,8%	65,8%

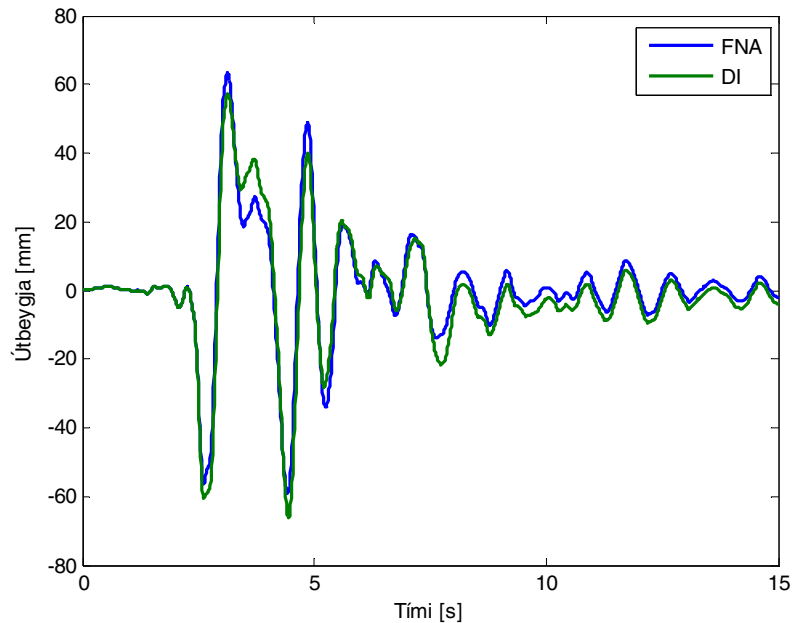
4.3.2 Samanburður á greiningaraðferðum

Kannaður var munurinn á hefðbundinni ólínulegri greiningu (DI) og hraðri ólínulegri greiningu (FNA). Ákveðið var í þessu sambandi að skoða færslur í y-stefnu það er þvert á yfirbyggingu brúarinnar. Aðaltilgangurinn með þessu var að sannfærast um að hægt sé að nota FNA-greininguna til að greina líkanið án þessa að mikil munur sé á þeirri lausn og lausn sem byggir á hefðbundinni ólínulegri tímaraðgreining (DI), sem gengið er út frá að

sé rétt. Við samanburðinn var notast við hröðunartímaröð sem skráð var við gömlu Þjórsárbrúnni í Suðurlandsskjálftanum 21. maí 2000 (tilfelli nr. 1 í töflu 4.3). Hraðvirk ólínulegu greining er eins og nafnið ber með sér fljótvirkari og þar með töluvert þægilegri í notkun en hefðbundin greining. Á mynd 4-9 má sjá mestu færslur í y-stefnu, það er þvert á yfirbygginguna, yfir allan varanda skjálftans fyrir báðar aðferðir. Á myndinni er horft ofan á brúna og má sjá að mesta færslan er við vestari landstöpul brúarinnar. Gefa þessar niðurstöður til kynna að ágætis fylgni er á milli færsla fyrir báðar aðferðir. Þó svo að endapunkturinn vestanmegin sé með um það bil 18 mm mun. Til að skoða fylgni í þessum punkti ferkar er á mynd 4-10 sýnd færsla sem fall af tíma á meðan jarðskjálftinn er keyrður á líkanið. Eins og sést er fylgnin góð yfir tíma. Þessar niðurstöður sýna að ágætis samsvörun er á milli aðferða fyrir þetta líkan og má leiða að því líkur að það sé í lagi að nota einungis hröðu ólínulegu aðferðina.



Mynd 4-9 Færslur yfirbyggingarinnar fyrir sitt hvora greininguna, horft ofan á brúna



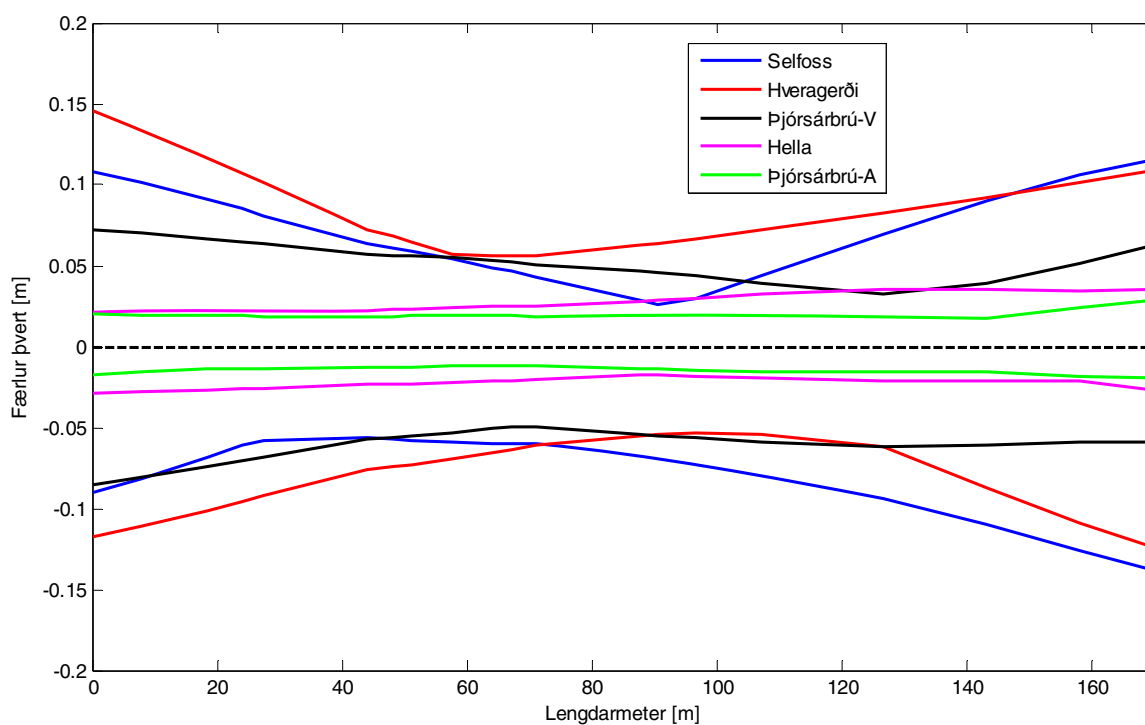
Mynd 4-10 Færslur í y-stefnu í yfirbyggingu í vestari enda brúarinnar sem fall af tíma fyrir tímaröð 1 í töflu 4.3

4.4 Tölulegar niðurstöður

Í þessum kafla verður farið yfir þær greiningar sem gerðar voru á líkaninu. Fyrst verða skoðaðar færslur sem komu í ljós þegar tímaraðirnar sem talað var um í kafla 4.2.1 voru keyrðar á líkanið. Prófað verður að snúa tímaröðunum um 90° og sjá hvaða áhrif það hefur og einnig verða skoðuð áhrifin af því að keyra á líkanið tilbúnu tímaraðirnar sem fjallað var um í kafla 3.7. Í lokin verður farið yfir niðurstöðurnar og þær ræddar.

