



Mat á sveiflum í göngubrúm

Leiðbeiningar og hönnunarviðmið

Efnisyfirlit

Efnisyfirlit	i
Tákn.....	ii
1 Inngangur	1
2 Markmið.....	2
3 Flokkun göngubrúar.....	3
4 Hönnunarviðmið	4
5 Álagslíkön.....	6
6 Lokaorð.....	16
7 Heimildir.....	17
Viðauki A: Einföld aðferð til að reikna svörun göngubrúa	1
Viðauki B: Svörun göngubrúa við álagi frá stærri hópum af gangandi vegfarendum	1
Viðauki C: Dæmi um notkun.....	1

TÁKN

Tákn	Skýring	Eining
α_j	= álagsstuðull (DLF) fyrir sveiflutímahlutfall (load harmonic) j	[m/s ²]
$\beta_L, \beta_\zeta, \beta_\Phi, \beta_M,$ $\beta_i, \beta_R, \beta_f,$	= margföldunarstuðlar úr viðauka B	[-]
β_n	= hlutfall göngutíðninnar og tíðni sveifluforms n	[-]
$\delta(x)$	= Dirac's delta fall	[-]
η_L, η_ζ	= margföldunarstuðlar úr viðauka B	[-]
λ	= meðalstreymi fólks	[pers/s]
$\Phi(x)$	= sveifluform	[-]
φ_j, θ_j	= fasahorn fyrir sveiflutímahlutfall j	[rad]
μ_f	= meðalgöngutíðni, meðalhlaupatíðni	[Hz]
$\psi_{j,n}$	= minnkunarstuðull fyrir sveiflutímahlutfall j og sveifluform n	[-]
ζ	= deyfing brúarinnar sem hlutfall af krítísku deyfingarhlutfalli	[-]
A, B, C, D, E	= Stuðlar fyrir álagstilfelli úr viðauka B	[-]
$a(t)$	= hröðun sem fall af tíma	[m/s ²]
a_0	= viðmiðunar RMS hröðunar	[m/s ²]
$a_{b,RMS}$	= grunnildi fyrir RMS hröðun	[m/s ²]
$a_{leyfileg}$	= leyfileg RMS hröðun	[m/s ²]
a_{max}	= mesta (peak) hröðun	[m/s ²]
a_{RMS}	= RMS hröðun	[m/s ²]
\hat{a}_n	= grunnhröðun sveifluforms n	[m/s ²]
$\hat{a}_{RMS,n}$	= grunn RMS hröðun sveifluforms n	[m/s ²]
f, f_0, f_n	= eigintíðni (sveifluforms n)	[Hz]
f_L	= eigintíðni fyrir lárétt sveifluform	[Hz]
$f_{m,hlaup}$	= hlaupatíðni fyrir hlaup á venjulegum hraða	[Hz]
f_p	= göngutíðni, hlaupatíðni	[Hz]
$f_{p,0.05}$	= neðri 5% vikmörk fyrir göngutíðnir	[Hz]
$f_{p,0.95}$	= efri 5% vikmörk fyrir göngutíðnir	[Hz]
$F(t), F_v(x,t)$	= álag sem fall af tíma	[N]
F_s	= jafngilt statískt álag	[N]
F_p, G_p	= þyngd vegfarandans	[N]
$H_{j,n}$	= tíðni-svörunar fallið (FRF) fyrir sveiflutímahlutfall j og sveifluform n	[-]
K_1, K_2, K_3	= margföldunarstuðull sem tekur tillit til samhæfingar fólks fyrir sveiflutímahlutfall 1, 2 og 3	[-]
k_1, k_2, k_3	= margföldunarstuðull á viðmiðunar RMS hröðunina	[-]

