



Göngubrýr - Sveiflumælingar

Greinargerð



 Línuhönnun
verkfræðistofa

Febrúar 2007

Upplýsingablað með skýrslum

Unnið af: Guðmundur Valur Guðmundsson, Einar Þór Ingólfsson, Baldvin Einarsson, Bjarni Bessason (Háskóla Íslands)		Unnið fyrir: Vegagerðina	
Dagsetning: 02.02.2007	Skýrslunúmer:	Staða: Lokið	
Verkefnisstjóri: Guðmundur Valur Guðmundsson		Yfirfarið af: Baldvin Einarsson	
Tegund skýrslu: Greinargerð			
Titill skýrslu: Göngubrýr á Hringbraut - sveiflumælingar			
Útdráttur: Göngubrú á Hringbraut við Njarðargötu var tekin í notkun árið 2005 í tengslum við færslu Hringbrautar. Sótt var um styrk til rannsóknasjóðs Vegagerðarinnar til að staðfesta sveifluhegðun brúarinnar ásamt því að staðfesta þau reiknilíkön sem notuð hafa verið við sveiflugreiningu göngubrúa. Svörun var mæld á þremur brúm við álag frá stökum vegfaranda sem gengur/hleypur yfir á eigintíðni brúarinnar og nálægt henni. Þar að auki voru gerðar mælingar þar sem misstórir hópar voru látnir ganga og skokka yfir brúna á mismunandi hraða. Mæld svörun vegna álags frá einum gangandi vegfaranda reyndist standast þær kröfur sem evrópskur hönnunarstaðall setur. Mæld svörun vegna álags frá stökum vegfaranda reyndist samræmast vel við reiknilíkön sem notuð eru. Ekki eru til skilgreind viðmið fyrir svörun vegna hlaupaálags eða hópa sem ganga/hlaupa yfir brúna.			
Lykilorð: Göngubrýr, FE-reiknilíkön, hönnunarstaðlar, sveiflumælingar, álagslíkön			
Vistunarstaður: M:\Vegagerðin\Rannsóknaverkefni\2006\Göngubrýr – sveiflumælingar\			
Verknúmer: VR06GS		Fjöldi síðna: 72	

Dreifing skýrslu og upplýsingablaðs:

Öllum opin



Engin dreifing nema með leyfi verkkaupa



Breytingasaga

Nr.	Höfundur (nafn/dagsetning)	Yfirfarið (nafn/dagsetning)	Samþykkt (nafn/dagsetning)
1			
2			

Upplýsingablað með skýrslum

SAMANTEKT

Göngubrú á Hringbraut við Njarðargötu var tekin í notkun árið 2005 í tengslum við færslu Hringbrautar. Við hönnun brúarinnar kom í ljós að eiginsveiflur hennar voru nálægt eigintíðni gangandi vegfarenda og hlaupara en metið sem svo að þær hreyfingar væru ekki óþægilegar fyrir vegfarendur. Til að staðfesta þær ályktanir var sótt um styrk til Rannsóknasjóðs Vegagerðarinnar til mælinga á brúnni.

Þegar mælingar voru hafnar var ákveðið að útvíkka verkefnið að því leyti að mæla ekki eingöngu hreyfingar á göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu heldur á tveimur göngubrúum til viðbótar. Annars vegar göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala sem er sams konar brú og hins vegar göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði sem er stálbitabrú. Tilgangurinn með því var að skoða hegðun brúa með annan grunnsveiflutíma og úr öðru byggingarefni til að öðlast betri samanburð.

Fyrir hverja brú var svörunin mæld við álag frá stökum vegfarenda sem gengur/hleypur yfir á eigintíðni brúarinnar og nálægt henni. Þar að auki voru gerðar mælingar þar sem misstórir hópar voru látnir ganga og skokka yfir brúna á mismunandi hraða.

Álagslíkön í núgildandi stöðlum endurspeglar ekki raunálag frá gangandi vegfarendum. Margir óvissuþættir eru varðandi hegðun göngubrúa gagnvart álagi frá gangandi vegfarendum og eru þeir helstu deyfingarhlutfallið, breytileiki álagsins og hönnunarviðmiðin. Það er því lagt í hendur hönnuða að taka á þessum óvissuþáttum við hönnun nýrra mannvirkja.

Mæld svörun göngubrúar yfir Hringbraut við Njarðargötu er innan við staðalviðmið fyrir einn gangandi vegfaranda þó að lóðrétt eigintíðni brúarinnar sé nálægt tíðni gangandi vegfarenda eða um 2,3 Hz. Deyfingarhlutfall brúarinnar mældist um 0,6% af krítísku deyfingarhlutfalli.

Mæld svörun göngubrúar yfir Miklubraut við Grundargerði (við Hagkaup) er innan við staðalviðmið fyrir einn gangandi vegfaranda. Fyrir einn hlaupara mældist mesta hröðun meira en tvöfalt hærra en staðalkröfur enda eru hreyfingar brúarinnar mjög greinilegar. Mæld eigintíðni brúarinnar er um 2,7 Hz og deyfingarhlutfallið um 2% af krítísku deyfingarhlutfalli.

Mæld svörun fyrir einn hlaupara er lítillega ofan við staðalkröfur fyrir göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala, en þar var mældist eigintíðni brúarinnar um 3,0 Hz og deyfingarhlutfallið um 0,9%. Staðalkröfurnar sem miðað er við eru þó einungis skilgreindar fyrir álag frá gangandi manni en ekki hlaupandi.

Mæld svörun brúnna tveggja við Hringbraut reyndist samræmast vel við reiknaða svörun í reiknilíkani. Þó var töluverð dreifing á niðurstöðum mælinganna sem skýrist af því hversu breytileikinn í álagi frá einum gangandi manni er mikill. Einfaldar hönnunaraðferðir falla jafnframt vel að niðurstöðum tímaraðgreiningar fyrir álagslíkön fyrir gangandi vegfarendur í reiknilíkani og samkvæmt því mætti nýta sér einfaldar hönnunaraðferðir á forhönnunarstigi.

Þrjú af fjórum markmiðum sem sett voru fram í upphafi verkefnisins náðust, þ.e. þau reiknilíkön sem notuð hafa verið voru staðfest, staðfest var að hreyfingar brúarinnar væru innan settra marka og mikil þekking hefur orðið til varðandi notkun sveifflugreiningar við hönnun göngubrúa sem mun nýtast mjög vel við hönnun í framtíðinni. Ekki var sérstaklega reynt að gera tillögur að hönnunarviðmiðum eins og upphafleg markmið voru skilgreind. Hins vegar þá kemur það fram hér frammar að skortur á skilgreiningum í nógildandi stöðlum gefur hönnuðum og eigendum mannvirkjanna tækifæri til að laga sig að aðstæðum á hverjum stað án þess að vera bundnir af forskriftum. Það er því lagt í hendur hönnuða hverju sinni að setja þær kröfur sem mannvirkinu er ætlað að uppfylla í samráði við eigendurna.

Í hóptilraunum á göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu reyndist mæld hröðun hærri en skilgreind staðalviðmið og fundu flestir þátttakendur fyrir hreyfingum brúarinnar, að auki fannst nokkrum hreyfingarnar óþægilegar. Ekki er fjallað um álag frá hópum í hönnunarviðmiðum en æskilegt er að skilgreina slíkar kröfur á hönnunarstigi.

EFNISYFIRLIT

SAMANTEKT	I
EFNISYFIRLIT	III
1 INNGANGUR	1
2 BAKGRUNNUR	3
2.1 ÍSLAND	3
2.2 GÖNGUBRÚ YFIR MIKLUBRAUT VIÐ RAUÐAGERÐI	3
2.3 ERLENDAR HEIMILDIR.....	4
2.4 ÍSLENSKAR MEISTARARITGERÐIR.....	4
3 LÝSING Á GÖNGUBRÚM	6
3.1 HÖNNUNARSAMKEPPNI.....	6
3.2 GÖNGUBRÚ YFIR HRINGBRAUT VIÐ NJARÐARGÖTU	6
3.3 GÖNGUBRÚ YFIR HRINGBRAUT VIÐ LANDSPÍTALA	8
3.4 GÖNGUBRÚ YFIR MIKLUBRAUT VIÐ GRUNDARGERÐI.....	9
4 MÆLINGAR	11
4.1 MÆLINGAR	11
4.2 MÆLIBÚNAÐUR	12
4.3 GÖNGUBRÚ YFIR HRINGBRAUT VIÐ NJARÐARGÖTU	12
4.4 GÖNGUBRÚ YFIR HRINGBRAUT VIÐ LANDSPÍTALA	20
4.5 GÖNGUBRÚ YFIR MIKLUBRAUT VIÐ GRUNDARGERÐI.....	27
5 ÁLAGSLÍKÖN	31
5.1 GÖNGUÁLAG	32
5.2 HLAUPAÁLAG	34
5.3 HOPPÁLAG.....	35
5.4 HÓPÁLAG.....	36
5.5 ÁLAGSLÍKAN SAMKVÆMT STÖÐLUM	37
6 REIKNILÍKAN	39
6.1 INNTAKSSTÆRÐIR	39
6.2 BRÚ YFIR HRINGBRAUT VIÐ NJARÐARGÖTU.....	42
6.3 BRÚ YFIR HRINGBRAUT VIÐ LANDSPÍTALA.....	48
6.4 BRÚ YFIR MIKLUBRAUT VIÐ GRUNDARGERÐI	51
7 HÖNNUNARVIÐMIÐ	52
7.1 ALMENNT UM HÖNNUN GÖNGUBRÚA GAGNVART SVEIFLUM	52
7.2 STAÐLAR	52
7.3 FRÆÐIN.....	54
7.4 EINFÖLD HÖNNUNARVIÐMIÐ	57
7.5 SAMANBURÐUR	58
7.6 TILLÖGUR AÐ BREYTINGUM.....	59
8 SAMANBURÐUR	63
8.1 GÖNGUBRÚ YFIR HRINGBRAUT VIÐ NJARÐARGÖTU	63
8.2 GÖNGUBRÚ YFIR HRINGBRAUT VIÐ LANDSPÍTALA	65
9 HVERNIG VERÐUR NÆSTA BRÚ HÖNNUÐ?	68
10 NIÐURSTÖÐUR	69
11 HEIMILDASKRÁ	71

11.1 ALMENNAR HEIMILDIR	71
11.2 STAÐLAR OG HANDBÆKUR.....	73

1 INNGANGUR

Árið 2003 var efnt til hönnunarsamkeppni á vegum Vegagerðarinnar og Reykjavíkurborgar um hönnun þriggja göngubrúa í tengslum við færslu Hringbrautar. Eitt af þeim atriðum sem skyldi dæmt eftir var hversu sveigjanleg hönnunin væri gagnvart því að endurnýta hana á öðrum stað. Línuhönnun og arkitektar Studio Granda sigruðu í samkeppninni.

Á árunum 2004 og 2005 voru byggðar þrjár göngubrýr, tvær yfir Hringbraut og ein yfir Njarðargötu. Stærsta brúin af þessum þremur, göngubrúin á Hringbraut við Njarðargötu var tekin í notkun árið 2005. Göngubrúin er í 9 höfum með mislöng höf, það lengsta 27,1 m. Lengsta hafið hefur eigintíðni nálægt eigintíðni gangandi vegfarenda. Útreikningar á hönnunarstigi gáfu til kynna að örvaðar hreyfingar brúarinnar frá gangandi vegfarendum væru undir viðmiðunargildum gildandi staðla. Viðmiðunargildi miða við upplifun vegfarenda, þ.e. að flestum sem ganga yfir brúna eiga ekki að finnst hreyfingar hennar vera óþægilegar. Upplifun vegfarenda af sams konar titringi er hins vegar mjög mismunandi, á meðan einum finnst hreyfingar brúarinnar vera skemmtilegar þá geta þær valdið hræðslu hjá öðrum.

Viðmið í núgildandi stöðlum, Eurocode 2 (ENV 1992-2:1995 – Steyptar brýr) og samsvarandi breskum staðli, BS5400, varðandi sveifluhegðun göngubrúa byggja að mestu leyti á einfölduðum aðferðum en hafa ekki hliðsjón af nýjustu þekkingu á þessu sviði eða framþróun í tölvuforritum sem hafa mun meiri reiknigetu en áður tíðkaðist. Á sama tíma er þróunin sú að göngubrýr verða sífellt flóknari að lögun og jafnframt koma arkitektar í meira mæli að hönnun brúa í þéttbýli og er útlit brúnna mikilvægari þáttur en áður. Þekkt dæmi um þetta er Millennium göngubrúin yfir Thames á í Lundúnum sem var lokuð í tæp tvö ár eftir opnunina á meðan verkfræðingar fundu lausn á vandræðum vegna hliðarsveifla af völdum gangandi vegfarenda á brúnni, [Dallard et.al., 2001]. Nærtækara dæmi frá Íslandi er göngubrú yfir Miklubraut en þar þurfti að koma fyrir búnaði til að dempa hreyfingar brúarinnar vegna hlaupandi vegfarenda eftir að brúin hafði verið tekin í notkun.

Sem fyrr segir hefur lengsta haf brúarinnar á Hringbraut við Njarðargöt eigintíðni nálægt tíðni gangandi vegfarenda og má greina lóðréttu hreyfingu á miðju hafi þegar maður kemur hlaupandi upp brúna. Áætluð lóðrétt hröðun brúarinnar var metin með einfaldaðri reikniáferð og reyndist hún vera innan við viðmiðunargildi staðalsins. Það var þó vitað að hreyfingar myndu finnast á brúnni en metið sem svo að þær yrðu ekki óþægilega miklar.

Til að rannsaka nánar göngubrýrnar með tilliti til sveifluörvunar frá gangandi umferð var sótt um styrk til Rannsóknasjóðs Vegagerðarinnar til sveiflumælinga á göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu árið 2006.

Markmið verkefnisins voru skilgreind eftirfarandi:

1. Að sannreyna reiknilíkön sem notuð hafa verið við hönnun gagnvart mældum niðurstöðum úr sveifluþrófunum.
2. Að tryggja öryggi og vellíðan notenda mannvirkisins með því að staðfesta að hreyfingar brúarinnar séu innan eðlilegra marka.

3. Að auka þekkingu og notkun á aðferðum sveifflugreiningar við hönnun göngubrúa hér á Íslandi.
4. Gera tillögur að hönnunarviðmiðum fyrir sveifluhegðun göngubrúa á Íslandi

Þegar mælingar voru hafnar var ákveðið að útvíkka verkefnið að því leyti að mæla ekki eingöngu hreyfingar á göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu heldur á tveimur göngubrúum til viðbótar. Annars vegar göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala sem er sams konar brú og hins vegar göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði sem er stálbitabrú. Tilgangurinn með því var að skoða hegðun brúa með annan grunnsveiflutíma og úr öðru byggingarefni til að öðlast betri samanburð.

Verkefnið er styrkt af Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar og Línuhönnun hf. og unnið í samstarfi við Bjarna Bessason prófessor við Verkfræðideild Háskóla Íslands. Umsjón með verkefninu hafði Guðmundur Valur Guðmundsson verkfræðingur hjá Línuhönnun en aðrir sem komu að því voru Einar Þór Ingólfsson verkfræðingur hjá Línuhönnun og Baldvin Einarsson sviðsstjóri Vega- og byggðasviðs Línuhönnunar. Nokkuð fleiri komu að tilraununum þar sem gengið, hlaupið og hoppað var yfir brýrnar. Þar má telja hópa úr Vinnuskóla Reykjavíkur, verkfræðinema úr Háskóla Íslands ásamt nokkrum af frískustu starfsmönnum Línuhönnunar og er þeim þakkað fyrir sitt framlag. Að lokum viljum við þakka verkfræðistofunni Vista í Reykjavík og Svend Ole Hansen Aps. í Kaupmannahöfn fyrir afnot af mælitækjum og söfnunarbúnaði sem gerði þessar mælingar mögulegar.

2 BAKGRUNNUR

2.1 Ísland

Fyrsta göngubrú yfir stofnbraut og tengibrautir á höfuðborgarsvæðinu var göngubrú yfir Kringlumýrarbraut í Fossvogi sem myndaði þannig samfelldan stofnstíg úr Elliðarárdal um Fossvogsdal yfir í Nauthólsvík og þaðan út á Ægisíðu í vesturbæ Reykjavíkur. Brúin var tekin í notkun árið 1995. Síðan þá hafa alls tólf göngubrýr verið byggðar á stofnbrautakerfi höfuðborgarsvæðisins fram til 2006.

Göngubrýr yfir stofn- og tengibrautir á höfuðborgarsvæðinu

Kringlumýrarbraut í Fossvogi	1995
Miklabraut við Rauðagerði	1997
Kringlumýrarbraut við Sóltún	1998
Vesturlandsvegur í Mosfellsbæ	1998
Miklabraut við Grundargerði	2000
Miklabraut við Kringluna	2002
Hafnarfjarðarvegur við Hraunsholt	2002
Reykjanesbraut við Stekkjarbakka	2003
Reykjanesbraut í Hafnarfirði	2003
Hringbraut vestan Njarðargötu	2005
Hringbraut við Læknagarð	2005
Njarðargata norðan Hringbrautar	2005
Vatnsendavegur í Kópavogi	2006

Í tímariti umhverfis- og byggingarverkfræðinema, Upp í vindinn, árið 2005 má finna grein sem fjallar um nýlegar göngubrýr á Íslandi þar sem meðal annars er fjallað um göngubrýr yfir Hringbraut og Njarðargötu. [Guðmundsson og Einarsson, 2005].

2.2 Göngubrú yfir Miklubraut við Rauðagerði

Í skýrslu Verkfræðistofnunar Háskóla Íslands frá 1997 er fjallað um niðurstöður rannsóknarverkefnis sem styrkt var af Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar og var unnin í samstarfi VSÓ ráðgjafar og Verkfræðistofnunar Háskóla Íslands, sjá [Snæbjörnsson et.al., 1997]. Skýrslan fjallaði um mælingar og reikninga á hreyfingarfræðilegum eiginleikum göngubrúar yfir Miklubraut við Rauðagerði. Brúin er þriggja hafa stálbitabrá þar sem hvert haf hefur mismunandi lengd, þ.e. 13,5 m, 25,5 m og 30 m. Aðalburðarkerfi brúarinnar eru tveir samhliða grindarbitar (Vierendeel grindur) sem eru undirstuddir á súlum brúarinnar með mómentstífum tengingum. Súlurnar eru úr stálrörum sem fyllt eru með steypu. Brúargólfið er gert úr þunnri stífaðri stálplötu sem spannar milli aðal burðarbita brúarinnar og er undirstutt af þverbitum. Brúin var byggð árið 1997. Eftir byggingu hennar varð vart við óþægindi af völdum sveifla, sérstaklega vegna fjölda hlaupahópa á brúnni en brúin var staðsett í nágrenni við stóra líkamsræktarstöð. Niðurstöður mælinga Verkfræðistofnunar HÍ voru meðal annars:

Mesta svörun frá einum gangandi:	0,261 m/s^2
Mesta svörun frá tveimur gangandi:	0,584 m/s^2
Mesta svörun frá einum hlaupara:	0,947 m/s^2
Mesta svörun frá tveimur hlaupurum:	3,663 m/s^2

Fyrsta lóðréttta sveifluform reyndist vera samkvæmt mælingum 2,7 Hz en reiknuð eigintíðni samkvæmt sveiflugreiningu í FE-líkani var metin á bilinu 2,60 til 2,92 Hz háð randskilyrðum.

Deyfingarhlutfall fyrir fyrsta melda sveifluform reyndist vera 1,14% en dreifingin var þó með staðalfráviknið 0,74 % (tafla 6 í skýrslu). Jafnframt er gerð grein fyrir niðurstöðum þessarar rannsóknar í grein sem birtist á ráðstefnunni Eurodyn 1999, [Snæbjörnsson og Sigbjörnsson, 1999].

Á grundvelli ofangreindrar rannsóknar var ákveðið að koma fyrir dempurum (e. tuned mass damper) í brúnni til að minnka hreyfingar hennar.

2.3 Erlendar heimildir

Síðan byrjun 19. aldar hefur það verið þekkt að brýr geti farið í eiginsveiflur vegna fótgangandi vegfarenda. Sem dæmi má taka að árið 1831 hrundi brú í Broughton við Manchester þegar 60 manna herdeild gekk í takt yfir hana. Síðan hefur herdeildum verið skipað að ganga úr takt þegar gengið er yfir göngubrú, [Zivanovic et.al., 2005]. Fyrsti brúarstaðall sem kveður á að meta þurfi sveifluhegðun göngubrúa er BS5400 frá 1978 og kom hann í kjölfar fræðigreinar sem skrifuð var ári áður, [Blanchard et.al., 1977].

Á opunardegi aldamótabrúarinnar í Lundúnum sveiflaðist brúin til hliðar undan stórum hópi fótgangandi vegfarenda sem gengu í takt við hreyfingar brúarinnar. Þessar sveiflur urðu þess valdandi að loka þurfti brúnni í tæplega tvö ár meðan verkfræðingar hönnuðu dempunarkerfi fyrir hana, sjá [Dallard et.al., 2001]. Komið hefur í ljós að þessi samstilling milli fótgangandi vegfarenda og brúarinnar á aldamótabrúnni er ekki einsdæmi, heldur hefur þetta komið fyrir nokkrum sinnum áður. Fyrsta skiptið sem tekið var eftir þessu var árið 1993 þegar Toda Park brúin í borginni Toda í Japan sveiflaðist til hliðar líkt og í London. Frá þessu er greint m.a. í [Fujino et.al., 1993].

Aðrir fræðimenn hafa rannsakað sveifluhegðun göngubrúa á undanförunum árum og ber hér helst að nefna Hugo Bachmann, sem hefur skrifað margar greinar og bækur um sveiflur í mannvirkjum af mannavöldum, sjá t.d. [Bachmann et.al., 1996] og [Bachmann, 2002]. Einnig má taka fram að verið er að vinna við uppfærslu á breska brúarstaðlinum og framvindu þeirra vinnu er lýst í þremur greinum, sjá [Barker 2005; Barker et.al. 2005; Mackenzie et.al. 2005].

Í kjölfari atviksins í London var komið á fót ráðstefnu um hönnun og sveifluhegðun göngubrúa (FOOTBRIDGE 2002 og 2005), sú fyrsta var haldin árið 2002 í París og nýlega fór sú önnur fram í Feneyjum, eða árið 2005.

2.4 Íslenskar meistaritgerðir

Á síðasta ári hafa tvær meistaritgerðir (M.Sc.) verið skrifaðar af íslenskum verkfræðinemum um sveifluhegðun göngubrúa. Önnur ritgerðin var skrifuð við Tækniháskólann í Lundi (LTH) og fjallar um láréttar og lóðréttar sveiflur í göngubrúum þar sem sérstök áhersla var lögð á aldamótabrúna í London (Millennium Bridge). Byggt var upp nákvæmt einingalíkan af brúnni og mismunandi álagslíkön, bæði úr stöðlum og frá mismunandi fræðimönnum, voru notuð til að meta svörun brúarinnar. Verkefnið var unnið af Fjalari Haukssyni haustið 2005, sjá [Hauksson,

2005]. Hin ritgerðin var skrifuð við Tækniháskólann í Kaupmannahöfn (DTU) og fjallar um lóðréttar sveiflur í göngubrú. Sú ritgerð tók mið af tilraunum sem gerðar voru á 12 m langri hengibrú sem var byggð í tilraunasal skólans. Eigintíðni brúarinnar við fyrsta lóðréttu sveifluform var 2,3 Hz og svörun hennar vegna gangandi vegfarenda var metin og borin saman við þau álagslíkön sem sett hafa verið fram. Einnig kemur fram í þeirri skýrslu að hætta sé á óþægilegum sveiflum í göngubrúnni yfir Hringbraut við Njarðargötu ef stór hópur af fólki gengur yfir hana. Verkefnið var unnið af Einari Þór Ingólfssyni vorið 2006, sjá [Ingólfsson, 2006].

3 LÝSING Á GÖNGUBRÚM

3.1 Hönnunarsamkeppni

Í maí árið 2003 efndu Umhverfis- og tæknisvið Reykjavíkurborgar og Vegagerðin til samkeppni um hönnun þriggja göngubrúa í Reykjavík, tveggja yfir Hringbraut og einnar yfir Njarðargötu. Samkeppnistillagan var unnin í samstarfi Línuhönnunar og Studio Granda.

Um var að ræða tveggja þrepa samkeppni. Á fyrra þrepi samkeppninnar var nafnleynd keppenda og komst Línuhönnun og Studio Granda áfram ásamt tveimur öðrum hópum. Í síðari þrepi voru höfundar þekktir og var skilað inn tillögum í ágúst 2003. Niðurstaða dómnefndar lá fyrir í ágúst og var tillaga Línuhönnunar og Studio Granda valin áfram til frekari hönnunar. Umsögn dómnefndar um tillögu Línuhönnunar og Studio Granda var eftirfarandi:

“Akreinar eru brúaðar með svífléttri lausn sem hvílir á súlum í miðdeilum og til enda. Landtaka brúnna og aðlögun að landi er vel leyst með framlengingu brúa niður í landhæð. Gönguleiðir um brýrnar tengjast vel gönguleiðum svæðisins með svífandi tengingu yfir friðland Vatnsmýrinnar, en þar þarf þó að huga betur að útfærslu. Hefðbundin og sannfærandi lausn. Steypt eftirspennt lausn er hagkvæm með tilliti til viðhalds. Sveigjanleiki lausnar er mikill með tilliti til breytilegra haflengda og byggingaraðstæðna.”

3.2 Göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu

3.2.1 Staðsetning og umhverfi

Göngubrú á Hringbraut við Njarðargötu tengist bæði aðalgöngustíg sem liggur suður með Njarðargötu og göngustíg sem liggur vestur með Hringbraut í átt að Háskólanum. Staðsetning brúarinnar og lögun gerir þessum leiðum jafnhátt undir höfði og vegfarandinn skynjar ekki að hann sé að taka krók á leið sinni. Brúin liggur í sveig með um 60 m radíus að norðanverðu en kreppist þegar hún svífur yfir friðlandið í Vatnsmýri í 30 m radíus og endar í 15 m radíus. Að auki er gert ráð fyrir að gangandi vegfarendur hafi þann möguleika að ganga niður stiga um leið og komið er yfir Hringbraut að sunnan. Staðsetning brúarinnar er sýnd á mynd 3-1.

Heildarlengd brúarinnar er 169,3 m í átta höfum þar sem lengsta hafið er 27,1 m langt og það stysta 15,4 m endahaf að sunnan. Yfirbyggingin nær rúmlega fjóra metra aftur fyrir frambrún endastöpla hvoru megin. Staðsetning millisúlna og hafskiptingar gera ráð fyrir að á gatnamótum Hringbrautar og Njarðargötu verði fjögurra fasa ljós með tilheyrandi fjölgun akreina. Brúin er sýnd á mynd 3-2.



Mynd 3-1: Göngubrýr á Hringbraut og Njarðargötu.



Mynd 3-2: Göngubrú á Hringbraut við Njarðargötu. Vinstra megin er horft til norðurs og hægra megin er horft til suðurs.

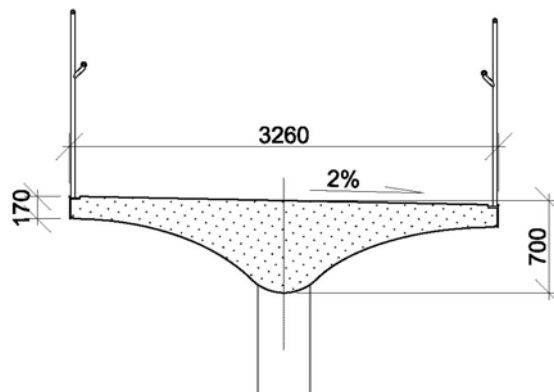
3.2.2 Burðarvirki

Í tillögu hönnuða að þversniði yfirbyggingar á fyrra þrepi hönnunarsamkeppninnar voru settir fram þrír kostir, þ.e. steipt þversnið með annars vegar forsteiptum einingum og hins vegar staðsteypu. Einnig var sýnt stálþversnið. Steipta þversniðið og stálþversniðið höfðu sömu forsendur að leiðarljósi, þ.e. vindustíft þversnið sem mætti nýta óháð formi brúarinnar í plani og hæð.

Göngubrúin er samfelld og eftirspennt bitabré með bogaförmuðum bita. Heildarháð bitans er 700 mm og er þykkt kantsins einungis 170 mm og festist handriðið í kantinn, sjá mynd 3-3. Handriðið er gert úr grönnum ryðfríum teinum, sem soðnir eru á samfelldan vinkel neðst. Hvítt sement og ljós fylliefni er notuð í steypu brúardekksins til að fá ljósara og bjartara útlit. Þrjár spennikaplar eru í þversniðinu af gerðinni 9C15.

Millisúlurnar eru úr ryðfríum stálrörum sem fyllt eru með steypu og gengur stálrörið líttillega upp í yfirbygginguna. Súlurnar sem eru næst Hringbrautinni og í miðeyjunni eru hringlaga með þvermál 500 mm og þola að keyrt sé á þær. Þær fjórar súlur sem eru yfir friðlandinu þurfa ekki að þola slíkt álag og því eru þær grennri eða frá 400 mm og niður í 350 mm.

Endastöplarnir eru með lóðréttum veggjum sem ganga ofan í jörð og eru jafnbreiðir yfirbyggingunni en ná um 4 m aftur. Yfirbyggingin nær rétt aftur fyrir stöpulinn og kemur göngustígurinn að endanum.



Mynd 3-3: Þversnið brúar.