4.4.1 Keyrslur fyrir raunveruleg gögn

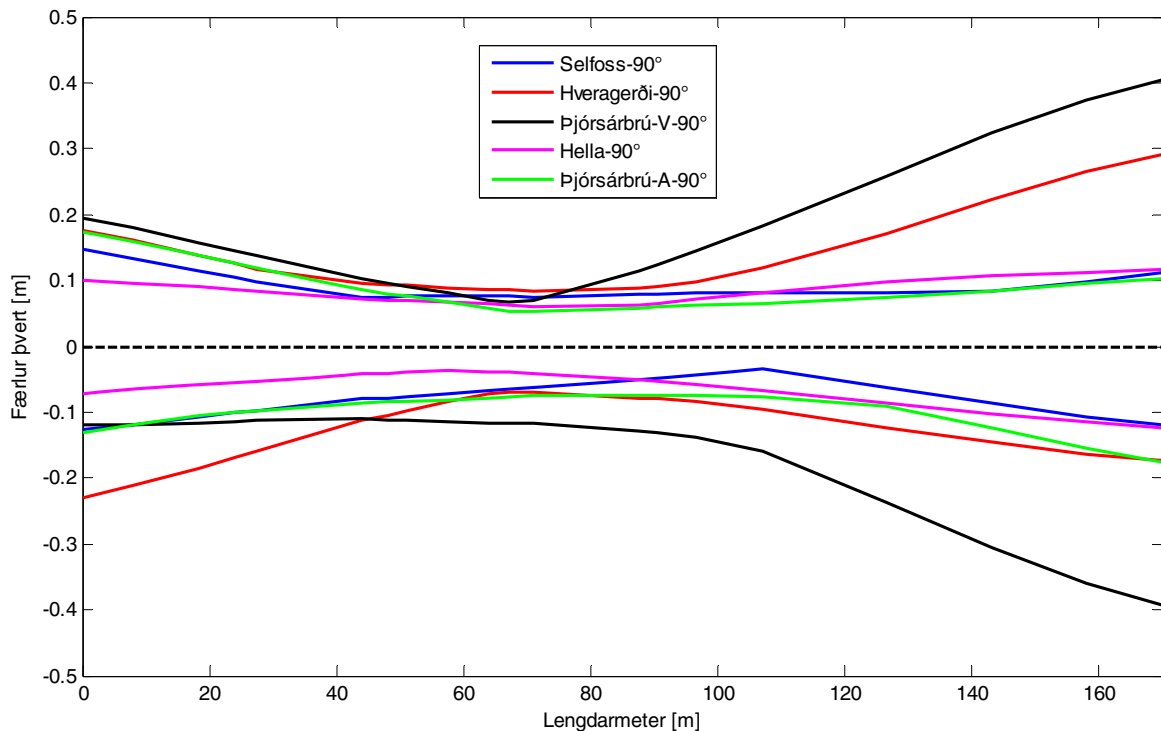
Til að skoða niðurstöður úr fyrstu keyrslunum skulum við líta á mynd 4-11. Hér má sjá mestu færslur yfirbyggingarinnar eftir endilangri brúnni í báðar áttir í y-stefnu fyrir mismunandi tímaraðir (sjá töflu 4.3). Færslurnar fyrir tímaraðirnar frá Hveragerði og Selfossi eru mestar. Rétt er að undirstrika að það skiptir verulegu máli hvernig tímaraðirnar verka á brúnna. Hér var valið að láta upplýsingarnar í töflu 3.5 og 3.6 ákvarða stefnuna, þ.e. þverátt þar er látin verka þvert á brúnna og langátt langsum t.d. er áraunin sem mæld var við Þjórsárbrú 21.06.00 mun meir í þverátt en í langátt. Fróðlegt er einnig að sjá muninn á niðurstöðum frá tímaröðum frá vestari og austari stöplum Þjórsárbrúarinnar. Munurinn felst þó eflaust töluvert í því að um mismunandi jarðveg er að ræða á hvorum árbakka (Bessason og Kaynia, 2002). Einnig sést að bæði tímaraðir frá Hellu og austari stöpli Þjórsárbrúarinnar gefa litla færslu og jafna, má ætla að í þessum tilfellum séu jarðskjálftalegurnar ekki farnar að fljóta og þar með mun stífari. Út frá þessum gögnum var svo reiknuð meðaltalsfærsla fyrir hvert færslulínurit. Þessar meðalfærslur verða svo notaðar seinna meir við greiningu á áhrifum nærsviðsáhrifa og í kafla 4.4.4.



Mynd 4-11 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðir 1-5, horft er ofan á yfirbyggingu brúarinnar

4.4.2 Keyrslur fyrir raunveruleg gögn snúin um 90°

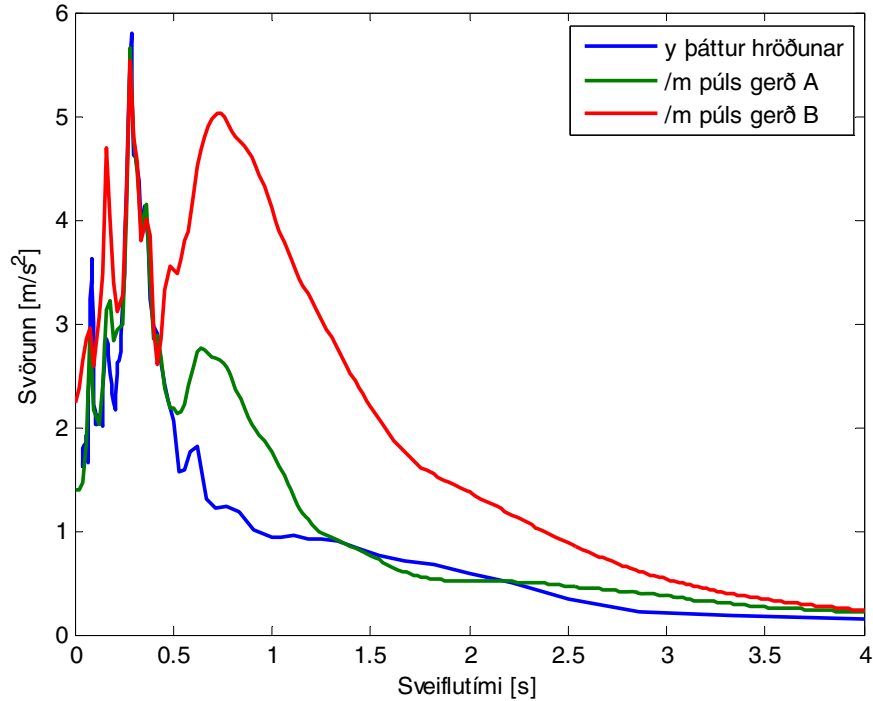
Eins og áður hefur verið talað um var tímaröðunum snúið um 90° til að sjá hvaða áhrif það hefur þegar skjálftarnir koma úr annarri átt og um aðra álagsdreifingu er að ræða. Á mynd 4-12 má sjá færslur í y-stefnu þegar búið er að snúa tímaröðunum. Í flestum tilfellunum er um meiri færslu að ræða en þegar tímaraðirnar snéru rétt. Taka má fram að tímaröðin fyrir Selfoss er nokkurn veginn öfug við hinar þar sem mælirinn fyrir Selfoss snýr 100° frá norðri (Sjá mynd 3-5). Þess vegna má sjá að færslurnar eru meiri þegar tímaröðin er ekki snúin. En eins og sjá má eru færslurnar fyrir vestari stöpul Þjórsárbrúar og Hveragerði mestar, og er það þokkalega í samræmi við fjarlægð þeirra frá upptökum.



