



Jarðskjálftavarnir fyrir stagbrú á Ölfusá við Efri Laugardælaeyju

Ingvar Hjartarson



**Umhverfis- og
byggingarverkfræðideild
Háskóli Íslands
2019**

Jarðskjálftavarnir fyrir stagbrú á Ölfusá við Efri Laugardælaeyju

Ingvar Hjartarson

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

Leiðbeinendur
Arnar Björn Björnsson
Bjarni Bessason

Prófdómari
Guðmundur Valur Guðmundsson

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, apríl 2019

Jarðskjálftavarnir fyrir stagbrú á Ölfusá
30 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í Byggingarverkfræði

Höfundarréttur © 2019 Ingvar Hjartarson

Öll réttindi áskilin

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álitþeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

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

Sími: 525 4600

Skráningarupplýsingar:

Ingvar Hjartarson, 2019, *Jarðskjálftavarnir fyrir stagbrú á Ölfusá við Efri Laugardælaeyju*, meistararitgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóli Íslands, 134 bls.

Prentun: Háskólaprent
Reykjavík, apríl 2019

Útdráttur

Á undanförunum áratugum hefur mikil þróun verið á jarðskjálftabúnaði til að verja brýr. Á Íslandi hafa blýgúmmílegur fyrst og fremst verið notaðar í þessu sambandi og ákveðin reynsla er komin á þær. Í þessari ritgerð er fókusinn settur á stagbrýr. Fyrst er fjallað um hönnun erlendra stagbrúa á þekktum jarðskjálftasvæðum. Í framhaldinu er fyrirhuguð stagbrú yfir Ölfusá við Efri Laugardælaeyju skoðuð nánar. Brúin er fyrsta sinnar tegundar á Íslandi og því er ekki sjálfsagt að blýgúmmílegur reynist ákjósanlegur kostur við jarðskjálftavarnir. Mannvirkið verður staðsett á þverbrotabelti Suðurlands og þarf að vera hönnuð fyrir nærsprunguáhrifum sem hafa greinst í jarðskjálftum þar. Slík áhrif einkennast af kröftugum lágtíðni hraðapúlsi á svæðum sem liggja nálægt upptökum jarðskjálfta. Þau er einkum hættuleg mannvirkjum með langan eiginsveiflutíma, sem er eitt af einkennum stagbrúa. Í verkefninu voru skráðar jarðskjálftatímaraðir á Suðurlandi keyrðar á reiknilíkan af stagbrúnni yfir Ölfusá og avinningur af notkun blýgúmmílega skoðaður. Niðurstöður benda til þess að blýgúmmílegurnar séu skilvirkari í þveráttina heldur en í langáttina þar sem miklar færslur brúargólfsins í langáttina valda miklu álagi á turninn.

Abstract

Seismic protection devices for bridges have developed rapidly in recent decades. Lead rubber bearings (LRBs) have mainly been used in Iceland as seismic devices and experience on using them has been established. The focus is on cable stayed bridges in this essay. Cable stayed bridges and their design in known earthquake zones are first discussed and then the planned bridge over Ölfusá near Efri Laugardælaeyja is examined in more detail. The bridge is the first of its type in Iceland and therefore it's not given that LRBs are a suitable solution. The structure will be in the South Icelandic Seismic Zone (SISZ) and must be designed for near-source effects that have been recorded in earthquakes in the area. Near-source effects are characterized by strong low-frequency velocity pulse in areas near the earthquake source. It's particularly dangerous to structures with a long natural period, which is one of the characteristics of cable-stayed bridges. Recorded time-series from SISZ were run on a computer model of the cable-stayed bridge and the benefits from using LRBs analysed. The results imply that LRBs are more suitable in the direction perpendicular to the bridge deck than in the bridge deck direction, because the large displacement of the bridge deck in the bridge deck direction cause large forces in the tower.

Efnisyfirlit

| | |
|---|-----------|
| Töflur | xiv |
| Þakkir | xv |
| 1 Inngangur | 1 |
| 2 Stagbrýr – Erlend þekking..... | 3 |
| 2.1 Rion-Antirion brúin í Grikklandi | 4 |
| 2.2 Shipshaw brúin í Kanada..... | 8 |
| 2.3 Sutong brúin í Kína | 10 |
| 2.4 Ji-Lu brúin í Taiwan | 13 |
| 2.5 Tsurumi Tsubasa brúin í Japan..... | 16 |
| 2.6 Samantekt | 18 |
| 3 Brú á Ölfusá við Efri Laugardælaeyju | 23 |
| 3.1 Aðdragandi nýrrar brúar yfir Ölfusá | 23 |
| 3.2 Þverbrotabelti Suðurlands | 25 |
| 4 Líkangerð..... | 29 |
| 4.1 Þversniðsstærðir og lögun brúar..... | 30 |
| 4.1.1 Brúargólf..... | 31 |
| 4.1.2 Turn..... | 32 |
| 4.1.3 Kapalkerfi | 32 |
| 4.2 Álagsforsendur | 34 |
| 4.2.1 Eiginálag | 35 |
| 4.2.2 Jarðskjálftaálag | 36 |
| 4.2.3 Umferðarálag | 40 |
| 4.3 Blýgúmmilegur..... | 41 |
| 4.3.1 Hermun blýgúmmílega í SAP2000 | 45 |
| 4.4 Jaðarskilyrði líkana..... | 47 |
| 5 Niðurstöður..... | 51 |
| 5.1 Eiginsveifluform brúarinnar | 52 |
| 5.2 Jarðskjálftasvörun turnsins | 56 |
| 5.2.1 Hámarkskraftar | 56 |
| 5.2.2 Hámarksfærslur..... | 59 |
| 5.2.3 Hreyfing turnsins | 60 |
| 5.3 Jarðskjálftasvörun brúargólfsins..... | 63 |
| 5.3.1 Endastöplar | 63 |
| 5.3.2 Brúargólfið við turninn | 65 |
| 5.3.3 Svignun brúargólfsins | 67 |
| 5.4 Krafta-færslu gröf af blýgúmmílegunum | 70 |
| 6 Umræður..... | 73 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.1 | Frekari rannsóknir | 74 |
| 7 | Lokaorð | 77 |
| | Heimildir | 79 |
| A. | Viðauki, myndir af tímaröðum | 85 |
| B. | Viðauki, myndir af fyrstu sveifluformum brúarinnar | 93 |
| C. | Viðauki, myndir af hreyfingu turntoppsins | 99 |
| D. | Viðauki, myndir af svignun brúargólfsins | 105 |
| E. | Viðauki, myndir af stress-strain graphs | 111 |

Myndir

| | |
|---|----|
| Mynd 2.1 Strömsundsbrúin hafði mikil áhrif á hönnun stagbrúa og oft nefnd sem fyrsta nútíma stagbrúin (Gimsing og Georgakis, 2011) | 3 |
| Mynd 2.2 Stærðir og lögun Rion-Antirion brúarinnar, stærðir í metrum. (Pecker, 2004)..... | 5 |
| Mynd 2.3 Mjúku setlögín á sjávarbotninum voru styrkt með stálsúlum áður en fyllt var undir steiptuturnfætturna með malarfyllingu (Teysandier, 2002)..... | 5 |
| Mynd 2.4 Stærð og lögun turnanna í Rion-Antirion brúarinnar, pýramídaform turnanna er einkennandi fyrir brúna (Pecker, 2004)..... | 6 |
| Mynd 2.5 Rion-Antirion brúin á byggingarstigi, hver turn er hannaður sem sjálfstæð eining sem geti staðið ein og sér (Infanti o.fl., 2004)..... | 6 |
| Mynd 2.6 Jarðskjálftabúnaður í Rion-Antirion brúnni við turnana. Fórnarbitinn (e. fuse restrainer) er fyrir miðju og fjórir vökvadempara (e. viscous dampers) í kring. (Infanti o.fl., 2004)..... | 7 |
| Mynd 2.7 Stærðir og lögun Shipshaw brúarinnar (Martínez-Rodrigo og Filiatrault, 2015)..... | 8 |
| Mynd 2.8 Burðarvirki brúargólfsins er samsett þversnið, lang- og þverbítar eru úr stáli ásamt millibítum sem bera 165 mm steiptu plötuna (Martínez-Rodrigo og Filiatrault, 2015)..... | 9 |
| Mynd 2.9 Stærð og lögun Sutton brúarinnar (Shen, Camara og Ye, 2015). | 11 |
| Mynd 2.10 Stærð og lögun Ji-Lu brúarinnar (Chadwell o.fl., 2003)..... | 13 |
| Mynd 2.11 Hálf þversnið brúargólfsins, aðal burðarbiti brúargólfsins er grár en forsteypta einingin hvít (Chadwell o.fl., 2003). | 13 |
| Mynd 2.12 Staðsetning brúarinnar með tilliti til jarðskjálftans, svörtu punktarnir eru staðsetning hröðunarmæla (Chadwell o.fl., 2003)..... | 14 |
| Mynd 2.13 Yfirlit yfir staðsetningu skemmda á brúnni ásamt því að sýna hvar vantaði forsteyptu einingarnar (Chadwell o.fl., 2015)..... | 15 |
| Mynd 2.14 Stærð og lögun Tsurumi Tsubasa brúarinnar í Japan (Enomoto o.fl.,1995). | 16 |
| Mynd 2.15 Legu-dempaparar (e. vane-type dampers) í Tsurumi Tsubasa brúnni. Hreyfing brúargólfsins knýr snúningshreyfingu í dempurunum, hreyfing | |

| | |
|--|----|
| vökvans myndar viðnám sem eyðir orku og dempar hreyfinguna. (Enomoto o.fl.,1995). | 17 |
| Mynd 2.16 Eiginleikar legu-demparanna í Tsurumi Tsubasa brúnni. Krafturinn sem demparinn myndar og því orkueyðingin er í öðru veldi af afstæðum hraða á milli brúargólfsins og turnsins. Þrýstilokan (e. pressure control valve) stjórnar hámarks kraftinum sem legu-demparinn getur myndað (Enomoto o.fl., 1995). | 17 |
| Mynd 2.17 Festingar kaplanna við brúargólfið. Hádempanði gúmmí og olúdempari koma í veg fyrir að sveiflur vegna vindálags magnist upp (Enomoto o.fl., 1995). | 18 |
| Mynd 3.1 Fyrirhugað brúarstæði um Efri Laugardælaeyju og veglína eftir breytingar á Suðulandsveginum.(Óskarsson, 2016) | 24 |
| Mynd 3.2 Ummerki eftir virkar sprungur síðustu 10.000 ár eru merkt með gulum blettum á myndina (Einarsson, 2009). | 26 |
| Mynd 3.3 Áhrif nærsviðsáhrifa á hraðatímaraðir jarðskjálfta. Venjuleg hraðatímaraöð er til vinstri, í miðjunni eru áhrifin frá nærsviðsáhrifunum sýnd og til hægri er heildar hraðatímaraöð jarðskjálfta með nærsviðsáhrifum (Taflanidis, 2011). | 27 |
| Mynd 4.1 SAP2000 reiknilíkanið af brúnni. Skeljaeiningar eru gráar, bitaeiningar rauðar og kaplar grænir. Hnitakerfi brúarinnar má einnig sjá á miðri brúnni. | 29 |
| Mynd 4.2 Þversnið brúarinnar eins og það er notað í reiknilíkaninu (Óskarsson, 2016). | 31 |
| Mynd 4.3 Láréttir kraftar myndast í brúargólfinu vegna halla kaplanna (Óskarsson, 2015). | 32 |
| Mynd 4.4 Þversnið turnsins og eiginleikar þess. Blái krossinn er miðpunktur þversniðsins. Einingar eru í metrum. | 32 |
| Mynd 4.5 Mismunandi form kapalkerfa í stagbrúm, frá vinstri: Hörpu-, blævængs- og breytt blævængskerfi (Casado, 2011). | 33 |
| Mynd 4.6 Kaplarnir sem lagt er til að nota í forhönnun Eflu. Spíralformið á hólknun er ætlað að draga úr titringi kaplanna vegna vindálags, Freyssinet kapalkerfi. | 33 |
| Mynd 4.7 Hönnunarróf jarðskjálftaálags fyrir brúarstæðið samkvæmt Evrópustaðli 1998-2:2005 en aðlagð að íslenskum aðstæðum samkvæmt Bjarna Bessasyni (2011) | 36 |
| Mynd 4.8 Hröðunarróf tímaraðanna í lárétta stefnu 1, sjá töflu 4.5. Hröðunarróf EC8 er með grunnhröðun $agR = 0,6g$ og jarðvegsflokk A. Markrófið | |

| | |
|---|----|
| (hönnunarrófið) er skalað hröðunarróf EC8 með mikilvægisstuðul $\gamma_I = 1,15$ og hegðunarstuðul $q = 1,0$ | 38 |
| Mynd 4.9 Hröðunarróf tímaraðanna í lárétta stefnu 2, sjá töflu 4.5. Hröðunarróf EC8 er með grunnhröðun $ag_R = 0,6g$ og jarðvegsflokk A. Markrófið (hönnunarrófið) er skalað hröðunarróf EC8 með mikilvægisstuðul $\gamma_I = 1,15$ og hegðunarstuðul $q = 1,0$ | 39 |
| Mynd 4.10 Hröðunarróf tímaraðanna í lóðrétta stefnu, sjá töflu 4.5. Hröðunarróf EC8 er með grunnhröðun $ag_R = 0,6g$ og jarðvegsflokk A. Markrófið (hönnunarrófið) er skalað hröðunarróf EC8 með mikilvægisstuðul $\gamma_I = 1,15$ og hegðunarstuðul $q = 1,0$ | 39 |
| Mynd 4.11 Skilgreining á umferðarálagi á brúna samkvæmt EN1991-2 (Óskarsson, 2016)..... | 41 |
| Mynd 4.12 Skematísk mynd af því hvernig hefðbundið er að koma blýgúmmílegum fyrir í mannvirki (Christopoulos og Filiatrault., 2006)..... | 42 |
| Mynd 4.13 Þverskurður af ferningslaga lagskiptri gúmmílegu til vinstri (Priestley, Seible og Calvi, 1996) og þverskurður af ferningslaga blýgúmmílegu til hægri (Skinner, Robinson og McVerry, 1993)..... | 42 |
| Mynd 4.14 Hysteríuslaufa fyrir blýgúmmílegu (heila línán) og hysteríuslaufa lagskiptrar gúmmílegu (punkta línán) (Skinner o.fl., 1993)..... | 43 |
| Mynd 4.15 Virkt flatarmál gúmmílegu undir lóðrétta álagi (Christopoulos og Filiatrault, 2006)..... | 44 |
| Mynd 4.16 Horft ofan á skervegg við endastöpul. Blýgúmmílegunum (hringirnir) ofan á skervegg (kassinn) sem hefur mismunandi stífni eftir stefnum..... | 45 |
| Mynd 4.17 Möguleg útfærsla blýgúmmílega undir brúargólfinu við turninn. Skerveggir með blýgúmmílegum ofan á tryggja ólíka eiginleika blýgúmmíleganna í sithvora áttina. | 46 |
| Mynd 4.18 Hysteríuslaufa fyrir blýgúmmílegu í reiknilíkaninu SAP2000 (Jangid, 2007)..... | 46 |
| Mynd 5.1 Sveifluformið sem hefur mesta virka massan í langátt brúarinnar eftir undirstöðuskilyrðum. Í upphaflega líkaninu (OR, efst) er brúargólfinu haldið á þremur stöðum, í báðum endum og í miðjunni. Blýgúmmílegu líkanið (LRB, miðjan) er með stuðning í miðjunni en lausa líkanið (LAUS, neðst) er alveg frjálst að hreyfast í langátt brúarinnar. Sveiflutímarnir eru 0,21 sek, 1,59 sek og 10,2 sek..... | 55 |
| Mynd 5.2 Sveifluformið sem hefur mesta virka massan í þverátt brúarinnar eftir undirstöðuskilyrðum. Í upphaflega líkaninu (OR, efst) er brúargólfinu haldið á þremur stöðum, í báðum endum og í miðjunni Blýgúmmílegu líkanið (LRB, miðjan) er með tvílínulega tengingu í þverátt í stað stífra tenginga upprunalega líkansins. Lausa líkanið (LAUS, neðst) er alveg | |

| | |
|---|----|
| frjálst að hreyfast í þverátt brúarinnar. Sveiflutímarnir eru 0,42 sek, 1,77 sek og 8,44 sek. | 55 |
| Mynd 5.3 Sveifluform brúarinnar í lóðréttu stefnu brúarinnar sem hefur mesta virka massann eftir undirstöðuskilyrðum. Líkönin eru öll með stífar undirstöður í lóðréttu stefnu í báðum endum brúarinnar og fyrir miðju brúarinnar. Sveiflutímarnir eru 1,68 sek, 1,71 sek og 1,68 sek. | 56 |
| Mynd 5.4 Hámarks kraftar í undirstöðum á hvorum turnfæti í hverju álagstílfelli, einingar í MN | 57 |
| Mynd 5.5 Hámarks vægisáraunir í undirstöðum á hvorum turnfæti í hverju álagstílfelli eftir jaðarskilyrðum líkana. Efst er vægi um langás (M_x), í miðjunni vægi um þverás (M_y) og neðst vægi um lóðréttan ás (M_z), sjá mynd 4.1. | 58 |
| Mynd 5.6 Hámarks færsla eftir stefnu á turntoppi þegar álagstílfellin eru keyrð á líkönin þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslum. | 59 |
| Mynd 5.7 Hámarks færsla eftir stefnu þar sem turnfætur mætast þegar álagstílfellin eru keyrð á líkönin þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslum. | 60 |
| Mynd 5.8 Hreyfing turntoppsins þegar álagstílfellið Flag0 er keyrt á líkönin. | 61 |
| Mynd 5.9 Hreyfing turntoppsins þegar álagstílfellið Flag90 er keyrt á líkönin. | 61 |
| Mynd 5.10 Hreyfing turnsins þar sem turnfæturnir mætast þegar álagstílfellið Flag0 er keyrt á líkönin. (Ath. breytta skala miðað við myndir að ofan) | 62 |
| Mynd 5.11 Hreyfing turnsins þar sem turnfæturnir mætast þegar álagstílfellið Flag90 er keyrt á líkönin. (Ath. breytta skala miðað við myndir að ofan) | 62 |
| Mynd 5.12 Hámarks kraftar í vesturstöpli undir öðrum langbitanum. | 64 |
| Mynd 5.13 Hámarks kraftar í austurstöpli undir öðrum langbitanum. | 64 |
| Mynd 5.14 Hámarks færsla á vesturenda brúargólfsins þegar álagstílfellin eru keyrð á líkönin þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslum. | 65 |
| Mynd 5.15 Hámarks færsla á austurenda brúargólfsins þegar álagstílfellin eru keyrð á líkönin þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslum. | 65 |
| Mynd 5.16 Hámarks kraftar í undirstöðum undir miðju brúargólfinu undir öðrum langbitanum. | 66 |
| Mynd 5.17 Hámarks færslur brúargólfsins við turninn þegar álagstílfellin eru keyrð á líkönin þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslum brúargólfsins. | 67 |
| Mynd 5.18 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstílfellið Flag0 er keyrt á líkönin. | 68 |

| | |
|---|----|
| Mynd 5.19 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstilfellið Flag90 er keyrt á líkönin..... | 69 |
| Mynd 5.20 Hámarks svignun brúargólfsins á vesturhafinu miðað við enda hafsins þegar álagstilfellin eru keyrð á líkönin..... | 70 |
| Mynd 5.21 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið Hell0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 71 |
| Mynd 5.22 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið Hell90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 71 |
| Mynd A.1 Hröðunartímaraðir mældar í Selfosspítalanum 29 maí árið 2008 í x, y og z stefnu..... | 85 |
| Mynd A.2 Hraðatímaraðir mældar í Selfosspítalanum 29 maí árið 2008 í x, y og z stefnu. | 86 |
| Mynd A.3 Færslutímaraðir mældar í Selfosspítalanum 29 maí árið 2008 í x, y og z stefnu. | 86 |
| Mynd A.4 Hröðunartímaraðir mældar á Flagbjarnarholti 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu. | 87 |
| Mynd A.5 Hraðatímaraðir mældar á Flagbjarnarholti 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu. | 87 |
| Mynd A.6 Færslutímaraðir mældar á Flagbjarnarholti 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu. | 88 |
| Mynd A.7 Hröðunartímaraðir mældar á Hellu 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu..... | 88 |
| Mynd A.8 Hraðatímaraðir mældar á Hellu 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu. | 89 |
| Mynd A.9 Færslutímaraðir mældar á Hellu 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu. | 89 |
| Mynd A.10 Hröðunartímaraðir mældar á Kaldárholti 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu. | 90 |
| Mynd A.11 Hraðatímaraðir mældar á Kaldárholti 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu. | 90 |
| Mynd A.12 Færslutímaraðir mældar á Kaldárholti 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu. | 91 |
| Mynd A.13 Hröðunartímaraðir mældar á Þjórásárbrú 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu. | 91 |
| Mynd A.14 Hraðatímaraðir mældar á Þjórásárbrú 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu..... | 92 |
| Mynd A.15 Færslutímaraðir mældar á Þjórásárbrú 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu. | 92 |

| | |
|--|-----|
| Mynd B.1 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í langáttina með upphaflegu undirstöðuskilyrðunum..... | 93 |
| Mynd B.2 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í þveráttina með upphaflegu undirstöðuskilyrðunum..... | 94 |
| Mynd B.3 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í lóðrétta stefnu með upphaflegu undirstöðuskilyrðunum..... | 94 |
| Mynd B.4 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í langáttina með blýgúmmílegum. | 95 |
| Mynd B.5 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í þveráttina með blýgúmmílegum. | 95 |
| Mynd B.6 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í lóðrétta stefnu með blýgúmmílegum. | 96 |
| Mynd B.7 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í langáttina þegar hún hreyfist óhindruð í láréttu plani..... | 96 |
| Mynd B.8 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í þveráttina þegar hún hreyfist óhindruð í láréttu plani..... | 97 |
| Mynd B.9 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í lóðrétta stefnu þegar hún hreyfist óhindruð í láréttu plani. | 97 |
| Mynd C.1 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið SelS0 er keyrt á líkönin..... | 99 |
| Mynd C.2 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Flag0 er keyrt á líkönin..... | 100 |
| Mynd C.3 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Hell0 er keyrt á líkönin. | 100 |
| Mynd C.4 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Kald0 er keyrt á líkönin. | 101 |
| Mynd C.5 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið ThVs0 er keyrt á líkönin. | 101 |
| Mynd C.6 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið SelS90 er keyrt á líkönin..... | 102 |
| Mynd C.7 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Flag90 er keyrt á líkönin. | 102 |
| Mynd C.8 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Hell90 er keyrt á líkönin. | 103 |
| Mynd C.9 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Kald90 er keyrt á líkönin. | 103 |
| Mynd C.10 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið ThVs90 er keyrt á líkönin. | 104 |
| Mynd D.1 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstilfellið SelS0 er keyrt á líkönin. | 105 |
| Mynd D.2 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstilfellið Flag0 er keyrt á líkönin. | 106 |
| Mynd D.3 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstilfellið Hell0 er keyrt á líkönin..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| Mynd D.4 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstílfellið Kald0 er keyrt á líkönin..... | 107 |
| Mynd D.5 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstílfellið ThVs0 er keyrt á líkönin..... | 107 |
| Mynd D.6 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstílfellið Sels90 er keyrt á líkönin..... | 108 |
| Mynd D.7 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstílfellið Flag90 er keyrt á líkönin..... | 108 |
| Mynd D.8 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstílfellið Hell90 er keyrt á líkönin..... | 109 |
| Mynd D.9 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstílfellið Kald90 er keyrt á líkönin..... | 109 |
| Mynd D.10 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstílfellið ThVs90 er keyrt á líkönin..... | 110 |
| Mynd E.1 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfellið Sels0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 111 |
| Mynd E.2 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfellið Flag0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 112 |
| Mynd E.3 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfellið Hell0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 112 |
| Mynd E.4 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfellið Kald0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 113 |
| Mynd E.5 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfellið ThVs0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 113 |
| Mynd E.6 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfellið Sels90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 114 |
| Mynd E.7 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfellið Flag90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 114 |
| Mynd E.8 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfellið Hell90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 115 |
| Mynd E.9 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfellið Kald90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 115 |
| Mynd E.10 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfellið ThVs90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið..... | 116 |

Töflur

| | |
|---|----|
| Tafla 2.1 Hámarkssvörun Sutong brúarinnar við mældum jarðskjálftatímaröðum eftir vali á jarðskjálftabúnaði í þverátt brúarinnar (Shen o.fl., 2015) | 12 |
| Tafla 2.2 Samantekt á jarðskjálftavörnum og tengingum á milli brúargólfs og turna. | 19 |
| Tafla 2.3 Samantekt á frágangi á milli brúargólfs og endastöpla..... | 20 |
| Tafla 4.1 Þversniðsstærðir stálbita í reiknilíkaninu..... | 31 |
| Tafla 4.2 Fjöldi víra í hverjum kapli í líkaninu, talið frá turni að endum ásamt kraftinum í köplunum þegar þeir eru strektir, sem þarf til að brúargólfið verði flatt í langtímaástandi..... | 34 |
| Tafla 4.3 Eðlisþyngd efna í líkaninu | 35 |
| Tafla 4.4 Viðbótarálag í líkaninu sem verkar sem langtíma álag á brúna..... | 35 |
| Tafla 4.5 Yfirlit yfir tímaraðir notaðar í jarðskjálftagreiningunni ásamt helstu kennistærðum tímaraðanna..... | 37 |
| Tafla 4.6 Öxulþungi og jafndreift álag á akreinar vegna umferðarálags | 40 |
| Tafla 4.7 Flotstyrkur blýgúmmíleganna í þveráttina, ákvarðaður út frá vindálagi [kN].Gildin miðast við eina legu í hverju tilviki. Á öllum stöðum eru hins vegar tvær legur..... | 47 |
| Tafla 4.8 Færsla turntoppsins [mm] þegar kaplarnir eru strektir. | 48 |
| Tafla 4.9 Færsla brúargólfsins [mm] yfir blýgúmmílegum við turninn þegar kaplarnir eru strektir..... | 48 |
| Tafla 4.10 Kraftar og vægi í turnfótum í langtímaástandi brúarinnar | 49 |
| Tafla 4.11 Undirstöðukraftar í brúargólfinu í lóðrétta stefnu í langtímaástandi þegar kaplarnir hafa verið strektir í hvorum langbitanum [kN]..... | 49 |
| Tafla 5.1 Tímaraðir sem voru notaðar í greiningunni og auðkenni álagstilfellis..... | 51 |
| Tafla 5.2 Sveiflutími (s), fyrsta sveifluforms sem hefur yfir 5% virkan massa í hverja stefnu. | 52 |
| Tafla 5.3 Sveiflutími sveifluforma brúarinnar í upprunalega líkaninu sem hafa yfir 5% virkan massa í einhverja stefnu..... | 53 |
| Tafla 5.4 Sveiflutími sveifluforma brúarinnar í blýgúmmílegu líkaninu sem hafa yfir 5% virkan massa í einhverja stefnu..... | 53 |
| Tafla 5.5 Sveiflutími sveifluforma brúarinnar í lausa líkaninu sem hafa yfir 5% virkan massa í einhverja stefnu. | 54 |

Þakkir

Ég vil þakka leiðbeinendum mínum, Bjarna Bessasyni og Arnari Birni Björnssyni, fyrir góð ráð, aðstoð við gerð verkefnisins og yfirlesturinn. Án þeirra hefði þetta ekki verið mögulegt.

Ég vil þakka verkfræðistofunni Eflu fyrir reiknilíkanið og aðgang að gögnum um hönnun brúarinnar sem nýttust við gerð ritgerðarinnar. Sérstaklega vil ég þakka Kristjáni Una Óskarssyni fyrir tíma sinn og leiðbeiningar við líkangerð.

Verkefnið var styrkt af Vegagerðinni og vil ég þakka fyrir framlag þeirra.

Síðast en ekki síst vil ég þakka fjölskyldu minni og sambýliskonu Ingibjörgu Tómasdóttur fyrir þolinmæði, skilning og ómetanlegan stuðning.

1 Inngangur

Jarðskjálftavarnir hafa verið notaðar í brýr á Íslandi undanfarna áratugi (Jónsson, Bessason og Haflidason, 2010). Þeim er ætlað að tryggja öryggi brúa í jarðskjálftum og takmarka skemmdir. Jarðskjálftavarnir má flokka í þrjá flokka; þær sem einangra brúargólfið frá áhrifum jarðskjálfta (e. base isolation), dempa jarðskjálftasvörun (e. damper) eða virka sem blanda af báðum. Á Íslandi eru gúmmílegur og blýgúmmílegur algengustu kostirnir af jarðskjálftavörnunum en þær falla í fyrsta og síðasta flokkinn.

Viðnámslegur (e. frictional dampers) og stál hysteríudemparar (e. hysteretic dampers) hafa verið notaðar í stakar brýr á Íslandi en þá samhliða legubúnaði. Seigjudemparar (e. hydraulic dampers) hafa aðeins verið hannaðir í eina brú sem er fullhönnuð og stendur til að byggja (Þorsteinsson, 2012).

Hegðun blýgúmmýlega og áhrif þeirra á svörun brúa í íslenskum jarðskjálftum hefur verið rannsökuð, sjá t.d. Bessason og Haflidason (2004), Jónsson, Bessason og Haflidason (2010) og Bessason, Haflidason og Guðmundsson (2019). Greiningar á jarðskjálftasvörun annara íslenskra brúa hafa aðallega verið í formi tölvureiknilíkana af brúm með og án jarðskjálftavarna, sjá t.d. Þorsteinsson (2014) og Sigurgeirsdóttir (2010). Íslensku rannsóknirnar fjalla iðulega um brýr sem stendur til að byggja, að bæta núverandi brýr eða skemmdir á og svörun á ákveðinni brú í jarðskjálfta.

Í þessari ritgerð verður fyrirhuguð brú yfir Ölfusá við Laugadælur skoðuð, brúin er á samgönguáætlun fyrir árin 2024 til 2028 (Þingskjal 174, 2018-2019, 4. gr.). Samkvæmt forhönnun sem Verkfræðistofan Efla vann er lagt til að hún verði stagbrú (e. cable-stayed bridge) og verði því sú fyrsta sinnar tegundar á Íslandi (Óskarsson, 2016).

Í ritgerðinni var byrjað á að skoða hvaða aðferðir hafa verið notaðar erlendis við hönnun stagbrúa á jarðskjálftasvæðum. Margar mismunandi aðferðir eru mögulegar við nálgun verkefnisins og hér eru fimm mismunandi stagbrýr skoðaðar og bornar saman. Brýrnar sem um ræðir eru Rion-Antirion í Grikklandi, Shipyaw í Kanada, Sutong í Kína, Ji-Lu í Taiwan og Tsurumi Tsubasa í Japan. Þær hafa allar sín einkenni, mismunandi jarðskjálftaálag og mismunandi lausnir í jarðskjálftavörnum.

Fyrirhuguð brú yfir Ölfusá var skoðuð í framhaldinu, aðdragandinn í hönnun og núverandi staða hennar verður kynnt. Fyrirhuguð staðsetning brúarinnar er á Suðurlandi þar sem stórir þekktir jarðskjálftar hafa átt sér stað í gegnum tíðina. Jarðfræði brúarstæðisins og einkenni þekktra jarðskjálfta á svæðinu eru rakin ásamt því jarðskjálftaálagi sem brúin er hönnuð fyrir.

Svörun brúarinnar við jarðskjálftaálagi var byggt á reiknilíkani af brúnni sem var fengið frá Verkfræðistofunni Eflu og skráðar tímaráðir frá mældum jarðskjálftum á svæðinu keyrðar í líkaninu. Blýgúmmílegum var bætt við líkanið og svörun brúarinnar var borin við upphaflega líkanið og þegar brúargólfið er óhindrað að hreyfast í lárétta plani. Ástæðan fyrir valinu á blýgúmmílegum er vegna þess hve þekktur valkostur þær eru á Íslandi sem

jarðskjálftavarnir í brúargerð. Þótt blýgúmmílegur hafi reynst vel á Íslandi er ekki sjálfsagt að þær henti vel í stagbrúna þar sem brúin verður sú fyrsta sinnar tegundar á Íslandi.

2 Stagbrýr – Erlend þekking

Kapalbrýr (e. cable supported bridges) þykja vænlegur kostur fyrir brýr með haflengdir frá 200 m og upp úr (Gimsing og Georgakis, 2011). Þær einkennast af stálköplum sem styðja við brúargólf og flytja krafta yfir í brúarturna. Fyrstu hugmyndir af kapalbrúm má rekja aftur ársins 1823 þegar stagbrú í Genf sem notaðist við keðjur fyrir stög (Gimsing og Georgakis, 2011). Þær urðu hinsvegar ekki algengar fyrr en eftir árið 1930 þegar hástyrkleikastálstrengir voru kynntir til sögunnar af Eduardo Torroja árið 1927 og Franz Dischinger árið 1934 (Casado, 2011). Strömsundsbrúin í Svíþjóð er hinsvegar þekkt sem fyrsta nútíma stagbrúin þar sem hún hafði mikil áhrif á hönnun slíkra brúa í framhaldinu en hún var byggð árið 1955 (Gimsing og Georgakis, 2011). Strömsundsbrúin nýtir færri kapla heldur en það sem tíðkast í dag, þá þarf brúargólfið að vera sterkara og bera sig yfir lengri haflengd, sjá mynd 003.



Mynd 2.1 Strömsundsbrúin hafði mikil áhrif á hönnun stagbrúa og oft nefnd sem fyrsta nútíma stagbrúin (Gimsing og Georgakis, 2011)

Á Íslandi hafa verið byggðar nokkrar kapalbrýr en einungis í formi hengibrúa. Munurinn á stagbrúm og hengibrúm er að kaplarnir á hengibrúm eru festir niður í jörðina með ankerum eða þar til gerðum undirstöðum en á stagbrúm eru kaplarnir festir í brúargólfið (Gimsing og Georgakis, 2011). Stórar og þungar undirstöður getur þurft til að festa niður kaplana á hengibrúm en í stagbrúm þarf þversnið brúargólfsins að vera sterkt til að taka á móti skástæðum kröftunum frá köplunum. (Gimsing og Georgakis, 2011).

Einn af kostunum við stagbrýr eru fáar undirstöður þar sem kaplarnir sjá um að flytja lóðrétt álagið frá brúargólfinu og í turnana. Vegna fárra undirstaðna og langra haflengda eru stagbrýr almennt sveigjanlegri heldur en aðrar brýr sem endurspeglast í lengri eiginsveiflutíma (e.

fundamental vibration periods). Hönnunarjarðskjálftaálag á stagbrýr er því yfirleitt frekar lágt samanborið við stífari mannvirki þar sem hönnunarhröðunarrófið (e. design response spectra) lækkar með lengri eiginsveiflutíma (Casado, 2011). Hinsvegar geta færslur brúargólfsins orðið óhóflega miklar vegna sveigjanleikans. Jarðskjálftavarnir miða því iðulega að því að hafa stjórn á færslunum án þess að jarðskjálftakraftarnir rjúki upp (Casado, 2011).

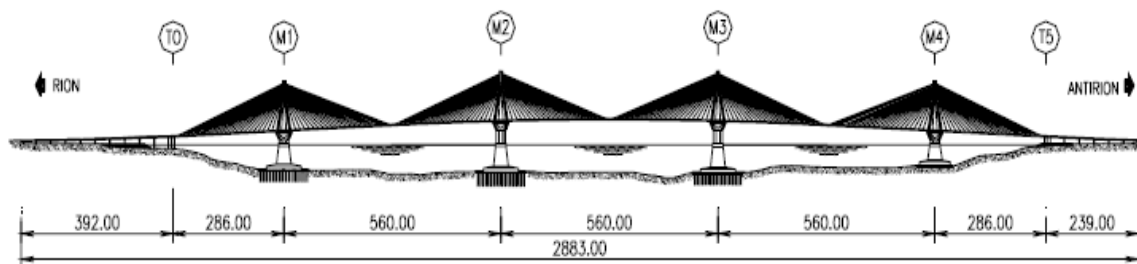
Tengingarnar á milli undirstaðna og brúargólfs ásamt tenginganna á milli turnanna og brúargólfsins hafa mikið um að segja hversu stíf eða sveigjanleg stagbrúin verður (Casado, 2011). Líta má á tvö tilfelli sem jaðartilfelli, annarsvegar ef brúargólfið er frjálst að hreyfast við turna og undirstöður og hangir aðeins í köplunum og hinsvegar ef brúargólfið er fast við turnana og undirstöðurnar með stífum tengingum (e. rigid connection). Í fyrra tilfellinu myndi brúargólfið hegða sér eins og pendúll eða róla ef lárétt álag verkar á brúna svo sem vindálag eða jarðskjálftaálag. Færslur brúargólfsins gætu orðið ansi miklar en kraftarnir í undirstöðum yrði haldið í lágmarki. Hinsvegar ef brúargólfið er tengt með stífum tengingum við undirstöður og turnfætur þá takmarkar það færslur gólfsins en kraftarnir sem undirstöður þurfa að þola aukast í staðinn.

Jarðskjálftavarnir, bæði einangrarar og demparar, hafa þann möguleika að stilla af samspil krafta og færslna á brúargólfinu. Margar bækur og greinar er hægt að finna um mismunandi tegundir jarðskjálftavarna, ekki verður farið nánar út í eiginleika mismunandi jarðskjálftavarna í þessari grein en lesendum er bent á Þorsteinsson (2014), Skinner, Robinson og McVerry (1993) og Christopoulos, Filiatrault og Bertero (2006).

Notkun jarðskjálftavarna í stagbrýr erlendis á jarðskjálftasvæðum hefur verið töluvert rannsakað enda yfirleitt stór mannvirki og hvert með sitt kennileiti. Því getur verið fróðlegt að skoða hvaða aðferðir hafa verið nýttar erlendis við hönnun stagbrúa á jarðskjálftasvæðum, ásamt því að skoða hvað hefði mátt gera betur við hönnun slíkra brúa sem hafa skemmt í jarðskjálftum. Í reynd eru hinsvegar fá dæmi um stagbrýr sem hafa orðið fyrir tjóni í jarðskjálftum. Casado (2011) greinir aðeins frá tveimur slíkum í doktorsverkefni sínu um stagbrýr, annars nefnir hann aðeins skemmdir sem takmarkast við jarðskjálftabúnað sem er ætlað að skemmtast í jarðskjálfta. Báðar stagbrýrnar sem Casado (2011) nefnir að skemmtast hafa í jarðskjálftum verða teknar fyrir í þessari ritgerð, helsta jarðskjálftabúnaði þeirra lýst og hvað hefði mátt gera betur. Einnig verður litið á þekktar stagbrýr sem sumar hafa þegar staðið af sér stóra jarðskjálfta, það eru brýrnar Rio-Antirion, Sutong og Tsurumi Tsubasa og jarðskjálftabúnaður þeirra skoðaður.

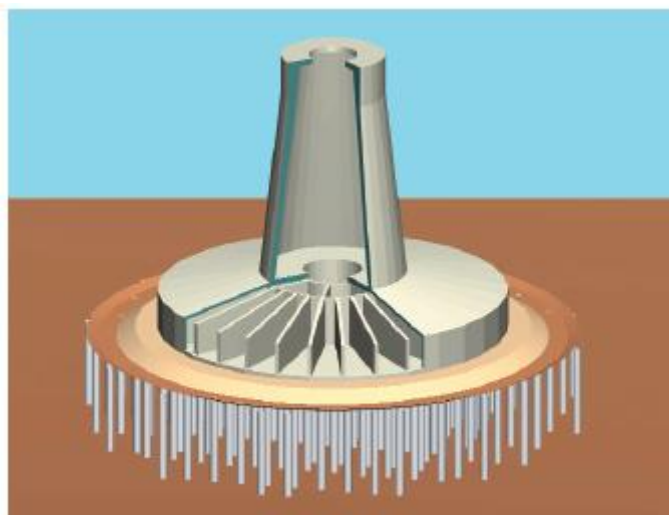
2.1 Rion-Antirion brúin í Grikklandi

Rion-Antirion stagbrúin er staðsett í „The Gulf of Corinth“ í Grikklandi. Brúin var tekin í notkun árið 2004 og spannar fimm höf samtals um 2.250 m (Pecker, 2004). Turnarnir fjórir standa hæst í 230 m hæð yfir sjávarbotni. Brúargólfið er samsett þversnið sem er byggt upp af I-laga stálbitum og samverkandi steypu brúargólfi. Stálbitarnir bera sig á milli kaplanna í bæði lang- og þverátt brúarinnar. Brúargólfið er um 27 m á breidd og hannað fyrir fjórar akreinar, tvær í hvora átt. Á mynd 004 má sjá skematíska mynd af stærð og lögun brúarinnar.



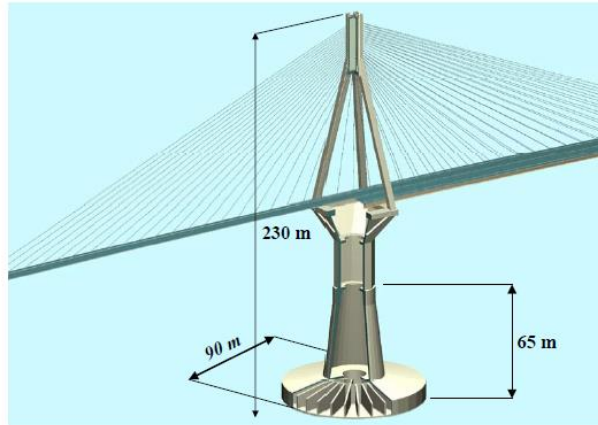
Mynd 2.2 Stærðir og lögun Rion-Antirion brúarinnar, stærðir í metrum. (Pecker, 2004).

Grundun brúarinnar reyndist eitt tæknilega flóknasta atriðið þar sem um 65 m eru niður á sjávarbotn þar sem sundið er dýpst. Þar að auki eru efstu 100 m sjávarbotnsins úr mjúkum setlögum sem þurfti að grunda brúna á (Pecker, 2004). Ákveðið var að styrkja mjúku setlögin með um 150 þriggja metra sverum og 25 metra löngum, stálsúlum fyrir neðan hvern turn til að setlögin þyldu hönnunar skerálag frá brúnni (Teyssandier, 2002). Ofan á súlustyrkta setlagið var sett um þriggja metra þykk malarfylling. Turnundirstaðan hegðar sér því eins og hún sé grunduð á malarpúða en ekki eins og hún hvíli á stauraundirstöðu (Teyssandier, 2002). Malarpúðarnir eru yfir 90 metrar í þvermál, sjá mynd 005.



Mynd 2.3 Mjúku setlögin á sjávarbotninum voru styrkt með stálsúlum áður en fyllt var undir steiptuturnfætturna með malarfyllingu (Teyssandier, 2002).

Steiptu turnfætturnir eru úr kringlóttu holu þversniði ofan í sjónum. Fyrir neðan brúargólfið er öfugur pýramídi til að taka á móti fjórum skáhallandi súlum sem mynda turn brúarinnar fyrir ofan brúargólfið, sjá mynd 006. Á myndinni má einnig sjá helstu þversniðsstærðir turnanna. Súlurnar fjórar veita meiri stífni í langátt brúarinnar heldur en hefðbundið öfugt-Y laga turnform. Brúin er því stöðugri gagnvart ósamhverfu notálagi og jarðskjálftaálagi í langátt brúarinnar (Pecker, 2004).



Mynd 2.4 Stærð og lögun turnanna í Rion-Antirion brúarinnar, pýramídaform turnanna er einkennandi fyrir brúna (Pecker, 2004).

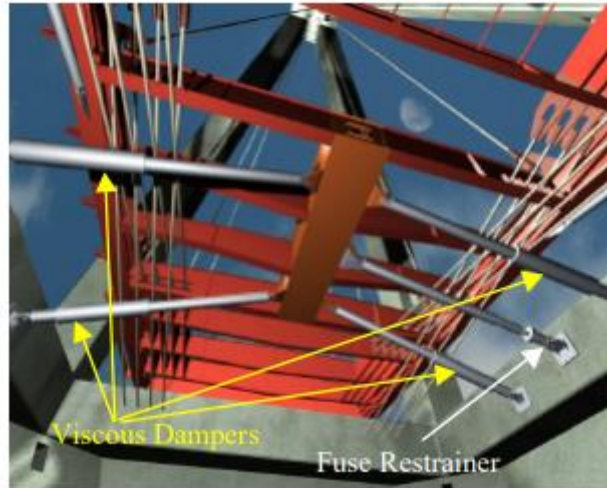
Jarðskjálftavirkni er í sundinu og það er talin hætt á að sprunga geti myndast á milli turnanna og ollið varanlegri mismunafærslu upp að tveim metrum í lárétta eða lóðrétta stefnu (Infanti, Papanikolas, Benzoni og Castellano, 2004). Brúin er einnig hönnuð fyrir jarðskjálfta upp á stærð 7 á vægisskalanum (e. moment magnitude) eða hámarkshröðun jarðar (e. peak ground acceleration, PGA) upp á 0,48 g, þar sem g er þyngdarhröðun jarðar. Toppur hönnunarrófsins (e. design response spectra) er 1,2 g og verkar á mannvirki með sveiflutíma á bilinu 0,2 – 1,1 sek. Toppurinn var lengdur vegna mögnunaráhrifa mjúku setlaganna sem turnarnir eru grundaðir á. Á byggingartíma brúarinnar var hver turn hannaður sem sjálfstæð eining sem gæti staðið einn og sér, sjá mynd 007.



Mynd 2.5 Rion-Antirion brúin á byggingarstigi, hver turn er hannaður sem sjálfstæð eining sem geti staðið ein og sér (Infanti o.fl., 2004).

Nýting jarðskjálftavarna við hönnun brúarinnar var talið nauðsynlegt vegna hás hönnunar jarðskjálftaálags (Infanti o.fl., 2004). Í þverátt er brúargólfinu haldið föstu með stálbitum í notmarkaástandi. Stálbitunum er ætlað að þola vindálag og jarðskjálfta með endurkomutíma styttri en 350 ár. Í stærri jarðskjálftum er stálbitunum ætlað að gefa sig og þá taka við fjórir vökvademparar (e. viscous dampers) við hvern turn sem stjórna hegðun brúarinnar í þverátt.

Stálbitarnir kallast fórnarbitar þar sem þeim er ætlað að gefa sig við stóra jarðskjálfta. Á mynd 008 má sjá útfærslu á stífingarkerfi brúarinnar í þverátt. Hreyfing brúarinnar í þessa átt er því takmörkuð við turnana í notmarkaástandi en við stóra jarðskjálfta getur færsla brúargólfsins verið allt að 3,5 m í þverátt og náð upp undir 1,6 m/s.



Mynd 2.6 Jarðskjálftabúnaður í Rion-Anterion brúnni við turnana. Fórnarbitinn (e. fuse restrainer) er fyrir miðju og fjórir vökvadempara (e. viscous dampers) í kring. (Infanti o.fl., 2004)

Einn af ókostum við nýtingu fórnarbita og vökvadempara er að brúnni er leyft að fá varanlega færslu í stórum jarðskjálftum (Infanti o.fl., 2004). Eftir stóra jarðskjálfta gæti því þurft að rétta brúna af, til dæmis með vökvatjökkum. Færslurnar eiga þó ekki að verða það miklar að brúin verði ónothæf.

Við turnana hangir brúargólfið í köplunum í stað þess að festast í turnana. Brúargólfið virkar því líkt og pendúll í jarðskjálfta. Svörun brúargólfsins í lóðrétta stefnu stjórnast því af stífni kaplanna. Turnarnir þurfa að bera uppi alla þyngd brúargólfsins, jarðskjálftaálag í lóðrétta stefnu og allt ósamhverft álag sem getur verkað á brúargólfið.

Brúargólfið er samfelld yfir alla kapalbrúna og hreyfist því sem ein heild í langátt brúarinnar og stjórnast af köplunum og stífum turnum. Stífleiki turnanna í langátt var aukinn með því að hafa fjóra fætur á turnunum í stað tveggja eins og áður hefur komið fram. Raufar úr gervigúmmí (e. neoprene) sem eru á milli samskeyta brúargólfsins við endastöpla leyfa allt að 5 metra færslu í langátt brúarinnar. Raufarnar leyfa því brúargólfinu að taka upp hitabreytingar, jarðskjálftaálag og varanlegar færslur brúargólfsins í langátt brúarinnar

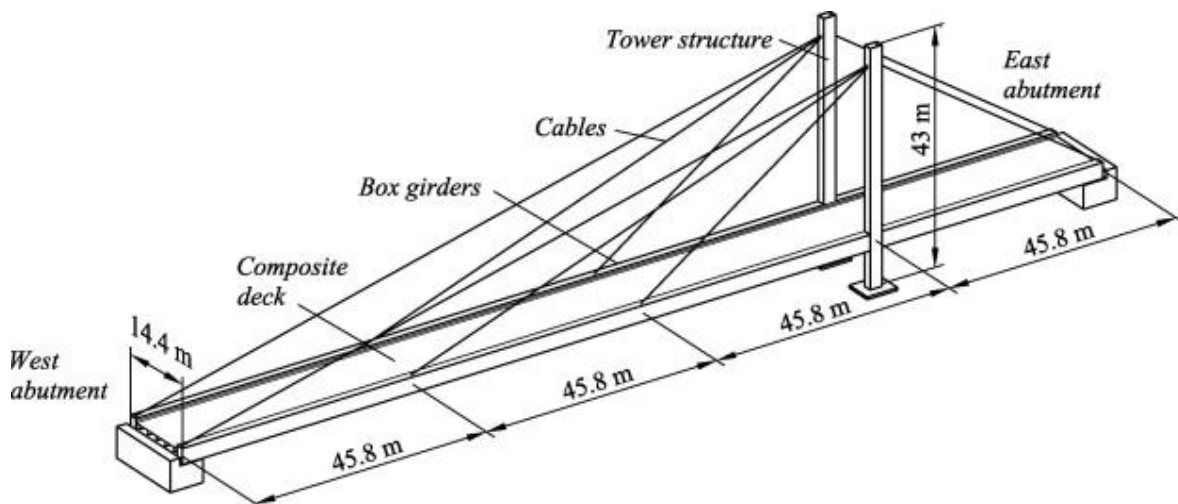
Rannsóknir á grundun brúarinnar bendir til þess að turnfætturnir geti myndað flotlið (e. Plastic hinge) í stórum jarðskjálftum (Teyssandier, 2002). Rannsóknin benti til þess að turnfætturnir gætu hreyfst ofan á malarlaginu og þannig takmarkað jarðskjálftakraftana sem geta borist í brúna. Þannig takmarki grundun brúarinnar hversu mikið jarðskjálftaálag geti verkað á brúna sjálfa.

Á brúarstöplum á hvorum enda brúarinnar, áður en komið er út á meginbrúna þar sem stagvirkið tekið við, (e. viaduct) (sjá 004) eru notaðar gúmmílegur (e. elastometric bearings) sem jarðskjálftaeinangrar til að lengja eiginsveiflutíma (Casado, 2011). Ef grunneiginsveiflutími þessara aðliggjandi brúarluta og stagbrúarinnar sjálfar eru líkari þá eru taldar meiri líkur á að mannvirkin muni hreyfast í takt sem minnkar líkurnar á að mannvirkin skelli saman (e. pounding). Vökvadempingar eru einnig nýttir með einangranum í bæði langátt og þverátt til að eyða orkunni og takmarka færsluna á aðliggjandi brúargólfi (Infanti o.fl., 2004).

Fleiri rannsóknir hafa einnig verið gerðar á brúnni, þar á meðal rannsóknir á titring í köplunum (Lecinq, Messein og Boutillon, 2003) og hvernig brúin bregst við jarðskjálftaálagi á byggingartíma brúarinnar (Combault og Teyssandier, 2005).

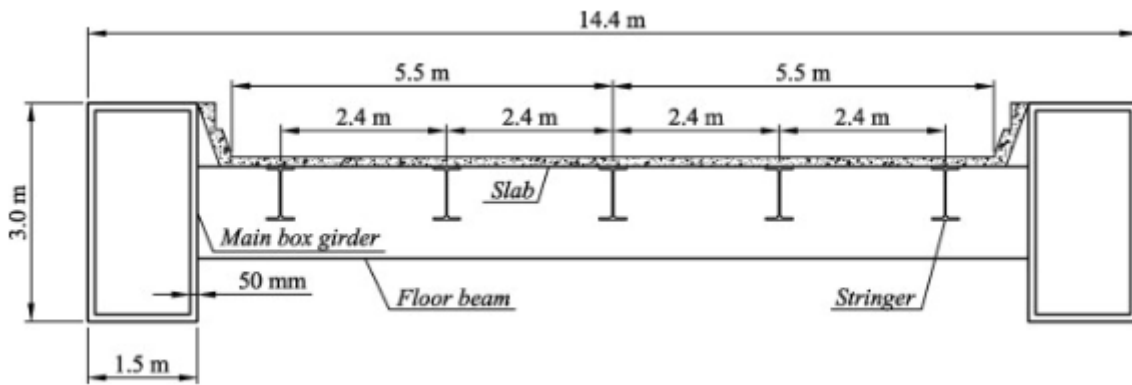
2.2 Shipshaw brúin í Kanada

Brúin er kölluð Shipshaw bridge og er staðsett í Kanada (Martínez-Rodrigo og Filiatrault, 2015). Hún spannar 183 m sem skiptist niður í fjögur jafn löng höf (45,8 m) og er með tvo 43 m háa turna, sjá mynd 009. Heildarbreidd brúargólfsins er 14,4 metrar og það hallar 4% upp til austurs. Aksturshluti brúarinnar er 11 metra breiður og er með tvær akreinar.