Yfirbyggingin situr á legum á báðum endum og er haldið gagnvart láréttum kröftum við endastöpla með stálfestingum. Hreyfingar brúarinnar vegna hitabreytinga eru þannig að hún leggst inn í bogann þegar hún kólnar en út þegar hún hitnar.

3.2.3 Grundun

Jarðtæknilegar aðstæður í brúarstæðinu eru þannig að um 4-5 m djúp mýri er ofan á jökulurð sem myndar þunnt lag ofan á berggrunninum. Grafa þarf út fyrir götunum og er gert ráð fyrir að sá uppgröftur nýtist sem fyllingarefni til landmótunar. Millisúla í miðeyju Hringbrautar er grunduð á þjappaðri fyllingu ásamt millisúlu og endastöpli norðan Hringbrautar. Aðrar undirstöður eru grundaðar á um 5 m löngum steypum staurum sem reknir eru niður í mýrina. Fjórir staurar eru undir hverja millisúlu, sex staurar undir endastöplinum og einnig eru undirstöður stigans grundaðar á staurum.

3.3 Göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala

Göngubrú á Hringbraut við Landspítala er á aðalgöngustíg sem liggur meðfram Hringbraut að norðan og áfram meðfram Hringbraut að sunnan að íþróttasvæði Vals. Þaðan liggur hann áfram inn að Öskjuhlíð og í Nauthólsvík.

Brúin hefur sama útlit og sama burðarvirki og göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu. Brúin liggur í boga yfir Hringbraut með radíus 60 m en sveigist í 30 m

boga að sunnanverðu og mætir landinu inn á hljóðmön samhliða Hringbrautinni. Við enda brúarinnar eru tröppur niður á samsíða stíg. Heildarlengd brúarinnar er um 86 m í fmm höfum og er lengsta hafið 23,5 m yfir syðri akbraut Hringbrautar.

Yfirbyggingin situr á legum á báðum endum og er haldið gagnvart láréttum kröftum við endastöpla með stálfestingum. Nyrðri endinn er fastur bæði í þver- og langátt en syðri endinn er laus í langátt brúarinnar til að mæta hreyfingum brúarinnar vegna hitabreytinga.

Allar undirstöður brúarinnar eru grundaðar á þjappaðri fyllingu



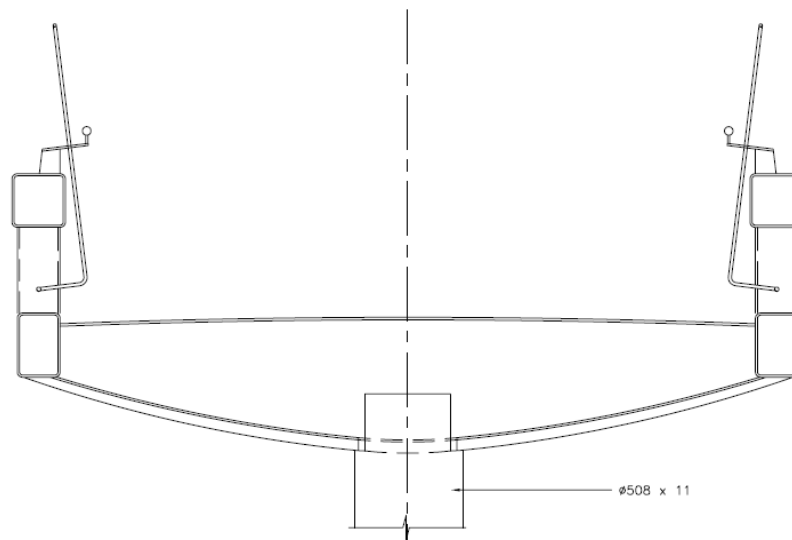
Mynd 3-4: Göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala.

3.4 Göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði

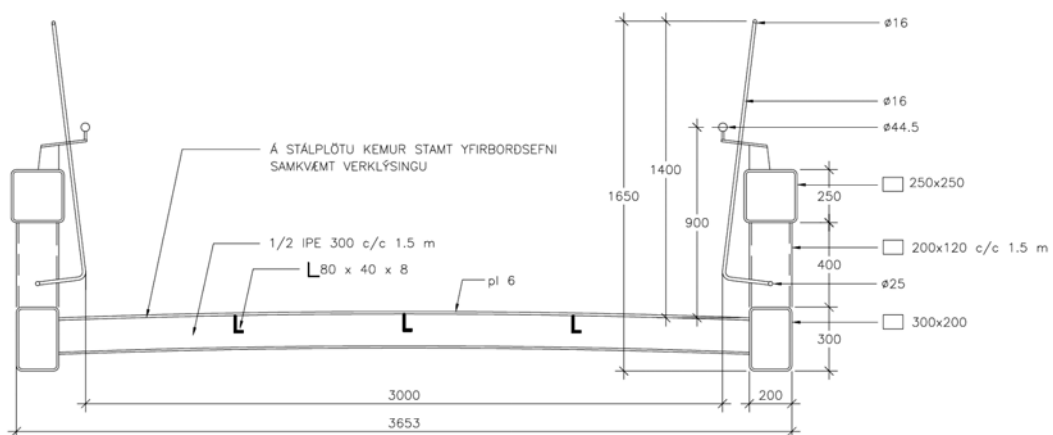
Göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði er ein af þremur sams konar göngubrúum yfir Miklubraut, þ.e. við Grundargerði, Rauðagerði og Kringluna. Brúin er rúmlega 3,6 m breið stálbitabrá og er heildarlengd hennar 54 m sem skiptist í tvö jafn löng höf (27 m), sjá mynd 3-5. Brúin er gerð úr tveimur samhliða grindarbitum (Vierendeel grindum) sem eru undirstuddir á millisúlu með vægisstífum tenginum. Millisúlan er úr stálröri sem fyllt er með steypu. Brúargólfíð er gert úr þunnri stífaðri stálplötu sem spannar milli aðal burðarbita brúarinnar og er undirstutt af þverbitum. Við endana er brúin innspennt þar sem burðarbitinn nær rúma þrjá metra aftur fyrir fremsta hluta stöpsulsins og er boltaður niður í sökkulinn. Þversnið brúarinnar yfir millisúlunni er sýnt á mynd 3-6 og þversnið á miðju hafi á mynd 3-7.



Mynd 3-5: Göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði.



Mynd 3-6: Þversnið brúar yfir millisúlu. Teikning birt með leyfi VSÓ Ráðgjafar.



Mynd 3-7: Þversnið brúar á hafi. . Teikning birt með leyfi VSÓ Ráðgjafar.

4 MÆLINGAR

4.1 Mælingar

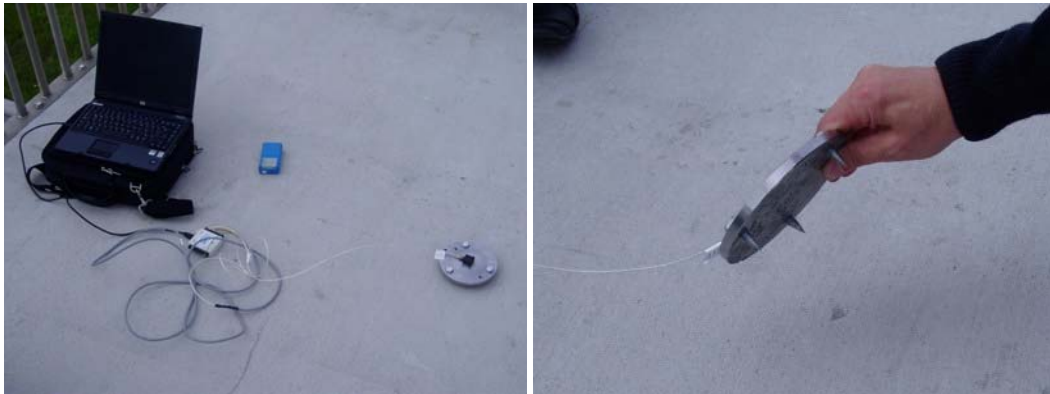
Upphaflega var einungis áætlað að mæla titring í göngubrúnni yfir Hringbraut við Njarðargötu. Ákveðið var að bæta við mælingum á göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala sem er af sömu gerð og svo til samanburðar göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði sem er stálbitabrú. Alls er um að ræða átta mæliraðir. Í viðauka A má sjá niðurstöður allra mælinganna.

- Mánudagur 3. júlí 2006: Göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu.
Megintilgangurinn var að prófa mælibúnaðinn og nákvæmni hans. Alls voru mældar 19 tímaraðir.
- Fimmtudagur 6. júlí 2006: Göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu.
Tilgangur mælinganna var að gera tilraunir á hlaupa- og gönguhópum við mismunandi hlaupatíðnir. Alls voru mældar 16 tímaraðir. Hópurinn samanstóð af nokkrum starfsmönnum Línuhönnunar auk vinnuhóps frá Vinnuskóla Reykjavíkur.
- Fimmtudagur 13. júlí 2006: Göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala
Þennan dag var lokahátíð Vinnuskóla Reykjavíkur haldin og að því tilefni gekk um 2000 manna skruðganga úr Hljómskálagarðinum yfir göngubrúna við Landspítalann og endaði í Nauthólsvíkinni. Hópurinn stóð aðallega af unglíngum á aldrinum 13-17 ára. Fyrir skruðgönguna voru mældar nokkrar tímaraðir.
- Fimmtudagur 13. júlí 2006 : Göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði
Tilgangur mælinga á þessari brú var að fá samanburð á hegðun stálbrúar og steyptrar brúar með svipaða eigintíðni.
- Fimmtudagur 17. ágúst 2006: Göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala
Tilgangur mælinganna var að mæla svörun brúarinnar fyrir betur skilgreint álag en áður, þ.e. hlaupið var yfir brúna á mismunandi tíðni.
- Föstudagur 13. október 2006: Göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala
Tilgangur mælinganna var að endurtaka fyrri mælingar með notkun nýrra mælitækja. Hér voru notaðir þrír hröðunarnemar og hlaupið var yfir brúna.
- Föstudagur 13. október 2006: Göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu
Tilgangur mælinganna var að endurtaka fyrri mælingar með notkun nýrra mælitækja. Hér voru notaðir þrír hröðunarnemar og gengið og hlaupið var yfir brúna. Einnig voru gerðar hóptilraunir.
- Mánudagur 16. október 2006: Göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði
Tilgangur mælinganna var að endurtaka fyrri mælingar með notkun nýrra mælitækja. Hér voru notaðir þrír hröðunarnemar og gengið og hlaupið var yfir brúna.

4.2 Mælibúnaður

4.2.1 Fyrri mælingar (júlí og ágúst)

Við mælingarnar var notaður einása hröðunarnemi frá Verkfræðistofunni Vista af gerðinni Kistler 8312A2, SN2022845. Næmni hröðunarnemans er $1g = 1,002 V$ og er mælisvið hans $\pm 2g$. Aðrar upplýsingar um mælinn eru að næmni hans í þverátt (e. transverse sensibility) er 3,0%, eigintíðnin er 1,4 kHz og hitastigssviðið er frá -40 til 80°C. Hröðunarneminn var festur á stálplötu með fjórum skrúfum, undir stálplötunni eru þrjár oddhvasir fætur sem sitja á brúardekkinu eins og sjá má á mynd 4-1. Gögnunum var safnað með söfnunarbúnaði sem tengdist fartölvu og þannig mátti skoða niðurstöður strax að lokinni mælingu. Gögnum var safnað með tíðninni 200 Hz. Í kyrrstöðu gefur neminn útslagið 0 V. Útslag á suði í mælingunni var um 0,002V eða um 0,02 m/s^2 . Ekki var því mögulegt að mæla lægri hröðun en 0,02 m/s^2 .



Mynd 4-1: Hröðunarnemi og fartölva sem notuð var við mælingarnar.

4.2.2 Seinni mælingar (október)

Í seinni mælingunum voru notaðir þrjár hröðunarnemar, tveir af gerðinni Microtron 7596A-2 og einn af gerðinni Valuline 7596-2, SN20652. Næmni nemanna er sambærileg Kistler nemans sem notaður var í fyrri mælingum. Gögnum var safnað með tíðninni 100 Hz og filteruð í stafrænu low-pass filteri ($F_{pass} = 10 Hz$).

4.3 Göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu

4.3.1 Hröðun

Mælt var á þremur stöðum á lengsta hafi brúarinnar sem er 27,1 m. Mælt var á miðju hafi bæði í innri og ytri hring (austur og vestur megin) og í fjórðungspunkti hafsins að utanverðu (vestur megin).

Fyrir stakan gangandi vegfarenda voru gerðar 24 mælingar við mismunandi göngutíðni og mældist hröðun á bilinu 0,11 – 0,42 m/s^2 háð göngutíðninni. Mesta hröðun sem fall af göngutíðninni er sýnd á mynd 4-8. Mynd 4-9 sýnir mestu hröðun brúarinnar fyrir alla þátttakendur þar sem búið er að kvarða svörunina miðað við þyngd einstaklingsins, þ.e. hröðunin er gefin sem m/s^2 pr. kN . Fyrir tvo gangandi vegfarendur mældist svörun á bilinu 0,19 – 0,71 m/s^2 háð göngutíðninni. Mynd 4-10 sýnir mestu mældu svörun brúarinnar háð göngutíðninni þegar tveir vegfarendur ganga saman. Athuga skal að svörunin er ekki tvöföld miðað við stakan vegfarenda.

Tímaröð fyrir mælingu þar sem tveir vegfarendur ganga saman á eigintíðni brúarinnar er sýnd á mynd 4-4.

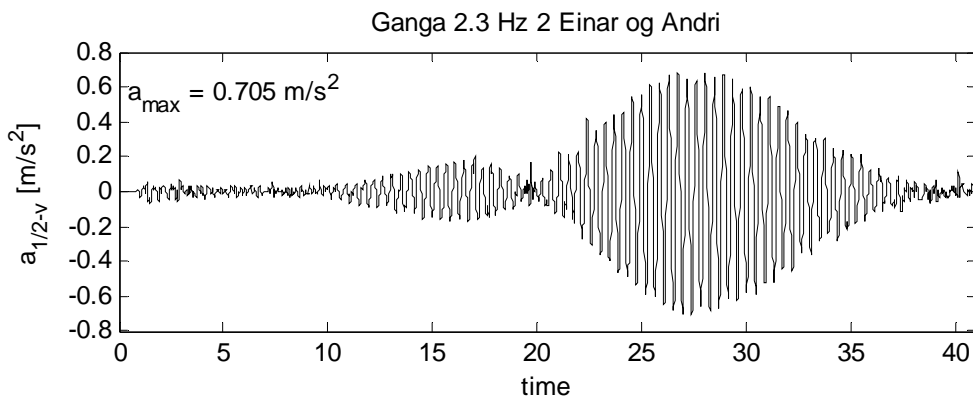


Mynd 4-2: Hópurinn að leggja á stað yfir brúna. (25 manns).

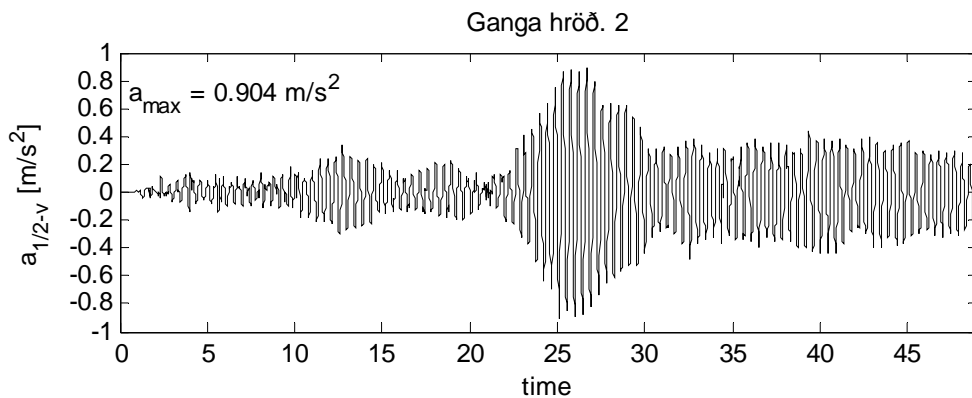
Svörun brúarinnar við hlaupaálagi var einnig metin og fyrir stakan vegfaranda mældist hröðun á bilinu $0,18 - 0,69 \text{ m/s}^2$ háð hlaupatíðninni, sjá einnig mynd 4-8 og 4-9. Fyrir tvo hlaupara mældist hröðunin á bilinu $0,27 - 1,43 \text{ m/s}^2$, sjá mynd 4-10. Gerð var hóptilraun þar sem 25 nemendur úr rafmagnsverkfræði við Háskóla Íslands tóku þátt (24 menn og 1 kona, aldur 20 – 30 ára). Tvívegis var mælt þar sem hópurinn gekk rösklega yfir brúna (göngutíðni ca. $2,3 \text{ Hz}$), sjá mynd 4-2. Mesta hröðun mældist $0,90 \text{ m/s}^2$ og tímaröðin er sýnd á mynd 4-5. Einnig var mælt fjórum sinnum þar sem hópurinn hljóp yfir brúna; tvívegis fyrir hægt hlaup (ca. $2,3 \text{ Hz}$) og tvívegis fyrir venjulegt hlaup (ca. $2,5 \text{ Hz}$). Mesta hröðun mældist $1,1 \text{ m/s}^2$ og tímaröðin er sýnd á mynd 4-6. Að lokum var gerð tilraun þar sem hópurinn var látinn ganga í hringi á aðalhafni brúarinnar í beinni röð, sjá mynd 4-3. Eina tilraunin sem gerð var til að stýra hlaupa- og göngutíðni hópsins var að fremsti maðurinn notaði taktmæli og stýrði þannig hraða hópsins. Tímaröð hröðunarinnar er sýnd á 4-7. Samantekt allra mælinga má sjá í töflu 4-1. Jafnframt voru gerðar nokkrar mælingar þar sem hoppað var á miðju hafi brúarinnar til að meta eigintíðni og deyfingu brúarinnar. Standandi maður á miðju hafi finnur greinilega hreyfingu þegar einn maður hleypur eftir brúnni. Aftur á móti þegar viðtakandinn er á hreyfingu sjálfur finnst hreyfing brúarinnar ekki.



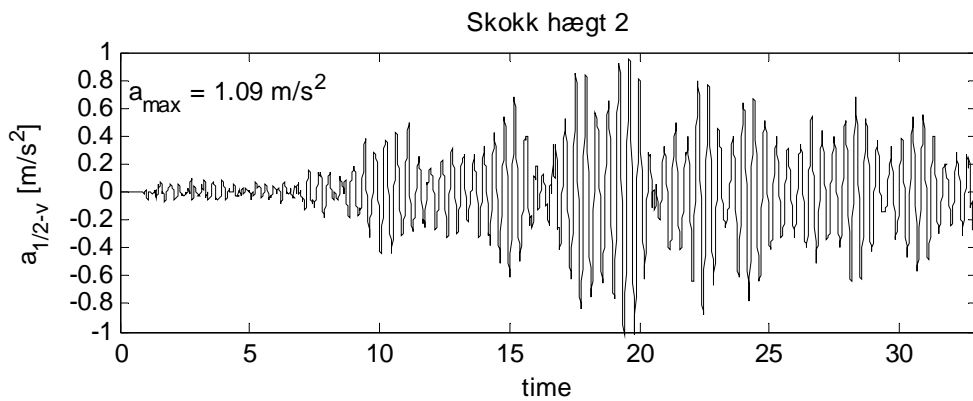
Mynd 4-3: Hópur að ganga í hringi á aðalhafri brúar.



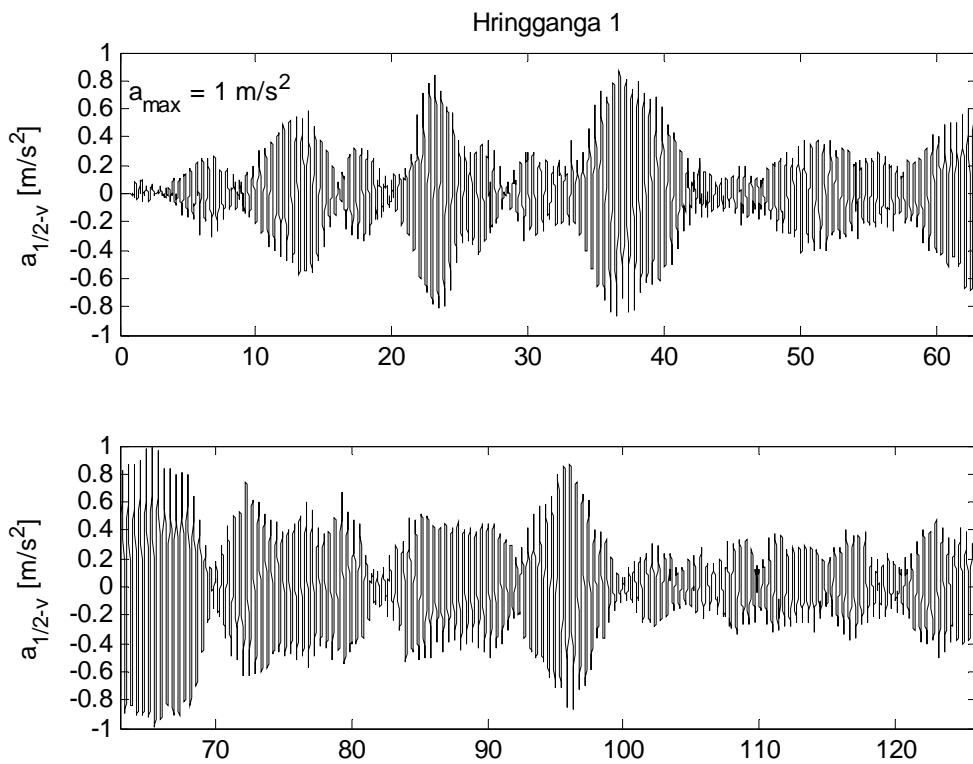
Mynd 4-4: Mæld hröðun á miðju aðalhafri fyrir tvo menn sem ganga yfir brú frá súlu #3. Þáttakendur: EPI og AHK.



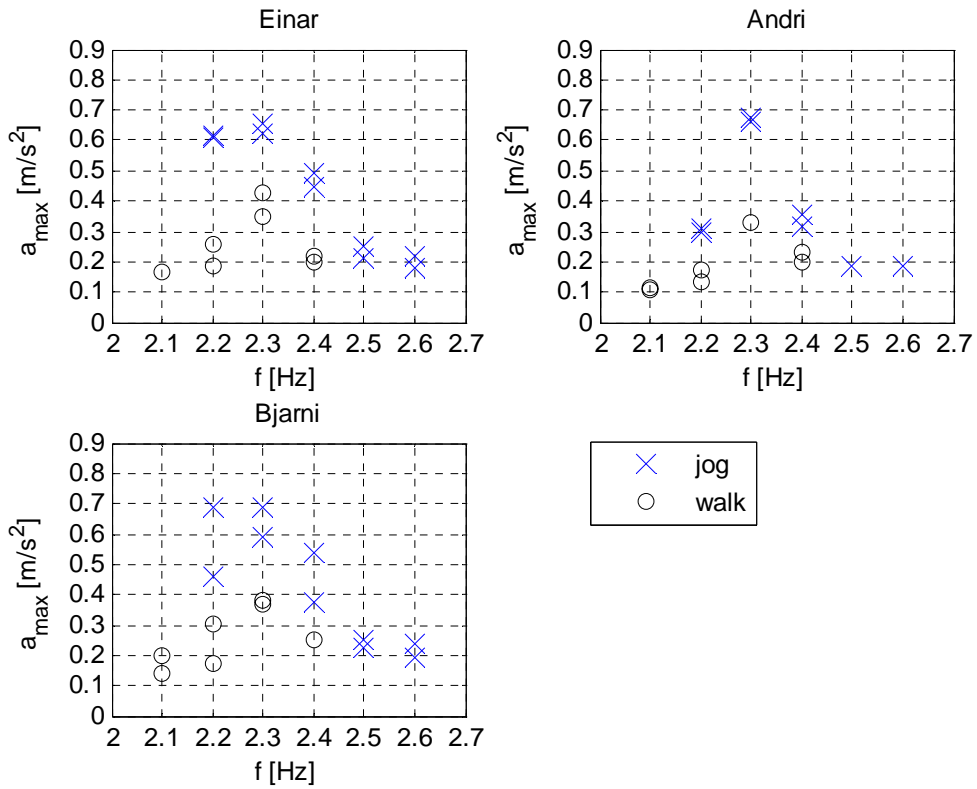
Mynd 4-5: Mæld hröðun á miðju aðalhafri fyrir 25 manna hóp sem gengur rösklega yfir brúna.



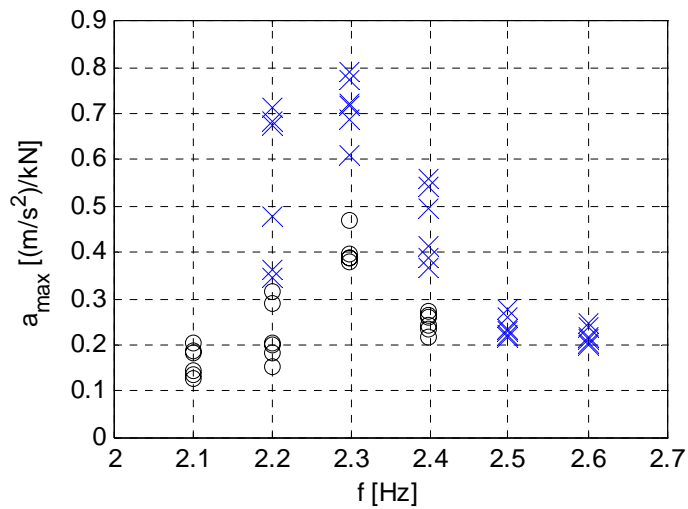
Mynd 4-6: Mæld hröðun á miðju aðalhafi fyrir 25 manna hóp sem skokkar hægt yfir brúna.



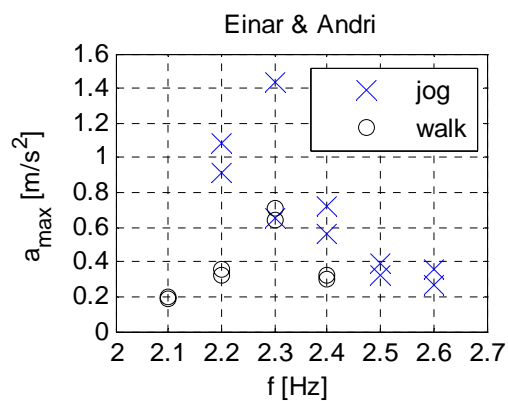
Mynd 4-7: Mæld hröðun á miðju aðalhafi fyrir 25 manna hóp sem gengur rösklega í hringi á aðalhafinu.



Mynd 4-8: Mesta mældu hröðun á miðju aðalhafi fyrir stakan vegfarenda.



Mynd 4-9: Mesta mælda hröðun á miðju aðalhafti í einstaklingstilraunum. Hröðun er kvörðuð miðað við líkamsþyngd þátttakenda.



Mynd 4-10: Mesta mælda hröðun á miðju aðalhafti fyrir tvo þátttakendur saman.

Tafla 4-1: Mesta mælda hröðun í hverri seríu.

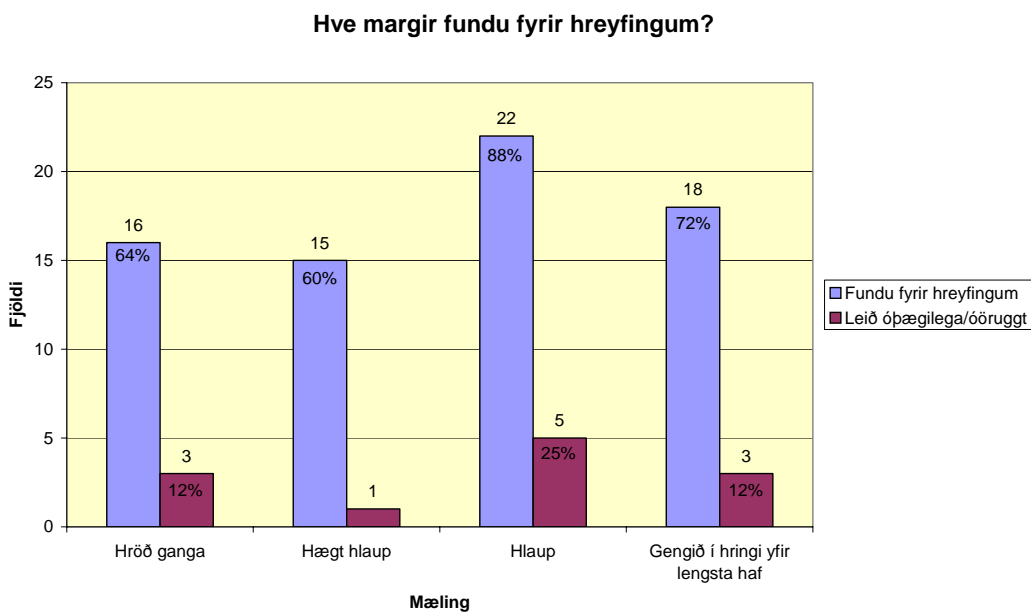
Fjöldi þátttakenda	Tegund	Tíðni	a _{max}
1	Ganga	2,1 – 2,4 Hz	0,11 – 0,42 m/s ²
2	Ganga	2,1 – 2,4 Hz	0,19 – 0,71 m/s ²
1	Skokk	2,2 – 2,6 Hz	0,18 – 0,69 m/s ²
2	Skokk	2,2 – 2,6 Hz	0,27 – 1,43 m/s ²
25	Ganga	~ 2,3 Hz	0,90 m/s ²
25	Skokk	~ 2,3 Hz	1,09 m/s ²
25	Hringganga	~ 2,3 Hz	1,00 m/s ²

4.3.2 Upplifun notenda á brúnni

Eins og greint var frá í kafla 4.3.1 tók 25 manna hópur þátt í mælingum á brúnni. Að mælingum loknum voru 5 spurningar lagðar fyrir hópinn til að meta upplifun notenda á brúnni við mismiklar hreyfingar brúarinnar. Spurningarnar voru:

1. Fannst þér þú geta gengið/hlaupið eðlilega á meðan mælingunum stóð?
2. Ef ekki, í hvaða tilraun fannst þú fyrir áhrifum sem breyttu því hvernig þú gengur/hleypur venjulega og hvernig?
3. Fannstu fyrir hreyfingum brúarinnar? Ef já, í hvaða tilraun?
4. Leið þér óþægilega eða varstu óöruggur meðan á einhverri tilraun stóð? Ef já, í hverri?
5. Höfðu hreyfingar brúarinnar áhrif á hvernig þú gekkst/hljópst? Ef já, í hvaða tilraun?

