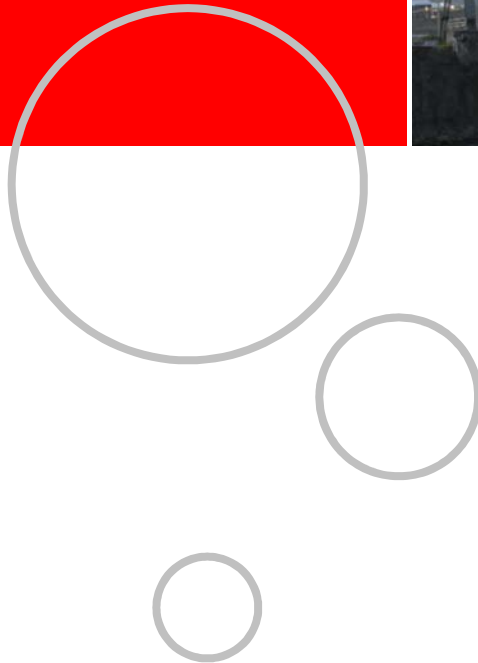


# Ástandsvöktun brúa

Lokaskýrsla

Desember 2013





Titill: **Ástandsvöktun brúa, lokaskýrsla**  
Höfundur: *Guðmundur Valur Guðmundsson og Kristján Uni Óskarsson*  
Fulltrúi verkkaupa: *Aron Bjarnason og Einar Hafliðason (Vegagerðin)*  
Skýrslunúmer: *13-773*  
Verknúmer: *2970-157*

Útgáfa :  
Dagsetning: 13. desember 2013

Staða skýrslu: *Lokið*  
Dreifing skýrslu: *Dreifing með leyfi verkkaupa*

Höfundur: *GVG/KUÓ*  
Rýnt af: *BE*  
Samþykkt: *GVG*

Lýsing: *Samantekt og helstu niðurstöður úr rannsóknarverkefninu Ástandsvöktun brúa 2012-2013*



## Efnisyfirlit

<b>1 Inngangur .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Yfirlit/markmið rannsóknarverkefnisins.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Hengibrú á Ölfusá.....</b>	<b>4</b>
3.1 Niðurstöður mælinga 2012 .....	5
3.2 Vöktun .....	8
<b>4 Bogabréi í Mjóafirði .....</b>	<b>11</b>
<b>5 Árangur rannsóknarverkefnisins .....</b>	<b>13</b>
<b>6 Birtar niðurstöður.....</b>	<b>14</b>
<b>7 Samantekt og næstu skref .....</b>	<b>15</b>
<b>8 Heimildir .....</b>	<b>16</b>
<b>9 VÍÐAUKAR.....</b>	<b>17</b>



## 1 Inngangur

Skoðun á ástandi burðarkapla brúar á Ölfusá á Selfossi sumarið 2011 leiddi í ljós að vísbendingar eru um að kaplarnir hafi skerta burðargetu vegna tæringar auk þess sem eiginþunga- og umferðarálag hefur aukist verulega frá því að brúin var tekin í notkun. Í framhaldi af skoðun burðarkaplanna var rannsóknarverkefnið Ástand kapla í hengibrúm, styrkt af rannsóknasjóði Vegagerðarinnar, unnið árið 2011. Niðurstöður þess verkefnis leiddu í ljós að alvarlegar vísbendingar eru um að kaplar í brú á Ölfusá hafi skerta burðargetu vegna tæringar og var brotöryggi kapla brúarinnar metið sem óásættanlegt.

Mælt var með að brúin yrði tekin til frekari skoðunar. Mörg atriði styðja það. Brúin er hluti af mikilvægri samgönguleið og er sú elsta og lang umferðarþyngsta af þeim 7 hengibrúm sem eru á Þjóðvegakerfinu í dag. Þá var töluverð óvissa um öryggi gagnvart broti, dreifing raunkrafta var ekki þekkt af nægilegri nákvæmni og vísbendingar voru um skert burðarþol kaplanna.

Kaplar hengibrúa eru mikilvægar burðareiningar og er líklegt að brot í þeim valdi hruni brúarinnar. Jafnframt er mjög erfitt og kostnaðarsamt að skipta þeim út auk þess sem lokun brúarmannvirkja vegna viðgerða getur valdið töluverðum töfum með tilheyrandi kostnaði fyrir notendur mannvirkjanna. Kaplarnir eru útsettir fyrir tæringu og viðkvæmir punktar eru gjarnan við hengistangir þar sem stálhlutir eru í sneringu hver við annan og því erfitt að verja gagnvart tæringu. Vegna þessa hafa kaplar gjarnan verið hannaðir með háu brotöryggi.

Rannsóknarverkefnið Ástandsvöktun brúa hefur verið unnið í samstarfi Vegagerðarinnar, EFLU verkfræðistofu, Háskóla Íslands og Tækniháskólans í Kaupmannahöfn (DTU Byg). Verkefnið er styrkt af rannsóknasjóði Vegagerðarinnar. Umsjón með verkefninu hafði Guðmundur Valur Guðmundsson hjá EFLU hf. og fulltrúi Vegagerðarinnar var Aron Bjarnason. Þátttakendur rannsóknarverkefnisins eru:

Guðmundur Valur Guðmundsson hjá EFLU hf.  
Einar Þór Ingólfsson, DTU Byg í Kaupmannahöfn (nú hjá Krabbenhof Aps)  
Jens Fogh Andersen, MSc nemandi við DTU Byg  
Guðni Páll Pálsson, MSc nemandi við DTU Byg (nú hjá EFLU hf.)  
Kristján Uni Óskarsson, verkfræðingur hjá EFLU hf.  
Baldvin Einarsson, verkfræðingur hjá EFLU hf.  
Bjarni Bessason, prófessor við Háskóla Íslands

Undirbúningur mælinga og heimildaöflun hófst í febrúar 2012. Mælingar á Ölfusárbrú og brú í Mjóafirði fóru fram í maí 2012.

Í þessari lokaskýrslu er farið yfir verkefnið í heild, hvað hefur verið unnið og hvaða árangri verkefnið hefur skilað. Þá er farið yfir aðalatriði þeirra þriggja skýrslna sem gefnar hafa verið út sem hluti af verkefninu: Brú á Ölfusá, niðurstöður mælinga (2012), Brú í Mjóafirði, mælingar 2012 (2013) og Brú á Ölfusá, áætlun um vöktun (2013).



*Mynd 1-1: Hengibrú á Ölfusá við Selfoss*



*Mynd 1-2: Bogabréi í Mjóafirði*



## 2 Yfirlit/markmið rannsóknarverkefnisins

Rannsóknarverkefninu er ætlað að bæta við þá þekkingu sem nauðsynleg er til að komast að raunverulegu brotöryggi Ölfusárbrúar ásamt því að skilgreina sérstaka vöktunaráætlun og vöktunarkerfi fyrir brúna. Slík áætlun og kerfi getur orðið fyrirmynd í framtíðinni fyrir aðrar mikilvægar brýr á vegakerfinu. Með mælingum á sveiflueiginleikum Mjóafjarðarbrúar verða til upplýsingar um sveiflufræðilega eiginleika og kraftdreifingu í burðarvirki brúarinnar sem munu nýtast á líftíma mannvirkisins.