$k_{F,n}$	= mögnunarstuðull fyrir sveifluform n	[-]
k_F	= heildar mögnunarstuðull	[-]
l_p	= skreflengd vegfarandans	[m]
L	= haflengd brúarinnar	[m]
$m_{brú}$	= þyngd brúarinnar pr. m.	[kg/m]
$m_{hópur}$	= þyngd hóps pr. m.	[kg/m]
M_n	= almassi (modal mass) sveifluform n , kvarðaður miðað við að mesta útslag í sveifluforminu er 1	[kg]
N	= fjöldi	[-]
$p(f_p)$	= líkindadreifing fyrir göngutíðnir	[-]
r	= hlutfall tíðni sveifluforms og meðalgöngutíðni	[-]
R	= margföldunarstuðull á grunngildi hröðunar	[-]
S_c	= Scruton tala hóps gangandi vegfarenda	[-]
v_p	= gönguhraði vegfarandans, hlaupahraði vegfarandans	[m/s]
t	= tími	[s]
t_{ar}	= komutími vegfaranda á brú	[s]
T	= sveiflutími	[s]
T_0	= tími sem það tekur meðalvegfaranda að ferðast yfir brúna	[s]
T_R	= Endurkomutími	[s]

1 INNGANGUR

Verkefnið er framhald á verkefni sem Rannsóknasjóður Vegagerðarinnar styrkti árið 2006 sem bar heitið, *Göngubrúar á Hringbraut – sveiflumælingar*. Þar var veittur styrkur fyrir því að mæla svörun göngubrúar yfir Hringbraut við Njarðargötu við álagi frá vegfarendum og staðfesta þau reiknilíkön sem notuð voru við hönnun göngubrúarinnar. 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 göngubrúm 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.

Í greinargerð frá 2007 [Línuhönnun, 2007] er meðal annars fjallað um hönnunarstaðla sem í gildi eru og þá þróun sem er á þessu sviði erlendis. Núgildandi staðlar eru byggðir á mjög einfölduðum reikniáðferðum en taka ekki mið af nýjustu þekkingu á þessu sviði. Staðlarnir setja kröfur varðandi svörun brúar gagnvart álagi frá einum gangandi vegfaranda en taka ekki tillit til annarra álagstilfella, þ.e. hlaupaálags eða álag frá hópum. Ekki er heldur tekið tillit til notkunar brúarinnar eða staðsetningar, þ.e. sömu viðmið eiga ekki við fyrir göngubrú sem staðsett er á fjölförnum stað, t.d. við skóla eða sjúkrahús, eða göngubrú á útivistarsvæði. Það er því lagt í hendur hönnuða að skilgreina forsendurnar hverju sinni í samráði við verkkaupa.

Rannsóknaverkefnið 2006 staðfesti að þau reiknilíkön sem notuð voru við hönnun gáfu réttmætt mat á bæði eigintíðnum brúna og svörun þeirra við einum gangandi vegfaranda eins og skilgreint er í nýjustu hönnunarviðmiðum t.d. [Bachmann 1996; Willford 2006]. Í sama verkefni kom þó í ljós að sveifluhegðun göngubrúa er ekki einungis háð svörun við stökum gangandi vegfaranda, heldur þarf einnig að taka tillit til annarra álagstilfella svo sem minni og stærri hópa gangandi og skokkandi vegfaranda.

Hér eru settar fram tillögur að hönnunarviðmiðum fyrir sveifluhegðun göngubrúa sem nota má við hönnun nýrra brúa, bæði í þéttbýli og dreifbýli. Viðmiðin byggja á að eigandi brúarinnar skuli í samráði við hönnuði skilgreina titringskröfur fyrir brúna, sem geta verið háðar staðsetningu hennar og notkun. Skilgreind eru mismunandi álagslíkön, þ.e. bæði fyrir stakan vegfaranda og minni hópa og fyrir hvert álagstilfelli skal reikna út svörun brúarinnar og bera saman við skilgreindar kröfur. Megin markmið þessara viðmiða er að tryggja að hönnuðir hafi verkfæri til að reikna út og meta sveiflur í göngubrúm vegna gangandi og hlaupandi vegfaranda og geti þannig tekið upplýsta ákvörðun um hvort sveiflurnar séu ásættanlegar.

Haustið 2007 voru gerðar frekari mælingar í tengslum við rannsóknaverkefnið þar sem safnað gögnum og mælingum við tvær brýr á höfuðborgarsvæðinu. Það var gert í samstarfi við háskólann í Sheffield í Englandi og munu þær mælingar og niðurstöður nýtast bæði við doktorsverkefni Einars Þórs Ingólfssonar við DTU í Danmörku svo og í rannsóknum við verkfræðideild háskólans í Sheffield. Niðurstöður úr úrvinnslu þeirra gagna munu birtast á öðrum vettvangi síðar.