Mynd 4-11 sýnir niðurstöður úr könnuninni. Eins og sjá má á myndinni fann stærsti hluti hópsins fyrir hreyfingum brúarinnar á meðan mælingunum stóð og nokkrum fannst hreyfingarnar óþægilegar. Hönnunarviðmið breska brúarstaðalsins er að mesta leyfilega hröðun fyrir stakan mann sem fer yfir brúna er $0,76 \text{ m/s}^2$. Hönnunarviðmiðið byggir á tilraunum sem gerðar voru á fyrri hluta síðustu aldar, þar sem mörkin fyrir óþægilegar sveiflur voru skilgreind sem fall af eigintíðninni sem $a_{max} = 0,5f^{1/2}$, sjá [Zivanovic et.al., 2005]. Rétt er að taka fram að þessi mörk eru fengin fyrir fólk sem verður fyrir hreinsveifluálagi og ekki er því víst að það gefi sömu mörk fyrir sveiflur sem mælast á göngubrú.



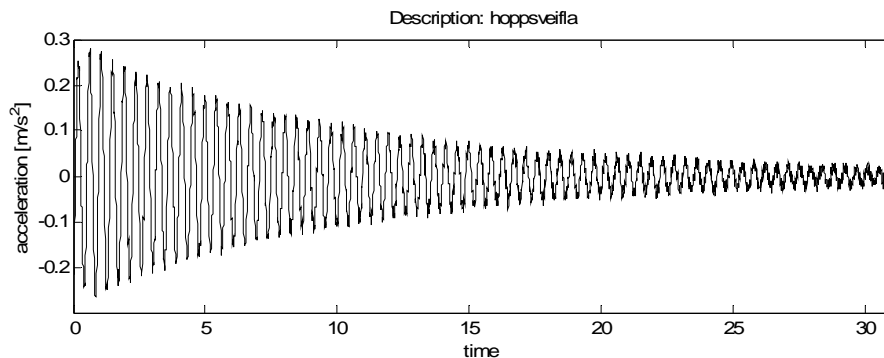
Mynd 4-11: Niðurstöður könnunar á upplifun notenda brúarinnar. Hve margir fundu fyrir hreyfingum brúarinnar meðan gengið/hlaupið var yfir brúna.

Þegar hópurinn var látinn ganga í hringi á aðalhafni brúarinnar voru níu manns sem töldu sig hafa byrjað að ganga í takt við sveiflur brúarinnar. Þetta er áhugaverð athugun, þar sem niðurstöður mælinganna gefa engar vísbendingar um að fólk hafi gengið í takt, sjá mynd 4-7. Svörunin er minni en þreföld svörunin fyrir stakan mann

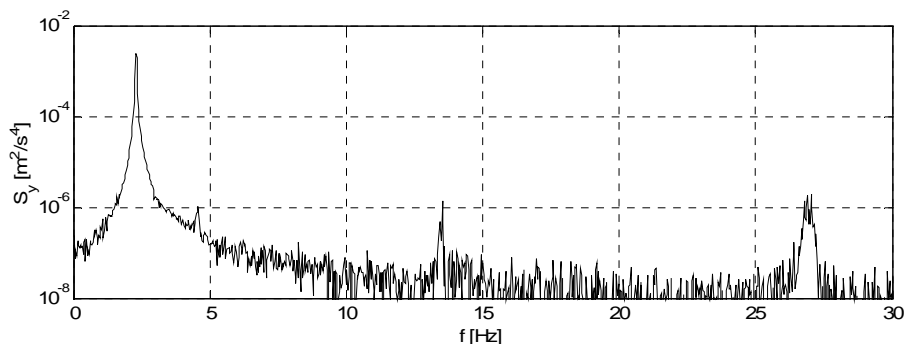
sem gengur á eigintíðni brúarinnar. Þetta er ekki hægt að útskýra með því að halda fram að göngutíðnin hafi verið sú sama en fasinn milli hvers einstaklings á brúnni mismunandi, því ef einstaklingur gengur í takt við sveiflu brúarinnar, þá er ekki eingöngu tíðnin heldur einnig fasinn sá sami.

4.3.3 Eigintíðni

Eigintíðni brúarinnar er ákvörðuð með því að koma henni á hreyfingu, t.d. með því að hoppa og mæla svo hröðunina þegar brúin sveiflast frítt (e. free decay). Eigintíðnin ákvarðast með því að breyta tímaröðinni í orkuróf við hefðbundna Fourier-vörpun og finna hæsta gildi í orkurófinu. Dæmi um tímaröð og tilsvareandi orkuróf má sjá á mynd 4-12 og 4-13.



Mynd 4-12: Tímaröð hröðunar á aðalhafi fyrir hopp á aðalhafi.



Mynd 4-13: Orkuróf fyrir hopp á aðalhafi.

Af mynd 4-13 sést greinilega að eigintíðni brúarinnar er þar sem toppurinn á orkurófinu er, eða u.þ.b. 2.3 Hz . Við nánari skoðun á fleiri tímaröðum (og tilsvareandi orkurófum) kom í ljós að eigintíðni fyrsta lóðréttu sveifluforms er $f_1 \approx 2,30 \text{ Hz}$.

4.3.4 Deyfing

Deyfing brúarinnar ákvarðast á samsvarandi hátt og eigintíðnin, þ.e. brúnni er komið á hreyfingu og frísveifla hennar mæld. Fyrir einnar frelsisgráðu kerfi má rita frísveifluna á eftirfarandi hátt, sjá t.d. [Chopra, 2001]:

$$x(t) = X \sin(\omega_d t - \phi) e^{-\zeta \omega_0 t} \quad (4-1)$$

þar sem ω_0 er eigintíðni brúarinnar [rad/s], ω_d er deyfð eigintíðni brúarinnar og ζ er deyfingarhlutfallið. Fasahornið er φ og X er sveifluútvikið. Út frá jöfnu (4-1) og sé gert ráð fyrir að dempunin er lítil, þ.e. $\zeta \ll 1$ má sýna að deyfingin er

$$\zeta = \frac{\ln(x_n / x_{n+m})}{2\pi m} \quad (4-2)$$

þar sem x_n er sveifluútvikið við sveiflutopp n og x_{n+m} er sveifluútvikið m toppum síðar í tímaröðinni. Jafna (4-2) var notuð til að meta deyfinguna fyrir nokkrar mismunandi tímaröðir og niðurstöðurnar má sjá í töflu 4-2.

Tafla 4-2: Mæld deyfing á brú yfir Hringbraut við Njarðargötu.

ζ	x_n	x_{n+m}
0,0055	0,199 m/s^2	0,100 m/s^2
0,0055	0,100 m/s^2	0,050 m/s^2
0,0062	0,280 m/s^2	0,128 m/s^2
0,0064	0,128 m/s^2	0,057 m/s^2
0,0065	0,283 m/s^2	0,125 m/s^2
0,0053	0,125 m/s^2	0,064 m/s^2

Meðalgildi deyfingarinnar er $\zeta = 0,0059$ eða 0,6 % af krítísku deyfingarhlutfalli og ber að líta á þetta sem deyfingarhlutfall brúarinnar fyrir fyrsta lóðrétta sveifluformið, þ.e. við 2,30 Hz.

4.4 Göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala

4.4.1 Hröðun

Í töflu 4-3 má sjá mælda hröðun fyrir göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala. Mælt var á þremur stöðum á lengsta hafi brúarinnar sem er 24,5 m langt. Mælt var á miðju hafi bæði í innri og ytri kanti (austur og vestur megin) og í fjórðungspunkti hafsins í ytri kanti (vestur megin).

Mæld var svörun brúarinnar við hlaupaálagi. Þrír hlauparar tóku þátt í tilrauninni og hljóp hver fram og til baka yfir brúna á ákveðinni tíðni. Hlauparinn stjórnaði taktinum með taktmæli. Alls voru þetta fjórtán hlaup fyrir hvern mann á sjö mismunandi tíðnum frá 2,6 Hz til 3,2 Hz. Hlaup með tíðni 2,6 Hz er rólegt hlaup, hlaup með tíðni 3,0 Hz er orðið nokkuð hratt hlaup en hlaupatíðni hærri en 3,0 Hz er nánast orðið spretthlaup. Hröðunin mældist á bilinu 0,14 – 1,02 m/s^2 háð hlaupatíðninni. Mynd 4-16 sýnir dæmi um mælda tímaröð fyrir stakan mann sem skokkar yfir brúna á eigintíðninni, þ.e. við 3,0 Hz. Á mynd 4-21 má sjá mestu hröðun brúarinnar sem fall af hlaupatíðninni fyrir þátttakendurna þrjá. Á mynd 4-22 er búið að kvarða hröðunina með tilliti til þyngdar einstaklingsins og er því hentugra til samanburðar en mynd 4-21. Það sést að mælingarnar falla misvel saman fyrir hverja tíðni en greinilegt hágildi er á mældri hröðun þegar hlaupið er á eigintíðni brúarinnar eins og búið var við.

Hröðun fyrir tvo hlaupara sem reyndu að hlaupa á sömu tíðni var mæld og mesta hröðun var á bilinu 0,23 – 1,72 m/s^2 . Mynd 4-17 og 4-18 sýna dæmi um mældar tímaröðir fyrir tvo hlaupara sem hlaupa annars vegar á tíðninni 2,6 Hz og hins vegar á

tíðninni 3,0 Hz. Mynd 4-23 sýnir mestu hröðun í hverri tímaröð fyrir tvo hlaupara sem fall af hlaupatíðninni.

Hröðun var einnig mæld fyrir 5 manna hóp. Fyrir venjulega göngu var mæld hröðun $0,21 \text{ m/s}^2$. Þá voru gerðar nokkrar mælingar þar sem sami hópur hljóp yfir brúna á tíðni sem næst eigintíðni brúarinnar. Hópurinn hljóp í beinni röð og hljóp annars vegar milli enda brúarinnar (sjá mynd 4-19) og hins vegar í hringi yfir lengsta hafið. Í töflunni má sjá að mæld hröðun var á bilinu $1,10 - 2,50 \text{ m/s}^2$. Hæsta gildið var þegar hlaupið var í hringi yfir hafið. Jafnframt voru gerðar nokkrar mælingar þar sem hoppað var á miðju hafi brúarinnar til að meta eigintíðni og dempun brúarinnar. Við hoppssveiflur þar sem hópurinn reyndi að hoppa við eigintíðni brúarinnar mældist mesta hröðun á bilinu $2,7 - 4,1 \text{ m/s}^2$. Dæmi um mælingu frá hoppi er sýnd á mynd 4-20. Þegar Lokahátíð Vinnuskóla Reykjavíkur fór fram var hröðun brúarinnar mæld. Göngubrúin var fulllestuð af fólki eins og sjá má á mynd 4-14 og 4-15 og var skrúðgangan rúmlega 10 mínútur að fara yfir brúna. Hópurinn gekk hægt yfir brúna og fyrir mann í kyrrstöðu á miðju hafi mátti greina lítilsháttar hreyfingu brúarinnar stærsta hluta tímans. Þó tók brúin nokkra “kippi” sem voru vel greinilegir en stóðu mjög stutt. Hröðunarmælingarnar sem teknar voru meðan á skrúðgöngunni stóð eru því miður ómarktækar og verða því ekki kynntar hér. Niðurstaðan er þó sú að vegna þess hversu þéttur hópurinn var, þá lækkaði gönguhraðinn og þar með göngutíðnin og sveifluútvik álagsins.



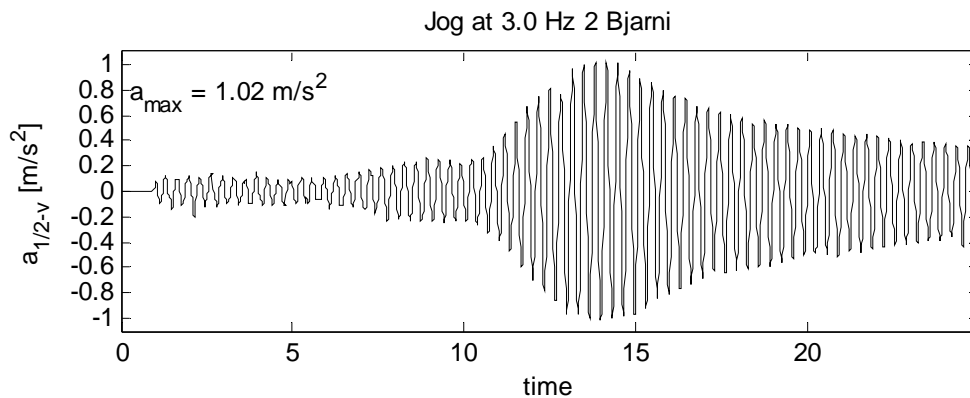
Mynd 4-14: Skrúðganga á leið yfir brúna.



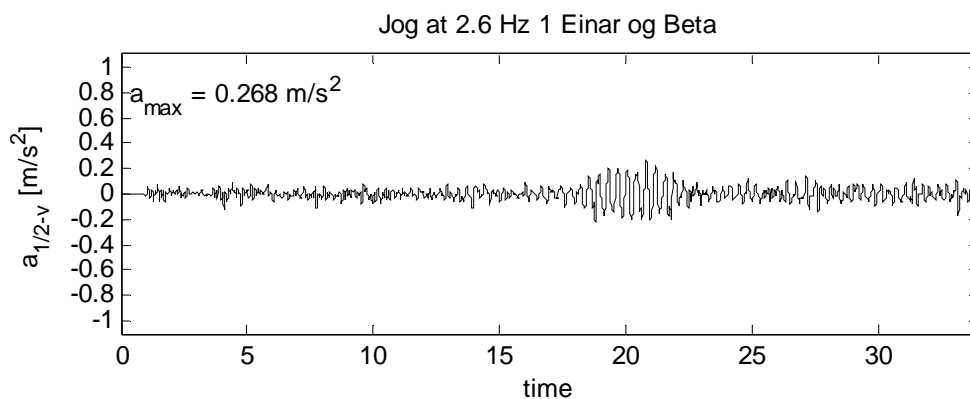
Mynd 4-15: Skríðganga að fara yfir göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala.

Tafla 4-3: Mesta mæld hröðun í hverri tímaröð. Niðurstöður frá 13. júlí 2006.

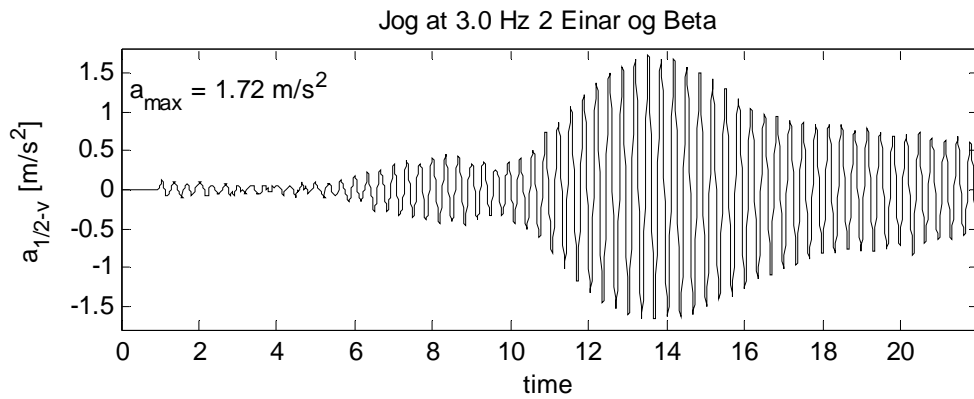
Fjöldi Þátttakenda	Tegund	Tíðni	a_{max}
1 (Einar)	Skokk	2,6 – 3,2 Hz	0,20 – 0,98 m/s ²
1 (Elísabet)	Skokk	2,6 – 3,2 Hz	0,14 – 0,79 m/s ²
1 (Bjarni)	Skokk	2,6 – 3,2 Hz	0,28 – 1,02 m/s ²
2 (Einar og Elísabet)	Skokk	2,6 – 3,2 Hz	0,23 – 1,72 m/s ²
5	Ganga		0,21 m/s ²
5	Skokk		1,60 m/s ²
5	Skokk		1,10 m/s ²
5	Skokk í hringi		2,50 m/s ²
5	Hopp	3,0 Hz	2,72 – 4,1 m/s ²
2000	Ganga		-



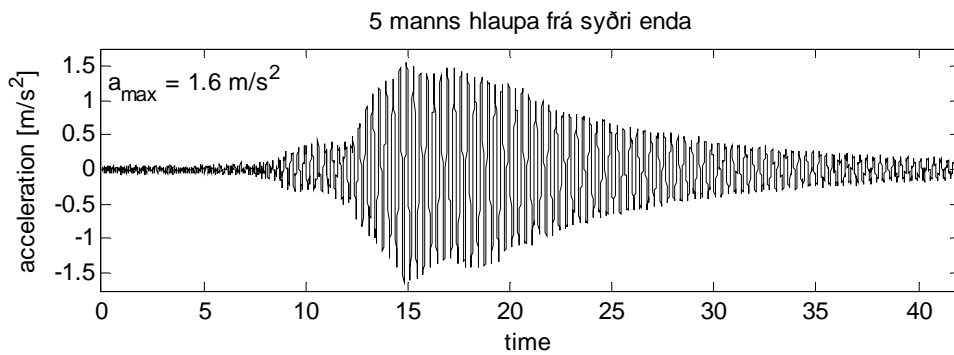
Mynd 4-16: Mæld hröðun fyrir stakan mann sem hleypur yfir brúna með tíðninni 3,0 Hz.



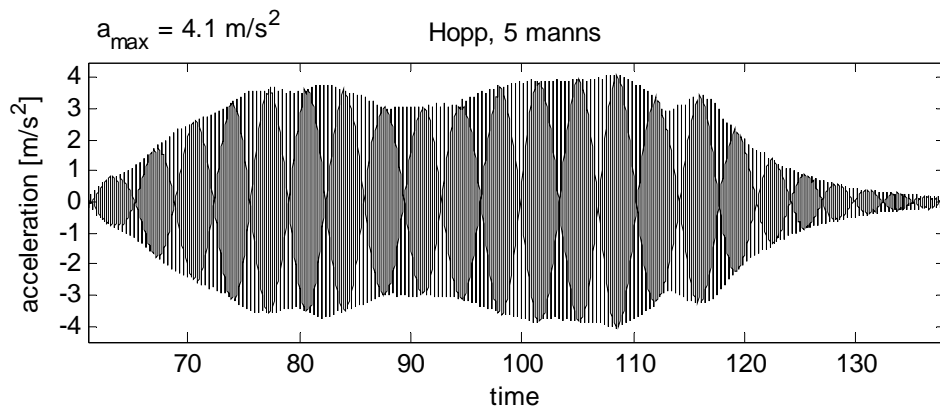
Mynd 4-17: Mæld hröðun fyrir tvo sem hlaupa saman yfir brúna með tíðninni 2,6 Hz.



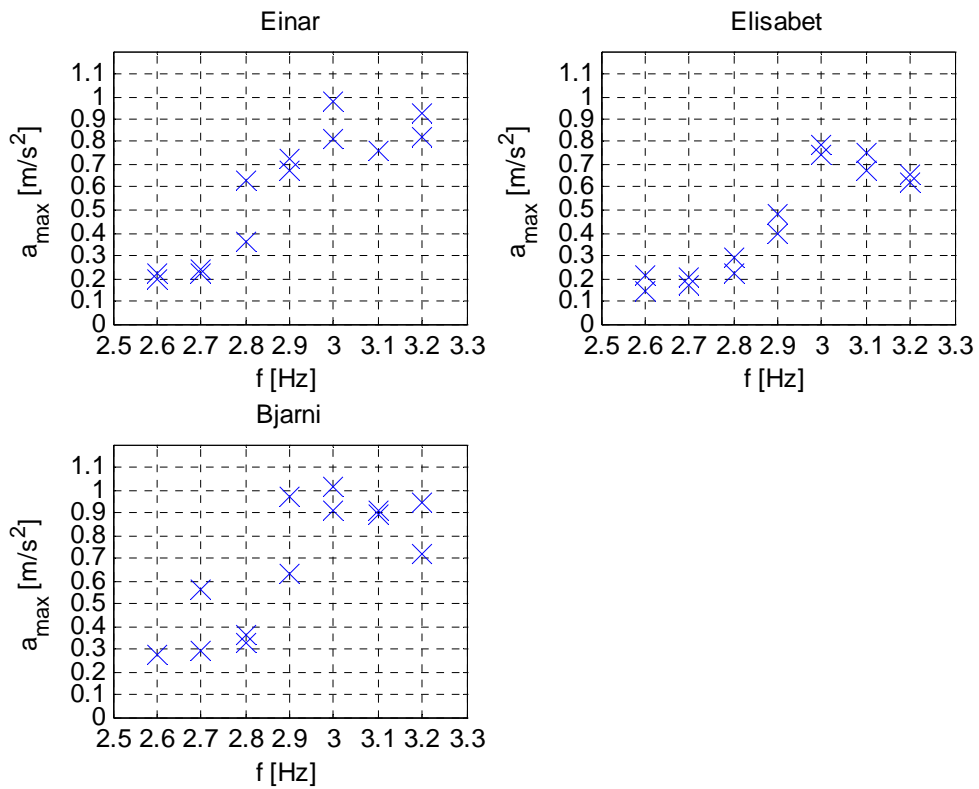
Mynd 4-18: Mæld hröðun fyrir tvo sem hlaupa saman yfir brúna með tíðninni 3,0 Hz.



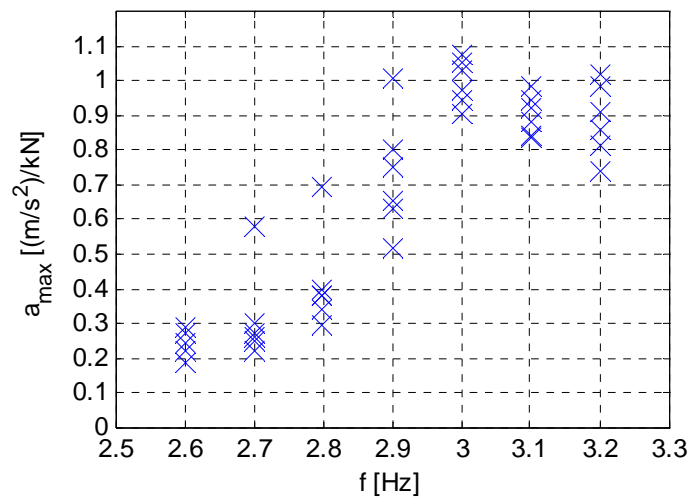
Mynd 4-19: Mæld hröðun fyrir 5 manns sem hlaupa frá suðri til norðurs.



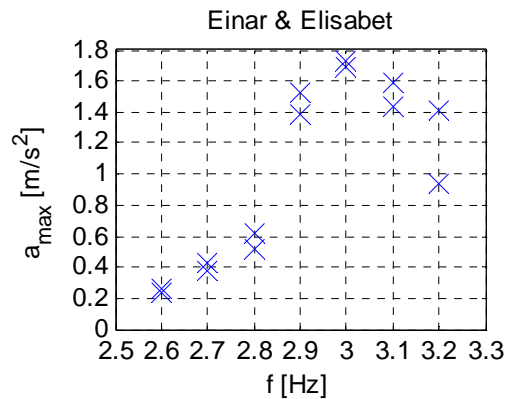
Mynd 4-20: Mæld hröðun þegar 5 manns hoppa á miðju aðalhafni.



Mynd 4-21: Mesta mælda hröðun í hverri tímaröð sem fall af hlaupatiðninni.



Mynd 4-22: Mesta mælda hröðun í hverri tímaröð sem fall af hlaupatiðninni. Hröðun er kvörðuð miðað við bygð þátttakendans.



Mynd 4-23: Mesta mældar hröðun í hverri tímaröð fyrir tvo hlaupara sem fall af hlaupatíðninni.

4.4.2 Eigintíðni

Eigintíðni brúarinnar var mæld á sambærilegan hátt og fyrir brúna við Njarðargötu, sjá kafla 4.3.2. Við að skoða 5 mældar tímaröðir var staðfest að eigintíðni brúarinnar fyrir fyrsta lóðréttu sveifluformið er $f_1 \approx 3,0 \text{ Hz}$.

4.4.3 Deyfing

Deyfing brúarinnar var mæld á sama hátt og deyfing á brúnni við Njarðargötu, sjá kafla 4.3.3. Niðurstöðurnar eru sýndar í töflu 4-4.

Tafla 4-4: Mæld deyfing brúar yfir Hringbraut við Landspítala.

ζ	x_n	x_{n+m}
0,0085	0,390 m/s ²	0,205 m/s ²
0,0071	0,205 m/s ²	0,120 m/s ²
0,0077	2,11 m/s ²	1,18 m/s ²
0,0088	1,18 m/s ²	0,61 m/s ²
0,0066	2,55 m/s ²	1,55 m/s ²
0,0130	1,55 m/s ²	0,58 m/s ²
0,0089	3,29 m/s ²	1,68 m/s ²
0,0083	1,68 m/s ²	0,90 m/s ²
0,0075	0,90 m/s ²	0,51 m/s ²
0,0100	3,24 m/s ²	1,53 m/s ²
0,0154	1,53 m/s ²	0,48 m/s ²

Meðalgildi deyfingar er $\zeta = 0,00925$ eða 0,9 % af krítísku deyfingarhlutfalli og ber að líta á þetta sem deyfingarhlutfall brúarinnar við fyrsta lóðréttu sveifluform, þ.e. $f_1 = 3,0 \text{ Hz}$.

4.5 Göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði

4.5.1 Hröðun

Í töflu 4-5 má sjá mælda hröðun fyrir göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði. Tveir einstaklingar tóku þátt í tilrauninni og fór hver þeirra 20 sinnum yfir brúna; 6 sinnum gangandi (1,8 – 2,0 Hz) og 14 sinnum skokkandi (2,4 – 3,0 Hz). Mynd 4-24 sýnir stakan vegfarenda á leið yfir brúna. Hröðunarnemarnir sjást í plastpokum á brúardekkinu.

Fyrir gangandi vegfarendur var erfitt að meta hröðunina þar sem mikið suð var á mælingunum. Suðið var vegna þess að mikill raki hefur verið í mælitækjunum þegar á mælingunum stóð. Sem dæmi sýnir mynd 4-25 mælda hröðun á miðju norðurhafi þegar stakur maður gengur yfir brúna. Með því að nota low-pass filter, má sía í burtu hátíðni suð. Mynd 4-26 sýnir sömu tímaröð eftir síu þar sem allar tíðnir hærri en 10 Hz eru síaðar í burtu. Hröðunin var því ákvörðuð fyrir hverja tímaröð með því að skoða einungis neikvæð hröðunargildi og sleppa því að taka tillit til stakra toppa í mælingunum. Það má því segja að mesta hröðun brúarinnar við gönguálag hafi verið á bilinu 0,22 – 0,47 m/s^2 háð göngutíðninni, sjá einnig mynd 4-29.

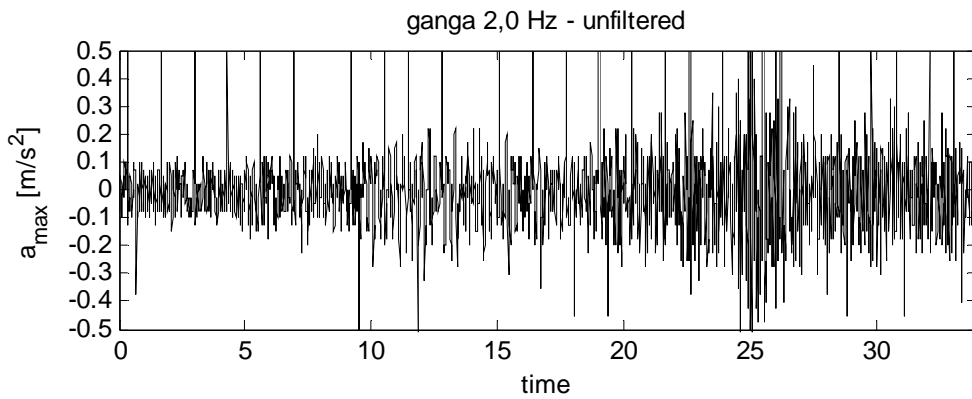
Fyrir hlaup mældist hröðun á bilinu 0,51 til 2,22 m/s^2 háð hlaupatíðninni og má sjá dæmi um tímaröð á mynd 4-27. Einnig voru nokkrar hopp sveiflur mældar og mældist hröðun fyrir einn mann á bilinu 1,42 – 2,73 m/s^2 . Dæmi um mælda hröðun við hoppálag er sýnt á mynd 4-28.