Mynd 2.7 Stærðir og lögun Shipshaw brúarinnar (Martínez-Rodrigo og Filiatrault, 2015).

Turnarnir eru úr holum kassaþversniðum úr stáli og þversniðið er 2,4 m í langátt brúarinnar en 1,5 m í þveráttina. Burðarvirki brúargólfsins er samvirkandi þversnið úr steyptri plötu og stálbitum. Tveir stálbitar úr kassaþversniðum (1,5x3 m) bera brúargólfið á milli kaplanna, á milli þeirra er net stálbita sem bera 165 mm þykka steypa plötu, sjá mynd 010 (Martínez-Rodrigo og Filiatrault, 2015).



Mynd 2.8 Burðarvirki brúargólfsins er samsett þversnið, lang- og þverbítar eru úr stáli ásamt millibitum sem bera 165 mm steypu plötuna (Martínez-Rodrigo og Filiatrault, 2015).

Brúin er ekki útbúin neinum jarðskjálftabúnaði en legubúnaður í endastöplum leyfir brúnni að hreyfast í langátt og kemur í veg fyrir að brúargólfið geti lyfst upp við undirstöðurnar vegna togkrafta í köplunum (Javanmardi o.fl, 2017). Turnunum er leyft að snúast um lóðréttan ás brúarinnar en að örðu leyti eru allar tengingar stífar (e. rigid connection), þar á meðal tengingin á milli turnanna og brúargólfs.

Brúin skemmdist í jarðskjálfta, að stærð 6,0 á Richterskalanum árið 1988 (Martínez-Rodrigo og Filiatrault, 2015). Hámarks yfirborðshröðun (e. peak ground acceleration, PGA) nálægt skjálftaupptökunum mældist 0,15 g. Ein stáltenging skemmdist á milli langbitanna í brúargólfinu og undirstoðar (e. abutment). Loka þurfti brúnni á meðan viðgerðum stóð til að tryggja öryggi.

Árið 2015 gerðu Martínez-Rodrigo og Filiatrault (2015) rannsókn á brúnni til að meta hvort bæta mætti jarðskjálftahönnun hennar. Í rannsókninni voru skoðaðir nokkrir mismunandi möguleikar á jarðskjálftavörnum; að bæta við stálhysteríudempurum (e. metallic dampers), útbúa hana með vökvadempurum (e. fluid viscous dampers), nota þyngdarstillta dempara (e. tuned mass dampers) og loks að bæta við viðnámslegum undir brúargólf við turna (e. friction dampers).

Í rannsókninni var lögð áhersla á að skoða hreyfingu brúarinnar í langátt sem og kraftana sem myndast í turnunum við samanburð mismunandi jarðskjálftavarna. Rannsóknin byggði á því að gera ólínulegt, dýnamískt (e. dynamic) reiknilíkan af brúnni í reikniforritinu RUAUMOKO-2D og keyra valdar jarðskjálftatímaraðir sem álag á brúna. Rannsóknin tók einnig tillit til nærsviðsáhrifa með því að nota nokkrar tímaraðir þar sem nærsviðsáhrif komu fram.

Stálhysteríudempararnir voru útfærðir með því að tengja stálstífur frá turnunum skáhalt í brúargólfið. Stálstífurnar voru styrktar gagnvart kiknun (e. buckling restrained braces). Þá miðaðist útfærslan við að steypa utan um stálbitana til að hindra að stálbitarnir kikni ekki í þrýstingi. Stálinu var ætlað að taka upp formbreytingar og eyða orku vegna álagsins. Stálstífurnar auka stífleika brúarinnar í langáttina og við það aukast jarðskjálftakraftarnir sem verka á brúna í leiðinni.

Vökvademparnir voru útfærðir með því að staðsetja demparana við endastöpla í langátt brúarinnar. Dempunin stjórnast af mismunafærslu á milli endastöplanna og brúargólfsins.

Vökvademparnir reyndust betri í að takmarka krafta heldur en að takmarka færslu brúargólfsins. Vökvademparnir eru stilltir af til að dempa ákveðna tíðni álags og í rannsókninni voru dempararnir stilltir á eigintíðni fyrsta sveifluforms í langátt brúarinnar.

Þyngdarstillta dempunin var útfærð með því að bæta við massa á þrjú mismunandi staði á brúna. Þyngdin breytir eiginsveiflutíma brúarinnar vegna aukins massa en hefur ekki áhrif á stífni brúarinnar. Prófað var að staðsetja þyngdina við báða enda brúarinnar og á milli turnanna fyrir ofan brúargólfið. Þyngdarstillta dempunin bar mestan árangur þegar þyngdin var staðsett á milli turnanna, hinsvegar þurfti svo mikla þyngd að lausnin var ekki talin raunhæf. Aukna þyngdin sem turnarnir þurfa að bera vegur einnig upp á móti skilvirkni demparans. Martínez-Rodrigo og Filiatrault töldu einnig hættu á að massinn auki álag frá hærri sveifluformum brúarinnar sem gæti haft ófyrirsjáanlegar afleiðingar.

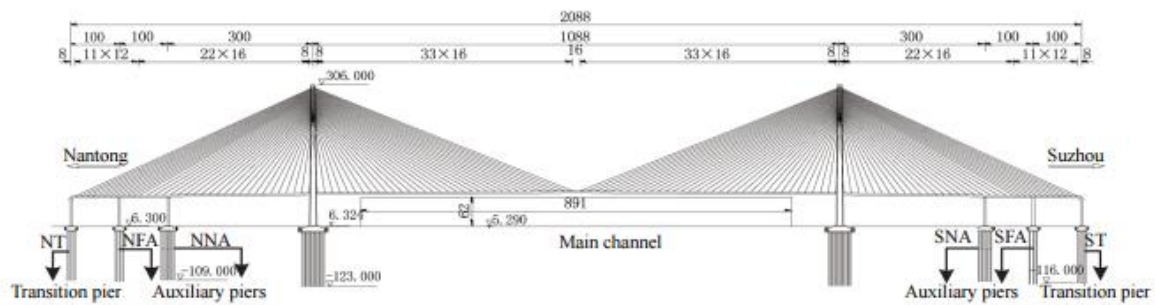
Fjórða og seinasta aðferðin var að setja viðnámslegur í brúargólfið við turnana. Brúargólfið hvílir þá á kúptum flötum sem mynda viðnám gagnvart hreyfingu og leitast við að ná upprunalegu formi eftir jarðskjálftann. Þótt aðferðin sé óraunhæf við breytingu núverandi brú þá er lausnin áhugaverð í samanburði þegar nýjar brýr eru byggðar.

Rannsóknin benti til þess að allir valmöguleikar á jarðskjálftavörnum hefðu komið í veg fyrir skemmdirnar sem urðu á brúnni í jarðskjálftanum árið 1988. Brúin hegðaði sér hinsvegar aðeins línulega þegar hún var einangruð með viðnámslegum. Martínez-Rodrigo og Filiatrault töldu því viðnámslegurnar besta kostinn við val á jarðskjálftavörnum fyrir hönnun á sambærilegum brúm. Martínez-Rodrigo og Filiatrault töldu vökvadempara næst bestu lausnina, bæði vegna breyttrar svörunar og vegna einfaldleika í uppsetningu. Versta lausnin reyndist vera þyngdarstillti demparinn. Þyngdarstillti demparinn bætti svörun brúarinnar fyrir sumar tímaraðir en hafði slæm áhrif á svörun brúarinnar fyrir aðrar tímaraðir. Stálstífunar sem styrktar voru gegn kikkun reyndust besta lausnin gegn fjarsviðsáhrifum en ekki mjög skilvirkir gagnvart nærsviðsáhrifum. Stálstífunar komu því ekki jafn vel út og viðnámslegur eða vökvademparnir þegar á heildina er lítið.

Fleiri rannsóknir hafa verið gerðar á brúnni, Javanmardi o.fl. (2017) könnuðu notkun blýgúmmílega. Blýgúmmílegurnar voru notaðar við tengingu brúargólfsins við turna og undirstöður. Þær voru stilltar þannig að flotstyrkur þeirra væri 5% af þyngd brúarinnar. Í rannsókn sinni komust þeir að því að blýgúmmílegurnar juku sveigjanleika brúarinnar sem lækkaði undirstöðuskerkraftinn (e. base shear) og undirstöðuvægið (e. base moment) í jarðskjálftum. Notkun blýgúmmílega tvöfaldaði hinsvegar færslur brúargólfsins en Javanmardi o.fl. (2017) töldu þær samt ennþá innan skynsamlegra marka. Í rannsókninni var hinsvegar ekkert fjallað um nærsviðsáhrif jarðskjálfta.

2.3 Sutong brúin í Kína

Sutong brúin er samtals um 8 km að lengd yfir ána Yangtze og tengir saman borgirnar Nantong og Suzhou (Bittner, Safaqah, Zhang og Jensen, 2007). Lengsta haf brúarinnar er 1088 metrar og var lengsta haf stagbrúar þegar hún var byggð, sjá mynd 011. Brúin var tekin í notkun árið 2008 eftir að hafa verið um fimm ár í smíði.



Mynd 2.9 Stærð og lögur Suton brúarinnar (Shen, Camara og Ye, 2015).

Grundunaraðstæður brúarinnar eru nokkuð líkar og hjá Rion-Antirion brúnni, en um 300 metrar eru niður á fast berg, þar af eru 270 metrar af mjúkum setlögum (Bittner o.fl., 2007). Brúin er því grunduð á stauraundirstöðum og undir hvorum turn er um 130 staurar sem eru 2,5m í þvermál og 115 m langir.

Burðarvirki brúargólfsins er stálkassabiti (e. steel box girder) sem er um 40 metrar á breidd og fjórir metrar á hæðina (Xigang, Hong, Minshan, Jie og Lin, 2009). Brúin er með sex akreinar, þrjár í hvora átt. Brúargólfið hangir í tveimur kapalplönnum sem festast í kantinn á brúargólfinu. Að jafnaði eru um 16 m á milli kapalparanna þar sem þau tengjast við brúargólfið en aðeins tveir metrar á milli festinga í turninum og því halla kaplarnir mis mikið.

Vegna umferðar skipa undir brúna þurfti brúargólfið að vera 62 metrum fyrir ofan yfirborð ánnar (Xigang o.fl., 2009). Turnarnir tveir ná um 230 m yfir yfirborð brúargólfsins og eru því samtals um 300 metra háir. Turnarnir eru eins og öfugt-Y í laginu og eru úr holum steypum ferhyrindum þversniðum. Þversnið turnanna er 8,5 metrar í langátt og 4 metrar í þverátt brúarinnar. Þverbítur tengir saman turnfætturna undir brúargólfinu og heldur uppi brúargólfinu í leiðinni.

Vindálag á brúna getur einnig verið töluvert en brúin er með grunnildi vindhraða upp á 38,9 m/s í tíu metra hæð (Xigang o.fl., 2009). Þar sem brúin er bæði löng og grönn þá hefur hún háa Reynoldstölu (e. Reynolds number) sem veldur hættum á hvirflamögnun (e. turbulence). Því voru settir demparar á kaplana sem eiga að koma í veg fyrir vindálag magni upp eígtíðni brúargólfsins.

Jarðskjálftavarnir brúarinnar eru vökvademparar (e. viscous fluid damper) í langáttina sem verða virkir við jarðskjálftaálag eða mikið vindálag en annars er brúnni frjálst að hreyfast í langáttina. Færsla brúargólfsins miðað við turnana í langáttina er takmörkuð við 750 mm, við þá færslu læsast dempararnir og hindra frekari færslu brúargólfsins (Shen o.fl., 2015). Einnig eru viðnámslegur (e. frictional sliding bearings) við turnana sem auka stífni brúarinnar í langátt og eyða orku í jarðskjálftum. Viðnámslegurnar þjóna einnig þeim tilgangi að beina brúargólfinu í upprunalega stöðu með aðstoð þyngdarkraftsins eftir stóra jarðskjálfta. Geta þeirra til að eyða orku takmarkast hinsvegar af þyngdinni sem hvíla á þeim en þar sem brúargólfið hangir að megninu til í köplunum er takmörkuð þyngd sem hvílir á legunum.

Í þverátt brúarinnar er hinsvegar enginn jarðskjálftabúnaður heldur er brúargólfið tengt með stífri tengingu við turninn (Shen o.fl., 2015). Vegna þröngs tímaramma í hönnun og byggingu brúarinnar var jarðskjálftabúnaður ekki skoðaður. Stífa tengingin hjálpar til við að takmarka færslur á brúargólfinu í notmarkaástandi en stífa tengingin kallar á meiri jarðskjálftakrafta.

Áætlað er að kraftarnir sem tengingin á milli brúargólfsins og turnsins þurfi að þola í þverátt brúargólfsins sé um 140% af þyngd brúargólfsins (Shen o.fl., 2015). Gerð er krafa um að brýr á mikilvægum stofnbrautum hagi sér línulega í jarðskjálftum sem gerir tenginguna á milli brúargólfsins og turnsins stóra og kostnaðarsama.

Shen o.fl. (2015) gerðu rannsókn á því hvernig mætti bæta tenginguna á milli brúargólfsins og turnanna í þverátt brúarinnar. Skoðuð var notkun vökvadempara (e. viscous fluid damper, VFD) með legubúnaði (e. sliding bearings), pendúla viðnámslega (e. friction pendulum sliding bearings, FPSB) og stál hysteríudempara (e. transverse yielding metallic dampers, TYMD) í þverátt brúarinnar. Þessi tilfelli voru borin saman við núverandi ástand brúarinnar, það er stífa tengingu. Tilfellið þegar brúargólfið er frjálst að hreyfast til hliðanna við turnana var einnig skoðað og haft til samanburðar.

Niðurstaða rannsóknarinnar var að vökvadempararnir og stálhysteríudempararnir komu best út í að takmarka bæði jarðskjálftakraftana í tengingunni á milli brúargólfsins og turnanna á sama tíma og stóru færslunum á milli brúargólfsins og turnanna var haldið í skefjum (Shen o.fl., 2015). Vökvadempararnir og stálhysteríudempararnir hafa engin áhrif á eiginleika brúarinnar í langáttina, það er hægt að setja demparana upp eftirá og þeir hafa minni upphafs og viðhaldskostnað heldur en viðnámslegurnar. Notkun á viðnámslegum minnkar jarðskjálftakraftana í tengingunni en hliðarfærslurnar verða óhóflega miklar, ástæðan er rakin til lítillar þyngdar sem hvílir á viðnámslegunum þar sem brúargólfið hangir að megninu til í köplunum. Geta viðnámslega til orkueyðingar er í réttu hlutfalli við þyngdina sem hvílir á þeim. Í töflu 003 má sjá frekari samanburð á hámarkssvörun Sutong brúarinnar við mældum jarðskjálftatímaröðum eftir jarðskjálftabúnaði.

Shen o.fl ráðleggja notkun stálhysteríudempara vegna skilvirkni og hagkvæmni. Þeir benda einnig á hættuna á að vökvademparar munu ekki virka vegna mikilla færslna brúargólfsins í langáttina.

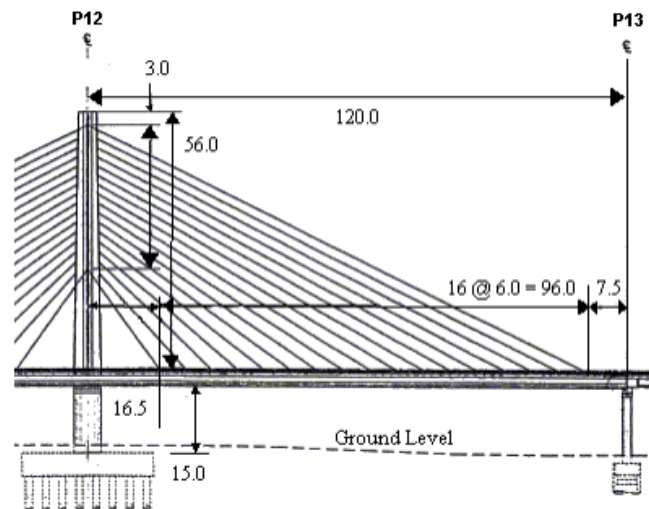
Tafla 2.1 Hámarkssvörun Sutong brúarinnar við mældum jarðskjálftatímaröðum eftir vali á jarðskjálftabúnaði í þverátt brúarinnar (Shen o.fl., 2015)

| | | VFD | FPSB | TYMD | Free | Fix |
|--|------------------------|----------------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Optimal parameters | Loma Prieta Chi-Chi | $C_a = 3000, \alpha = 0.5$ | $\eta = 0.048$ | $\beta = 50\%$ | — | — |
| Displacement at the end of girder (m) | Loma Prieta Chi-Chi | 0.387 0.373 | 0.671 1.68 | 0.312 0.2 | 0.663 1.067 | 0.268 0.205 |
| Bending moment at pier bottom section (kN-m) | Loma Prieta Chi-Chi | 827022 488188 | 1497299 549446 | 749412 478738 | 1700048 594115 | 1300696 881720 |
| Seismic device relative displacement (m) | Loma Prieta Chi-Chi | 0.512 0.345 | 0.847 1.551 | 0.534 0.235 | 0.707 1.136 | 0 0 |
| Seismic device force (kN) | Loma Prieta Chi-Chi | 4858 3204 | 2173 3080 | 2976 2976 | 138 138 | 19879 11836 |

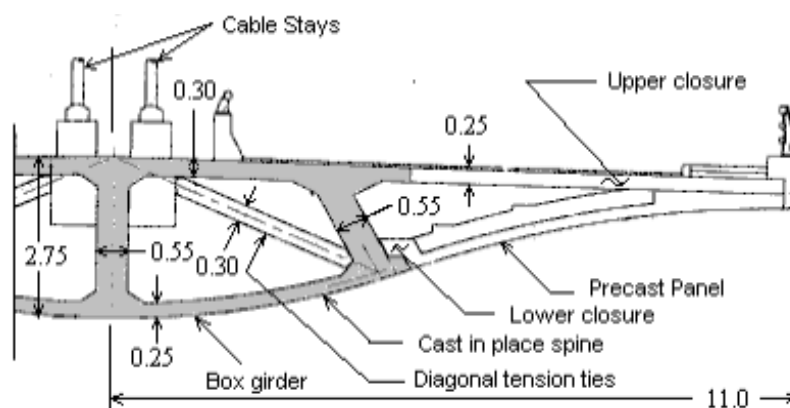
2.4 Ji-Lu brúin í Taiwan

Ji-Lu stagbrúin þverar Juo Sheui ána sem er staðsett í Nantou héraði í norðvestur hluta Taiwan. Brúin er spannar tvö 120 metra löng samhverf höf með stökum turn í miðjunni (Chadwell, Fenves og Mahin, 2003), sjá mynd 012.

Brúargólfið er byggt úr forspenntri, staðsteyptri steypu sem mynda kassabita (e. box girder) (Chadwell o.fl., 2003). Á báðum hliðum kassabitans voru settar útkragandi forsteyptar einingar sem mynda akhluta brúargólfsins, sjá mynd 013. Kassabitinn er 10,4 metrar á breidd og 2,75 metrar á dýpt en Heildar breidd brúarinnar er um 24 metrar. Brúargólfið er borið uppi af 34 kapalpörum ásamt endastöplum. Kaplarnir eru tengdir í miðju brúargólfsins eins og sést á mynd 013. Kapalkerfið er breytt blævængskerfi (e. modified fan system) sem merkir að kapalfestingunum er dreift yfir hæð turnsins og þeir halli mismunandi, sjá mynd 012.



Mynd 2.10 Stærð og lögun Ji-Lu brúarinnar (Chadwell o.fl., 2003).



Mynd 2.11 Hálft þversnið brúargólfsins, aðal burðarbiti brúargólfsins er grár en forsteypta einingin hvít (Chadwell o.fl., 2003).

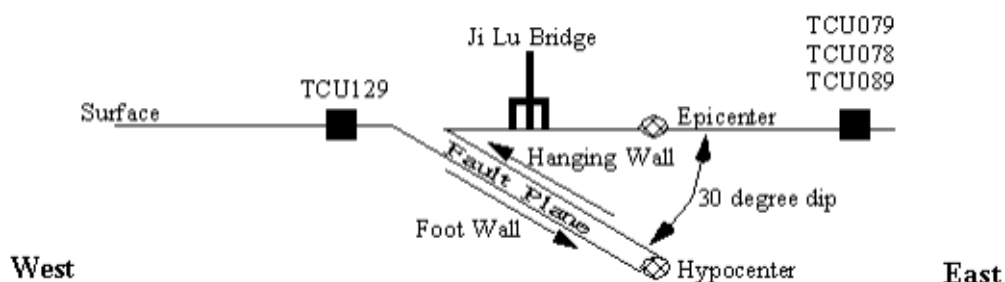
Turninn er 76 metra hár, þar af eru 58 metrar fyrir ofan brúargólfið (Chang, Chang, Tsai og Sung, 2000). Sverastur er turninn 6 metrar í þvermál en við brúargólfið breytist hann úr kringlóttu þversniði neðan brúardekks yfir í holt-ferhyrnt þversnið með 3 x 6 metra hliðarlengdir. Þversnið turnsins minnkar jafnt upp á við og er 3x4 metrar efst. Tenging turnsins við brúargólfið er stíf tenging (e. rigid connection), þ.e. tengingin leyfir engar hreyfingar eða færslur.

Tengingin á milli brúargólfsins og endastöpla er skúftenging sem flytur krafta í þverátt brúarinnar en leyfir færslu í langáttina. Endastöplarnir styðja undir brúargólfið í lóðrétta stefnu en þeir halda brúargólfinu ekki niður ef það verkar lyftikraftur á brúargólfið.

Brúin skemmdist í Chi-Chi jarðskjálftanum árið 1999 (Kosa og Tasaki, 2003). Jarðskjálftinn var 7,6 að stærð á vægisskalanum (M_w) og jarðskjálftamiðjan (e. epicentral distance) var í 6,3 km fjarlægð frá brúnni. Smíði brúarinnar var nánast lokið þegar jarðskjálftinn skall á, en það átti aðeins eftir að fínstilla togkraftinn í köplunum og að setja þrjár forsteyprtar útkragandi einingar í brúargólfið öðru megin við turninn. Jarðskjálftinn skemmdi um 10% brúa á svæðinu, þúsundir létust í jarðskjálftanum og tugþúsundir særðust (Kosa og Tasaki, 2003).

Enginn hröðunarmælir (e. accelerometers) var við brúna en fjórir mælar voru bæði innan við 15 km frá jarðskjálftamiðjunni og frá brúnni. Hámarks yfirborðshröðun (e. peak ground acceleration) mældist á bilinu 29-101% af þyngdarhröðun jarðar og hámarkshraðinn á bilinu 0,12-0,24 m/s á mælunum fjórum (Kosa og Tasaki, 2003).

Chadwell, Fenves og Mahin (2003) halda því fram að brúin hafi orðið fyrir nærsviðsáhrifum vegna stefnu brúarinnar frá jarðskjálftaupptökum og vegna þess að hermun á svörun brúarinnar þar sem notast var við mældu tímaraðirnar bar ekki saman við skemmdirnar sem urðu á brúnni. Þeir halda því fram að brúin hafi frekar skemmt í stökum hraðapúlsi með færslu upp á um 8 metra og sveiflutíma upp á 2,5 sekúndur. Chadwell, Fenves og Mahin (2003) telja ástæðu þess af hverju hraðapúlsinn mældist ekki á hröðunarmælunum vera sú að brúin hafi verið staðsett á hangandi hluta sprungunar, þ.e. yfir hinum hallandi brotfleti, ólíkt hröðunarmælunum, sjá mynd 014.

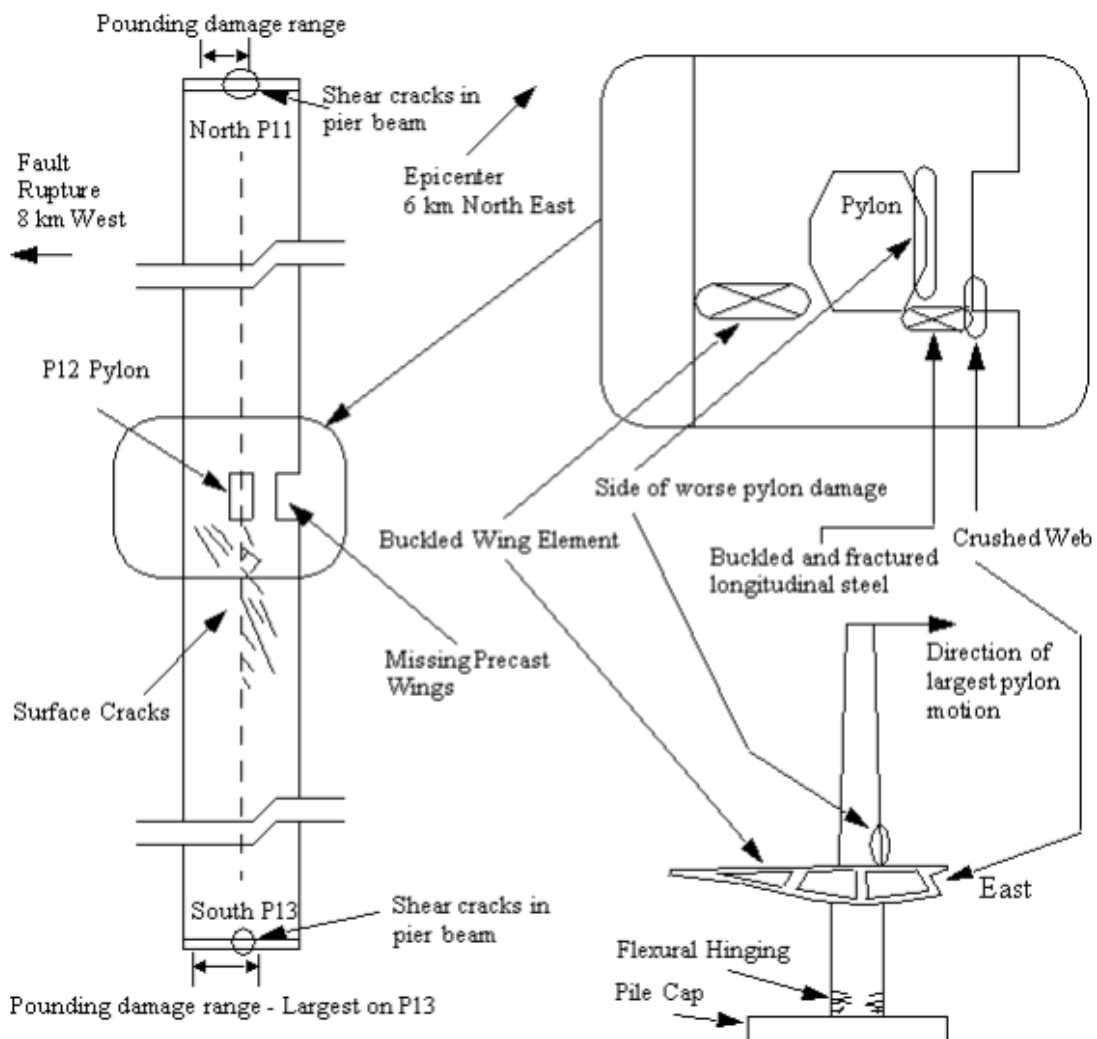


Mynd 2.12 Staðsetning brúarinnar með tilliti til jarðskjálftans, svörtu punktarnir eru staðsetning hröðunarmæla (Chadwell o.fl., 2003)

Brúin skemdist töluvert í jarðskjálftanum en helstu skemmdir brúarinnar voru beygju-flotliðir (e. flexural hinge) sem mynduðust við tengingu brúargólfsins við turninn, skemmdir í endastöplum eftir samstuð við brúargólfið (e. pounding), skemmdir í festingum kapla ásamt

Því að sker og togsprungur mynduðust við endastöpla (Chadwell o.fl., 2003). Mynd 2.13 sýnir helstu skemmdir sem urðu á brúnni ásamt því að sýna hvar forsteyptu einingarnar vantaði. Skemmdirnar benda til þess að brúargólfið hafi færst um 3-4 metra til vesturs. Ósamhverfa álagið sem myndaðist við turninn vegna forsteyptu eininganna sem vantaði er einnig talið hafa átt þátt í skaðanum.

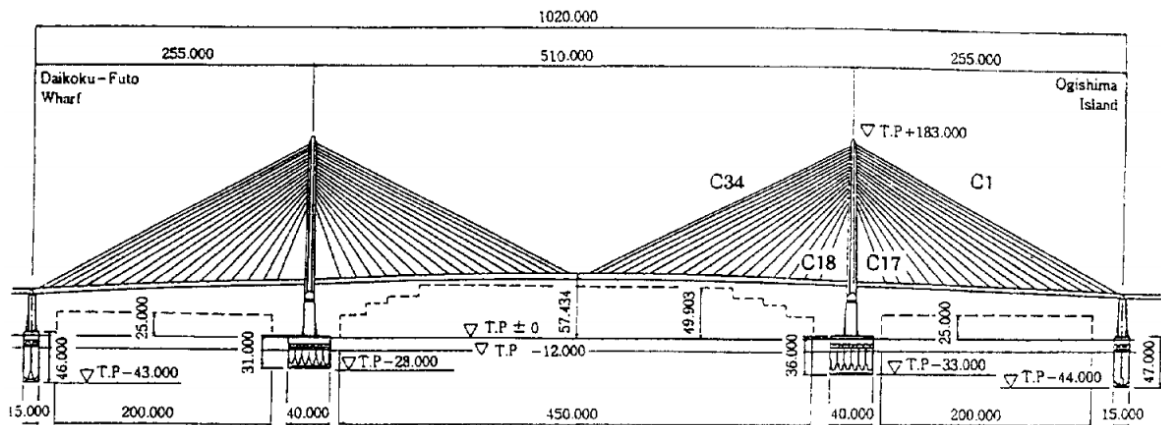
Niðurstöður Chadwell, Fenves og Mahin (2003) á hermun á svörun brúarinnar vegna mældu tímaraðanna og hraðapúlsins benda til þess að takmarka mætti skemmdirnar með því að festa brúargólfið í lóðrétta stefnu á endastöplum. Stífari tenging á endastöplum hefði takmarkað snúning brúargólfsins um turninn, sem hefði komið í veg fyrir skemmdirnar sem urðu á milli tengingar brúargólfsins og turnsins.



Mynd 2.13 Yfirlit yfir staðsetningu skemmda á brúnni ásamt því að sýna hvar vantaði forsteyptu einingarnar (Chadwell o.fl., 2015).

2.5 Tsurumi Tsubasa brúin í Japan

Brúin er staðsett í Japan og er hluti af stofnbraut sem liggur á milli borganna Yokohama, Kanazawa og Ichikawa (Hanno, Takahasi, Tsuno og Fujino, 1999). Brúin er 1020 m löng stagbrú með tveimur turnum og miðjuhafið er 510m, sjá mynd 016. Turnarnir eru eins og öfugt-Y í laginu og eru tvískiptir, fyrir ofan brúargólfið eru þeir úr stáli en fyrir neðan brúargólfið eru þeir úr samverkandi stáli og steypu. Turnarnir hafa eitt kapalplan sem tengist í mitt brúargólfið. Brúargólfið er því úr kassapversniði til að brúargólfið sé stöðugt gagnvart láréttu álagi og vinduálagi. Kassapversnið brúargólfsins er samtals 38 m á breiddina og 4 m á hæðina.

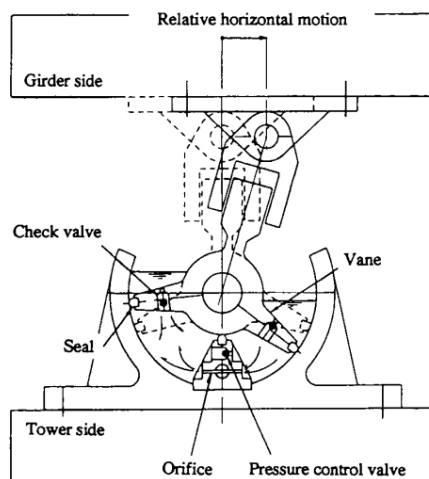


Mynd 2.14 Stærð og lögun Tsurumi Tsubasa brúarinnar í Japan (Enomoto o.fl., 1995).

Brúin var opnuð fyrir umferð árið 1994 en árið eftir skall á Kobe jarðskjálftinn. Brúin skemmdist ekki í jarðskjálftanum en í kjölfar jarðskjálftans voru hönnunarkröfur mikilvægra brúa fyrir stærri og sjaldgjæfari jarðskjálfta hertar (Hanno, o.fl., 2000). Hanno, Takahashi, Tsuno og Fujino (2000) yfirfóru Tsurumi Tsubasa brúna með tilliti til hertra jarðskjálftahönnunarkrafna. Þeir mátu eigintíðni brúarinnar (e. natural period) vera 2,91 sekúndur í langáttina og 4,00 sekúndur í þveráttina. Þeir lögðu fram ýmsar lagfæringar til að brúin uppfyllti hertu kröfurnar. Helstu lagfæringar á brúnni miðuðu að því að auka hreyfanleika brúarinnar, t.d. voru festingar brúargólfsins í þverátt við turnfætur lengdar, hreyfanleiki í legubúnaðinum í langátt var aukinn og ásetur brúargólfsins við endastöpla voru lengdar svo brúargólfið detti ekki af þeim. Einu styrktarúrbæturnar voru að turnarnir fyrir neðan brúargólfið voru styrktir gagnvart skerálagi.

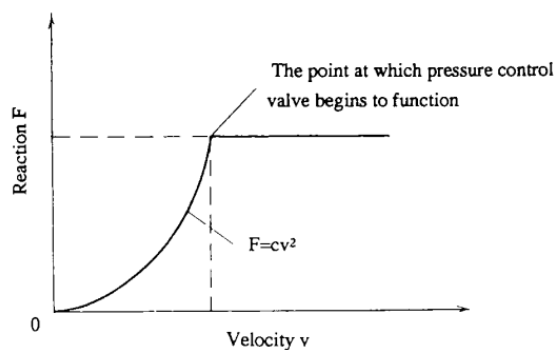
Brúin var upphaflega hönnuð fyrir jarðskjálfta að stærðinni $M=7,8-8,2$ með jarðskjálftamiðju í 50-200 km fjarlægð (Enomoto, o.fl., 1995). Jarðskjálftaraðir voru hermdar sem uppfylltu þessar kröfur og hegðuðu sér svipað og mældar tímaraðir á svæðinu. Hermdu tímaraðirnar voru keyrðar sem álag á brúna.

Í jarðskjálftahönnun brúarinnar voru notaðir fjórir snúningslegu-dempingar (e. vane-type dampers), sjá mynd 017. Tveimur dempurum var komið fyrir við hvorn turn og þeir stilltir til að takmarka hreyfingu brúargólfsins í langáttina. Þegar brúargólfið færast í langátt brúarinnar þá myndast snúningshreyfing í dempurunum, við þá hreyfingu myndast vökvanúningur í legunum.



Mynd 2.15 Legu-demparar (e. vane-type dampers) í Tsurumi Tsubasa brúnni. Hreyfing brúargólfsins knýr snúningshreyfingu í dempurunum, hreyfing vökvans myndar viðnám sem eyðir orku og dempar hreyfinguna. (Enomoto o.fl., 1995).

Dempunin af vökvænum í snúningslegunni er í öðru veldi af afstæðum hraða (e. relative velocity) á milli turnfótanna og brúargólfsins. Demparnir hafa því lítil áhrif á hægar hreyfingar á brúargólfinu eins og hitabreytingar en þegar hraðinn eykst þá margfaldast dempunin. Til að krafturinn frá dempurunum rjúki ekki upp úr öllu veldi þá var settur þrýstiloki á demparana sem opnast þegar ákveðnum þrýstingi er náð. Lokinn setur því hámark á mögulega dempun á brúargólfinu, sjá mynd 018. Reiknilíkanið af brúnni sýndi fram á 20-30% lækkun á togkrafti í köplunum og um 30% lækkun á færslu brúargólfsins við notkun snúningslegudemparanna.

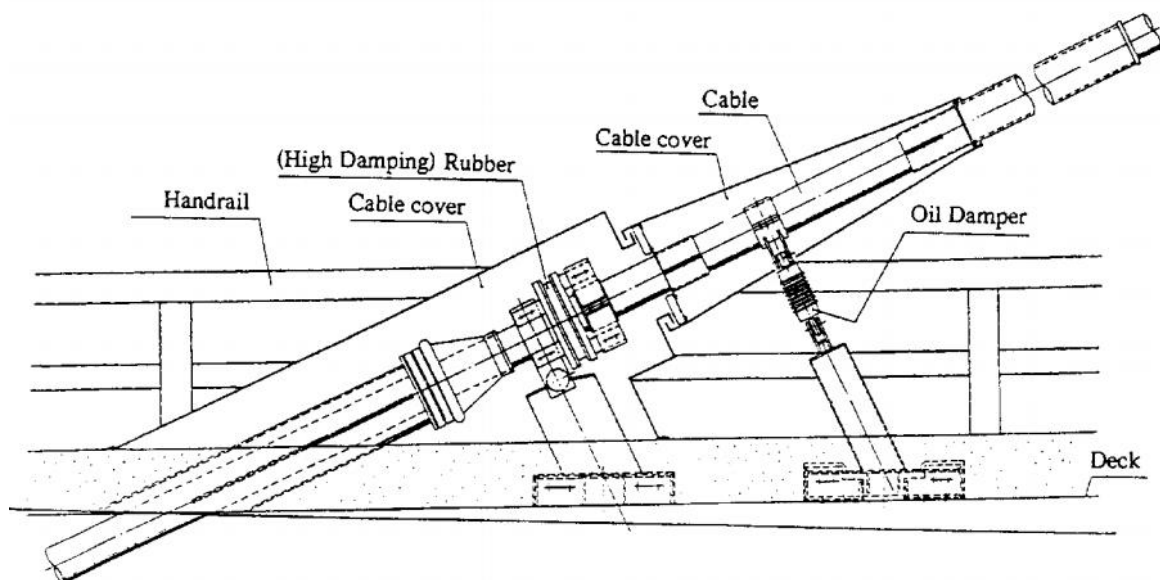


Mynd 2.16 Eiginleikar legu-demparanna í Tsurumi Tsubasa brúnni. Krafturinn sem demparinn myndar og því orkueyðingin er í öðru veldi af afstæðum hraða á milli brúargólfsins og turnsins. Þrýstilokan (e. pressure control valve) stjórnar hámarks kraftinum sem legu-demparinn getur myndað (Enomoto o.fl., 1995).

Í þverátt er brúargólfinu haldið föstu við turnana og færslur brúargólfsins á milli turnanna er takmarkað af stífu kassapversniði brúargólfsins ásamt fjórum láréttum köplum í brúargólfinu sem takmarka hreyfingu þess í þveráttina.

Hefðbundinn legubúnaður styður brúargólfið í lóðrétta stefnu við turnana en annars hangir brúargólfið í köplunum. Brúargólfið er stutt til endana af endastöplum en vegna þess að brúargólfið er stutt lengst af með köplum er nánast engin eiginþyngd sem hvílir á endastöplunum. Til að tryggja að legubúnaðurinn á endastöplunum sé stöðugt í þrýstingi var um 250 m³ af steypu dælt inn í kassapversnið brúargólfsins við endana. Annars var talin hætt á að togkraftar gætu myndast við endastöplana sem gæti skemmt legubúnaðinn, sérstaklega ef notálag myndi sveifla álaginu stöðugt frá þrýstikrafti yfir í togkraft (Enomoto, o.fl, 1995).

Við smíði brúarinnar var tekið eftir vindhvirflamyndun (e. vortex shedding) og vindörvuðum sveiflum (e. wind induced vibration). Til að koma í veg fyrir mögnun (e. resonance) þá var olíudempara og gúmmíeinöngurur komið fyrir við festingar kaplanna við brúargólfið, sjá mynd 019. Olíudemparinn og gúmmíeinangrarnir draga einnig úr titringi brúarinnar við notálag (Enomoto o.fl., 1995).



Mynd 2.17 Festingar kaplanna við brúargólfið. Háðempandi gúmmí og olíudempari koma í veg fyrir að sveiflur vegna vindálags magnist upp (Enomoto o.fl., 1995).

2.6 Samantekt

Brýrnar sem teknar voru fyrir að ofan beita allar mismunandi aðferðum við nálgun sama verkefnis, hvernig best sé að verja stagbrýr fyrir jarðskjálftum. Brýrnar hafa allar ólíka eiginleika og hönnunarjarðskjálftaálag sem gæti rökstutt mismunandi lausnir en lausnirnar eru eins ólíkar og brýrnar eru margar. Tafla 2.2 tekur saman hvernig tengingin á milli brúargólfs og turna er háttáð og helstu kennileiti hvernar brúar. Tafla 2.3 tekur saman hvernig tengingu brúargólfs við endastöpla hvernar brúar. Í töflunum er einnig fjallað um viðbótar jarðskjálftabúnað á brúnum.

Tafla 2.2 Samantekt á jarðskjálftavörnum og tengingum á milli brúargólfs og turna.

| Brú | Lengsta haflengd [m] | Turnform | Tegund kapalplana | Tenging á milli brúargólfs og turna | | | Aðrar jarðskjálftavarnir | Grundun - jarðvegur |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|--|
| | | | | Langgátt (X) | Þverátt (Y) | Lóðrétt (Z) | | |
| Rion- Antirion | 550 | Fjórar skáhallandi súlur | Kantar, breyttur blævængur | Laus | Fórnarbiti og VD ¹ | Laus | Flotliður getur myndast í grundun brúarinnar, legubúnaður á aðliggjandi brú | Súlur – sandjarðlög styrkt með staurum |
| Shiphaw | 137,5 (275) ² | Tveir ferhyrntir | Kantar, blævængur - beinir | Stíf | Stíf | Stíf | Turnum leyft að snúast um lóðréttan ás | Klöpp |
| Sutong | 1088 | Öfugt Y | Kantar breyttur blævængur | VD ¹ og viðnámslegur | Stíf | Stíf, hvílir á viðnámslegum | Legur og VD í aðliggjandi brú | Stauraundirstaða |
| Ji-Lu | 120 (240) ² | Stakur ferhyrntur | Miðja breyttur blævængur | Stíf | Stíf | Stíf | - | súlufótur |
| Tsurumi Tsubasa | 510 | Öfugt Y | Miðja breyttur blævængur | Dempari, hringlega ³ | Stíf | Stíf | Demparar í stögum ⁴ | - |

¹ VD: vökvaþrýstidempingar (e. viscous fluid dampers)

² Brúin er stakur turn og því samanburðarhæf haflengdir innan sviga

³ Demparinn breytir færslu í langgátt brúarinnar í snúning í legunni sem er orkueyðandi (e. vane damper)

⁴ Stögin eru bæði með hádempanði gúmmýi og olíu dempara við brúargólf, hugsað sem vindvörn en hjálpar einnig við dempun færslna í langgátt.

Tafla 2.3 Samantekt á frágangi á milli brúargólfs og endastöpla

| Brú | Lengsta haflengd [m] | Turnform | Tegund kapalplana | Tenging á milli brúargólfs og endastöpla | | | Aðrar jarðskjálftavarnir við endastöpla | Burðavirki brúargólfsins |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|--|-------------------------------|----------------------------|--|------------------------------------|
| | | | | Langgátt (X) | Þverátt (Y) | Lóðrétt (Z) | | |
| Rion-Antirion | 550 | Fjórar skáhallandi súlur | Kantar, breyttur blævængur | Færsluraufar | Fórnarbiti og VD ¹ | Stuðningur og haldið niðri | Gúmmílegur og VD ¹ á aðliggjandi brú í bæði langgátt og þverátt | I laga stálbitar í lang og þverátt |
| Shiphaw | 137,5 (275) ² | Tveir ferhyrntir | Kantar, blævængur - beinir | Legubúnaður | Stíf | Stuðningur og haldið niðri | | Stálbitar úr kassaþversniðum |
| Sutong | 1088 | Öfugt Y | Kantar breyttur blævængur | Legubúnaður og VD | Stíf | Stuðningur | Einangrarar og VD í aðliggjandi brú | Stálbox (e. box girder) |
| Ji-Lu | 120 (240) ² | Stakur ferhyrntur | Miðja breyttur blævængur | Legubúnaður | Skerlás – stíf tenging | Stuðningur | | Steypt box (e. box girder) |
| Tsurumi Tsubasa | 510 | Öfugt Y | Miðja breyttur blævængur | Legubúnaður | Stíf tenging | Stuðningur | Þyngd bætt við í brúargólfið til enda til að koma í veg fyrir lyftikrafta yfir endastöplum | Stálbox (e. box girder) |

¹ VD: vökvaþrýstidemparar (e. viscous fluid dampers)

Tvær af brúnum fimm sem fjallað var um hafa skemmst í jarðskjálftum og báðar þeirra nýta engan eiginlegan jarðskjálftavarnabúnað. Brýrnar eru báðar með stífar tengingar við turnfætur og frekar stífa tengingu við endastöpla sem leyfa þó hreyfingar í langátt brúarinnar. Rannsóknir Martínez-Rodrigo og Filiatrault (2015) á Shipshaw brúnni benti til að brúin hefði staðist jarðskjálftann ef hún hefði verið útbúin einhverjum eiginlegum jarðskjálftabúnaði en hinsvegar bentu rannsóknir Chadwell, Fenves og Mahin (2003) á Ji-Lu brúnni að stífari tenging í lóðréttastefnu á milli brúargólfsins og endastöpla hefði dugað til að koma í veg fyrir mestu skemmdirnar.

Brýrnar þrjár sem hafa staðið af sér stóra skjálfta án þess að skemmast eða eru óreyndar hafa allar tvöfalt jarðskjálftakerfi eftir því hvort brúin sé í notmarkaástandi eða undir hönnunarjarðskjálftaálagi. Jarðskjálftabúnaðurinn er því óvirkur eða stífur í notmarkaástandi en virkar sem dempari þegar á reynir.

Rion-Antirion brúin notar fórnarbita í þverátt brúarinnar sem er ætlað að skemmast við hönnunarjarðskjálftaálag og vökvadempapar taka við og stjórna eiginleikum brúarinnar við hönnunarjarðskjálfta. Sutong brúin nýtir vökvadempara í langátt brúarinnar sem eru óvirkir í notálagi en verða virkir við miklar hreyfingar. Vökvadempararnir takmarka enn fremur færslu brúargólfsins við 750 mm, við þá færslu læsast dempararnir og hindra frekari hreyfingu. Tsurumi Tsubasa brúin nýtir legudempara í langátt brúarinnar sem veita lítla stífni við notmarkaástand en dempahreyfingu brúargólfsins við miklar hreyfingar. Legudempararnir eru enn fremur með þrýstilokur og því geta dempararnir ekki farið yfir ákveðinn hámarks kraft.

Við endastöpla leyfa allar brýrnar færslur brúargólfsins í langáttina með færsluraufum eða legubúnaði. Allar brýrnar hafa líka stífar tengingar í þveráttina við endastöpla í notmarkaástandi en aðeins Rion-Antirion brúin notar fórnarbita sem er ætlað að gefa sig í jarðskjálfta og vökvaþrýstidempapar taka við og stýra hegðun brúargólfsins við endastöpla. Í lóðréttu stefnu er misjafnt hvort aðeins sé stutt undir brúargólfið við endastöpla eða hvort því sé einnig haldið niðri.

Af dæmunum að ofan má því álykta að engin ein rétt leið sé í jarðskjálftavörnum á stagbrúm en reynst hafi vel að nýta tvöfalt eða þrefalt kerfi, eitt fyrir notmarkaástand og annað fyrir jarðskjálftaálag og jafnvel þriðja kerfið við öfuga hamförum, læsingu dempara eða þak á hámarks dempunarkraft.

3 Brú á Ölfusá við Efri Laugardælaeyju

Núverandi brú yfir Ölfusá við Selfoss er orðin rúmlega 70 ára gömul og tæring er komin í burðarvirki hennar. Hún annar vart þeirri umferð sem fer yfir brúna og hún var heldur ekki hönnuð fyrir það umferðarálag sem hún þarf að þola í dag (Bjarnason, 2014). Því eru hugmyndir um að byggja nýja brú yfir Ölfusá í stað þess að fara í kostnaðarsamar viðgerðir. Nýja brúin myndi léttu umferðarálagið á núverandi brú ásamt því að færa Hringveginn út fyrir Selfoss. Nokkrar rannsóknir hafa verið gerðar á fyrirhugaðri brú, bæði varðandi lögum og burðarvirki ásamt staðsetningarvali og jarðvegsskilyrðum. Hér verður fjallað um þær rannsóknir og þá vinnu sem hefur verið gerð í hönnun brúarinnar ásamt því að gera grein fyrir jarðvegsskilyrðum og jarðskjálftavirkni á svæðinu.

3.1 Aðdragandi nýrrar brúar yfir Ölfusá

Samkvæmt Samgönguáætluninni fyrir árin 2011 til 2022 þá stóð til að færa veginn út fyrir Selfoss og hefja framkvæmdir á nýrri brú yfir Ölfusá árið 2018 og að þeim yrði lokið fyrir árið 2022 (Samgönguráð, 2012). Í kjölfarið átti svo að breikka veginn á milli Hveragerðis og Selfoss í 2+1 veg. Hinsvegar í tillögu Alþingis fyrir samgönguáætlun fyrir árin 2015-2026 kemur fram að búið sé að seinka smíði brúarinnar til tímabilsins 2023-2026 (Þingskjal 1706, 2015-2016, 3. gr.). Í nýjustu samgönguáætluninni fyrir árin 2019-2033 er búið að seinka brúnni enn frekar. Í samgönguáætluninni er gert ráð fyrir að brúin verði byggð á öðru tímabili, eða á árunum 2024-2028 en þó eigi að nýta 50 milljónir króna í hönnun brúarinnar á árunum 2019-2023 (Þingskjal 174, 2018-2019, 4.gr.)

Verkfræðistofan Efla vann frumdrög af forhönnun fyrir brúna árið 2010 (Óskarsson, 2016). Í frumdrögunum voru tvö mismunandi brúarstæði skoðuð, um Efri Laugardælaeyju og um 400 m norðar. Á mynd 004 má sjá brúarstæðið um Efri Laugardælaeyju og hvernig Suðurlandsvegur yrði færður. Kosturinn við þetta brúarstæði er nýting eyjunnar sem undirstöðu fyrir brúna. Haf lengdirnar yrðu þá styttri en brúin í heild sinni lengri en ef nýðra brúarstæðið yrði valið. Árfarvegurinn við nýðra brúarstæðið er hinsvegar þrengri og þá yrði brúin styttri en með eitt lengra haf. Á hvoru brúarstæði voru skoðaðar tvær brúargerðir, stagbrú og bogabré. Engin niðurstaða er birt í skýrslunni um hvort sé talið ákjósanlegra, en samanburður á valmöguleikunum og kostnaði þeirra er birtur.



Mynd 3.1 Fyrirhugað brúarstæði um Efri Laugardælaeyju og veglína eftir breytingar á Suðurlandsveginum. (Óskarsson, 2016)

Ólína Kristín Sigurgeirsdóttir (2010) gerði meistara verkefni um hönnunarferli stagbrúa og tók fyrir brú yfir Ölfusána sem rannsóknartilfelli. Í verkefninu var hugmyndin að byggja brúna á efri staðnum og hafa tvo turna í stagbrúnni á sitthvorum árbakkanum. Í verkefninu fjallar hún um hönnunarferlið, áskoranir og eiginleika stagbrúa. Rannsóknin hjá henni gengur út á að skoða þversniðsstærðir í brúnni og áhrif varanlegra mismunafærslna á árbökkum í jarðskjálfta á brúna.

Árið 2016 vann Verkfræðistofan Efla (Óskarsson, 2016) greinargerð um forhönnun á brúnni. Í greinargerðinni kemur fram að búið sé að ákveða staðsetningu og tegund brúarinnar síðan frumdröggin voru unnin. Brúin verði staðsett í Efri Laugardælaeyju, um 1 km norðar en núverandi brú og stagbrú varð fyrir valinu með einum eða tveimur samstæðum turnum í Efri Laugardælaeyju. Í greinargerðinni skoðar Efla fjórar mismunandi gerðir af turnum og fjórar mismunandi breiddir á brúnni eftir fjölda akreina. Greinargerðin miðar að því að meta hagkvæmni mismunandi turnforma og kostnaðarmeta mismunandi breiddir brúargólfsins en engin ákvörðun er tekin um endanlegt form.