Sumarið 2008 er haldin þriðja alþjóðlega ráðstefnan um göngubrýr, Footbridge 2008, í Portúgal. Þar er hluta ráðstefnunnar ætlað að fjalla um hönnunarviðmið göngubrúa og má gera ráð fyrir því að eitthvað af nýjum rannsóknum komi fram í kjölfar þeirrar ráðstefnu ásamt viðmiðum sem sett hafa verið annars staðar í Evrópu.

Verkefnið er styrkt af rannsóknasjóði Vegagerðarinnar og Línuhönnun hf. og unnið í samstarfi við Bjarna Besson prófessor við Verkfræðideild Háskóla Íslands og Einar Hafliðason forstöðumanns brúadeildar Vegagerðarinnar. Umsjón með verkefninu hafði Guðmundur Valur Guðmundsson verkfræðingur ásamt Einari Þór Ingólfssyni doktorsnema í verkfræði við DTU í Danmörku og Baldvini Einarssyni yfirverkfræðingi hjá Línuhönnun.

2 MARKMIÐ

Markmiðið með þeim hönnunarviðmiðum sem sett eru fram í þessari skýrslu er að eigendur göngubrúa geti skilgreint á grundvelli þeirra, æskilega hegðun þeirra vegna umferðar gangandi og hlaupandi vegfarenda í samráði við hönnuði. Viðmiðin eru ekki sett til að vera takmarkandi fyrir framsækna hönnun heldur miða að því að hönnuðir og eigendur mannvirkjanna hafi sameiginlegan skilning á því hvers konar hegðun skuli stefnt að strax á undirbúningsstigi hönnunar til að koma í veg fyrir mögulegan kostnaðarauka vegna lagfæringa eða óánægju notenda göngubrúanna eftir að brúin hefur verið tekin í notkun.

Til þess að koma á mótis við þetta markmið er mikilvægt að viðmiðin taki tillit til nýjustu þekkingar á þessu sviði, bæði hvað varðar álagið sem verkar á brúna, reiknilíkanið sem notað er og kröfur um mestu leyfilegu sveiflur. Í eðli sínu er vandamálið slembukennt (e. stochastic), þar sem álagið frá vegfarendum er mismunandi milli manna og umferðin á brúna (sem er ráðandi fyrir stærð álagsins) er breytileg í tíma og mjög háð staðsetningu brúarinnar og notkuninni. Einnig eru viðbrögð manna við titringi mjög einstaklingsbundin með mikilli dreifni og fáar rannsóknir eru til á viðbrögðum gangandi fólks við lágtíðni titringi. Hér verður kynnt aðferð sem nota má við mat á sveifluhegðun göngubrúa við álagi frá gangandi vegfarendum. Aðferðin tekur mið af nýjustu þekkingu á þessu sviði og reynt er að setja hana fram á einfaldan hátt þar sem tekið hefur verið tillit til ofangreindra atriða.

Aðferðafræðin og grunnhugsunin á bak við viðmiðin er sú að göngubrúm sé skipt í fjóra flokka sem taki mið af notkun þeirra og staðsetningu. Á grundvelli þess í hvaða flokki brúin er þá er skilgreint hversu ítarlega greiningu skuli gera á sveifluhegðun brúarinnar, þ.e. hvaða álagstíffelli skuli skoða og hvaða aðferðum skuli beita. Niðurstöður sveiflugreiningar gefa hver líkleg svörun brúarinnar vegna umferðar gangandi og hlaupandi vegfarenda er, bæði frá stökum vegfarendum og hópum, og eru þau gildi borin saman við skilgreinda hröðunarkröfu til að meta hvort sveifluhegðun brúarinnar sé ásættanleg. Hönnunarkrafan er skilgreind út frá því þægindastigi (e. *comfort level*) sem stefnt skal að, þ.e. hvort hreyfingar brúarinnar skuli vera vart greinanlegar (e. *merely perceptible*) eða töluverðar (e. *easily perceptible but not intolerable*). Þægindastigið er skilgreint út frá þeirri hröðun sem líkleg er til að valda óþægindum fyrir notendur brúarinnar, þ.e. því herra þægindastig, því stærra hlutfall notenda mun finna fyrir sveiflunum og finnast þær óþægilegar.