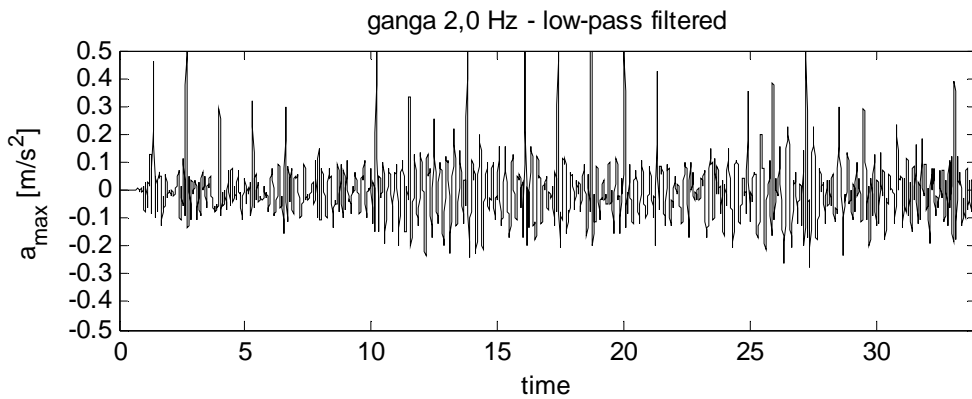
Mynd 4-24: Einn hlaupari á leið yfir brú.

Tafla 4-5: Mesta mælda hröðun á stálbrú yfir Miklubraut við Grundargerði.

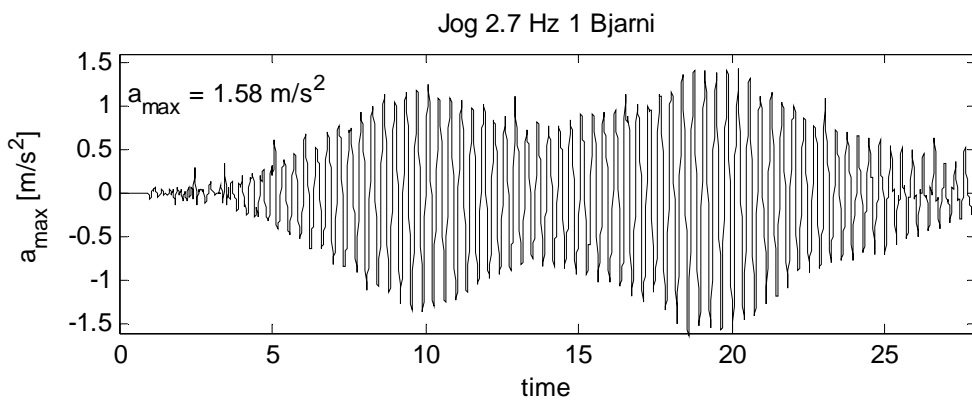
Fjöldi þátttakenda	Tegund	Tíðni	a_{max}
1 (Einar)	Ganga	1,8 – 2,0 Hz	0,22 – 0,33 m/s^2
1 (Bjarni)	Ganga	1,8 – 2,0 Hz	0,22 – 0,47 m/s^2
1 (Einar)	Skokk	2,6 – 3,0 Hz	0,58 – 2,22 m/s^2
1 (Bjarni)	Skokk	2,6 – 3,0 Hz	0,51 – 1,65 m/s^2
1	Hopp	2,6 – 2,8 Hz	1,42 – 2,73 m/s^2



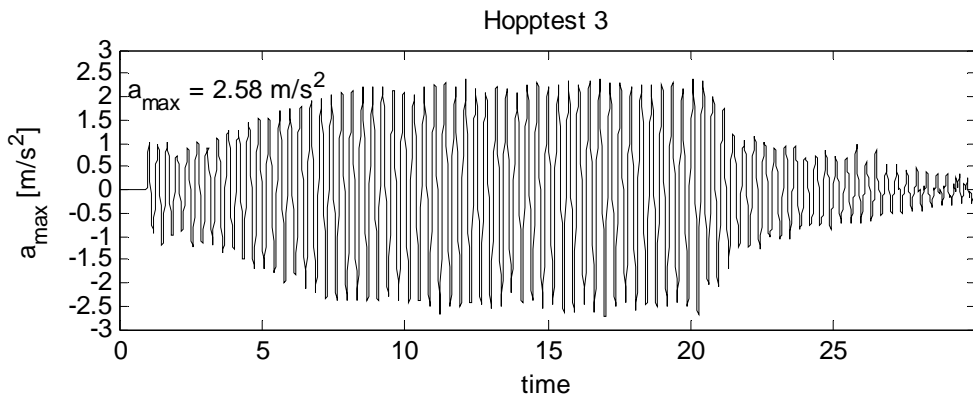
Mynd 4-25: Mæld hröðun á miðju norðurhafi fyrir gangandi vegfaranda við tíðnina 2,0 Hz.



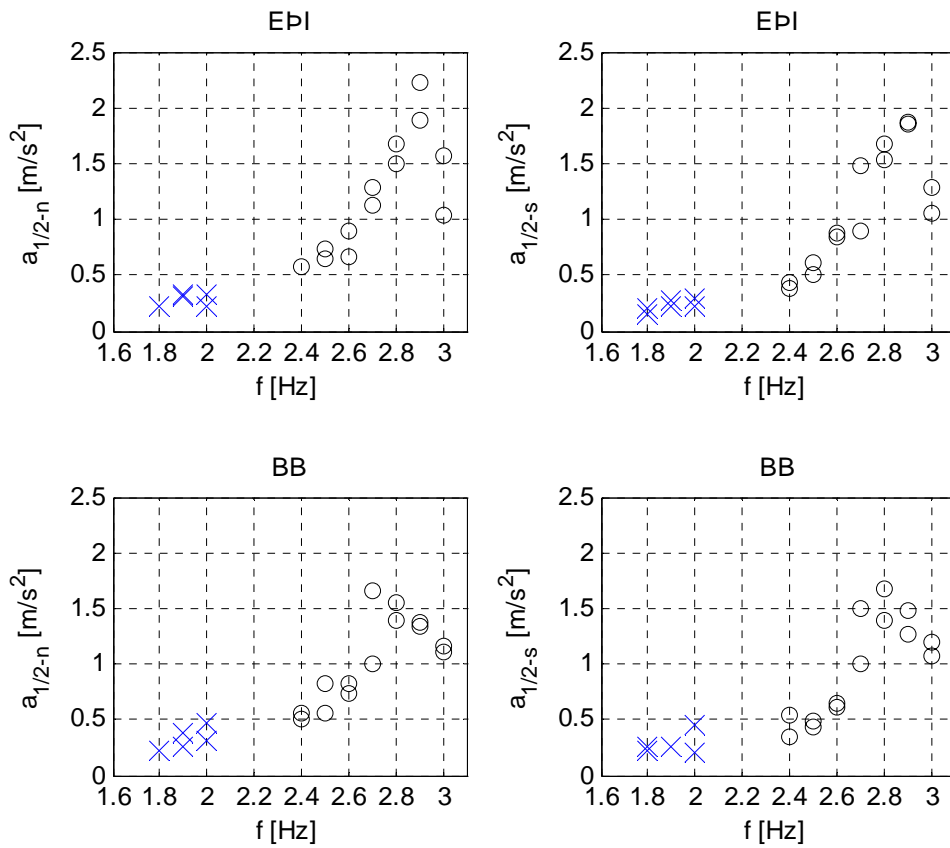
Mynd 4-26: Súð hröðun á miðju norðurhafi fyrir gangandi vegfaranda við tíðnina 2,0 Hz.



Mynd 4-27: Mæld hröðun á miðju norðurhafi fyrir hlaupandi vegfaranda við tíðnina 2,7 Hz.



Mynd 4-28: Mæld hröðun á miðju suðurhafi fyrir einn hoppandi mann.



Mynd 4-29: Mesta hröðun sem fall af göngu/hlaupatiðni þátttakandas. Vinstra megin er mesta hröðun á norður hafi og hægra megin er mesta hröðun á suður hafi.

4.5.2 Eigintíðni

Eigintíðni brúarinnar var ákvörðuð á sama hátt og fyrir brýrnar yfir Hringbraut. Niðurstaðan er að eigintíðni brúarinnar fyrir fyrsta lóðrétta sveifluformið er $\approx 2,65 \text{ Hz}$.

4.5.3 Deyfing

Deyfing brúarinnar var mæld á sama hátt og deyfingin á brúnni við Njarðargötu, sjá kafla 4.3.3. Niðurstöðurnar eru sýndar í töflu 4-6.

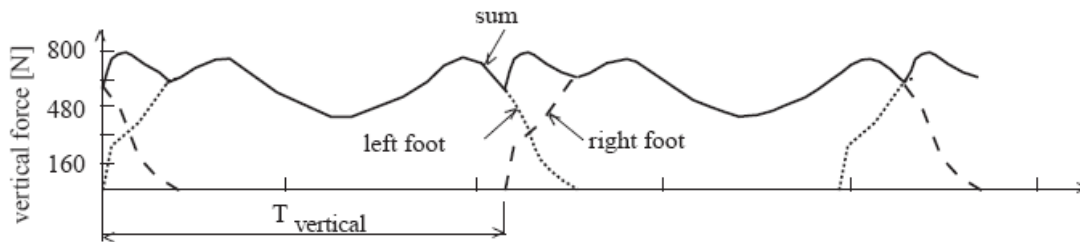
Tafla 4-6: Mæld deyfing brúar yfir Miklubraut við Grundargerði.

ζ	x_n	x_{n+m}
0,023	1,01 m/s^2	0,17 m/s^2
0,021	0,17 m/s^2	0,035 m/s^2
0,015	0,40 m/s^2	0,127 m/s^2
0,019	0,127 m/s^2	0,03 m/s^2

Meðalgildi er $\zeta = 0,0195$ eða 2 % af krítísku deyfingarhlutfalli og er það miðað við fyrsta lóðrétta sveifluform brúarinnar.

5 ÁLAGSLÍKÖN

Í þessum kafla er fjallað um það lóðrétta álag sem myndast vegna ferðar manns/manna yfir mannvirki. Í stuttu máli samanstendur krafturinn af meðalgildi álagsins (sem er óháð tíma og jafnt þunga mannsins) og tímaháðum hluta sem kemur vegna höggsins sem myndast við hvert fótspor. Þessi hluti er því háður göngutíðninni, þ.e. fjölda skrefa á sekúndu (f_p). Mynd 5-1 sýnir dæmi um lóðréttt álag frá fótgangandi vegfarenda.



Mynd 5-1: Dæmi um lóðréttt álag sem fall af tíma fyrir fótgangandi vegfarenda.
Mynd úr [Zivanovic et.al., 2005].

Mörg mannvirki verða fyrir álagi af völdum manna þar sem sérstaklega þarf að huga að sveifluhegðun, hér má nefna áhorfendastúkur, skrifstofugólf, íþróttasali og göngubrýr. Fyrir göngubrýr þarf að huga að álagi vegna

- Gangandi vegfarenda
- Hlaupandi vegfarenda
- Hugsanlegra skemmdarverka (hopp)
- Hópa fólks (skrudgöngur, hlaupahópar eða annað)

Þar sem fólk er ólíkt, munu engir tveir einstaklingar gefa sama álag. Þess vegna er mikilvægt að skilgreina þær breytur sem hafa mest áhrif á álagið. Þessar breytur eru:

- Göngutíðni (e. pacing rate)
- Þyngd
- Skreflengd
- Sveifluútvik álagsins (e. Dynamic Load Factors)

Af ofanefndum breytum er þyngdin sú sem er einna best skilgreind og auðveldast að mæla. Oft er talað um að meðalþyngd manns sé u.þ.b. 70 – 80 kg. Þess má geta að árið 2000 var meðalþyngd dönsku þjóðarinnar 74,0 kg og staðalfráviknið 14,72 kg skv. upplýsingum frá heilbrigðisráðuneyti Danmerkur og því er líklegt að samsvarandi tölur eigi við fyrir íslensku þjóðina.

Göngutíðnin er mjög einstaklingsbundin, en samkvæmt mælingu sem gerð var á 505 manns í Japan sást að göngutíðnin er mjög nálægt því að vera normaldreifð með meðaltal $f_p = 2,0 \text{ Hz}$ og staðalfráviknið $\sigma_{fp} = 0,173 \text{ Hz}$. Nýrri rannsóknir gefa þó í skyn að göngutíðnin sé heldur lægri en það sem Matsumoto fékk, eða um 1,85 – 1,90 Hz, sjá [Zivanovic, 2006], [Sahnaci & Kasperski, 2005] eða [Ingólfsson, 2006]. Tilraunin var gerð á fólki úti á götu sem gekk eðlilega, [Matsumoto et.al. 1972, 1978]. Tafla 5-1 sýnir grunntíðni álags við mismunandi hreyfingu samkvæmt [Bachmann, 2002].

Tafla 5-1: Grunntíðni álags við mismunandi hreyfingu, skv. [Bachmann, 2002].

Hreyfing	Tíðnisvið [Hz]	Hægt [Hz]	Venjulegt [Hz]	Hratt [Hz]
Ganga	1,4 – 2,4	1,4 – 1,7	1,7 – 2,2	2,2 – 2,4
Hlaup	1,9 – 3,3	1,9 – 2,2	2,2 – 2,7	2,7 – 3,3
Hopp	1,3 – 3,4	1,3 – 1,9	1,9 – 3,0	3,0 – 3,4

Skreflengd vegfarandans hefur áhrif á svörun mannvirkisins þar sem það hefur áhrif á hvernig álagið dreifist á mannvirkið. Tafla 5-2 sýnir meðalgildi skreflengdar fyrir göngu og hlaup. Niðurstöðurnar í töflunni byggja á tilraunum gerðar af [Wheeler, 1982].

Tafla 5-2: Samband göngutíðni/hlaupatíðni og skreflengdar, skv. [Bachmann, 2002].

	f_p [Hz]	l_p [m]
Hæg ganga	~1,7	0,60
Venjuleg ganga	~2,0	0,75
Hröð ganga	~2,3	1,00
Skokk	~2,5	1,30
Hlaup/sprettur	~3,2	1,75

5.1 Gönguálag

Ef gert er ráð fyrir að vegfarandinn gangi í sama takti allan tímann og að álagið við hvert skref sé eins og það á undan þá er álagið lotubundið (e. periodic). Almennt má lýsa lotubundinni örvun sem röð af hreinsveiflubylgjum, þ.e. Fourier-röð. Fyrir gönguálag er grunntíðni Fourier-raðarinnar göngutíðnin, f_p , og oftast nóg að taka aðeins fyrstu 3 liðina með, þ.e. álagið er ritað sem

$$F(t) = G_p \left[1 + \sum_{j=1}^3 \alpha_j \sin(2j\pi f_p t - \phi_j) \right] \quad (5-1)$$

Þar sem

G_p :	þyngd vegfarandans	[N]
α_j :	Fourier-stuðull fyrir j -ta sveiflutímahlutfall.	[-]
f_p :	göngutíðni vegfarenda	[Hz]
ϕ_j :	fasahorn fyrir j -ta sveiflutímahlutfall	[rad]

Þar sem vegfarandinn fer yfir brúna/mannvirkið er ekki nóg að skoða einungis hvernig álagið breytist sem fall af tíma, heldur þarf einnig að taka tillit til staðsetningar vegfarendans, $x(t)$. Álagið má því rita sem:

$$F(x, t) = G_p \left[1 + \sum_{j=1}^3 \alpha_j \sin(2j\pi f_p t - \phi_j) \right] \delta(x - f_p l_p t) \quad (5-2)$$

þar sem

l_p :	Skreflengdin	[m]
δ :	Dirac's delta fall	

Fourier stuðlarnir, α_1 , α_2 og α_3 ákvarðast út frá tilraunum. Mismunandi gildi hafa verið sett fram fyrir Fourier-stuðlana og helst ber að nefna [Bachmann et.al., 1996] sem leggur til að eftirfarandi gildi séu notuð:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0,4 & (f_p = 2,0 \text{ Hz}) & \quad \& \quad \alpha_1 = 0,5 & \quad (f_p = 2,3 \text{ Hz}) \\ \alpha_2 &= 0,1 \\ \alpha_3 &= 0,1 \end{aligned}$$

Einnig hefur verið lagt til að notað sé línulegt sambengi milli göngutíðninnar og Fourier-stuðlanna. Þessi tillaga kemur úr [Young, 2001] og byggir á samantekt frá mörgum mismunandi höfundum og er meðalgildi á Fourier-stuðlunum. Samband milli göngutíðninnar og stuðlanna er:

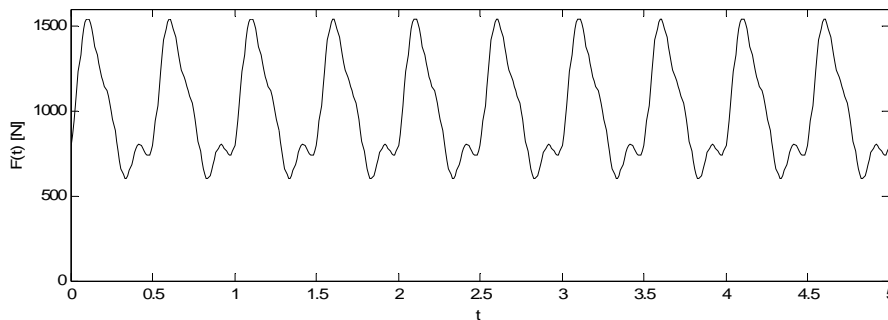
$$\alpha_1 = 0,37(f_p - 0,95) \leq 0,5 \quad 1,0 \leq f_p \leq 2,8 \text{ Hz} \quad (5-3a)$$

$$\alpha_2 = 0,054 + 0,0044 f_p \quad 2,0 < f_p \leq 5,6 \text{ Hz} \quad (5-3b)$$

$$\alpha_3 = 0,026 + 0,0050 f_p \quad 3,0 < f_p \leq 8,4 \text{ Hz} \quad (5-3c)$$

$$\alpha_4 = 0,010 + 0,0051 f_p \quad 4,0 < f_p \leq 11,2 \text{ Hz} \quad (5-3d)$$

Rétt er að geta þess að það er mikil dreifing á Fourier-stuðlunum og því ákveðin óvissa í sveifluútviki álagsins í líkaninu. Það sem er einkennandi fyrir gönguálag er að vegfarandinn er alltaf í snertingu við jörðina og tímaröðin því samfelld. Mynd 5-2, sýnir álagið sem fall af tíma fyrir stakan vegfaranda sem gengur með tíðninni $f_p = 2,0 \text{ Hz}$.

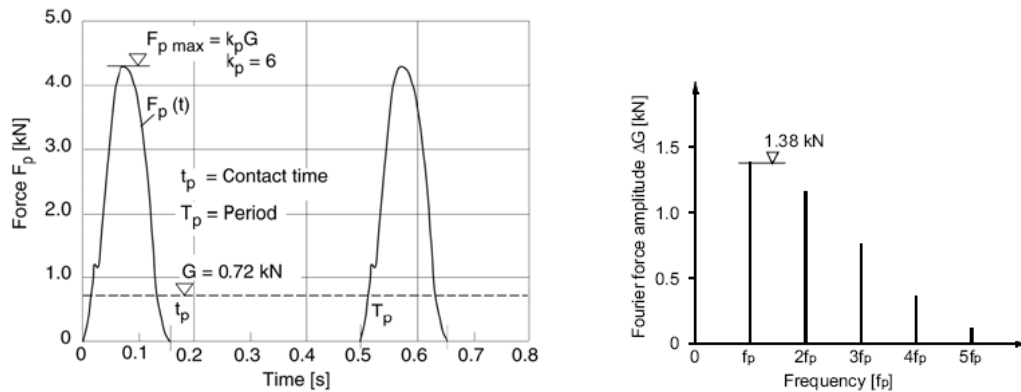


Mynd 5-2: Gönguálag sem fall af tíma. $G_p = 1000 \text{ N}$, $\alpha_1 = 0,4$, $\alpha_2 = 0,1$, $\alpha_3 = 0,1$, $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$ og $f_p = 2,0 \text{ Hz}$.

Rétt er að taka fram að fáar heimildir eru fyrir fasahornin φ_2 og φ_3 , en samkvæmt [Bachmann et.al., 1997] skal setja þau sem $\pi/2$. Fasahornið φ_1 er oftast sett sem 0, enda er það hlutfallið milli hornanna sem skiptir máli, en ekki tölulega stærð þeirra.

5.2 Hlaupaálag

Hlaupaálag er frábrugðið gönguálaginu á þann hátt að hlauparinn er ekki alltaf í snertingu við jörðina og því er álagið ósamfellt í tíma. Mynd 5-3 sýnir hvernig hlaupaálagið getur litið út sem fall af tíma.

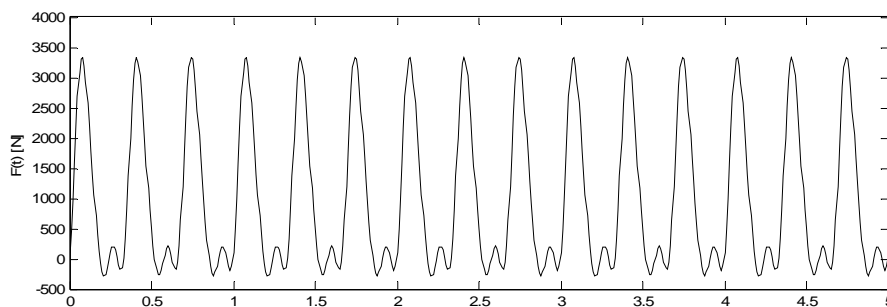


Mynd 5-3: Hlaupaálag og tilsvarandi Fourier-stuðlar. Mynd úr [Bachmann, 2002].

Með því að Fourier-greina mælda tímaröð við hlaup, sbr. mynd 5-3 er hægt að rita hlaupaálag á sama hátt og gönguálagið, þ.e. eins og jöfnu (5-2). Hér þarf þó að nota aðra Fourier-stuðla en fyrir göngu. Í [Bachmann et.al., 1996] er lagt til að eftirfarandi stuðlar séu notaðir:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 1,6 \\ \alpha_2 &= 0,7 \\ \alpha_3 &= 0,2\end{aligned}$$

Grunntíðni hlaupaálags er á bilinu 2,0 – 3,0 Hz, en spretthlaup nær upp í allt að 3,5 Hz. Séu þessir Fourier-stuðlar notaðir fæst tímaröð hlaupaálags eins og sýnd er á mynd 5-4 að neðan.



Mynd 5-4: Hlaupaálag sem fall af tíma. $G_p = 1000 \text{ N}$, $\alpha_1 = 1,6$, $\alpha_2 = 0,7$, $\alpha_3 = 0,2$, $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$ og $f_p = 3,0 \text{ Hz}$.

Í [Bachmann et.al., 1996] er ekki gerður greinarmunur á hlaupaálagi við mismunandi tíðni, þ.e. Fourier-stuðlarnir eru ekki tíðniháðir eins og fyrir gönguálag. Önnur nálgun

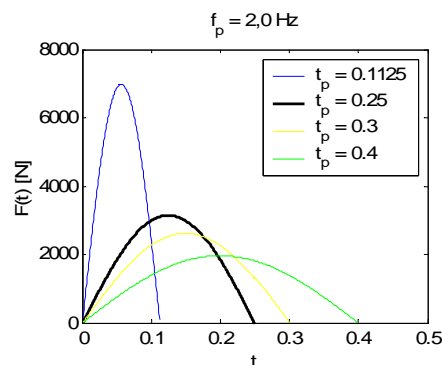
sem hægt er að nota fyrir hlaupaálag er sú sama og notuð er fyrir hoppálag, sjá næsta kafla.

5.3 Hoppálag

Hoppálag er líkt og hlaupaálag ósamfellt og oft er það skilgreint sem stök sínus bylgja sem virkar yfir tímabilið t_p . Stærðfræðilega er stök sínus bylgja skrifuð á eftirfarandi hátt:

$$F(t) = \begin{cases} k_p G_p \sin\left(\pi \frac{t}{t_p}\right) & t \leq t_p \\ 0 & t_p < t \leq T_p \end{cases} \quad (5-4)$$

Þar sem $k_p = \pi T_p / 2t_p$. Stærð álagsins ræðst því eingöngu af völdum snertitíma (e. contact time), t_p , á meðan tíðni álagsins ákvarðast af sveiflutímanum $T_p = 1/f_p$. Oft er talið að tíðni hoppálags sé á bilinu 2,0 – 3,0 Hz, sjá t.d. [Bachmann et.al., 1996]. Mynd 5-5 sýnir álagið frá hoppi fyrir mismunandi val á snertitíma t_p .



Mynd 5-5: Hoppálag fyrir mismunandi snertitíma.

Eins og sést af mynd 5-5, þá er stærð álagsins háð snertitímanum. Í [Bachmann et.al., 1996] er lagt til að hoppálagið sé búið til með Fourier-röð skv. (5-2) og að þá skuli nota eftirfarandi stuðla:

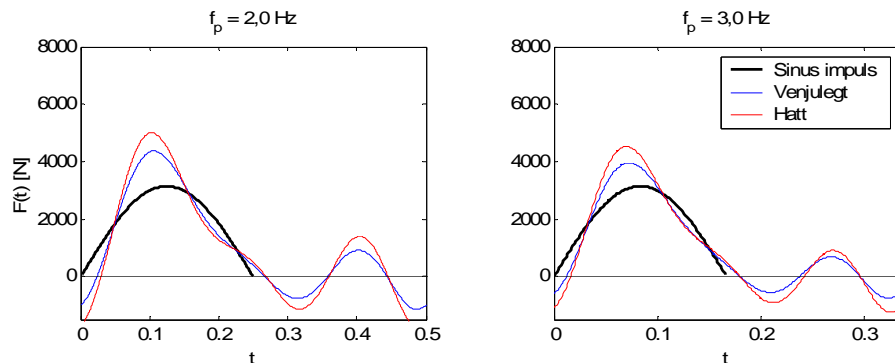
Tafla 5-3: Fourier-stuðlar og hopp tíðni samkvæmt [Bachmann et.al., 1996].

	f_p	α_1	α_2	α_3
Venjulegt hopp	2,0 Hz	1,8	1,3	0,7
	3,0 Hz	1,7	1,1	0,5
Hátt hopp	2,0 Hz	1,9	1,6	1,1
	3,0 Hz	1,8	1,3	0,8

Fasahornið er gefið sem fall af snertitímanum sem

$$\varphi_2 = \varphi_3 = \pi(1 - f_p t_p) \quad (5-5)$$

Þó er ekki tekið fram hvaða snertitíma skuli nota fyrir mismunandi hopp. Mynd 5-6 sýnir samanburð á hoppinu samkvæmt töflu 5-3 og hoppi skv. (5-4) þegar snertitíminn $t_p = 0.5 T_p$ er notaður.



Mynd 5-6: Tímaröð hoppálags fyrir mismunandi hopptíðni.

Það er ekki alveg augljóst hvaða snertitíma er rétt að nota þegar hoppálag er skilgreint en þegar notað er $t_p = 1/2 T_p$ fæst

$$k_p = \pi T_p / 2t_p = \pi \quad \text{og} \quad \varphi_2 = \varphi_3 = \pi(1 - f_p t_p) = \pi / 2$$

5.4 Hópálag

Eins og sýnt hefur verið hér framfar eru ákveðnir óvissuþættir í álaginu frá stökum manni, þá sérstaklega varðandi Fourier-stuðlana og fasahornin. Fyrir hóp af manneskjum sem ganga yfir brú flækist málið til muna. Sérstaklega hvað varðar samhæfingu stíganda, þ.e. hvort fólk hreyfi sig í takt og ef ekki, þá hvaða breytur hafa áhrif á það hvort fólk gangi í takti. Sem dæmi má nefna eftirfarandi áhrifaþætti:

- Stókastísk samhæfing
- Fjöldi manns pr. m^2
- Hreyfing mannvirkis (e. human-structure lock-in)
- Sjónræn áhrif
- Hjóð

Við stókastíska samhæfingu má skilja þannig að hver einstaklingur í hópnum gengur óháð öðrum og svörunina má því leiða út frá líkindafræði. Ef gert er ráð fyrir að hópur manns gangi yfir brúna með sömu göngutíðni og komutími þeirra er Poisson dreifður er hægt að sýna að svörun brúarinnar er m sinnum stærri en svörunin frá stökum manni. Stuðullinn m var leiddur út í [Matsumoto et.al., 1972; 1978] og gefin sem

$$m = \sqrt{\lambda T_0} \tag{5-6}$$

Þar sem λ er meðalflæðið gefið sem fjöldi persóna á sekúndu pr. m í breidd og T_0 er tíminn sem það tekur einn mann að fara yfir brúna. Í öðrum orðum er m fjöldi manns á brúnni á gefnum tímapunkti. Tekið skal fram, að við notkun á jöfnu (5-6) er gert ráð fyrir að allir einstaklingar á brúnni séu eins.

Önnur áhrif sem hafa verið nefnd sem hugsanlegir áhrifaþættir er þéttleiki mannfjölda á brúnni, þ.e. ef hópurinn er þéttur er erfitt að ganga á eigin hraða (og takti) og því er líklegra að fólk gangi í takt. Sama á við um hvort það hafi áhrif að horfa á manninn fyrir framan eða við hliðina á þér og hvort maður sé líklegri til að ganga í takt þess vegna.

Í [Bachmann et.al., 1996] er nefnt að við 10 – 20 mm færslu byrji brúin að hafa áhrif á hvernig fólk gengur og að við þannig færslu mun fólk byrja að ganga í takt við sveiflur brúarinnar. Þetta hefur þó ekki enn verið staðfest af marktækum tilraunum.