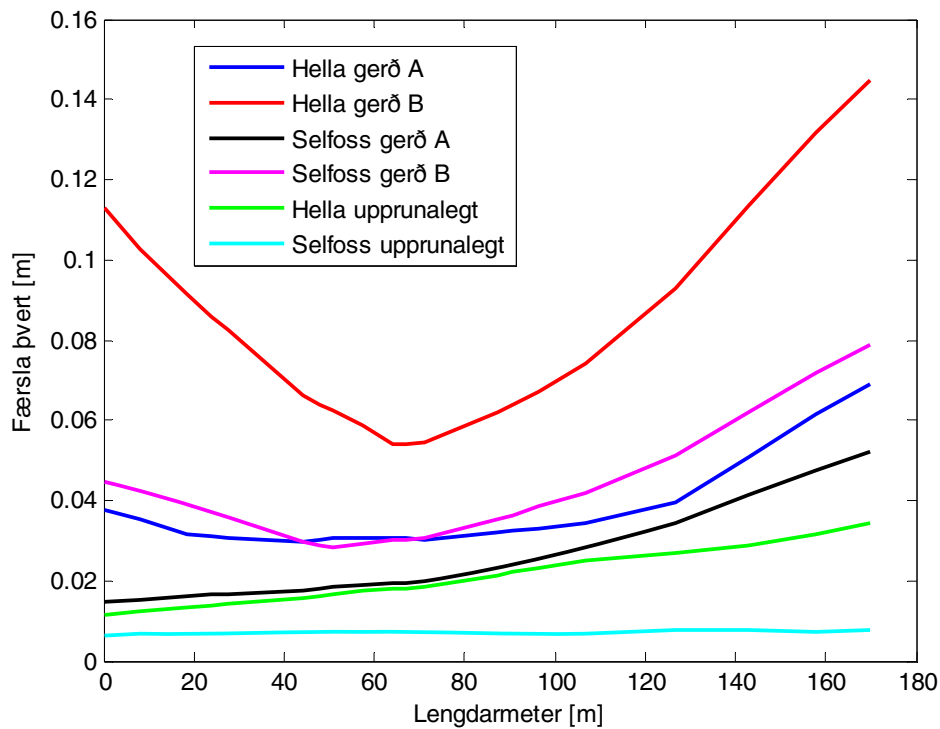
Mynd 4-12 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðir 1-5 búið að snúa þeim um 90° , horft er ofan á yfirbyggingu brúarinnar

4.4.3 Keyrslur fyrir tilbúna tímaraðir

Í þessum kafla verða sýndar niðurstöður fyrir tilbúna tímaraðirnar þar sem búið að bæta við hraðapúlsi í tímaröðinni (sjá kafla 3.7). Til að átta sig aðeins á því hvaða þýðingu þetta hefur er gott að skoða svörunarrófið fyrir tímaröð fyrir og eftir að búið er að bæta púlsinum við. Á mynd 4-13 má sjá þennan mun fyrir tegund A púls og sést greinilegur aukatoppur við ca. 1 sek. Er þetta alveg eðlilegt þar sem púlsinum var gefinn sveiflutíminn 1 sek. Áberandi er hvað toppurinn er hár og er fróðlegt að sjá hvað þetta hefur mikli áhrif á brúna. Tvær tímaraðir voru keyrðir á brúnna með og án púlsa. Tvær tegundir af púlsum voru prófaðar, þ.e. A og B (sjá kafla 3.7). Þess vegna er hér um 6 keyrslur að ræða og verður skoðaður munurinn á þessum keyrslum. Mynd 4-14 sýnir mestu færslur yfirbyggingar brúarinnar í y-stefnu (þvert á brúna). Eins og sést aukast færslurnar töluvert mikið við það þegar hraðapúlsi er bætt við tímaraðirnar. Þetta er merkileg aukning og er auðséð að hraðapúls af gerð B er öflugri en púls af gerð A, og passar það vel við mynd 4-13.

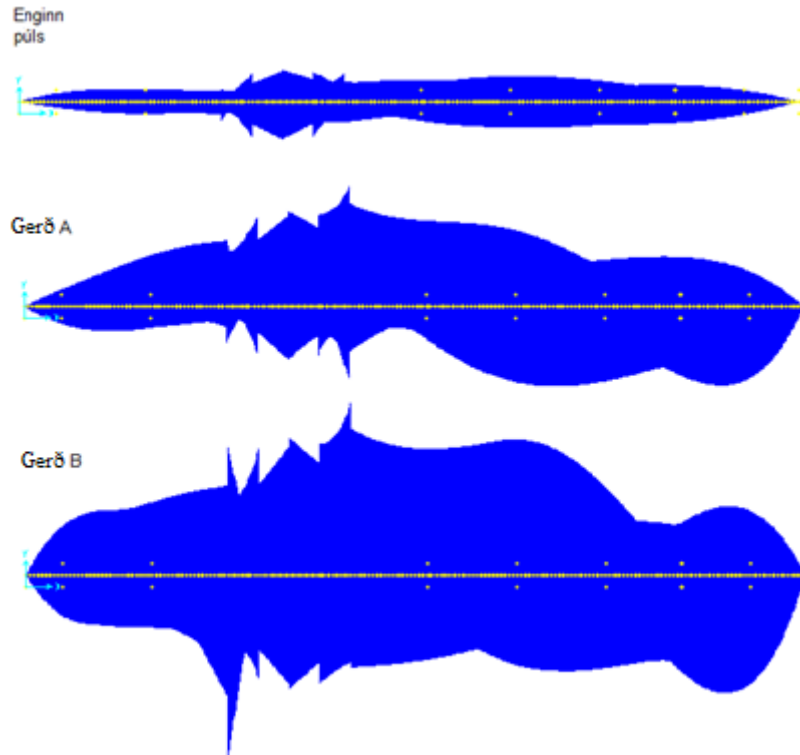


Mynd 4-13 Svörunarróf fyrir skjálftann við Hellsu bæði með og án hraðapúlssi



Mynd 4-14 Færslur í yfirbyggingu brúarinnar fyrir mismunandi gerðir af hraðapúlsum

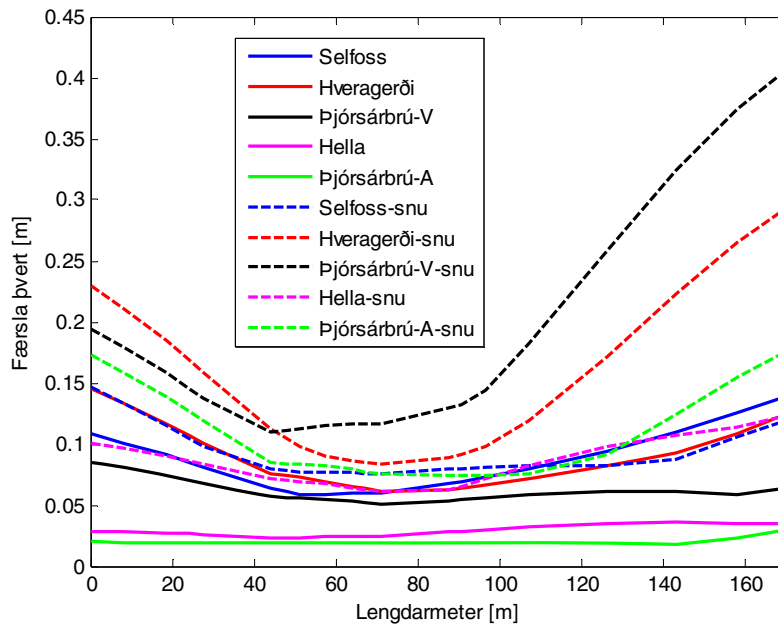
Einnig var skoðað hversu mikil áhrif púlssarnir hafa á beygjuvægi um lóðrétta ás í yfirbyggingunni. Þetta er sýnt á mynd 4-15. Eins og sést breytist vægisdreifingin töluvert á milli þess að hafa engan púls og púls af gerð A. Einnig sést, eins og hefur komið í ljós, að B-púlsinn er mun kraftmeiri en A. Þetta er kannski ekki beint hægt að út skýra á neinn sérstakan hátt, en gæti falist í hvernig sveiflu er um að ræða. Fyrir gerð A er um einn topp að ræða (hálf sveiflu) sem kemur fram í eina átt en fyrir B sveiflast púlsinn heila sveiflu.