Rannsóknaverkefnið er framhald af verkefninu Ástand kapla í hengibrúm frá 2011. Óvissa í upprunalegu mati á brotöryggi Ölfusárbrúar eru metnar með raunmælingum og samanburði við reiknilíkan. Nákvæmt reiknilíkan af brúnni gefur betri vísbendingar um kraftadreifinguna (bæði milli kapalplana sem og milli grindarbita og aðalkapla), jafnframt eru mælingar notaðar til að meta gæði líkansins og uppfæra það með tilliti til raunhegðunar brúarinnar. Mælingar eru því gerðar til þess að meta kraftadreifingu í köplum brúarinnar, meta sveifluhegðun hennar (eigintíðnir og sveifluform) sem og svörun brúarinnar undir álagi.

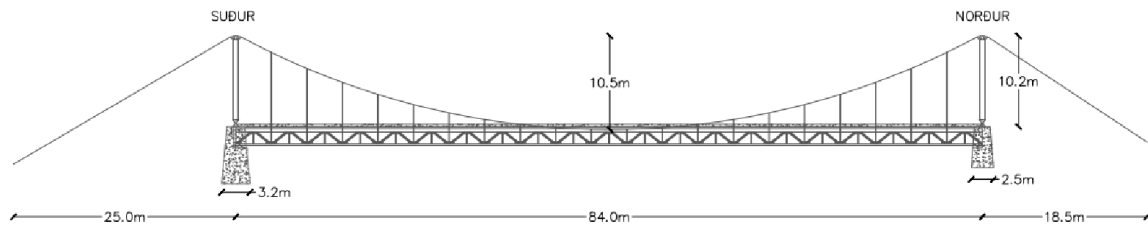
Áætlun um tíðni ástandsskoðana og umfang vöktunar á hverjum stað ætti að vera háð umferðarmagni, hlutfalli þungaumferðar, mikilvægi samgönguleiðar, hvert er öryggi gagnvart broti svo og ástandi samkvæmt fyrri skoðunum. Áhersla er jafnframt lögð á að skilgreina mikilvægar staðsetningar (veika hlekki) í mannvirkinu sem fylgjast þarf með.

Ekki er einungis mikilvægt að fylgjast vel með eldri brúm, heldur þarf líka að huga að nýjum brúm. Með því að greina hegðun og eiginleika þeirra strax á hönnunarstigi eða eftir að mannvirkið hefur verið tekið í notkun líkt og nú hefur verið gert fyrir brú í Mjóafirði, er mögulegt að fá upplýsingar um upphafsástand. Með því móti má fylgjast með ástandi og hvernig eiginleikar hennar breytast með tíma alveg frá upphafi.

Í upphafi verkefnisins voru eftirfarandi markmið sett fram:

1. Framkvæma mælingar á hegðun Ölfusárbrúar til að geta ákvarðað sveiflueiginleika, kraftdreifingu og ástand hennar, sem og til að geta byggt upp áreiðanlegt tölvulíkan af brúnni. Markmiðið er að meta brotöryggi hennar.
2. Skilgreina vöktunarkerfi fyrir Ölfusárbrú.
3. Skilgreina hvernig fylgjast skuli með nýjum brúm og hvernig og hvaða upplýsingar frá hönnunarstigi nýtast við viðhald og ástandsskoðanir á líftíma brúarinnar.
4. Gera mælingar á nýrri brú á Mjóafjörð í Ísafjarðardjúpi, til að meta sveiflueiginleika hennar sem nota má til samanburðar við hönnunarforsendur.
5. Þjálfra upp stúdenta við mælingar, gagnaúrvinnslu og líkanagerð.
6. Gefa stúdentum tækifæri til að gera meistaraverkefni sem fjalla um brýr. Það styrkir Vegagerðina til framtíðar að hafa verkfræðinga með þekkingu á slíkum mannvirkjum.
7. Búa til teymi um ástandsvöktun brúarmannvirkja og byggja upp fagþekkingu á því sviði.

### 3 Hengibrú á Ölfusá



Mynd 3-1: Ölfusárbrú, yfirlitsmynd

Upphaflegt brotöryggi kapla á Ölfusárbrúnni var fjórfalt samkvæmt hönnunarútreikningum. Lauslega var metið árið 2011 að brotöryggið væri komið niður í 1,8 vegna aukins eiginþunga- og umferðarálags. Í þessu mati er þó ekki tekið tillit til að kaplarnir hafi skert burðarþol vegna tæringar eins og vísbendingar eru um.

Niðurstöður verkefnisins Ástand kapla í hengibrúm frá 2011 voru m.a. þær að brotöryggi kapla væri orðið óásættanlegt hvort sem notuð er upphafleg reikniaðferð án álagsstuðla eða að reiknað sé samkvæmt núgildandi hönnunarstöðlum. Helstu ástæður voru meðal annars þær að ástand kaplanna gaf vísbendingar um að þversnið þeirra væri farið að skerðast, sérstaklega á stöðum þar sem erfitt hefur reynst að verja þá fyrir tæringu, s.s. við upphengi hengistanga. Dreifing krafta milli kapalplana var ekki þekkt, en sökum hliðrunar eiginþunga- og umferðarálags frá miðju brúarinnar vegna göngubrautar á eystri hlið hennar er brotöryggið enn minna en metið hafði verið.

Nefna má tvær ástæður fyrir háu brotöryggi í upphafi. Í fyrsta lagi er það mikilvægi kaplanna gagnvart öryggi brúarinnar. Í öðru lagi er gert ráð fyrir að þeir muni hrörna með tíma.

Kaplar í hengibrúm á Íslandi eru allir af svipaðri gerð. Hver kapall er byggður upp af nokkrum aðskildum strengjum af lokaðri gerð (e. locked coil strand). Hver strengur er byggður upp af mismunandi mörgum þráðum sem fer eftir stærð strengsins. Kjarninn er úr hringlaga þráðum sem eru vafðir í spirál í nokkrum lögum, ytri þræðirnir eru Z-laga sem læsast saman þegar þeir eru vafðir og mynda þannig lokað yfirborð þannig að raki eða önnur tæringarefni eigi ekki greiða leið inn að kjarnanum. Jafnframt eru strengirnir málaðir í heilu lagi eftir uppsetningu til að bæta enn frekar tæringarvörn þeirra. Allir strengir sem framleiddir eru nú eru heitgalvaniseraðir en þess ber að geta að strengir Ölfusárbrúar sem byggð var 1945 eru ekki heitgalvaniseraðir heldur aðeins málaðir.

Ekki er hægt að meta ástand strengjanna að innan með sjónskoðun og því alls óvíst hvernig ástandið er þar. Hugsanlegt brot í þráðum og/eða tæring í strengnum að innan má helst merkja ef breytingar hafa orðið á þvermáli strengsins, hann hafi gliðnað eða aflagast.