Almennt má rita álagið frá N einstaklingum á eftirfarandi hátt:

$$F(x,t) = \sum_{i=1}^N G_{p,i} \left[1 + \sum_{j=1}^3 \alpha_{j,i} \sin(2j\pi f_{p,i}(t - \Delta t_i) - \phi_{j,i}) \right] \delta(x - f_{p,i} l_{p,i}(t - \Delta t_i)) \quad (5-7)$$

Þar sem Δt_i er komutími einstaklings i á brúna. Ef búa á til álagslíkan fyrir hóp af N persónum má gera ráð fyrir að þyngdin G_p sé normaldreifð með meðalþyngd 74,0 kg og staðalfrávikíð 14,7 kg. Sama má gera fyrir göngutíðnina eins og nefnt var í kafla 2.1, þ.e. nota meðaltíðni 2,00 Hz og staðalfrávikíð 0.17 Hz. Þar sem Fourier-stuðlarnir eru tíðniháðir fást þeir beint þegar göngutíðni hvers einstaklings hefur verið ákvörðuð. Skreflengdina má líka ákvarða sem fall af göngutíðninni með því að nota upplýsingarnar úr töflu 5-2. Þá vantar einungis fasahornið φ og komutímann Δt . Til að byrja með er rétt að líta á þessar breytur sem slembibreytur, þ.e. gert er ráð fyrir að fólk gangi slembið (e. randomly).

Heildarsvörun brúarinnar fæst svo með því að setja álagið á brúna, annaðhvort í FEM eða með því að leysa hreyfðarjöfnuna tölulega, t.d. með tegrun skv. Newmark aðferðinni, sjá t.d. [Chopra, 2001].

5.5 Álagslíkan samkvæmt stöðlum

Fyrstu kröfur um sveifluhegðun göngubrúa undan álagi frá fótgangandi vegfarendum voru settar fram árið 1978 í breska brúarstaðlinum BS5400. Álagslíkanið var mjög einfalt og byggði á tillögu að hönnunarviðmiðum sem birt var í [Blanchard et.al., 1977]. Líkanið reiknar svörun mannvirkisins í lóðréttu stefnu undan álagi frá stökum fótgangandi vegfaranda. Svörun undan hópi vegfarenda eða svörun vegna hlaupaálags er ekki reiknuð. Ekki er heldur tekið á svörun vegna örvunar í lárétta stefnu. Í framhaldi tóku fleiri staðlar upp þessa sömu aðferð og hér má t.d. nefna kanadíska brúarstaðalinn, OHBDC (Ontario Highway and Bridge Design Code) og danska vegstaðalinn, Vejregler.

Í öllum stöðlum er álagið sett fram sem stakur kraftur sem færast yfir aðalhaf brúarinnar með jöfnum hraða, v :

$$F(t) = G_o \sin(2\pi f_0 t) \quad (5-8)$$

$$v = 0,9 f_0 \quad (5-9)$$

Álagið skal sett á brúnna þannig að f_0 sé fyrsta lóðrétta eigintíðni brúarinnar og G_0 er sveifluútvik álagsins sem er mismunandi milli staðla. Mesta hröðun brúarinnar skal reiknuð og borin saman við hönnunarviðmiðin sem eru mismunandi milli staðla. Tafla 5-4 sýnir stuðlana sem nota skal við hönnun skv. mismunandi stöðlum.

Tafla 5-4: Stuðlar fyrir álagslíkan í mismunandi hönnunarstöðlum.

Staðall	G_0	a_{max}
BS5400 – BD19/04	180 N	$0,5\sqrt{f_0}$ [m/s^2]
DS410 – Vejregler	360 N	$0,25f_0^{0,78}$ [m/s^2]
ENV 1992-2:1996	180 N	$0,5\sqrt{f_0}$ [m/s^2]
ENV 1995-2:1997	280 N	$0,7 m/s^2$
OHBDC	180 N	$0,25f_0^{0,78}$ [m/s^2]

Þessar reglur eiga við um göngubrýr með eigintíðnir á bilinu 1,0 – 5,0 Hz en þó má lækka reiknaða svörun fyrir brýr með eigintíðnir milli 4,0 – 5,0 Hz. Það skal gert þannig að reiknuð svörun er ekkert lækkuð við 4,0 Hz en svo lækkuð línulega niður í 70% af reiknaðri svörun við 5,0 Hz. Eins og sést, þá er álagslíkanið einföldun á líkaninu sem kynnt var í kafla 5-1 fyrir gangandi vegfarendur. Einföldunin felur í sér að einungis fyrsti liður Fourier-raðarinnar er tekinn með í líkaninu og að Fourier-stuðullinn er valinn óháður tíðninni.

6 REIKNILÍKAN

6.1 Inntaksstærðir

Niðurstöður sveiflugreiningar í FE-líkani eru skv. [Zivanovic et.al., 2005] mjög háðar nákvæmni í inntaksstærðum líkansins sem geta oft verið nokkuð breytilegar. Helstu þættir sem hafa áhrif eru:

- randskilyrði
- efniseiginleikar
- hvernig tekið er tillit til handriða, kapla og brúardekks í líkaninu.
- hitastig getur einnig haft áhrif á grunnsveiflutíma brúarinnar

6.1.1 Fjaðurstuðull steypunnar

Við sveiflugreiningu brúarinnar á hönnunarstigi var gert ráð fyrir að steypa væri C35/37 steypa með þrýstistyrk $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$. Tilsvarandi fjaðurstuðull fyrir slíka steypu er $E = 33282 \text{ MPa}$. Sá fjaðurstuðull var hins vegar hækkaður í 35000 MPa til að taka tillit til þess að annars vegar væri steypa með hærri þrýstistyrk en 35 MPa og hins vegar að skammtímafjaðurstuðull steypunnar væri hærri heldur en langtímafjaðurstuðull. Það var því gildið sem notað var á hönnunarstigi brúarinnar.

Steypa í brúardekkið er hvít steypa úr norskum fylliefnum og sementi. Því eiga gildi um fjaðurstuðul íslenskrar steypu ekki við. Niðurstöður prófana á steypublöndunni sýndu að meðalstyrkur steypusýnanna var 65 MPa sem er umtalsvert hærra heldur en kröfurnar voru. Það hefur þau áhrif að fjaðurstuðull steypunnar er einnig mun hærri. Fjaðurstuðullinn er hækkaði í töluverðan tíma á meðan steypa þroskast og við 2 ára aldur steypunnar þá má gera ráð fyrir að fjaðurstuðullinn sé u.þ.b. $E = 45000 \text{ MPa}$ sé reiknað samkvæmt aðferð í [FIB, 1999].

6.1.2 Tregðuvægi þversniðsins

Brúardekkið er eftirspennt með þremur köplum af gerðinni 9C15 ($A_p = 4050 \text{ mm}^3$) og er áætluð meðalþrýstispenna í þversniði brúarinnar um 4 MPa . Steypuþversniðið er því ósprungið og með því að reikna elastískt tregðuvægi fyrir samsett þversnið fæst stífni brúardekksins. Það er því um að ræða járnþvingu í efri og neðri brún, spennikapla sem eru í breytilegri hæð eftir lengd brúarinnar ásamt innsteypum ryðfríum stálvinkli í brúarkantinum sem að handriðið er fest í.

Þar sem að tregðuvægi samsetta þversniðsins er háð staðsetningu kaplanna er það breytilegt eftir lengd brúarinnar en í sveiflugreiningunni er tekið meðaltal af stífni brúardekksins yfir ásetu og á miðju hafi. Tafla 6-1 sýnir tregðuvægi þversniðsins fyrir mismunandi staðsetningu kapla og bendistáls.

Tafla 6-1: Tregðuvægi brúarþversniðs.

Útskýring	I
Tregðuvægi; einungis steypa	$30,9 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$
Tregðuvægi yfir ásetu	$35,5 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$
Tregðuvægi á miðju hafi	$36,7 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$

6.1.3 Massi

Uppgefin rúmþyngd á steypublöndunni var fengin frá steypuframleiðanda sem var Steypustöðin hf. og var hún um 2350 kg/m^3 .

6.1.4 Randskilyrði

Randskilyrði geta haft töluverð áhrif á eiginsveifluform brúarinnar í reiknilíkaninu. Undirstöður brúarinnar eru annars vegar á súlum sem eru steyptar saman við brúardekkið að ofan og jafnframt í steypa undirstöðu sem grunduð er á þjappaðri fyllingu. Við endastöpla situr yfirbyggingin á blýgúmmílegum en er haldið gagnvart láréttum kröftum með stálfestingum. Göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu er haldið í lang- og þverátt á báðum endastöplum á meðan göngubrú við Landspítala er haldið í lang- og þverátt að austanverðu en einungis í þverátt að vestanverðu.

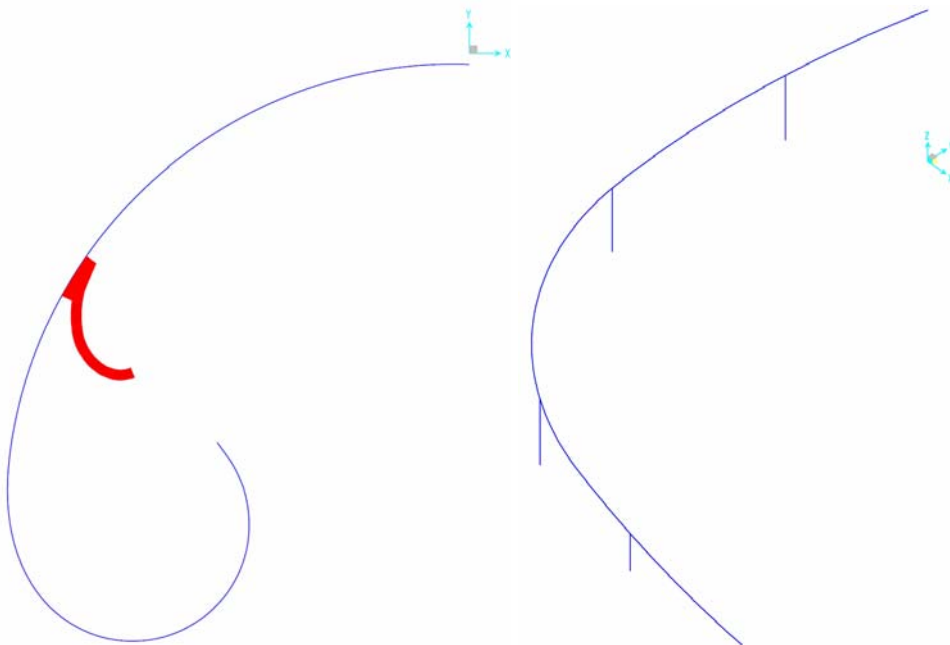
Í þessu verkefni er fyrst og fremst verið að skoða lóðrétt sveifluform brúnna og breytingar á randskilyrðum, þ.e. hvort að súlur séu innspenntar í undirstöður hefur lítil áhrif á fyrsta lóðréttu grunnsveiflutímann en hefur mikil áhrif á láréttu sveifluformin. En þó að áhrifin á lóðréttu sveifluformið sé lítið hafa breytingar á randskilyrðum nokkur áhrif á svörun brúarinnar samkvæmt tímaraðagreiningunni.

6.1.5 Samræmi - Kalibrering

Í kafla 4 er fjallað um niðurstöður mælinga á brúnum og þar kemur fram að fyrsta lóðréttu eiginsveifluformið hefur sveiflutíma:

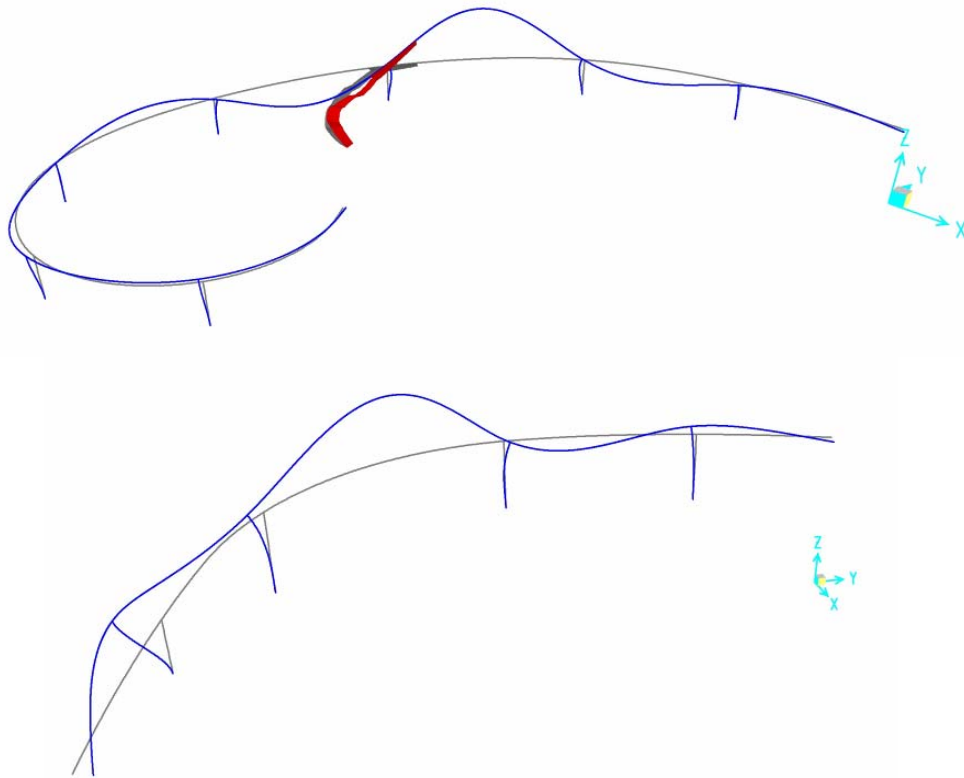
Göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu	$\approx 2,30 \text{ Hz}$
Göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala	$\approx 3,00 \text{ Hz}$
Göngubrú yfir Miklubraut við Rauðagerði	$\approx 2,65 \text{ Hz}$

Geómetría brúnna tveggja sem greindar voru í FEM eru sýndar á mynd 6-1.



Mynd 6-1: Göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu (vinstri) og göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala (hægri).

Með því að nota þær inntaksstærðir sem fjallað er um hér að ofan fékkst góð samsvörun fyrir fyrsta lóðréttu sveifluformið í báðum brúm samanborið við mældan eiginsveiflutíma. Fyrsta lóðréttu sveifluformið í reiknilíkaninu hafði eiginsveiflutíma $T_4 = 0,43 \text{ s}$ ($f_4 = 2,32 \text{ Hz}$) í Njarðargötubrúnni en $T_4 = 0,33 \text{ s}$ ($f_4 = 3,02 \text{ Hz}$) í Landspítalabrúnni. Bæði gildi eru mjög nálægt mældum eiginsveiflutíma. Sveifluformin sjást á mynd 6-2. Fyrstu þrjú sveifluformin eru í lárétta stefnu.



Mynd 6-2: Fyrsta lóðréttu sveifluform göngubrúar yfir Hringbraut við Njarðargötu (að ofan) og við Landspítala (að neðan).

6.1.6 Samanburður við hönnunarstig

Við hönnun brúanna var byggt upp þrívítt einingalíkan í SAP2000, V.9.1.1 frá CSI Berkeley af lengstu og flóknustu brúnni, þ.e. göngubrú á Hringbraut við Njarðargötu. Sú brú er með lengstu höfin og flóknustu geometríuna. Út frá niðurstöðum þessa líkans voru metin áhrif fyrir hinar brýrnar. Yfirbyggingin var byggð upp af skeljaeiningum en súlur úr bitaeiningum.

Niðurstöður sveiflugreiningar voru þannig að fyrsta lóðréttu sveifluformið reyndist vera $T_3 = 0,521 \text{ s}$ eða tíðni $f_3 = 1,92 \text{ Hz}$ sem er nálægt tíðni gangandi vegfarenda, sjá töflu 5-1. Munurinn frá hönnunarstigi og því reiknilíkani sem notast er við hér skýrist af breyttum inntaksstærðum, þ.e. búið er að uppfæra fjaðurstuðull steypunnar og tregðuvægi þversniðsins svo það endurspegli betur raunverulegt mannvirki.

Við mat á sveiflum í brúnum var notuð einföld aðferð til að reikna mögulega hröðun brúarinnar vegna gangandi vegfaranda en þessari aðferð er betur lýst í kafla 7 og

[Bachmann et.al., 1996]. Samkvæmt jöfnu (7-15) þá fékkst að fyrir lengsta hafið yrði mesta hröðun frá einum gangandi vegfaranda $a = 0,31 \text{ m/s}^2$ sem er vel innan við staðalgildið $0,69 \text{ m/s}^2$ ($0,5 \cdot f_0^{1/2}$).

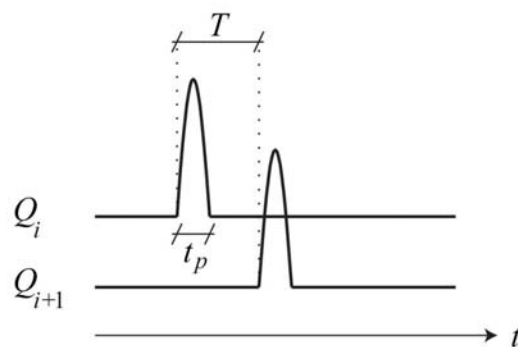
Þó svo að nokkrir óvissuþættir séu varðandi notkun þessarar formúlu þá var gert ráð fyrir að líkleg hröðun yrði innan við staðalgildið og því var það metið að ekki yrði um vandamál vegna sveiflna í brúnni þó svo að grunnsveiflutími í lóðrétta stefnu hafi verið reiknaður sem $T_3 = 0,521 \text{ s}$ eða grunntíðni $f_3 = 1,92 \text{ Hz}$, sem er nálægt tíðni gangandi vegfarenda.

6.2 Brú yfir Hringbraut við Njarðargötu

Byggt var upp einingalíkan í FE-forritinu SAP2000. Við hönnun brúarinnar hafði verið sett upp reiknilíkan í SAP2000 þar sem að skeljaeiningar voru notaðar fyrir yfirbyggingu brúarinnar ásamt stiganum sem tengist yfirbyggingunni. Bitaeiningar voru notaðar fyrir súlurnar. Það þótti ekki nægilega hentugt að nota skeljaeiningar fyrir tímaraðgreininguna ásamt því að ekki var verið að skoða eða mæla láréttar hreyfingar eða vinduhreyfingar. Í þessu verkefni er einungis verið að skoða lóðréttar hreyfingar og því þótti ekki ástæða til að nota skeljaeiningar fyrir yfirbyggingu í reiknilíkaninu.

6.2.1 Álagslíkan

Yfirbyggingin er byggð upp af $0,1 \text{ m}$ löngum bitaeiningum og fylgir geometríu brúarinnar. Þessi þéttleiki gerir auðveldlega kleift að setja inn punktálag með $0,1 \text{ m}$ millibili og því má stilla skreflengd álagsins með þeirri nákvæmni. Aðferðin við tímaraðgreininguna er sú að álagslíkanið sem til skoðunar er hverju sinni er gefið upp sem ein (eða fleira) sínuslaga sveiflur yfir tímann T_p sem jafngildir $1/f_p$ þar sem f_p er göngu- eða hlaupatíðnin. Álagið færir svo yfir á næsta hnútpunkt sem er í fjarlægðinni l_{skref} frá fyrsta álagspunktinum og hefur þá upphafstíma T_p og lokatíma $2T_p$. Á þann hátt færir álagið eftir brúnni og líkir þannig eftir göngu eða hlaupi yfir brúna. Hugmyndin er útskýrð á mynd 6-3 að neðan.



Mynd 6-3: Skematísk mynd sem sýnir hvernig hlaupaálag er sett í FEM módelið.

Eins og kemur fram í kaflanum hér á undan um álagslíkön má setja þau fram á ýmsa vegu og er óvissan í skilgreiningu þeirra tölverð.

6.2.2 Álagstilfelli

Álagslíkanið sem notað er fyrir greiningu brúarinnar er tekið úr kafla 5. Fyrir gönguálag var notað líkanið úr jöfnu (5-2). Fourier-stuðlarnir voru valdir skv. (5-3), þ.e. tíðniháðir meðan skreflengdin var valin skv. töflu 5-2. Jafna (5-2) var einnig notuð fyrir hlaupaálagið. Hér voru Fourier-stuðlarnir valdir skv. [Bachmann et.al., 1996], þ.e. óháðir tíðninni, ($\alpha_1 = 1,6$, $\alpha_2 = 0,7$ og $\alpha_3 = 0,2$). Fasahornin, φ_2 og φ_3 voru valin sem $\pi/2$ og skreflengdin skv. töflu 5-2. Álagstilfellin sem skoðuð voru í greiningunni er sýnd í töflu 6-2.

Tafla 6-2: Álagstilfelli í SAP2000 fyrir brú yfir Hringbraut við Njarðargötu.

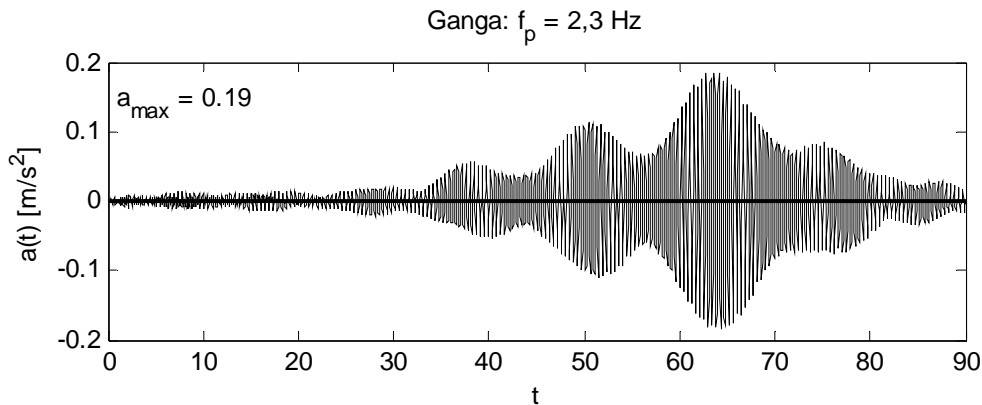
Álagstilfelli	Tegund álags	Tíðni [Hz]	Hröðun, a_{max} [m/s ²]
G11	Ganga	1,1	0,011
G12	Ganga	1,2	0,035
G13	Ganga	1,3	0,014
G15	Ganga	1,5	0,021
G16	Ganga	1,6	0,013
G17	Ganga	1,7	0,012
G18	Ganga	1,8	0,012
G19	Ganga	1,9	0,020
G20	Ganga	2,0	0,023
G21	Ganga	2,1	0,037
G22	Ganga	2,2	0,063
G23	Ganga	2,3	0,185
G24	Ganga	2,4	0,254
G25	Ganga	2,5	0,095
G26	Ganga	2,6	0,053
G27	Ganga	2,7	0,046
G28	Ganga	2,8	0,055
H20	Hlaup	2,0	0,092
H22	Hlaup	2,2	0,227
H23	Hlaup	2,3	0,669
H24	Hlaup	2,4	0,629
H25	Hlaup	2,5	0,290
H26	Hlaup	2,6	0,165
H28	Hlaup	2,8	0,141
H29	Hlaup	2,9	0,209
H30	Hlaup	3,0	0,245
H31	Hlaup	3,1	0,252
H32	Hlaup	3,2	0,203
Stadalalag23	Ganga	2,3	0,098
HOPP23	Hopp	2,3	0,995
HOPP30	Hopp	3,0	0,299

Í töflunni má sjá niðurstöður fyrir álag frá einum manni með þyngdina 1000 N. Fyrir hópa er um nokkuð margar breytistærðir að ræða, s.s. skreflengd, göngutíðni, fjarlægð í næsta mann, þyngd o.s.frv.. Hægt er að beita líkindafræðilegum aðferðum til að herma álag vegna hlaupahópa. Áhugavert væri þá að keyra greiningu fyrir nokkrar útgáfur af hópum til að meta hvernig svörun frá hópum er frábrugðin svörun frá einum manni, sbr. umnræðu í kafla 5.4.

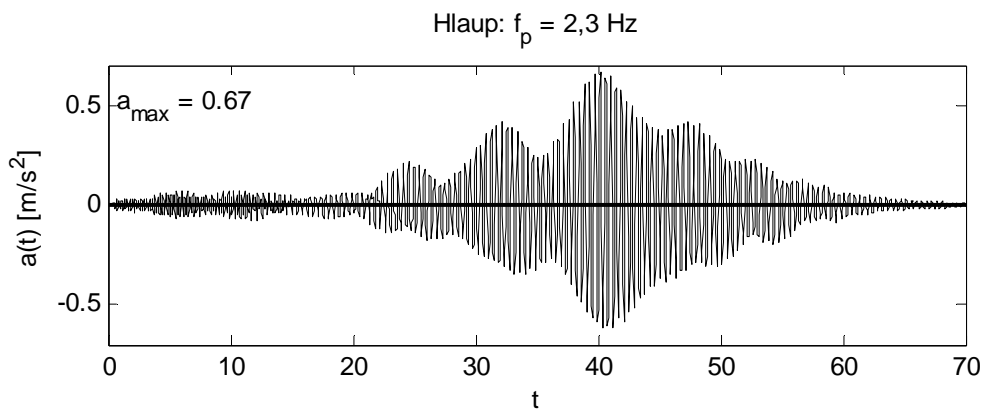
Aðferðin sem notuð var í SAP 2000 til að reikna út svörunina er “Linear Modal Analysis”, þ.e. gert er ráð fyrir að bæði álag og svörun séu línuleg. Þær inntaksstærðir sem notaðar voru í greiningunni eru eftirfarandi:

- Fjöldi reiknaðra tímaskrefa : Breytilegt
- Stærð hvers tímaskrefs í tímaröð: 0,05 s
- Deyfingarhlutfall: 0,0060 (fasti fyrir öll sveifluforma)
- Fjöldi sveifluforma: 80

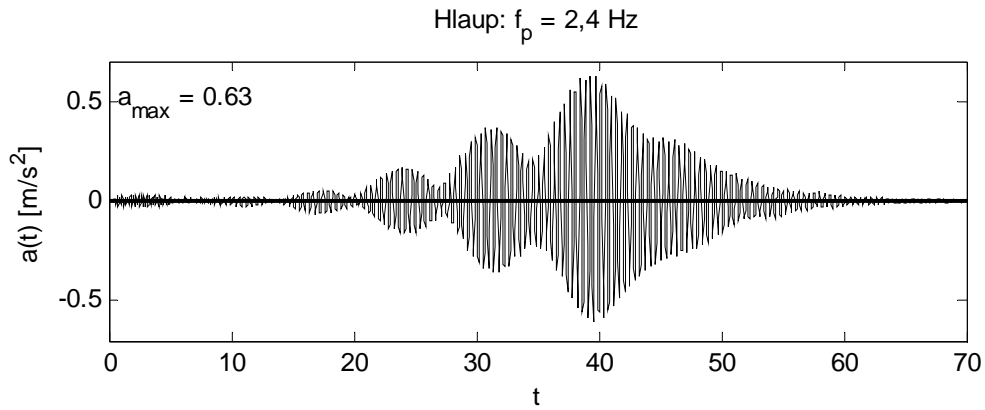
Mynd 6-4 til 6-6 sýna reiknaða svörun brúarinnar fyrir mismunandi göngu/hlaupatíðnir. Mynd 6-7 sýnir reiknaða svörun brúarinnar við staðalálaginu. Myndir 6-8 og 6-9 sýna mestu reiknaða hröðun sem fall af annars vegar göngutíðninni og hins vegar hlaupatíðninni.



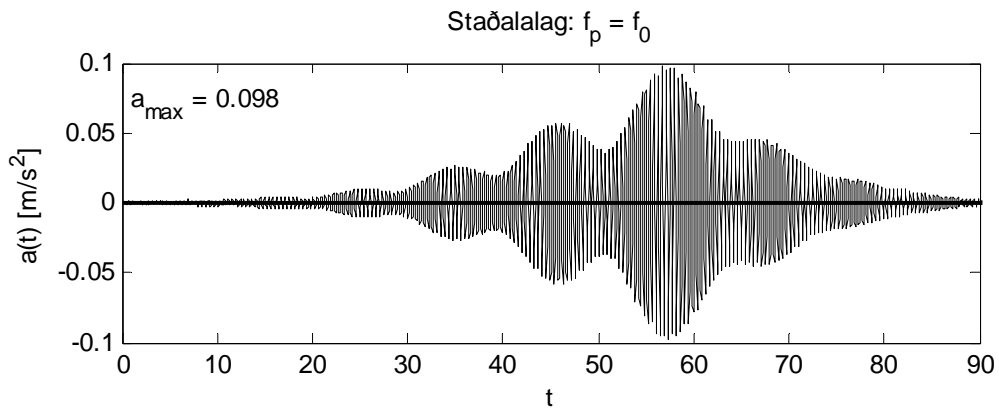
Mynd 6-4: Reiknuð hröðun fyrir einn mann gangandi frá suðri til norðurs á tíðni 2,3 Hz, þyngd 1000 N og deyfing, $\zeta = 0,006$.