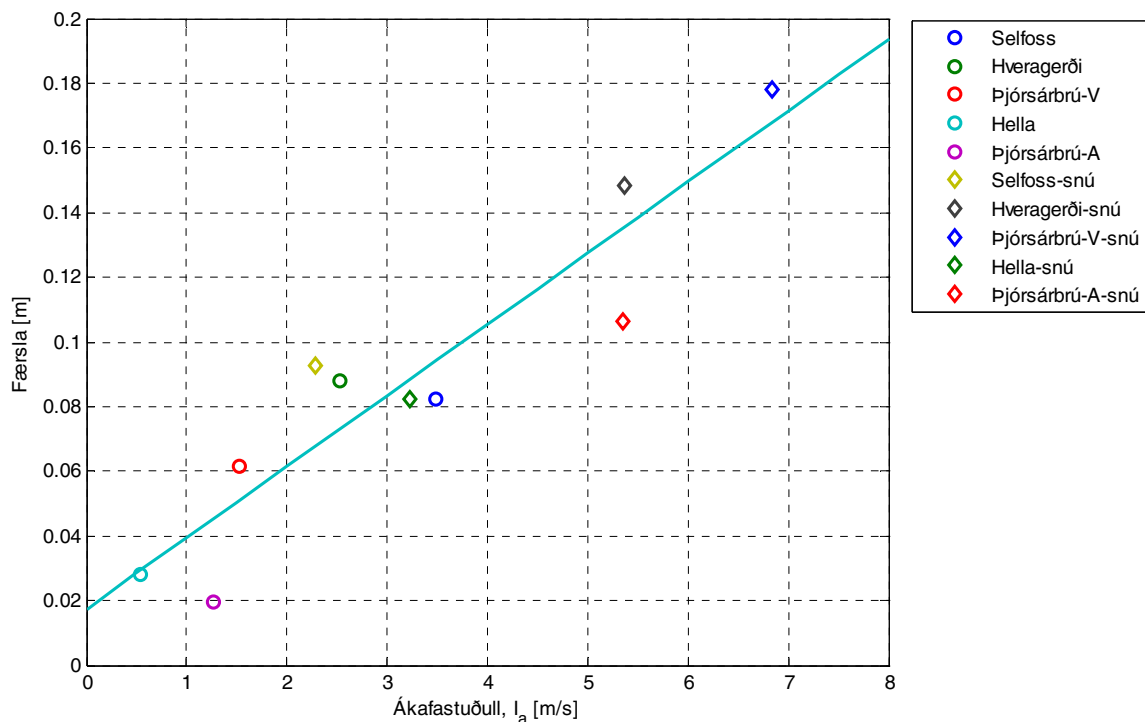
Mynd 4-15 Vægisdreifing í yfirbyggingu um y-ás brúarinnar fyrir skjálftann við Selfoss

4.4.4 Niðurstöður og samantekt

Í þessum kafla verður reynt að bera kennsl á áhrif stefnu og orku á ákveðnum tíðnisviðum á færslur brúarinnar. Verður skoðað hvar mestu færslurnar koma fram og hvað hefur mestu áhrifin á það hversu stórar þær eru. Fyrst skulum við kanna fyrir hvaða tímaröð mestu færslurnar koma fram, sjá mynd 4-16. Eins og sjá má eru færslurnar fyrir Þjórsárbrúar tímaröðina (vestari stöpull) mestar og einnig fyrir Hveragerðis röðina. Ástæða þessa er kannski ekki alveg augljós en gæti verið til komin vegna þess að skýrir toppar koma í svörunarrófið við ca. 0,9 sek (nálægt eigintíðni brúarinnar) og sem gæti virkað samverkandi á einhverju tímabili. Sjá má að snúnu tímaraðirnar hafa eitthvað hærri færslu heldur en hinar nema hvað fyrir Selfossmælinn eru þær svipaðar. Ástæðan fyrir þessum meiri færslum gæti verið sú að fyrir þessar stefnur er svörunin meiri á tíðnisviði brúarinnar og þar með meiri orka að verka á hana. Þetta verður skoðað betur hér á eftir. Ekki er þó hægt að ákvarða af hverju Selfoss tímaraðirnar sýna svo svipaðar niðurstöður en ætla mætti að stefna mælisins hafi hér einhver áhrif. Til að greina færslurnar betur var ákveðið að taka þær saman og skilgreina bara eina meðalfærslu fyrir hverja tímaröð. Stuðlarnir sem skilgreindir voru í kafla 3.6 og settir upp í töflum 3.6 og 3.7 verða einnig notaðir. Þetta eru ákafastuðullinn I_a og styrkleikastuðullinn SI . Meðalfærslurnar eru svo teiknaðar upp á móti þessum stuðlum til að sjá hvort um einhverja fylgni er að ræða. Þetta má sjá á mynd 4-17 fyrir ákafastuðulinn og mynd 4-18 fyrir styrkleikastuðulinn.



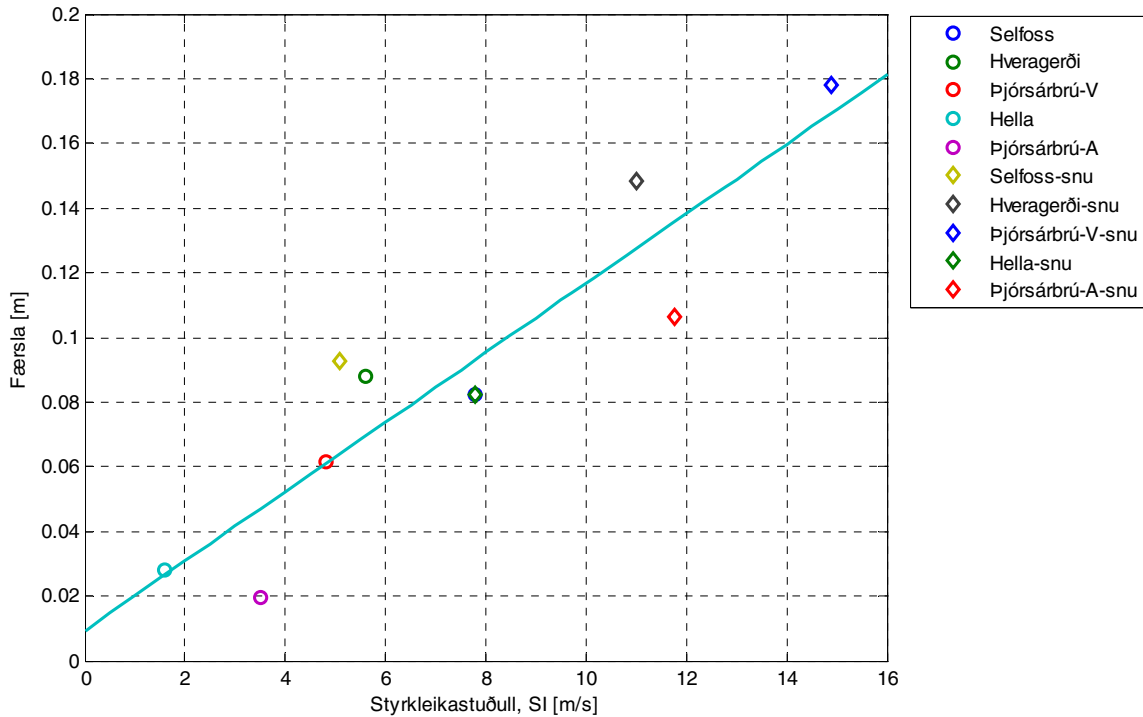
Mynd 4-16 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðir 1-5 og sömu tímaraðir snúið um 90°