### 3.1 Niðurstöður mælinga 2012

#### Mælingar og uppfærsla reiknilíkans

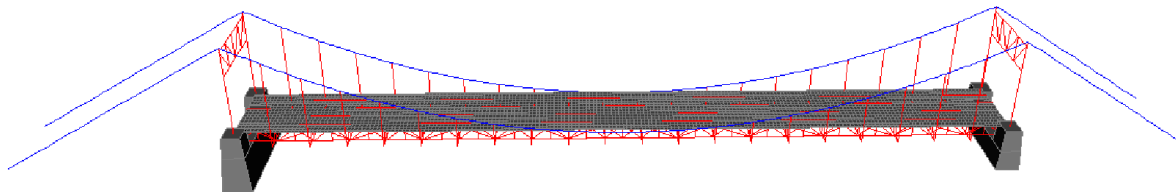
Fyrir brú á Ölfusá voru gerðar titringsmælingar á brúargólfi og titrings- og streitumælingar á köplum og hengistöngum. Þá var gert álagspróf þar sem þungu ökutæki var ekið yfir brúna á meðan mælt var Einnig var hæðarferill brúarinnar undir eiginþungaálagi mældur til samanburðar við hæðarferil í álagsprófi. Mælt var dagana 29. og 30. maí 2012.

Við titringsmælingar brúargólfs var hröðunarnemum stillt upp á átta mismunandi vegu og fyrstu eigintíðnir brúarinnar mældar. Í framhaldi var lagt mat á eiginsveifluform og þau borin saman við reiknilíkan af brúnni. Hröðunarnemar voru notaðir til að mæla eigintíðnir hengistanga og bakstaga burðarkapla. Mæligögnin voru notuð til að reikna út togkrafta í hengistöngum og bakstögum. Allir strengir bakstaga voru mældir og 4 lengstu hengistangirnar í hvoru kapalplani frá báðum brúarendum, samtals 16 stangir.

Sveiflumælingar á brúargólfi fóru fram án notálags á brúna, þar sem sérstaklega er leitast eftir því að greina eigintíðnir til kvörðunar á reiknilíkani. Mælingar á eigintíðnum hengistanga og bakstaga ásamt mælingu hæðarferils voru gerðar með og án notálags. Slíkur samanburður er mikilvægur til að leggja mat á álagsaukningu vegna umferðarálags.

Til viðbótar við þessar mælingar voru gerðar streitumælingar í hengistöngum og bakstögum til að meta álagsaukningu þegar þungu ökutæki var ekið út á brúna.

Sem hluti af meistaraverkefni við Háskóla Íslands var einingalíkan af hengibrúnni sett upp í tengslum við verkefnið. Almennur hugbúnaður til burðarþolsreikninga, Sap 2000 v.15 og CSi Bridge v. 15.1 var notaður til að líkja á sem nákvæmastan hátt eftir burðarkerfi Ölfusárbrúar til þess að geta kvarðað við niðurstöður mælinga. Í framhaldi af titringsmælingum og álagsprófi á Ölfusárbrú var líkanið uppfært og kvarðað við mældar eigintíðnir.



Mynd 3-2: Reiknilíkan af Ölfusárbrú

Tafla 3-1: Eigintíðnir brúar: Samanburður mælinga, upphaflegs líkans og uppfærðs líkans

Nr.	Form	Mælingar	FEM		Uppfært FEM	
		f [1/s]	f [1/s]	Mism.	f [1/s]	Mism.
1	1. lóðrétt	1,08	0,88	23%	1,09	1%
2	1. lárétt	1,61	1,42	14%	1,42	13%
3	2. lóðrétt	1,71	1,48	16%	1,70	1%
4	1. vinda	2,07	2,11	2%	2,17	4%
				13%		5%

Með því að breyta völdum stikum í reiknilíkani lækkaði hlutfallslegur munur mældra og reiknaðra eigintíðna fyrstu fjögurra sveifluformanna úr 13% í 5% í uppfærðu líkani. Við kvörðun líkansins

voru stífni og massi burðarvirkis, túlkun undirstöðuskilyrða og mismunandi þverskurðarflatarmál kapla sérstaklega skoðuð með tilliti til áhrifa á eigintíðnir brúarinnar. Við nánari greiningu reiknilíkans reyndust breytingar á stífni undirstöðuskilyrða, þyngd steypa brúargólfsins og stífni langbita milli brúargólfs og stálgrindar hafa mest áhrif á hreyfi- og stöðufræðilega svörun mannvirkisins. Ekki hefur verið tekið tillit til álagssögunnar í reiknilíkani, þ.e. breytinga á eiginþunga og áhrif þeirra á kapallegu og fjaðurstuðul kapla.

### Togkraftar í bakstögum

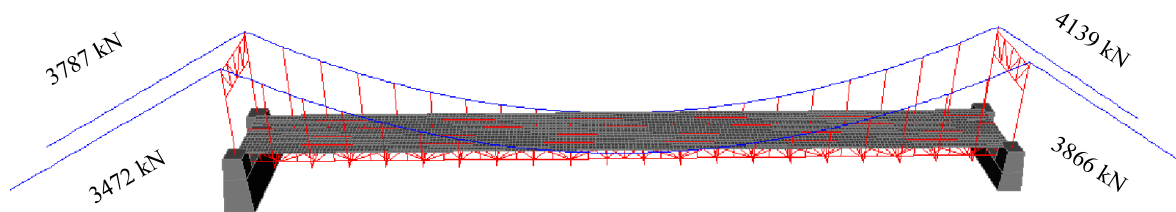
Stærstu togkraftarnir í köplum brúarinnar eru í bakstögum þar sem lóðréttur þáttur kapalkraftsins er stærstur. Sérstök áhersla er því lögð á að meta togkrafta í bakstögum á sem nákvæmasta hátt til að meta brotöryggi burðarkaplanna.

Kraftar í bakstögum eru metnir með beinum reikningum út frá mældum eigintíðnum og virkri lengd og massa strengjanna annars vegar og hins vegar með uppsetningu einingalíkans af bakstögum. Beinir útreikningar eru næmir fyrir breytingu á virkri lengd strengja og er einingalíkaníð talið gefa áreiðanlegri niðurstöður. Tafla 3-2 sýnir krafta í bakstögum, annars vegar reiknaða beint út frá mældum tíðnum fyrir liðtengd og innspennt jaðarskilyrði og hinsvegar reiknaða út frá sambandi forspennukrafts og tíðni þar sem notast var við einingalíkan af bakstögum.

Hámarks togkraftur, ofanstraums í bakstagi sunnan megin, er hér 4139 kN sem er um 5% hærri en 3960 kN sem fæst þegar reiknað er með hefðbundnum formúlum fyrir streng.

Tafla 3-2: Kraftar bakstaga, eiginálag

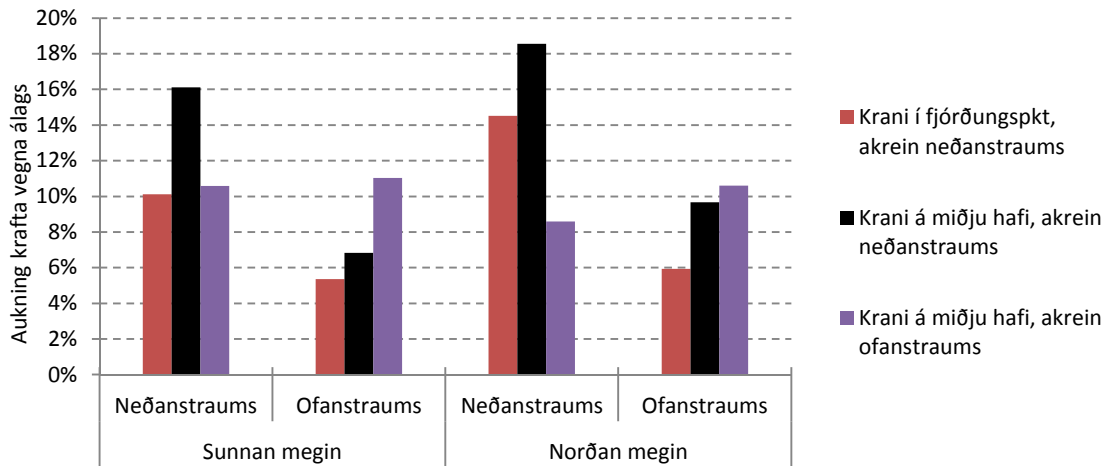
	Kapalkraftur mv. mælda tíðni og útreikninga [kN]		Kapalkraftur mv. mælda tíðni og FE líkan af bakstögum [kN]
	Liðtenging	Innspenna	Liðtenging / innspenna
NEDANSTRAUMS			
Sunnan	3723	3500	3866
Norðan	3621	3517	3472
OFANSTRAUMS			
Sunnan	3960	3729	4139
Norðan	3915	3806	3787