Hlutverk eigenda mannvirkjanna er fyrst og fremst að skilgreina það þægindastig sem stefnt skal að við hönnun brúarinnar svo og að skilgreina í hvaða flokk brúin skuli vera. Sú ákvörðun tekur fyrst og fremst mið af því hver ætluð notkun brúarinnar er og í hvaða umhverfi hún er.

Hér í næstu köflum verður gerð grein fyrir þessum þáttum, þ.e. skilgreindir eru fjórir mismunandi flokkar göngubrúa, skilgreint þægindastig sem stefnt skal að við hönnun og álagslíkön sem hæfa aðstæðum hverju sinni eru skilgreind. Jafnframt er í viðauka einfölduð aðferð til að meta svörun göngubrúa ásamt dæmum um notkun viðmiðanna.

Taka ber þó fram að rannsóknir hafa sýnt að upplifun og öryggistilfinning notenda göngubrúa er ekki einungis háð því hversu miklar sveiflur brúarinnar eru heldur ekki síður hversu traustvekjandi handriðin eru, hvort að hröð umferð sé undir brúna eða hvort hátt sé niður á jörðu, [Mackenzie et.al., 2005].

Rétt er að taka fram að eftirfarandi viðmið skal ekki túlka sem skilyrði, en frekar sem leiðbeiningu fyrir hönnuði göngubrúa. Einnig að mikilvægt er að kanna sveiflur göngubrúa undan álagi frá gangandi vegfarendum til að koma í veg fyrir óvæntar og óæskilegar hreyfingar sem leiða til óöryggis meðal notenda.

3 FLOKKUN GÖNGUBRÚAR

Hér eru skilgreindir fjórir flokka göngubrúa sem taka mið af staðsetningu og hlutverki brúarinnar.

Flokkur 1: Göngubrú í þéttbýli þar sem búast má reglulega við að margir noti brúna á sama tíma. Til dæmis nálægt verslunum eða annarri þjónustu, samgöngumiðstöð eða öðru slíku. Einnig þar sem búast má reglulega við stórum hópum, s.s. almenningshlaupum, skrudgöngum o.s.frv.

Flokkur 2: Göngubrú í þéttbýli þar sem stöku sinnum má búast við stórum hópum en almenn umferð er lítil (þ.e. þéttleikinn er almennt minni en 0.1 manns/m^2)

Flokkur 3: Göngubrú í þéttbýli þar sem ekki er búist við mikilli umferð gangandi vegfarenda.

Flokkur 4: Göngubrú í dreifbýli þar sem ekki er búist við mikilli umferð gangandi vegfarenda.

Mynd 1 sýnir dæmi um göngubrýr á Íslandi og tillögu að hvernig flokka megi brýrmar samkvæmt ofangreindum flokkum. Eins og sést eru flestar brýr í flokki 3, þar sem umferð gangandi vegfarenda í Reykjavík er almennt lítil.



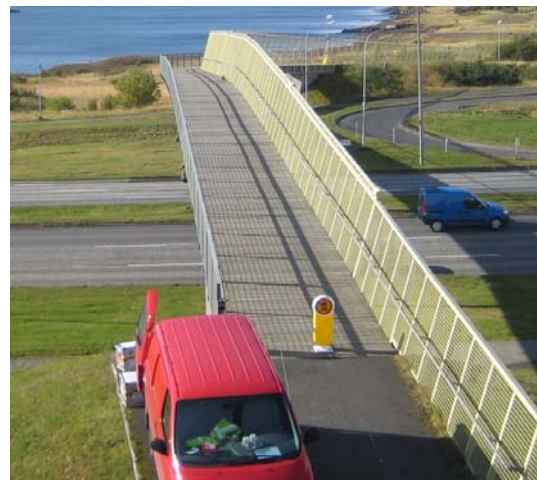
Flokkur 2: Göngubrú yfir Miklubraut við Landspítala



Flokkur 2: Göngubrú yfir Miklubraut við Njarðargötu



Flokkur 4: Göngubrú yfir Jökulsá í lóni



Flokkur 3: Göngubrú yfir Kringlumýrabraut við Fossvog



Flokkur 3: Göngubrú yfir Miklubraut við Grundargerði

Mynd 1: Dæmi um göngubrýr á Íslandi og mögulega flokkun þeirra.