Mynd 4-17 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðirnar á móti ákafastuðlinum, I_a

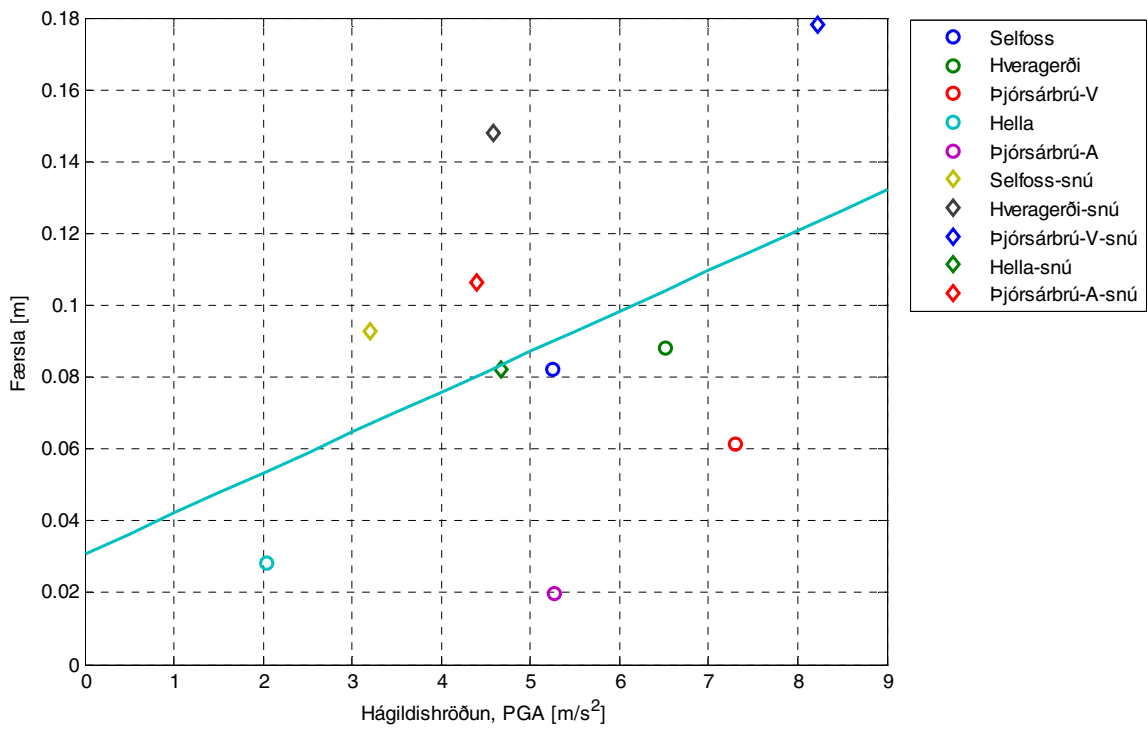
Eins og sjá má á mynd 4-17 er fylgni ákafastuðulsins með meðalfærslu ákaflega góð. Þetta er augljóslega hægt að skýra á þann hátt að eðlilegt er að mesta svörunin komi fram þegar rófin eru orkurík í kringum eigintíðni brúarinnar. Stuðullinn er mælikvarði á orkuinnihald rófsins frá fyrsta eiginsveiflutíma þess (0,9s) og upp í tvöfaldan þann eiginsveiflutíma (1,8s) en ljóst er að sveiflutíminn lengist þegar ólínulegar formbreytingar verða stærri. Því er eðlilegt að einhver fylgni komi fram en þetta er einkar góð fylgni. Á mynd 4-18 má sjá

fylgni á milli meðalfærslu og styrkleikastuðulsins. Eins og sjá má er fylgnin einnig góð hér og er kannski ekki ýkja mikill munur á fylgninni. Má skýra þetta þannig að í rauninni er ákafastuðullinn innifalinn í styrkleikastuðlinum og þar með ekki svo ósvipaðir nema að styrkleikastuðullin getur verið töluvert hærri þó svo að munurinn sé svipaður.