Mynd 3-3: Hámarks togkraftar í bakstögum undir eiginálagi

### Aukning krafta í bakstöðum við álag frá kranabíl

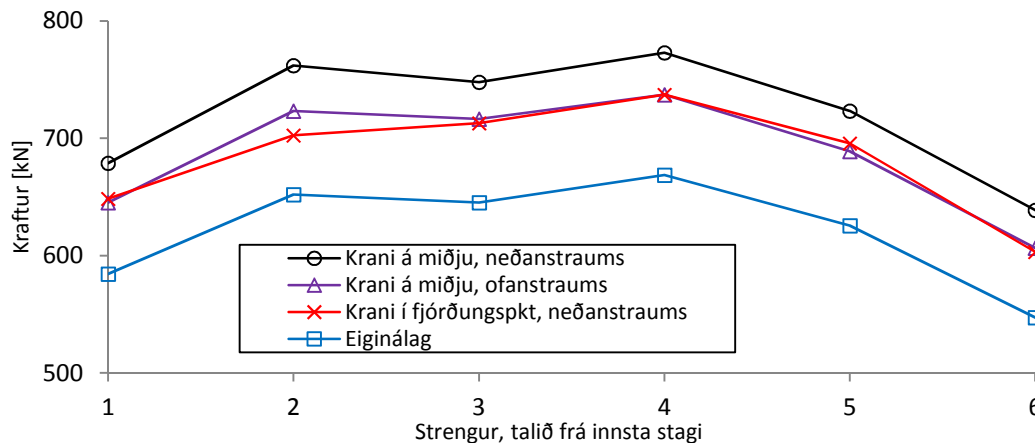
Hlutfallslega aukningu krafta í bakstöðum (miðað við brú undir eiginálagi) þegar kranabíl er stillt upp á þrenna vegu má sjá á Mynd 3-4. Aukningin er aðeins sýnd myndrænt fyrir liðtengd endaskilyrði þar sem kraftaukning verður sambærileg fyrir innspennt skilyrði.



Mynd 3-4: Hlutfallsleg aukning krafta í bakstöðum með tilkomu kranabíls (liðtengd endaskilyrði)

### Dreifing krafta í strengjum bakstaga

Mynd 3-5 sýnir dreifingu togkrafta í þeim sex strengjum sem mynda bakstöð Ölfusárbrúar sunnan megin brúarinnar, í kapalplani neðanstraums. Uppgefin gildi eru reiknuð út frá mældum eigintíðnum og gefa krafta við eiginálag og við álagsaukningu vegna kranabíls sem stillt er upp á þrjá vegu. Reiknaður kraftur fyrir álag frá krana inniheldur jafnframt eiginálag, þ.e. kranaálag + eiginálag.



Mynd 3-5: Kraftar í strengjum bakstaga - kapalplan neðanstraums, sunnan (liðtengd endaskilyrði) fyrir mismunandi álagstilfelli, álagstilfelli með krana innifelur eiginálag.

Á Mynd 3-5 má sjá að álagi milli strengja bakstaganna er misdreift og má greina mest rúmlega 20% mun á krafti milli strengja. Dreifingin er mjög svipuð í kapalplani ofanstraums.

Í skýrslu um niðurstöður mælinga á brú á Ölfusá (2013) er á nákvæmari hátt gerð grein fyrir mælingunum, kraftdreifingu í köplum og hengistöngum ásamt mati á brotöryggi.

## 3.2 Vöktun

Við mat á nauðsyn vöktunar Ölfusárbrúar er horft til þeirra þátta sem taldir eru gefa hvað besta mynd af ástandi brúarinnar með tilliti til brotöryggis mikilvægra burðareininga, þá sérstaklega burðarkapla brúarinnar. Gerður er greinarmunur milli stöðugar vöktunar með sjálfvirkum mælitækjum þar sem hægt er að fylgjast með brúnni í rauntíma annars vegar og hins vegar vöktunar í formi reglulegra mælinga og skoðana, t.d. árlega eða á tveggja ára fresti. Ástandsskoðun valdra burðareininga í formi sjónskoðunar er óháð þessum mælingum.

- Valkostur A: Sjálfvirkar stöðugar mælingar + sjónskoðun á 1-2 ára fresti
- Valkostur B: Reglulegar tímabundnar mælingar + sjónskoðun á 1-2 ára fresti

Meginmarkmið vöktunarinnar er að geta greint breytingar á burðarvirki brúarinnar og þar með öryggi brúarinnar. Vöktunin þarf að geta greint breytingar vegna umferðar- og náttúruálags, s.s. vinds. Einnig þarf vöktunin að geta gefið upplýsingar um ástand brúarinnar eftir stærri atburði, s.s. stóra jarðskjálfta þar sem hún gegnir mikilvægu hlutverki í viðbúnaði Almannavarna.

Mikil þróun hefur verið á búnaði til vöktunar burðarkerfa síðustu ár og mun verða áfram þar sem sífellt er meiri þörf fyrir vöktun eldri mannvirkja. Dæmi um þróun er mælibúnaður með þráðlausum tengingum sem einfaldar uppsetningu.

Með þekkingu á ástandi og hegðun brúa má stýra viðhaldi þeirra og endurnýjun á sem hagkvæmastan hátt. Jafnframt er hægt að kortleggja uppsafnaða þörf fyrir viðhald sem styður við ákvarðanatöku um útteilingu fjármagns til viðhalds.

Mikilvægt er að gögn úr sjálfvirkri vöktun séu áreiðanleg og á aðgengilegu formi þannig að notendur í vaktstöð geti á einfaldan hátt séð hvort um einhverjar breytingar sé að ræða. Hægt verði að greina sérstaklega niðurstöður stærri atburða, s.s. jarðskjálfta og umferð ólöglegra ökutækja, og að hægt verði að svara því hvort brúin sé örugg eða ekki eftir jarðskjálfta.

Með sjálfvirkum eða reglulegum mælingum er hægt að þekkja hegðun brúarinnar nokkuð nákvæmlega og því er hægt að meta brotöryggi hennar með meiri nákvæmni en ella.