Í greinargerðinni er sömuleiðis farið í að hanna þversniðsstærðir út frá Evrópustöðlum og íslenskum þjóðaviðaukum. Gert er ráð fyrir notkun jarðskjálftavarna og eru hröðunarróf (e. response spectra) notuð við hönnunina. Greinargerðin nefnir notkun fórnarelementa líkt og Rion Antirion brúin gerir sem möguleika. Útreikningar og hönnun á brúnni var gerð með einingarlíkani (e. The Finite Element Model) í forritinu CSI Bridge (Computers and structures, V16.02).

Hönnunin á brúnni er því langt komin og hugmyndir um þversniðsstærðir á turni, köplum og brúargólfi liggja fyrir. Hinsvegar er eftir að ákvarða fjölda og form turna, útfærslu á

jarðskjálftadempurum ásamt deilihönnun brúarinnar. Stöðuleiki brúarinnar ákvarðast töluvert af formi og fjölda turnanna. Í minnisblaði Eflu frá árinu 2017 (Óskarsson, 2017) um hönnun brúarinnar var ákveðið að skoða möguleg stálþversnið í öfugu Y-laga turnformi. Einnig var farið í að skoða ferhyrnt þversnið sem væri snúið um 45 gráður.

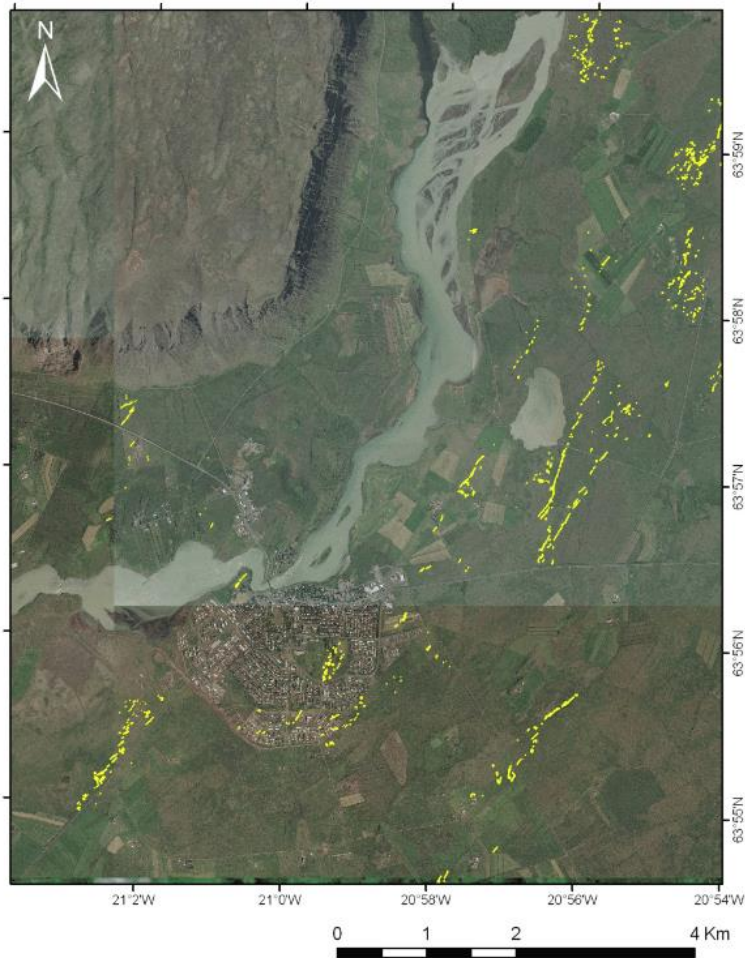
Til að takmarka þetta meistaraverkefni var ákveðið að styðjast við eitt turnform og eitt efnisval. Stakur turn með ferhyrndu stálþversniði í Efri-Laugardælaeyju með öfugt Y-laga turnform var fyrir valinu. Öfugt Y-laga turn virðist vera algengur valkostur í stagbrúm erlendis til að auka stífleika turnsins í þveráttina og minnka þversnið brúargólfsins. Einnig var ákveðið að skoða brúna af stærstu gerð, það er brúargólf með tveimur akreinum í hvora átt ásamt útkragandi göngubrú.

3.2 Þverbrotabelti Suðurlands

Brúin er staðsett á virku jarðskjálftasvæði sem kallast þverbrotabelti Suðurlands (e. South Icelandic Seismic Zone, SISZ). Sögu jarðskjálfta á þverbrotabelti Suðurlands er hægt að rekja aftur til elleftu aldar. Einkenni þverbrotabeltisins eru lotur af stórum jarðskjálftum sem byrja austarlega og færast til vestur með endurkomutíma lotnanna um 100 ár (Einarsson, 2008). Jarðskjálftalotan sem hófst með Suðurlandsskjálftanum árið 2000 er líklega ekki lokið samkvæmt Decriem ofl. (2010), þar sem uppsafnaða streituorkan hefur ekki losnað öll úr læðingi enn sem komið er.

Stóru jarðskjálftarnir þrír á þverbrotabelti Suðurlands árin 2000 og 2008 voru allir á bilinu 6,3 – 6,5 á vægisskalanum. Jarðskjálftarnir ollu engum dauðsföllum eða alvarlega slysum en hinsvegar skemmdust hátt í þriðjungur bygginga á svæðinu og leiðslur í jörðu (Bessason og Bjarnason, 2016). Skemmdirnar fóru hratt minnkandi með fjarlægð og mestu skemmdirnar voru á gömlum húsum (byggð fyrir árið 1980) eða hlöðnum húsum.

Rannsóknir og kortlagning á jarðskjálftasprungum á Suðurlandi hófust árið 1978 með vinnu Páls Einarssonar og Jóns Eiríkssonar (Imslund, 2013). Þessi vinna hefur staðið yfir síðan þá með einhverjum hléum og alltaf bæst við nýjar upplýsingar og uppgötvanir. Í bókinni Náttúruva á Íslandi (Sólnes, Sigmundsson og Bessason, 2003) má finna nokkur sprungukort af mismunandi svæðum á Suðurlandi. Í tengslum við fyrirhugaða brú yfir Ölfusá var Páli Einarssyni falið að skoða sérstaklega öll ummerki um sprungur sem ætla má að hafi verið virkar á síðust 10.000 árum á svæðinu í kringum brúarstaðið (Einarson, 2009). Í rannsókninni kemur fram að líkindi eru á því að Ölfusáin renni í virkri sprungu. Á mynd 005 má sjá hvar ummerkin um virkar sprungur í kringum Selfoss eru að finna (Einarsson, 2009). Þar sem hætta er á því að brúin muni þvera virka sprungu þá má búast við mismunafærslum á árbökkunum sem geti verið upp á 1-2 metra og valdið varanlegri aflögun á brúnni (Einarsson, 2009).

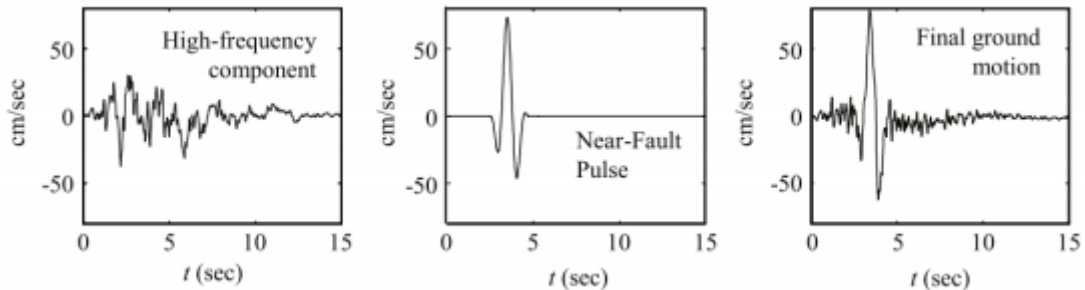


Mynd 3.2 Ummerki eftir virkar sprungur síðustu 10.000 ár eru merkt með gulum blettum á myndina (Einarsson, 2009)

Þekkingin á hegðun þverbrotabeltisins hefur aukist töluvert eftir Suðurlandsskjálftana árin 2000 og 2008 enda mældust nærsprunguáhrif í fyrsta skipti á Íslandi þökk sé mörgum hröðunarmælum sem eru staðsettir á Suðurlandi (Halldórsson, Ólafsson og Sigbjörnsson, 2007). Nærsprunguáhrifin voru mæld á 14 mismunandi mælistöðvum á svæðinu en á þeim mældust hraðapúlsar sem eru einkennandi fyrir nærsprunguáhrif. Gagnagrunnurinn frá Suðurlandsskjálftunum hefur meðal annars verið notaður í þróun líkana af nærsviðsáhrifum (Halldórsson, Mavroeidis og Papageorgiou, 2011) og við gerð á íslenski dvínunarlíkingu (e. ground motion prediction equation) sem nýtist við mat á jarðskjálftavá á byggingarsvæðum (Rupakhety og Sigbjörnsson, 2009).

Nærsprunguáhrif einkennast af lágtíðni-skúfbylgjupúls sem dreifist frá misgengi og getur haft marktæk áhrif á mannvirki nálægt upptökum (Somerville, Smith, Graves, og Abrahamson, 1997). Skúfbylgjupúlsinn sést einkum vel í hraðatímaröðum (tegruð hröðunartímaröð) og birtist þar sem háur púls með sveiflutíma um 1-2 sekúndur, sjá mynd 006. Áhrifin eru talin marktæk í innan við 20 km fjarlægð frá virkum sprungum og eru áhrifin mest á mannvirki með langa grunnsveiflutíma, t.d. háar byggingar og langar brýr (Somerville o.fl, 1997). Evrópski jarðskjálftastaðallinn segir að hanna þurfi mannvirki fyrir nærsprunguáhrifum ef þau eru staðsett innan 10 km fjarlægð frá virkri sprungu þar sem búast má við jarðskjálfta stærri en 6,5 á vægisskalanum (European Comitee for

Standardization, 2005). Staðallinn tilgreinir hinsvegar ekki hvernig eigi að taka tillit til nærsprunguáhrifanna.



Mynd 3.3 Áhrif nærsviðsáhrifa á hraðatímaraðir jarðskjálfta. Venjuleg hraðatímarað er til vinstri, í miðjunni eru áhrifin frá nærsviðsáhrifunum sýnd og til hægri er heildar hraðatímaröð jarðskjálfta með nærsviðsáhrifum (Taflanidis, 2011).

Til að meta styrk nærsviðsáhrifanna eru tvær breytur mikilvægastar fyrir hraðapúlsinn, sveifluviddin, A_p , og sveiflutíminn, T_p . Fjarlægð sprungunnar frá mælistað, ásamt stefnu milli sprungunnar sem rifnar og mælistaðarins skipta miklu máli í útslaginu og sveiflutíma hraðapúlsins. Rupakhety og Sigbjörnsson (2011) fjalla ítarlegar um hvernig megi meta styrk nærsviðsáhrifanna út frá tímaröðum og hvernig þessar breytur hafa áhrif.

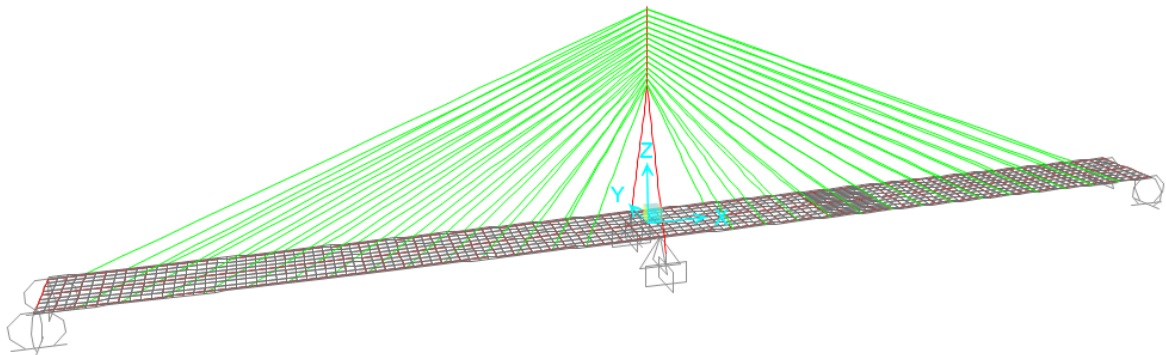
Rupakhety, Halldórsson, og Sigbjörnsson (2010) gerðu rannsókn á því hvernig meta megi varanlegar færslur sem myndast vegna nærsprunguáhrifanna út frá tímaröðum. Þeir nýta meðal annars gögn úr Suðurlandsskjálftanum árið 2008 við gerð líkansins. Rupakhety og Sigbjörnsson (2011) hafa einnig rannsakað hvort nægilegt sé að herma nærsviðsáhrifin með stökum hraðapúls sem álagi, það er án tímaraðagreiningar. Greiningin virðist væri nægilega góð fyrir minni mannvirki en fyrir löng og flóknari mannvirki þar sem hærri eigintíðnir geta verið mikilvægar er tímaraðagreining talin nauðsynleg.

Jarðvegsskilyrði við austur árbakka Ölfusár gæti einnig magnað upp jarðskjálftaálagið. Besson og Kaynia (2002) hafa greint frá mögnun á jarðskjálftaálagi við vestur stöpla Þjórsárbrúar vegna mjúkssetlags sem er að finna vestan megin við ána. Mjúka setlagið er einnig að finna við austurbakka Ölfusár og gæti því valdið sambærilegri mögnun á jarðskjálftaálagi við austurbakka Ölfusár (Minnisblað Eflu, 2008). Mjúka setlagið magnar upp jarðskjálftaálagið fyrir mannvirki með eiginsveiflutíma á bilinu 0,2-0,8 sekúndur sem er svipaður sveiflutími og búast má við að fyrirhugaða brúin yfir Ölfusánnu muni hafa. Stakur turn í Efri Laugardælaeyju er því talinn kostur til að koma annarsvegar í veg fyrir jarðskjálftamögnun út af mjúka setlaginu og hinsvegar til að losna við miklar undirstöður í árbökkunum sem geta orðið fyrir varanlegum mismunafærslum.

4 Líkangerð

Tölvutækt reiknilíkan af brúnni var fengið frá verkfræðistofunni Eflu. Efla vann forhönnun af brúnni og bjó til reiknilíkan af henni í forritinu CSIBridge V16.02. Reiknilíkanið var fært yfir í SAP2000 vegna leyfismála, en bæði forritin koma frá sama framleiðenda og eru byggð á sömu reikniaðferðarfræði. Forritin nota bæði einingaaðferðina (e. The Finite Element Method) við greiningu á svörun brúarinnar við álagi.

Í líkaninu voru bitaeiningar (e. frame elements) notaðar fyrir stálbita og turninn. Steypta platan í brúargólfinu var hermd með skeljaeiningum (e. shell elements). Brúarstögin voru hermdir sem kaplar (e. cables). Við skilgreiningu á skeljaeiningum er mikilvægt að tryggja samvirkni á milli skeljaeininganna og bitaeininganna. Allir tengipunktur bita- og plötueininga flytja bæði vægi og lárétta krafta til að tryggja samvirkni. Við skilgreiningu bita var valinn miðpunktur í efri brún (e. top center) sem tengir gólfplötuna í efri brún bitans og flytur þyngdarpunkt bitaþversniðsins neðar. Á mynd 005 má sjá líkanið af brúnni litakóðað eftir því hvaða einingar voru notaðar í líkanið. Á myndinni sést einnig að staðsetning núllpunktar hnitakerfisins í reiknilíkaninu er miðja brúargólfsins undir turninum. Langátt og þverátt brúarinnar samsvara x- og y-ásunum hnitakerfisins og z-ás er lóðrétt upp á við.



Mynd 4.1 SAP2000 reiknilíkanið af brúnni. Skeljaeiningar eru gráar, bitaeiningar rauðar og kaplar grænir. Hnitakerfi brúarinnar má einnig sjá á miðri brúnni.

Höfin á brúnni eru mislöng vegna náttúrulegrar staðsetningar eyjunnar í ánni. Haflendirnar eru 145 m vestan (vinstra) megin við turninn og 155 m austan (hægra) megin. Mismunandi haflendir valda því að eiginálæg brúarinnar veldur ósamhverfu álagi á turninn. Til að leiðrétta varanlegu vægisáraunina á turninn vegna mislöngu hafanna er gert ráð fyrir að hafa steypu plötuna þykkari á styttra hafinu. Við forhönnun brúarinnar var gert ráð fyrir að brúargólfið liggi lárétt yfir ánnu til einföldunar, þ.e. halli brúargólfsins í langátt er hunsaður. Áfram er stuðst við þá nálgun.

Við forhönnun Eflu (Óskarsson, 2015) á brúnni var brúargólfinu leyft að hreyfast í langátt við endana en með fastlegu í miðjunni. Brúnni er því leyft að taka upp hitabreytingar og

aðrar hreyfingar í langátt brúarinnar við brúarendana. Engar orkueyðandi eða einangrandi einingar voru nýttar í forhönnun á brúnni. Við skoðun á blýgúmmílegum var ólínulegum einingum (e. non-linear elements) komið fyrir í stað annarra jaðarskilyrða á brúargólfinu. Nánari umfjöllun um skilgreiningu blýgúmmíleganna má sjá í kafla 4.3.

Í verkefninu verður ekki farið út í að sýna fram á að þversniðsstærðir einstakra hluta uppfylli kröfur Evrópustaðlanna. Krítískir tímamarkar í byggingu brúarinnar þegar hún er ófullgerð voru ekki heldur skoðaðir, það er bæði fyrir utan umfang þessarar ritgerðar. Stöðugleiki brúarinnar og þversniðsstærðir gætu t.d. ráðist af hönnunarálagi þegar brúin er í byggingu og brúargólfið hefur ekki verið tengt við undirstöður. Þá ræðst geta brúargólfsins til að taka upp lárétta krafta þvert á brúargólfið af hverfitregðu þversniðs brúargólfsins um lóðréttan ás ásamt stífni kaplanna.

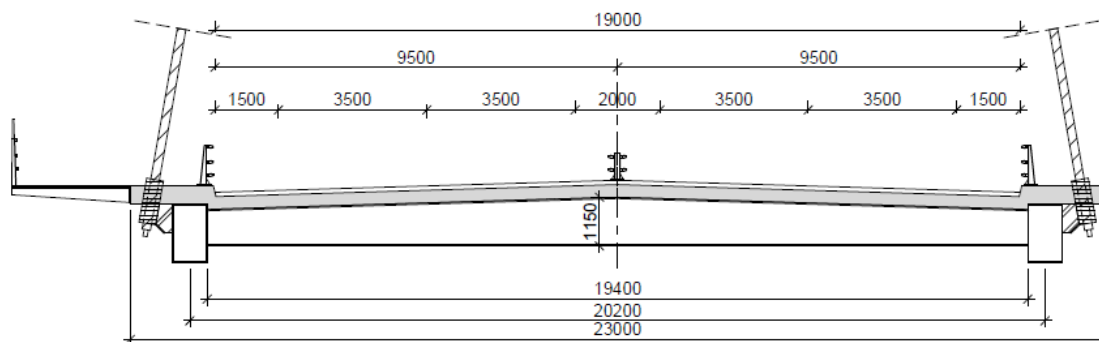
Í þessum kafla verður farið í skilgreiningar og þversniðsstærðir einstakra hluta í líkaninu. Einnig verður farið í álagið sem keyrt var á brúna og hvernig blýgúmmílegurnar voru skilgreindar í líkaninu.

4.1 Þversniðsstærðir og lögun brúar

Reiknilíkan var fengið frá Eflu verkfræðistofu, eins og hefur komið fram. Notast var við þversniðsstærðirnar í því reiknilíkani en það er sama líkan og forhönnunarskýrsla Eflu byggist á (Óskarsson, 2016). Í reiknilíkaninu spannar brúin þrjú höf, heildar haflengd brúarinnar er 315 m sem skiptist niður í 145 m haf yfir vestari kvísl Ölfusár, 155 m yfir eystri kvíslina og 15 m löngu landhafi á austurbakkanum. Landhafið er til að koma göngu- og hjólastíg undir brúna þeim megin.

Í reiknilíkaninu frá Eflu var landhafið hluti af stagbrúnni en þegar sveiflueiginleikar brúarinnar voru skoðaðir var ákveðið að í þessu verkefni yrði landhafinu sleppt til að sveiflueiginleikar brúarinnar yrði samhverfari um turninn. Gert er ráð fyrir að landhafið verði byggt sem aðskilin brú sem er slitin frá stagbrúnni sjálfri og því er landhafið ekki með inn í reiknilíkaninu.

Heildarbreidd brúarinnar í reiknilíkaninu er 20 m. Gert er ráð fyrir að brúin verði byggð sem fjögurra akreina brú með miðdeili og með þriggja metra breiðum útkragandi göngu- og hjólastíg öðru megin, sjá mynd 006. Í reiknilíkaninu er göngu- og hjólastígurinn sleppt þar sem hann er ekki nýttur sem burðarvirki. Þess í stað er tekið tillit til hans með því að bæta við viðbótar eiginþyngd og álagi.



Mynd 4.2 Pversnið brúarinnar eins og það er notað í reiknilíkaninu (Óskarsson, 2016)

4.1.1 Brúargólf

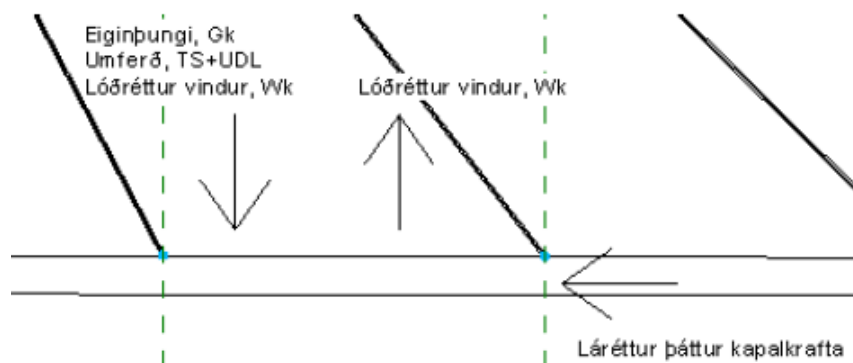
Brúargólfið er 20 m á breiddina í líkaninu og er úr samverkandi þversniði, samsett af stálbitum bæði í langátt og þverátt og steyptri plötu sem liggur ofan á flöngum bitanna. Þversnið brúargólfsins má sjá á mynd 006. Stálbitar í reiknilíkaninu eru úr S355 stáli og eru kassalaga plötubitar. Langbitarnir á jöðrunum eru með breytilega hæð, stærstir eru þeir við ásetu við turninn en minnka svo í um 30 metra fjarlægð frá turninum. Breidd og hæð bitanna má sjá í töflu 005. Í reiknilíkaninu er millibilið á milli þverbitanna 4,5 m á vesturhafinu en 4,75 m á eystra hafinu, þá eru bitarnir jafn margir sitt hvoru megin við turninn og passa við kapalfestingarnar.

Tafla 4.1 Þversniðsstærðir stálbita í reiknilíkaninu.

| Þversnið | Hæð [mm] | Breidd [mm] | Þykkt flanga [mm] | Þykkt kropps [mm] |
|--------------------|----------|-------------|-------------------|-------------------|
| Langbitar við turn | 1.540 | 800 | 70 | 30 |
| Langbitar á höfum | 1.270 | 800 | 35 | 20 |
| Þverbitar | 1.140 | 600 | 20 | 15 |
| Miðjubiti | 440 | 300 | 20 | 12 |

Í reiknilíkani Eflu er gert ráð fyrir að steypa platan verði 27 cm þykk en í reynd verður hún um 30 cm þykk á vesturhafinu til að eiginþyngd turnsins verður samhverf vegna mismunandi haflengda eins og áður hefur komið fram. Í reiknilíkaninu er þykkingunni bætt við sem viðbótarálagi og hefur hún því ekki áhrif á stífleika brúargólfsins. Í þessu verkefni var ákveðið að láta vægið um turninn verða samhverft þegar landhafið var tekið út. Til þess þurfti að auka þykkinguna á plötunni á vesturhafinu um 2 cm eða upp í 32 cm.

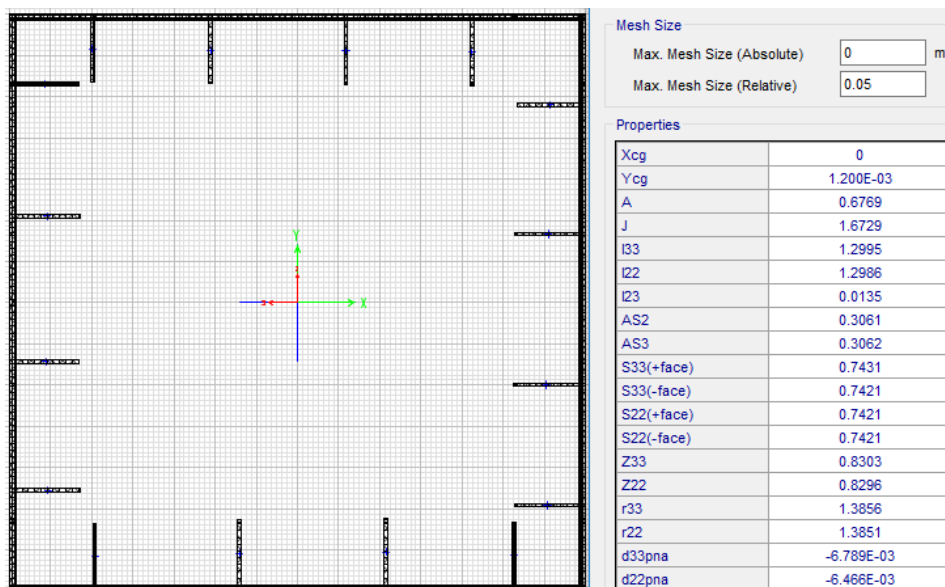
Hlutverk brúargólfsins er að bera álag frá brúargólfinu að upphengipunktum kaplanna. Kaplarnir taka á móti lóðréttum kröftum frá brúargólfinu en vegna halla kaplanna munu láréttir þrýstikraftar myndast í gólfinu, sjá mynd 007. Lárétti þrýstikrafturinn í brúargólfinu safnast upp og verður mestur við turninn. Þrýstikrafturinn er að megninu til tekinn upp í steypu plötunni og hann hefur jákvæð áhrif á vægisdreifinguna í henni við kapalfestingarnar þar sem togkraftur vill myndast í plötunni. Þar sem kapalplönin tvö tengjast kantinum á brúargólfinu þarf brúargólfið ekki að vera vindustíft. Kaplarnir hjálpa einnig til við að stífa brúargólfið af gagnvart láréttum færslum og vinduálagi.



Mynd 4.3 Láréttir kraftar myndast í brúargólfinu vegna halla kaplanna (Óskarsson, 2015)

4.1.2 Turn

Verkfræðistofan Efla hefur bæði skoðað turn úr steypu þversniði og úr stálþversniði. Massi og stífni turnsins breytist eftir því hvort efnið er valið og það hefur því áhrif á jarðskjálftasvörun brúarinnar. Í þessari greiningu er gengið út frá því að nota stálturn úr ferhyrndu þversniði með hliðarlengdir 3,5 m og úr 40 mm þykku stáli. Stálgæði S460 er notað í turninn í reiknilíkaninu. Fjórar stífur úr stálgæðum S355 verða á hverri hlið turnsins að innanverðu (verða ósýnilegar), 400 mm á lengdina og 20 mm á þykkt, sjá mynd 008. Á mynd 008 má einnig sjá helstu þversniðseiginleika þversniðsins í metrum.

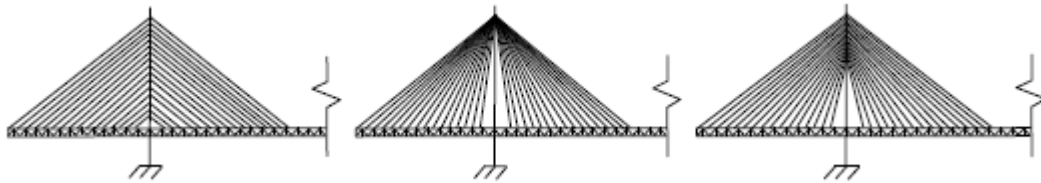


Mynd 4.4 Þversnið turnsins og eiginleikar þess. Blái krossinn er miðpunktur þversniðsins. Einingar eru í metrum.

4.1.3 Kapalkerfi

Kapalkerfið í líkaninu er svokallað breyttur blævængur (e. modified fan system). Þá tengjast kaplarnir við turninn í mismunandi hæð en með jöfnu millibili í brúargólfið, sjá mynd 009 (Casado, 2011). Í reiknilíkaninu tengjast kaplarnir með 1,5 m millibili í turninn

en með 9,0 m millibili í brúargólfið vestan megin en með 9,5 m millibili austan megin. Mismunandi millibil á milli kaplanna í brúargólfinu skýrist af mismögnum haflengdum brúarinnar en kapalpörin verða þá jafn mörg, 14 pör hvorum megin við turninn. Hornið á milli kaplanna og brúargólfsins er því breytilegt og er mest um 62° við turninn en fer niður í um 22° til endanna.



Mynd 4.5 Mismunandi form kapalkerfa í stagbrúm, frá vinstri: Hörpu-, blævængs- og breytt blævængskerfi (Casado, 2011).

Fjöldi kaplanna og þversniðsstærð brúargólfsins helst í hendur en fleiri kaplar þýðir að brúargólfið þarf að bera sig yfir styttri haflengdir og verður þar af leiðandi minna. Í forhönnun Eflu er talað um kosti þess að hafa stutt á milli kapla og meðal annars nefnt að auðveldara sé að skipta köplum út í framtíðinni þar sem hver kapall verði minni í smíðum.

Í reiknilíkaninu er gert ráð fyrir að nota kapla samsetta af samsíða vírum með 150 mm^2 þversniðsflatarmál (e. parallel strands). Kaplarnir innihalda mismarga víra eftir því hversu mikinn togkraft þeir bera. Á mynd 010 má sjá hvernig kapla er lagt til að nota í forhönnun Eflu en spíralforminu á hólkinum er ætlað að draga úr mögnun vindálagsins.



Mynd 4.6 Kaplarnir sem lagt er til að nota í forhönnun Eflu. Spíralformið á hólkinum er ætlað að draga úr titringi kaplanna vegna vindálags, Freyssinet kapalkerfi.

Fjöldi víra í hverjum kapli er annaðhvort 31 eða 37 í reiknilíkaninu, nákvæman fjöldi víra í hverjum kapli má sjá í töflu 006, talið frá turni að endum. Togkrafturinn í köplunum eykst almennt þegar halli kaplanna minnkar. Því eru notaðir sverari kaplar til endanna. Í forhönnun Eflu við ákvörðun fjölda víra var miðað við að halda nýtingu kaplanna í brotmarkarástandi að meðaltali 50-55%.

Í þessu verkefni var notaður sami fjöldi víra í hverjum kapli og í forhönnun Eflu en þar sem landhafið var tekið út úr líkaninu þurfti að endurstilla togkraftana í köplunum í

langtímaástandi til að brúargólfíð verði lárétt. Kraftana í kapalpörunum eftir að kaplarnir eru strekktir til að brúargólfíð verði lárétt í langtímaástandi má einnig sjá í töflu 006.

Tafla 4.2 Fjöldi víra í hverjum kapli í líkaninu, talið frá turni að endum ásamt kraftinum í köplunum þegar þeir eru strekktir, sem þarf til að brúargólfíð verði flatt í langtímaástandi.

| nr kapalpars | Fjöldi víra | Kraftar [kN], vestur hafi | Kraftar [kN], austur hafi |
|--------------|-------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 37 | 2872 | 2520 |
| 2 | 31 | 1135 | 1124 |
| 3 | 31 | 1928 | 1821 |
| 4 | 31 | 2041 | 1941 |
| 5 | 31 | 2223 | 2126 |
| 6 | 31 | 2390 | 2292 |
| 7 | 37 | 2564 | 2468 |
| 8 | 37 | 2724 | 2629 |
| 9 | 37 | 2879 | 2785 |
| 10 | 37 | 3028 | 2934 |
| 11 | 37 | 3175 | 3079 |
| 12 | 37 | 3289 | 3201 |
| 13 | 37 | 3739 | 3493 |
| 14 | 37 | 2971 | 3734 |

4.2 Álagsforsendur

Brúin er hönnuð samkvæmt Evrópustöðlum og íslenskum þjóðarviðaukum. Áherslan í þessari greinargerð er á jarðskjálftabúnað fyrir brúna og því er aðeins það álag sem kemur inn í álagsfléttuna sem inniheldur jarðskjálftaálag skilgreint hér auk umferðarálags, þar sem umferðarálag getur verið ráðandi fyrir hönnunina á turninum samkvæmt Óskarsson (2016). Hitaálagi er einnig sleppt til einföldunar þar sem brúnni er frjálst að hreyfast til endanna sem minnkar kraftana vegna hitaálags. Önnur álagstilfelli má sjá í Evrópustöðlum og íslenskum þjóðarviðaukum og í forhönnunarskýrslu Verkfræðistofunnar Eflu (Óskarsson, 2015).

Álagsfléttan fyrir jarðskjálftaálag samkvæmt Evrópustaðli 1990, er gefin samkvæmt jöfnu (6.12b) í grein 6.4.3.4, sjá jöfnu (5-1).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5-1)$$

Þar sem $G_{k,j}$ er varanlegt eiginálag; P er álag vegna forspennu (e. prestress action); A_{Ed} er hönnunarjarðskjálftaálag; ψ_2 er stuðull fyrir varanlegt álag hreyfilegs álags og $Q_{k,i}$ er álag

tilsvarandi hönnunarálags. Hlutstuðullinn ψ_2 er núll fyrir umferðarálag og vindálag og því verður vindálag ekki skoðað í ritgerðinni.

4.2.1 Eiginálag

Undir eiginálag brúarinnar flokkast öll þyngd sem verður varanlega á brúnni. Tafla 4.3 listar upp eðlisþyngd helstu efna í burðarvirki brúarinnar. SAP2000 reiknar út þyngd þeirra burðarhluta sem eru skilgreindir í forritinu. Hinsvegar er mikilvægt að skilgreina viðbótar eiginálag vegna lagna, vegriða o.fl. sem er ekki skilgreind í líkaninu en kemur til með að verða á brúnni. Helsta viðbótar eiginálag má sjá í töflu 008. Þar sem gangbrautin og aukna þykktin á plötunni eru ekki inn í líkaninu þá þarf að bæta því við sem viðbótarálagi. Álagstilfellið „Plata_aukning“ var aukið úr 1 kN/m^2 eins og það var í forhönnun Eflu (Óskarsson, 2016) upp í $1,65 \text{ kN/m}^2$ til þess að vægisáraunin yrði samhverf um turninn þegar landhafið var tekið út úr líkaninu.

Tafla 4.3 Eðlisþyngd efna í líkaninu

| Efni | Þyngd [kN/m^3] |
|-----------|---------------------------|
| Stál | 78,5 |
| Kapalstál | 82 |
| Steypa | 25 |
| Malbik | 20 |

Tafla 4.4 Viðbótarálag í líkaninu sem verkar sem langtíma álag á brúna.

| Nafn álags | Álag | Lýsing |
|---------------|--|---|
| Dead | - | Eiginþyngd burðarvirkis í líkaninu |
| Malbik | 2 kN/m^2 | flatarálag á brúargólf |
| Vegrið | $2 \times 2 \text{ kN/m}$, ($0,2 \text{ kN/m}^2$) | línuálag á langbita, 4 vegrið ($4 \times 1 \text{ kN}$) (jafngilt flatarálag á brúargólf) |
| Lagnir | $2 \times 2,5 \text{ kN/m}$, ($0,25 \text{ kN/m}^2$) | línuálag á langbita, (jafngilt flatarálag á brúargólf) |
| Gangbraut | 9 kN/m ($0,45 \text{ kN/m}^2$) | línuálag á langbita (jafngilt flatarálag á brúargólf) |
| Plata_aukning | $1,65 \text{ kN/m}^2$ | flatarálag á brúargólfið á vesturhafinu |

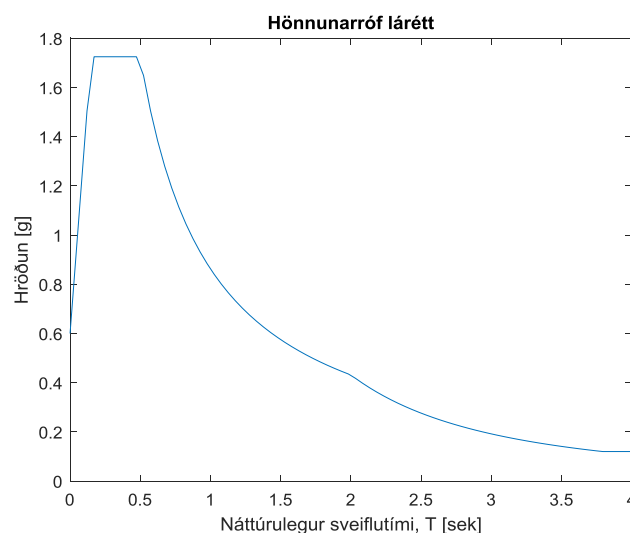
4.2.2 Jarðskjálftaálag

Samkvæmt íslenskum þjóðarviðauka fyrir Evrópustaðal 1998-1:2004 er grunnhröðun jarðskjálftarófsins $a_{gR} = 0,5 \cdot g$ fyrir brúarstæðið, þar sem g er hröðun jarðar. Íslenski þjóðarviðaukinn tekur hinsvegar ekki nægjanlega vel tillit til nærsviðsáhrifa sem mælst hafa á Íslandi. Vegna þessa var lagst í vinnu við að aðlaga hönnunarróf jarðskjálftaálags (e. design response spectra) fyrir brúna sem tekur betur tillit til nærsviðsáhrifa (Bessason, 2011). Breytingin sem Bessason lagði til að gera var hækkun á grunnildi hröðunar upp í $a_{gR} = 0,6 \cdot g$ og álagið aukið fyrir lægri eigintíðnir með því að hækka T_C upp í 0,5 eins og þjóðarviðaukinn mælir með.

Bessason fjallar einnig um hvaða mikilvægisstuðul skuli nota. Í greiningunni ber hann saman brúarluta jarðskjálftastaðalsins (EC8-2) og norska þjóðarviðauka með staðlinum. Í greiningunni mælir hann með því að nota mikilvægisstuðul sem er mitt á milli flokka II og III í brúarluta jarðskjálftastaðalsins, þ.e. $\gamma_I = 1,15$.

Þar sem stagbrýr eru með háa áslæga krafta í burðarvirkinu þá er ekki gert ráð fyrir flotliðum og orkueyðingu í brúnni (EN 1998-2:2005. Fyrir línulega hegðun í jarðskjálfta mælir staðallinn með að nota hegðunarstuðullinn (e. behavior factor) $q = 1$. Hins vegar, ef orkueyðandi búnaði er beitt, t.d. blýgúmmílegum, getur það gefið forsendu fyrir hærri hegðunarstuðli, q . Hærri hegðunar stuðull er háður getu búnaðarins til þess að formbreytast ólínulega og eyða orku, en einnig er mikilvægt að búnaður sé aðgengilegur þannig eftirlit geti farið fram. Náist að skapa forsendur fyrir hærri hegðunarstuðli er því ljóst að álag á aðra hluti brúarinnar kemur til með að lækka í hlutfalli við hegðunarstuðulinn. Þá verður alltaf einhver dempun á orkunni vegna núnings og öðru slíku, því verður stuðst við 5% dempun á öll sveifluform í reiknilíkaninu.

Svörun brúarinnar við hönnunarrófi var ekki skoðuð sérstaklega en hönnunarrófið var nýtt í samanburði við tímaraðirnar sem keyrðar voru á líkanið. Hönnunarrófið sem notað var til viðmiðunar var með grunnildi hröðunar upp á $a_{gR} = 0,6g$, jarðvegsflokk A með mikilvægisstuðul $\gamma_I = 1,15$ og hegðunarstuðul $q = 1,0$, eins og Bessason (2011) mælir með. Hönnunarrófið má sjá á mynd 011.



Mynd 4.7 Hönnunarróf jarðskjálftaálags fyrir brúarstæðið samkvæmt Evrópustaðli 1998-2:2005 en aðlagð að íslenskum aðstæðum samkvæmt Bjarna Bessasyni (2011)

Í skýrslu Páls Einarssonar (2009) kemur fram að hætta sé á að brúin þverir virkar sprungur og því hætta á að árbakkarnir færast í jarðskjálfta í sitt hvora áttina um allt að 2 m (mismunafærsla). Slíkt gerir kröfur um sveigjanleika brúarinnar og að brúin geti tekið upp færslur án þess að mynda miklar spennur. Í meistaraverkefni Ólínu Kristínu Sigurgeirsdóttur (2010) var niðurstaðan á greiningu á mismunafærslum á undirstöðum að kraftarnir voru óverulegir miðað við þegar mældar tímaraðir voru keyrðar á stagbrúna. Áhrif mismunafærslna á milli undirstaðna verður því ekki skoðað nánar í þessu verkefni.

Jarðskjálftastaðallinn ÍST EN 1998-2:2005 skilgreinir tvenns konar hönnunarskjálfta; stærri atburð sem brúin þarf að standa án þess að hrynja (e. no collapse requirement) og minni atburð sem brúin þarf að þola án skemmda (e. damage limitation requirement). Áherslan í greiningunni er að skoða svörun jarðskjálftabúnaðar við tímaraðagreiningu fyrir mældar tímaraðir á Suðurlandi. Tímaraðirnar eru keyrðar á líkanið án skölunar. Svörunarróf tímaraðanna er svo bornar saman við línulega hönnunarrófið skv. Evrópustöðlum, sem samsvarar stærri hönnunaratburðinum. Fyrir endanlega hönnun er þörf á að finna rétta skölun sem endurspeglar þessa tvo umræddu atburði.

Við val á tímaröðum var stuðst við sömu tímaraðir og Verkfræðistofan Efla notaði við forhönnun brúarinnar, tímaraðirnar má sjá í töflu 009. Í töflunni eru einnig upplýsingar um hvar tímaröðin var mæld, stærð jarðskjálftans, fjarlægð frá skjálftaupptökum að mælitæki, melda hámarkshröðun og hámarks hraða. Í viðauka A eru myndir af tímaröðunum sem sýna hröðun, hraða og færslu tímaraðanna.

Tafla 4.5 Yfirlit yfir tímaraðir notaðar í jarðskjálftagreiningunni ásamt helstu kennistærðum tímaraðanna.

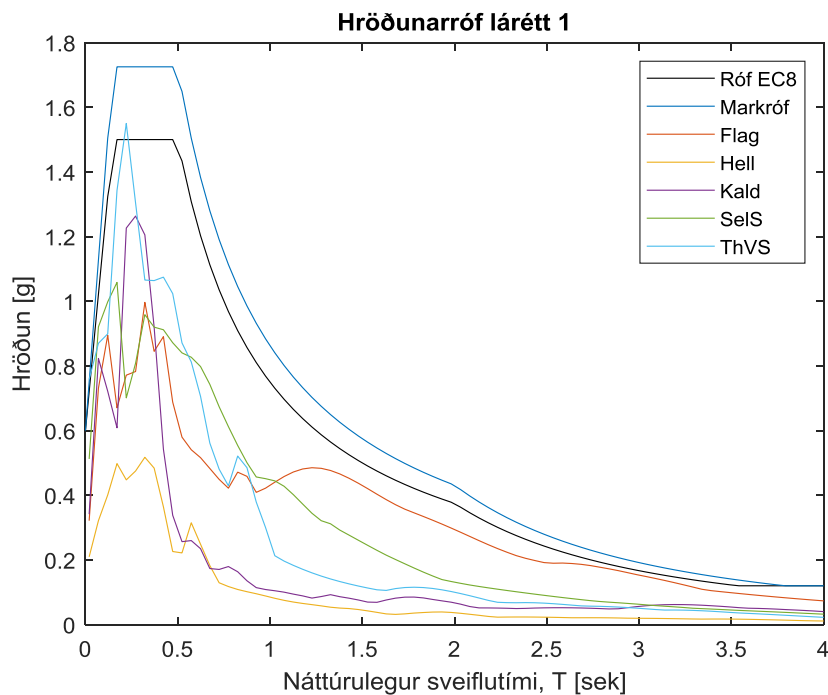
| Nafn | Staðsetning mælitækis | Stærð [Mw] | PGA [m/s ²] | PGV [m/s] | PGA/PGV [s ⁻¹] | Fjarlægð [km] |
|----------------|-----------------------|------------|-------------------------|-----------|----------------------------|---------------|
| SelS_29may2008 | Selfosspítalinn | 6,3 | 5,0 | 0,43 | 11,6 | 9 |
| Flag_17jun2000 | Flagbjarnarholt | 6,5 | 3,3 | 0,61 | 5,4 | 5 |
| Hell_17jun2000 | Hella | 6,5 | 4,7 | 0,48 | 9,8 | 15 |
| Kald_21jun2000 | Kaldárholt | 6,4 | 3,8 | 0,20 | 19,0 | 12 |
| ThVS_21jun2000 | Þjórsárbrú | 6,4 | 8,2 | 0,92 | 8,9 | 5 |

Vandasamt er að velja tímaraðir og því vert að skoða nánar tímaraðirnar sem urðu fyrir valinu. Þær þurfa að vera líkar því sem getur gerst hjá brúarstæðinu og því þurfa jarðvegsskilyrði, fjarlægð frá jarðskjálftamiðjunni og stærð jarðskjálftans að vera raunsæ. Einnig eru dæmi um að jarðskjálftamögnun eigi sér stað ef mælirinn er staðsettur í mannvirki sem magnar upp eiginsveiflutíma mannvirkisins eða staðbundin jarðvegsskilyrði magni upp ákveðnar tíðnir. Tímaraðirnar sem eru notaðar hafa allar þau einkenni að vera mældar í jarðskjálftum stærri en 6 á vægiskvarðanum, vera innan við 15 km frá jarðskjálftaupptökum og hafa berg eða stífan jarðveg á mælistaðnum.

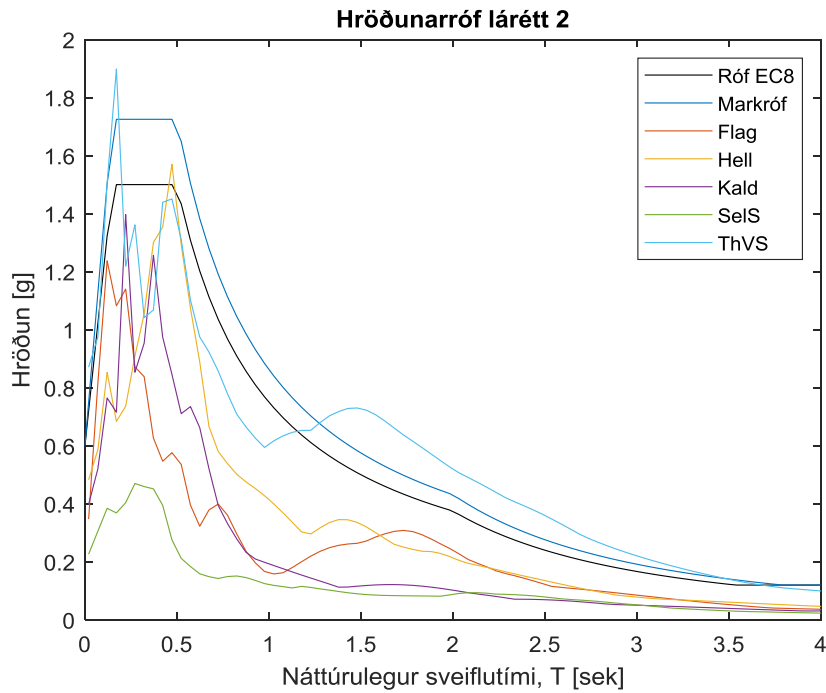
Eina tímaröðin sem uppfyllir ekki þessi skilyrði er tímaröðin sem var mæld hjá Þjórsárbrúnni en Bessason og Kaynia (2002) hafa sýnt fram á jarðskjálftamögnun hjá Þjórsárbrúnni vegna mjúks setlags sem er að finna við vestur árbakkann. Sama setlag er að finna við austurbakka Ölfusár og því hætta á samskonar mögnun við eystri árbakkann.

Hinsvegar er reynt að sneiða framhjá áhrifum mjúka setlagsins með því að hafa stakan turn á Efri Laugadælaeyju sem ber megnið af þyngd brúargólfsins. Á eystri bakka árinna væri þá legubúnaður sem styður undir brúargólfið í lóðréttu stefnu en á sama tíma einangrar brúargólfið frá láréttum hreyfingum með því að leyfa færslur í lárétta stefnu. Brúargólfið þyrfti þá ekki að taka upp alla jarðskjálftakraftana heldur myndi legubúnaðurinn hindra að kraftarnir bærust í brúargólfið.

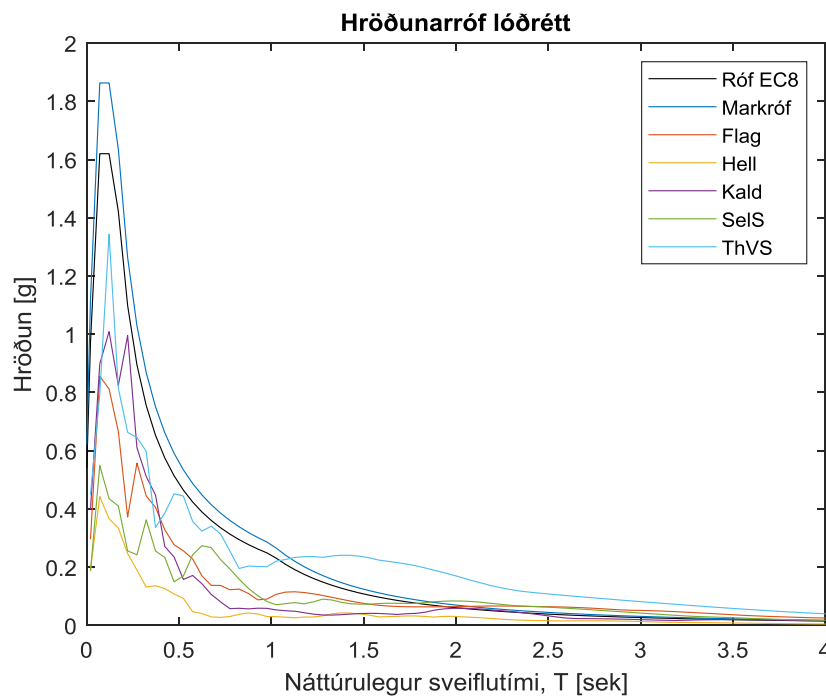
Í greiningunni voru tímaraðirnar ekki skalaðar til að passa við hönnunarrófið heldur notaðar eins og þær voru mældar. Samanburð hröðunarrófa tímaraðanna, elastíska hröðunarrófsins samkvæmt EC8-1 og markrófið eru borin saman á myndum 012 til 014. Á myndunum sést að aðeins tímaröðin sem var mæld hjá Þjórsárbrúnni fer yfir markrófið. Við fullnaðarhönnun brúarinnar þarf því að skala tímaraðirnar og/eða velja aðrar sem geta einkennt það jarðskjálftaálag sem hönnunin á að miðast við. Tölvuhermun á tímaröðum er líka eitthvað sem má skoða í þessu sambandi. Niðurstöður tímaraðagreiningarinnar í þessu verkefni gefur mikilvægar upplýsingar um jarðskjálftasvörun brúarinnar og hvernig hún hegðar sér í jarðskjálfta en ekki er hægt að hanna hana út frá þessari greiningu einni saman.



Mynd 4.8 Hröðunarróf tímaraðanna í lárétta stefnu 1, sjá töflu 009. Hröðunarróf EC8 er með grunnhröðun $a_{gR} = 0,6g$ og jarðvegsflokk A. Markrófið (hönnunarrófið) er skalað hröðunarróf EC8 með mikilvægisstuðul $\gamma_1 = 1,15$ og hegðunarstuðul $q = 1,0$



Mynd 4.9 Hröðunarróf tímaraðanna í lárétta stefnu 2, sjá töflu 009. Hröðunarróf EC8 er með grunnhröðun $a_{gR} = 0,6g$ og jarðvegsflokk A. Markrófið (hönnunarrófið) er skalað hröðunarróf EC8 með mikilvægisstuðul $\gamma_I = 1,15$ og hegðunarstuðul $q = 1,0$



Mynd 4.10 Hröðunarróf tímaraðanna í lóðrétt stefnu, sjá töflu 009. Hröðunarróf EC8 er með grunnhröðun $a_{gR} = 0,6g$ og jarðvegsflokk A. Markrófið (hönnunarrófið) er skalað hröðunarróf EC8 með mikilvægisstuðul $\gamma_I = 1,15$ og hegðunarstuðul $q = 1,0$

Tímaraðirnar voru allar skráðar með 0,01 sekúndu millibili (söfnunartíðni 100 Hz) og álagið því skilgreint með þeirri upplausn í líkaninu. Reiknilíkanið var hinsvegar látið skrifa aðeins út niðurstöður reikninganna í þriðja hverju tímaskrefi til að gera keyrslutíma reiknilíkansins viðuráðanlegan. Grunneiginsveifluform brúarinnar í upprunalega líkaninu frá Eflu var um 0,3 sekúndur í bæði langátt og þverátt og því eru útreikningarnir skrifaðir út á 1/10 af grunneigintíðninni. Það kann að vera að söfnunartíðni svörunar missi af útslögum á hærri sveifluformum einangraðra byggingarluta. Hinsvegar, þar sem áherslan er á svörun heildarmannvirkisins þá er ekki talið að þessi söfnunartíðni komi niður á niðurstöðum.