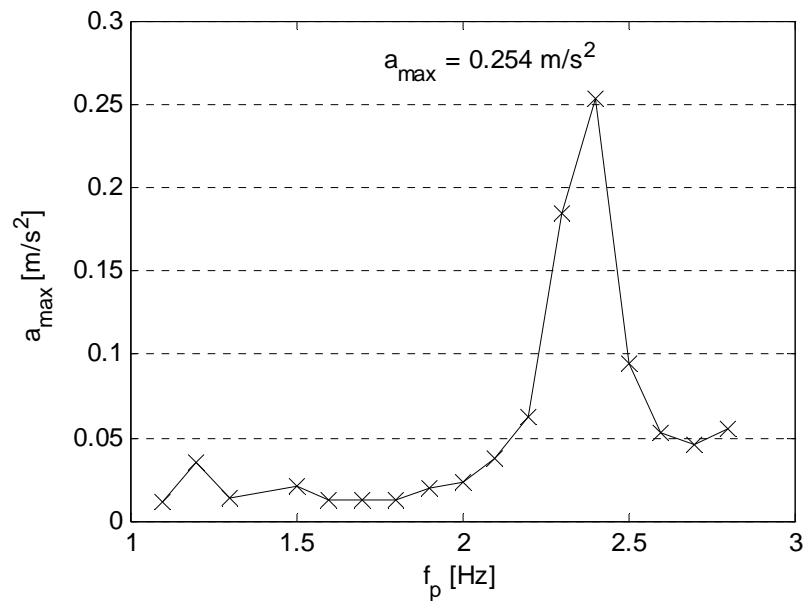
Mynd 6-5: Reiknuð hröðun fyrir einn mann skokkandi frá suðri til norðurs á tíðni 2,3 Hz, þyngd 1000 N og deyfing, $\zeta = 0,006$.



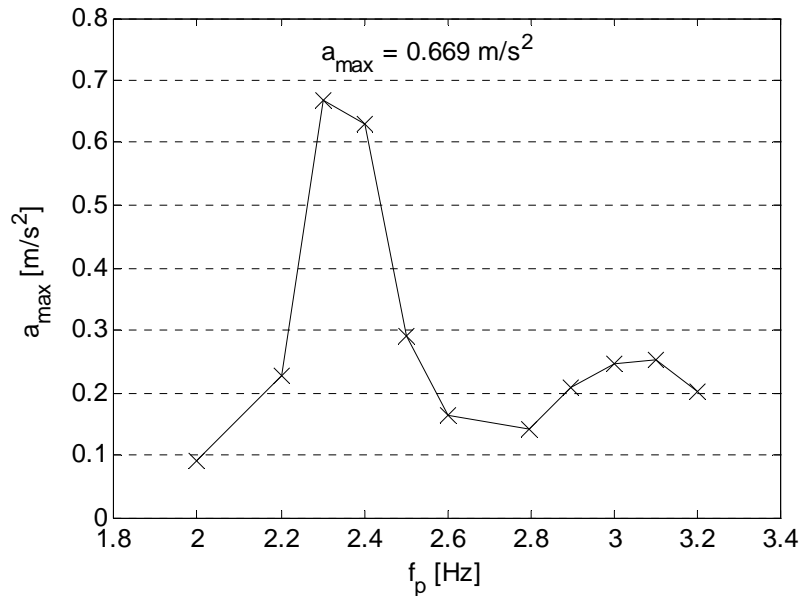
Mynd 6-6: Reiknuð hröðun fyrir einn hlaupara frá suðri til norðurs á tíðni 2,4 Hz, þyngd 1000 N og deyfing, $\zeta = 0,006$.



Mynd 6-7: Reiknuð hröðun fyrir staðalalag úr Eurocode á tíðni 2,3 Hz, Þyngd 700 N og deyfing, $\zeta = 0,006$.



Mynd 6-8: Svörunarróf sem sýnir mestu reiknaða hröðun sem fall af tíðni álagsins fyrir einn mann gangandi (1000 N) og deyfing, $\zeta = 0,006$.



Mynd 6-9: Svörunarróf sem sýnir mestu reiknaða hröðun sem fall af tíðni álagsins fyrir einn hlaupara (1000 N) og deyfing, $\zeta = 0,0060$.

6.2.3 Einfeldari aðferðir

Hægt er að beita einfaldari aðferðum til að meta mestu svörun brúarinnar, þ.e. aðferðum sem lýst er í kafla 7.4.

Aðferð samkvæmt brúarstöðlum (BS5400, BD37/01 og Ontario brúarstaðlinum)

Eftirfarandi stærðir eru notaðar til að meta mestu svörun brúarinnar samkvæmt breska staðlinum. Stífni brúarinnar er ca. 9 kN/mm sem gefur $y_s = 0,08 \text{ mm}$ (miðað við 700 N þungan mann). Haf lengdarstuðullinn k er tekinn sem $0,8$ þar sem hliðarhöf brúarinnar eru aðeins styttri en aðalhafið og gert er ráð fyrir að deyfingin sé $\zeta = 0,0059$ sem gefur $\psi = 11$. Mestu svörun brúarinnar fyrir einn vegfarenda á eigintíðni brúarinnar má nú reikna skv. jöfnu (7-14):

$$a_{peak} = (2\pi \cdot 2,3)^2 \cdot 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 11 = 0,14 \text{ m/s}^2$$

Hér er rétt að taka fram að sé notaður annar haf lengdarstuðull eða önnur gildi fyrir deyfingu brúarinnar, fæst önnur niðurstaða.

Aðferð samkvæmt [Bachmann et.al, 1996]

Í þessari aðferð er hægt að taka tillit til Fourier stuðli álagsins og þar með meta mestu hröðun brúarinnar fyrir bæði göngu- og hlaupaálag. Fyrir göngu er notaður Fourier stuðullinn $\alpha_{ganga} = 0,5$ og við hlaup er notaður stuðullinn $\alpha_{hlaup} = 1,6$. Ef reiknað er með að skreflengdin sé $0,9 \text{ m}$ við göngu og $1,1 \text{ m}$ við hlaup fást eftirfarandi mögnunarstuðlar, $\Phi_{ganga} = 38$ og $\Phi_{hlaup} = 35$. Mesta svörun reiknast samkvæmt jöfnu (7-15):

Ganga: $a_{peak} = 0,25 \text{ m/s}^2$
 Hlaup: $a_{peak} = 0,75 \text{ m/s}^2$

Rétt er að taka fram að nokkur óvissa er í þeim stærðum sem notaðar eru til að meta mestu svörun mannvirkisins. Þá sérstaklega í Fourier-stuðlunum sem mælst hafa á bilinu 0,2 – 0,6 fyrir gönguálag við 2,3 Hz. Einnig er nokkur óvissa í deyfingarhlutfalli brúarinnar, skreflengdinni og haflengdarstuðlunum sem gerir það erfitt að meta hröðunina nákvæmlega. Við nánari útreikninga kemur í ljós að fyrir gönguálag er þó líklegast að hröðunin sé á bilinu 0,11 – 0,34 m/s^2 skv. þessari aðferð og á bilinu 0,58 – 0,96 m/s^2 fyrir hlaupaálag. Allir útreikningar taka mið af stökum vegfarenda sem vegur 700 N, eða u.þ.b. 71 kg. Þar sem allir útreikningar eru línulega háðir þyngdinni, má einfaldlega kvarða hröðunina fyrir aðra líkamsþyngd en 71 kg. Til samanburðar má geta þess að kröfur staðlana eru eins og sýnt í töflu 6-3.

Tafla 6-3: Mismunandi hönnunarkröfur við mismunandi eigintíðnir.

f_0	$0,25 f_0^{0,78}$ (OHBD)	$0,5 \sqrt{f_0}$ (Eurocode og BS5400)
2,30 Hz	0,48 m/s^2	0,76 m/s^2
2,65 Hz	0,53 m/s^2	0,81 m/s^2
3,00 Hz	0,59 m/s^2	0,87 m/s^2

6.3 Brú yfir Hringbraut við Landspítala

Einingalíkan í SAP2000 er byggt upp á sama hátt og fyrir göngubrú við Njarðargötu, þ.e. yfirbyggingin er byggð upp af 0,1 m löngum bitaæiningum og fylgir því viðri geometríu brúarinnar.

6.3.1 Álagstilfelli

Álagslíkanið sem notað er, er sambærilegt því sem notað var á göngubrúnni við Njarðargötu. Álagstilfelli sem skoðuð voru í greiningunni eru sýnd í töflu 6-4.

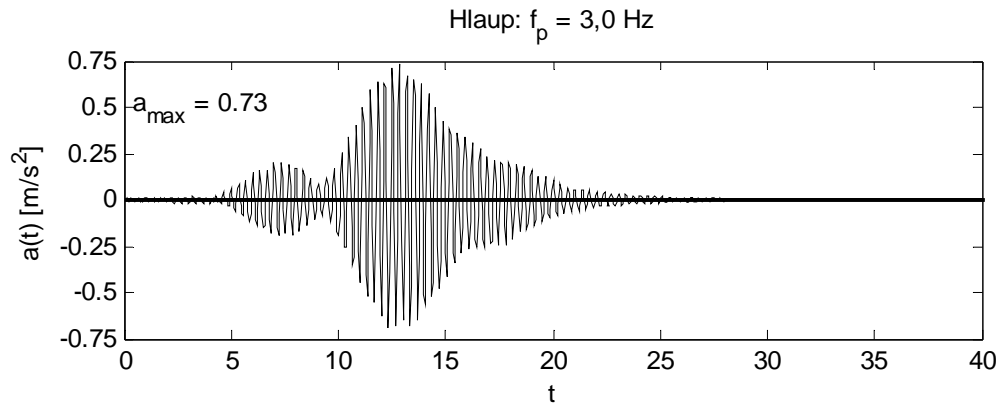
Tafla 6-4: Álagstilfelli í SAP2000 fyrir brú yfir Hringbraut við Landspítala.

Álagstilfelli	Tegund álags	Tíðni [Hz]	Hröðun, a_{\max} [m/s^2]
G10	Ganga	1,0	0,027
G12	Ganga	1,2	0,008
G14	Ganga	1,4	0,020
G15	Ganga	1,5	0,042
G16	Ganga	1,6	0,015
G17	Ganga	1,7	0,013
G18	Ganga	1,8	0,012
G19	Ganga	1,9	0,014
G20	Ganga	2,0	0,015
G21	Ganga	2,1	0,018
G22	Ganga	2,2	0,022
G23	Ganga	2,3	0,031
G24	Ganga	2,4	0,033
G25	Ganga	2,5	0,046
G26	Ganga	2,6	0,063
G27	Ganga	2,7	0,100
G28	Ganga	2,8	0,196
H20	Hlaup	2,0	0,067
H22	Hlaup	2,2	0,083
H23	Hlaup	2,3	0,094
H24	Hlaup	2,4	0,109
H25	Hlaup	2,5	0,131
H26	Hlaup	2,6	0,169
H28	Hlaup	2,8	0,482
H29	Hlaup	2,9	0,721
H30	Hlaup	3,0	0,732
H31	Hlaup	3,1	0,544
H32	Hlaup	3,2	0,338
Stadalalag30	Ganga	3,0	0,094
HOPP30	Hopp	3,0	1,141

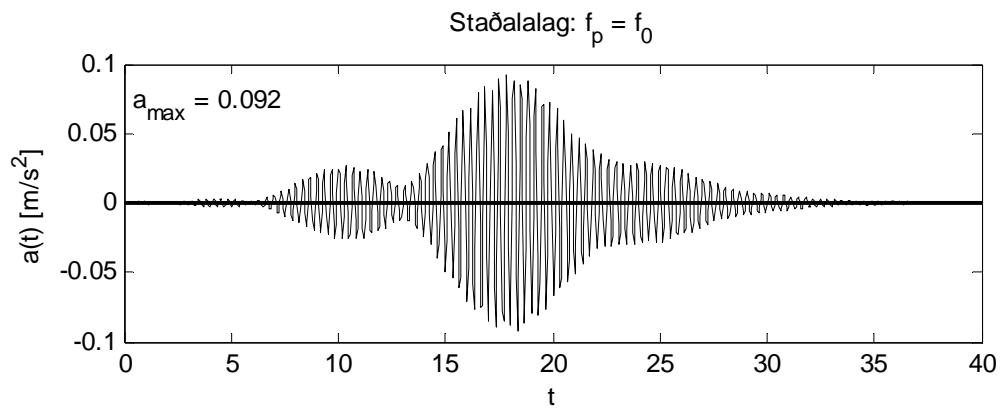
Í töflunni eru niðurstöður fyrir álag frá einum manni með þyngdina 1000 N.

Aðferðin sem notuð var í SAP 2000 til að reikna út svörunina er “Linear Modal Analysis”, þ.e. gert er ráð fyrir að bæði álag og svörun séu línuleg. Þær inntaksstærðir sem notaðar voru í greiningunni eru eftirfarandi:

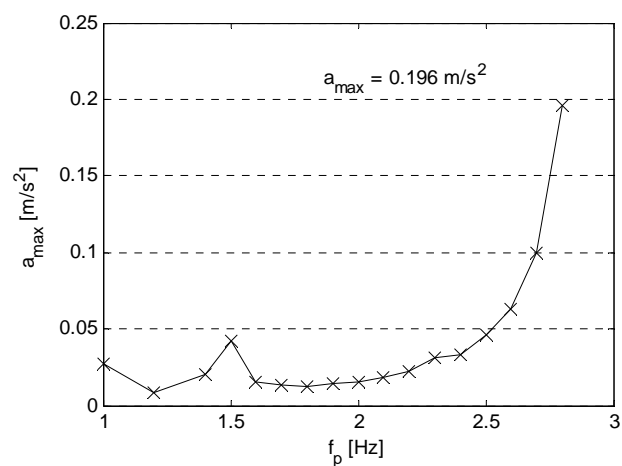
- Fjöldi reiknaðra tímaskrefa: Breytilegt
- Lengd reiknaðra tímaskrefa: 0,05
- Deyfingarhlutfall: 0,009 (fasti fyrir öll sveifluform)
- Fjöldi sveifluforma: 50



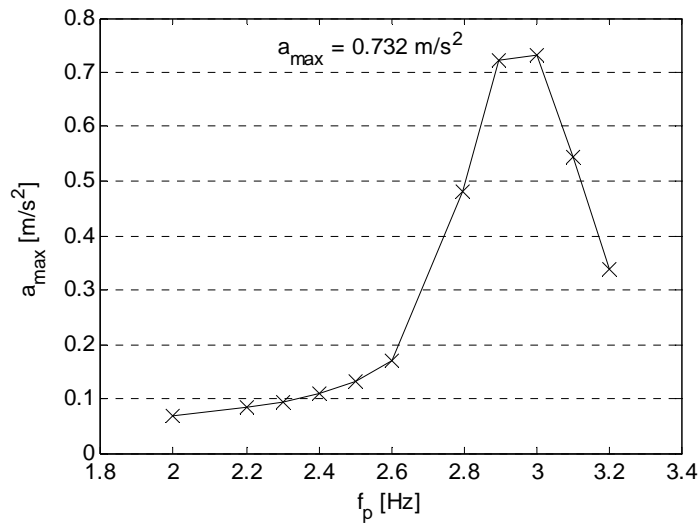
Mynd 6-10: Reiknuð hröðun fyrir einn hlaupara frá suðri til norðurs á tíðni 3,0 Hz, þyngd 1000 N og $\zeta = 0,009$.



Mynd 6-11: Reiknuð hröðun fyrir staðalalag úr Eurocode á tíðni 3,0 Hz, Þyngd 700 N og $\zeta = 0,009$.



Mynd 6-12: Svörunarróf sem sýnir mestu reiknaða hröðun sem fall af tíðni álagsins fyrir einn mann gangandi (1000 N) og $\zeta = 0,009$.



Mynd 6-13: Svörunarróf sem sýnir mestu reiknaða hröðun sem fall af tíðni álagsins fyrir einn hlaupara (1000 N) og $\zeta = 0,0085$.

6.3.2 Einfaldari aðferðir

Hægt er að beita einfaldari aðferðum til að meta mestu svörun brúarinnar, þ.e. aðferðum sem lýst er í kafla 7.4.

Aðferð samkvæmt brúarstöðlum (BS5400, BD37/01 og Ontario brúarstaðlinum)

Eftirfarandi stærðir eru notaðar til að meta mestu svörun brúarinnar samkvæmt breska staðlinum. Stífni brúarinnar er ca. 12 kN/mm sem gefur $y_s = 0,06 \text{ mm}$ (miðað við 700 N þungann mann). Haf lengdarstuðullinn k er tekinn sem 0,8 og gert er ráð fyrir að deyfingin sé $\zeta = 0,00925$ sem gefur $\psi = 7,5$. Mestu svörun brúarinnar fyrir einn vegfarenda á eigintíðni brúarinnar má nú reikna skv. jöfnu 7-14:

$$a_{peak} = (2\pi \cdot 3,0)^2 \cdot 0,06 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 7,5 = 0,13 \text{ m/s}^2$$

Aðferð samkvæmt [Bachmann et.al, 1996]

Ekki er reiknuð út hröðunin fyrir göngu þar sem eigintíðni brúarinnar er utan við tíðnisvið fótgangandi vegfarenda. Við hlaup er notaður Fourier-stuðullinn $\alpha_{hlaup} = 1,6$. Ef reiknað er með að skreflengdin 1,1 m við hlaup fæstst $\Phi_{hlaup} = 24$. Mesta svörun reiknast samkvæmt jöfnu 7-15:

Hlaup:
$$a_{peak} = 0.65 \text{ m/s}^2$$

Við nánari útreikninga á hröðuninni kemur í ljós að hröðunin er líklegast á bilinu $0,48 - 1,07 \text{ m/s}^2$ fyrir hlaupaálag. Þessi stóra dreifing er vegna þess hversu mikil dreifing mældist í deyfingu brúarinnar, þ.e. gildi á bilinu $\zeta = 0,0065 - 0,015$ voru mæld. Allir

útreikningar taka mið af stökum vegfarenda sem vegur 700 N , eða u.þ.b. 71 kg . Til samanburðar má geta þess að kröfur staðlana eru $a_{max} = 0,59\text{ m/s}^2$ skv. Ontario brúarstaðlinum og $0,87\text{ m/s}^2$ skv. breska staðlinum og Eurocode.

6.4 Brú yfir Miklubraut við Grundargerði

Byggt var upp einingarlíkan af brúnni við Grundargerði út frá upplýsingum og teikningum frá hönnuðum brúarinnar, Verkfræðistofunni VSÓ í Reykjavík. Einingarlíkanið er tvívítt bitalíkan og inniheldur einungis aðalburðarbita brúarinnar. Líkanið er því ekki ætlað til sveiflugreiningar, heldur einungis til að meta stífnir brúarinnar svo hægt sé að nota einfaldaðar aðferðir til að meta sveifluhegðun hennar. Mynd 6-14 sýnir niðurbeygju brúarinnar við stökum krafti (700 N), sem verkar á mitt haf. Niðurbeygjan er $0,42\text{ mm}$ og stífnin því $1,67\text{ kN/mm}$.



Mynd 6-14: Formbreyting brúar undan punktkrafti á miðju haf.

Aðferð samkvæmt brúarstöðlum (BS5400, BD37/01 og Ontario brúarstaðlinum)

Haf lengdarstuðullinn k er $0,7$ og gert er ráð fyrir að deyfingin sé $\zeta = 0,02$ sem gefur $\psi = 5,2$. Mestu svörun brúarinnar fyrir einn vegfarenda á eigintíðni brúarinnar má nú reikna skv. jöfnu 7-14:

$$a_{peak} = (2\pi \cdot 2,65)^2 \cdot 0,42 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7 \cdot 5,2 = 0,42\text{ m/s}^2$$

Aðferð samkvæmt [Bachmann et.al, 1996]

Ekki er reiknuð út hröðunin fyrir göngu þar sem eigintíðni brúarinnar er utan við tíðnisvið fótgangandi vegfarenda. Við hlaup er notaður Fourier-stuðullinn $\alpha_{hlaup} = 1,6$. Ef reknað er með að skreflengdin $1,1\text{ m}$ við hlaup fæstst $\Phi_{hlaup} = 19$. Mesta svörun reiknast samkvæmt jöfnu 7-15:

Hlaup:
$$a_{peak} = 2,48\text{ m/s}^2$$

Við nánari útreikninga á hröðuninni kemur í ljós að hröðunin er líklegast á bilinu $2,11 - 3,35\text{ m/s}^2$ fyrir hlaupaálag. Þessi stóra dreifing er vegna þess hversu mikil dreifing mældist í deyfingu brúarinnar, þ.e. gildi á bilinu $\zeta = 0,015 - 0,023$ voru mæld. Allir útreikningar taka mið af stökum vegfarenda sem vegur 700 N , eða u.þ.b. 71 kg . Til samanburðar má geta þess að kröfur staðlana eru $a_{max} = 0,53\text{ m/s}^2$ skv. Ontario brúarstaðlinum og $0,81\text{ m/s}^2$ skv. breska staðlinum og Eurocode.

7 HÖNNUNARVIÐMIÐ

Í þessum kafla er fjallað um þau hönnunarviðmið sem annars vegar hafa verið sett fram í mismunandi stöðlum sem og þeim sem finna má í fræðunum. Einnig verður fjallað stutt um viðmið varðandi skynjun hröðunar.

7.1 Almennt um hönnun göngubrúa gagnvart sveiflum

Árið 2005 var gefið út leiðbeiningarit, Guidelines for the Design of Footbridges, á vegum fib (Fédération Internationale du Béton) þar sem meðal annars er fjallað um hvernig hanna skuli göngubrýr gagnvart sveiflum, [FIB, 2005].

Lögð er nokkur áhersla á að margir óvissuþættir hafi áhrif á hegðun göngubrúa gagnvart sveiflum. Helstu óvissuþættirnir eru:

- *Deyfingarhlutfallið* er ekki þekkt fyrir en brúin hefur verið byggð og er breytilegt að einhverju leyti eftir byggingu hennar. Þættir sem hafa áhrif á deyfingarhlutfallið eru meðal annars byggingarefnið sem notað er, hversu flókin brúin er, yfirborð brúardekksins, festingar og legur, handrið og fjöldi fólks sem er á brúnni.
- *Álagið*. Mörg mismunandi álagstilfelli eru möguleg og hægt er að líkja eftir þeim á ólíkan hátt.
- *Viðmiðunargildin* ættu ekki að vera eingöngu háð álaginu heldur einnig taka mið af staðsetningu brúarinnar og hver notar brúna. Viðmiðunarhröðunin þarf einnig að taka mið af tíðninni sem um ræðir.

Mælt er með eftirfarandi aðferðafræði við sveifflugreininguna:

- Taka tillit til staðsetningar brúarinnar ásamt gerð og tíðni væntanlegs álags
- Ræða við verkkaupa varðandi hver æskileg sveifluhegðun brúarinnar á að vera og setja raunhæf mörk með tilliti til staðsetningar. Einnig að meta hvort eigi að gera ráð fyrir sérstökum búnað vegna dempunar.
- Fyrst er einfölduð sveifflugreining gerð, annaðhvort með handreikningum eða FE-líkani til að meta hvort og hvar vandræði geta orðið. Sökum ónákvæmni í greiningunni eins og getið er um hér að ofan er nauðsynlegt að taka þessum niðurstöðum með fyrirvara. Þær geta þó gefið fyrstu hugmyndir að mögulegum dempunarbúnaði og því hægt að taka tillit til þess við frekari hönnun.
- Ef einhver vafi leikur á hvort sveifluvandamál verði þá þarf að skoða hvernig mögulegt er að koma fyrir dempunarbúnaði. Þannig er tryggt að burðarþol brúarinnar taki mið af því.
- Raunhegðun brúarinnar er skoðuð eftir byggingu. Reynist þörf á dempunarbúnaði þá er auðvelt að koma honum fyrir.

7.2 Staðlar

Í Evrópustaðlinum er að finna mismunandi hönnunarreglur eftir því á hvaða staðal er litið. Í hönnunarstaðli fyrir steinsteypar brýr, ENV 1992-2:1996 kemur fram að mesta lóðréttá hröðun sem er leyfileg á brúardekkinu sé $a_{max} = 0.5f_0^{1/2}$ og að hún sé reiknuð með líkani úr breska staðlinum, BS5400, þ.e.



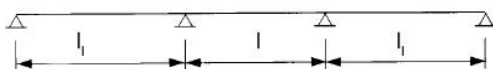
$$F(t) = 180 \sin(2\pi f_0 t) \quad (7-1)$$

$$v = 0,9 f_0 \quad (7-2)$$

Í hönnunarstaðli fyrir timburbrýr, ENV 1995-2:1997 kemur fram að mesta leyfilega hröðun einhversstaðar á brúardekkinu sé $a_{max} = 0,7 \text{ m/s}^2$. Þar kemur fram að reikna megi hröðunina með eftirfarandi einföldu jöfnu þegar brúin er yfir eitt, tvö eða þrjú höf:

$$a_{vert,l} = 165k_a \frac{1 - e^{-2m\zeta}}{M\zeta} \quad (7-3)$$

Í jöfnu (7-3) er k_a stuðull sem tekur tillit til hlutfalls lengdar aðalhafsins og hliðarhafanna (e. configuration factor), sjá mynd 7-1. Deyfingarhlutfall brúarinnar fyrir það sveifluform sem litið er á (e. modal damping ratio) er gefið sem ζ á meðan n er fjöldi skrefa sem þarf til að fara yfir brúna.

Bridge configuration		K
	-	1.0
	-	0.7
	Ratio l/l	
	1.0	0.6
	0.8	0.8
	0.6 or less	0.9

Mynd 7-1: Haflengdarstuðullinn.

Fyrir brýr sem falla ekki undir skilgreininguna að ofan skal nota staka sínus bylgju sem fer yfir brúna á hraðanum v , þ.e.

$$F(t) = 280 \sin(2\pi f_0 t) \quad (7-4)$$

$$v = 0,9 f_0 \quad (7-5)$$

Í Evrópastöðlunum er misræmi varðandi hverjar kröfurnar eigi að vera, en þeir eru þó í vinnslu og eins og fram kemur í nýrri útgáfu af Eurocode 1990, Annex A2, þá eru eftirfarandi kröfur gerðar fyrir mestu reiknuðu hröðun:

Lóðréttar sveiflur:	$a_{max} = 0.7 \text{ m/s}^2$
Láréttar sveiflur við venjulegar aðstæður:	$a_{max} = 0.2 \text{ m/s}^2$
Láréttar sveiflur fyrir sérstaklega stóran hóp:	$a_{max} = 0.4 \text{ m/s}^2$

Í nýrri útgáfu af hönnunarstaðlinum fyrir timburbrýr ENV 1995-2:2004 kemur fram að fyrir einfalt undirstuddar bita- eða grindarbrýr megi reikna mestu hröðun sem

$$a_{vert,l} = \frac{200}{M\zeta} \quad \text{fyrir} \quad f_{vert} \leq 2,5 \text{ Hz} \quad (7-6)$$

$$a_{vert,l} = \frac{100}{M\zeta} \quad \text{fyrir} \quad 2,5 \text{ Hz} < f_{vert} \leq 5,0 \text{ Hz} \quad (7-7)$$

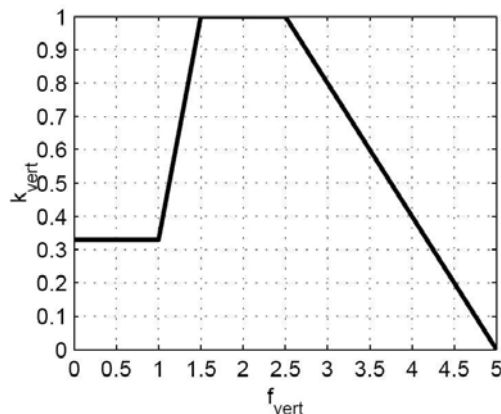
þar sem M er heildarmassi brúarinnar og ζ er deyfingarhlutfall sveifluformsins sem tilheyrir eigintíðnini f_{vert} . Þessi brúarstaðall gengur lengra og skilgreinir mestu hröðun fyrir hlaupaálag sem:

$$a_{vert,1} = \frac{600}{M\zeta} \quad \text{fyrir} \quad 2,5 \text{ Hz} \leq f_{vert} \leq 3,5 \text{ Hz} \quad (7-8)$$

Einnig er gefin aðferð til að reikna mestu hröðun fyrir hóp af fótgangandi vegfarendum sem

$$a_{vert,n} = 0,23a_{vert,1}nk_{vert} \quad (7-9)$$

þar sem n er fjöldi vegfarenda og skal tekið sem $n = 13$ fyrir einn hóp af fólki og $n = 0,6A$ fyrir samfelldan straum. Flatarmál brúardekksins er A . Stuðullinn k_{vert} tekur tillit til þess að brýr sem hafa eigintíðni aðra en meðaltíðni gangandi vegfarenda eru ólíklegri til að sveiflast. Stuðullinn má lesa af grafi eins og sýnt á mynd 7-2.



Mynd 7-2: Stuðullinn k_{vert} .

Sameiginlegt fyrir öll hönnunarviðmið er að brýr sem hafa eigintíðni hærri en $5,0 \text{ Hz}$ í lóðrétta átt og $2,5 \text{ Hz}$ í lárétta átt þurfi ekki að athuga gagnvart sveiflum vegna umferðar fólks. Aðrir staðlar, eins og breski, kanadíski og danski staðallinn notast einungis við sínusálagið frá stökum einstaklingi eins og greint var frá í kafla 5.5, sjá töflu 5-4.

Annmarkar þessarar aðferðar eru helst þeir að álagslíkanið er ekki mjög raunverulegt samanborið við þau álagslíkön sem fjallað er um í kafla 5. Í flestum tilfellum er heldur ekki tekið á því hvernig skuli meðhöndla fleiri en einn gangandi eða hlaupara.