Mynd 8: Brotinn þráður í einum strengja Ölfusárbrúar

### Sjálfvirkar mælingar

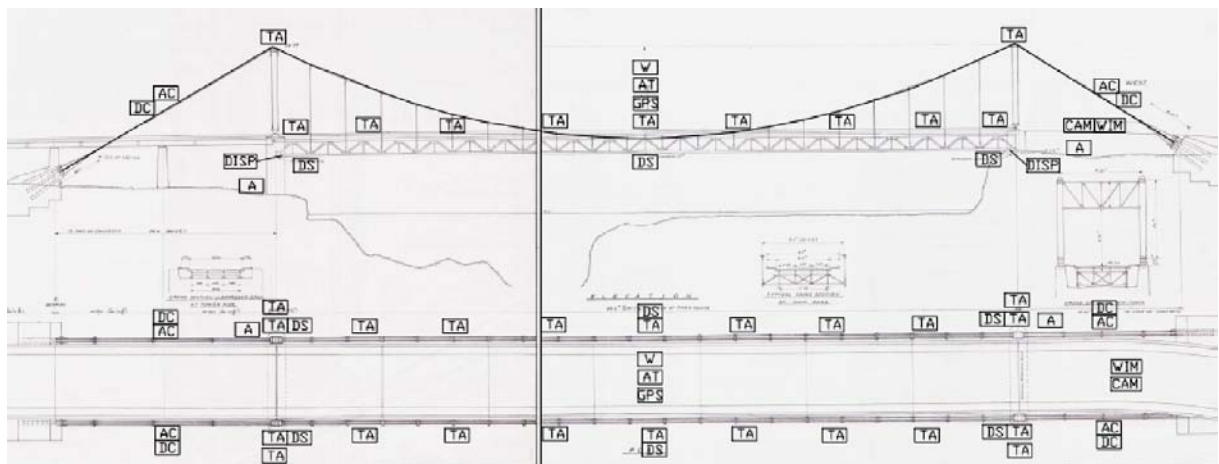
Með uppsetningu sjálfvirks vöktunarkerfis fyrir Ölfusárbrú má fylgjast með hegðun burðarvirkisins í rauntíma og fá upplýsingar varðandi frávik frá núverandi ástandi.

Sjálfvirk vöktun hefur það að markmiði að gefa upplýsingar um:

- Áætlaða krafta í bakstögum brúarinnar
- Lóðréttar færslur brúargólfs
- Sveifluform brúargólfsins
- Áraun af völdum umferðar (umferðargreinar)
- Áraun af völdum jarðskjálfta (jarðskjálftanemar)

Tafla 3-3: Yfirlit yfir algeng mælitæki til vöktunar ásamt uppstillingu fyrir Ölfusárbrú

		Algeng mælitæki			Sjálfvirkt vöktunarkerfi fyrir Ölfusárbrú		
		Fjöldi	Rásir per nema	Fjöldi rása	Fjöldi	Rásir per nema	Fjöldi rása
Hröðunarnemar á kapla	AC	4	3	12	4	1	4
Hröðunarnemi + halli á gólf	TA	18	5	90	14	5	70
Streitunemar á kapla	DC	4	1	4	0	1	0
Streitunemar á fótbita	DS	3	1	3	3	1	3
Færslur við legur	DISP	4	2	8	2	2	4
Umferðargreinir	WIM	1	1	1	0	1	0
GPS	GPS	1	1	1	0	1	0
Vindhraði og stefna	W	1	1	1	0	1	0
Hitastig	AT	1	1	1	0	1	0
Myndavél	CAM	2	1	2	1	1	1
Hröðunarnemar á jörðu	A	2	3	6	2	3	6
<b>Samtals</b>		<b>41</b>		<b>129</b>	<b>26</b>		<b>88</b>



Mynd 3-7: Algeng mælitæki til ástandsvöktunar hengibrúa, sýnd í hæðarprófil og plani Ölfusárbrúar

## Reglulegar mælingar

Með reglulegum mælingum má fylgjast með breytingum á burðarvirki brúarinnar með vissu millibili. Fylgst er með sömu atriðum og með sjálfvirku mælakerfi, þ.e. kröftum í bakstögum og hengistöngum, breytingum á hæðarferli brúarinnar og eigintíðnum brúargólfs.

Í töflu 3-2 má sjá yfirlit um þær reglulegu mælingar sem mælt er með, ásamt áætlun um tíðni mælinga, lengd tíma sem fer í mælingar og hvort sé þörf á lokun brúarinnar. Tíðni mælinganna er svo hægt að endurmeta eftir 2-3 ár ef niðurstöður mælinganna eru stöðugar og reynsla er komin á þær.

Tafla 3-4: Vöktun í formi reglulegra mælinga, tíðni gefin sem fjöldi ára milli skoðana, skoðunartími í klst.

MÆLINGAR	Tíðni	Skoðunartími	Lokun
Mæling á eigintíðnum bakstaga kapals	1-2 ár	1-2 klst	Nei
Mæling á eigintíðnum hengistanga	1-2 ár	2-4 klst	1 akrein
Hæðarmæling á föstum punktum	1 ár	1-2 klst	Nei
Mæling á eigintíðnum brúargólfs	1-4 ár	4-6 klst	2 akreinar

## Ástandsskoðun/sjónskoðun

Reiknað er með að regluleg ástandsskoðun fari fram á sambærilegan hátt og áður eftir verklagi Vegagerðarinnar. Tafla 4-1 sýnir þau atriði sem mikilvægast er að fylgjast með í ástandsskoðun.

Metið skal með reglulegu millibili tíðni sjónskoðana og hvort ástæða sé til að lengja tíma milli skoðana.

Tafla 3-5: Ástandsskoðun í formi sjónskoðunar, tíðni gefin sem fjöldi ára milli skoðana, skoðunartími í klst.

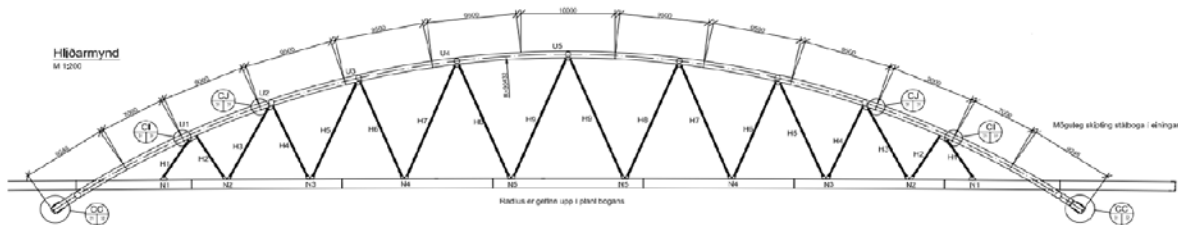
	Tíðni (ár)	Skoðunartími (klst)	Lokun	Notkun kláfferju	Notkun körfubíls
Burðarkaplar	1	4-6	1 akrein	Já	Já
Akkeri	1	1-2	Nei	Nei	Nei
Hengistangir og tengingar	1	2-4	1 akrein	Já	Já
Turnsöðlar	1-2	1-2	1 akrein	Nei	Já
Legur í suðurenda	1-2	1-2	Nei	Nei	Nei
Fótbitar/stálgrind	1-2	4-5	Nei	Já	Nei
Þensluraufar	1-2	1-2	Já	Já	Nei

Í skýrslu um vöktunaráætlun fyrir brú á Ölfusá (2013) er fjallað nánar um vöktunaráætlun og fýsileg mælitæki fyrir brúna ásamt því að lagt er mat á kostnað við mælingar.