Samkvæmt greiningu Tubaldi, Mitoulis og Ahmadi (2018) þá hefur lóðrétti þáttur jarðskjálftans óveruleg áhrif á lárétta svörun blýgúmmílega fyrir plötubrýr og byggingar. Lóðrétti þáttur jarðskjálftans hefur hinsvegar marktæk áhrif á hámarks þrýsti- og togkraft sem legurnar verða fyrir. Við gerð reiknilíkansins var talin vera möguleiki á samspili togkrafta í köplunum og færslu brúargólfs og því var lóðrétti hluti tímaraðanna keyrður samtímis láréttu tímaröðunum. Þar sem áhersla verkefnisins hér er að kanna áhrif blýgúmmílega til að einangra brúna í láréttu plani þá voru blýgúmmílegurnar hafðar stífar í lóðrétta stefnu. Við frekari greiningu væri hægt að skoða hvort formbreytingar blýgúmmíleganna í lóðrétta stefnu hafi áhrif á lárétta svörun.

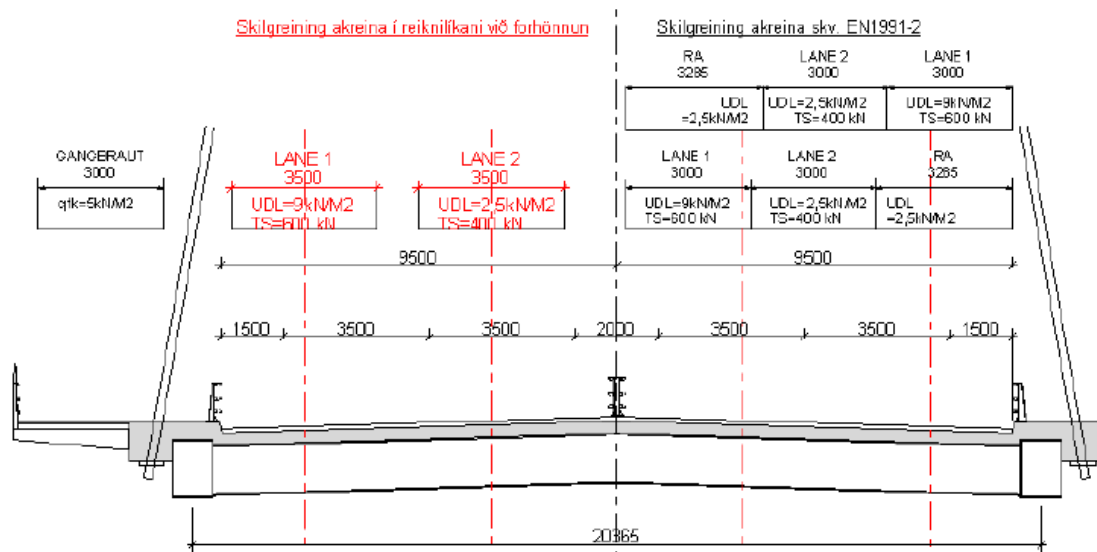
Við greiningu eiginsveifluforma stagbrúarinnar og samanburð þeirra þá var líkanið látið finna fyrstu 300 eiginsveifluform brúarinnar. Grunnsveifluform og eigintíðnir brúarinnar segir mikið til svörun hennar við jarðskjálftaálagi en þar sem líkanið reiknar svörun brúarinnar út frá hverju tímaskrefi tímaraðanna (e. direct integration) þá eru sveifluformin og eigintíðnir ekki nýtt við útreikninga tímaraðanna. Grunnsveifluform og eigintíðnir brúarinnar eru því aðeins skoðuð til að fá yfirsýn yfir sveiflueiginleika brúarinnar en ekki við frekari útreikninga á tímaröðunum.

4.2.3 Umferðarálag

Umferðarálagi er ekki fléttað saman með jarðskjálftaálagi og telst því ekki með massa þegar jarðskjálftinn verkar samkvæmt Evrópustaðli 1990. Umferðarálagið var aðeins skoðað í greiningunni í samanburði við jarðskjálftaálagið þar sem Óskarsson (2016) komst að því að umferðarálag gat verið ráðandi fyrir kraftana í turninum. Umferðarálag var ákvarðað í samræmi við álagsstaðal fyrir umferðarálag á brýr (ÍST EN 1991-2: 2003). Jafndreift álag og punktkraftur frá öxulþunga má sjá í töflu 010. Brúnni var skipt niður í 3,0 m breiðar akbrautir (e. notional lanes). Fjöldi akbrauta á brúnni eru því fjórar í líkaninu, tvær akreinar í hvora átt, sjá mynd 015.

Tafla 4.6 Öxulþungi og jafndreift álag á akreinar vegna umferðarálags

| Staðsetning | Öxulþungi Q_{lk} (kN) | Jafndreift álag q_{lk} (kN/m ²) |
|----------------|-------------------------|---|
| Akrein númer 1 | 300 | 9 |
| Akrein númer 2 | 200 | 2,5 |
| Akrein númer 3 | 100 | 2,5 |
| Aðrar akreinar | 0 | 2,5 |
| Annað svæði | 0 | 2,5 |



Mynd 4.11 Skilgreining á umferðarálagi á brúna samkvæmt EN1991-2 (Óskarsson, 2016)

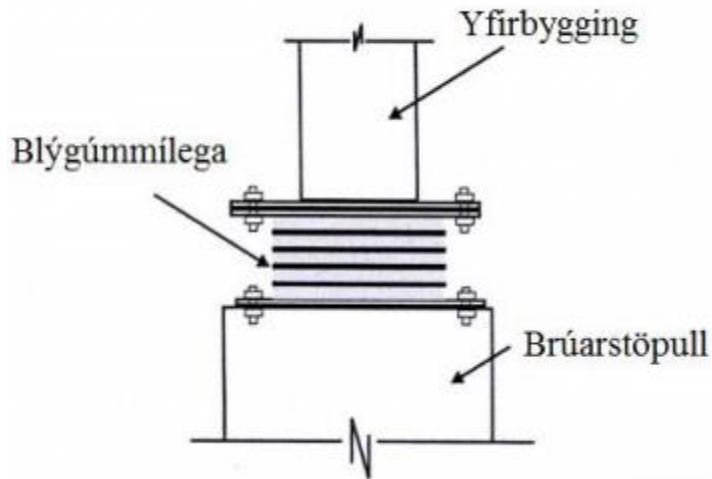
Álagið er staðsett þannig að það gefi sem óhagstæðasta áraun þegar styrkur einstakra brúarhluti er skoðaður (EN 1991-2:4.2.5). Í samanburði við jarðskjálftaálagið er aðeins jafndreifða álagið skoðað, punktkraftarnir geta verið ráðandi fyrir staka burðarhluta en jafndreifða álagið gefur stærri undirstöðukrafta og meiri formbreytingar.

Í líkaninu frá Eflu var umferðarálagið skilgreint sem hreyfanlegt flatarálag á skeljaeiningar í CSIBridge en vegna áherslu á jarðskjálftasvörun brúarinnar og til einföldunar var umferðarálaginu breytt í jafndreifft álag í SAP2000. Þrjú álagstilfelli voru skoðuð; þegar álag er á allri brúnni, þegar álag er á öðru hafinu og þegar álag er á annarri hlið brúarinnar. Fyrsta tilfellið gefur mesta lóðrétta álagið en seinni tilfellið mynda vægisáraun á turninn vegna ósamhverfu álagsins ásamt því að valda miklum áslægum krafti á turninn.

4.3 Blýgúmmilegur

Blýgúmmilegur hafa verið notaðar undanfarna áratugi til að jarðskjálftaeinangra brýr og aðrar byggingar (Christopoulos, Filiatrault og Bertero, 2006). Á Íslandi hafa þær verið notaðar í 15 brýr síðan 1983 (Jónsson, Bessason og Hafliðason, 2010). Brýrnar á Íslandi sem nýta blýgúmmilegur eru staðsettar annaðhvort á Suðurlandsjarðskjálftasvæðinu eða á Norðurlandsjarðskjálftasvæðinu (Tjörnesþverbrotabeltið) (Bessason og Hafliðason, 2004). Bessason, Hafliðason og Guðmundsson (2017) fjalla um hvernig blýgúmmilegur hafa verið notaðar í brúargerð á Íslandi og hvernig blýgúmmilegur hjálpuðu brúnum að standast Suðurlandskjálftana árið 2000.

Blýgúmmilegur þykja meðal annars ákjósanlegur kostur vegna einfaldleika í uppsetningu, sjá mynd 016 (Christopoulos og Filiatrault., 2006). Þær eru settar á milli undirstaðna og burðarhluta brúargólfsins. Hlutverk þeirra er að einangra brúargólfið frá undirstöðunum og þá sveiflast gólfið óháð undirstöðunum. Eiginsveiflutími brúargólfsins lengist þegar það er einangrað frá undirstöðum og þar sem markrófið lækkar með lengri eiginsveiflutíma þá lækkar jarðskjálftaálagið.

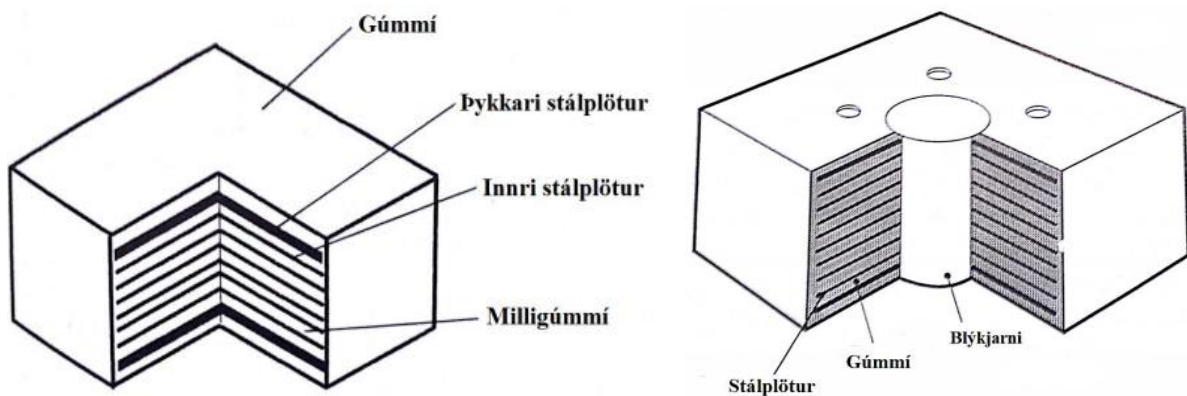


Mynd 4.12 Skematísk mynd af því hvernig hefðbundið er að koma blýgúmmílegum fyrir í mannvirki (Christopoulos og Filiatrault., 2006)

Blýgúmmílegur eru gerðar úr lagskiptum gúmmílegum með þar til gerðu gati fyrir blýkjarnann sem er svo þrýst inn í gatið. Blýkjarninn er iðulega örlítið stærri heldur en gatið í gúmmílegunni til að tryggja samvirkni á milli gúmmílegunnar og blýkjarnans (Bjarni Bessason, 1992).

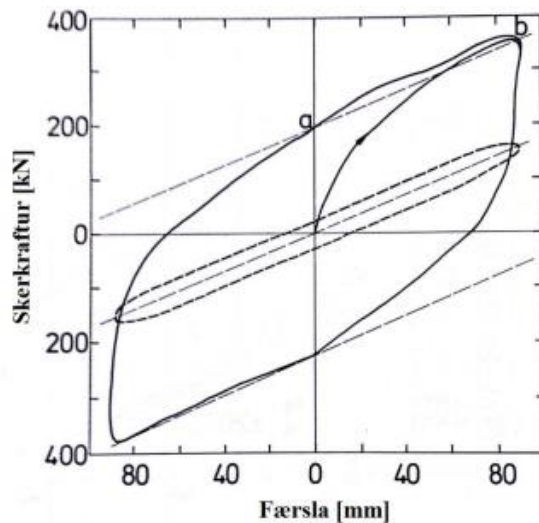
Íslenska aðferðin er hinsvegar að skera gat í lagskipta gúmmílegu og hella bráðnu blýi ofan í gatið og leyfa því að harðna. Íslenska aðferðin er því einfaldari og ódýrari en gallinn er að skerspennustuðull legunnar lækkar úr 10 MPa niður í 8 MPa, vegna minni samvirkni á milli blýkjarnans og gúmmílegunnar (Bjarni Bessason, 1992).

Blýgúmmílegur eru oftast sívalnings eða ferningslaga í laginu. Gúmmíhlutinn er lagskiptur með þunnum stálplötum og gúmmílögunum á víxl, sjá mynd 017. Tilgangur stálplátnanna er að auka stífleika legunnar þegar hún verður fyrir lóðréttu álagi (Priestley, Seible og Calvi, 1996). Blýkjarninn er hinsvegar yfirleitt sívalningslaga og þeir geta verið fleiri en einn í hverri blýgúmmílegunni ef þörf er á, dæmigerða lagskipta gúmmílegu og blýgúmmílegu má sjá á mynd 017.



Mynd 4.13 Þverskurður af ferningslaga lagskiptri gúmmílegu til vinstri (Priestley, Seible og Calvi, 1996) og þverskuður af ferningslaga blýgúmmílegu til hægri (Skinner, Robinson og McVerry, 1993)

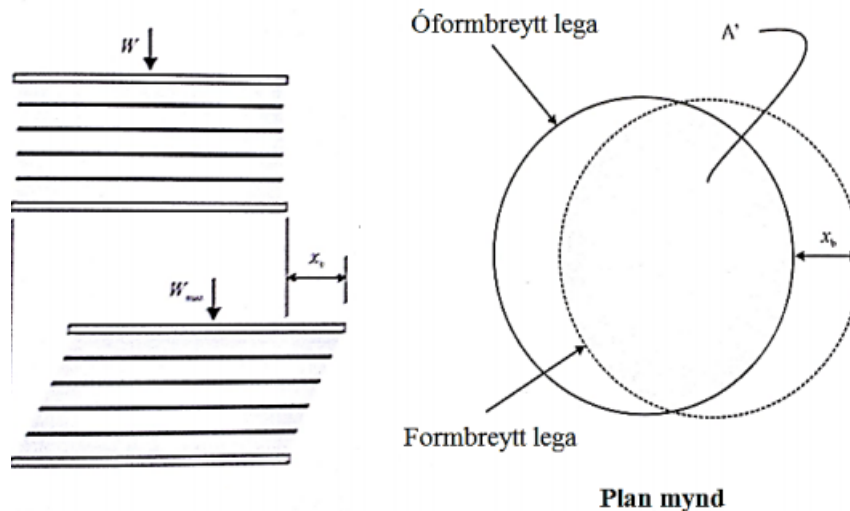
Blýgúmmílegur hafa þann kost umfram lagskiptar gúmmílegur að blýkjarninn eykur dempun legunnar með hystériskerformbreytingu blýsins. Á mynd 018 má sjá samanburð á skerstífni blýgúmmílegu og lagskiptar gúmmílegu. Á myndinni sést að upphafsstífni blýgúmmílegunnar er margfalt meiri heldur en upphafsstífni lagskiptar gúmmílegu vegna blýkjarnans en eftir að blýkjarninn er kominn á flot hafa þær sömu skerstífni. Flatarmál hystérislaufunnar er mælikvarði á orkueyðingu einingarinnar og af myndinni sést að blýgúmmílegur hafa meiri getu til orkueyðingar í jarðskjálftum heldur en lagskiptar gúmmílegur. Blýkjarninn eykur einnig stífni mannvirkisins í notmarkaástandi og dregur úr færslum gagnvart lárétu hreyfanlegu álagi eins og vindálagi. Fyrir langar brýr og sveigjanleg mannvirki geta lárétu færslurnar í notmarkaástandi orðið óhóflegar án blýkjarnans. Blý hefur einnig góða þreytueiginleika gagnvart plastískum lotum.



Mynd 4.14 Hystérislaufa fyrir blýgúmmílegu (heila línan) og hystérislaufa lagskiptar gúmmílegu (punkta línan) (Skinner o.fl., 1993)

Lykilstærðir við hönnun blýgúmmílega er lóðrétt burðargeta (e. carrying capacity), lárétt stífni og mesta mögulega færsla á milli neðri og efri brún legunnar (Christopoulos og Filiatrault, 2006). Lárétt stífni legunnar hefur áhrif á eiginsveiflutíma einangraða mannvirkisins og þar af leiðandi einnig áhrif á svörun mannvirkisins gagnvart jarðskjálftaálagi. Mesta færslan sem legan þarf að þola er fundin með reiknilíkönnum út frá hönnunarálagi mannvirkisins með gefna stífni á legunni. Mesta lóðrétt álag sem blýgúmmýlega þolir er skilgreint með jöfnu 4-1. Tryggja þarf að blýgúmmílegan sé nægilega stór til að þola lóðrétt hönnunarálag. Í jöfnu 4-1 er W_{max} mesti lóðrétti hönnunarkraftur sem blýgúmmílegan getur borið, A' er virkt flatarmál legunnar eftir lárétta formbreytingu legunnar vegna lóðréttis álags, flatarmálið er skilgreint á mynd 019, G er skerstuðull gúmmísins [0,5 til 1 MPa], S er formstuðull fyrir hvert gúmmílag og γ er leyfileg skerstreita gúmmísins.

$$W_{max} = A' \cdot G \cdot S \cdot \gamma \quad (4-1)$$



Mynd 4.15 Virkt flatarmál gúmmílegu undir lóðréttu álagi (Christopoulos og Filiatrault, 2006)

Elastíska upphafsskerstífni blýgúmmílega má reikna út frá jöfnu 4-2 (Christopoulos, Filiatrault og Bertero, 2006). Þar sem h_r er hæð gúmmísins, A_p er flatarmál blýsins, A_r er flatarmál gúmmísins, G_p er skerstuðull blýsins (um 150 MPa við stofuhita) og G_r er skerstuðull gúmmísins (0,5 til 1 MPa). Blýkjarninn og gúmmílegan hafa bæði áhrif á elatísku skerstífnina sem vex með auknu flatarmáli hvoru tveggja. Upphafsstífnin lækkar hinsvegar með aukinni hæð legunnar. Lárétta stífni blýgúmmílegunnar eftir að blýið er komið í flot má finna með jöfnu 4-3 en af jöfnunni sést að skerstífni blýgúmmílega eftir að þær eru komnar á flot er sú sama og ef um lagskipta gúmmílegu væri að ræða.

$$k_1 = \frac{1}{h_r} \cdot (G_p \cdot A_p + G_r \cdot A_r) \quad (4-2)$$

$$k_2 = k_b = G_r \cdot \frac{A_r}{h_r} \quad (4-3)$$

Hefðbundið er að flotstífni blýgúmmílegu sé 1/10 af elastískri stífni, eða $k_1 \cong 10k_2$ (Christopoulos, Filiatrault og Bertero, 2006). Sú nálgun er yfirleitt notuð við forhönnun blýgúmmílega og verður slíkt gert í þessu verkefni. Þegar endanleg blýgúmmílega hefur verið ákveðin er hún iðulega prófuð í reiknilíkani af mannvirkinu með nákvæmum eiginleikum frá framleiðanda blýgúmmílegunnar.

Flotkraftur blýgúmmílega (F_y) er metinn út frá skerkraftinum sem þarf til að láta blýkjarnann fljóta, sjá jöfnu 4-4 (Christopoulos, Filiatrault og Bertero, 2006). Þar sem τ_{py} er flotskerspenna blýs eða um 8-10 MPa eftir því hvaða aðferð er notuð við framleiðslu blýgúmmílegunnar. Fyrir venjulegar stærðir á blýgúmmílegum þá er hægt að einfalda jöfnu 4-4 yfir í jöfnu 4-5.

$$F_y = \tau_{py} \cdot A_p \cdot \left(1 + \frac{G_r \cdot A_r}{G_p \cdot A_p}\right) \quad (4-4)$$

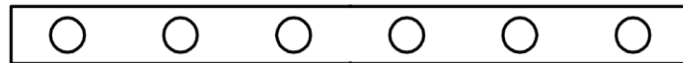
$$F_y \cong \tau_{py} \cdot A_p \quad (4-5)$$

Þegar lárétt færsla blýgúmmílega er metin er mikilvægt að meta færsluna í langátt og þverátt á sama tíma. Þar sem færslutoppar blýgúmmílegurnar í sitthvora áttina þurfa ekki að vera á sama tíma í jarðskjálfta er ekki hægt að leggja færsluna línulega saman. Einnig getur hreyfing í aðra átt mannvirkisins haft áhrif á svörun þess í þverstæða átt. Því er hætt á vanmati færslunnar ef hreyfing legunnar er aðeins skoðuð í aðra átt í einu (Jangid, 2004).

4.3.1 Hermun blýgúmmílega í SAP2000

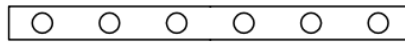
Samtals sex blýgúmmílegur voru í reiknilíkaninu, tvær undir hvorum enda brúargólfsins (undir langbitum) og tvær undir brúargólfinu við turninn. Í reiknilíkaninu höfðu blýgúmmílegurnar í endum brúargólfsins aðeins stífni í þveráttina en enga stífni í langáttina. Blýgúmmílegurnar undir brúargólfinu við turninn höfðu hins vegar stífni í bæði langáttina og þveráttina.

Ákveðið var að sleppa stífni blýgúmmíleganna í endastöplum í langáttina til að líkja eftir hegðun líkansins sem fengið var hjá Eflu sem leyfir brúargólfinu að hreyfast óhindruðu í langáttina í endastöplum. Hægt er að útfæra ólíka stífni blýgúmmíleganna í mismunandi stefnur með því að staðsetja þær ofan á skerveggi eða á öðrum búnaði sem hefur ólíka stífni í mismunandi áttir. Á mynd 020 má sjá mögulega útfærslu við endastöpla þar sem blýgúmmílegum er komið fyrir ofan á skerveggi. Þar sem stífni veggjarins í langáttina væri óveruleg miðað við þveráttina myndi það takmarka áhrif blýgúmmíleganna á langátt brúarinnar.



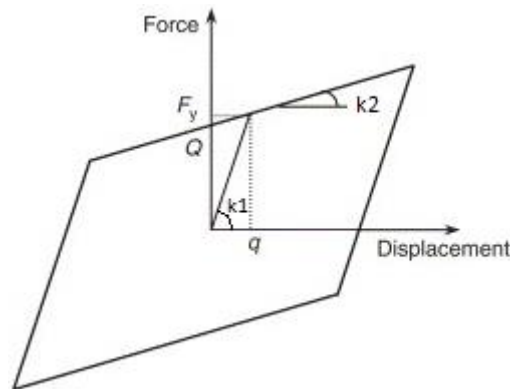
Mynd 4.16 Horft ofan á skervegg við endastöpul. Blýgúmmílegunum (hringirnir) ofan á skervegg (kassinn) sem hefur mismunandi stífni eftir stefnum.

Þar sem flestar greinar um skilgreiningu blýgúmmílega fjalla um notkun þeirra í plötubrúm og byggingum þar sem öll þyngd mannvirkisins hvílir á blýgúmmílegunum, ólíkt stagbrúm, var ákveðið að miða flotstyrk blýgúmmíleganna í langáttina undir brúargólfinu við turninn við heildarþyngd brúargólfsins. Í þveráttina var hinsvegar stuðst við undirstöðukraftana sem lárétt vindálag orsakar við skilgreiningu flotstyrk blýgúmmíleganna. Blýgúmmílegurnar undir brúargólfinu við turninn hafa því mismunandi eiginleika í langátt og þverátt. Mismunandi eiginleika blýgúmmíleganna undir brúargólfinu við turninn má útfæra með svipuðum hætti og í endastöplum, sjá mynd 021. Hægt væri að setja blýgúmmílegurnar ofan á skerveggi eða annan búnað sem hefur ólíka eiginleika í mismunandi stefnur.



Mynd 4.17 Möguleg útfærsla blýgúmmílega undir brúargólfinu við turninn. Skerveggir með blýgúmmílegum ofan á tryggja ólíka eiginleika blýgúmmíleganna í sitthvora áttina.

Við greiningu stagbrúarinnar í reiknilíkaninu voru blýgúmmílegurnar hermdar sem tvíflínulegar tengieiningar (e. bi-linear link element). Í reiknilíkaninu var notuð sú einföldun að elatíska stífni sé tíuföld plastíska stífni, þ.e. $k_1 = 10 \cdot k_2$. Á mynd 022 er sýnd hvernig hystérislaufur fyrir blýgúmmílegurnar í líkaninu líta út.



Mynd 4.18 Hystérislaufa fyrir blýgúmmílegu í reiknilíkaninu SAP2000 (Jangid, 2007).

Jangid (2007) ráðleggur að láta flotstyrk blýgúmmílega vera á bilinu 10-15% af heildarþyngd mannvirkja þegar hætta er á nærsviðsáhrifum. Í rannsókn sinni skoðaði hann bæði fimm hæða hús og einfalt undirstudda plötubrú. Af greiningunni dró hann þá ályktun að færslur blýgúmmílega vegna nærsviðsáhrifa yrðu óhóflegar ef flotstyrkurinn er hafður lægri. Ástæðan fyrir miklu færslunum rakti hann til hraðapúlsins sem einkennir nærsviðsáhrif. Hraðapúlsinn er með sveiflutíma á bilinu 1-2 sekúndur sem svipaður sveiflutími og blýgúmmílegur í mýkri kantinum. Jangid (2007) greinir einnig frá því að

aukinn stífleiki blýgúmmílegunnar dragi ekki úr skilvirkni þeirra við að einangra mannvirknið frá jarðskjálftanum, hinsvegar ef flotstyrkurinn fer yfir 15% af þyngd mannvirkisins þá er hætt við því að skilvirkni blýgúmmíleganna minnki.

Providakis (2008) fjallar um færslu vandamál blýgúmmílega gagnvart nærsviðsáhrifum. Hann ráðleggur að nýta viðbótar dempun eins og vökvadempura sem takmarkar hámarksfærslu til að blýgúmmílegurnar þurfi ekki að vera eins stórar til að ráða við færsluna. Kostnaður stórra blýgúmmílega getur verið talsvert mikill og því glatast tilgangur blýgúmmíleganna, að draga úr kostnaði mannvirkja með því að einangra þær frá jarðskjálftum. Viðbótar stífnin frá vökvadempurum eða öðrum einingum skilar hinsvegar verri svörun gagnvart fjarviðsáhrifum samkvæmt Providakis (2008). Hameed, Koo, Dai Do og Jeong (2008) skoðuðu plötubrýr með blýgúmmílegum og mæla hinsvegar með því að flotstyrkur blýgúmmílega sé á bilinu 3-10% af þyngdinni sem hvílir á blýgúmmílegunum eftir því hversu stórum hraðapúlsi megi búast við. Ennfremur mæla þeir með eigintíðni kerfisins eftir að blýgúmmílegan sé komin á flot sé á bilinu 2-3 sekúndur.

Í reiknilíkaninu var hysteríuslaufa blýgúmmíleganna undir brúargólfinu við turninn skilgreindar með flotstyrk (F_y) upp á 10% af heildarþyngd brúargólfsins í langáttina. Þyngd brúargólfsins var áætluð sem 10 kN/m^2 eða um 60.000 kN. Flotstyrkur hvorrar blýgúmmílegu í langáttina undir brúargólfinu við turninn var því skilgreind sem 3.000 kN. Í stagbrúm hangir megnið af þyngd brúargólfsins í köplunum og því var talið að flotstífnin legurnar í langáttina yrði of lítil ef aðeins yrði litið á þyngdina sem hvílir á undirstöðunni.

Í þveráttina voru blýgúmmílegurnar skilgreindar út frá hönnunarvindálagi þvert á brúna. Kraftarnir sem hönnunarvindálagið í brotmarksástandi olli í upprunalega líkaninu í undirstöðum brúarinnar var stillt sem flotstyrkur blýgúmmíleganna í þveráttina. Með því að skilgreina flotstyrk blýgúmmíleganna út frá hönnunarvindálagi er tryggt að blýgúmmílegurnar fari ekki á flot undan vindálagi. Í töflu 011 má sjá flotstyrk blýgúmmíleganna í þverátt eftir staðsetningu. Blýgúmmílega er undir hvorum langbita og því er búið að deila undirstöðukraftinum sem vindálagið veldur niður á tvær blýgúmmílegur í töflunni. Flotstyrkur blýgúmmíleganna í þveráttina undir brúargólfinu við turninn var því 44,5% af flotstyrk blýgúmmíleganna í langáttina.

Tafla 4.7 Flotstyrkur blýgúmmíleganna í þveráttina, ákvarðaður út frá vindálagi [kN]. Gildin miðast við eina legu í hverju tilviki. Á öllum stöðum eru hins vegar tvær legur.

| Vestur endi | Við turni | Austur endi |
|-------------|-----------|-------------|
| 504 | 1335 | 516 |

Við ákvörðun elastísku og plastísku stífnis blýgúmmíleganna var miðað við að 4 cm færslu þyrfti til að blýgúmmílegurnar fari á flot. Plastíska stífnin blýgúmmíleganna var skilgreind sem 1/10 af elastísku stífninni eins og áður hefur komið fram.

4.4 Jaðarskilyrði líkana

Þrenn mismunandi jaðarskilyrði voru skoðuð af brúnni; upprunalega líkanið (OR), blýgúmmílegu líkan (LRB) og þar sem brúargólfinu er óhindrað að hreyfast í láréttu plani (LAUS). Í öllum tilfellum var stíf tenging á milli brúargólfsins og undirstaðna í lóðrétta

stefnu, þ.e. í báðum endum brúargólfsins og á eyjunni (við turninn). Upphaflega líkanið var með sömu jaðarskilyrði og líkanið sem var fengið frá Eflu, það er brúargólfið var með fastlegu við turninn (bæði langátt og þverátt) en leyft að hreyfast í langátt við endastöpla. Brúargólfinu var einnig haldið föstu í þverátt við endastöpla en aðeins í öðrum langbitanum til þess að forðast að mynda innspennu.

Í lausa líkaninu er aðeins stíf tenging í lóðréttu stefnu á milli brúargólfsins og undirstaðna en brúargólfið er óhindrað að hreyfast í láréttu plani. Undirstöður mætti útfæra með gúmmílegum eða legubúnaði með lága skerstífnu. Líkanið gefur einnig vísbendingu um hvernig brúin myndi hegða sér ef kapalpörunum yrði fjölgað og brúargólfið látið hanga alveg í köplunum.

LRB líkanið inniheldur ólínulegar tengingar í stað stífra tenginga upphaflega líkansins, á samtals sex stöðum. Blýgúmmílegurnar undir brúargólfinu við turninn hafa ólínulega eiginleika í bæði langátt og þverátt en blýgúmmílegurnar í endum brúargólfsins hafa einungis ólínulega eiginleika í þverátt brúarinnar. Blýgúmmílegurnar eru staðsettar undir báðum langbitum og hafa því möguleika á að mynda hlutainnspennu. Ákveðið var að sleppa ólínulegri virkni blýgúmmíleganna í langáttina á endastöplum.

Líkönin þrjú hafa því öll mismunandi stífnu í langáttina vegna ólíkra undirstaðna. Þegar kaplarnir eru strekktir í reiknilíkönunum til að brúargólfið verði lárétt myndast láréttir kraftar í langátt brúargólfsins eins og áður hefur komið fram, sjá mynd 007 í kafla 4.1.1. Láréttu kraftarnir frá köplunum valda því mismunandi færslum á turntoppum og brúargólfinu á milli líkana. Í töflum 012 og 013 má sjá færslur turntoppsins og brúargólfsins þegar kaplarnir eru strekktir. Í töflunum sést að lausa líkanið er viðkvæmast fyrir ósamhverfum haflengdum, enda mætti líkja líkaninu við stóra rólu, það þurfi litla krafta til að koma kerfinu úr jafnvægi. Töflunar benda til þess að líkönin hegði sér eins í aðrar stefnur. Lóðrétt færsla á turntoppi er aðallega háð þyngd brúargólfsins og þ.s. kerfin eru samhverf um langátt turnsins er færslan í þveráttina ómarktæk. Brúargólfið færir ekkert í lóðréttu stefnu við turninn þar sem því er haldið föstu í öllum líkönunum.

Tafla 4.8 Færsla turntoppsins [mm] þegar kaplarnir eru strektir.

| Stefna | OR | LRB | LAUS |
|---------|--------|--------|--------|
| Langátt | 7,69 | 9,32 | 64,85 |
| Þverátt | 0,12 | 0,12 | 0,18 |
| Lóðrétt | -19,61 | -19,61 | -19,61 |

Tafla 4.9 Færsla brúargólfsins [mm] yfir blýgúmmílegum við turninn þegar kaplarnir eru strekktir.

| Stefna | OR | LRB | LAUS |
|---------|-------|-------|-------|
| Langátt | 0 | 2,6 | 288,6 |
| Þverátt | -0,02 | -0,01 | 0,03 |

Brúargólfið dregst einnig saman um 16,3 mm og 17,2 mm á vestur- og austurhafi í öllum líkönunum vegna þrýstikraftsins sem myndast í brúargólfinu. Eystra hafið er lengra og því eru elastísku formbreytingarnar meiri. Turntoppurinn lækkar einnig um tæpa 20 mm (öll líkönin) frá upphafsstöðu þegar kaplarnir eru strekktir út af elastískum formbreytingum vegna lóðréttu kraftanna.

Í töflu 014 má sjá kraftana og vægisáraunina sem verkar á turninn í langtímaástandi brúarinnar. Þótt að færslur turntoppsins séu óverulegar í langtímaástandi samkvæmt reiknilíkaninu ($L/6000$ í upphaflega líkaninu) þá eru töluverðar vægisáraunir í turnfótunum.

Tafla 4.10 Kraftar og vægi í turnfótum í langtímaástandi brúarinnar

| Líkan | Kraftar [MN] | | | Vægi [MN·m] | | |
|-------|--------------|---------|---------|-------------|-----------|--------------------|
| | Langátt | Þverátt | Lóðrétt | Um langás | Um þverás | Um lóðréttu stefnu |
| OR | 0,203 | 14,95 | 41,57 | 7,04 | 3,38 | -1,42 |
| LRB | 0,199 | 14,95 | 41,57 | 7,03 | 3,08 | -1,35 |
| LAUS | 0,001 | 14,95 | 41,57 | 6,91 | -8,27 | 1,52 |

Í töflu 015 má sjá undirstöðukraftana brúargólfsins í lóðréttu stefnu. Búið er deila kraftinum niður á báða langbitana, þannig að heildarkrafturinn í undirstöðunni er tvöföld gildin sem eru í töflunni.

Tafla 4.11 Undirstöðukraftar í brúargólfinu í lóðréttu stefnu í langtímaástandi þegar kaplarnir hafa verið strekktir í hvorum langbitanum [kN].

| Vestur endi | Við turninn | Austur endi |
|-------------|-------------|-------------|
| 630 | 3461 | 752 |

5 Niðurstöður

Í þessari greiningu er áhersla lögð á notkun blýgúmmílega en niðurstöður gefa einnig vísbendingar um mögulegan ávinning fyrir aðrar gerðir af orkueyðandi lausnum. Sveiflueiginleikar líkananna þriggja, sem eru með ólík jaðarskilyrði (OR, LRB, LAUS), eru borin saman í þessum kafla sem og lykilstæðir svörunar við mismunandi jarðskjálftatímaraðasettum. Notuð voru fimm sett af tímaröðum sem keyrðar voru í tvær meginstefnur á líkönin, þ.e. lárétta þáttum tímaraðasettanna var víxlað, og því samtals tíu álagstilfelli, sjá kafla 4.2.2 um jarðskjálftaálag. Áherslan var á svörun brúarinnar við jarðskjálftaálagi og ávinninginn við notkun blýgúmmílega við jarðskjálftavarnir, því var svörun brúarinnar við vegna vind- og umferðarálags sleppt. Svörun vegna eiginálags var hinsvegar samfléttuð við jarðskjálftasvörun. Við vinnslu niðurstaðanna voru tímaröðunum gefin auðkenni til einföldunar, sjá töflu 006.

Tafla 5.1 Tímaraðir sem voru notaðar í greiningunni og auðkenni álagstilfellis.

| Nafn | Stefna lárétta tímaraða | Auðkenni álagstilfellis |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
| SelS_29may2008 | 0° | SelS0 |
| Flag_17jun2000 | 0° | Flag0 |
| Hell_17jun2000 | 0° | Hell0 |
| Kald_21jun2000 | 0° | Kald0 |
| ThVS_21jun2000 | 0° | ThVs0 |
| SelS_29may2008 | 90° | SelS90 |
| Flag_17jun2000 | 90° | Flag90 |
| Hell_17jun2000 | 90° | Hell90 |
| Kald_21jun2000 | 90° | Kald90 |
| ThVS_21jun2000 | 90° | ThVs90 |

Byrjað var á því að skoða hvernig eiginsveifluform og eiginsveiflutími brúarinnar breytast eftir undirstöðuskilyrðum. Kraftarnir og færslurnar á turntoppinum og undirstöðum brúargólfsins voru því næst skoðuð. Að lokum var útbeygjan á brúargólfinu skoðuð, það er mismunafærslan á milli punkts á miðju hafi og yfir endastöplum. Útbeygjan á brúargólfinu virkar sem mælikvarði á hvort brúargólfið hreyfist sem ein heild (e. rigid body) og því hversu mikla jarðskjálftakrafta brúargólfið verður fyrir í jarðskjálftum.

Greining líkanana fór þannig fram að fyrst var eiginálag lagt á brúna og kaplarnir strekktir. Í framhaldi var svörun brúarinnar við tímaröðunum reiknuð. Birtar niðurstöður fyrir færslum eru leiðréttar fyrir upphafs færslum. Undirstöðukraftar innifela í sér krafta vegna langtímaálags. Upphafsfærslur turntoppsins og brúargólfsins þegar kaplarnir eru strekktir má sjá í töflum 012 og 013 í kafla 4.4.

5.1 Eiginsveifluform brúarinnar

Sveifluform brúarinnar fengust úr SAP2000 reiknilíkaninu. Forritið var látið reikna fyrstu 300 sveifluform brúarinnar og þeim var raðað eftir sveiflutíma (e. natural period). Þau sveifluform sem hafa lengsta sveiflutíma eru kölluð fyrstu sveifluformin. Virka massahlutfall hvers sveifluforms segir til um hversu mikil áhrif sveifluformið hefur á svörun brúarinnar við jarðskjálftaálagi fyrir tiltekna stefnu. Yfirleitt eru fyrstu sveifluformin með mesta virka massann en það er þó ekki algilt.

Í töflu 007 má sjá samanburð á sveiflutíma fyrsta eiginsveifluformsins í hverja stefnu fyrir hvert líkan. Af töflunni má sjá að fyrsta sveifluform brúarinnar er með nánast sama eiginsveiflutíma í lóðrétta stefnu fyrir öll þrjú reiknilíkönin. Ástæðuna má rekja til þess að líkönin eru öll með sömu undirstöðuskilyrðin fyrir þá stefnu, það eru stífar undirstöður í báðum endum og við turninn. Brúin hefur því svipaða hegðun í lóðrétta stefnu óháð líkönunum. Í lárétta plani eru sveiflutímar fyrstu eiginsveiflna ólíkir. Eins og fyrrisjäänlegt var er upphaflega líkanið með stysta eiginsveiflutímamann en lausa líkanið lengsta.

Tafla 5.2 Sveiflutími (s), fyrsta sveifluforms sem hefur yfir 5% virkan massa í hverja stefnu.

| Stefna | OR | LRB | LAUS |
|---------|------|------|-------|
| Langátt | 0,21 | 1,60 | 10,18 |
| Þverátt | 0,44 | 1,77 | 8,44 |
| Lóðrétt | 1,68 | 1,71 | 1,68 |

Töflur 008 til 010 bera saman sveiflutíma og virkan massa sveifluforma brúarinnar sem hafa yfir 5% virkan massa í einhverja stefnu í hverju líkani. Af töflunum sést að fyrsta sveifluformið er ekki endilega alltaf með mesta virka massann. Einnig sést að upprunalega líkanið er með stysta sveiflutímamann í lárétta plani en lausa líkanið lengstan. Tafla 010 bendir til þess að jarðskjálftasvörun brúarinnar í lóðrétta stefnu sé mjög sambærileg þar sem sveiflutími massa mestu sveifluformana eru með nánast sama sveiflutíma vegna sambærilegra undirstöðuskilyrða í lóðrétta stefnu. Svörun lausa líkansins í lárétta plani stjórnast nánast einungis af fyrsta sveifluforminu. Sama á við um svörun blýgúmmflegu líkansins í þverátt.

Virki massinn er alltaf kominn yfir 95% þegar fyrstu 300 sveifluformin eru notuð í reiknilíkaninu. Samkvæmt Eurocode 8 þarf yfir 90% massans að vera virkur þegar línuleg jarðskjálftasvörun mannvirkja er reiknuð. Þá er jarðskjálftasvörun metin línulega út frá sveifluformum og jarðskjálftahönnunarrófi.

Tafla 5.3 Sveiflutími sveifluforma brúarinnar í upprunalega líkaninu sem hafa yfir 5% virkan massa í einhverja stefnu.

| OR Nr. | Sveiflu- Tími [s] | Langátt | | Þverátt | | Lóðrétt | |
|-----------|----------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | Massa hlutfall | Söfnuð summa | Massa hlutfall | Söfnuð summa | Massa hlutfall | Söfnuð summa |
| - | | | | | | | |
| 2 | 1,68 | - | - | - | - | 0,45 | 0,45 |
| - | | | | | | | |
| 4 | 1,17 | - | - | - | - | 0,10 | 0,55 |
| - | | | | | | | |
| 8 | 0,86 | - | - | - | - | 0,17 | 0,73 |
| - | | | | | | | |
| 15 | 0,49 | - | - | - | - | 0,06 | 0,83 |
| - | | | | | | | |
| 17 | 0,44 | - | - | 0,15 | 0,16 | - | - |
| 18 | 0,42 | - | - | 0,55 | 0,71 | - | - |
| - | | | | | | | |
| 34 | 0,21 | 0,38 | 0,45 | - | - | - | - |
| - | | | | | | | |
| 38 | 0,19 | 0,32 | 0,78 | - | - | - | - |
| - | | | | | | | |
| 64 | 0,13 | - | - | 0,05 | 0,80 | - | - |
| - | | | | | | | |
| 84 | 0,10 | - | - | 0,12 | 0,93 | - | - |
| - | | | | | | | |
| 121 | 0,06 | 0,06 | 0,93 | - | - | - | - |
| - | | | | | | | |
| 300 | 0,03 | - | 0,97 | - | 0,99 | - | 0,98 |

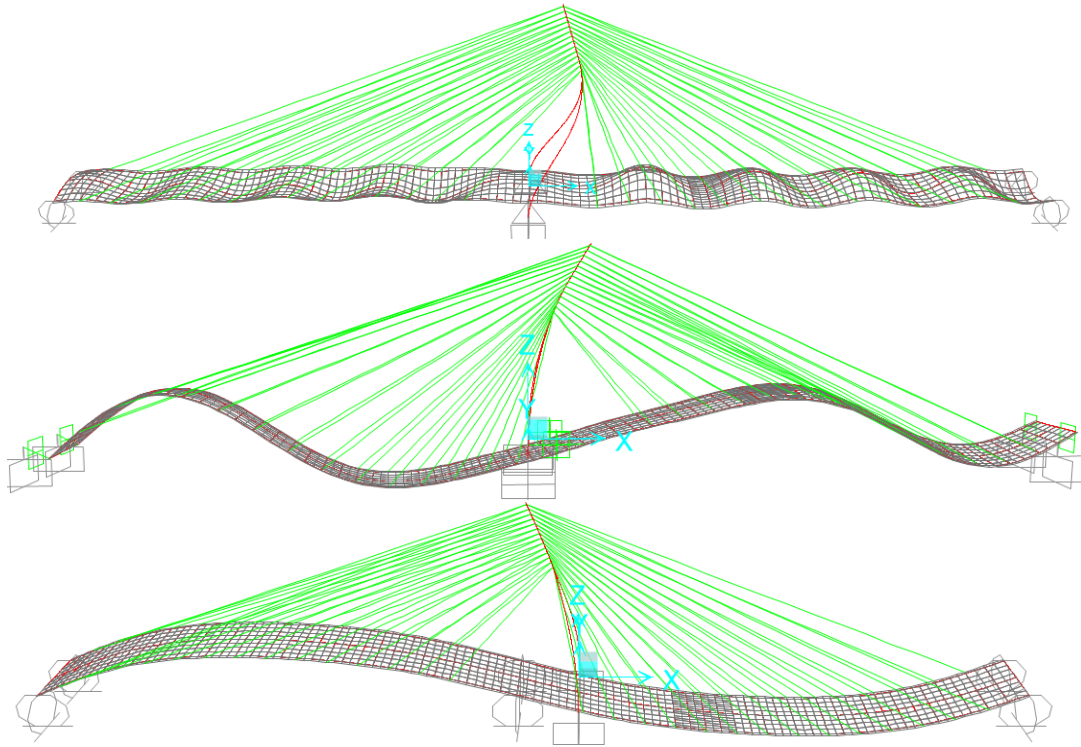
Tafla 5.4 Sveiflutími sveifluforma brúarinnar í blýgúmmílegu líkaninu sem hafa yfir 5% virkan massa í einhverja stefnu.

| LRB Nr. | Sveiflu- Tími | Langátt | | Þverátt | | Lóðrétt | |
|------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | Massa hlutfall | Söfnuð summa | Massa hlutfall | Söfnuð summa | Massa hlutfall | Söfnuð summa |
| - | | | | | | | |
| 2 | 1,77 | - | - | 0,88 | 0,88 | - | - |
| 3 | 1,71 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,89 | 0,44 | 0,44 |
| 4 | 1,60 | 0,22 | 0,23 | - | - | - | - |
| 5 | 1,59 | 0,50 | 0,74 | - | - | 0,01 | 0,45 |
| 6 | 1,33 | 0,22 | 0,96 | - | - | 0,01 | 0,46 |
| 7 | 1,19 | - | - | - | - | 0,10 | 0,55 |
| - | | | | | | | |
| 11 | 0,87 | - | - | - | - | 0,17 | 0,73 |
| - | | | | | | | |
| 20 | 0,49 | - | - | - | - | 0,06 | 0,83 |
| - | | | | | | | |
| 300 | 0,03 | - | 0,99 | - | 0,99 | - | 0,98 |

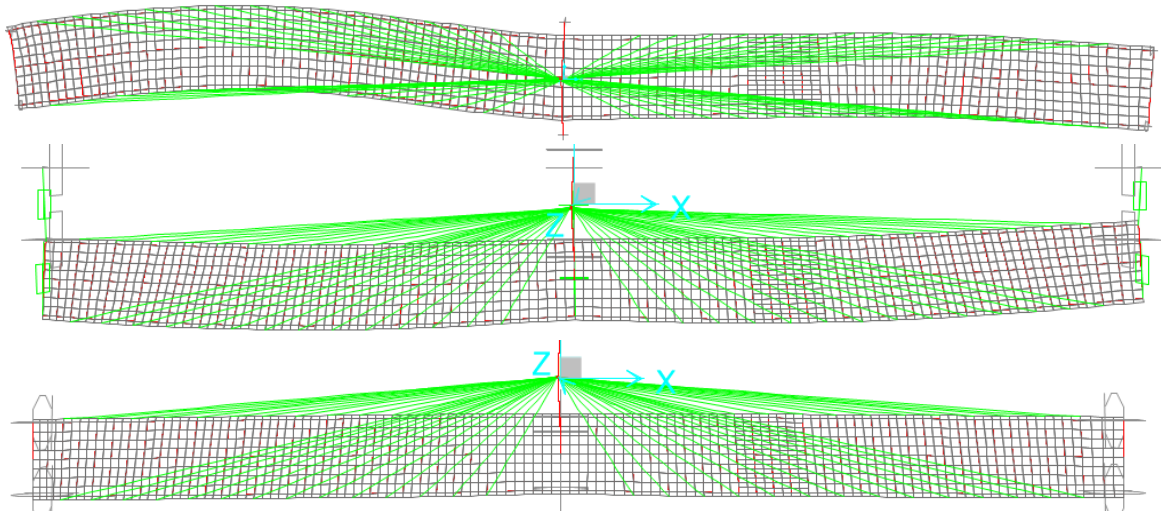
Tafla 5.5 Sveiflutími sveifluforma brúarinnar í lausa líkaninu sem hafa yfir 5% virkan massa í einhverja stefnu.

| LAUS Nr. | Sveiflu- tími | Langátt | | Þverátt | | Lóðrétt | |
|-------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | Massa hlutfall | Söfnuð summa | Massa hlutfall | Söfnuð summa | Massa hlutfall | Söfnuð summa |
| - | | | | | | | |
| 2 | 10,18 | 0,74 | 0,74 | - | - | - | - |
| 3 | 8,44 | - | - | 0,91 | 0,91 | - | - |
| 4 | 3,70 | 0,20 | 0,94 | - | - | - | - |
| 5 | 1,68 | - | - | - | - | 0,45 | 0,45 |
| - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | 1,17 | - | - | - | - | 0,10 | 0,55 |
| - | | | | | | | |
| 12 | 0,86 | - | - | - | - | 0,17 | 0,73 |
| - | | | | | | | |
| 19 | 0,49 | - | - | - | - | 0,06 | 0,83 |
| - | | | | | | | |
| 157 | 0,05 | - | - | - | - | 0,05 | 0,97 |
| - | | | | | | | |
| 300 | 0,03 | - | 0,99 | - | 0,99 | - | 0,98 |

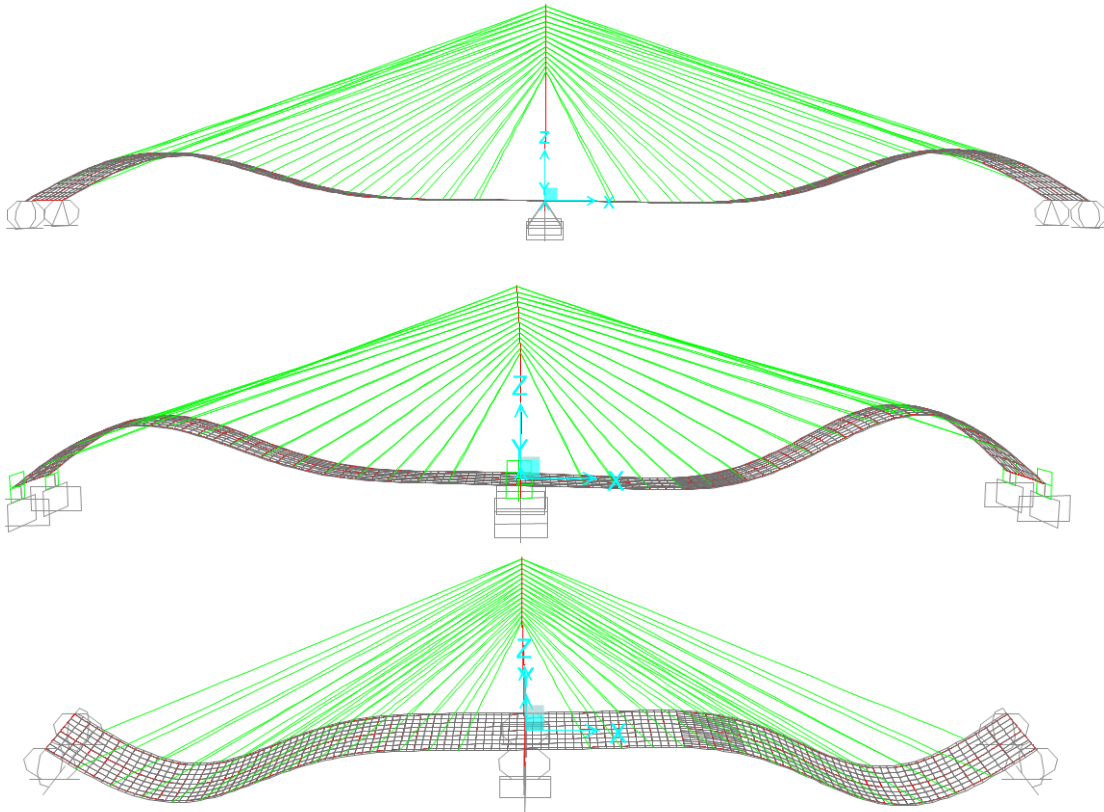
Sveiflutími sveifluformanna skiptir ekki eingöngu máli heldur skiptir lögun sveifluformanna líka máli. Myndir 006 til 008 bera saman útlit virkasta sveifluform brúarinnar í hverja stefnu eftir því hvaða undirstöðuskilyrði eru notuð. Í viðauka B eru fyrstu þrjú sveifluform hvers líkans í hverja átt birt. Á mynd 008 sést að fyrsta sveifluform brúarinnar í lóðrétta stefnu er eins óháð jaðarskilyrðum í lárétta stefnu. Á myndum B03, B06 og B09 í viðauka B sést enn frekar að fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í lóðrétta stefnu líta öll eins út. Myndirnar ásamt töflunum að ofan benda því til að jarðskjálftasvörun brúarinnar í lóðrétta stefnu sé óháð jaðarskilyrðum í lárétta stefnu.