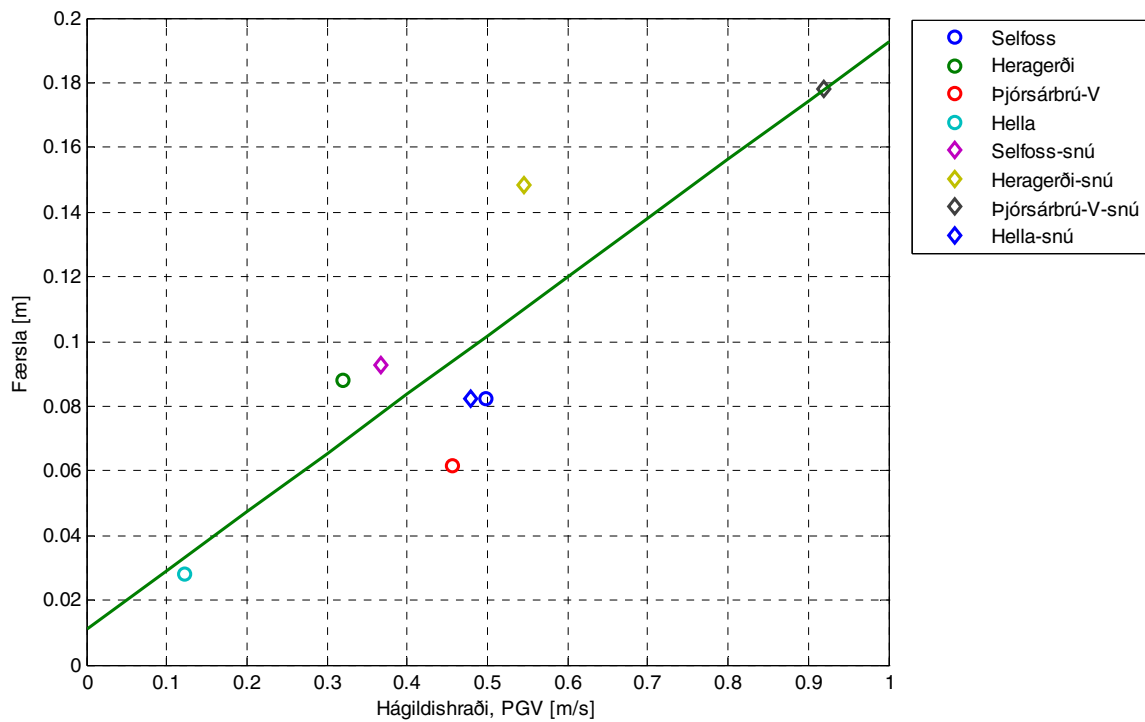


Mynd 4-18 Færslur í y-stefnu fyrir tímaráðirnar á móti styrkleikastuðlinum, SI

Þessar meðalfærslur voru einnig skoðaðar á móti hámarks jarðhröðun (PGA) og hámarks jarðhraða (PGV). Á mynd 4-19 má sjá hámarks hröðun á móti færslum og sést að ekki er mikil fylgni með þessu tvennu. Skýringin á þessu gæti falist í því að hugsanlega er mesta hröðunin ekki að koma fram á sama tíma (sömu tímaröð) og mesta svörun kemur fram við tíðni brúarinnar. Á mynd 4-20 má sjá svo fylgni meðalfærslunnar og hámarks jarðhraða og kemur í ljós að fylgni þeirra er töluvert betri en með hröðuninni. Þetta skýrist þá einkum af því að grunnsveiflutími brúarinnar er á því bili þar sem svörunarrófið breytist frá hraðasvæði (flata part hönnunarrófsins) yfir í færslupart (aflíðandi parturinn sem er fyrir hærri sveiflutíma). Þetta þýðir að færslur brúarinnar eru meira háðar mesta hraða en hröðun. Því er hugsanlega ekki gott að horfa eingöngu á hágildi jarðhröðunar þegar lagt er mat á jarðskjálftaálag fyrir mannvirki með langa grunnsveiflutíma (~> 1 sek) eins og brýr.



Mynd 4-19 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðirnar á móti hámarks jarðhröðun, PGA



Mynd 4-20 Færslur í y-stefnu fyrir tímaraðirnar á móti hámarks jarðarhraða, PGV

4.4.5 Samantekt

Til að draga saman það sem búið er að fara í gegnum í þessum kafla skulum við telja upp helstu atriði

- Í kaflanum er búið að sýna fram á að fylgni er á milli svörunar sem má ætla að tengist nærsviðsáhrifum og færslna mannvirkisins. Fylgni bæði ákafastuðulsins I_a og styrkleikastuðulsins SI var svipað.
- Búið er að sýna að þessir stuðlar hafa betri fylgni en t.d. hámarks jarðhröðun tímaraðanna, PGA. Einnig er betri fylgni á milli færslna og hámarks jarðhraða, PGV heldur en hröðunar.
- Það er búið að sýna að það skiptir máli fyrir mannvirki af þessari gerð hvernig það snýr miðað við misgengin og að stefna tímaraðanna skiptir máli þegar færslur eru skoðaðar.
- Þegar hraðapúlsi var bætt við tímaraðir jukust færslurnar töluvert mikið og jókst áraunin (beygjuvægið í yfirbyggingunni) svipað mikið og er þar með búið að sýna fram á að við litla breytingu á svörunarrófinu geta orðið mikillar breytingar á svörun mannvirkisins.

5 LOKAORÐ

Í þessari ritgerð hefur verið farið yfir ýmis atriði varðandi svörun mannvirkja á jarðskjálftasvæðum og þá sérstaklega svörun nýju Þjósárbrúarinnar. Skoðuð voru jarðskjálftaáhrif nálægt misgengjum og hvernig þau stýra svörun mannvirkja sem reist eru á slíkum svæðum.

Fjallað var um nærsviðáhrif jarðskjálfta sem einkennast af kröftugum hraðapúlsi á stöðum sem liggja innan við 15 til 20 kílómetra frá misgengjum. Beitt var sérstökum aðferðum við að greina slík áhrif í mældum gögnum frá Suðurlandsskjálftunum frá árinu 2000 og 2008. Í þeim gögnum sem til athugunar voru sáust greinilega nærsviðsáhrif. Kom í ljós að hraðapúlsarnir voru oftast en ekki í sömu stefnu og misgengin þ.e. u.þ.b. í norður. Sveiflutími púlsanna var á bilinu 1,2 til 1,9 sekúndur og mesta útslag á bilinu 0,48 til 0,95 m/s. Nærsviðsáhrifin voru einnig sjáanleg í svörunarrófum þessara skjálfta og birtast þar í háum rófgildum við sveiflutíma sem var svipaður sveiflutíma hraðapúlsanna. Þau eru mun hærri en rófgildi jarðskjálftarófs samkvæmt gildandi Evrópustöðlum. Af þessu má ráða að taka þarf sérstakt tillit til nærsviðsáhrifa við hönnun mannvirkja með eiginsveiflutíma sem er nálægt sveiflutíma hraðapúlsanna. Í jarðskjálftahluta Evrópustaðalsins er bent á að huga að nærsviðsáhrifum fyrir jarðskjálftaainangruð mannvirki og brýr. Ekki er þó lýst hvernig það skuli gert.

Til þess að taka tillit til nærsviðsáhrifa á Íslandi þarf kannski að líta til landa sem hafa svipaða jarðfræði og hér er, þ.e. ungt og sprungið berg með tíða jarðskjálfta og eldvirkni. Í þessu verkefni var í þessu sambandi skoðaður staðall frá 1997 sem upprunninn er í Kaliforníu í Bandaríkjunum (UBC97). Í honum er tekið tillit til nærsviðsáhrifa með því að nota ákveðna stuðla til að margfalda upp jarðskjálftarófið. Í nýrri útgáfu af þessum staðli frá 2006 er búið að innleiða vákort fyrir nærsviðsáhrif með rófgildum við mismunandi sveiflutíma. Það verður því að teljast tímabært að skoða innleiðingu einhverra stuðla, í svipaðri mynd og þeir bandarísku eru, inn í íslensku þjóðarskjölin fyrir Eurocode eða leita annarra fyrirmynda

Byggt á hönnunargögnum Vegagerðarinnar um nýju Þjósárbrúna var sett upp tölvutækt líkan í einingaforritinu Sap2000. Mældar tímaráðir nálægt upptökum frá Suðurlandsskjálftunum 2000 og 2008 voru keyrð á það. Jarðskjálftasvörun brúar var skoðuð og borin saman við ólíkar kennistærðir þessara sömu tímaráða. Hugmyndin var að rannsaka fylgni svörunarinnar við þessar stærðir, sem voru ýmist skilgreindir með þar til gerðum rófstuðlum en einnig með hinum velþekktu stærðum hámarks jarðhröðunar (PGA), og hámarks jarðhraða (PGV). Í stuttu máli var minnsta fylgnin á milli PGA og svörunar á meðan PGV og hinir ólíku rófstuðlarnir gáfu mun meiri upplýsingar um hversu vænta mátti. Hér má hafa í huga að oftast en ekki er PGA sú mælieining sem mest er notuð við að skilgreina jarðskjálftaálag. Velþekkt er að PGA er mjög tengt hátíðnihreyfingum á meðan nærsviðsáhrif tengjast meira lágtíðni hreyfingum sem betur er lýst með öðrum stuðlum. Greining sýndi jafnframt að stærri brýr, eins og nýja Þjósárbrúin, er reist nálægt virkum sprungum þarf að gera ráð fyrir nærsviðsáhrifum við hönnun þeirra. Í raun þarf að huga að þessum áhrifum fyrir öll mannvirki með sveiflutíma yfir 1 sek.