## 4 Bogabré í Mjóafirði

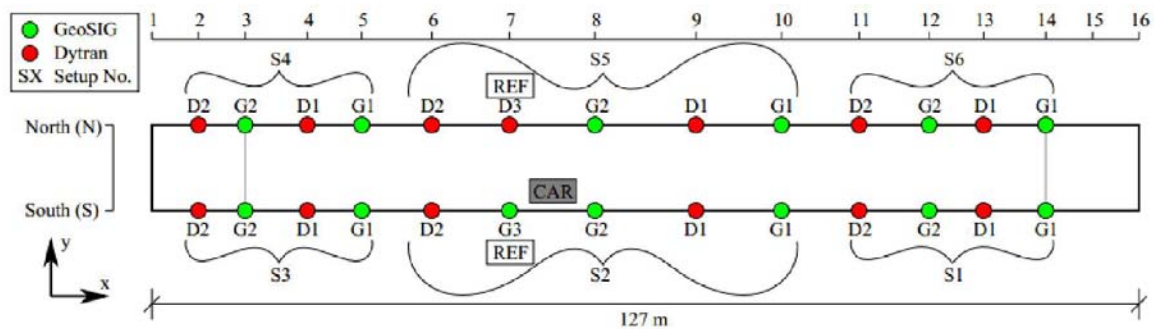
Brú á Mjóafjörð var opnuð fyrir umferð árið 2009 og er stálbogabré með upphengdu brúargólfi. Áhugavert er að fylgja eftir upplýsingum frá hönnunarstigi og staðfesta hegðun brúarinnar og eiginleika með mælingum. Þannig má tryggja að ástandsskoðanir til framtíðar nýtist sem best við viðhald á líftíma brúarinnar.



Mynd 4-1: Mjóafjarðarbrú

Fyrir brú á Mjóafjörð er um nokkuð umfangsminni mælingar að ræða heldur en þær mælingar sem voru gerðar á Ölfusárbrú. Álag í hengistöngum var metið með titringsmælingum, ásamt því að eiginveifluform brúarinnar voru metin. Mælingar fóru fram dagana 24.-25.mái 2012.

Mynd 4-2 sýnir uppstillingu hröðunarnema á brúargólfinu. Mæligögnin voru í framhaldinu notuð til þess að greina eiginveifluform gólfsins.



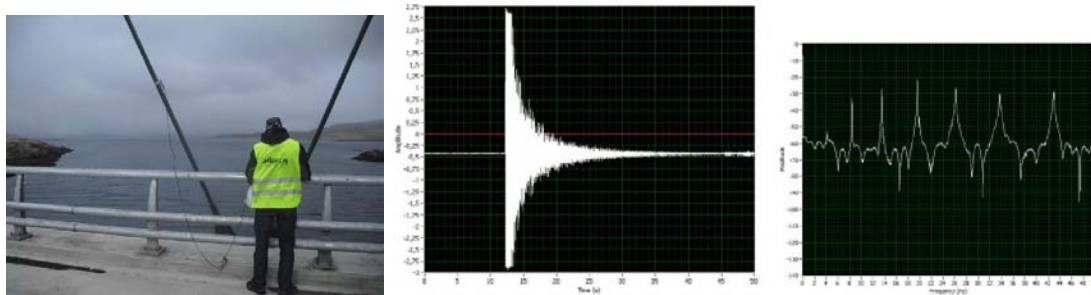
Mynd 4-2: Sveiflumælingar, uppröðun hröðunarnema, alls 6 uppstillingar (Jens Fogh Andersen, 2012).

Taflan að neðan gefur yfirlit yfir tíðnir og dempunarhlutfall fyrstu 7 sveifluforma brúargólfsins samkvæmt SSI-PC greiningu.

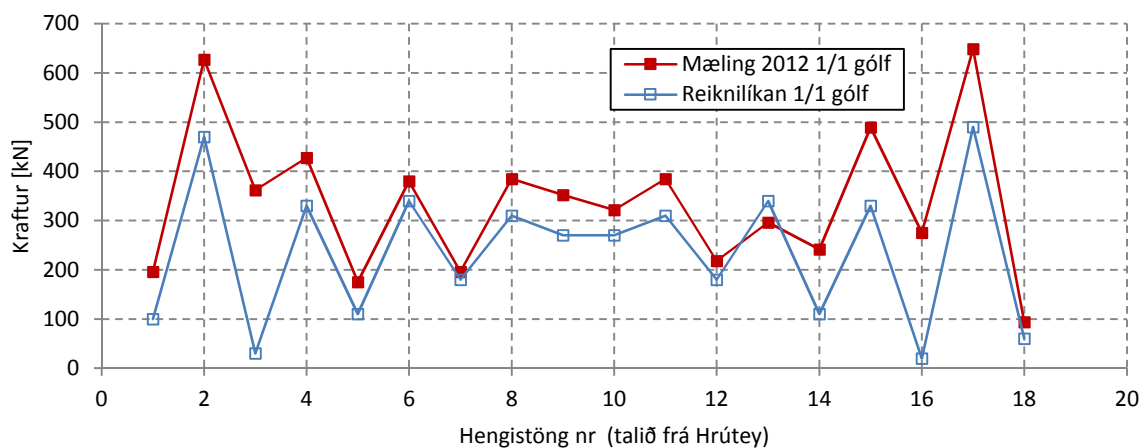
Mode	$\omega$ [Hz]	$\sigma_{freq}$ [Hz]	$\zeta$ [%]	$\sigma_{damp}$ [%]	Type
SSI-PC 1	1.772	0.021	1.515	0.493	1st Horizontal
SSI-PC 2	1.961	0.003	0.380	0.263	1st Vertical
SSI-PC 3	2.034	0.005	0.262	0.151	2nd Vertical
SSI-PC 4	2.283	0.054	1.291	0.486	1st Torsional
SSI-PC 5	3.160	0.033	0.682	0.343	1st Torsional
SSI-PC 6	3.305	0.019	1.577	1.471	2nd Torsional
SSI-PC 7	3.674	0.016	0.691	0.279	2nd Torsional

Mynd 3: Tíðnir fyrstu 7 sveifluforma brúargólfs

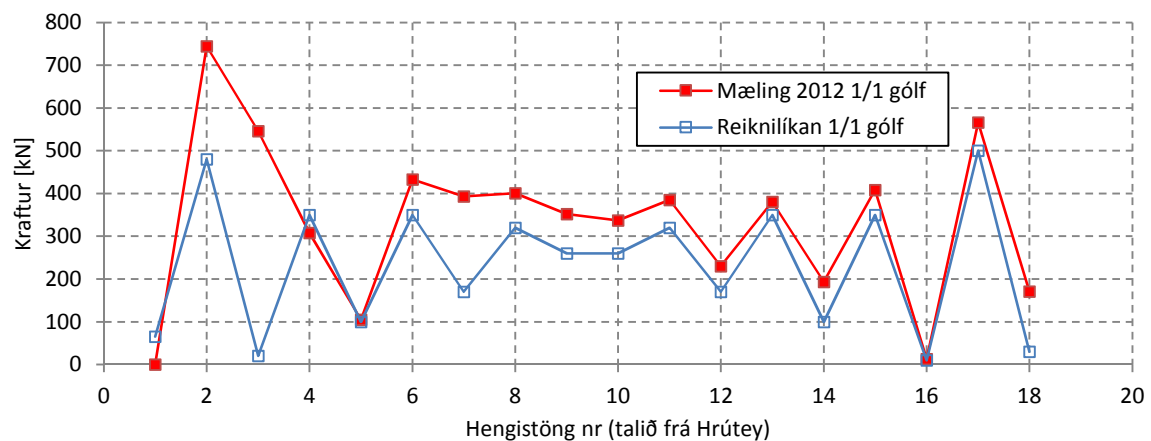
Eigintíðnir hengistanga voru mældar með hröðunarnema með það sem markmið að nota mældar eigintíðnir til að reikna út togkrafta í stöngum. Við mælingar var hengistöngum komið á hreyfingu með handafla áður en mæld var frísveifla í um 20 sekúndur. Kraftar úr reiknilíkani sem var notað við hönnun Mjóafjarðarbrúar voru bornir saman við útreiknaða krafta frá titringsmælingum.