Mynd 5.1 Sveifluformið sem hefur mesta virka massan í langátt brúarinnar eftir undirstöðuskilyrðum. Í upphaflega líkaninu (OR, efst) er brúargólfinu haldið á þremur stöðum, í báðum endum og í miðjunni. Blýgúmmílegu líkanið (LRB, miðjan) er með stuðning í miðjunni en lausa líkanið (LAUS, neðst) er alveg frjálst að hreyfast í langátt brúarinnar. Sveiflutímarnir eru 0,21 sek, 1,59 sek og 10,2 sek.



Mynd 5.2 Sveifluformið sem hefur mesta virka massan í þverátt brúarinnar eftir undirstöðuskilyrðum. Í upphaflega líkaninu (OR, efst) er brúargólfinu haldið á þremur stöðum, í báðum endum og í miðjunni. Blýgúmmílegu líkanið (LRB, miðjan) er með tvílínulega tengingu í þverátt í stað stífra tenginga upprunalega líkansins. Lausa líkanið (LAUS, neðst) er alveg frjálst að hreyfast í þverátt brúarinnar. Sveiflutímarnir eru 0,42 sek, 1,77 sek og 8,44 sek.



Mynd 5.3 Sveifluform brúarinnar í lóðrétta stefnu brúarinnar sem hefur mesta virka massann eftir undirstöðuskilyrðum. Líkönin eru öll með stífar undirstöður í lóðrétta stefnu í báðum endum brúarinnar og fyrir miðju brúarinnar. Sveiflutímarnir eru 1,68 sek, 1,71 sek og 1,68 sek.

5.2 Jarðskjálftasvörun turnsins

Til að bera saman álagið sem turninn verður fyrir vegna tímaráðasettanna eftir því hvernig undirstöðuskilyrði eru notuð þá var ákveðið að bera saman hámarks kraftana í turnfótunum, hámarks færsluna á turntöppinum og gröf af því hvernig turntöppurinn hreyfist þegar jarðskjálftaálagið verkar á turninn.

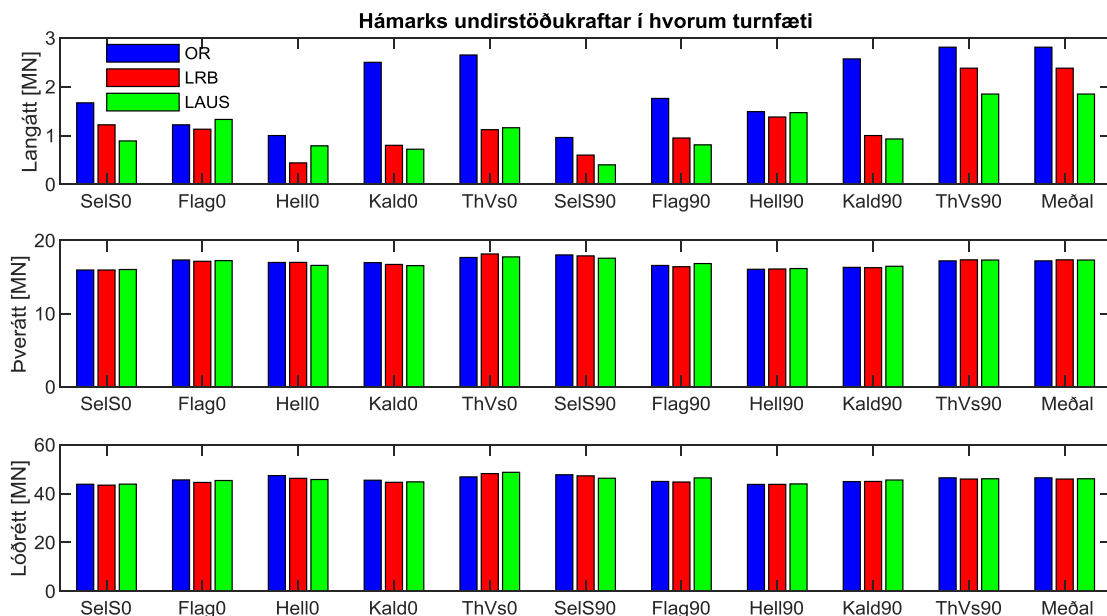
5.2.1 Hámarkskraftar

Þar sem turninn er innspenntur í reiknilíkönunum mætti líta á hann sem útkragandi bita og þá ættu kraftarnir og vægisáraunin að vera stærst í undirstöðum turnsins. Hinsvegar getur kraftadreifingin verið óregluleg þar sem kaplarnir tengjast í turninn og styðja við hann eða auka álagið. Kraftadreifing innan turnsins var ekki skoðuð í þessu verkefni. Hámarks kraftar og hámarks vægisáraun þegar tímaráðasettin voru keyrð á líkönin má sjá á myndum 009 og 010. Jarðskjálftaálagið er keyrt sem framhald af langtímaástandi brúarinnar og því er langtímaálagið innifalið í niðurstöðunum. Undirstöðukraftana í turnfótum vegna langtímaálags má sjá í töflu 014 í kafla 4.4.

Mynd 5.4 bendir til þess að almennt lækka skerkræftarnir í langátt turnsins með auknum hreyfanleika brúargólfsins. Lausa brúin skilar minnstum skerkræftunum í langátt turnsins en upphaflega líkanið mestum sem rekja mætti til lengri eiginsveiflutíma líkananna og því

lægra jarðskjálftaálagi. Blýgúmmílegu líkanið lækkar skerkröftana í langátt turnsins að jafnaði um 40% miðað við upprunalega líkanið og lausa líkanið um 45%. Hinsvegar skilar lausa líkanið mestu skerkröftunum í langátt fyrir álagstilfelli Flag0, það er því ekki algilt að skerkröftarnir í langáttina lækki með auknum sveigjanleika. Þar sem lausa líkanið er með lengsta náttúrulega eiginsveiflutímann þá ætti lausa líkanið að taka á sig minnstu jarðskjálftakraftana, það gæti einnig skýrt lægri skerkröfta í langáttina þ.s. turninn er óbreyttur á milli líkana og ætti því að vera með sömu sveiflueiginleika.

Hámarkskraftarnir í þverátt brúarinnar og lóðréttu stefnu virðast vera nokkuð óháðir undirstöðuskilyrðum brúarinnar í láréttu plani. Þar sem turnfætur eru skáhallandi í þveráttina þá veldur lóðrétt álag á turninn undirstöðukrafti í þveráttina. Hámarkskraftarnir í þveráttina eru einnig tífalt stærri heldur en hámarkskraftarnir í langáttina. Þar sem sveiflutími og eiginsveifluform brúarinnar í lóðréttu stefnu eru mjög lík þá er líklegt að jarðskjálftasvörun brúarinnar í lóðréttu stefnu sé lík og því séu kraftarnir í lóðréttu stefnu og í þveráttina sambærilegir.



Mynd 5.4 Hámarks kraftar í undirstöðum á hvorum turnfæti í hverju álagstilfelli, einingar í MN

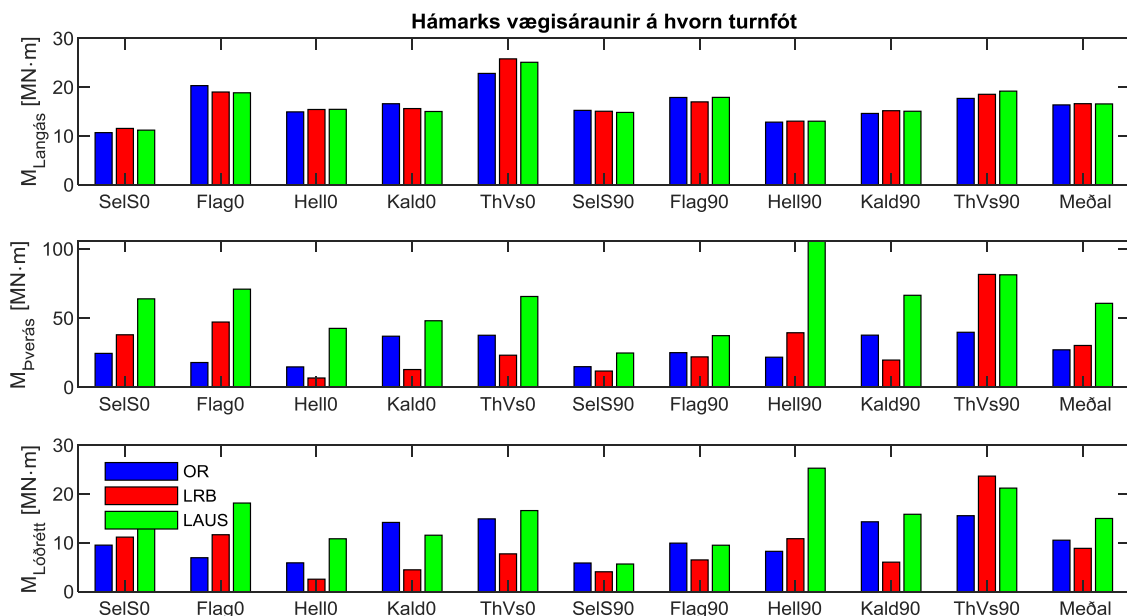
Á mynd 010 eru hámarks vægisáraunir á undirstöður fyrir hvorn turnfót fyrir hvert álagstilfelli. Vægi um langás (vægi um x-ás – M_x , sjá mynd 005) lýsir ósamhverfu hliðarálagi sem turninn verður fyrir eða hreyfingu brúargólfsins í þveráttina. Myndin bendir til þess að hliðarálagið á turninn breytist lítið eftir undirstöðuskilyrðum. Hreyfingar brúargólfsins í þveráttina eru minni heldur en í langáttina og kapalhornin eru hærri, sem útskýrir lítil áhrif í þverstefnu turnsins. Vægisáraun á turninn um langásinn virðist vera nokkuð óháð jaðarskilyrðum brúargólfsins.

Vægi um þverás (vægi um y-ás – M_y , sjá mynd 005) orsakast af ósamhverfu álagi á sitt hvoru hafinu eða vegna hreyfinga brúargólfsins í langáttina. Myndin bendir til þess að með auknum hreyfanleika brúargólfsins aukist vægið um þverásinn. Aukinn hreyfanleiki

brúargólfsins eykur hreyfingu turnans þar sem turninn missir stuðninginn frá köplunum. Þegar brúargólfið er fast við turninn stífa kaplarnir turninn af en þegar hreyfingar brúargólfsins aukast fer turninn að hegða sér meira eins og innspenntur biti. Stuðningurinn frá köplunum eykst þegar halli kaplanna minnkar því láréttu kraftarnir verða meiri. Turninn líkist því meira bita sem er innspenntur niðri og einfalt undirstuddur uppi heldur en hin líkönin. Sveifluformin af upprunalega líkaninu í langáttina styðja þessa tilgátu, að turntoppurinn sé hálfgerður hnútpunktur, sjá mynd B01. Annarsstigs-áhrif vægisáhrif (P-Delta) af færslum turnans magna upp vægisárunina á turninn. Því skilar lausa líkanið mestu vægisárununum um þverásinn á turninn. Að meðaltali er hámarks vægið um þverás í lausa líkaninu rúmlega tvöfalt meira heldur en í upprunalega líkaninu, í blýgúmmílegu líkaninu er það hinsvegar bara 12% meira að meðaltali.

Þar sem turninn er stífari í þveráttina og því færslur turnans minni, þá eru annarsstigs vægisáhrifin (P-Delta) minni og því sést ekki aukning á vægisáruninni á turninn um langásinn. Aukinn halli kaplanna ásamt öfugt-Y laga turnfæti eykur stífleika brúargólfsins í þveráttina sem takmarkar færslur brúargólfsins. Niðurstöðurnar benda til þess að turninn sé viðkvæmari fyrir miklum hreyfingum í langáttina.

Vægi um lóðréttan ás (M_z) lýsir snúningsáhrifunum sem turninn verður fyrir. Á heildina litið koma blýgúmmílegurnar best út við að takmarka snúningsálagið á turninn þótt að upprunalega líkanið skili lægri vægisárun fyrir sum álagstílfellin. Hámarks vægið um lóðréttu stefnu er að meðaltali um 15% lægra fyrir blýgúmmílegu líkanið heldur en upprunalega líkanið en lausa líkanið er með að meðaltali 40% hærra vægi um lóðréttu stefnu heldur en upprunalega líkanið.



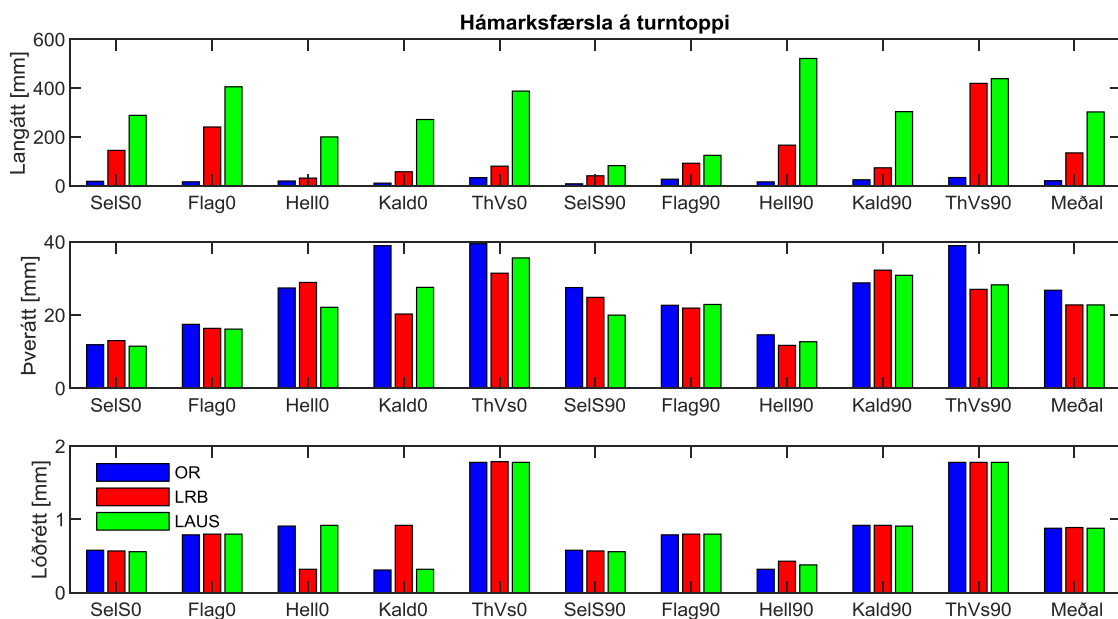
Mynd 5.5 Hámarks vægisárunir í undirstöðum á hvorum turnfæti í hverju álagstílfelli eftir jafarskilyrðum líkana. Efst er vægi um langás (M_x), í miðjunni vægi um þverás (M_y) og neðst vægi um lóðréttan ás (M_z), sjá mynd 005.

5.2.2 Hámarksfærslur

Hámarksfærslur á turntoppi í hverja stefnu má sjá á mynd 011 þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslum turntoppsins eftir að kaplarnir eru strekktir, sjá töflu 012 í kafla 4.4. Í langáttina er upprunalega líkanið með áberandi minni hámarksfærslur heldur en hin líkönin eða aðeins 7% að meðaltali af lausa líkaninu á meðan blýgúmmílegu líkanið er með 45% af hámarksfærslum lausa líkanins að meðaltali. Kaplarnir í upprunalega líkaninu ná að styðja betur við turninn heldur en í hinum líkönunum vegna þrýstikraftanna sem myndast í brúargólfinu þegar því er haldið föstu í langáttina.

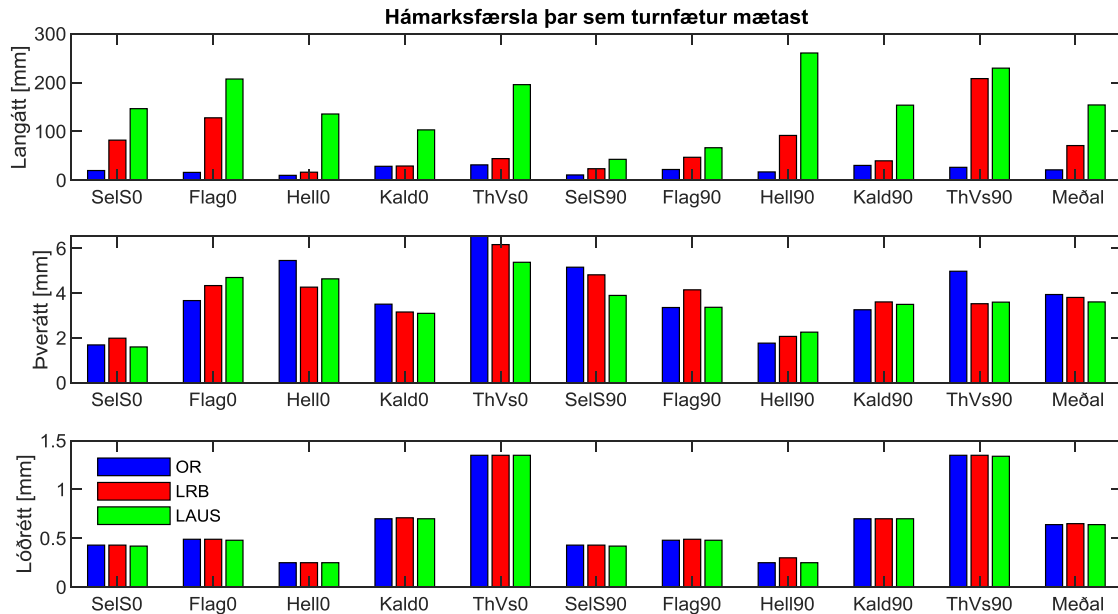
Á heildina titið í þveráttina virðast blýgúmmílegurnar og lausa líkanið minnka færsluna á turntoppinum álíka mikið (um 15%) þótt það sé óreglulegt á milli álagstílfella hvaða kerfi kemur best út. Í lóðrétta stefnu er færslan á turntoppinum nánast sú sama á milli líkana þar sem þau hafa sambærilega eiginleika í lóðrétta stefnu eins og áður hefur komið fram. Hreyfing turntoppsins í lóðrétta stefnu er því aðallega vegna formbreytinga vegna eiginþunga þegar kaplarnir eru strekktir.

Á mynd 011 sést einnig að hreyfingar turntoppsins eru mestar í langáttina og minnstar í lóðrétta stefnu. Hámarksfærsla turntoppsins óháð stefnu stjórnast því af hreyfingum turntoppsins í langáttina.



Mynd 5.6 Hámarks færsla eftir stefnu á turntoppi þegar álagstílfellin eru keyrð á líkönin þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslum.

Þar sem turntoppurinn á upphaflega líkaninu virkar sem hnútpunktur í langáttina miðað við eiginsveifluform brúarinnar (sjá mynd B01) þá var ákveðið að bera einnig saman hámarksfærslu turnsins þar sem turnfæturnir mætast, sjá mynd 012. Á myndinni sést að færsla upprunalega líkansins í langáttina er meiri heldur en á mynd 011 en upprunalega líkanið er samt sem áður með áberandi minnstu færslunar.



Mynd 5.7 Hámarks færsla eftir stefnu þar sem turnfætur mætast þegar álagstilfellin eru keyrð á líkönin þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafsferlum.

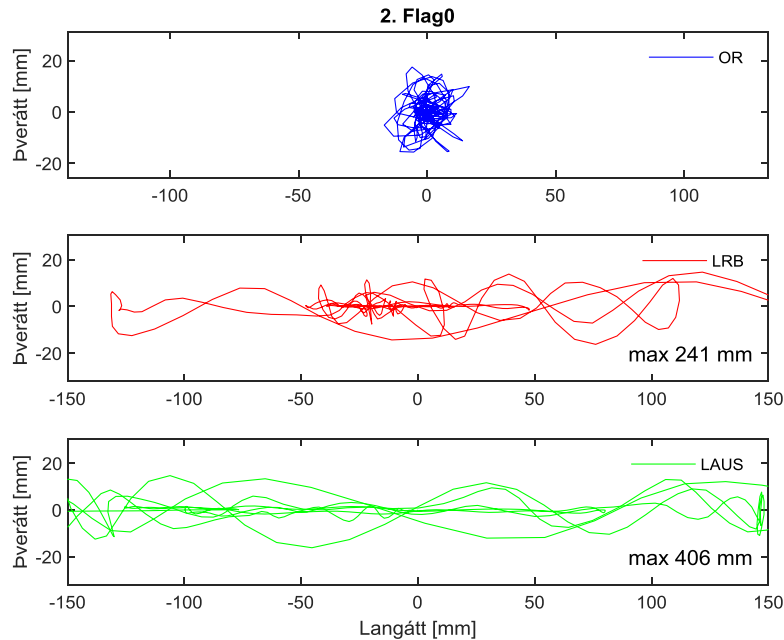
Í reikniskýrslu Eflu er talað um að útbeygja turntoppsins vegna umferðarálags sé um 270 mm fyrir öfugt-Y laga turnform (Óskarsson, 2015). Hámarksfærslur upphaflega líkansins og blýgúmmílegu líkansins í langáttina þegar tímaraðirnar eru keyrð á líkönin er undir 270 mm. Það bendir til þess að umferðarálag gæti verið ráðandi við hönnun turnsins í langáttina. Í greiningu Eflu er hins vegar miðað við turn með steypu þversniði en hér er notað stálþversnið. Tímaraðirnar sem voru notaðar í greiningunni eru óskalaðar og því ekki um hönnunarjarðskjálftaálág að ræða.

5.2.3 Hreyfing turnsins

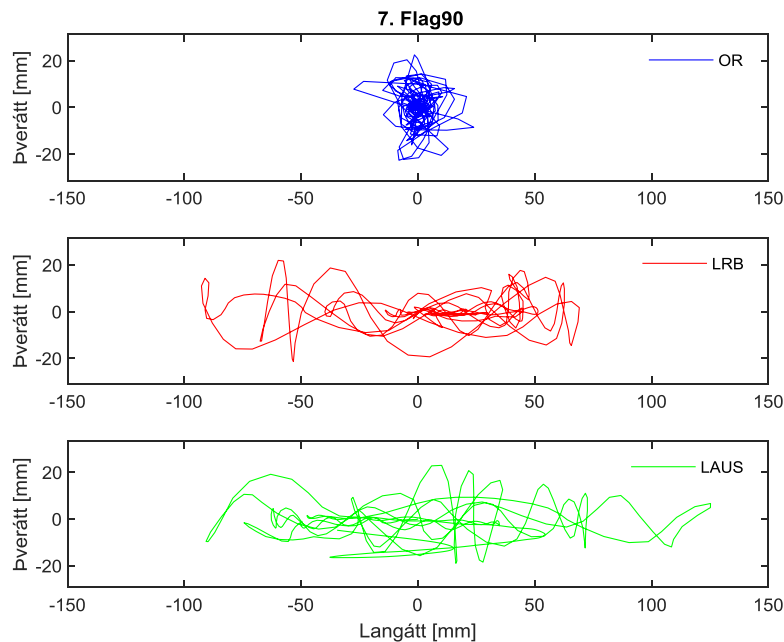
Hreyfing turntoppsins í langátt og brúargólfsins helst í hendur vegna kaplanna. Hvernig turntoppurinn hreyfist á meðan jarðskjálftunum stendur er því ágætis lýsing á heildarhegðun brúarinnar. Á myndum 013 og 014 má sjá hvernig turntoppurinn hreyfist þegar álagstilfelli Flag0 og Flag90 eru keyrð á líkönin. Í viðauka C má sjá myndirnar af hreyfingu turntoppsins þegar öll álagstilfellin eru keyrð á líkönin. Myndirnar hafa verið leiðréttaðar fyrir upphafsferlu turntoppsins þegar kaplarnir eru strekktir til að hreyfingarnar byrji allar í núllpunkti hnitakerfisins.

Á myndunum sést að hreyfing turntoppsins í upphaflega líkaninu sé frekar gróf, skrifa þyrfti út fleiri tímaskref til að ná samfelldari hreyfingu en grófleikinn hefur ekki mikil áhrif á hámarksútslagið. Eiginsveiflutími upprunalegalíkansins er styttri heldur en hjá hinum líkönunum og því verður hreyfingin grófari. Ef fleiri tímaskref yrðu skrifuð út myndi hreyfingin vera samfelldari og hámarksútslaginu náð en það myndi ekki breyta stóra samhenginu. Einnig sést á myndunum að hreyfing lausa líkansins er mest í lok keyrslunnar og því endar brúin á því að vera skökk þegar keyrslunni er hætt. Þar sem lausa líkanið er með svo langan eiginsveiflutíma og litla dempun er brúin ennþá að hreyfast þótt að jarðskjálftinn sé liðinn hjá. Einnig er líklegt að turninn fari á flot í reiknilíkaninu vegna hárrar vægisáraunar í lausa líkaninu.

Af myndunum sést að turntöppurinn í upphaflega líkaninu virðist hreyfast nokkuð jafnt í báðar stefnur vegna jarðskjálftaálagsins en blýgúmmílegu líkanið og lausa líkanið eru með áberandi meiri færslur í langáttina.



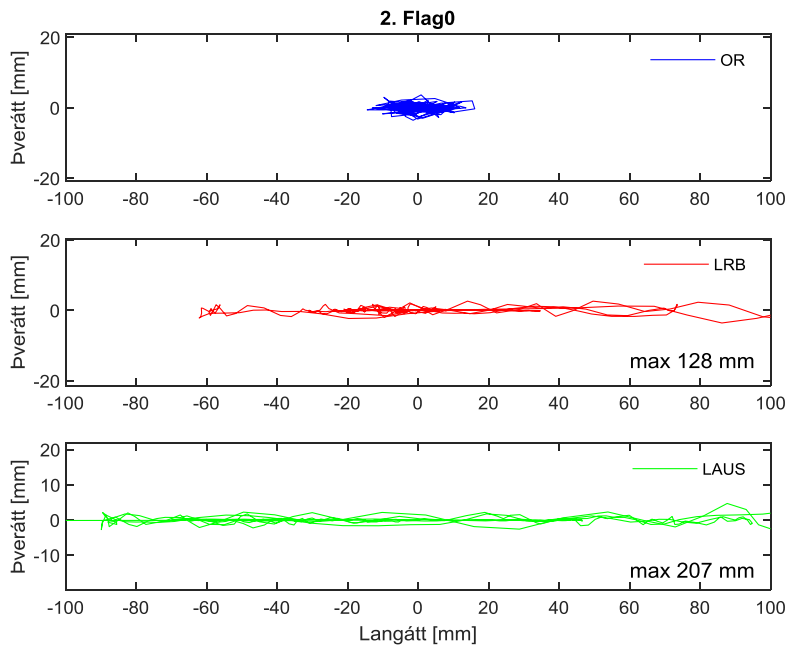
Mynd 5.8 Hreyfing turntöppsins þegar álagstilfellið Flag0 er keyrt á líkönin.



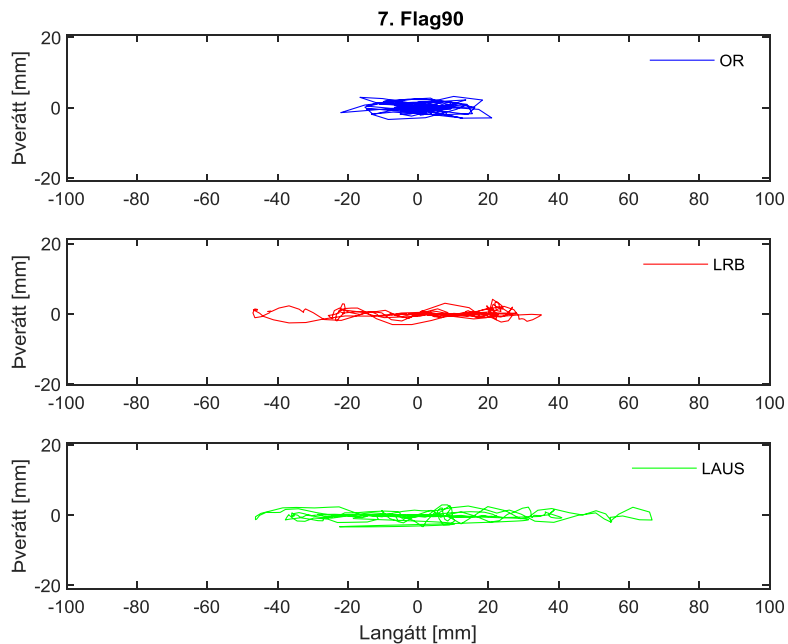
Mynd 5.9 Hreyfing turntöppsins þegar álagstilfellið Flag90 er keyrt á líkönin.

Myndir 015 og 016 sýna hreyfingu turnsins þar sem turnfætturnir mætast þegar svörun líkananna er hermd fyrir álagstilfellin Flag0 og Flag90. Af myndunum sést að hreyfing

turnsins í langáttina er ráðandi. Einnig sést á myndunum að hreyfing turnsins í upphaflega líkaninu er líkari hreyfingunum í hinum líkönunum, þ.e. með hreyfinguna í langáttina ráðandi.



Mynd 5.10 Hreyfing turnsins þar sem turnfæturnir mætast þegar álagstilfellið Flag0 er keyrt á líkönin. (Ath. breyttan skala miðað við myndir að ofan)



Mynd 5.11 Hreyfing turnsins þar sem turnfæturnir mætast þegar álagstilfellið Flag90 er keyrt á líkönin. (Ath. breyttan skala miðað við myndir að ofan)

5.3 Jarðskjálftasvörun brúargólfsins

Jarðskjálftasvörun brúargólfs var metin út frá kröftum og færslum á undirstöðum ásamt hreyfingu brúargólfsins á miðju vesturhafi miðað við hreyfingarnar enda hafsins. Færslurnar á undirstöðum meta hámarkshreyfingu brúargólfsins og undirstöðukraftar gefa mynd af heildar jarðskjálftakröftum í brúargólfinu. Hreyfing brúargólfsins á miðju vesturhafi miðað við enda hafsins lýsir því hvort brúargólfið hreyfist frekar sem ein heild (e. rigid body) eða hvort jarðskjálftaálagið valdi innri kröftum og færslum á brúargólfinu.

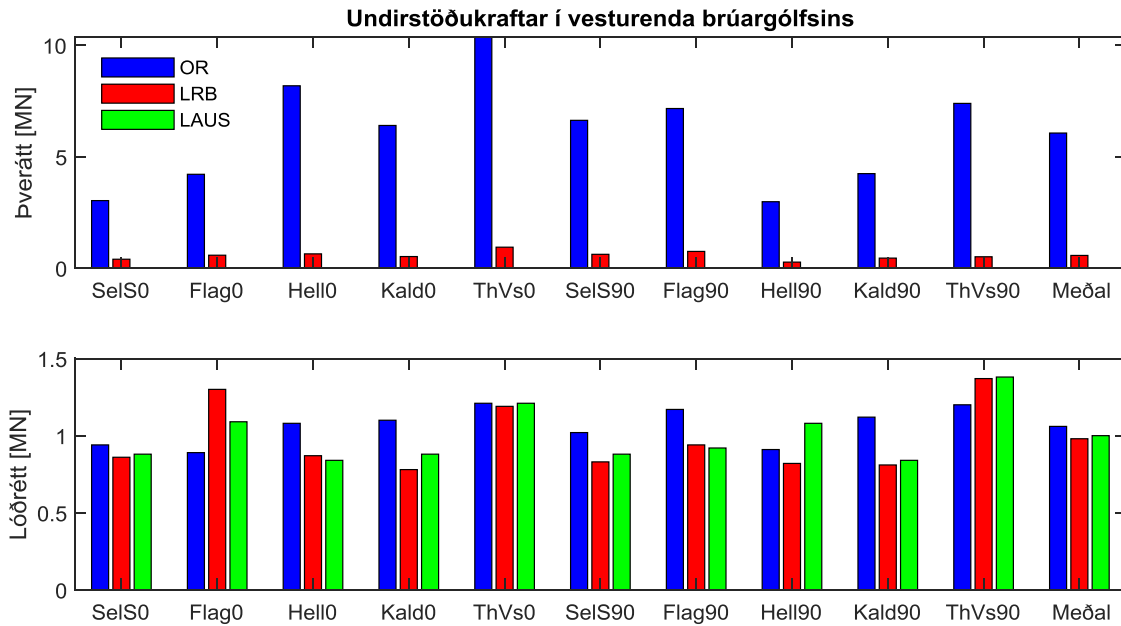
Upprunalega líkanið er aðeins með undirstöðu undir öðrum langbitanum í þveráttina en blýgúmmílega líkanið er með stífleika í þverátt brúarinnar undir báðum langbitum. Kraftarnir í töflunum eru miðaðir við annan langbitann, það er aðra undirstöðuna. Því voru kraftarnir í upprunalega líkaninu helmingaðir til að vera sambærilegir við blýgúmmílegu líkanið.

5.3.1 Endastöplar

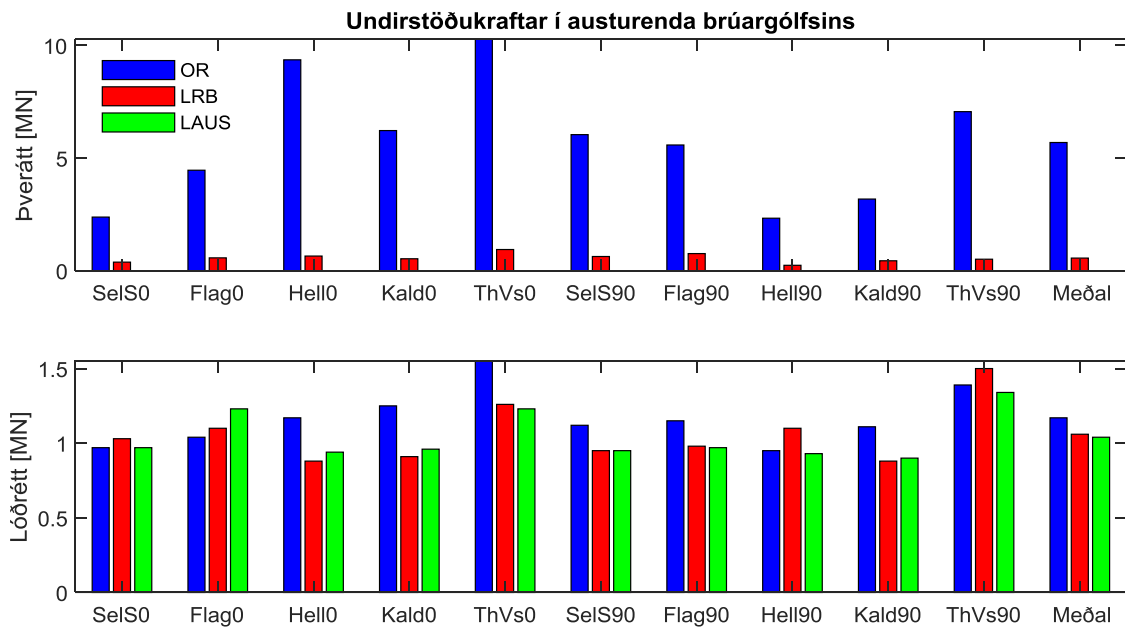
Á myndum 017 og 018 eru hámarksundirstöðukraftar undir báðum endum brúargólfsins undir öðrum langbitanum bornir saman. Þar sem hreyfingar brúargólfsins í langáttina í endastöplum eru óhindraðar í öllum líkönunum þá eru engir kraftar í langáttina. Kraftarnir í þverátt í upprunalega líkaninu var deilt niður á báða langbitana þar sem aðeins önnur undirstaðan í upprunalega reiknilíkaninu var með stuðningi í þveráttina, ólíkt blýgúmmílegu líkaninu sem var með stífleika í þveráttina undir báðum langbitum.

Á heildina litið eru lóðréttu kraftarnir í upprunalega líkaninu aðeins hærri (um 10% að meðaltali) heldur en í lausa- og blýgúmmílegulíkaninu. Lóðréttu kraftarnir í eystri undirstöðunni (sjá mynd 018) eru um 5-10% meiri heldur en í vestur undirstöðunni (sjá mynd 017). Í þveráttina er það hinsvegar öfugt, kraftarnir í vesturundirstöðunni eru um 5% stærri heldur en í eystri undirstöðunni. Blýgúmmílegurnar takmarka skerkræftinn sem getur myndast í þveráttina vegna ólínulegra eiginleika og þar af leiðandi eru kraftarnir í þveráttina aðeins um 10% hámarks undirstöðukröftunum í upprunalega líkaninu að meðaltali. Í lausa líkaninu eru hreyfingar brúargólfsins í þveráttina óhindraðar og því engir kraftar í þveráttina.

Á myndunum sést einnig að kraftarnir í þveráttina í líkönunum virðast vera mjög svipaðir á milli endanna en í lóðréttu stefnu er meiri óregla hvaða líkan skilar hæstu kröftunum í endastöplunum.



Mynd 5.12 Hámarks kraftar í vesturstöpli undir öðrum langbitanum.

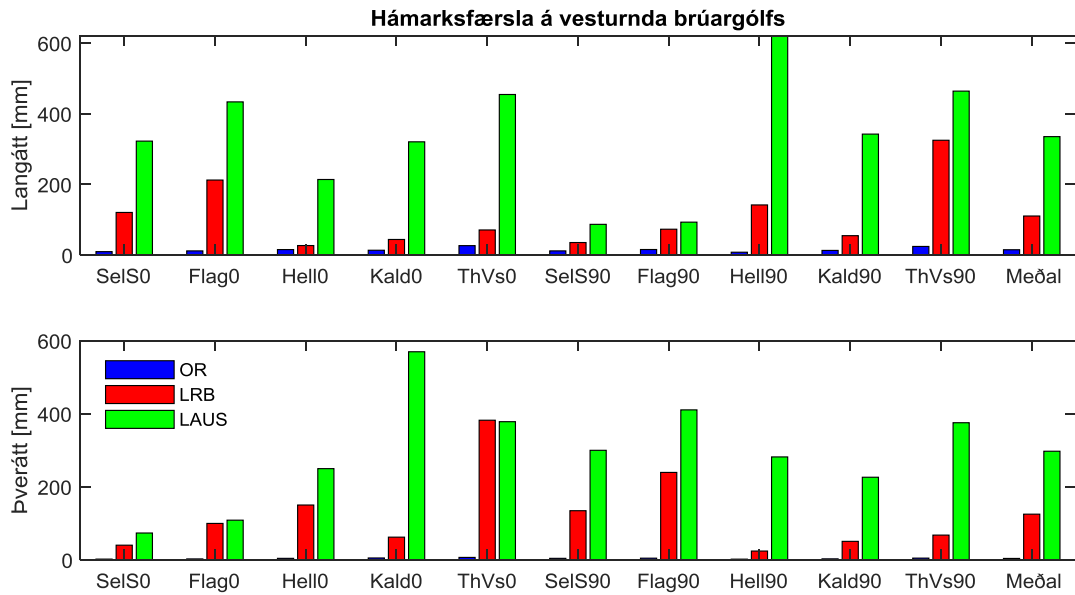


Mynd 5.13 Hámarks kraftar í austurstöpli undir öðrum langbitanum

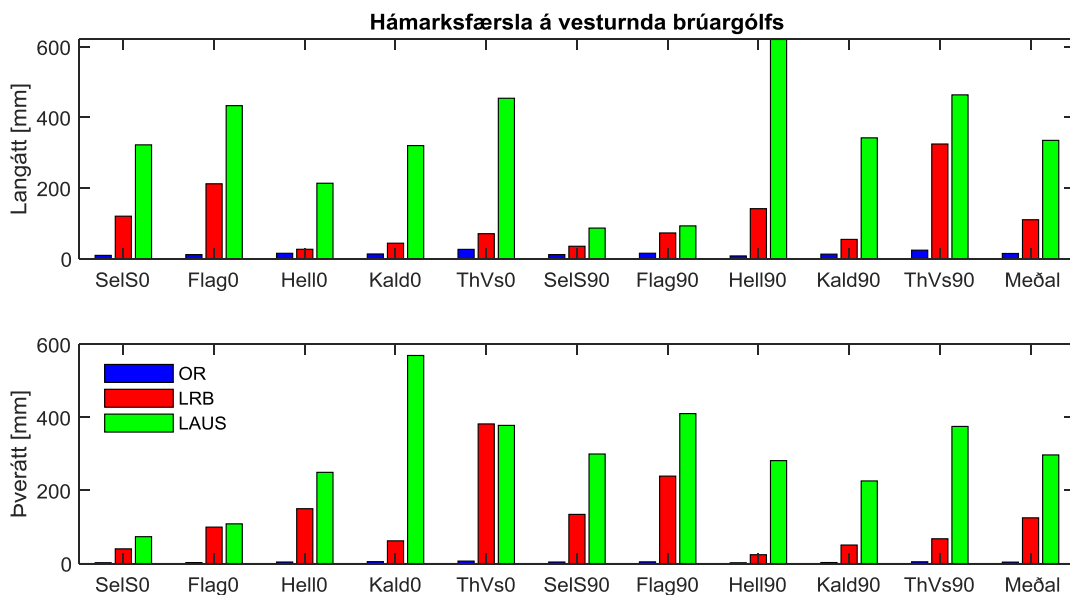
Færslur brúargólfsins yfir endastöplum má sjá á myndum 019 og 020. Þar sem brúargólfinu er haldið föstu í lóðrétta stefnu í endastöplum í öllum reiknilíkönum eru engar færslur í lóðrétta stefnu. Í þverrátt í upprunalega líkaninu er aðeins öðrum langbitanum haldið föstum, á myndunum eru færslur lausa bitans, sem getur færst lítillega, sýndar.

Í langáttina eru hámarksfærslur blýgúmmilegu líkansins aðeins um 30% af færslum lausa líkansins að meðaltali en upphaflega líkanið er með áberandi minnstu færslurnar enda

brúargólfinu haldið föstu í miðjunni. Í þveráttina eru færslur blýgúmmílegu líkansins um 40% af færslum lausa líkansins á meðan færslur upprunalega líkansins eru óverulegar.



Mynd 5.14 Hámarks færsla á vesturenda brúargólfsins þegar álagstilfellin eru keyrð á líkönin þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslum.



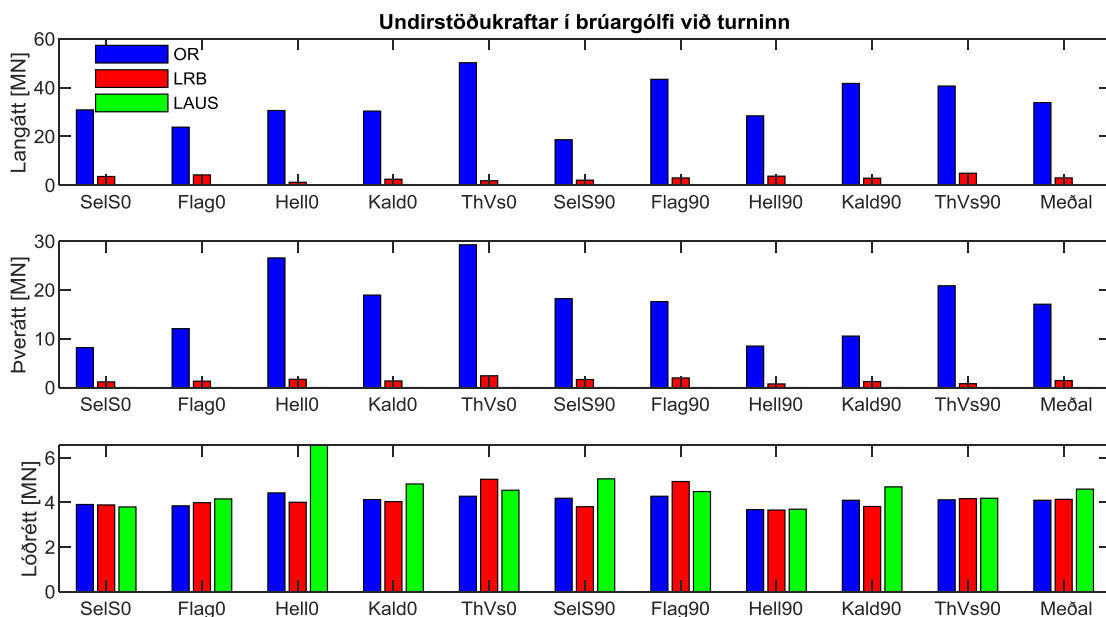
Mynd 5.15 Hámarks færsla á austurenda brúargólfsins þegar álagstilfellin eru keyrð á líkönin þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslum.

5.3.2 Brúargólfið við turninn

Á mynd 021 eru hámarksundirstöðukraftar í brúargólfin við turninn birt. Gildin eru fyrir undirstöðukraftana í öðrum langbitanum. Kröftunum í þverátt í upprunalega líkaninu var deilt niður á báða langbitana þar sem aðeins önnur undirstaðan í upprunalega

reiknilíkaninu var með stuðningi í þveráttina, ólíkt blýgúmmílegu líkaninu sem var með stífleika í þveráttina undir báðum langbitum.

Á heildina litið eru lóðréttu kraftarnir í lausa líkaninu aðeins stærri heldur en í hinum líkönunum (um 12%), þótt að það sé ekki algilt fyrir öll álagstílfellin. Þar sem brúargólfið er óhindrað að hreyfast í lárétta plani í lausa líkaninu þá eru engir undirstöðukraftar kraftar í lárétta plani. Undirstöðukrafturinn í langátt og þverátt í blýgúmmílegu líkaninu er að meðaltali aðeins um 8% af upprunalega líkaninu. Blýgúmmílegurnar virðast því mjög skilvirkar í að takmarka skerkriftana sem myndast í undirstöðunum.



Mynd 5.16 Hámarks kraftar í undirstöðum undir miðju brúargólfinu undir öðrum langbitanum.

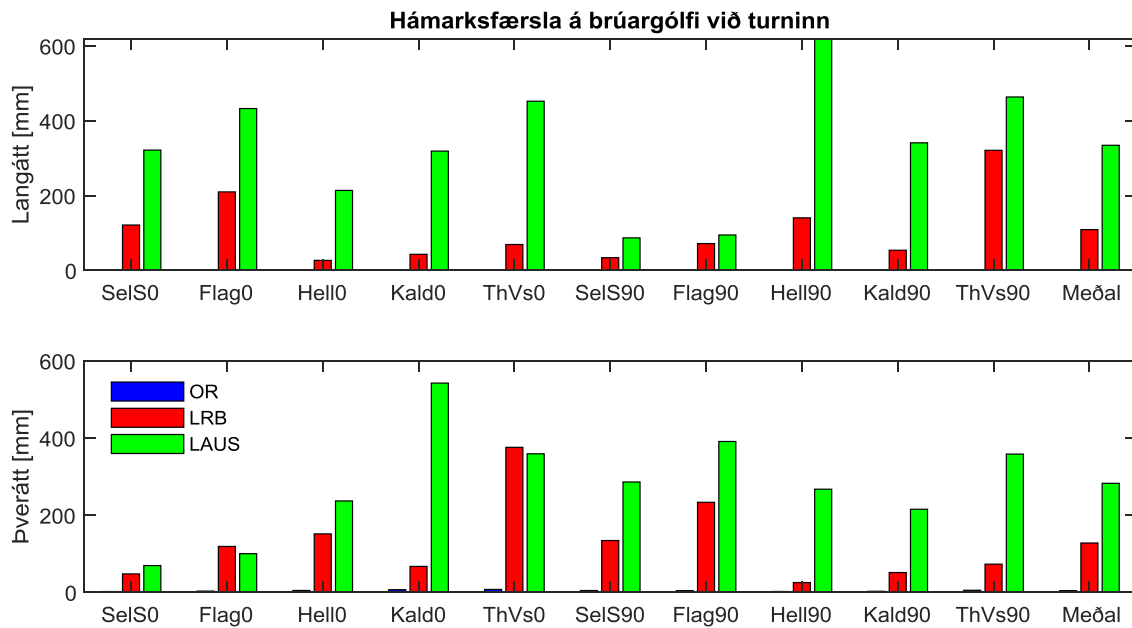
Hámarksfærslur brúargólfsins við turninn má sjá á mynd 022 þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslu brúargólfsins þegar kaplarnir eru strekktir, sjá töflu 013 í kafla 4.4. Líkt og á brúarendum eru blýgúmmílegurnar skilvirkari í að draga úr færslum brúargólfsins í langáttina heldur en í þveráttina ef litið er á upprunalega og lausa líkanið sem jaðargildin. Hámarksfærslur brúargólfsins með blýgúmmílegum eru að meðaltali um 33% af færslum lausa líkansins í langáttina en um 45% færslanna í þveráttina.

Í öllum líkönunum er brúargólfinu haldið föstu í lóðrétta stefnu við turninn og því eru engar færslur í lóðrétta stefnu við turninn. Í þverátt í upprunalega líkaninu er öðrum langbitanum haldið föstum, myndin sýnir lausa bitann sem getur færst lítillga. Í upprunalega líkaninu er báðum langbitunum í brúargólfinu haldið föstum við turninn í langáttina og því er engin hreyfing á brúargólfinu í langáttina.

Hámarksfærslur brúargólfsins í langáttina og þveráttina í öllum álagstílfellum eru 320 mm og 375 mm í blýgúmmílegu líkaninu en 620 og 540 mm í lausa líkaninu. Blýgúmmílegurnar eru því ekki jafn skilvirkar að draga úr hámarksfærslu brúargólfsins af öllum álagstílfellunum og af hámarksfærslu einstakra álagstílfalla. Það er vegna þess að

Þegar blýgúmmílegurnar eru komnar á flot missa þær stífleika sinn og þá hegðar blýgúmmílegu líkanið sér líkara lausa líkaninu.

Benda má á að álagstilfelli 10 skilar mestri formbreytingu í langátt og álagstilfelli 5 skilar mestri formbreytingu í þverátt fyrir blýgúmmílegurnar. Í báðum tilvikum er það sami stefnuþátturinn (sá orkumeiri, sjá mynd 013) frá skráðu tímaröðunum á vesturstöpli Þjórsárbrúar í Suðurlandsskjálftanum 2000 sem er orsakavaldurinn.



Mynd 5.17 Hámarks færslur brúargólfsins við turninn þegar álagstilfellin eru keyrð á líkönin þegar búið er að leiðrétta fyrir upphafs færslum brúargólfsins.

5.3.3 Svignun brúargólfsins

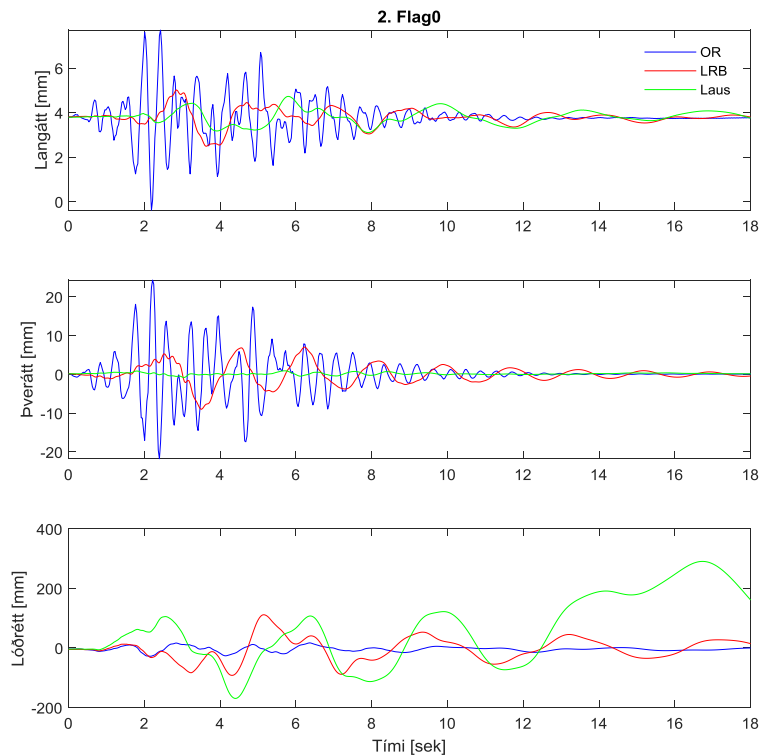
Hreyfing brúargólfsins fyrir miðju vesturhafi miðað enda hafsins gefur til kynna hversu miklar mismunafærslur eiga sér stað innan brúargólfsins og hversu mikill krappi myndast á brúargólfinu. Færslur innan brúargólfsins gefa til kynna hversu miklir innri kraftar myndast í brúargólfinu vegna jarðskjálftaálagsins og hvort brúargólfið hegði sér sem ein heild (e. rigid body) í jarðskjálftum. Á myndum 023 og 024 má sjá mismunafærslur brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og vesturenda brúargólfsins þegar álagstilfelli tvö og sjö (Flag0 og Flag90) eru keyrð á líkönin. Í viðauka D má sjá mismunafærslur brúargólfsins þegar öll álagstilfellin eru keyrð á líkönin.