HEIMILDIR

1997 Uniform Building Code. (2007). International Code Council, Los Angeles.

N. Ambraseys, P. Smit, R. Sigbjörnsson, P. Suhadolc og B. Margaris. (2002). "Internet-Site for European Strong-Motion Data." European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme.

N. N. Ambraseys og J. Douglas. (2003). "Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(1), 1-18.

N. N. Ambraseys, J. Douglas, S. K. Sarma og P. M. Smit. (2005). "Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Vertical peak ground acceleration and spectral acceleration." *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3(1), 55-73.

B. Halldórsson og R. Sigbjörnsson. (2009). "The Mw 6.3 Ölfus earthquake at 15:45UTC on 29 May 2008 in South Iceland: ICEARRAY strong-motion recordings." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.

B. Bessason og E. Haflidason. (2004). "Recorded and numerical strong motion response of a base-isolated bridge." *Earthquake Spectra*, 20(2), 309-332.

B. Bessason og A. M. Kaynia. (2002). "Site amplification in lava rock on soft sediments." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(7), 525-540.

J. D. Bray og A. Rodriguez-Marek. (2004). "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), 815-828.

A. K. Chopra. (2001). *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, New Jersey.

R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha og R. J. Witt. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons. Inc.

CSI. (2007). "Sap2000, Version 11, Intergrated Software for Structural Analysis and Design, Anlyse Reference Manual." Computer and Struturaer, Inc.

Einar Haflidason og Kristján S. Baldursson. (2003). "Hönnun Þjórsárbrúar."...upp í vindinn, Umhverfis- og byggingarverkfræðiskor Háskóla Íslands, Reykjavík, bls 8-11.

European commitee for standardization. (1997). "Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules for structures." Brussels.

European commitee for standardization. (2003). "Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic action and rules for buildings." Brussels.

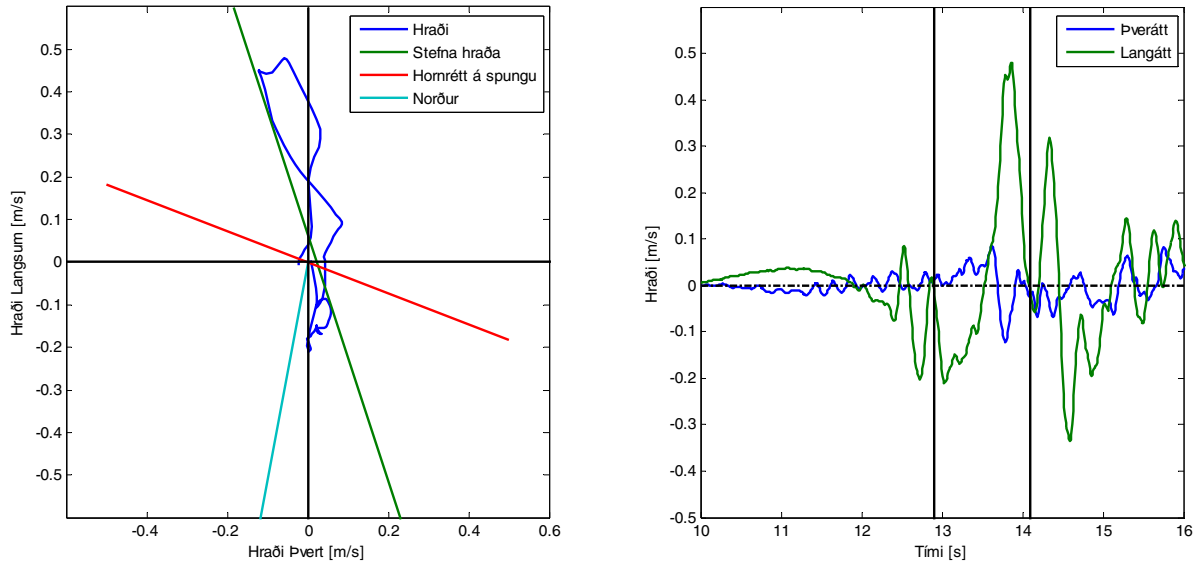
B. Halldórsson, S. Ólafsson og R. Sigbjörnsson. (2007). "A fast and efficient simulation of the far-fault and near-fault earthquake ground motions associated with the June 17 and 21, 2000, earthquakes in South Iceland." *Journal of Earthquake Engineering*, 11(3), 343-370.

J. K. Howard, C. A. Tracy og R. G. Burns. (2005). "Comparing observed and predicted directivity in near-source ground motion." *Earthquake Spectra*, 21(4), 1063-1092.

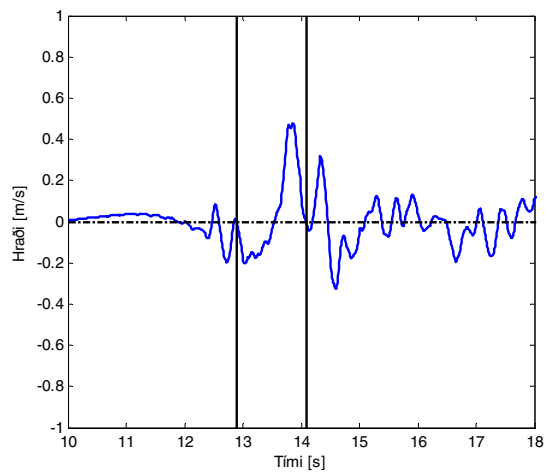
- International Conference of Building Officials. (1997). *Uniform Building Code*, Los Angeles.
- G. P. Mavroeidis og A. S. Papageorgiou. (2003). "A mathematical representation of near-fault ground motions." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3), 1099-1131.
- F. Naeim og J. M. Kelly. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley & Sons, Inc.
- N. Ottosen og H. Petersson. (1992). *Introduction to the Finite Element Method*, Prentice Hall Europe 1992, Lund.
- Ragnar Sigbjörnsson, Jónas Þór Snæbjörnsson, Símon Ólafsson, Bjarni Bessason, Gunnar I. Baldvinsson og Óðinn Þórarinnsson. (2000). "Jarðskjálftar á Suðurlandi, 17. og 21. júní 2000." Rannsóknarmiðstöð í jarðskjálftaverkfræði, Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, Selfoss.
- Ragnar Stefánsson, Gunnar B. Guðmundsson og Páll Halldórsson. (2000). "The two large earthquakes in the South Iceland seismic zone on June 17 and 21, 2000."
- J. Shen, M. H. Tsai, K. C. Chang og G. C. Lee. (2004). "Performance of a seismically isolated bridge under near-fault earthquake ground motions." *Journal of Structural Engineering-Asce*, 130(6), 861-868.
- P. G. Sommerville, N. F. Smith, R. W. Graves og N. A. Abrahamson. (1997). "Modification of empirical strong motion attenuation relations to include the amplitude and duration effect of rupture directivity." *Seismol Research Letter* 1997;68(1), 199-222.
- Vegagerðin. (2002). "Teikningasafn fyrir Þjórsárbrú."
- G. Q. Wang, X. Y. Zhou, P. Z. Zhang og H. Igel. (2002). "Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(1), 73-96.
- E. L. Wilson. (2008). *Static and Dynamic Analyssi of Structures*, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.