4 HÖNNUNARVIÐMIÐ

Skynjun fólks á titringi er mjög huglæg og því erfitt að skilgreina afmarkaðar kröfur fyrir sveifluhegðun göngubrúa. Skynjunin er jafnframt háð tíðni hreyfingarinnar og því hvort að sá sem nemur sveifluna sé kyrrstæður eða á hreyfingu eins og kemur fram í ISO 10137:2005 staðlinum sem fjallar um notástand bygginga og göngubrúa. Í ofangreindum ISO staðli er skilgreindur grunnferill (e. *base curve*) sem skilgreinir jafna skynjun fólks á titringi sem fall af tíðninni. Einnig er tekið fram að fyrir svörun sem er lægri en grunnferillinn eru kvartanir vegna titrings mjög sjaldgæfar og því má líta á grunnferilinn sem neðri mörk fyrir leyfilegan titring. Viðmið fyrir mesta leyfilegan titring í mannvirkjum eru byggð á stuðlinum R sem margfaldast við grunnferilinn. Þessi stuðull tekur tillit til notkunar mannvirkisins. Grunnferillinn fyrir lóðréttan titring er skilgreindur á eftirfarandi hátt:

$$a_{b,RMS} = \begin{cases} 0.010/\sqrt{f} & \text{þegar} & 1\text{ Hz} \leq f \leq 4\text{ Hz} \\ 0.005 & \text{þegar} & 4\text{ Hz} \leq f \leq 8\text{ Hz} \\ 625 \cdot 10^{-6} / f & \text{þegar} & f > 8\text{ Hz} \end{cases} \quad (1)$$

Sem íhaldssama nálgun má nota $a_{b,RMS} = 0.005\text{ m/s}^2$ sem grunnildi fyrir RMS hröðunina yfir allt tíðnibilið. Viðmiðunarhröðun (a_0) er skilgreind með margföldunarstuðlinum R í þremur þrepum, þ.e. strangar kröfur, meðal kröfur og litlar kröfur.

$$a_0 = a_{b,RMS} R \quad (2)$$

Strangar kröfur	$R = 60$	(litlar hreyfingar)
Meðal kröfur	$R = 100$	(greinilegar hreyfingar)
Litlar kröfur	$R = 200$	(vel greinilegar hreyfingar)

Í ákveðnum tilvikum (t.d. brýr í flokki 4) getur eigandi brúarinnar gert engar kröfur til hröðunar í notástandi. Þó er mælt með því að tryggt skuli að óæskilegar formbreytingar eða skemmdir s.s. staðbundið flot í brúnni eða sprungumyndun eigi sér ekki stað vegna skemmdarverka.

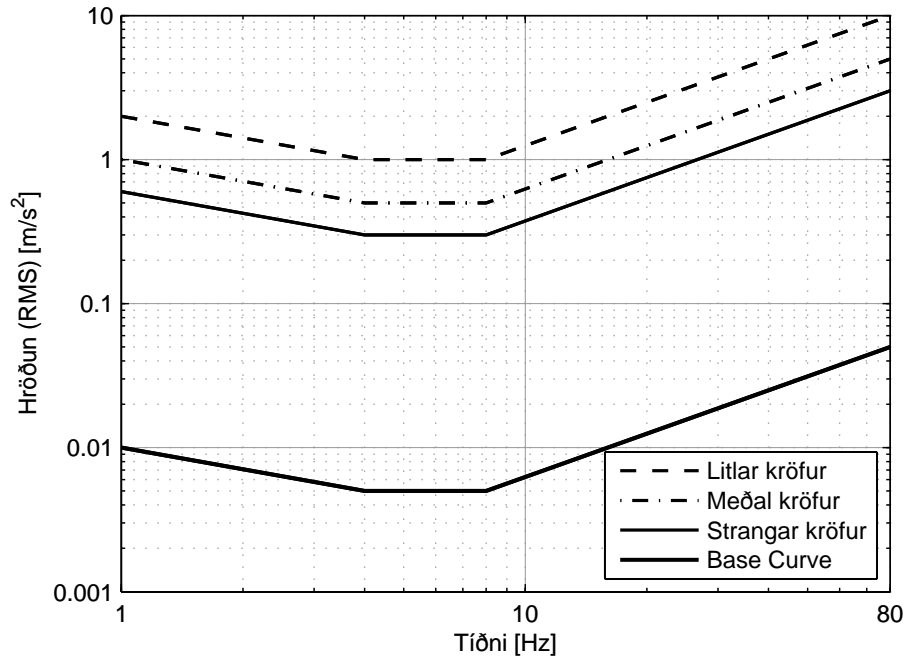
Skynjun notenda göngubrúa á titringi er háð því hvort hann sé kyrrstæður, gangi eða hlaupi. Einnig hafa ytri aðstæður áhrif á skynjunina, t.d. hversu hátt yfir jörðu brúin er, gerð handriða, tegund umferðar undir brúnni o.s.frv..