Mynd 4-4: Mæling krafta í hengistöngum með titringsmælingum / Tímaröð



Mynd 4-5: Kraftar í hengistöngum, fullbyggt mannvirki – bogaplan norðanmegin brúar



Mynd 4-6: Kraftar í hengistöngum, fullbyggt mannvirki – bogaplan sunnanmegin brúar

Myndirnar að ofan sýna að mælingar og útreikningar fylgjast almennt vel að. Mismunur milli reiknilíkans og krafta sem reiknaðir eru út frá titringsmælingum getur meðal annars orsakast af skekkjum í mati á massa og stífni hengistanga og óvissu við aflestur svörunarrófs titringsmælinga. Þá voru kraftmælingar frá byggingarstigi brúarinnar bornar saman við reiknilíkani fyrir samsvarandi byggingarstig, sjá nánar í skýrslu um mælingar á brú í Mjóafirði (2013).

## 5 Árangur rannsóknarverkefnisins

Þegar litið er yfir rannsóknarverkefnið í heild má líta svo á að vel hafi gengið að ná þeim markmiðum sem sett voru fram í upphafi og koma fram í kafla 2.

Kvörðun reiknilíkans við niðurstöður mælinga hefur gert það kleift að meta brotöryggi brúar á Ölfusá mun betur en áður. Betra mat á svörun brúarinnar við umferðarálagi og dreifingu krafta í burðarköplum og hengistöngum hefur dregið úr óvissu frá fyrri athugunum.

Með aukinni þekkingu á öryggi og hegðun Ölfusárbrúar hefur myndast áreiðanlegri grundvöllur til að meta þörf á- og skilgreina vöktunaráætlun fyrir brúna. Með vöktun brúarinnar verður mögulegt að fylgjast með þróun á ástandi hennar, ýmist í rauntíma eða með reglulegu millibili eftir því hvaða leið verður valin til vöktunar. Á þann hátt er hægt að stýra umferð um brúna og þannig lengja líftíma hennar og auka öryggi vegfarenda.

Með því að mæla sveiflueiginleika nýrra brúa, líkt og gert hefur verið við brú í Mjóafirði, fást mikilvæg gögn til samanburðar við mælingar á seinni stigum sem geta hjálpað til við skipulagningu viðhalds og mat á öryggi. Reynsla frá mælingum á Mjóafirði er gagnleg við slíka eftirfylgni og fróðlegt verður að sjá hvernig sveiflueiginleikar brúarinnar þróast með tíma.

Annar ávinningur af verkefninu er þjálfun stúdenta við mælingar, gagnaúrvinnslu og líkanagerð. Unnin hafa verið 3 verkefni tengd brúarhönnun og greiningu á ástandi og hegðun brúa sem meistaraverkefni við Háskóla Íslands og DTU í Kaupmannahöfn. Jafnframt er að myndast gagnasafn sem getur nýst fleiri stúdentum síðar.

Þá hefur fagleg þekking aukist hjá þátttakendum verkefnisins. Má þar nefna greiningu á sveiflufræðilegum eiginleikum sem þátt í öryggismati burðarvirkja og aðferðir til ástandsvöktunar.

## 6 Birtar niðurstöður

Nú þegar hafa verið birtar 3 greinargerðir með mælingum og 3 meistaraverkefni sem hluti af rannsóknarverkefninu ásamt því að vinna við fjórða meistaraverkefnið er hafin við Háskóla Íslands. Þar er meðal annars áætlað að nýta mæligögn til að framkvæma eiginsveiflugreiningu á Ölfusárbrú.

### Skýrslur:

- Brú á Ölfusá við Selfoss, mælingar 2012 (2012)
- Bogabrá í Mjóafirði, mælingar 2012 (2013)
- Brú á Ölfusá við Selfoss, áætlun um vöktun (2013)

### Meistaraverkefni:

Jens Fogh Andersen, 2012:

Output-Only Modal Identification of Bridges

Leiðbeinendur: Einar Thór Ingólfsson og Christos Georgakis

Guðni Páll Pálsson, 2012:

Finite Element Modelling and Updating of Medium Span Road Bridges: Case study of Ölfusá bridge in Iceland.

Leiðbeinendur: Einar Thór Ingólfsson og Christos Georgakis

Kristján Uni Óskarsson, 2012:

Structural health modeling of the Ölfusá Suspension Bridge. Damage detection and monitoring aspects

Leiðbeinendur: Bjarni Bessason og Baldvin Einarsson

Útdrátt úr verkefnum þremur má finna í viðauka A.

## 7 Samantekt og næstu skref

Í skýrslu um niðurstöður mælinga á Ölfusárbrú 2012 kom fram að með því að beita nógildandi hönnunarstöðlum fyrir nýjar brýr er brotöryggi burðarkapla brúarinnar metið í lagi að því gefnu að brotstyrkur þeirra sé óskertur frá upphafi. Vísbendingar eru um að svo sé ekki eins og kom fram í ástandsskoðun 2011. Brotöryggi hengistanga er metið á mörkum þess að vera ásættanlegt, eftir því hvaða staðall er notaður til viðmiðunar. Aðrir hlutar burðarvirkisins, þ.e. stálgrind og turnar hafa ekki verið metnir með sambærilegum hætti í þessari athugun.

Í skýrslu um vöktunarkerfi fyrir Ölfusárbrú eru fyrri rannsóknir á hegðun og ástandi burðarvirkis brúarinnar nýttar til þess að meta þörf á- og skilgreina fýsilegar leiðir til að vakta brúna. Niðurstöður fyrri athugana benda til líklegrar tæringar í burðarköplum sem eykur óvissu við mat á brotöryggi og þykir gefa tilefni til vöktunar brúarinnar. Í skýrslunni eru settir fram tveir valkostir við vöktun Ölfusárbrúar og þeir bornir saman með tilliti til bæði öryggis- og hagkvæmnisjónarmiða. Vöktun í formi sjálfvirks vöktunarkerfis sem gefur upplýsingar um hegðun brúarinnar í rauntíma annars vegar og hins vegar vöktun í formi reglulegra mælinga sem framkvæmdar eru með ákveðnu millibili. Er það metið svo að æskilegt sé að ráðast í uppsetningu vöktunarkerfis og er lausn sem þykir hentug sem grunnkerfi skilgreind í skýrslunni.