VIÐAUKI A: GÖGN FYRIR ATHUGUN Á STEFNUÁHRIFUM

Gögn fyrir Hellu 17 júní 2000

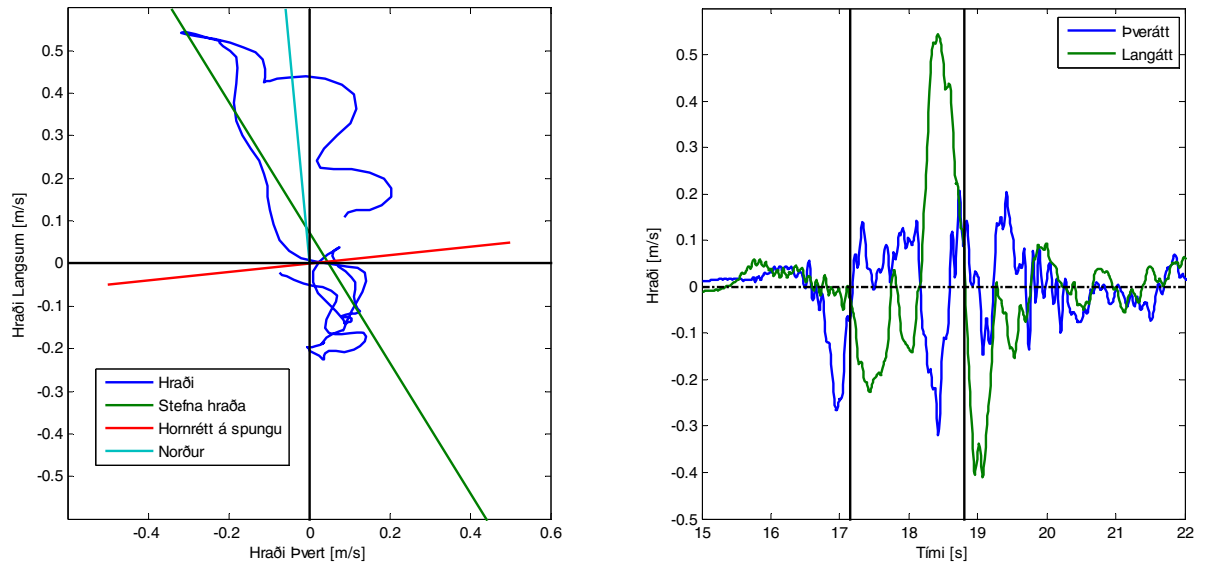


Mynd A-1: Stefna hraðapúlsins og hraða tímaröðir fyrir báðar átt (Hellu 17 júní 2000)

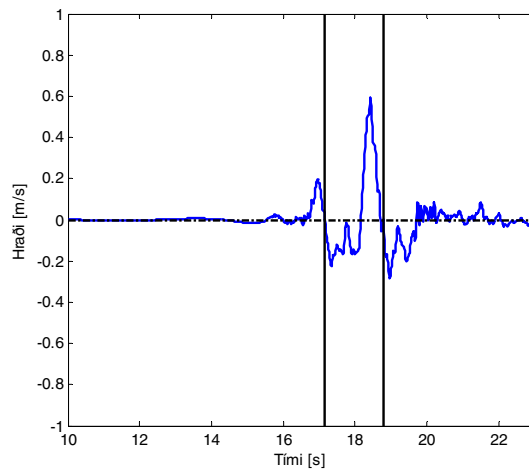


Mynd A-2: Tímaröð fyrir hraðapúlsinn (Hellu 17 júní 2000)

Gögn fyrir Hveragerði 29 maí 2008

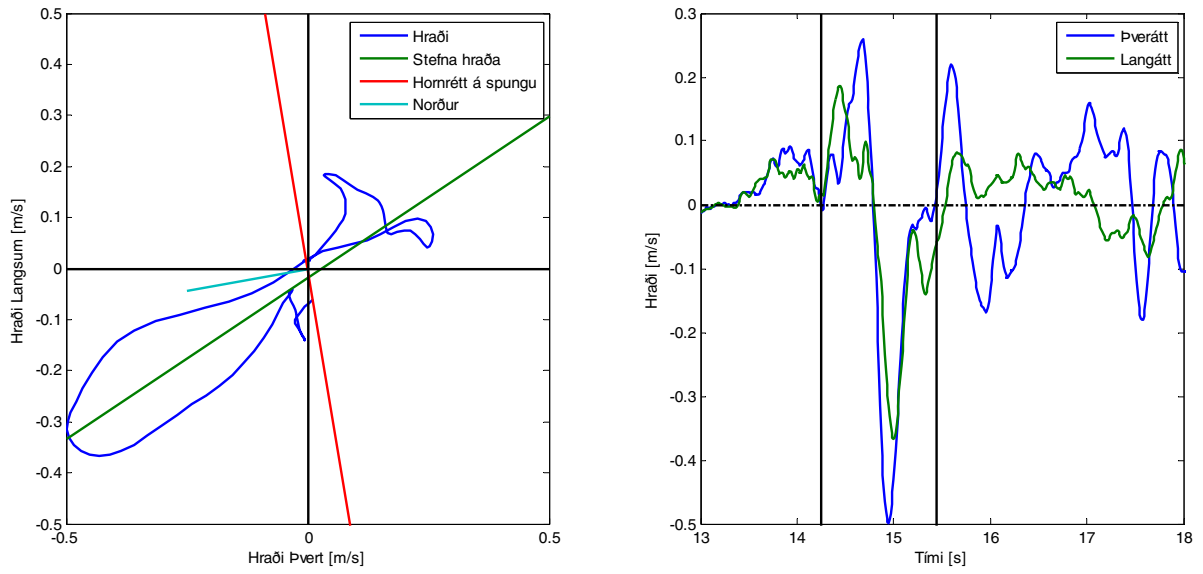


Mynd A-3: Stefna hraðapúlsins og hraða tímaröðir fyrir báðar átt (Hveragerði 29 maí 2008)

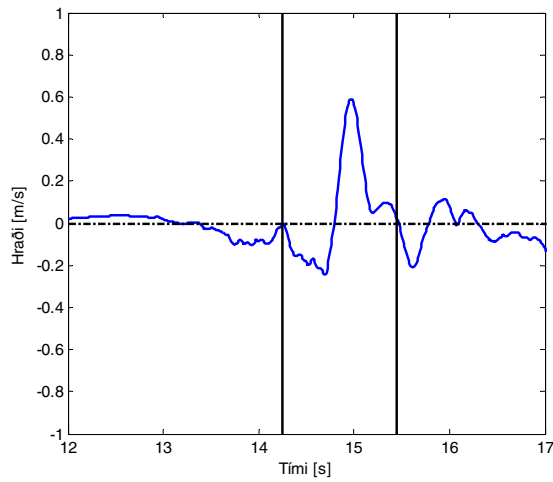


Mynd A-4: Tímaröð fyrir hraðapúlsinn (Hveragerði 29 maí 2008)

Gögn fyrir Selfoss 29 maí 2008



Mynd A-5: Stefna hraðapúlsins og hraða tímaraðir fyrir báðar átt (Selfoss 29 maí 2008)



Mynd A-6: Tímaröð fyrir hraðapúlsinn (Selfoss 29 maí 2008)