Ef miða á við kyrrstæðan vegfaranda	$k_1 = 0.5$
Ef miða á við gangandi vegfaranda	$k_1 = 1.0$
Ef miða á við hlaupandi vegfaranda	$k_1 = 2.0$
Hátt yfir jörðu eða hröð umferð undir	$k_2 = 0.8$
Notendur eru sjúklingar, eldra fólk, börn	$k_3 = 0.8$

Viðmiðunarhröðun sem bera skal saman við svörun brúarinnar er

$$a_{\text{leyfileg}} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times a_0 \quad (3)$$

Mögulegt er að gera mismunandi kröfur til svörunar brúarinnar eftir því hvaða álag verkar á hana, þ.e. hvort um er að ræða staka vegfarendur, hópa eða gangandi vegfarendur og hlaupara.



Mynd 2: RMS hröðunarkröfur fyrir lóðréttar sveiflur í göngubrúum sem fall af tíðni sveiflunar

Fyrir sveiflur í lárétta átt skal tryggt að reiknuð RMS svörun sé innan við $0,1 \text{ m/s}^2$. RMS gildi (e. Root Mean Square) hröðunar er skilgreint á eftirfarandi hátt:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (4)$$

Þar sem T viðmiðunartíminn tekinn sem 1s. Ef hröðunin er mæld eða reiknuð út með ákveðnu millibili, (t.d. með $\Delta t=0.01\text{sek}$) er RMS gildið jafnt og staðalfrávik svörunarinnar σ_x . Fyrir sínuslaga bylgju er því $a_{RMS} = 1/\sqrt{2}a_{max}$.

5 ÁLAGSLÍKÖN

Álagi frá stökum gangandi eða hlaupandi vegfarenda má lýsa með röð hreinsveiflubylgja sem fer yfir brúna á hraðanum v_p .

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

$$= G_p + \alpha_1 G_p \sin(2\pi f_p t) + \alpha_2 G_p \sin(4\pi f_p t - \pi/2) + \alpha_3 G_p \sin(6\pi f_p t - \pi/2)$$

$$v_p = f_p l_p \quad (6)$$

þar sem

G_p = þyngd vegfarendans, skal tekin sem 780 N

α_j = álagsstuðlar skv. töflu 1 fyrir gönguálag og töflu 2 fyrir hlaupaálag

f_p = tíðni hreyfingarinnar, þ.e. skref á sekúndu, sjá mynd 3 ásamt töflu 1 og 2

φ_j = fasahorn, nota má $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$

v_p = gönguhraðinn

l_p = er skreflengd vegfarendans

$$l_p = 0,25 f_p^{1,86} \quad \text{fyrir göngu}$$

$$l_p = 1,0 \text{ m} \quad \text{fyrir hlaup}$$

Í töflu 1 fyrir gönguálag eru gefin upp gildi bæði fyrir meðalgildi álagsstuðlanna svo og kennigildi sem nota má við hönnun sem jafngilda því að 75% fólks gefi lægri svörun en kennigildið (tilvísun).

Í töflu 2 fyrir hlaupaálag eru gefin upp gildi bæði fyrir meðalgildi álagsstuðlanna svo og kennigildi sem nota má við hönnun sem jafngildir því að 95% fólks gefi lægri álag en kennigildið (tilvísun)