Á myndunum sést að mismunafærslan á brúargólfinu í langáttina fyrir miðju vesturhafi miðað við enda hafsins er mestur fyrir upprunalega líkanið en minnstur fyrir lausa líkanið. Það bendir til þess að mismunafærslan eykst þegar stífari tenging er notuð í langáttina á milli brúargólfsins og undirstaðna. Enn fremur bendir það til að brúargólfið hegði sér mest sem ein heild (e. rigid body) í lausa líkaninu. Ástæðan af hverju mismunafærslan byrjar í kringum 4 mm er vegna elastískra formbreytinga í brúargólfinu þegar kaplarnir eru strekktir. Formbreytingin er meiri þegar horn kaplanna við lóðrétt minnkar og því er ekki

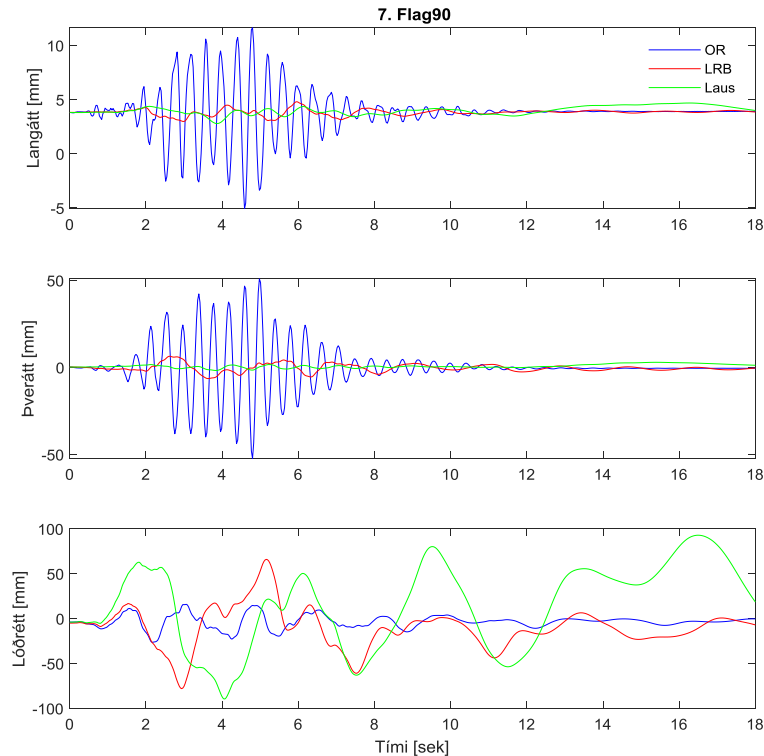
um línulegt samband að ræða. Í þveráttina hegða líkönin sér eins, það eru mestu mismunafærslurnar á upphaflega líkaninu og minnstu á lausa líkaninu.

Brúin hegðar sér hinsvegar töluvert ólíkt í lóðrétta stefnu heldur en í láréttu plani hvað mismunafærslu á milli brúargólfsins á miðju vesturhafi miðað við enda hafsins. Í öllum líkönunum er stíf undirstaða í lóðrétta stefnu undir enda hafsins og því er í raun aðeins um hreyfingu brúargólfsins í lóðrétta stefnu fyrir miðju hafi að ræða. Í lóðrétta stefnu er upphaflega líkanið með minnstu færslurnar en lausa líkanið mestu færslurnar. Hegðunin á lausa líkaninu passar vel við hreyfingu turntoppsins, að mestu færslurnar eigi sér stað í lok keyrslu líkansins, sjá mynd 013.

Á myndunum sést einnig að mismunafærslurnar í upphaflega líkaninu eru fljótastar að deyja út en lengstar að deyja út í lausa líkaninu. Hversu fljót líkönin eru að ná upphaflegri stöðu er því í réttu hlutfalli við eigintíðni kerfanna, innbyggða dempunin virðist ekki stjórna því jafn mikið.

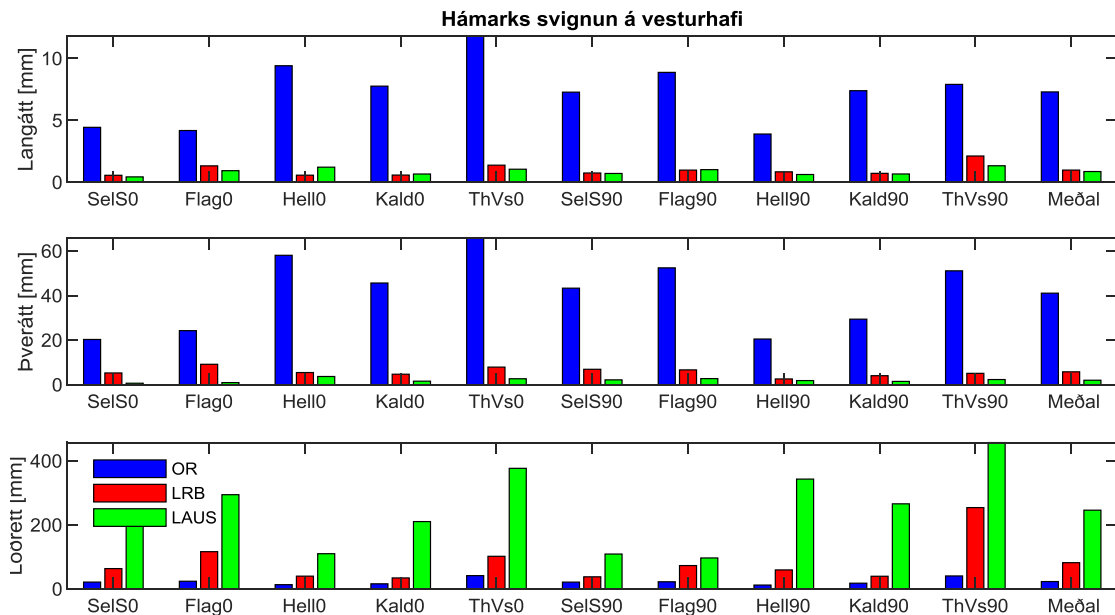


Mynd 5.18 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstílfellið Flag0 er keyrt á líkönin.



Mynd 5.19 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstilfellið Flag90 er keyrt á líkönin.

Hámarks svignun brúargólfsins á vesturhafinu miðað við enda hafsins má sjá á mynd 025. Á myndinni sést að upprunalega líkanið er með áberandi mestu mismunafærsluna í langátt og þverátt en lausa líkanið í lóðréttu stefnu. Blýgúmmílegu líkanið og lausa líkanið virðast álíka skilvirk í að takmarka mismunafærslur brúargólfsins í langáttina. Vegna elastískra formbreytinga brúargólfsins vegna kapalkraftanna þá byrjar mismunafærslan í langáttina í 4 mm eins og sést á myndum 023 og 024. Blýgúmmílegurnar minnka mismunafærslur brúargólfsins í láréttu plani um 85% að meðaltali miðað við upprunalega líkanið.



Mynd 5.20 Hámarks svignun brúargólfsins á vesturhafinu miðað við enda hafsins þegar álagstílfellin eru keyrð á líkönin.

5.4 Krafta-færslu gröf af blýgúmmílegunum

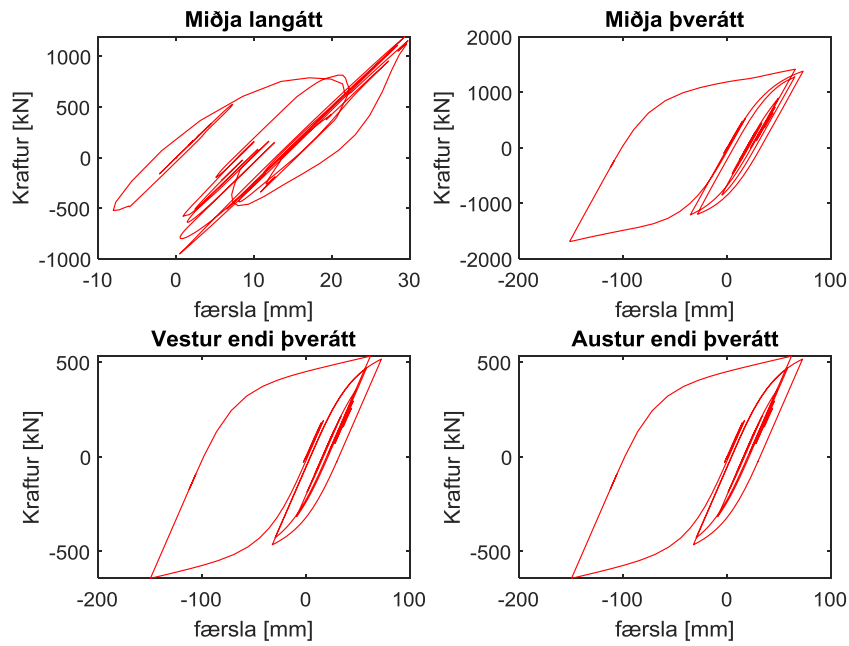
Flotstyrkur blýgúmmíleganna, sem voru staðsettar undir brúargólfinu hjá turninum, var skilgreindur sem 10% af þyngd brúargólfsins í langgáttina en í þveráttina var flotstyrkurinn skilgreindur út frá undirstöðukröftunum sem myndast þegar hönnunarvindálag verkar þvert á brúna í brotmarksástandi, sjá töflu 011 í kafla 4.4. Blýgúmmílgurnar ná ekki að fara í flot í þveráttina í öllum álagstílfellunum vegna þess hve hönnunar-vindálagið er hátt. Orkuueyðing blýgúmmíleganna eykst þegar blýgúmmílegurnar fara á flot þar sem flatarmál hystériuslaufunnar eykst.

Með því að teikna kraftana á móti færslu blýgúmmílega, m.ö.o. hystériuslaufu blýgúmmíleganna (e. hysteresis loops), má meta orkuueyðingu blýgúmmíleganna í jarðskjálftunum. Á myndum 026 og 027 má sjá hystériuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstílfelli númer þrjú og átta (Hell0 og Hell90) eru keyrð á blýgúmmílegu líkönin. Í viðauka E má sjá hystériuslaufur blýgúmmíleganna þegar öll álagstílfellin eru keyrð á blýgúmmílegu líkanið.

Á myndum sést að hystériuslaufur blýgúmmíleganna einkennast af stökum hring þegar blýgúmmílegurnar fara á flot. Stóra hringinn má rekja til nærsviðsáhrifanna í tímaröðunum, þegar stór hraðapúls verkar á brúna sem veldur miklum færslum.

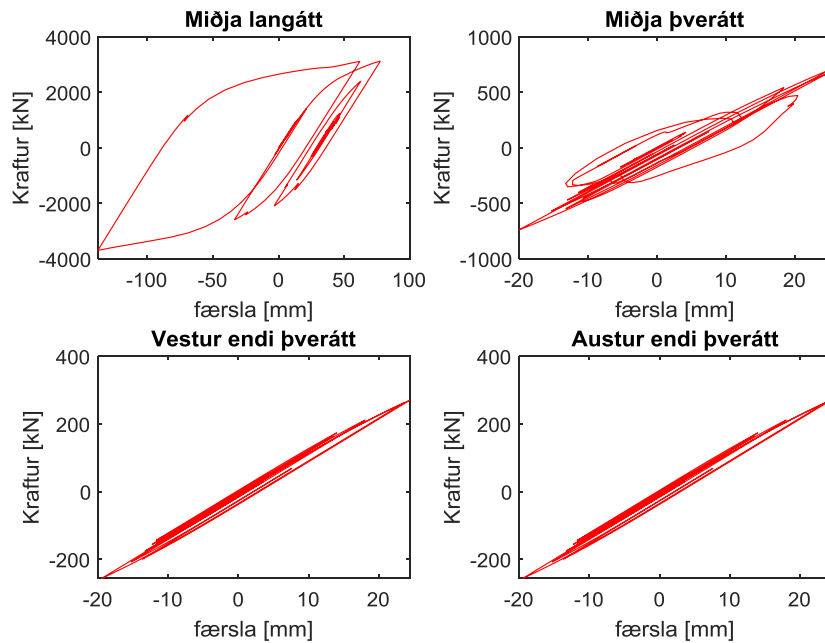
Á myndunum sést enn frekar að hystériuslaufur blýgúmmíleganna í báðum endum brúarinnar virðast vera eins. Það bendir til þess að hreyfingar brúargólfsins séu samhverfar um turninn þrátt fyrir að þau séu mislöng og þar af leiðandi með mismunandi massa. Blýgúmmílegan undir brúargólfinu við turninn virðist hreyfast nokkurn veginn í takt við blýgúmmílegurnar í endanum sem bendir til þess að brúargólfið hegði sér sem stíf eining (e. rigid body).

3. Hell0



Mynd 5.21 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið Hell0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

8. Hell90



Mynd 5.22 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið Hell90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

6 Umræður

Sveiflueiginleikar brúarinnar breytast við notkun blýgúmmílega miðað við upphaflega líkanið en fyrsta sveifluform brúarinnar í langátt og þverátt fer frá því að vera 0,21 sek og 0,42 sek yfir í 1,60 sek og 1,77 sek, sjá töflur 007 og 008. Sveiflutíminn eykst enn frekar ef brúargólfið er alveg óhindrað að hreyfast í láréttu plani og fer þá upp í 8-10 sek. Hönnunarrófið á mynd 011 bendir til þess að jarðskjálftaálagið á brúna minnkar frá því að vera 1,7 *g* niður í 0,5 *g* við að bæta við blýgúmmílegum en jarðskjálftaálagið verður 0,2 *g* við að leyfa brúargólfinu að hreyfast óhindruðu í láréttu plani. Hönnunarjarðskjálftaálagið lækkar því með auknum sveigjanleika brúarinnar.

Í lóðrétta stefnu eru líkönin öll með sömu jaðarskilyrði og því er eiginsveiflutími þeirra sá sami eða um 1,7 sek. Hönnunarrófið á mynd 014 bendir til þess að jarðskjálftaálagið á brúna í lóðrétta stefnu sé óverulegt þar sem eiginsveiflutími brúarinnar í lóðrétta stefnu er langur. Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar líta einnig eins út í lóðrétta stefnu, sjá viðauka B.

Undirstöðukraftar brúargólfsins í reiknilíkonunum eru í samræmi við jarðskjálftaálagið, þeir lækka með auknum sveigjanleika. Undirstöðukraftar brúargólfsins í blýgúmmílegulíkaninu eru að meðaltali aðeins um 8-10% af undirstöðukröftum upphaflega líkansins í láréttu plani. Lausa líkanið hefur engan stífleika í undirstöðum brúargólfsins í láréttu plani og þar af leiðandi enga krafta í láréttu plani.

Færslur brúargólfsins við undirstöður vegna jarðskjálftaálags eru hinsvegar mestar í lausa líkaninu og minnstar í upphaflega líkaninu þrátt fyrir að jarðskjálftaálagið sé minna. Færslur brúargólfsins eru því viðkvæmari fyrir stífleika undirstaðna heldur en jarðskjálftaálaginu sem verkar á það. Brúargólf blýgúmmílegu líkansins færast að meðaltali 35% af færslum lausa líkansins í langáttina en um 50% af færslum lausa líkansins í þveráttina. Blýgúmmílegurnar eins og þær hafa verið skilgreindar eru því skilvirkari í að minnka færslur brúargólfsins í langáttina heldur en þveráttina.

Mismunafærslur á milli mið-vesturhafs brúargólfsins og enda hafsins benda til þess að brúargólf lausa líkansins hegði sér sem líkast einni einingu (e. rigid body) í láréttu plani. Mismunafærslurnar eru mestar í upphaflega líkaninu í láréttu plani sem bendir til þess að álagið sem brúargólfið verður fyrir þegar álagstilfellin eru keyrð á líkönin sé mest í upphaflega líkaninu. Hámarks mismunafærslurnar eru að meðaltali 85% lægri í láréttu plani í blýgúmmílegu líkaninu heldur en upprunalega líkaninu. Í lóðrétta stefnu eru hinsvegar mismunafærslur brúargólfsins í lausa líkaninu mestar. Endunum á brúargólfinu er haldið föstum í lóðrétta stefnu og því er aðeins um hreyfingu brúargólfsins í lóðrétta stefnu fyrir miðju hafi að ræða og færslur lausa líkansins eru mestar eins og áður hefur komið fram. Hámarksfærslunar eru að meðaltali nífalt hærri í lausa líkaninu heldur en upprunalega líkaninu en aðeins þrefalt hærri í blýgúmmílegu líkaninu.

Vægisáraunin á turninn vegna jarðskjálftaálags er mest fyrir lausa líkanið. Færslur brúargólfsins í langáttina í lausa líkaninu valda mikilli vægisáraun á turninn um þverásinn. Vægisáraunin er minnst í upphaflega líkaninu þar sem færslurnar minnstar. Lausa líkanið

færir því jarðskjálftaálagið frá brúargólfinu og yfir á turninn en upphaflega líkanið beinir álaginu á brúargólfið og undirstöður þess. Athyglisvert er að hreyfanleiki brúargólfsins í þveráttina virðist hafa lítil áhrif á vægisáraunina um langásinn á turninn.

Færslur turntoppsins eru í samræmi við vægisáraunina, turntoppurinn svignar mikið í langáttina í lausa líkaninu en minnst í upphaflega líkaninu. Líkönin hegða sér þó nokkuð ólíkt þar sem kaplarnir styðja við turntoppinn í upphaflega líkanininu í gegnum þrýstikrafta brúargólfsins. Í hinum líkönunum þegar brúargólfið fær að hreyfast í langáttina missir turntoppurinn stuðninginn í gegnum kaplana og hegðar sér eins og útkragandi biti. Færslur turntoppsins í þveráttina eru svipaðar á milli líkana en upphaflega líkanið er með aðeins meiri færslur heldur en hin líkönin, um 18% að meðaltali.

Niðurstöður greiningarinnar benda til þess að varasamt geti verið að leyfa miklar færslur brúargólfsins í langáttina. Með lækkanði stífni undirstaða í langátt missir turninn stuðning við turntoppinn í gegnum þrýstikrafta í brúargólfinu sem skila sér í undirstöður (mest fyrir ystu kaplana með lægsta hornið við lárétt). Það hefur í för með sér að turninn fer frá því að hegða sér sem innspenntur biti með einskonar einfaldan undirstuðning í toppinum, yfir í að hegða sér meira sem útkragandi biti. Svagari turn hefur einnig í för með sér stærri færslur í brúarturni og þar af leiðandi stærri P-Delta mómenta við turnfætur. Lengri sveiflutími í langátt færir engu að síður mannvirkið yfir á orkuminni tíðni jarðhreyfinganna. Því kann að vera heppilegast að útfæra undirstöður í langátt með fjaðrandi eiginleikum (e. elastic) en ekki leyfa flot. Blýgúmmílegurnar eða aðrar orkueyðandi lausnir virðast ákjósanlegri í þveráttina þar sem þær auka ekki álagið á turninn og draga verulega úr álagi á brúargólfið og undirstöður þess.

6.1 Frekari rannsóknir

Í þessari greiningu var áhersla lögð á notkun blýgúmmílega en niðurstöður gefa einnig vísbendingar um mögulegan ávinning fyrir aðrar gerðir af orkueyðandi lausnum. Í greiningunni var aðeins skoðað eitt tilfelli af blýgúmmílegum en Hameed o.fl. (2008) komust að í rannsókn sinni að hægt sé að besta skilgreiningu blýgúmmílega til að lágmarka undirstöðukrafta og færslur brúargólfs. Blýgúmmílegur með ólíka stífni eftir áttum voru notaðar í líkaninu en í raun getur verið erfitt að hanna blýgúmmílegubúnað sem hefur mismunandi stífleika og flotkraft í annars vegar langátt og hins vegar í þverátt. Oftast er miðað við sömu eiginleika í báðar áttir. Þetta þarf að skoða nánar fyrir legurnar staðsettar í turni.

Hægt væri að breyta stífleika og flotstyrk blýgúmmíleganna undir brúargólfinu við turninn í langáttina en besta gildið á flotstyrki blýgúmmíleganna ætti að liggja á bilinu 3-15 % af þyngd brúargólfsins samkvæmt Hameed o.fl (2008). Mögulega væri heppilegast að forðast flot á undirstöðum í langátt. Einnig væri hægt að prófa að breyta stífni blýgúmmíleganna í þveráttina eða hækka flotstyrk þeirra en ekki er talið ráðlagt að minnka flotstyrkinn þar sem blýgúmmílegurnar myndu þá fara í flot áður en hönnunarvindálagi (brotmarkaástand) er náð og færslur yðu þá óhóflegar í notmarkaástandi.

Við hönnun brúarinnar þyrfti að meta kostnað blýgúmmíleganna og ávinningin sem felst í nýtingu þeirra. Miklar færslur brúargólfsins gætu krafist stórra og kostnaðarsamra blýgúmmílega en hámarksfærsla blýgúmmíleganna orsakast af nærsviðsáhrifum tímaraðanna sem einkennast af stökum hraðapúls. Kerfi sem takmarka hámarksfærslur brúargólfsins, líkt og Rion-Antirion og Sutong brúin nýta, gæti verið áhugaverður kostur til

að takmarka færslur brúargólfsins í langáttina þegar hraðapúls nærsviðsáhrifanna gengur yfir og þá væri hægt að minnka blýgúmmílegurnar.

Ráðstafanir gagnvart upplyftikröftum voru ekki skoðaðar í greiningunni en þegar tímaraðirnar sem voru mældar við Þjórsárbrú 21. júní árið 2000 (álagstílfelli númer 5 og 10) voru keyrðar á upphaflega líkanið og blýgúmmílegu-líkaninu ollu þær togkrafti í undirstöðum við enda brúargólfsins. Tryggja þyrfti að blýgúmmílegurnar ráði við togkraftinn eða bæta við öðrum búnaði sem tryggir að brúargólfið geti ekki lyfst upp svo sem köplum. Einnig væri hægt að bæta við auknum massa á enda brúargólfsins líkt og gert var við hönnun Tsurumi Tsubasa brúarinnar til að forðast upplyftikraftana.

Í greiningunni var umferðarálag ekki skoðað eða borið saman við jarðskjálftaálagið á brúna. Í forhönnun brúarinnar bendir Verkfræðistofan Efla á að ósamhverft umferðarálag á brúna gæti verið ráðandi við hönnun turnsins (Óskarsson, 2015). Í greiningu Eflu var hámarkssvignun turntoppsins í upprunalega líkaninu vegna ósamhverfs umferðarálags um 270 mm sem er meiri færsla heldur en þegar skráðu tímaraðirnar voru keyrðar á upprunalega líkanið og blýgúmmílegu líkanið. Færsla turntoppsins vegna umferðarálagsins bendir til þess að umferðarálagið gæti verið ráðandi í hönnun turnsins í langáttina. Einnig væri áhugavert að skoða hvernig brúin muni bregðast við jarðskjálftaálagi ef umferðarálag er ósamhverft um turninn, þótt að slíks sé ekki krafist í hönnunarstöðlum. Slíkt gæti breytt sveiflueiginleikum brúarinnar ef massinn á öðru hafinu eykst án þess að stífleiki brúarinnar breytist. Það gæti valdið snúningsáhrifum á turninn eða valdið ósamhverfum hreyfingum brúargólfsins sem gæti magnað upp jarðskjálftaálagið á brúargólfið.

Frekari rannsóknir á togkrafti kaplanna væri einnig hægt að gera með það markmið að stilla togkraftana þannig að þversnið brúargólfsins geti orðið sem minnst þegar ólík álagstílfelli verka á brúargólfið. Kraftadreyfingin innan brúargólfsins getur verið mjög ólík eftir því hvort langtímaálag verkar á brúargólfið eða hámarks umferðarálag. Stilla ætti kaplana þannig að áraunin á brúargólfið verði sem minnst og brúin smíðuð þannig að brúargólfið verði lárétt þegar kaplarnir eru strekktir með þeim kröftum. Breyting á togkröftum kaplanna getur einnig breytt sveiflueiginleikum brúarinnar og það gæti haft áhrif á svörun hennar við jarðskjálftaálagi.

Hönnun brúarinnar er því langt frá því að vera lokið þótt að nýting blýgúmmílega sem jarðskjálftabúnaðs hafi verið skoðuð. Einnig er rétt að undirstrika að allar tímaraðirnar sem notaðar voru í greiningunni voru ókvarðaðar, þ.e. þær voru notaðar eins og þær voru skráðar í Suðurlandskjálftunum 2000 og 2008. Mörgum spurningum er ennþá ósvarað eins og fjallað er um að ofan.

7 Lokaorð

Í þessari ritgerð var nýting blýgúmmílega sem jarðskjálftavörn fyrir fyrirhugaða stagbrú yfir Ölfusá við Efri Laugardælaeyju skoðuð. Áður en byrjað var að greina nýju brúna var í öðrum kafla ritgerðarinnar fjallað um erlendar stagbrýr á jarðskjálftasvæðum og skoðað hvernig þær hafa verið hannaðar með tilliti til jarðskjálftaálags. Þriðji kafli fjallar um staðhætti stagbrúarinnar og hvaða jarðskjálftaálagi megi búast við. Fjórði og fimmti kafli ritgerðarinnar fjalla svo um forsendur og niðurstöður jarðskjálftagreiningar á stagbrúnni yfir Ölfusá við Efri Laugardælaeyju.

Niðurstöður greiningarinnar á stagbrúnni yfir Ölfusá við Efri Laugardælaeyju benda til þess að blýgúmmílegur geti lækkað lárétta undirstöðukrafta brúargólfsins um 90% að meðaltali þegar skráðar tímaraðir eru keyrðar á reiknilíkanið samanborið við brú án lega. Færslur brúargólfsins þegar blýgúmmílegur eru notaðar eru hinsvegar að meðaltali 35% af færslum brúargólfsins í langáttina miðað við lausa líkanið en 50% í þveráttina. Blýgúmmílegurnar eru því skilvirkari í að takmarka kraftana sem myndast í undirstöðum brúargólfsins heldur en að stjórna færslunum. Brúargólfið hegðar sér einnig frekar sem ein heild þegar blýgúmmílegur eru notaðar í stað stífra tengingu. Blýgúmmílegurnar draga því úr jarðskjálftaálaginu sem brúargólfið verður fyrir.

Niðurstöðurnar benda til þess að ákjósanlegt sé að nota blýgúmmílegur í þverátt brúarinnar en færslur brúargólfsins í langáttina þegar blýgúmmílegur eru notaðar eru meiri og valda auknu álagi á turninn. Notkun stoppara eða viðbótar dempara í langáttina sem takmarkar hámarksfærslur brúargólfsins í langáttina gæti því verið ákjósanlegt eins og Rion-Antirion og Sutong brúarinnar gera.

Lausa líkanið er ekki talið ákjósanlegur kostur vegna þess hve viðkvæmt líkanið er fyrir ósamhverfu álagi og miklar færslur eiga sér stað þegar tímaráðasettin eru keyrð á líkanið. Lausa líkanið gefur hinsvegar hugmynd um hegðun brúarinnar ef brúargólfinu er sleppt í jarðskjálftaálagi.

Verði stagbrúin byggð þá verður hún sú fyrsta sinnar tegundar á Íslandi og því mikilvægt að vanda til verka. Miklir ávinningar geta verið af nýtingu jarðskjálftabúnaðar við hönnun brúarinnar. Í þessari greinagerð var ákveðið að skoða nýtingu blýgúmmílega þar sem blýgúmmílegur er þekktur valkostur við hönnun brúa á jarðskjálftasvæðum á Íslandi. Áhugavert væri að skoða annan búnað og aðrar lausnir þar sem stagbrúin er fyrsta sinnar tegundar á Íslandi og því ekki sjálfsagt að blýgúmmílegur séu ákjósanlegasti valkosturinn.

Heimildir

- Bessason, B. (1992). Assessment of Earthquake Loading and Response of Seismically Isolated Bridges, Ph.D. dissertation, Norwegian Institute of Technology.
- Bessason, B. (2011) *Minnisblað 1: Jarðskjálftaálag. Minnisblað um skilgreiningu jarðskjálftaálags fyrir hönnun á brú yfir Ölfusá*. Janúar 2011, yfirfarið í nóvember 2014.
- Bessason, B., og Bjarnason, J. Ö. (2016). Seismic vulnerability of low-rise residential buildings based on damage data from three earthquakes (Mw6. 5, 6.5 and 6.3). *Engineering Structures*, 111, 64-79.
- Bessason, B., og Hafliðason, E. (2004). Recorded and numerical strong motion response of a base-isolated bridge. *Earthquake Spectra*, 20(2), 309-332.
- Bessason, B., Hafliðason, E. og Guðmundsson, G. V. (2019). Performance of Base Isolated Bridges in Recent South Iceland Earthquakes. *Proceedings of the International Conference on Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (pp. 123-135). Springer, Cham.
- Bessason, B. og Kaynia, A. M. (2002). Site amplification in lava rock on soft sediments. *Soil dynamics and Earthquake engineering*, 22(7), 525-540.
- Bittner, R. B., Safaqah, O., Zhang, X., og Jensen, O. J. (2007). Design and construction of the Sutong Bridge foundations. *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 1(1), 2-18.
- Bjarnason, R. Þ. (2014). *Kerfisauðkenning á Ölfusárbrú. Sveifflugreining á mannvirki í rekstri*. Meistararitgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóla Íslands.
- Casado, A. C. (2011). *Seismic behaviour of cable-stayed bridges: design, analysis and seismic devices* (Doktorsritgerð). Universidad Politécnica de Madrid.
- Chadwell, C. B., Fenves, G. L., og Mahin, S. A. (2003). Near source earthquake effects on the Jilu cable-stayed bridge in the 21 September 1999 chi-chi taiwan earthquake. *Proceedings of the Community Workshop On Computational Simulation and Visualization Environment for NEES*. National Science Foundation, University of Kansas, Lawrence, Kan, USA.
- Chang, K. C., Chang, D. W., Tsai, M. H. og Sung, Y. C. (2000). Seismic Performance of Highway Bridges. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 2(1), 55-77.

- Christopoulos, C., Filiatrault, A., og Bertero, V. V. (2006). *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. Pavia, Italy: IUSS Press.
- Combault, J., og Teyssandier, J. P. (2005). The Rion-Antirion bridge: concept, design and construction. In *Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond* (pp. 1-12).
- Decriem, J., T. Árnadóttir, A. Hooper, H. Geirsson, F. Sigmundsson, M. Keiding, B. G. Ófeigsson, S. Hreinsdóttir, P. Einarsson, P. LaFemina og R. A. Bennett. (2010). The 2008 May 29 earthquake doublet in SWIce-land. *Geophysical Journal International*.181(2), 1128–1146, doi:10.1111/-j.1365-246X.2010.04565.x
- Einarsson, P. (2008). Plater boundaries, rifts and transforms in Iceland. *Jökull*, 58(12), 35-58.
- Einarsson, P. (2009). Um jarðskjálfta og sprunguhreyfingar í nágrenni við nýtt brúarstæði á Ölfusá við Selfoss. Skýrsla unnin fyrir Vegagerð ríkisins. *Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands*.
- Enomoto, M., Morikawa, H., Takano, H., Ogasawara, M., Hayashi, H., Takahashi, W., ... & Inoue, M. (1995, August). Design and construction of Tsurumi Tsubasa Bridge superstructure. In *Proceedings of the 4th International Bridge Engineering Conference, San Francisco. Transportation Research Board, Washington, DC* (pp. 249-258).
- EUROCODE, N. (1994). 8: Design provisions for earthquake resistance of structures. *Part, 2*, 1998-2.
- Gimsing, N. J., og Georgakis, C. T. (2011). *Cable supported bridges: Concept and design*. John Wiley & Sons.
- Guðmundsson, G.B., Halldórsson, P., og Stefánsson, R. (2000). Jarðskjálftarnir miklu á Suðurlandi 17. og 21. júní 2000. *Veðurstofa Íslands – Greinargerð VÍ-G00011-JA05*. Report, *Icelandic Meteorological Office*, 9pp.
- Halldórsson, B., Mavroeidis, G. P., & Papageorgiou, A. S. (2010). Near-fault and far-field strong ground-motion simulation for earthquake engineering applications using the specific barrier model. *Journal Of Structural Engineering*, 137(3), 433-444.
- Halldórsson, B., Ólafsson, S., Sigbjörnsson, R. (2007). A fast and efficient simulation of the far-fault and near-fault earthquake ground motion associated with the June 17 and 21, 2000, earthquakes in South Iceland. *Journal of Earthquake Engineering* 11.3 (2007): 343-370.
- Hameed, A., Koo, M. S., Dai Do, T., & Jeong, J. H. (2008). Effect of lead rubber bearing characteristics on the response of seismic-isolated bridges. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12(3), 187-196.

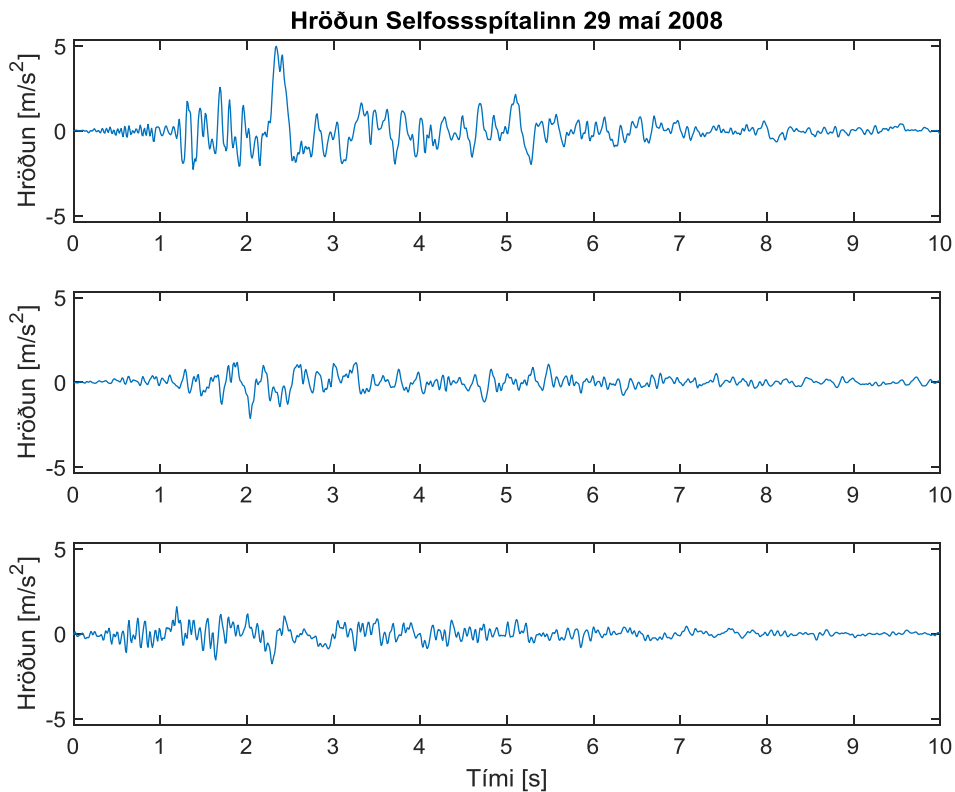
- Hanno, H., Takahashi, M., Tsuno, K., & Fujino, Y. SEISMIC RETROFIT OF LARGE CABLE-SUPPORTED BRIDGES ON TOKYO METROPOLITAN EXPRESSWAYS. *Lateral*, 3(8.57), 4- 2000.
- Imsland, P., (2013). Jarðskjálftasprungur, í bókinni: *Náttúruvá á Íslandi, eldgos og jarðskjálftar* (Ritsj. Sólnes, J., Sigmundsson, F., Bessason, B.), Háskólaútgáfan og Viðlagatrygging Íslands.
- Infanti, S., Papanikolas, P., Benzoni, G., & Castellano, M. G. (2004). Rion-Antirion Bridge: Design and full-scale testing of the seismic protection devices. In *Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering*. Vancouver: FIP Industriale.
- Jangid, R. S. (2004). Seismic response of isolated bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 9(2), 156-166.
- Jangid, R. S. (2007). Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions. *Engineering structures*, 29(10), 2503-2513.
- Javanmardi, A., Ibrahim, Z., Ghaedi, K., Jameel, M., Khatibi, H., & Suhatri, M. (2017). Seismic response characteristics of a base isolated cable-stayed bridge under moderate and strong ground motions. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(2), 419-432.
- Jónsson, M. H. (2009). *Svörun Óseyrarbrúar við Suðurlands skjálftanum 2008* (meistararitgerð), Uhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóli Íslands.
- Jónsson, M. H., Bessason, B. og Haflidason, E. (2010). Earthquake response of a base-isolated bridge subjected to strong near-fault ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(6), 447-455
- Kosa, K., & Tasaki, K. (2003). Detailed investigation of PC Cable-stayed Bridge damaged in the 1999 Taiwan earthquake. In *Proceedings of the 19th US-Japan Bridge Engineering Workshop, Tsukuba Science City, Japan* (pp. 27-29).
- Lecinq, B., Messein, J. P., og Boutillon, L. (2003). The rion antirion bridge stay cables; a seismic approach. In *FIB symposium; concrete structures in seismic regions, Athens (Greece)* (p. 310).
- Martínez-Rodrigo, M. D., & Filiatrault, A. (2015). A case study on the application of passive control and seismic isolation techniques to cable-stayed bridges: A comparative investigation through non-linear dynamic analyses. *Engineering Structures*, 99, 232-252.
- Minnisblað Eflu, (2008). *Rannsóknarboranir fyrir brú á Ölfusá norðan Selfoss*. Verkfræðistofan Eflan.

- Óskarsson, K. U. (2015). Brú á Ölfusá við Efri Laugardælaeyju – forhönnun. *Reikniskýrsla*. Verkfræðistofan Efla.
- Óskarsson, K. U. (2016). Brú á Ölfusá við Efri Laugardælaeyju – Greinargerð með forhönnun. *Áfangaskýrsla forhönnunar, samantekt vinnu áráanna 2014-2015*. Verkfræðistofan Efla.
- Óskarsson, K.U. (2017). Brú á Ölfusá – forhönnun. *Stálturn – samanburður við steipt þversnið*. Minnisblað. Verkfræðistofan Efla.
- Pecker, A. (2004). Design and construction of the Rion Antirion Bridge. In *Geotechnical Engineering for Transportation Projects* (pp. 216-240).
- Priestley, M. N., Seible, F. og Calvi, G. M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley & Sons.
- Providakis, C. P. (2008). Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations. *Engineering Structures*, 30(5), 1187-1198.
- Rupakhety, R., Halldorsson, B., & Sigbjörnsson, R. (2010). Estimating coseismic deformations from near source strong motion records: Methods and case studies. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(4), 787-811.
- Rupakhety, R., Sigurdsson, S. U., Papageorgiou, A. S., & Sigbjörnsson, R. (2011). Quantification of ground-motion parameters and response spectra in the near-fault region. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(4), 893-930.
- Rupakhety, R., & Sigbjörnsson, R. (2009). Ground-motion prediction equations (GMPEs) for inelastic displacement and ductility demands of constant-strength SDOF systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(3), 661-679.
- Rupakhety, R., & Sigbjörnsson, R. (2011). Can simple pulses adequately represent near-fault ground motions?. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(8), 1260-1272.
- Samgönguráð. (2012). *Samgönguáætlun 2011-2022 – Kynningarrit*. Vegagerðin. Ritstjóri Þorsteinn R. Hermansson. Prentsmiðjan Oddi ehf.
- Shen, X., Camara, A., & Ye, A. (2015). Effects of seismic devices on transverse responses of piers in the Sutong Bridge. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14(4), 611-623.
- Sigurgeirsdóttir, Ó. K. (2010). *Stagbrú yfir Ölfusá. Hönnun og athuganir á mismunafærslum* (Masters dissertation, Háskóli Íslands).
- Skinner, R. I., Robinson, W. H., & McVerry, G. H. (1993). An introduction to seismic isolation.

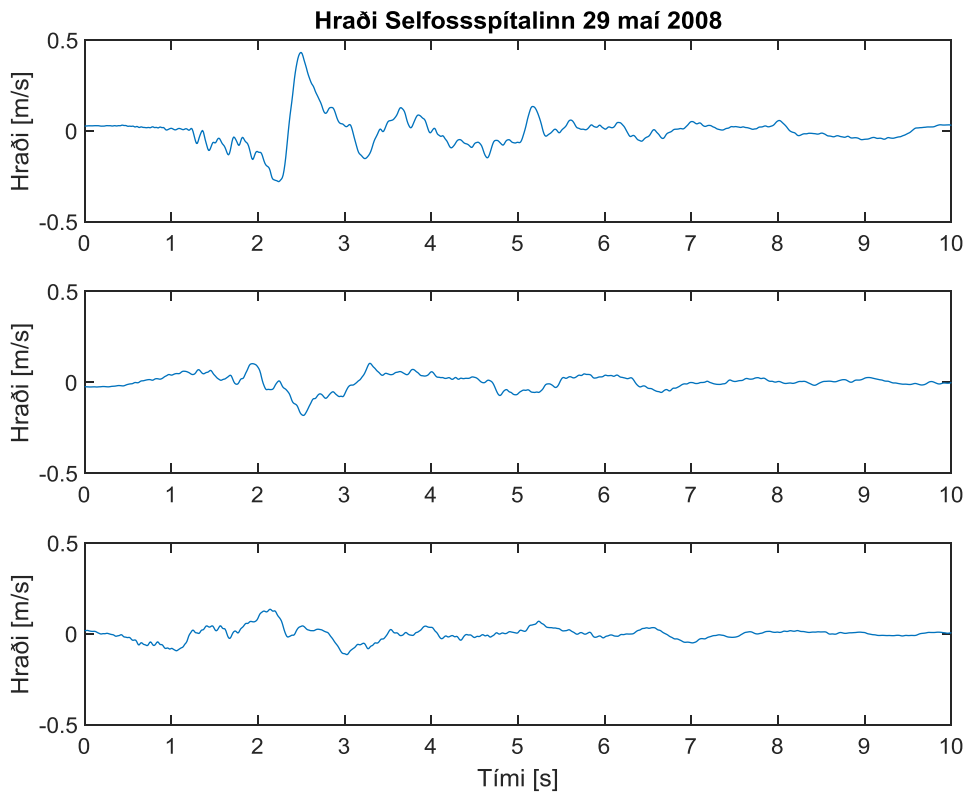
- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, 68(1), 199-222.
- Sólnes, J., Sigmundsson, F., Bessason, B. (2013). Náttúruvá á Íslandi, eldgos og jarðskjálftar. Háskólaútgáfan og Viðlagatrygging Íslands.
- Taflanidis, A. A. (2011). Optimal probabilistic design of seismic dampers for the protection of isolated bridges against near-fault seismic excitations. *Engineering structures*, 33(12), 3496-3508.
- Teyssandier, J. P. (2002). Corinthian crossing. *Civil engineering*, 72(10), 42-49.
- Tubaldi, E., Mitoulis, S. A., & Ahmadi, H. (2018). Comparison of different models for high damping rubber bearings in seismically isolated bridges. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 329-345.
- Valdebenito, G., & Aparicio Bengoechea, Á. C. (2005). *Comportamiento sísmico de puentes atirantados y disipación de la energía adicional: un estado del conocimiento*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).
- Xigang, Z., Hong, Y., Minshan, P., Jie, D., & Lin, X. (2009). General design of Sutong bridge. *Engineering Sciences*, 7(1), 12-17.
- Þingskjal 1706. (2015-2016). Tillaga til þingsályktunar um samgönguáætlun fyrir árin 2015-2026. *Alþingistíðindi A-deild*, 145. Sótt 19. júlí 2018 af: <https://www.althingi.is/altext/145/s/1706.html>
- Þingskjal 174. (2018-2019). Tillaga til þingsályktunar um samgönguáætlun fyrir árin 2019-2033. *Alþingistíðindi A-deild*, 149. Sótt 14. mars 2019 af: <https://www.althingi.is/altext/149/s/0174.html>
- Þorsteinsson, T. (2014). *Jarðskjálftademparar í brúargerð*. Meistararitgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóla Íslands.

A. Viðauki, myndir af tímaröðum

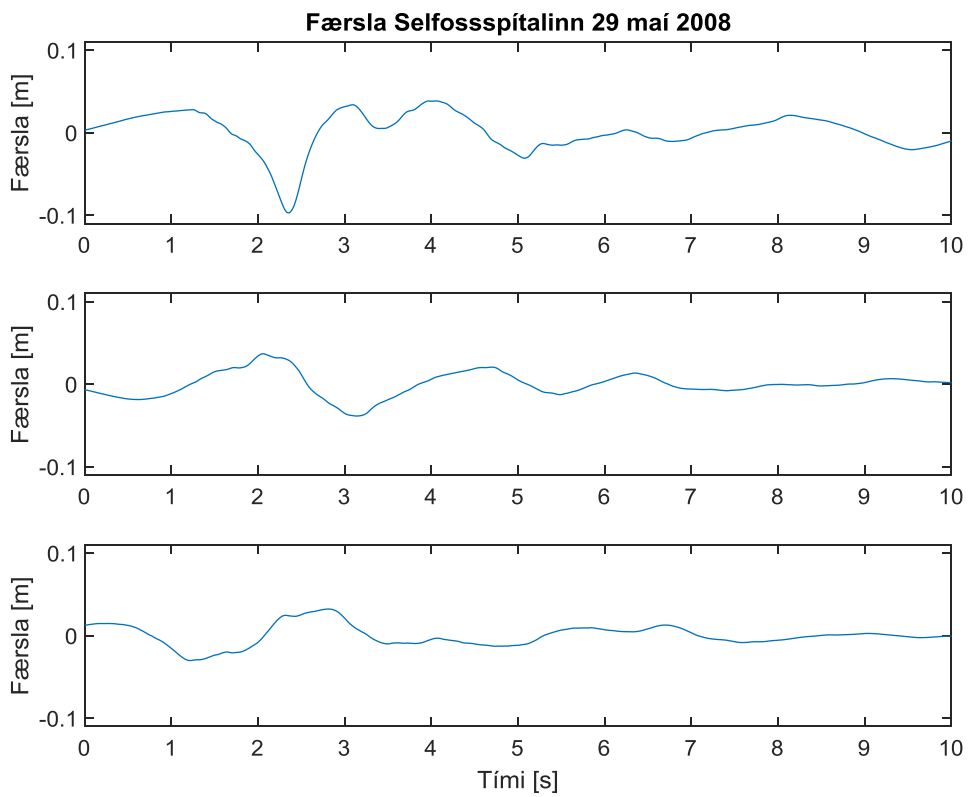
Á myndum A01 til A15 eru sýnd gröf af hröðun, hraða og færslu tímaraðanna sem eru notaðar í tímaraðgreiningunni. Á hverri mynd eru tímaraðirnar sýndar fyrir mælda stefnu í x, y og z hnit mælisins, þ.e. tvær láréttar stefnur hornréttar á hvor aðra og lóðrétta stefnu.



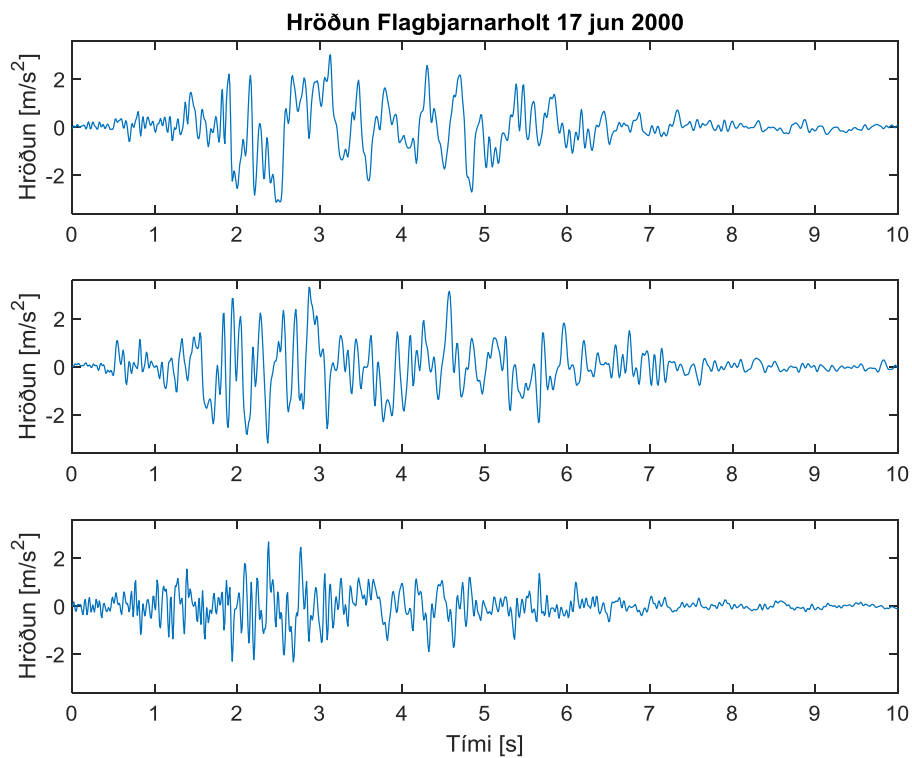
Mynd A.1 Hröðunartímaraðir mældar í Selfosspítalanum 29 maí árið 2008 í x, y og z stefnu.



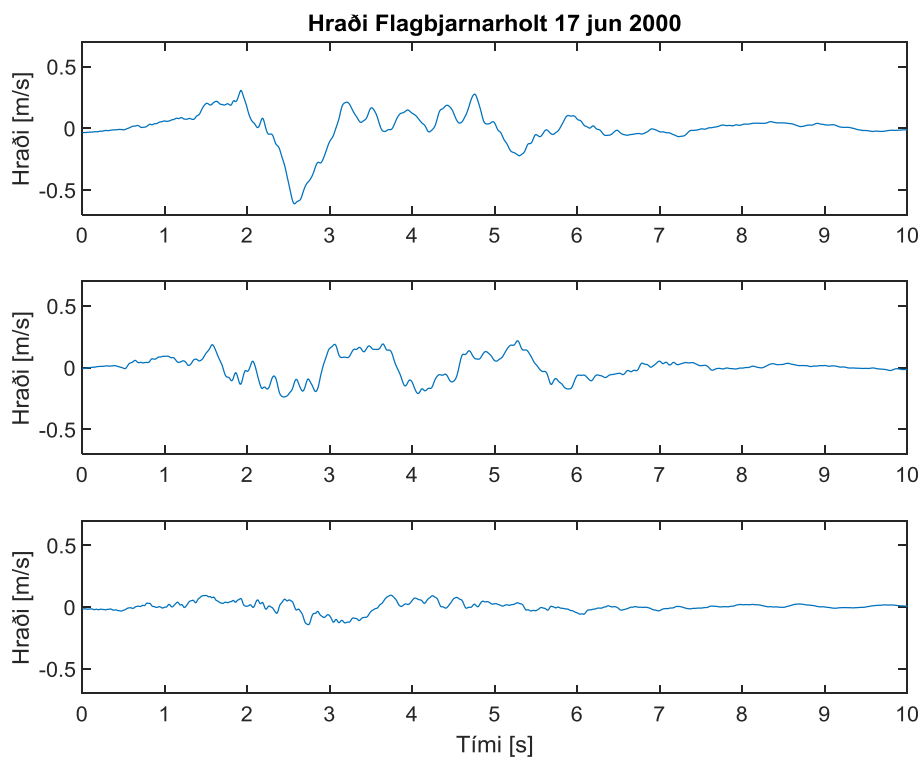
Mynd A.2 Hraðatímaraðir mældar í Selfosspítalanum 29 maí árið 2008 í x, y og z stefnu.



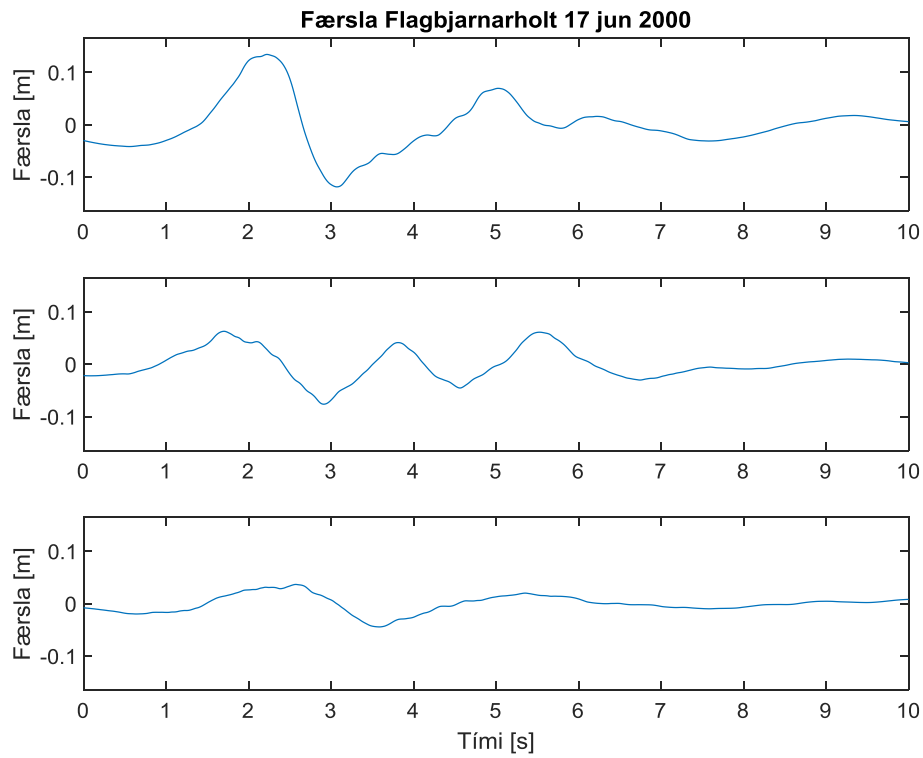
Mynd A.3 Færslutímaraðir mældar í Selfosspítalanum 29 maí árið 2008 í x, y og z stefnu.