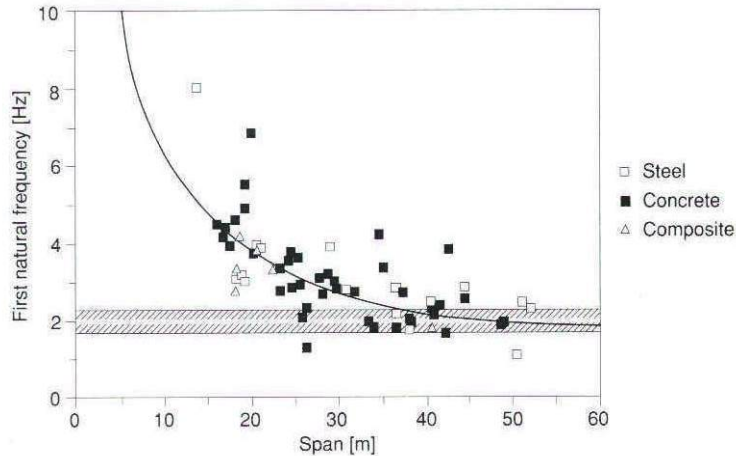
7.3 Fræðin

Eiginleikar göngubrúa

Helstu eiginleikar brúa sem hafa áhrif á sveifluhegðunina eru eigintíðni(r), dempun, massi og stífni. Í flestum tilvikum er massi brúarinnar vel skilgreindur þar sem rúmþyngd flestra byggingarefna er þekkt. Hin atriðin er fjallað um í [Bachmann et.al., 1996] og geta þær aðferðir sem þar eru gefnar komið sér vel, sérstaklega við forhönnun göngubrúa.

Tíðni

Samhengi milli fyrstu lóðrétta eigintíðni og haflengdar fyrir mismunandi brýr hefur verið tekið saman í [Bachmann et.al., 1996] og er sýnt á mynd 7-3.



Mynd 7-3: Samhengi milli haflengdar og eigintíðni. Mynd úr [Bachmann et.al. 1996].

Línan sem teiknuð er inn á grafið er reiknuð með aðferð minnstu kvaðrata (e. least-square method) og er gefin sem

$$f_1 = 33,6L^{-0,73} \quad (7-10)$$

Þar sem L er haflengd brúarinnar í m og f_1 er fyrsta lóðrétta eigintíðnin í Hz . Ef gerður er greinarmunur milli stálbrúa og steyptra brúa fást eftirfarandi jöfnur í staðinn

$$f_1 = 39L^{-0,77} \quad (\text{Steyptra brýr}) \quad (7-11)$$


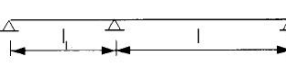

$$f_1 = 35L^{-0,73} \quad (\text{Stálbrýr}) \quad (7-12)$$

Það má því sem fyrsta nálgun segja að steyptra brýr með haflengdir lengri en $25 m$ og stálbrýr með haflengdir lengri en $35 m$ séu á óheppilegu tíðnibili.

Önnur einfölduð aðferð til að reikna eigintíðni brúa er gefin í breska staðlinum BD37/01 sem:

$$f_1 = \frac{C^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EIg}{M}} \quad (7-13)$$

þar sem g er þyngdarhröðunin, l er haflengd aðalhafsfins í m , EI er beygjustífni brúarinnar í kNm^2 , M er þyngd pr. m , þ.e. kN/m og C er stuðull sem tekur tillit til áhrifa frá hliðarhöfum, sjá mynd 7-4.

Bridge configuration	Ratio l/l_1	C
	-	π
	0.25	3.70
	0.50	3.55
	0.75	3.40
	1.00	π
	0.25	4.20
	0.50	3.90
	0.75	3.60
	1.00	π

Mynd 7-4: Stuðullinn C úr BD37/01.

Aðferðin gildir fyrir einfalt studdar brýr með einu, tveimur eða þremur höfum og með föstu þversniði.

Deyfing

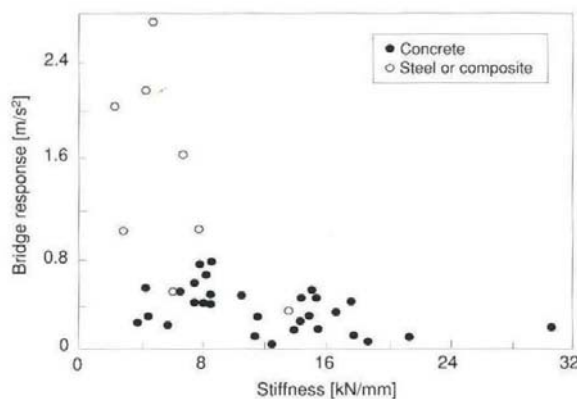
Deyfing er mjög mikilvægur þáttur í sveifluhegðun brúa, en erfitt er að meta hana við hönnun. Best er því að byggja á fyrri reynslu og mældri deyfingu í núverandi mannvirkjum. Gögn sem byggja á 43 göngubrúum í Bretlandi gefa eftirfarandi niðurstöður fyrir dempun, sjá [Bachmann et.al., 1996]:

Tafla 7-1: Dempun brúa mælt sem hlutfall af krítísku deyfingarhlutfalli (e. damping ratio) skv. [Bachmann et.al., 1996].

Byggingarefni	ζ_{min}	ζ_{mean}	ζ_{max}
Slakbent steinsteypa	0,008	0,013	0,020
Forspennt/eftirspennt steypa	0,005	0,010	0,017
Samverkandi stál og steypa	0,003	0,006	--
Stál	0,002	0,003	--

Stífni

Tilraunir gerðar af [Bachmann et.al., 1996] sýna að samband milli svörunar brúar og stífninnar sé eins og sýnt á mynd 7-5. Stífnin er í þessu tilviki skilgreind sem hlutfallið milli punktkrafts og niðurbeygju á miðju hafi. Byggt á myndinni má álykta að ekkert sveifluvandamál sé um að ræða þegar stífni brúarinnar er meiri en u.þ.b. 8 kN/mm að því gefnu að leyfileg hröðun sé takmörkuð við $0,7 m/s^2$ eins og tilfellið er í nýju útgáfunni af Eurocode 1990, Annex 2.



Mynd 7-5: Samband stífni brúar og svörunar. Mynd úr [Bachmann et.al., 1996].

7.4 Einföld hönnunarviðmið

Tíðnistilling (e. Frequency tuning)

Einföld aðferð til að koma í veg fyrir sveifur af völdum fótgangandi vegfarenda er að hanna brúna þannig að eigintíðnir séu vel yfir eigintíðni álagsins. Rannsóknir hafa sýnt að meðalgöngutíðnin er 2,0 Hz og staðalfrávikid er 0,175 Hz. Það þýðir að 50% ganga með tíðninni 1,9 til 2,1 Hz, og 95% ganga með tíðninni 1,65 til 2,35 Hz. Hlaupatíðni manna er nokkuð hærri, þ.e. frá 1,9 Hz – 3,3 Hz fyrir spretthlaup. Einnig er rétt að huga að því að annað sveifluform álagsins geti valdið óþægilegum sveiflum, sérstaklega í léttum brúm. Því er rétt að segja að brýr með eigintíðni yfir 5,0 Hz muni væntanlega ekki lenda í miklum sveiflum af mannavöldum.

Mynd 7-6 sýnir hvaða eigintíðni ber að forðast, háð því álagi sem virkar skv. [Bachmann, 2002].



Mynd 7-6: Krítískar eigintíðni í göngubrúm skv. [Bachmann, 2002].

Ókostir við þessa aðferð er að settar eru mjög strangar kröfur varðandi haflegd brúarinnar. Því er þetta ekki alltaf vænn kostur, t.d. ef brúa þarf stóra umferðargötu og möguleiki á að setja súlur er ekki til staðar.

Aukin dempun

Í staðinn má reyna að auka dempunina. Þetta er oftast gert með massadempurum (e. tuned mass dampers) sem veiga um 0.05% – 5% af massa brúarinnar sem þeir eru tengdir við. Í stuttu máli virkar demparinn þannig að ákveðinn massi er tengdur við fjöður og dempara og svo festur við brúna. Eiginleikar demparans eru stilltir þannig að massinn sveiflast við sömu tíðni og álagid en í mótfasa og minnkar þannig svörun brúarinnar, sjá t.d. [Chopra, 2001].

Gallinn við massademparana er að það þarf að koma þeim fyrir á miðju hafi og þeir þurfa pláss til að geta sveiflast. Þetta er ekki alltaf vænlegur kostur af útlitslegum ástæðum. Annar ókostur við massadempara er að þeir virka einungis á mjög þröngu tíðnibili, þ.e. þeir geta einungis dempað eitt sveifluform og því þarf að koma fyrir mörgum dempurum ef brúin hefur fleiri lágar eigintíðni sem geta örvast.

Aðferð skv. stöðlum

Fyrir einfaldar brýr, þ.e. brýr með eitt, tvö eða þrjú höf og jafnt þversnið má reikna út mestu hröðun undan staðalálaginu á einfaldan hátt eins og skýrt er út í breska

staðlinum (BD37/01). Aðferðin ákvarðar mestu lóðréttu hröðun vegna eins gangandi með göngutíðni sem fellur saman við grunntíðni brúarinnar:

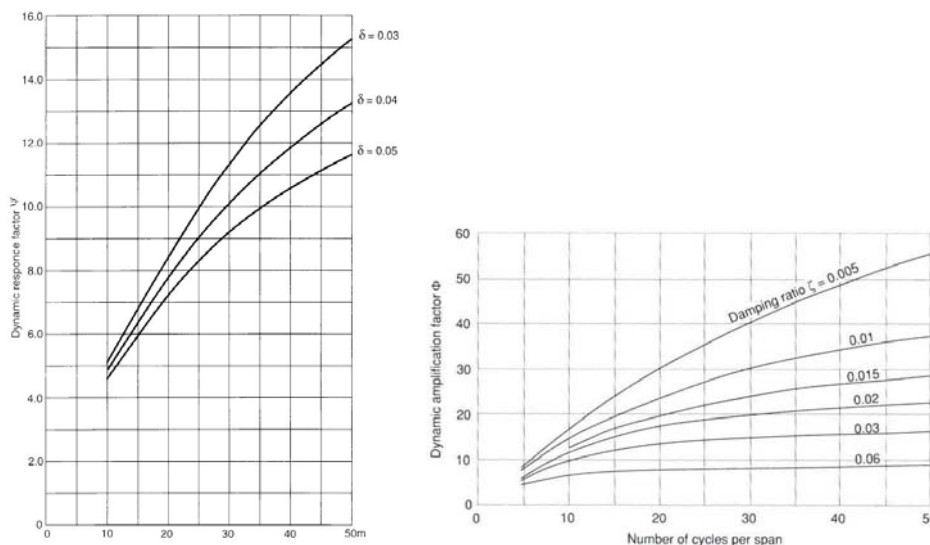
$$a_{peak} = 4\pi^2 f_0^2 y_s k \psi \quad (7-14)$$

f_1 : eigintíðni brúar í lóðréttu stefnu	[Hz]
y_s : niðurbeygja á miðju hafi vegna 700 N punktkrafts	[m]
k : haflengdarstuðull (e. configuration factor) skv. mynd 7-1	[-]
ψ : svörunarstuðull (e. response factor), sjá mynd 7-7	[-]

Þessa jöfnu má svo útfæra á annan hátt sem tekur tillit til Fourier-stuðla fyrir gangandi og hlaupandi sem hafa verið mældir. Þessi aðferð var m.a. notuð við hönnun göngubrúa á Hringbraut til að meta hver væri líkleg hröðun vegna gangandi vegfarenda.

$$a_{peak} = 4\pi^2 f_0^2 y_s k \alpha \Phi \quad (7-15)$$

Í ofangreindri jöfnu er α Fourier-stuðullinn sem er háður tíðni álagsins og Φ er svörunarstuðull sem fæst af mynd 7-7.



Mynd 7-7: Svörunarstuðull skv. BD37/01 (hægra megin) og [Bachmann et al., 1996] (vinstra megin).

Reiknaða lóðréttu hröðun er síðan hægt að bera saman við kröfur í staðli eða þá aðrar kröfur sem eigandi mannvirkisins setur í samráði við hönnuði.

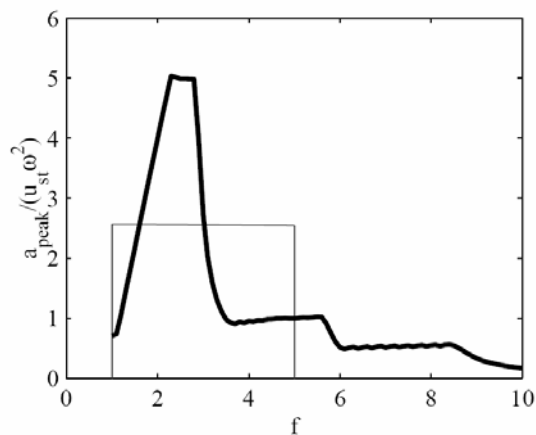
7.5 Samanburður

Það er hægt að sýna að svörun göngubrúar við því álagi sem skilgreint er í stöðlunum, þ.e. eins og í jöfnu (5-8) sé óháð eigintíðni brúarinnar. Þetta er vegna þess að líkanið tekur ekki tillit til þess að Fourier-stuðlarnir eru háðir göngutíðninni.

Þegar litið er á álag frá stökum vegfarenda er rétt að meta svörun frá þungum einstaklingi, t.d. er 95 % af dönsku þjóðinni léttari en 965 N og því virðist það betri kostur en að nota 700 N (sem en minna en meðalþyngd dönsku þjóðarinnar) eins og

staðlarnir gera ráð fyrir. Einnig er rétt að gera ráð fyrir að stakur maður geti ekki gengið hraðar en u.þ.b. $2,8 \text{ Hz}$ og að hann geti því ekki gengið á eigintíðni brúarinnar þegar $f_0 > 2,8 \text{ Hz}$. Á móti kemur er rétt að taka þrjá liði með í Fourier-röð álagsins, sjá (5-2) og þá mun annað sveifluform álagsins geta verið á eigintíðni brúarinnar ef gengið er á hálfri tíðni hennar.

Til að sýna muninn á reiknaðri hröðun skv. staðlinum, þ.e. þegar $F = 180 \cdot \sin(2\pi f_0 t)$, og á endurbætta álagslíkaninu úr kafla 5.1 er skoðuð einfalt undirstudd brú með haflengdina $L = 50 \text{ m}$ og dempunina $\zeta = 0,05$. Bæði álagslíkon eru keyrð fyrir mismunandi eigintíðnir og mesta svörun við hverja tíðni er sýnd í mynd 7-8.



Mynd 7-8: Samanburður á álagslíkani staðlanna og álagslíkani skv. kafla 5-1. Mjóá línan er svörun skv. staðlinum og sverari línan svörun við endurbætta álagslíkaninu. Mynd úr [Ingólfsson, 2006].

Eins og sést á myndinni þá vanmetur álagslíkanið úr staðlinum svörunina mjög mikið þegar eigintíðni brúarinnar er nálægt meðalgöngutíðni, þ.e. í kringum 2 Hz . Við hærri tíðnir, þ.e. milli $3,5 - 5,0 \text{ Hz}$ er hröðunin ofmetin af staðlinum, sjá einnig [Ingólfsson, 2006].

7.6 Tillögur að breytingum

Mikil vinna hefur verið lögð í að rannsaka sveiflur í göngubrúum frá fótgangandi vegfarendum undanfarin ár. Helst ber að nefna vinnu sem fer fram fyrir bresku vegagerðina (the UK Highway Agency) og er unnin af TRL Limited (Transport Research Laboratory) og ráðgjafafyrirtækinu Flint & Neill Partnership. Framvindu vinnunnar er lýst í þremur greinum sem lagðar voru fram á ráðstefnu um sveifluhegðun göngubrúa í Feneyjum í desember 2005, sjá [Barker, 2005; Barker et.al., 2005; Mackenzie et.al., 2005]. Þar er tekið fram að helstu gallar við hönnunarreglur staðlanna séu í stuttu máli eftirfarandi:

- Sveifluútvík álagsins (180 N) sé allt of lágt.
- Ekki er munur á reiknaðri svörun við $2,0 \text{ Hz}$ og $4,0 \text{ Hz}$.
- Aðeins fyrsti liður Fourier-raðarinnar er tekinn með.
- Ekki er tekið tillit til notkunar brúarinnar.
- Ekki er tekið tillit til hlaupaálags.

Í greinunum er lagt til að ennþá sé notað álagið úr staðlinum, þ.e. gangandi vegfarandi á eigintíðni brúarinnar, þó með öðrum hraða og öðru sveifluútvíki:

Gönguálag

$$F(t) = 280 \sin(2\pi f_0 t)$$

$$v = 1,7 \text{ m/s}$$

Hlaupaálag

$$F(t) = 910 \sin(2\pi f_0 t)$$

$$v = 2,0 \text{ m/s}$$

(7-16)

(7-17)

Í stuttu máli gengur aðferðin út á að reikna svörunina frá ofangreindu álagi fyrir hvert sveifluform sem getur örvast af álaginu. Svörunin er svo sköluð til að taka tillit til þess að meiri líkur séu á svörun við eigintíðni nálægt meðalgöngutíðninni. Tillit er tekið til svörunar sveifluforma með eigintíðni sem eru ekki nálægt meðalgöngutíðninni með því reikna út “quasi-steady” svörun sem svo er lögð saman við svörunina frá staðalálaginu. Rétt er að taka fram að svörunin sem reiknuð er, er ekki mesta svörun í tímaröðinni heldur skal hún reiknuð á eftirfarandi hátt:

$$a_{ref} = \sqrt[4]{\int [a(t)]^4 dt} \quad (7-18)$$

Einnig er lagt til að kröfurnar um mestu leyfilegu hröðun séu endurskoðaðar. Tvær mismunandi tillögur voru settar fram. Ein tillaga er að nota kröfur eins og sýndar í töflu 7-2.

Tafla 7-2: Tillaga að hönnunarviðmiðum fyrir mestu leyfilegu hröðun skv. [Mackenzie et al., 2005].

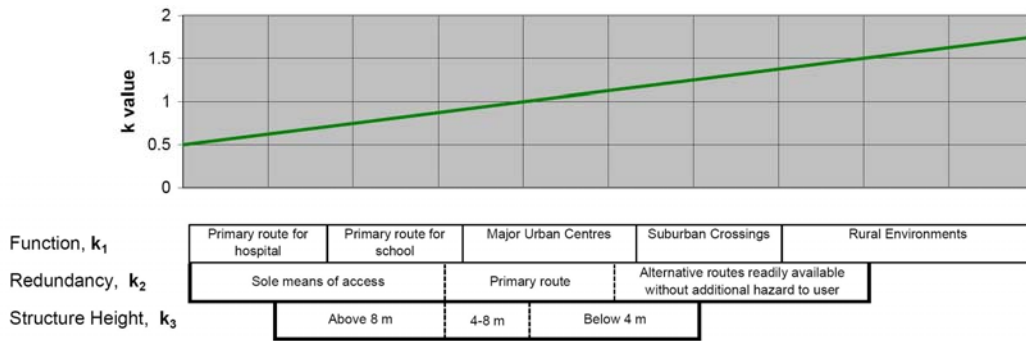
Viðmiðunar-flokkur	Viðmið	Efri mörk
Strangar kröfur	Leiðir að mikilvægum stöðum eins og sjúkrahúsum og skólum þar sem notandinn hefur takmarkaðan hreyfanleika	0,5 m/s ²
Meðal kröfur	Venjulegar kröfur fyrir brýr í þéttbýli	1,0 m/s ²
Léttar kröfur	Afskekktar brýr þar sem notkun er lítil	2,0 m/s ²

Önnur tillagan segir að mesta leyfilega hröðun sé:

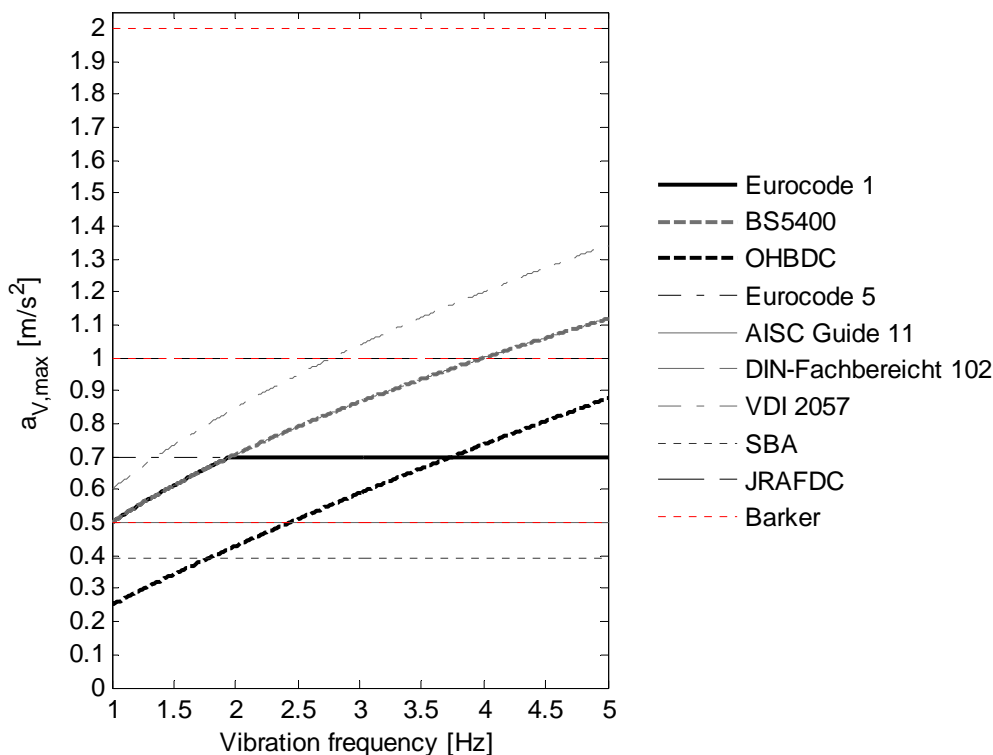
$$a_{limit} = a_0 k_1 k_2 k_3 k_4 \quad (7-19)$$

Þar sem $a_0 = 1,0 \text{ m/s}^2$ og stuðlarnir $k_1 - k_4$ taka tillit til þátta eins og staðsetningar og mikilvægi brúarinnar. Stuðlarnir taka gildi frá 0,5 – 1,8 háð staðsetningu brúarinnar, mikilvægi hennar í samfélaginu og hæðar brúardekksins yfir jörðu. Tillaga að stuðlum er sýnd á mynd 7-9.

Þessi hönnunarviðmið ganga vissulega skrefinu lengra en þau sem til eru í núverandi stöðlum. Reynt er að taka tillit til notkun brúarinnar og þess að brýr með eigintíðnir nálægt meðalgöngutíðni eru líklegri til að hegða sér illa. Gallinn við þessa aðferð er sá að ekki er verið að reikna út raunsvörun brúarinnar, heldur sýndarsvörun sem svo má bera saman við viðmiðunargildi.



Mynd 7-9: Tillaga að stuðlum $k_1 - k_3$ fyrir mestu leyfilegu hröðun skv. [Mackenzie et al., 2005].



Mynd 7-10: Samanburður á mismunandi hönnunarkröfum fyrir mestu leyfilegu hröðun í lóðrétta átt.

Önnur hugmynd væri að nota þær upplýsingar sem til eru um álag frá fótgangandi vegfarendum eins og skýrt er út í kafla 5 og nota endurbætta álagslíkanið sem grunn fyrir útreikninga á svöruninni. Í stuttu máli gengur þessi hugmynd út á að búa til svörunarróf sem væri reiknað fyrir ákveðna haflengd, t.d. 50 m og fyrir ákveðna dempun, t.d. 1%. Þetta staðlaða svörunarróf væri útbúið fyrir brýr fyrir eftirfarandi álagstilfelli

- Stakur maður gengur
- Stakur maður hleypur/skokka
- Lítil hópur af gangandi (t.d. 5-10 manns)
- Lítil hópur af skokkurum (t.d. 5-10 manns)
- Stór hópur af gangandi (skrúðganga)
- Stór hópur af skokkurum (maraþon)

Svörun brúarinnar væri lesin af svörunarrófinu fyrir hvert sveifluform í hverju álagstílfelli og lagt saman með annað hvort SRSS eða CQC aðferðinni. Svörunin væri svo sköluð til að taka tillit til mismunandi haflengdar og dempunar.

Hin reiknaða svörun við hverju álagstílfelli væri þá sú raunsvörun sem von væri á fyrir hvert álagstílfelli. Hugmyndin er svo að meta endurkomutíma hvers álagstílfellis og þannig skilgreina hröðunarkröfurnar, þ.e. með því að hafa kröfur sem eru í takt við töflu 7-2.

Hugmyndin á bakvið þessa aðferð kemur úr svörunarrófsaðferðinni (e. response spectrum method) eins og hún er skilgreind í jarðskjálftastaðlinum. Þar er hægt að reikna út svörun mannvirkis við mjög flóknu og slembikenndu álagi á frekar einfaldan hátt. Það sem þarf þó að gera fyrst er að búa til svörunarrófin út frá annaðhvort mældum tímaröðum eða tímaröðum sem byggja á aðferðunum sem fjallað var um í kafla 5.

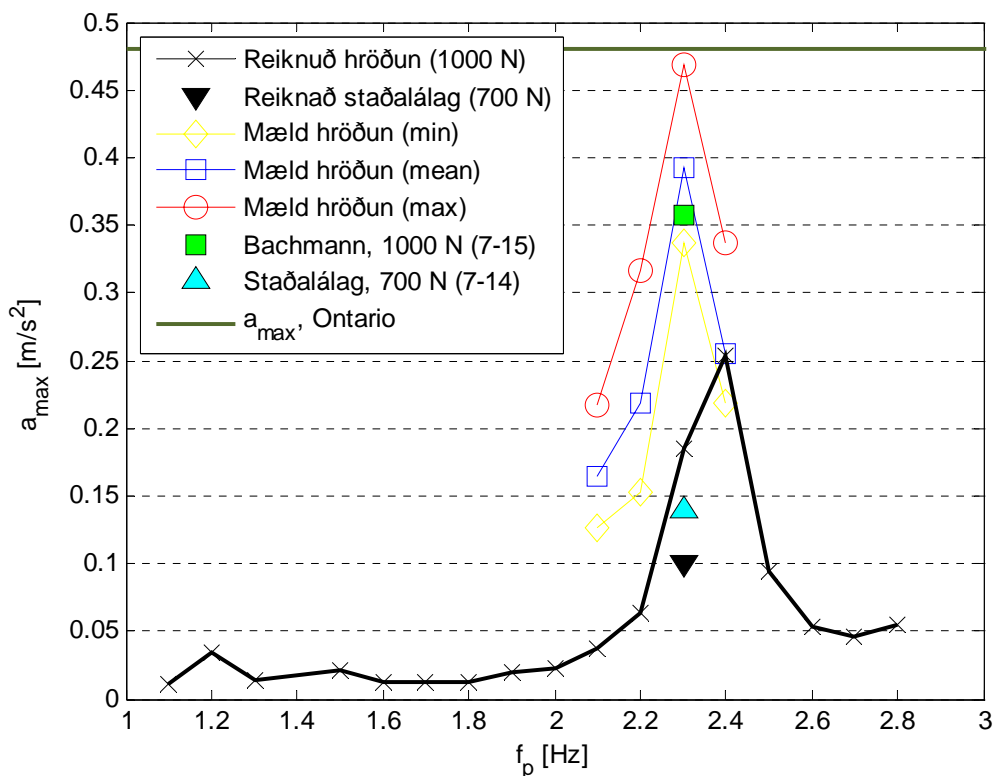
8 SAMANBURÐUR

8.1 Göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu

Á mynd 8-1 má sjá samanburð á reiknaðri og mældri svörun brúarinnar fyrir gangandi. Svörunin er mjög háð því hversu vel álagið hittir inn á eigintíðni brúarinnar eins og sést á því hve skarpur toppur er á svörunarrófinu.

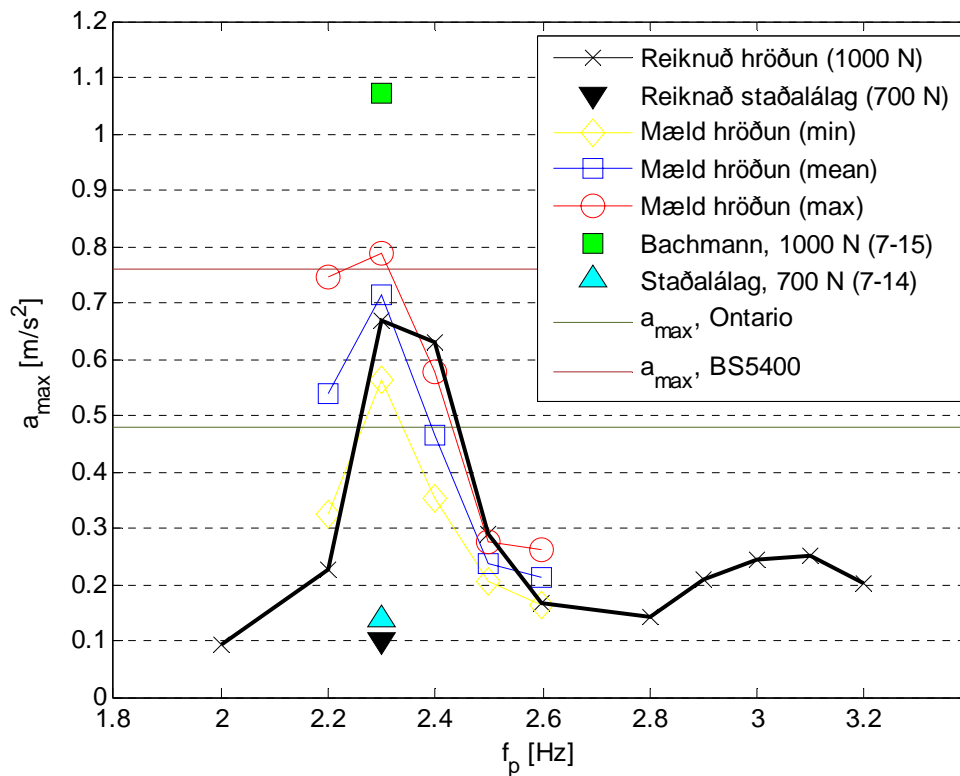
Staðalálagið (miðað við 700 N) gaf reiknaða svörun $0,10 \text{ m/s}^2$ sem er töluvert lægra en mæld svörun fyrir einn gangandi sem var mest $0,42 \text{ m/s}^2$ en meðaltalið var $0,35 \text{ m/s}^2$. Bæði gildin eru vel innan við staðalkröfurnar varðandi hröðun sem eru fyrir þessa brú $a_{\text{leyfilegt}} = 0,76 \text{ m/s}^2$. Tið að bera saman reiknuð gildi og mæld gildi, eru allar mælingar (nema gildi staðlanna) kvörðuð miðað við 1000 N í þyngd. Samanburðurinn er sýndur í mynd 8-1.