Í skýrslu um mælingar á bogabréi í Mjóafirði er gerð grein fyrir mældum eigintíðnum brúarinnar og útreiknuðum sveifluformum ásamt mælingum á eigintíðnum hengistanga. Bæði sveifluformin og kraftar í hengistöngum, reiknaðir út frá eigintíðnum, munu nýtast á líftíma mannvirkisins sem samanburðargögn þegar meta þarf ástand og þörf á viðhaldi. Samanburður krafta í hengistöngum við reiknilíkön sýnir fylgni í dreifingu á báðum bogaplönnum brúarinnar sem styrkir hönnunarforsendur.

Með útgáfu þessarar lokaskýrslu fyrir verkefnið ástandsvöktun brúa eru dregin saman helstu atriði úr þeim skýrslum og meistaraverkefnum sem unnin hafa verið.

Næstu skref varðandi áframhaldandi eftirfylgni eru að framkvæma ítarlegri ástandsskoðun á köplum Ölfusárbrúar undir upphengjum hengistanga og í söðlum til að hægt sé að meta á raunhæfari hátt hver skerðing strengjanna er vegna tæringar. Búið er að leggja drög að slíkri athugun. Þá gefur skýrsla um vöktunarkerfi fyrir Ölfusárbrú grunn til ákvörðunartöku varðandi vöktun á brúnni. Fyrir brú í Mjóafirði er mælt til þess að sveiflumælingar á brúargólfi og hengistöngum verði endurteknað með reglulegu millibili sem hluti af viðhalds- og vöktunaráætlun Vegagerðarinnar.

## 8 Heimildir

Andersen, J. F. (2012). *Output-Only Modal Identification of Bridge*. Copenhagen.

Guðmundur Valur Guðmundsson. (2011). *Brú á Ölfusá - Mat á ástandi kapla*. Reykjavík: EFLA.

Guðmundur Valur Guðmundsson, & Kristján Uni Óskarsson. (2012). *Brú á Ölfusá, niðurstöður mælinga 2012*. Reykjavík: EFLA.

Guðmundur Valur Guðmundsson, & Kristján Uni Óskarsson. (2013). *Bogabréi í Mjóafirði, mælingar 2012*. Reykjavík: EFLA.

Guðmundur Valur Guðmundsson, & Kristján Uni Óskarsson. (2013). *Brú á Ölfusá, áætlun um vöktun*. Reykjavík: EFLA.

Guðni Páll Pálsson. (2012). *Finite Element Modeling and Updating of Medium Span Road Bridges*. Copenhagen.

Kristján Uni Óskarsson. (2012). *Structural health modeling of the Ölfusá Suspension Bridge*. Reykjavík: Háskólaprent.

## 9 VIÐAUKAR

---

## **Viðauki A: Meistaraverkefni**



---

**Jens Fogh Andersen, 2012:**

**Output-Only Modal Identification of Bridges**

**Abstract**

Ambient measurements of accelerations have been made on two bridges in Iceland, Ölfusá and Mjóifjörður. Based on these accelerations, estimation of the natural frequencies  $f_i$ , damping ratios  $\zeta_i$  and mode shapes  $\varphi_i$  of the most significant modes are made using the commercial program ARTEMIS. The frequency domain based method Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) and the time domain based Stochastic Subspace Identification (SSI) are used, giving the possibility of comparison. Furthermore, a MATLAB script is created to estimate the same dynamic components using the EFDD approach. The MATLAB script is first verified, and then compared with ARTEMIS using synthetically created data. Afterwards, data from Ölfusá is put into the MATLAB script, and the results are compared to the EFDD results from ARTEMIS.

---

**Guðni Páll Pálsson, 2012:**

**Finite Element Modelling and Updating of Medium Span Road Bridges: Case study of Ölfusá bridge in Iceland.**

**Abstract**

This thesis focuses on Finite Element (FE) modelling and updating of the Ölfusá suspension bridge in Iceland. This project is part of an ongoing research project undertaken by the Icelandic Road Administration (Vegagerðin) concerning the condition of Ölfusá bridge. The bridge is almost 70 years old and the main cables are not galvanised and showing signs of deterioration. In 1992 the bridge deck was renovated, the new deck is around 50% heavier than the old one and has an unsymmetrical cross section unlike the old one. This lead to increased loading and a change in the distribution of forces in the main cables. To add to all this, the traffic loading has also increased dramatically over the last 70 years. The objective is therefore to determine the current condition of the bridge by updating a FE model. Measurements were performed on the bridge where the modal properties, cable- and hanger forces and deflections were measured. The measurements are presented in chapter 5. The measured modal properties were used to update the FE model and the deflections and forces were compared with the corresponding values from the FE model. The average frequency error between the initial FE model and the measured frequencies was 12% and the modes were not in the correct order. Using manual updating this difference was reduced down to 4,2% and the order of the modes corrected. The FE model was then subjected to automatic updating which lead to an average frequency error of 3%. In the original design the safety factor of the cables was calculated by taking the characteristic strength divided by the characteristic axial force. The safety factor calculated in this way should be around 4. In the design documents the safety factor is determined as 3,93. The safety factor of the main cables for the current state of the bridge calculated using simple hand calculation is 2,49. Using non-linear static analysis of the FE model the safety factor is determined as 2,60. The safety factor is also calculated using the updated FE model which lead to a value of 2,46. These values of the cable safety factor are much to low, but with careful maintenance and monitoring of the bridge, it could still serve as the important link it is for the next couple of decades.

---

**Kristján Uni Óskarsson, 2012:****Structural health modeling of the Ölfusá Suspension Bridge. Damage detection and monitoring aspects****Útdráttur**

Verkefnið er liður í áframhaldandi rannsóknum sem ætlað er að meta ástand hengibrúarinnar á Ölfusá þar sem hnignun og aukinn eiginþungi sökum byggingar nýs og þyngra brúargólfs árið 1992 hafa leitt til óvissu um burðargetu kapla. Annars vegar er áhersla lögð á að meta áhrif þyngdaraukningarinnar með uppsetningu tveggja tölvulíkana sem lýsa brúnni fyrir og eftir breytingarnar. Seinna líkanið verður einnig kvarðað við niðurstöður fyrirhugaðra mælinga á eigintíðnum brúarinnar til þess að auka nákvæmni þess við lýsingu á svörun mannvirkisins. Hins vegar er yfirliti yfir þekktar ástandsmats- og vöktunaraðferðir á hengibrúm stillt upp, þeim lýst og fjallað um kosti þeirra og galla með það að markmiði að öðlast yfirsýn og leggja mat á hvaða aðferðir gætu hentað hér á landi. Helstu greiningarniðurstöður benda til 49% aukningar á eiginþunga aðalhafs brúarinnar síðan fyrir uppsetningu nýs brúargólfs sem hefur framkallað 37% aukningu á hámarks kapalkröftum og lækku brotöryggis kaplanna. Vegna óvissu á burðarþoli kaplanna sökum tæringar og aldurshnignunar er erfitt að leggja nákvæmt mat á brotöryggið og þykir því nauðsynlegt að kanna ástand þeirra nánar. Ekki er talið tímabært sem stendur að ráðast í uppsetningu vöktunarkerfis, en frekari úrræði verða nauðsynleg komi í ljós að veruleg skerðing hafi orðið á þverskurðarflatarmáli og þar af leiðandi burðarþoli kaplanna.