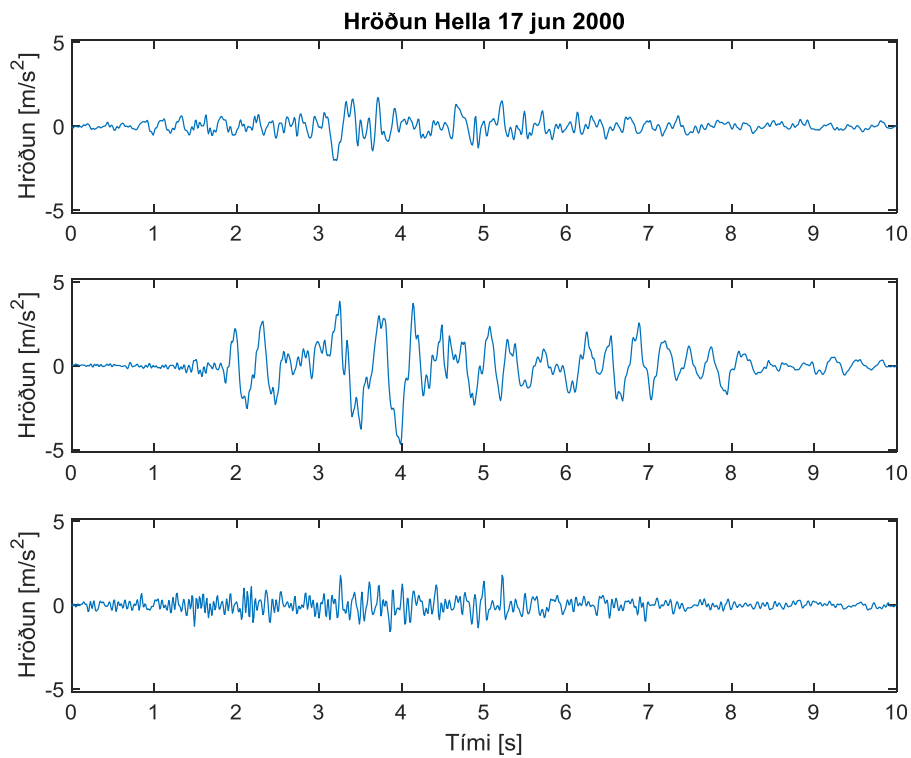
Mynd A.4 Hröðunartímaraðir mældar á Flagbjarnarholti 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



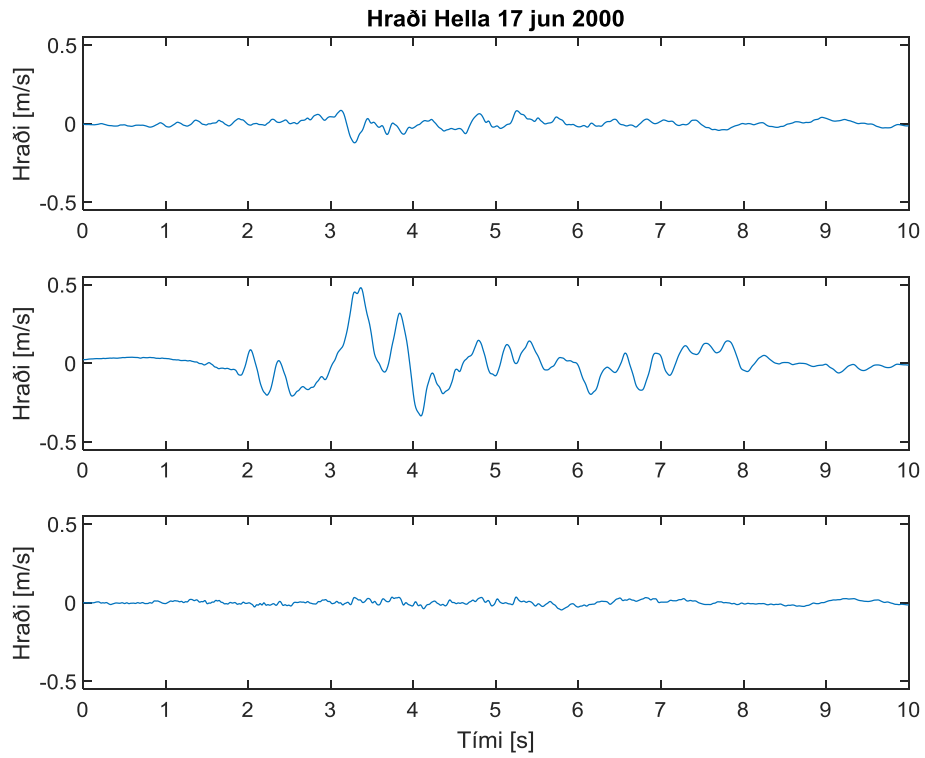
Mynd A.5 Hraðatímaraðir mældar á Flagbjarnarholti 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



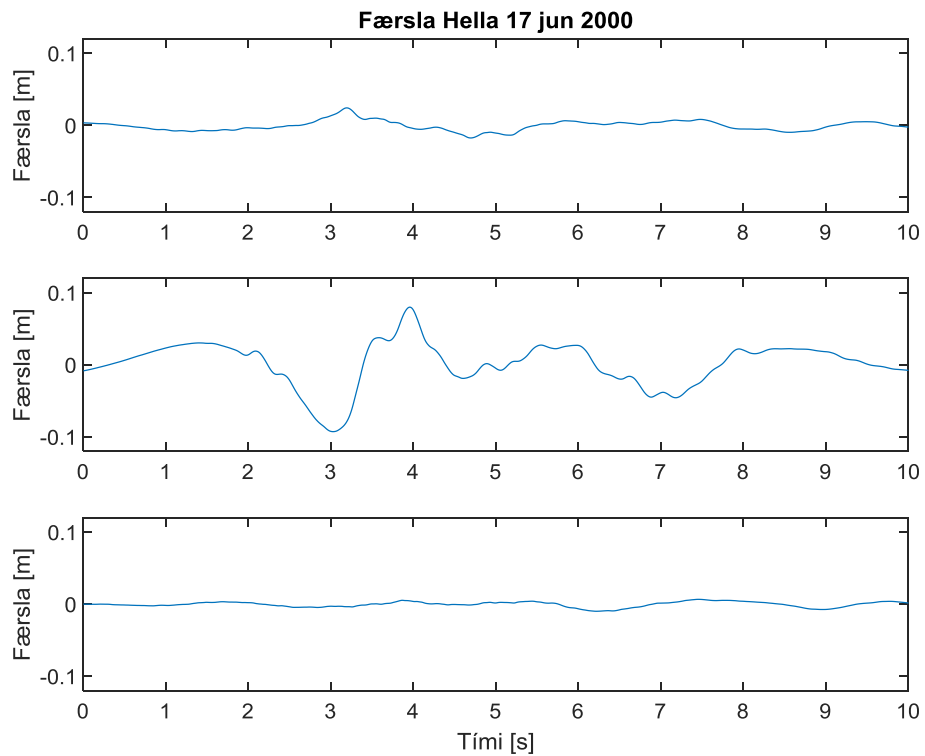
Mynd A.6 Færslutímaraðir mældar á Flagbjarnarholti 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



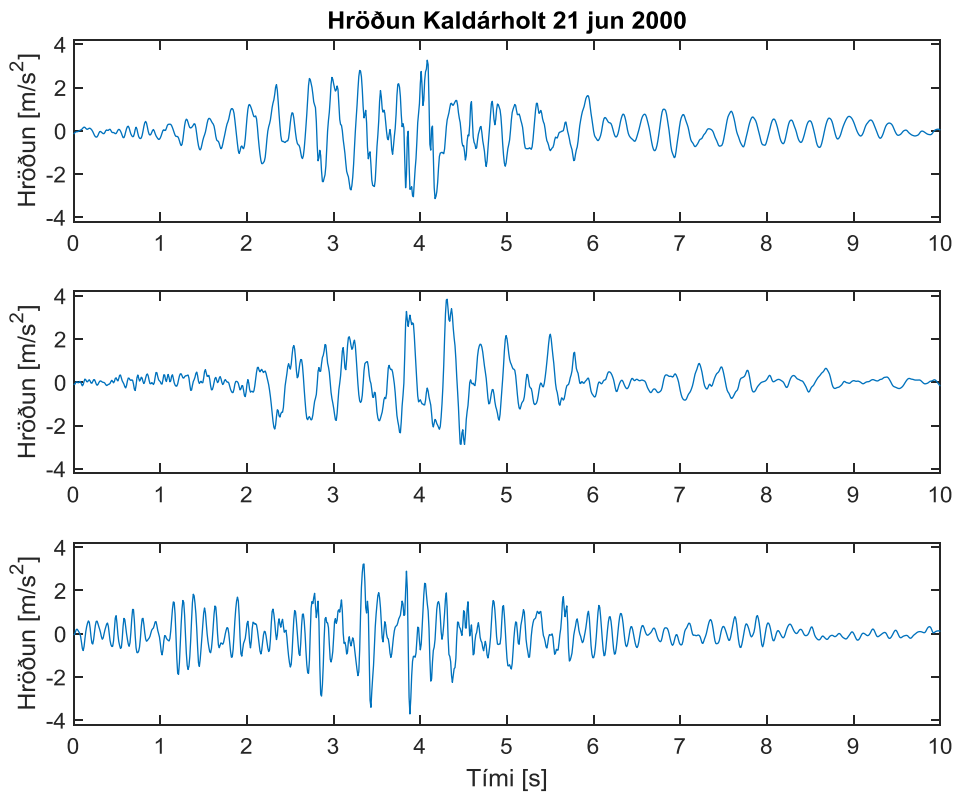
Mynd A.7 Hröðunartímaraðir mældar á Helli 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



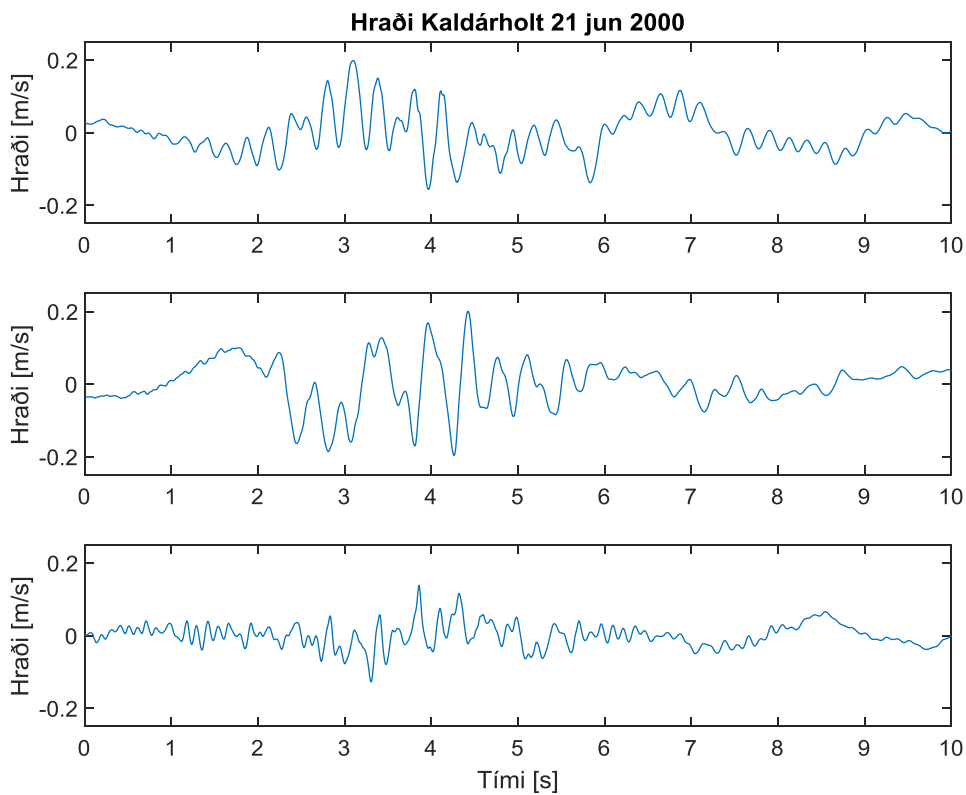
Mynd A.8 Hraðatímaraðir mældar á Hella 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



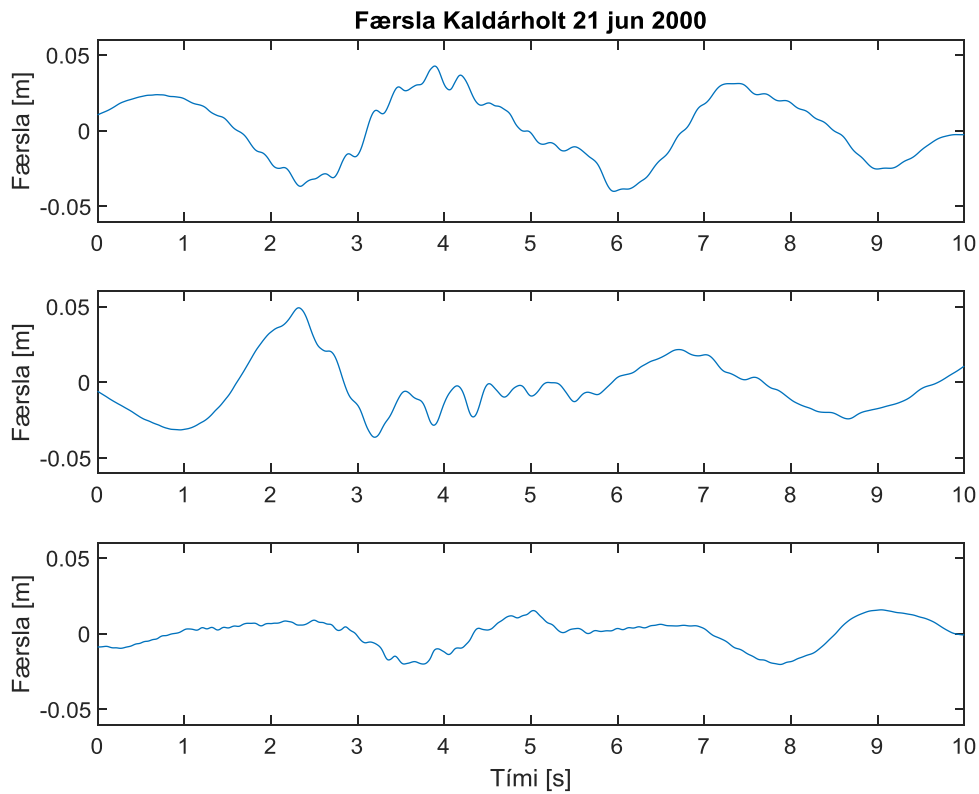
Mynd A.9 Færslutímaraðir mældar á Hella 17 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



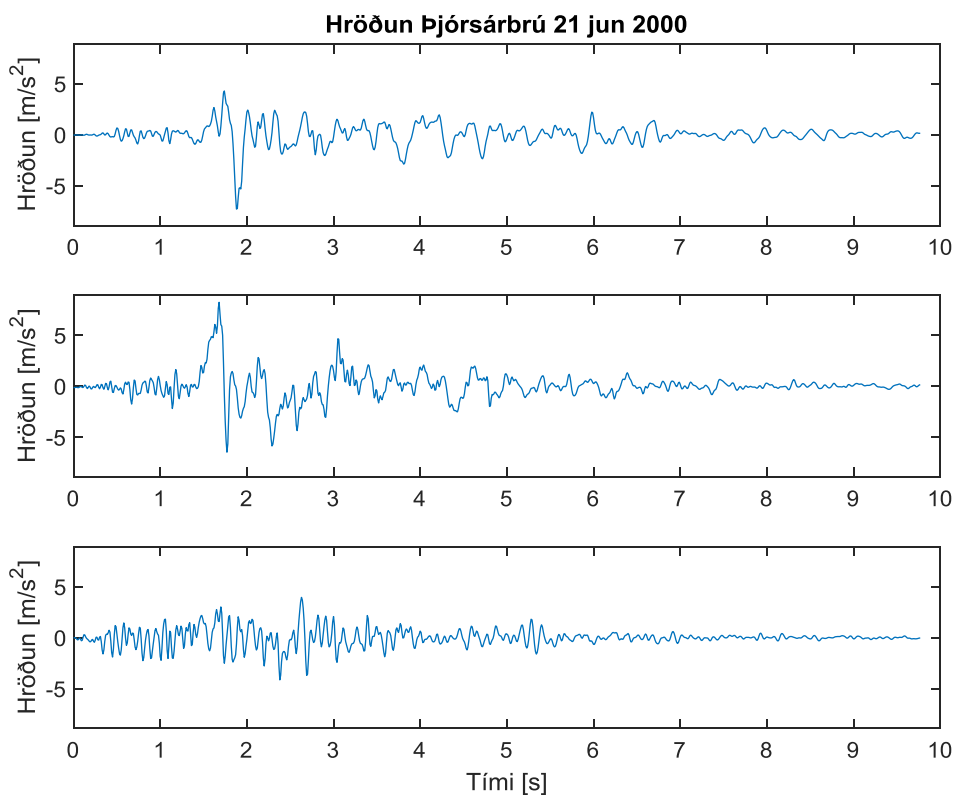
Mynd A.10 Hröðunartímaraðir mældar á Kaldárholti 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



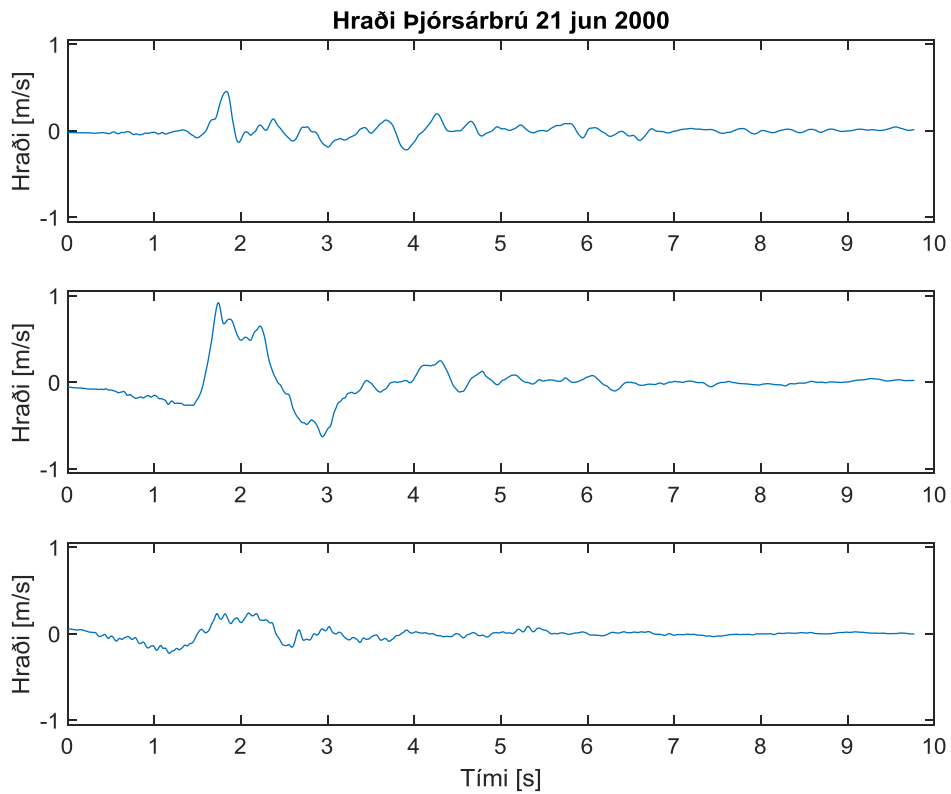
Mynd A.11 Hraðatímaraðir mældar á Kaldárholti 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



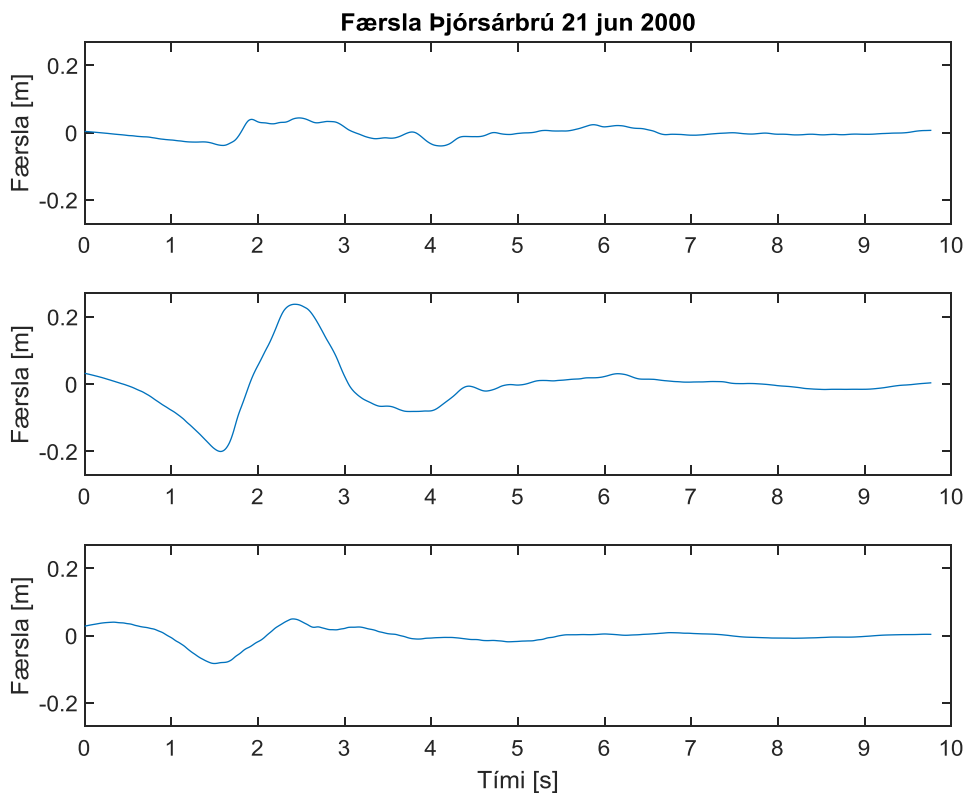
Mynd A.12 Færslutímaraðir mældar á Kaldárholti 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



Mynd A.13 Hröðunartímaraðir mældar á Þjórásárbrú 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



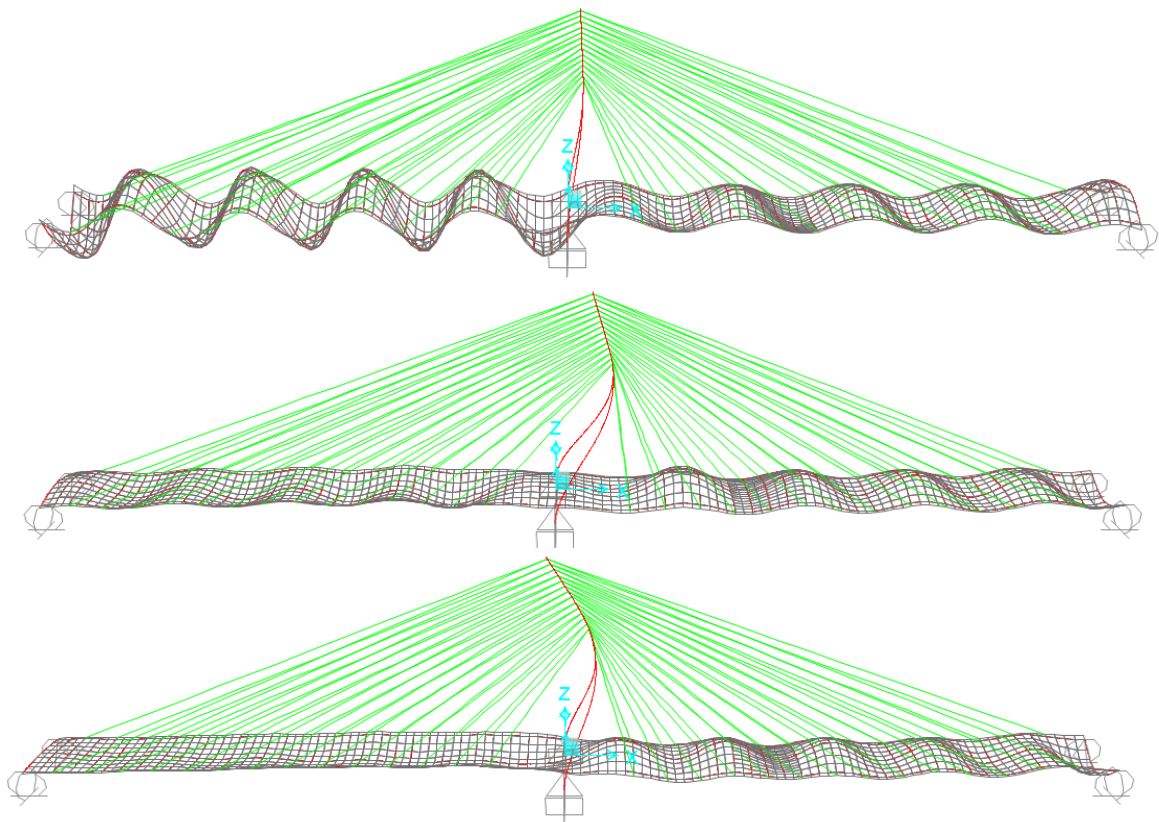
Mynd A.14 Hraðatímaraðir mældar á Þjórsárbrú 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.



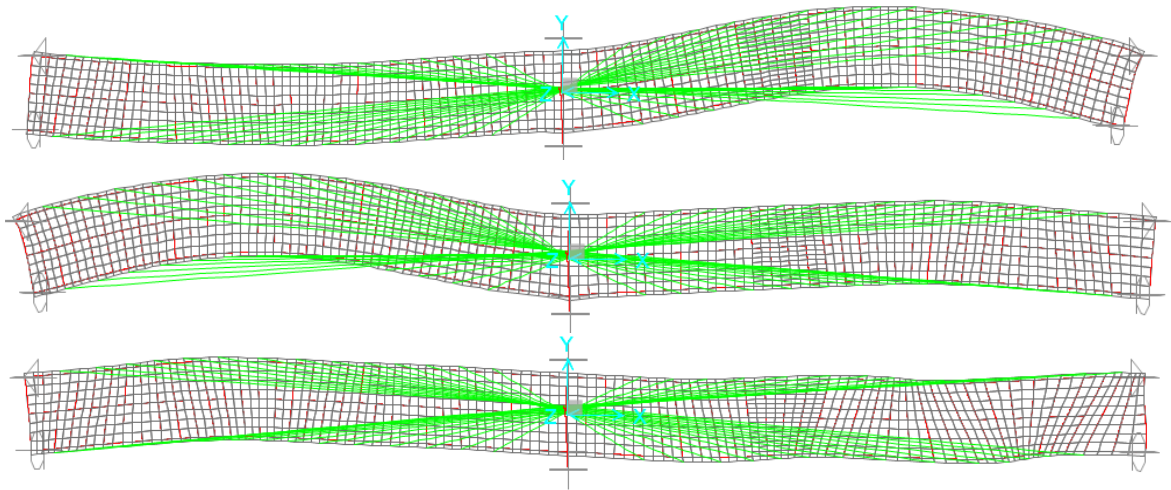
Mynd A.15 Færslutímaraðir mældar á Þjórsárbrú 21 júní árið 2000 í x, y og z stefnu.

B. Viðauki, myndir af fyrstu sveifluformum brúarinnar

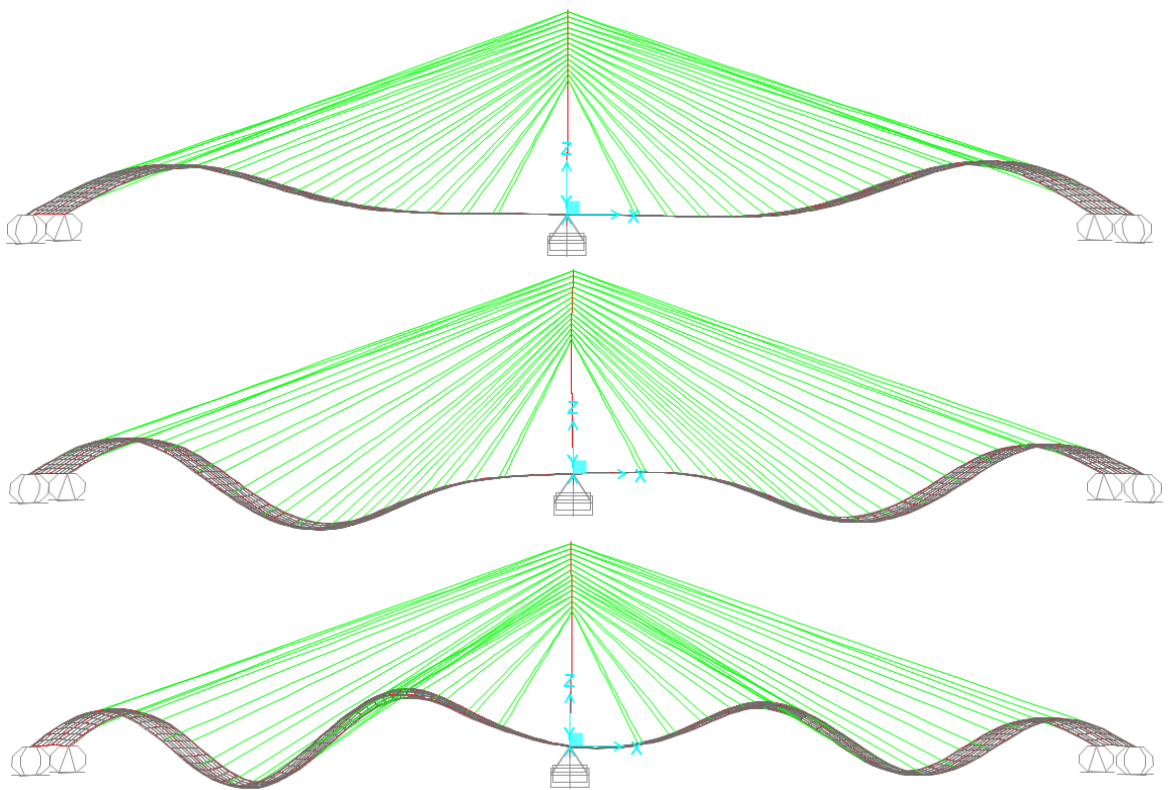
Í þessum viðauka eru fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í hverja stefnu sýnd. Upphaflega líkanið má sjá á myndum B01 til B03, á myndum B04 til B06 má sjá blýgúmmílegu líkanið og á myndum B07 til B09 má sjá lausa líkanið.



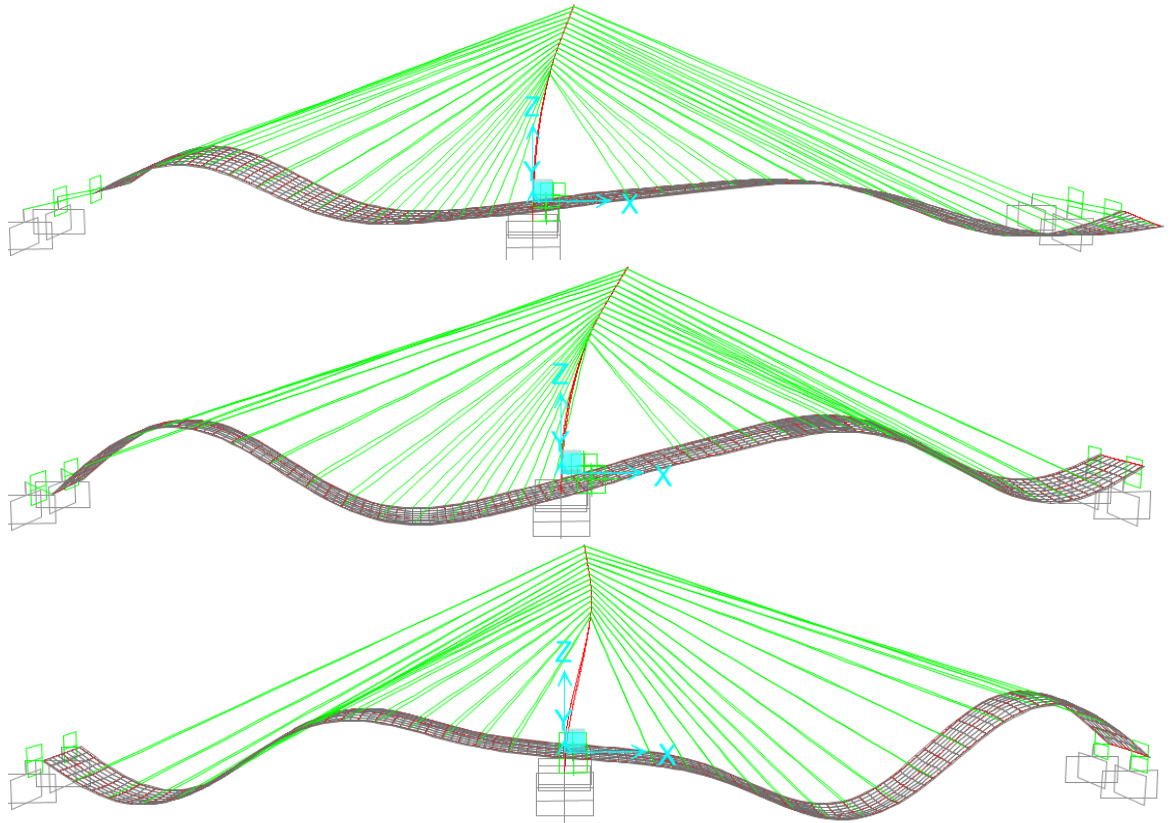
Mynd B.1 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í langáttina með upphaflegu undirstöðuskilyrðunum.



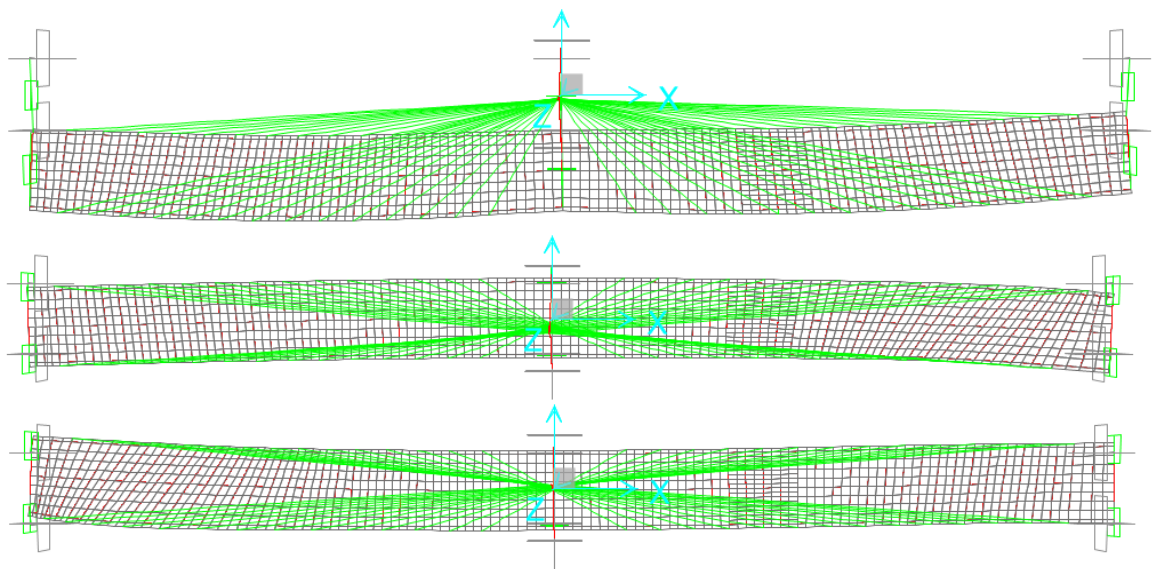
Mynd B.2 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í þveráttina með upphaflegu undirstöðuskilyrðunum.



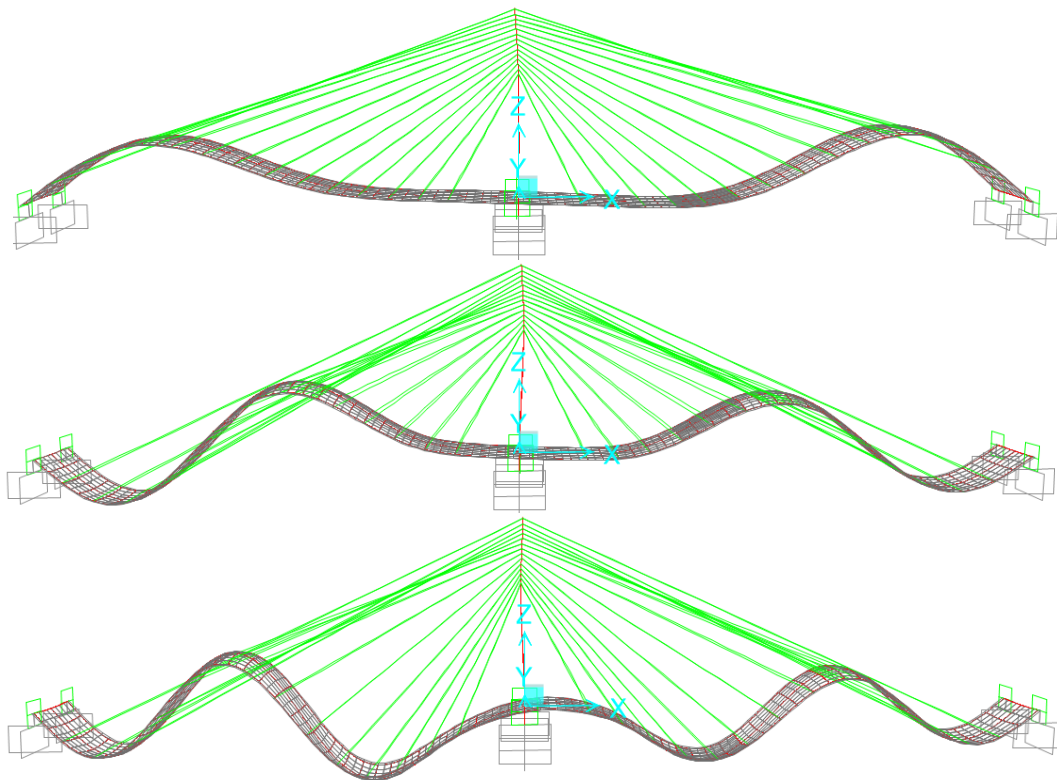
Mynd B.3 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í lóðrétta stefnu með upphaflegu undirstöðuskilyrðunum.



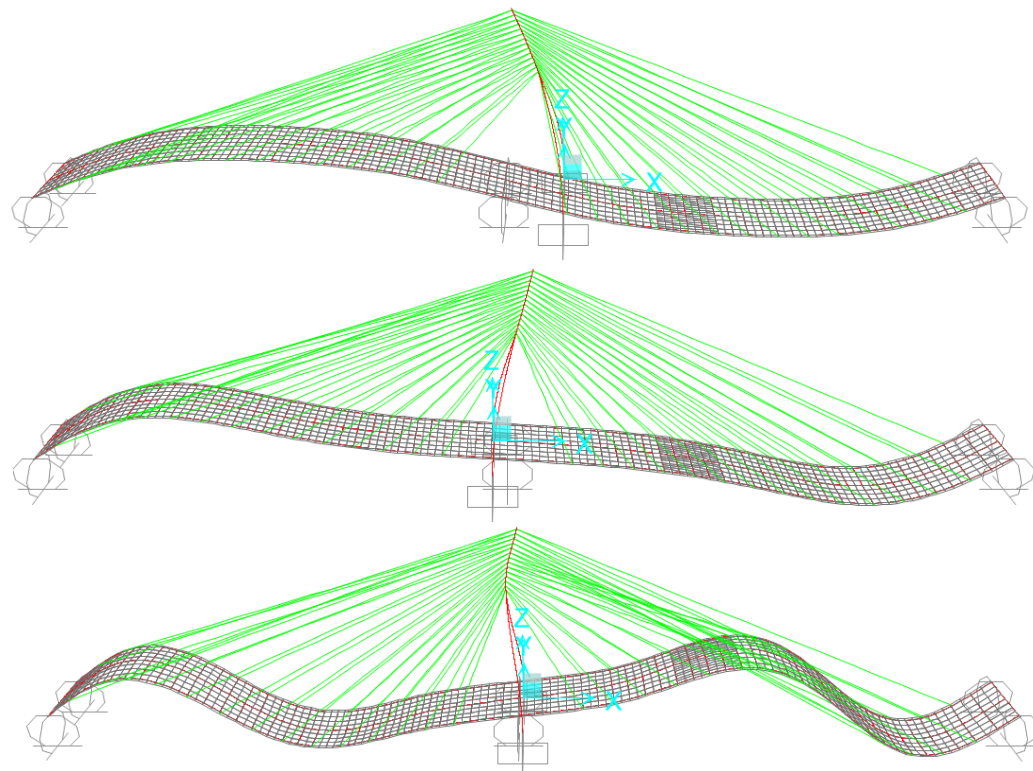
Mynd B.4 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í langáttina með blýgúmmúlegum.



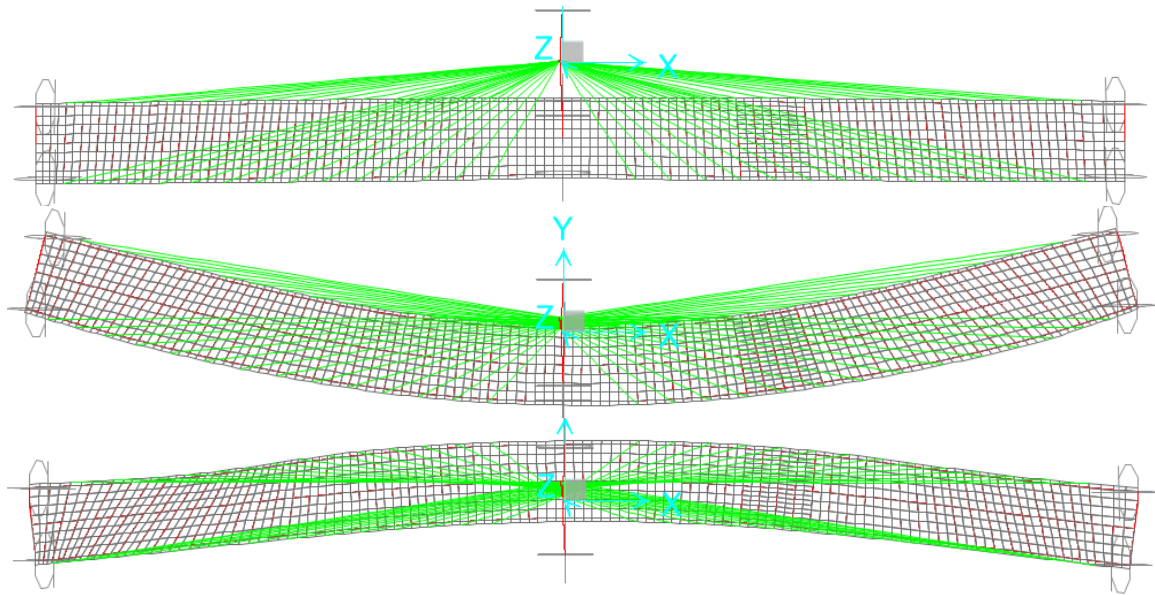
Mynd B.5 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í þveráttina með blýgúmmúlegum.



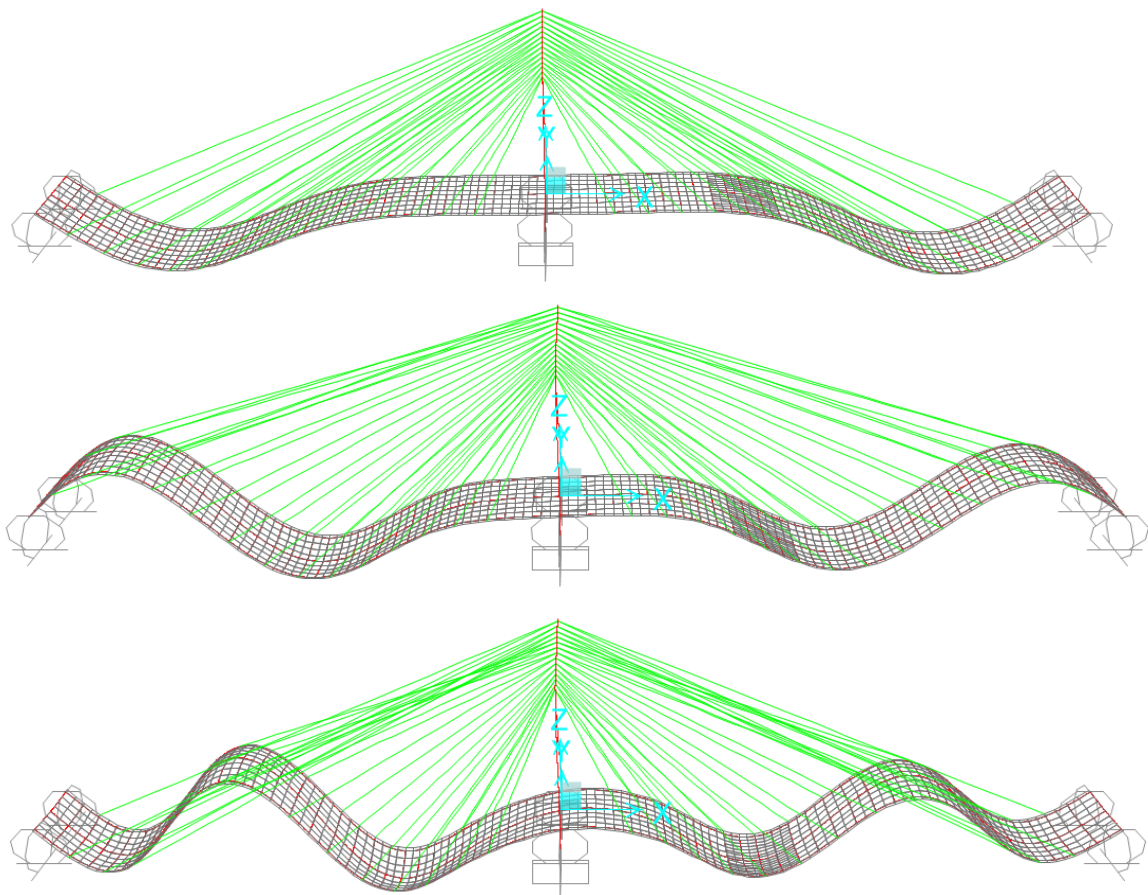
Mynd B.6 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í lóðrétta stefnu með blýgúmmílegum.



Mynd B.7 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í langáttina þegar hún hreyfist óhindruð í lárétta plani.



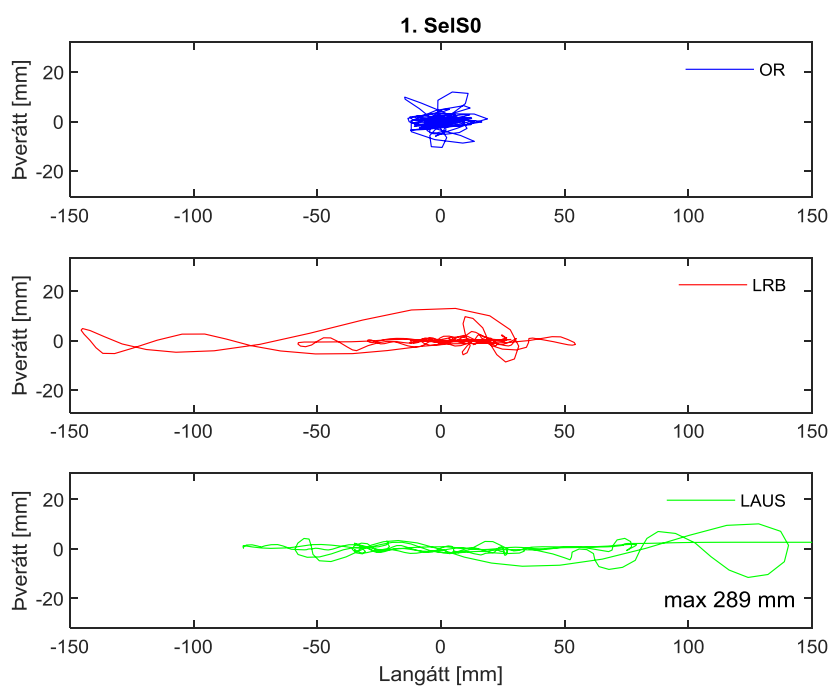
Mynd B.8 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í þveráttina þegar hún hreyfist óhindruð í láréttu plani.



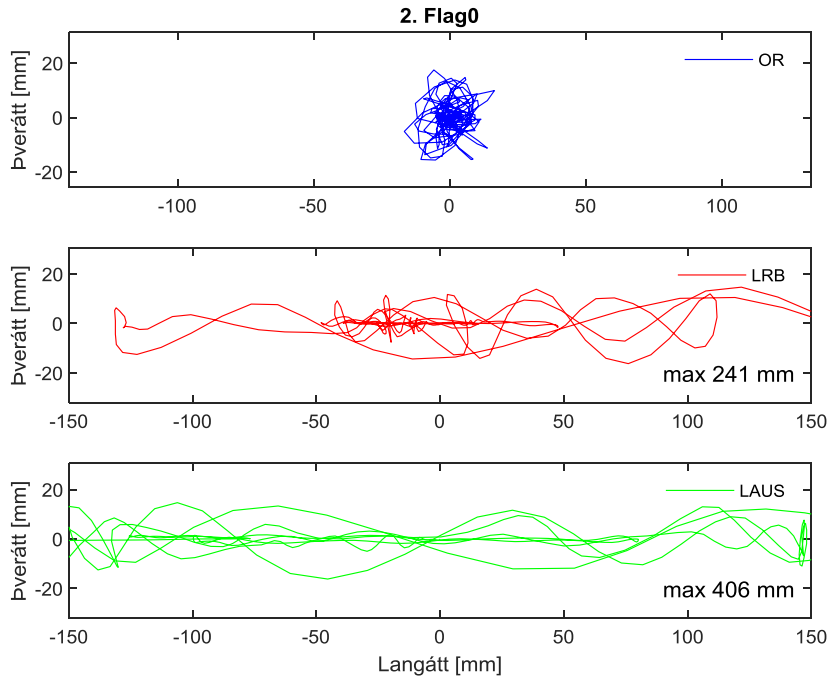
Mynd B.9 Fyrstu þrjú sveifluform brúarinnar í lóðrétta stefnu þegar hún hreyfist óhindruð í láréttu plani.

C. Viðauki, myndir af hreyfingu turntoppsins

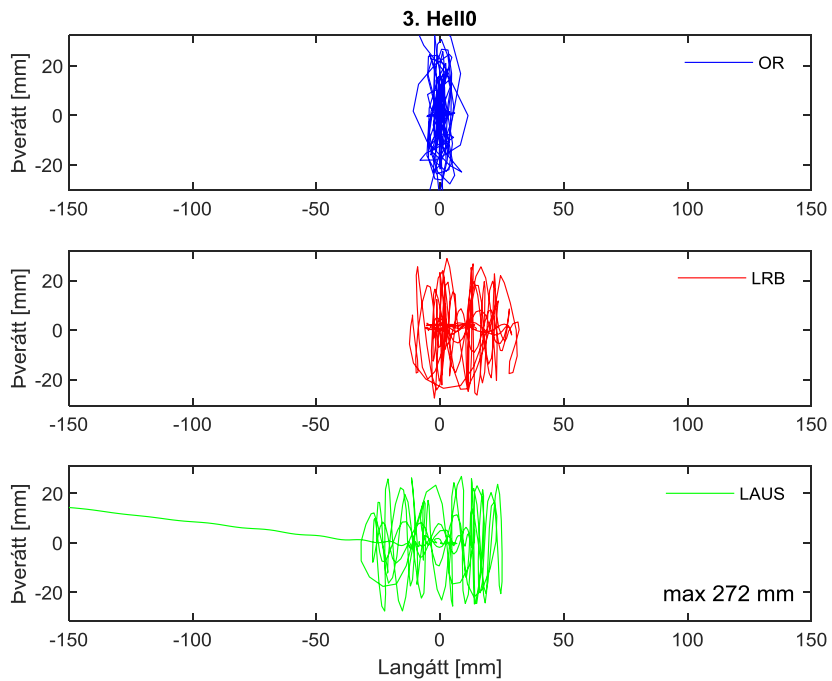
Í þessum viðauka er hreyfing turntoppsins sýnd á myndum C01 til C10 þegar tímaraðasettin eru keyrð á líkönin. Búið er að leiðrétta fyrir mismunandi upphafsstöðu turntoppsins á milli líkananna þegar kaplarnir eru strekktir. Turntoppurinn byrjar því í núllpunktinum í öllum líkönunum. Hámarksfærsla turntoppsins (óháð stefnu) er sýnd inn á gröfunum ef turntoppurinn fer út fyrir grafið.