Sé einföldum hönnunaraðferðum beitt fyrir þessa brú þá fæst að mesta hröðun samkvæmt (7-14) er $a_{\text{max}} = 0,25 \text{ m/s}^2$ miðað við 700 N eða $0,36 \text{ m/s}^2$ miðað við 1000 N. Þessi tala er ekki í samræmi við það sem fæst út úr FE-reiknilíkaninu sem almennt er lægra en það sem mældist á brúnni.



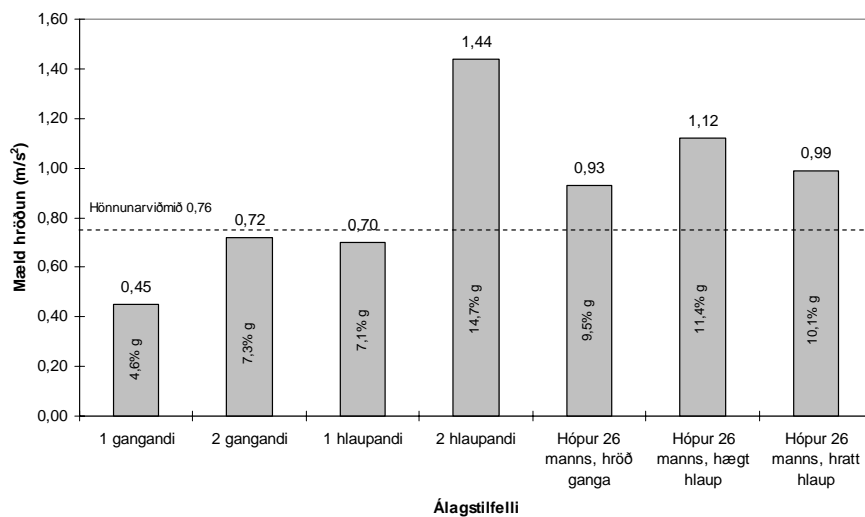
Mynd 8-1: Samanburður á reiknaðri og mældri hröðun fyrir gönguálag á göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu.

Á mynd 8-2 má sjá samanburð á reiknaðri og mældri svörun brúarinnar fyrir hlaupaálag. Reiknuð hröðun fellur ágætlega að mældri hröðun fyrir einn hlaupara. Mesta reiknaða hröðun er við hlaup á tíðninni 2,3 Hz $0,67 \text{ m/s}^2$ en mesta melda hröðun er $0,69 \text{ m/s}^2$ ($0,79 \text{ m/s}^2$ miðað við 1000 N) en meðalgildið úr 6 mæliröðum er $0,64 \text{ m/s}^2$ ($0,71 \text{ m/s}^2$ miðað við 1000 N) fyrir hlaup á tíðni 2,3 Hz. Einfalda aðferðin skv. jöfnu (7-14) er langt yfir mældum og reiknuðum gildum.



Mynd 8-2: Samanburður á reiknaðri og mældri hröðun fyrir hlaupaálag á göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu.

Á mynd 8-3 má sjá samanburð á mældri svörun fyrir mismunandi álag við hönnunarviðmið evrópustaðalsins. Þar má sjá að fyrir einn mann gangandi og einn mann hlaupandi er mæld svörun innan við staðalviðmiðið en fyrir tvo hlaupara og í hóptilraunum fer svörunin yfir staðalviðmiðið.



Mynd 8-3: Samanburður á mældri svörun fyrir mismunandi tilraunir fyrir göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu. Gildin eru hágildi hröðunar fyrir hvert álagstílfelli.

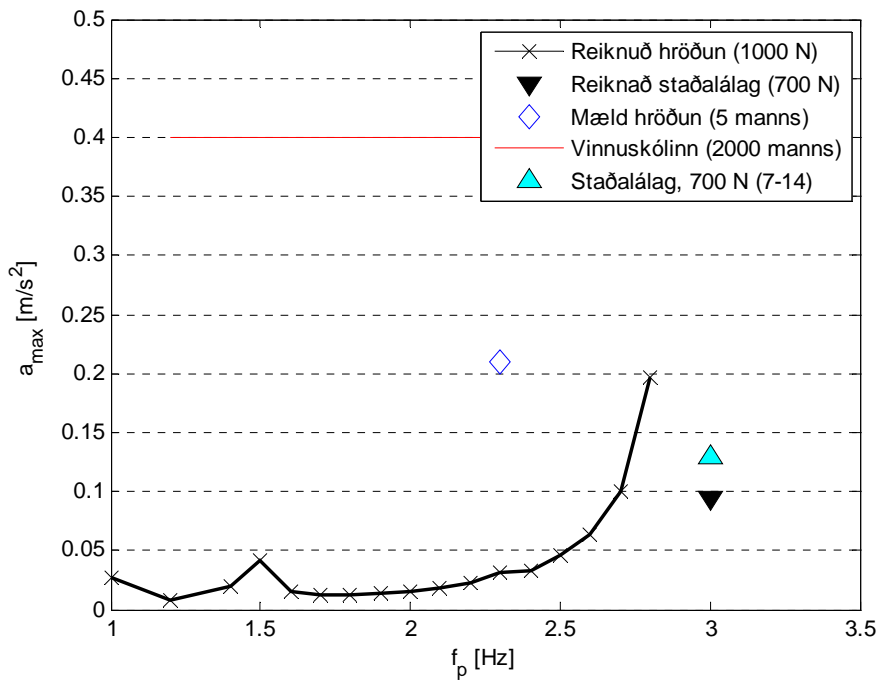
8.2 Göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala

Á mynd 8-4 má sjá samanburð á reiknaðri og mældri svörun brúarinnar fyrir gangandi. Eigintíðni brúarinnar er um $3,0 \text{ Hz}$ og því ofan við göngutíðni en samsvarar tíðni fyrir nokkuð hratt hlaup. Mælingar á svörun brúarinnar miðuðu því fyrst og fremst við hlaup. Á myndinni sést að mesta reiknaða hröðun fyrir gangandi er um $0,18 \text{ m/s}^2$ fyrir tíðnina $2,8 \text{ Hz}$ sem er langt ofan við tíðni gangandi vegfarenda.

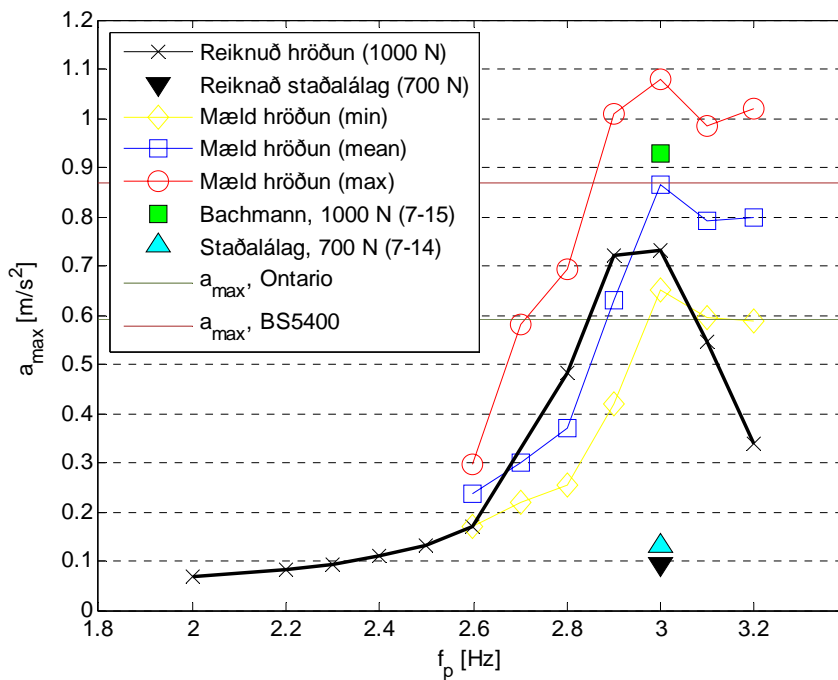
Staðalálagið gaf reiknaða svörun $0,09 \text{ m/s}^2$ sem er vel innan við staðalkröfurnar fyrir þessa brú sem eru $a_{leyfilegt} = 0,89 \text{ m/s}^2$, skv. BS5400 og $0,48 \text{ m/s}^2$ skv. Ontario staðlinum.

Á mynd 8-5 má sjá samanburð á reiknaðri og mældri svörun brúarinnar fyrir hlaupara. Nokkuð gott safn mælinga er til fyrir hlaupara fyrir mismunandi hlaupatíðni. Mesta mælda svörun fyrir einn hlaupara er $1,02 \text{ m/s}^2$ ($1,08 \text{ m/s}^2$ miðað við 1000 N). Meðaltalið úr 6 mæliröðum fyrir f_p $3,0 \text{ Hz}$ var $0,76 \text{ m/s}^2$ (eða $0,87 \text{ m/s}^2$ fyrir 1000 N). Reiknuð svörun var aftur á móti $0,66 \text{ m/s}^2$ fyrir einn hlaupara (1000 N) sem er frekar lægra en meðaltalið.

Sé einföldum hönnunaraðferðum beitt fyrir þessa brú þá fæst að mesta hröðun samkvæmt Bachmann er í góðu samræmi við mælda hröðun, en er töluvert herra en reiknuð hröðun í FE-reiknilíkani eins og sést á mynd 4-1. Sé jöfnu úr Ontario-brúarstaðlinum beitt þá fæst $a_{\max} = 0,13 \text{ m/s}^2$. Í þeirri jöfnu er ekki tekið tillit til þess að Fourier-stuðull hlaupaálags er hærri en Fourier-stuðull gönguálags.



Mynd 8-4: Samanburður á reiknaðri og mældri hröðun fyrir gönguálag á göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala.

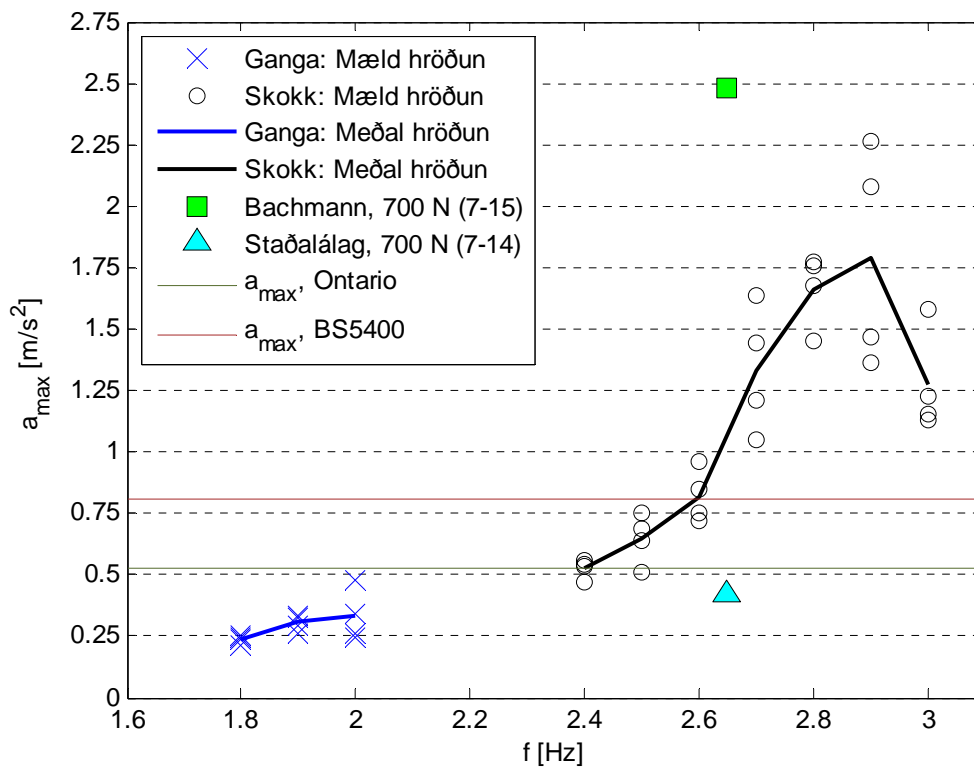


Mynd 8-5: Samanburður á reiknaðri og mældri hröðun fyrir hlaupaálag á göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala.

8.2.1 Göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði

Ekki var sett upp reiknilíkan af göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði og því ekki unnt að bera saman mælda svörun og reiknaða. Í staðinn er hægt að bera saman svörunina reiknaða samkvæmt einföldu aðferðunum og mældri svörun. Mesta mælda hröðun fyrir einn gangandi var $a_{max} = 0,47 \text{ m/s}^2$ og fyrir einn hlaupara $a_{max} = 2,22 \text{ m/s}^2$ (miðað við 1000 N fæst $0,49 \text{ m/s}^2$ fyrir göngu og $2,46 \text{ m/s}^2$ fyrir hlaup). Mesta leyfilega hröðun fyrir þessa brú miðað við evrópustaðal er $a_{leyfilegt} = 0,81 \text{ m/s}^2$ og er því mæld hröðun fyrir einn gangandi innan við leyfileg gildi. Hins vegar fyrir hlaupara er mæld hröðun verulega hærri en leyfileg gildi samkvæmt staðlinum.

Við útreikninga skv. einföldum aðferðum gaf jafna (7-14) $a_{max} = 0,42 \text{ m/s}^2$ ($0,60 \text{ m/s}^2$ miðað við 1000 N), meðan (7-15) gaf $a_{max} = 2,48 \text{ m/s}^2$ ($3,54 \text{ m/s}^2$ miðað við 1000 N).



Mynd 8-6: Samanburður á reiknaðri og mældri hröðun á göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði.

9 HVERNIG VERÐUR NÆSTA BRÚ HÖNNUÐ?

Eins og fram hefur komið hér framur endurspeglar álagslíkön í nógildandi stöðlum ekki raunálag frá gangandi vegfarendum. Margir óvissuþættir eru varðandi hegðun göngubrúa gagnvart álagi frá gangandi vegfarendum og eru helstu óvissuþættir deyfingarhlutfallið, breytileiki álagsins og hönnunarviðmiðin. Það er því lagt í hendur hönnuða að taka á þessum óvissuþáttum við hönnun nýrra mannvirkja.

Það að staðalgildin séu tiltölulega lítið skilgreind gefur hönnuðum tækifæri til að beita innsæi og þekkingu án þess að vera bundnir af forskriftum. Mikilvægustu forsendurnar til að setja viðmiðin er staðsetning brúarinnar. Það er ekki sama hvort að göngubrúin sé staðsett á fjölfarinni leið í miðri borg eða hvort að fáir leggi leið sína yfir brúna. Eða þá hvort að brúin sé staðsett í grennd við sjúkrahús, biðstöðvar strætisvagna, grunnskóla eða þá á fjöllum þar sem einungis fjallgöngufólk gengur yfir. Með því að skoða aðstæður í hvert sinn og þannig setja viðmið varðandi hröðun og aðra hegðun brúarinnar getur hönnuður haft meiri sveigjanleika í sinni hönnun. Mikilvægt er þó að eigandi brúarinnar sé vel meðvitaður um hvað um er að ræða og að hann viti hvað hann er að fá í hvert sinn.

Sökum fjölda óvissuþátta getur reynst erfitt að spá nákvæmlega fyrir um hegðun göngubrúa gagnvart sveiflum. Einfaldar aðferðir eða FE-reiknilíkön geta spáð fyrir um hver líkleg hröðun vegna gangandi og hlaupandi vegfarenda verði en séu líkur á að um vandræði verði vegna sveiflna þá má gera ráðstafanir til að koma fyrir dempurum strax á hönnunarstigi.

Til að staðfesta að hegðun brúarinnar sé ásættanleg er mikilvægt að mæla hreyfingar hennar fyrir gefið álag þegar byggingu hennar er lokið. Þess má geta að í svissneskum staðli SIA 160 þá er þess krafist að svörun brúarinnar sé mæld falli grunntíðni hennar að tíðni gangandi og hlaupandi vegfarenda, [Zivanovic, 2005].

Aðferð sem lögð er til af [Mackenzie et.al., 2005] (sjá kafla 7.6) gerir ráð fyrir að setja þrjú mismunandi viðmiðunarflokka ásamt því að taka tillit til staðsetningar, hæðar brúar og mikilvægi tengingar. Sú aðferð gefur ágætis möguleika til að setja mismunandi kröfur fyrir einn gangandi vegafaranda.

Forsendur sem þarf:

- hvar er brúin staðsett
- er göngutengingin mikilvæg samgönguleið?
- Hver er tíðni gangandi vegfarenda (ÁDU)
- Hver er tíðni hlaupara (ÁDU), fjöldi í hóp
- eru líkur á sérstökum viðburði

Með því að kvarða þessi viðmið við núverandi göngubrýr á höfuðborgarsvæðinu mætti ennþá frekar meta hvort þau séu ásættanleg eða ekki. Með því að gera litla könnun á notendum þeirra brúa sem eru til staðar nú þegar mætti búa til mælikvarða á ásættanlegar hreyfingar.

10 NIÐURSTÖÐUR

Upphafleg markmið verkefnisins voru eftirfarandi:

- Að sannreyna reiknilíkön sem notuð hafa verið við hönnun gagnvart mældum niðurstöðum úr sveifluprófunum.
- Að tryggja öryggi og vellíðan notenda mannvirkisins með því að staðfesta að hreyfingar brúarinnar séu innan eðlilegra marka.
- Að auka þekkingu og notkun á aðferðum sveifflugreiningar við hönnun göngubrúa hér á Íslandi.
- Gera tillögur að hönnunarviðmiðum fyrir sveifluhegðun göngubrúa á Íslandi.

Alls hafa nú verið mældar sveiflur á fjórum göngubrúum á höfuðborgarsvæðinu. Niðurstöður þeirra mælinga má sjá í töflu 10-1.

Tafla 10-1: Samantekt á mældri svörun göngubrúa yfir Hringbraut og Miklubraut fyrir mismunandi álag.

Göngubrú	Mæld eigintíðni	Mæld svörun				Staðlar a_{max}
		1 gangandi	2 gangandi	1 hlaupari	2 hlauparar	
Hringbraut við Njarðargötu	2,3 Hz	0,42 m/s^2	0,71 m/s^2	0,69 m/s^2	1,43 m/s^2	0,76 m/s^2
Hringbraut við Landspítala	3,0 Hz	-	-	1,02 m/s^2	1,72 m/s^2	0,87 m/s^2
Miklubraut við Grundargerði	2,65 – 2,8 Hz	0,47 m/s^2	-	2,22 m/s^2	-	0,82 m/s^2
Miklubraut við Rauðagerði ¹	2,7 Hz	0,261 m/s^2	0,584 m/s^2	0,947 m/s^2	3,663 m/s^2	0,82 m/s^2

¹ sjá [Snæbjörnsson & Sigbjörnsson, 1999]

Mæld svörun göngubrúar yfir Hringbraut við Njarðargötu er innan við staðalviðmið fyrir einn gangandi vegfaranda þó að lóðrétt eigintíðni brúarinnar sé nálægt tíðni gangandi vegfarenda. Staðalkröfurnar eru eingöngu háðar eigintíðni brúarinnar og gilda fyrir einn gangandi mann samkvæmt skilgreiningu í staðlinum.

Mæld svörun göngubrúar yfir Miklubraut við Grundargerði er innan við staðalviðmið fyrir einn gangandi vegfaranda.

Í töflu 10-1 má sjá að mæld svörun fyrir einn hlaupara er ofan við staðalkröfur fyrir göngubrú yfir Hringbraut við Landspítala og fyrir brú yfir Miklubraut við Rauðagerði. Fyrir brú yfir Hringbraut við Njarðargötu er mæld svörun innan við staðalkröfur. Fyrir göngubrú yfir Miklubraut við Rauðagerði (við Hagkaup) þá er mesta melda hröðun fyrir einn hlaupara meira en tvöfalt hærri en staðalkröfur ($2,22 m/s^2$) enda eru hreyfingar í þeirri brú mjög greinilegar.

Mæld svörun brúnna tveggja við Hringbraut reyndist samræmast vel við reiknaða svörun í FE-reiknilíkani. Einfaldar hönnunaraðferðir falla jafnframt vel að niðurstöðum tímaráðgreiningar fyrir álagslíkön fyrir gangandi vegfarendur í FE-reiknilíkani og samkvæmt því mætti nýta sér einfaldar hönnunaraðferðir á forhönnunarstigi.

Tafla 10-2: Mæld svörun göngubrúar yfir Hringbraut við Njarðargötu fyrir hópálagi (25 manns).

Hreyfing	a_{max}	Skýring
Hröð ganga (ca. 2,3 Hz)	$0,93 \text{ m/s}^2$	Mesta mælda hröðun í tveimur mælingum
Hægt skokk (ca. 2,3 Hz)	$1,12 \text{ m/s}^2$	Mesta mælda hröðun í tveimur mælingum
Hratt skokk (ca. 2,6 Hz)	$0,99 \text{ m/s}^2$	Mesta mælda hröðun í tveimur mælingum
Gengið í hringi á aðalhafni (ca. 2,3 Hz)	$1,06 \text{ m/s}^2$	Mesta mælda hröðun í 2 min. langri mælingu

Í töflu 10-2 má sjá niðurstöður þar sem hópur gekk og hljóp yfir göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu. Athyglisvert er að 25 manna hópurinn sem hleypur með tíðni jafnri eigintíðni brúarinnar gefur minni svörun heldur en 2 hlauparar á sömu tíðni. Skýringin á því er sú að erfitt er fyrir allan hópinn að halda réttum takti og því verður svörunin minni.

Þrjú af fjórum markmiðum sem sett voru fram í upphafi verkefnisins náðust, þ.e. þau reiknilíkön sem notuð hafa verið voru staðfest, staðfest var að hreyfingar brúarinnar væru innan settra marka og mikil þekking hefur orðið til varðandi notkun sveiflureiningar við hönnun göngubrúa sem mun nýtast mjög vel við hönnun í framtíðinni. Ekki var sérstaklega reynt að gera tillögur að hönnunarviðmiðum eins og upphafleg markmið voru skilgreind. Hins vegar þá kemur það fram hér frammar að skortur á skilgreiningum í núgildandi stöðlum gefur hönnuðum og eigendum mannvirkjanna tækifæri til að laga sig að aðstæðum á hverjum stað án þess að vera bundið af forskriftum. Það er því lagt í hendur hönnuða hverju sinni að setja þær kröfur sem mannvirkinu er ætlað að uppfylla í samráði við eigendurna.

11 HEIMILDASKRÁ

11.1 Almennar heimildir

H. Bachmann (2002), “Lively“ *footbridges – a real challenge*, Proceedings of the International Conference on the Design and Dynamic Behaviour of Footbridges. FOOTBRIDGE 2002, November 10-12. 2002.

H. Bachmann et.al. (1996), *Vibration Problems in Structures. Practical Guidelines*. Birkhauser, 2ⁿedition, 1996.

C. Barker, S. DeNeumann, D. Mackenzie og R. Ko. *Footbridge Pedestrian Vibration Limits. Part1: Pedestrian Input*. Proceedings of the Second International Conference on the Design and Dynamic Behaviour of Footbridges. FOOTBRIDGE 2005, December 6-8. 2005.

C. Barker. *Footbridge Pedestrian Vibration Limits. Part 3: Background to Response Calculations*. Proceedings of the Second International Conference on the Design and Dynamic Behaviour of Footbridges. FOOTBRIDGE 2005, December 6-8. 2005.

J. Blanchard, B.L. Davies og J.W. Smith (1977). *Design Criteria and Analysis for Dynamic Loading of Footbridges*. Proceedings of the DOE and DOT TTRL Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges, May 19 1977.

A.K. Chopra (2001), *Dynamics of Structures. Theory and Application to Earthquake Engineering*. Civil Engineering and Engineering Mechanics. Prentice Hall International Series, 2nd edition, 2001.

P. Dallard, T. Fitzpatrick, A. Flint, A. Low, R.R. Smith, M. Wilford og M. Roche (2001), *London Millennium Bridge: Pedestrian-Induced Lateral Vibration*. Journal of Bridge Engineering, 6(6):412-417, December 2001.

Y. Fujino, B.M. Pacheco, S-I. Nakamura og P. Wamitchai (1993), *Synchronization of Human Walking Observed during Lateral Vibration of a Congested Pedestrian Bridge*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 22:741-758, 1993.

F. Hauksson (2005), *Dynamic Behaviour of Footbridges Subjected to Pedestrian-Induced Vibrations*, Master’s Thesis, Division of Structural Mechanics, Lund University, Autumn 2005.

E.P. Ingólfsson (2006), *Pedestrian-Induced Vibrations of Line-Like Structures*. Master’s Thesis, Department of Civil Engineering, BYG.DTU, Section of Structural Engineering, Technical University of Denmark, June 2006.

G.V. Guðmundsson, B. Einarsson (2005), *Nýlegar göngubrýr á Íslandi*. Upp í vindinn, blað byggingarverkfræðinema við Háskóla Íslands. 2005.

D. Mackenzie, C. Barker, N. McFadyen og B. Allison, *Footbridge Pedestrian Vibration Limits. Part 2: Human Sensitivity*. Proceedings of the Second International Conference on the Design and Dynamic Behaviour of Footbridges. FOOTBRIDGE 2005, December 6-8. 2005.

Y. Matsumoto, S. Sato, T. Nishioka og H. Shiojiri (1972), *A study on the design of pedestrian over bridges*. Transactions of JSCE, 4:50-51, 1972.

Y. Matsumoto, T. Nishioka, H. Shiojiri og K. Matsuzaki (1978). *Dynamic design of footbridges*. IABSE Proceedings, P-17/78:1-15, 1978.

C. Sahnaci og M. Kasperski (2005), *Random Loads Induced by Walking*. Proceedings of the sixth European Conference on Structural Dynamics – Eurodyn '05, 2005.

J.P. Snæbjörnsson, R., Ó. Þórarinnsson, B. Halldórsson, R. Sigbjörnsson (1997), *Hreyfðareiginleikar göngubrúar. Mælingar og reikningar á hreyfingarfræðilegum eiginleikum göngubrúar yfir Miklubraut við Rauðagerði*. Skýrsla nr. 97007, Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, Reykjavík 1997.

J.P. Snæbjörnsson, R. Sigbjörnsson (1999), *Footbridge Dynamics and Pedestrian Induced Vibrations – a Case Study*. Proc. of the 4th European Conference on Structural Dynamics – Eurodyn '99. Prague, 7-10 June 1999.

J.E. Wheeler (1982), *Prediction and control of pedestrian-induced vibration in footbridges*, Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE, 108(9):2045-2065, September 1982.

P. Young. (2001) *Improved floor vibration prediction methodologies*, ARUP Vibration Seminar, October 4. 2001.

S. Zivanovic, A. Pavic og P. Reynolds (2005), *Vibration serviceability of footbridges under human induced excitation: a literature review*. Journal of Sound and Vibration, 279:1-74, 2005.

S. Zivanovic, A. Pavic og P. Reynolds (2006), *Probability-based Prediction of Multi-mode Vibration Response to Walking Excitation*. Engineering Structures, doi:10.1016/j.engstruct.2006.07.004.

11.2 Staðlar og Handbækur

BD19/04. *Design Manual for Roads and Bridges: Volume 2: Highway Structures – Design (Superstructures), Materials: Section 2: Special Structures: Part 8: BD19/04: Design Criteria for Footbridges*. UK Highway Agency, London, UK, February 2002.

BD37/01. *Design Manual for Roads and Bridges: Volume 1: Approval Procedures and General Design: Section 3: General Design: Part 14: BD37/01: Load for Highway Bridges*. UK Highway Agency, London, UK, 2001.

BS5400-2-A.C. *Steel, Concrete and Composite Bridges – Part 2: Specifications for Loads; Appendix C: Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges*. British Standards Association, London, UK, 1978.

EN 1990:2002/prA1:2004. *Eurocode 1990: Basis of Structural Design – Annex A2*. CEN, European Committee for Standardization, June 2004.

ENV 1992-2:1996. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 2. Concrete Bridges*. CEN, European Committee for Standardization, 1996.

EN 1995-2:1997. *Eurocode 5: Design of Timber Structures, Part 2. Bridges*. CEN, European Committee for Standardization, 1997.

EN 1995-2:2004. *Eurocode 5: Design of Timber Structures, Part 2. Bridges*. CEN, European Committee for Standardization, November 2004.

FIB (1999), *Structural Concrete. Textbook on Behaviour of, Design, and Performance Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990 – Volume 1*, Fib bulletin 1, Fédération Internationale du Béton, July 1999.

FIB (2005), *Guidelines for the Design of Footbridges*, Fib bulletin 32, Fédération Internationale du Béton, November 2005.

OHBDC (1983), *Ontario Highway Bridge and Design Code*. Highway Engineering Division, Ministry of Transportation and Communication, Ontario, Canada, 1983.

SIA (1989), *Actions on Structures*, Swiss Society of Engineers and Architects, SIA Standard 160, Zurich, 1989.

Vejregler (2002), *Vej- og stibroer. Belastnings- og beregningsregler*. Vejdirektoratet, Vejregleråder, November 2002.