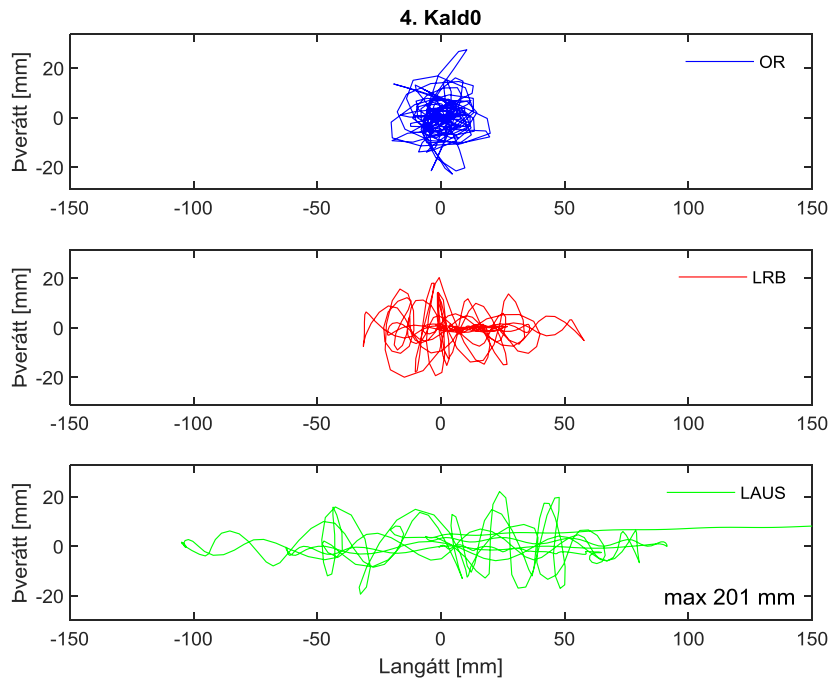
Mynd C.1 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið SelS0 er keyrt á líkönin.



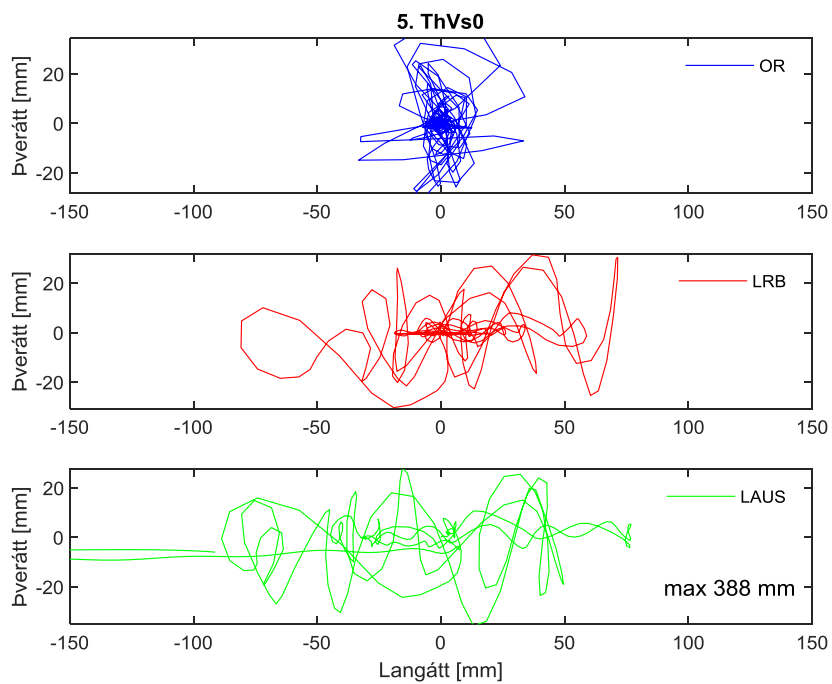
Mynd C.2 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Flag0 er keyrt á líkönin.



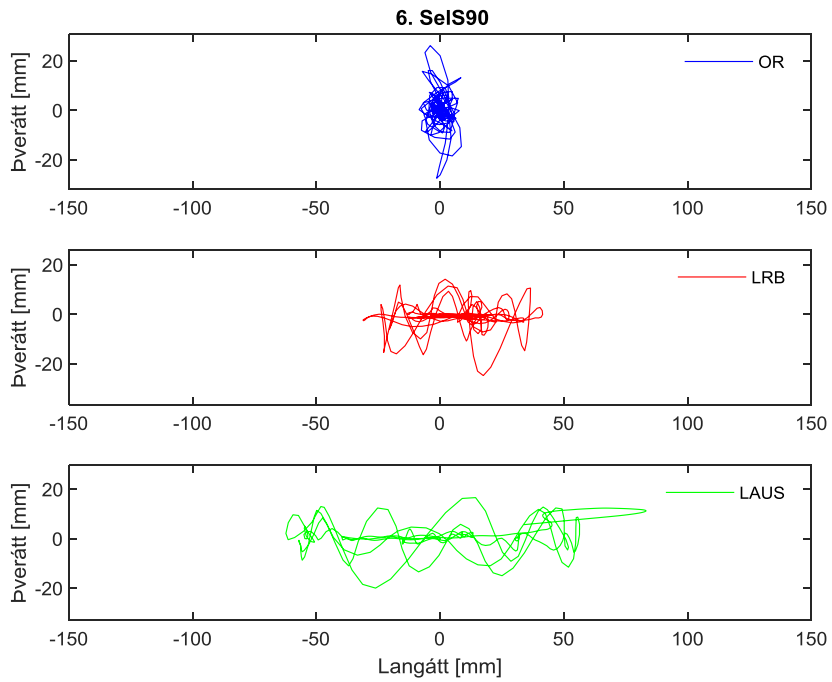
Mynd C.3 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Hell0 er keyrt á líkönin.



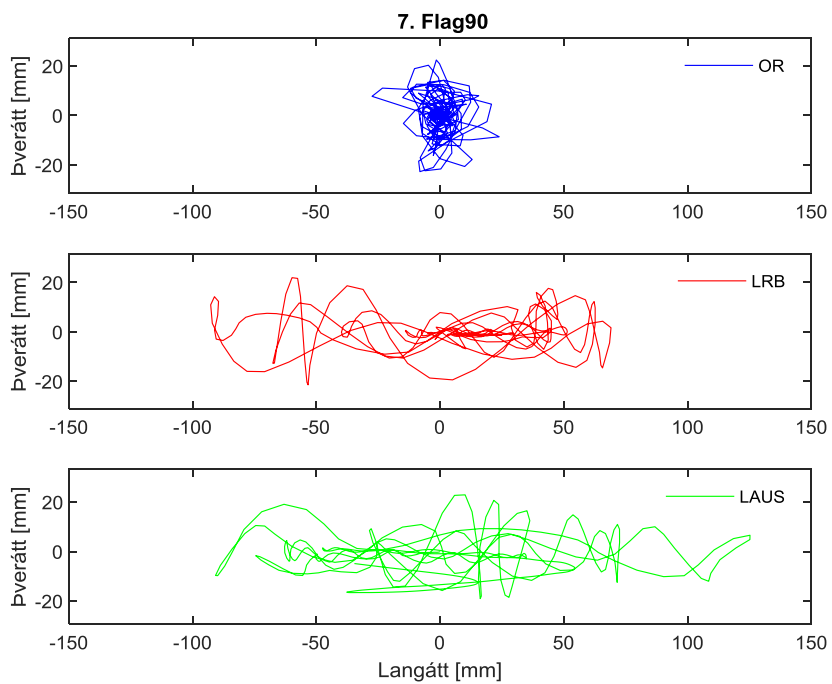
Mynd C.4 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Kald0 er keyrt á líkönin.



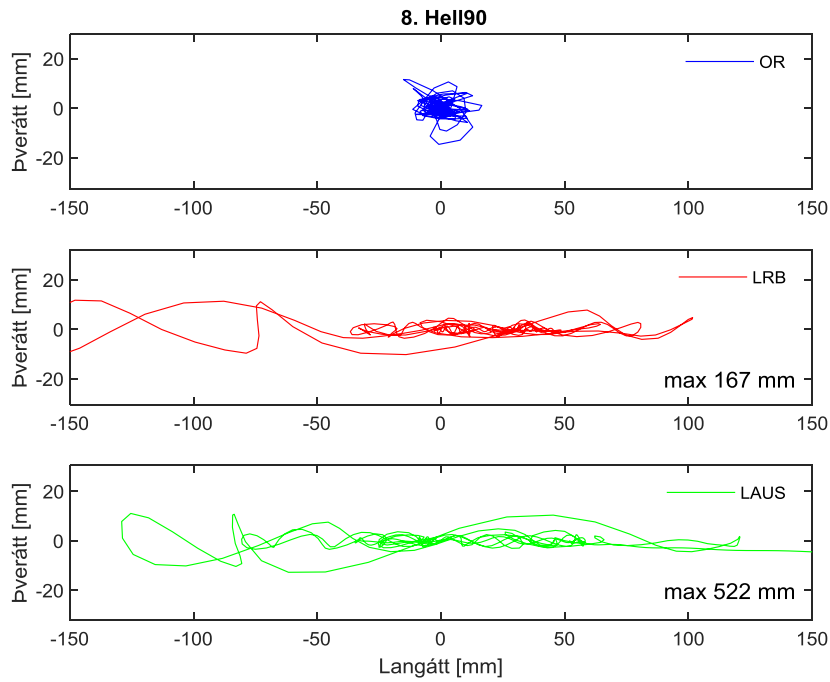
Mynd C.5 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið ThVs0 er keyrt á líkönin.



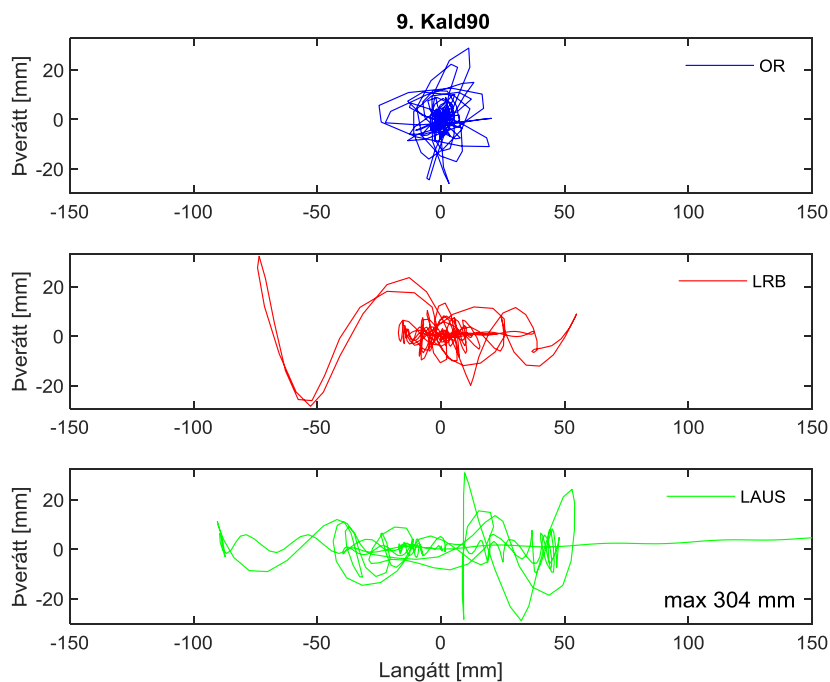
Mynd C.6 Hreyfing turntoppsins þegar álagstílfellið SeIS90 er keyrt á líkönin.



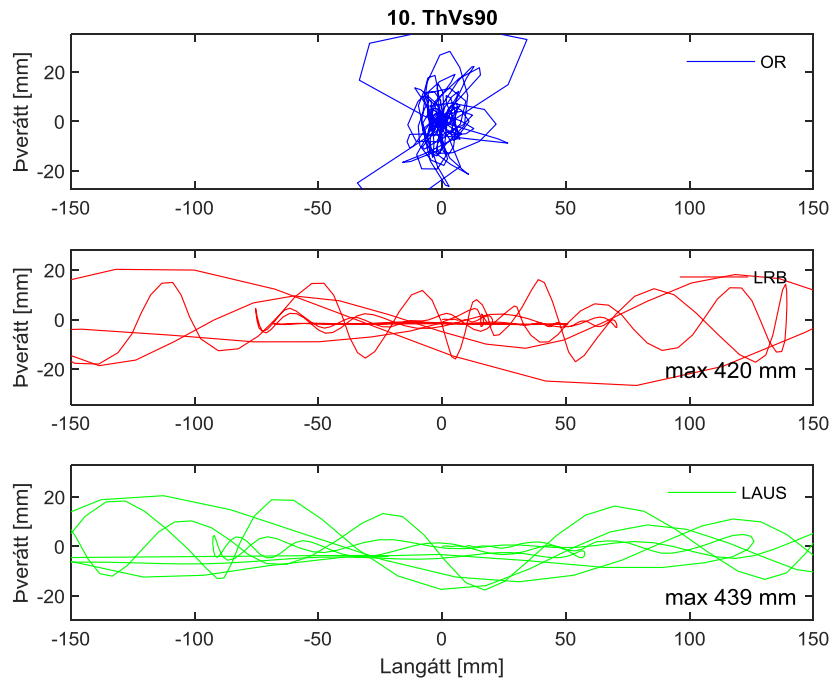
Mynd C.7 Hreyfing turntoppsins þegar álagstílfellið Flag90 er keyrt á líkönin.



Mynd C.8 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Hell90 er keyrt á líkönin.



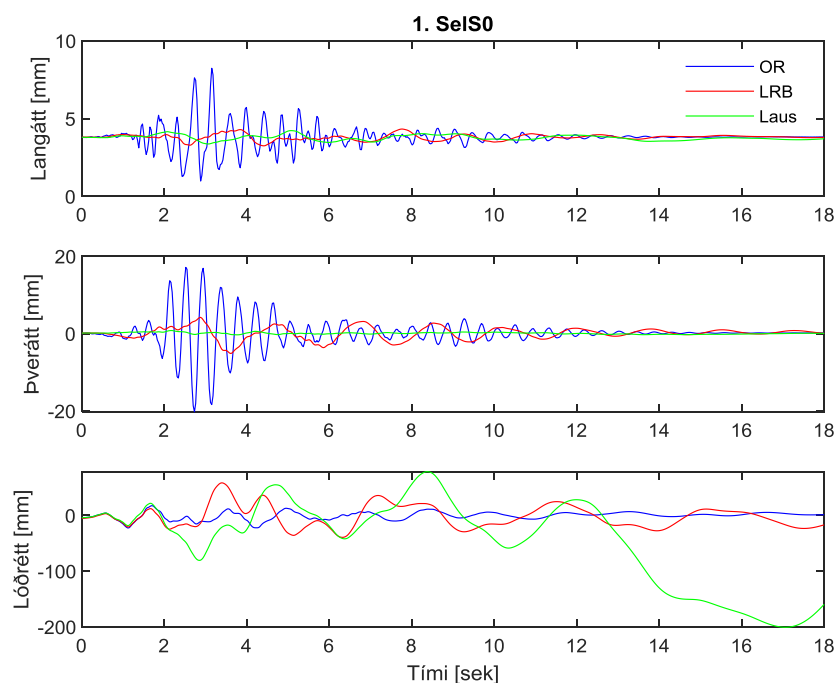
Mynd C.9 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið Kald90 er keyrt á líkönin.



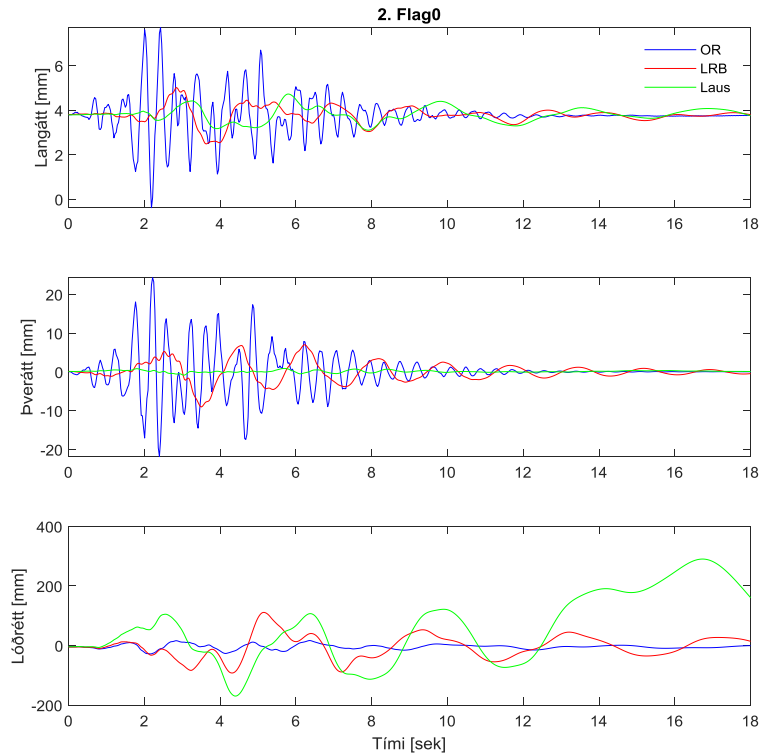
Mynd C.10 Hreyfing turntoppsins þegar álagstilfellið ThVs90 er keyrt á líkönin.

D. Viðauki, myndir af svignun brúargólfsins

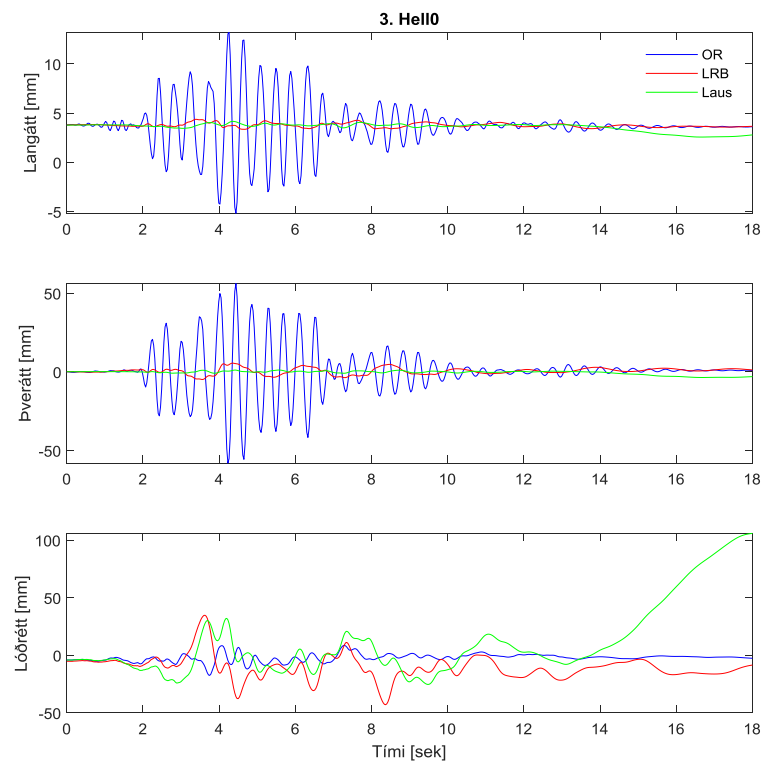
Í þessum viðauka er svignun vesturhafsins sýnd á myndum D01 til D10 þegar tímaraðasettin eru keyrð á líkönin. Svignunin er reiknuð sem færsla miðpunkts vesturhafsins miðað við færslu enda hafsins, þ.e. vestur endastöpsuls og við turninn. Þar sem brúargólfinu er haldið niðri í lóðrétta stefnu er aðeins um hreyfingu brúargólfsins í lóðrétta stefnu að ræða.



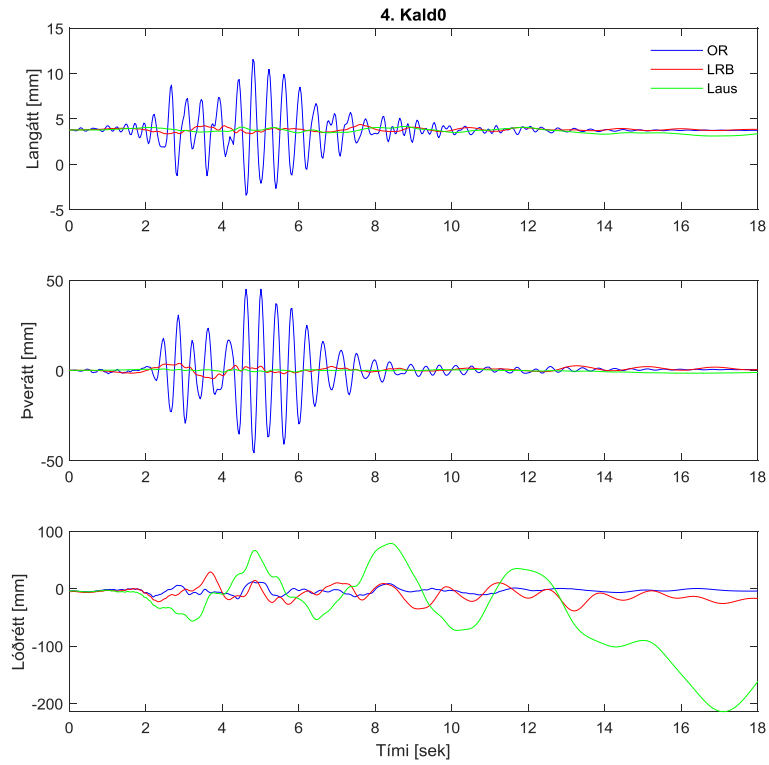
Mynd D.1 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstílfellið SelS0 er keyrt á líkönin.



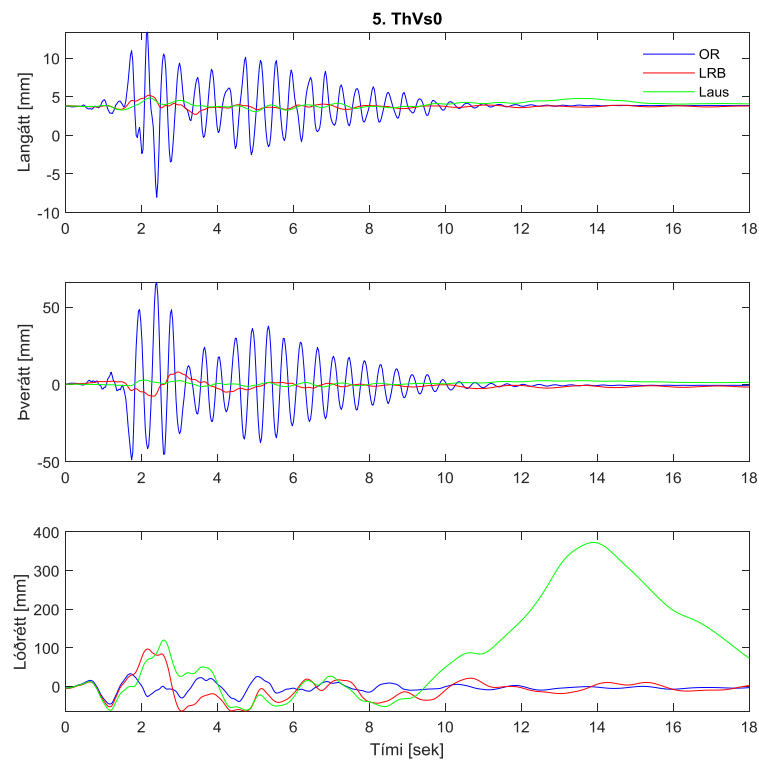
Mynd D.2 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstilfellið Flag0 er keyrt á líkönin.



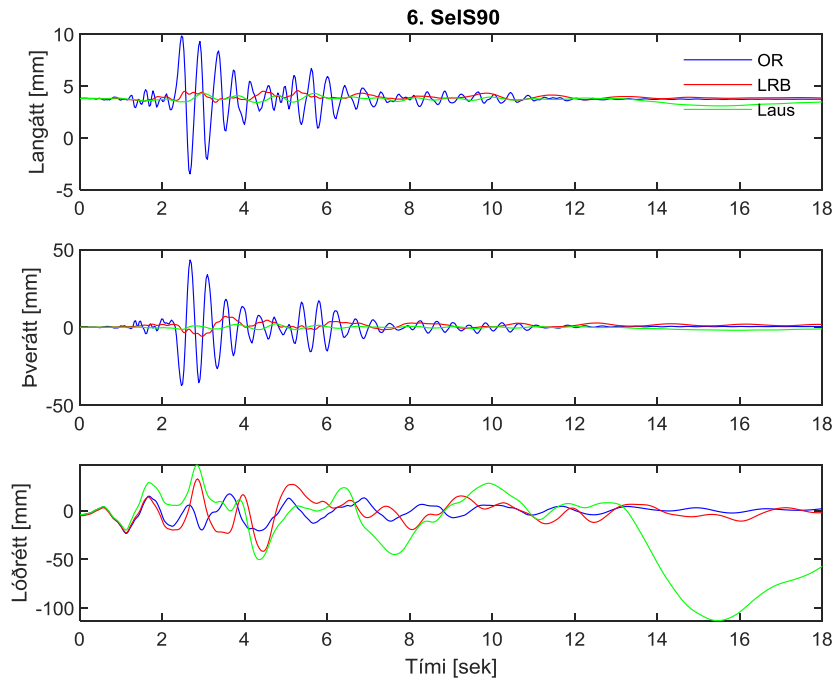
Mynd D.3 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstilfellið Hell0 er keyrt á líkönin.



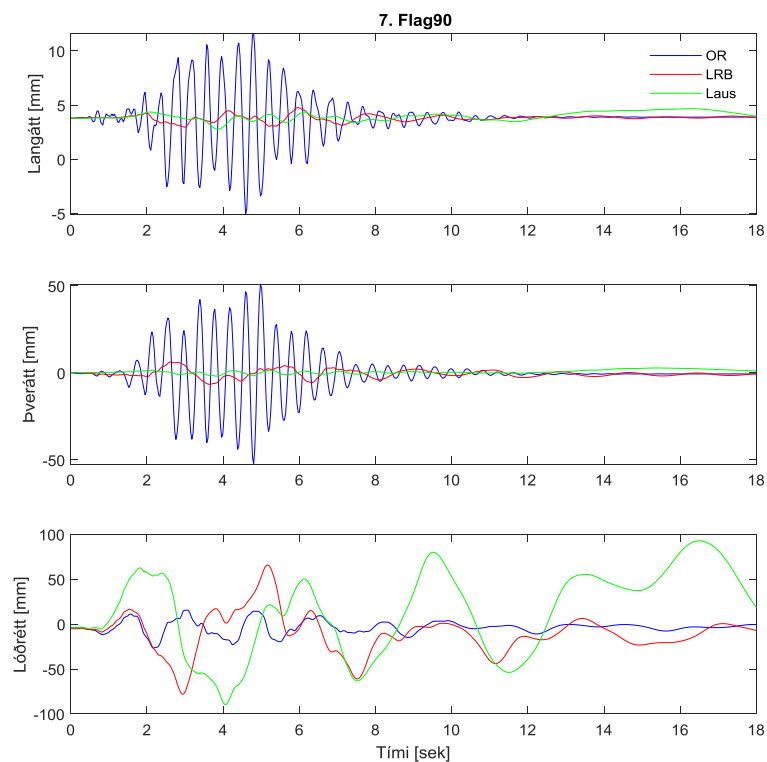
Mynd D.4 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafss og enda hafssins þegar álagstilfellið Kald0 er keyrt á líkönin.



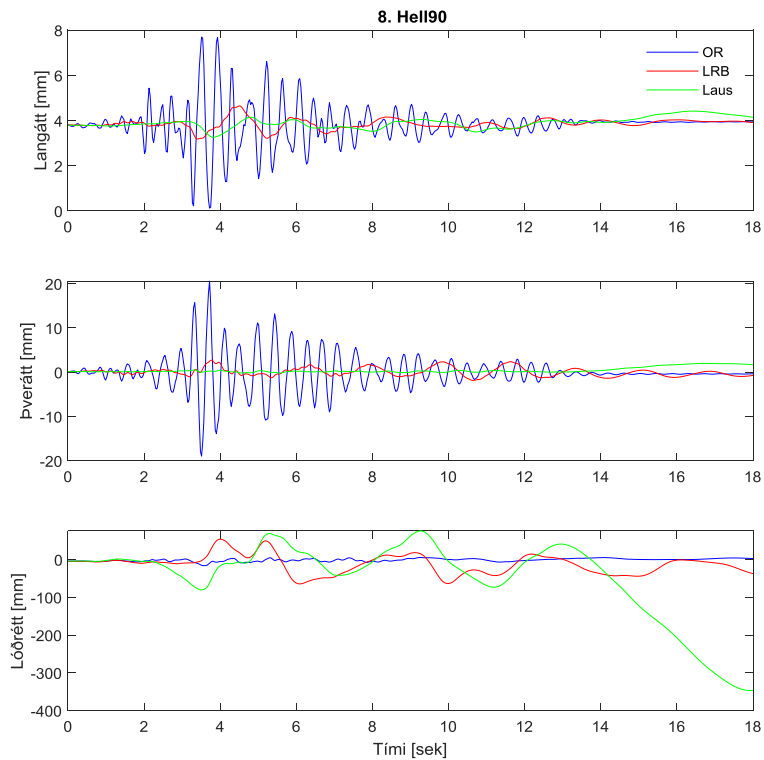
Mynd D.5 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafss og enda hafssins þegar álagstilfellið ThVs0 er keyrt á líkönin.



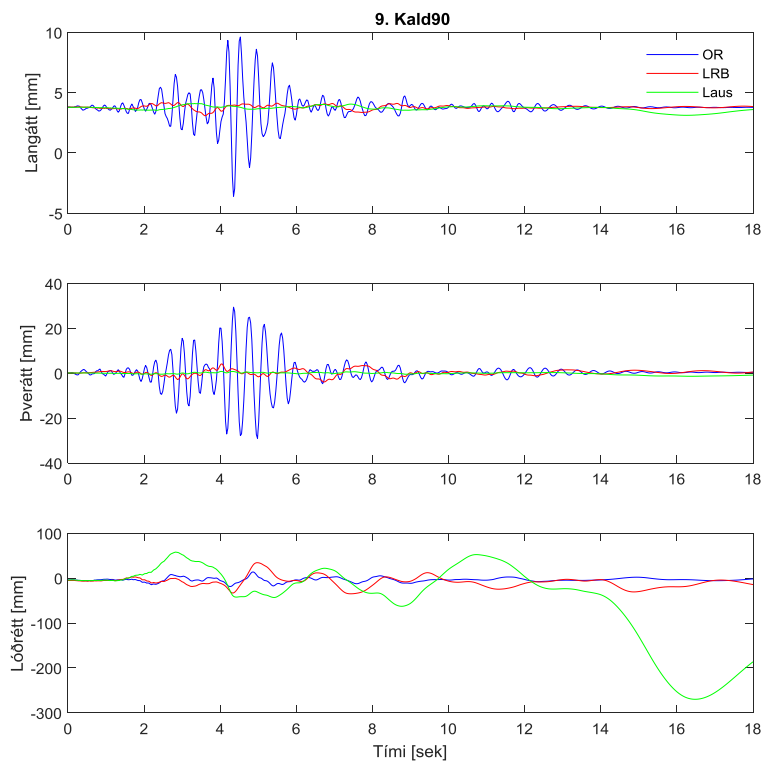
Mynd D.6 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafis og enda hafsis þegar álagstílfellið Seis90 er keyrt á líkönin.



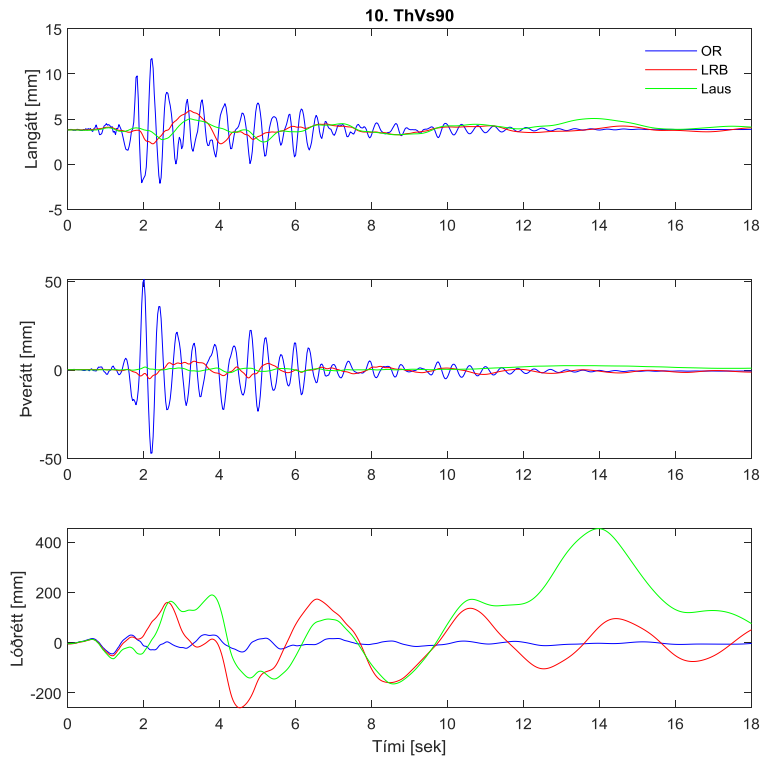
Mynd D.7 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafis og enda hafsis þegar álagstílfellið Flag90 er keyrt á líkönin.



Mynd D.8 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstilfallið Hell90 er keyrt á líkönin.



Mynd D.9 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstilfallið Kald90 er keyrt á líkönin.

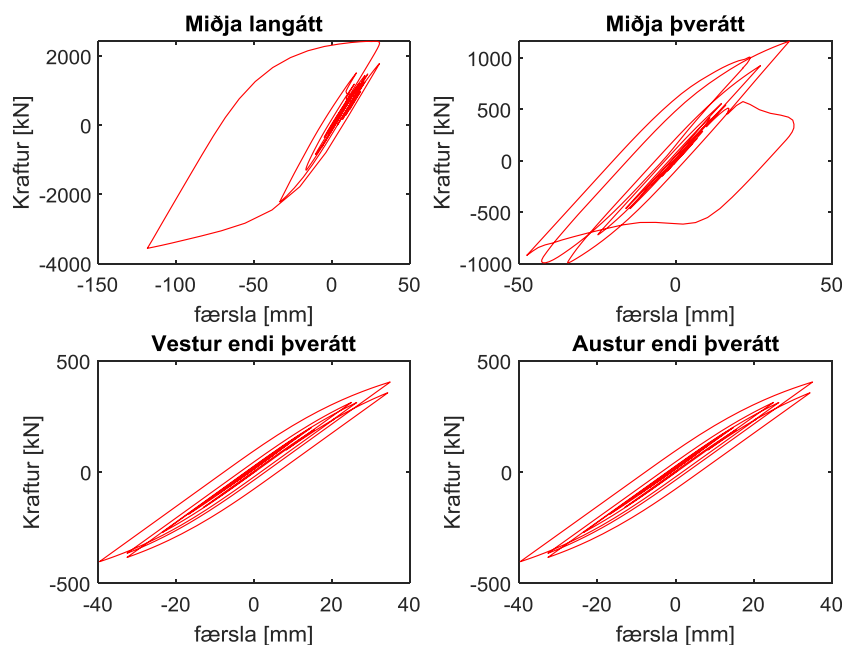


Mynd D.10 Svignun brúargólfsins á milli miðs vesturhafs og enda hafsins þegar álagstilfellið ThVs90 er keyrt á líkönin.

E. Viðauki, myndir af stress-strain graphs

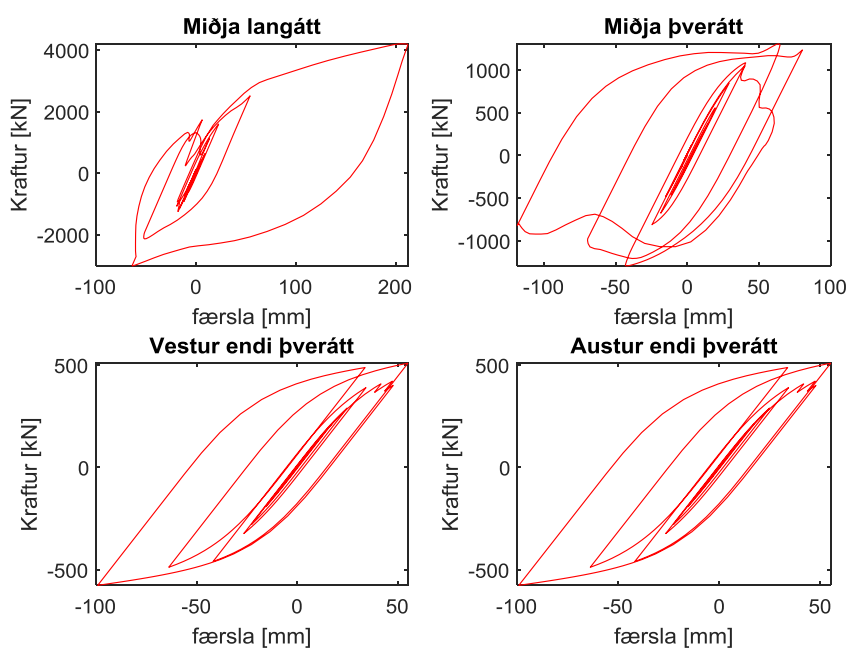
Í þessum viðauka eru hystérislaufur blýgúmmíleganna sýndar á myndum E01 til E10 þegar tímaraðasettin eru keyrð á blýgúmmílegu líkanið.

1. Sels0



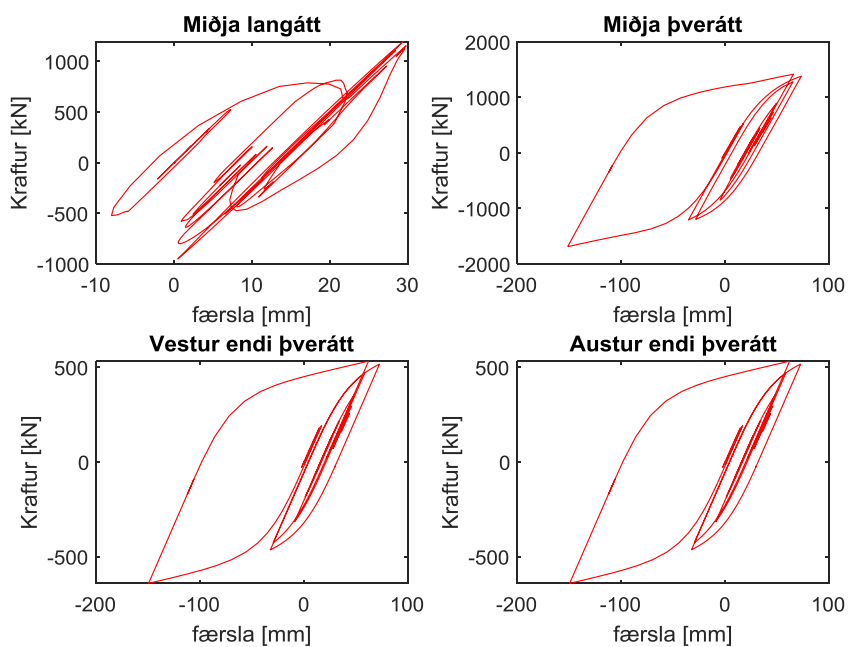
Mynd E.1 Hystérislaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið Sels0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

2. Flag0



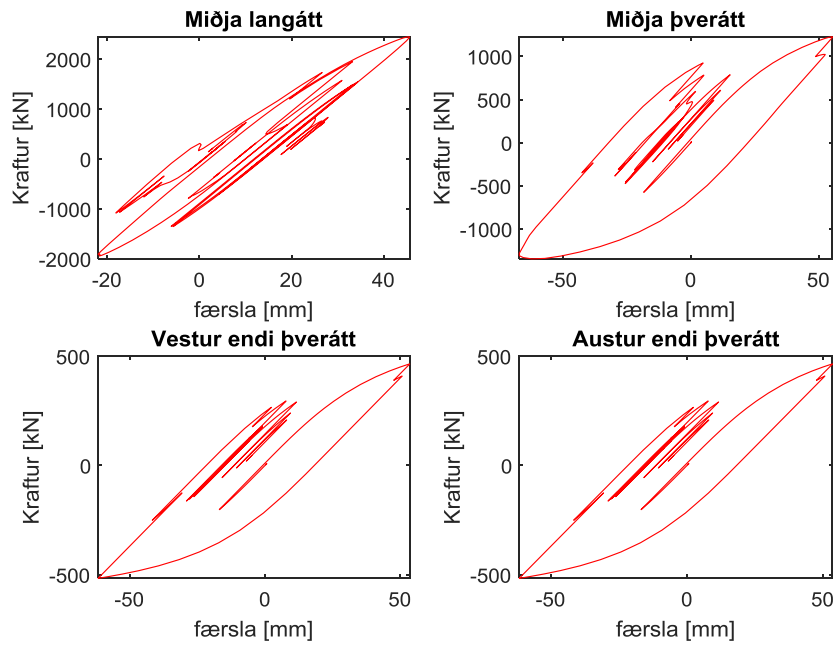
Mynd E.2 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið Flag0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

3. Hell0



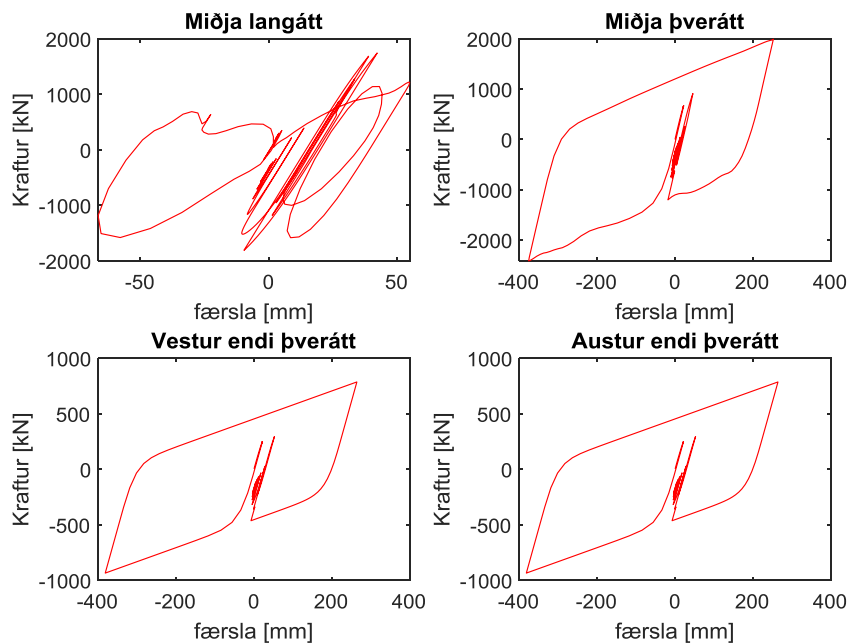
Mynd E.3 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið Hell0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

4. Kald0



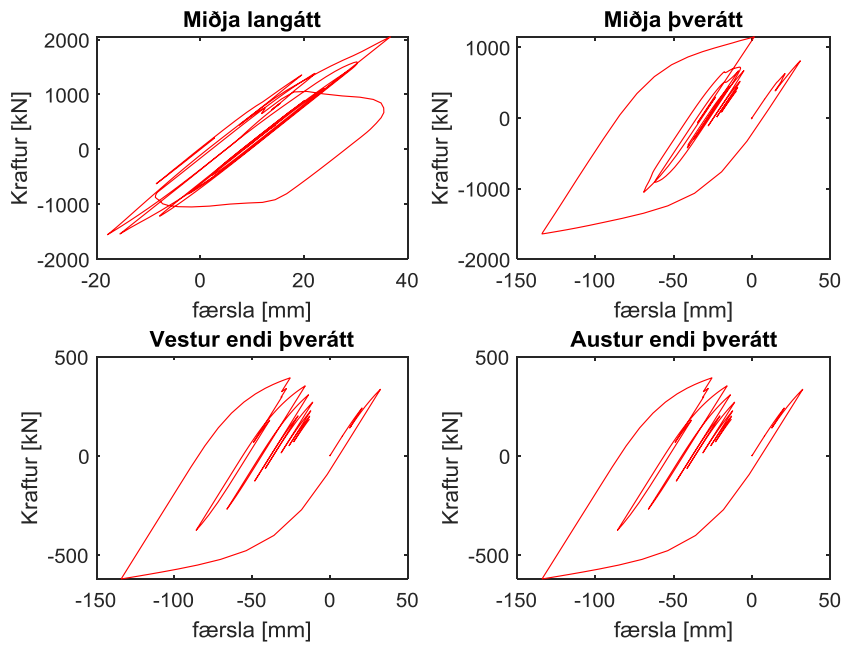
Mynd E.4 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið Kald0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

5. ThVs0



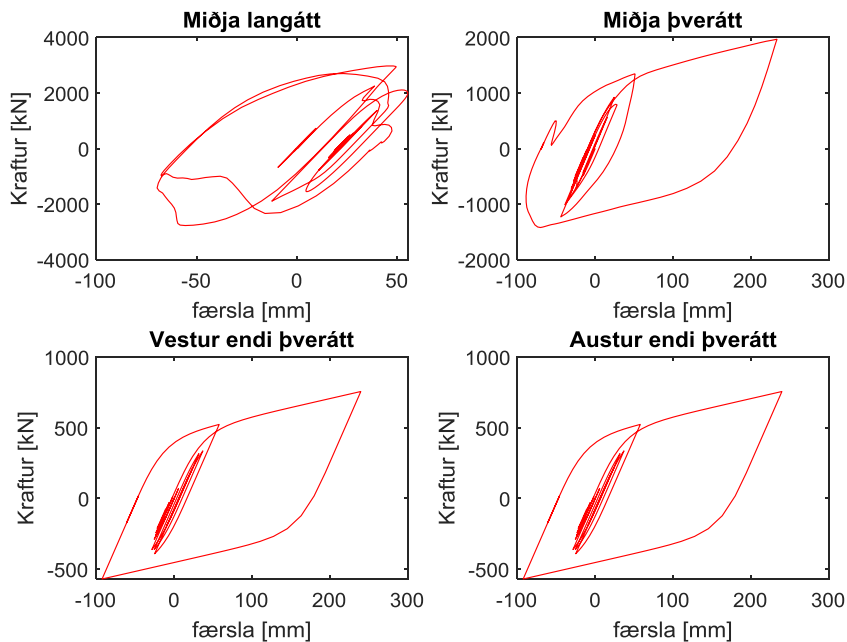
Mynd E.5 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið ThVs0 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

6. SelS90



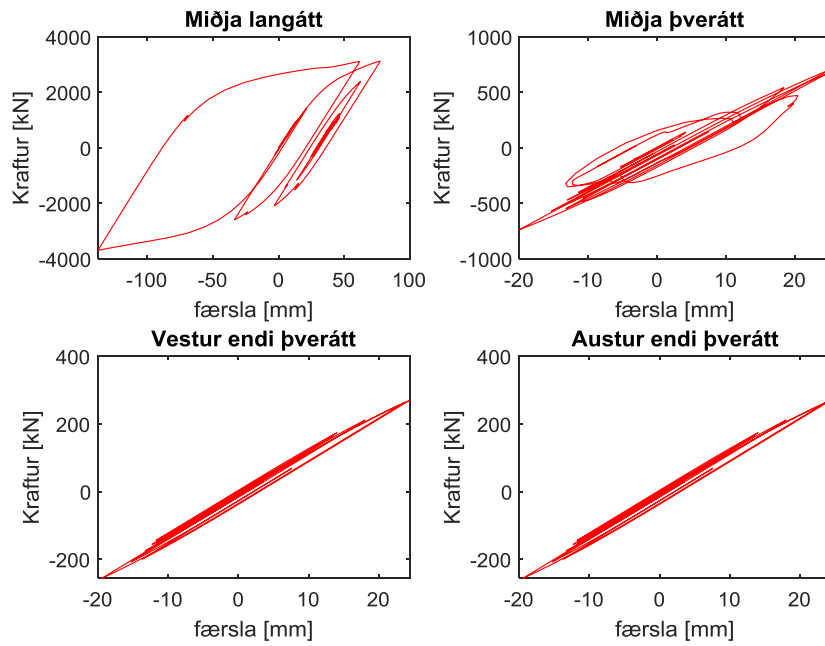
Mynd E.6 Hysteríuslaufur blýgúmmileganna þegar álagstilfellið SelS90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

7. Flag90



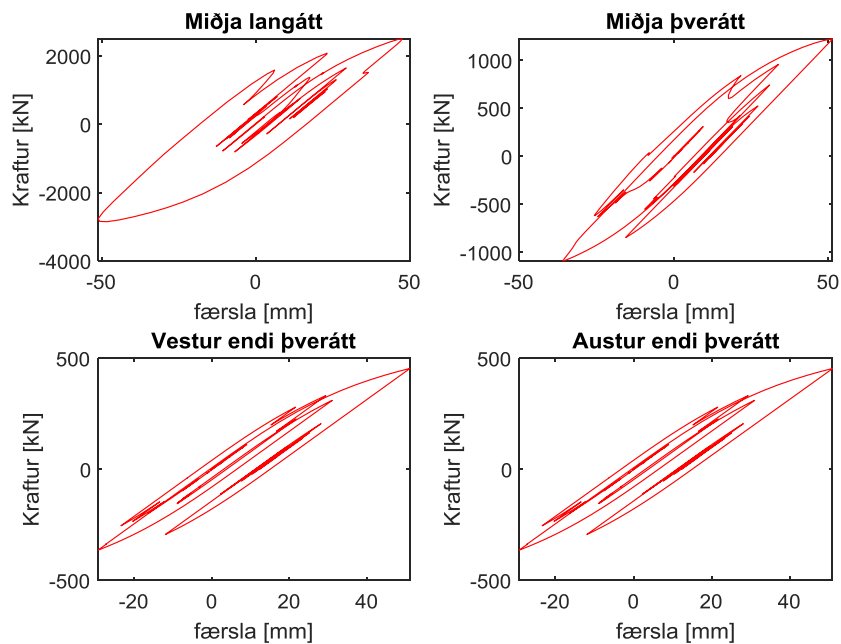
Mynd E.7 Hysteríuslaufur blýgúmmileganna þegar álagstilfellið Flag90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

8. Hell90



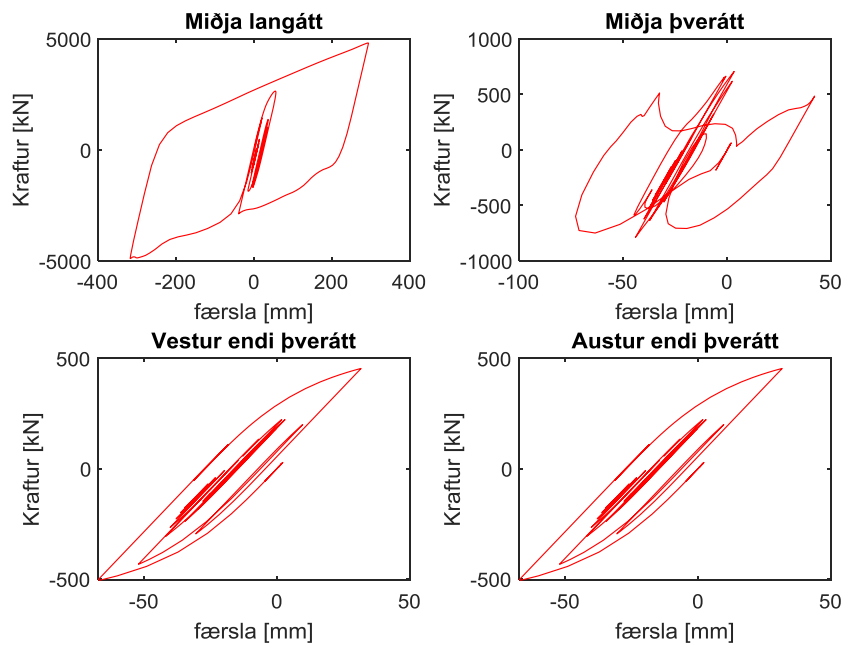
Mynd E.8 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið Hell90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

9. Kald90



Mynd E.9 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið Kald90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.

10. ThVs90



Mynd E.10 Hysteríuslaufur blýgúmmíleganna þegar álagstilfellið ThVs90 er keyrt á blýgúmmílegu líkanið.