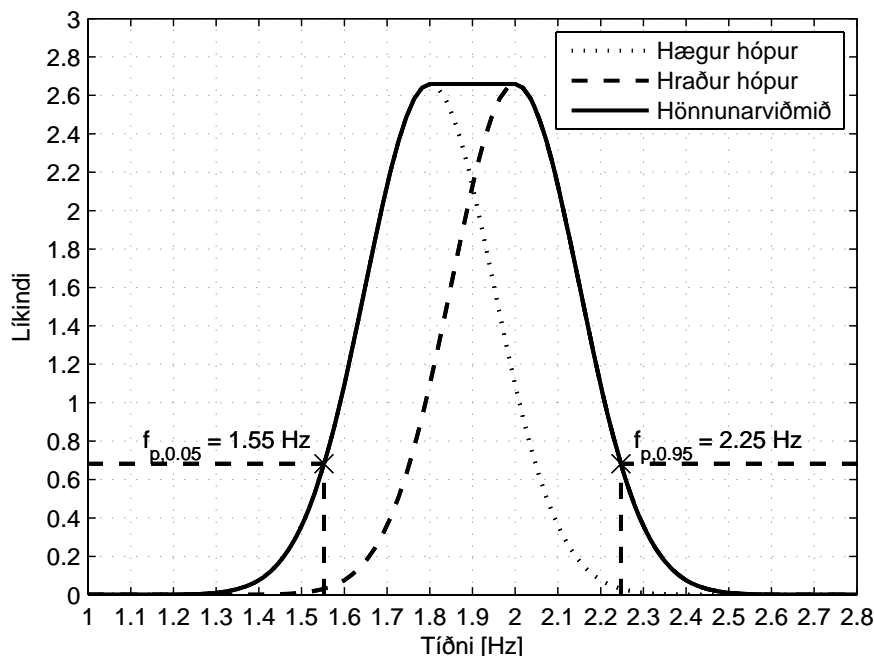
Tafla 1: Álagsstuðlar fyrir göngu

Hreyfing	Tákn	Tíðnibil (Hz)	Meðalgildi (DLF)	Kennigildi (75%) (DLF)
Ganga	α_1	1 – 2,8 Hz	$0,37(f_p - 0,95) \leq 0,50$	$0,41(f_p - 0,95) \leq 0,56$
	α_2	2 – 5,6 Hz	$0,054 + 0,0088 f_p$	$0,069 + 0,0102 f_p$
	α_3	3 – 8,4 Hz	$0,010 + 0,0153 f_p$	$0,033 + 0,0192 f_p$

Tafla 2: Álagsstuðlar fyrir hlaup

Hreyfing	Tákn	Tíðnibil (Hz)	Meðalgildi, (DLF)	Kennigildi (95%) (DLF)
Hlaup	α_1	2 – 4,0 Hz	$0,313(f_p + 1,2) \leq 1,25$	$0,375(f_p + 1,2) \leq 1,50$
	α_2	4 – 8,0 Hz	0,2	0,4
	α_3	8 – 12 Hz	0,1	0,2

Tekið skal fram að meðal göngutíðni fólks er á bilinu 1,8 – 2,0 Hz (háð aðstæðum) með staðalfrávik á bilinu 0,10 – 0,20 Hz. Mynd 3 sýnir líkindadreifingu göngutíðna fyrir tvær mismunandi meðalgöngutíðnir. Á myndinni eru einnig sýnd efri og neðri 5% vikmörk fyrir göngutíðnir, þ.e. reikna má með að aðeins 5% gangandi vegfarenda ganga hægara en á tíðninni 1,55 Hz (3,1 km/klst.) og 5% vegfarenda ganga hraðar en 2,25 Hz (9,2 km/klst.).



Mynd 3: Líkindadreifing göngutíðna fyrir gangandi vegfarendur

Fyrir hlaup er meðalhlaupatíðnin og staðalfrávikin ekki vel skilgreind, en í töflu 3 eru gefin dæmigerð gildi fyrir tíðni hlaupaálags.

Tafla 3: Tíðni hreyfingar fyrir göngu og hlaup

Hreyfing	Tíðnibil (Hz)	Hægt (Hz)	Venjulegt (Hz)	Hratt (Hz)	Meðalgildi (Hz)	Staðalfrávik (Hz)
Hlaup	1,9 – 3,3	1,9 – 2,2	2,2 – 2,7	2,7 – 3,3	-	-

5.1 Álagstílfelli

Til að meta svörun göngubrúa má almennt nota álagslíkanið í jöfnu (5) fyrir gangandi og/eða hlaupandi vegfarendur. Hönnuðir skulu þá í hverju sinni skilgreina þau álagstílfelli sem lýsa væntanlegum umferðarþunga og notkun brúarinnar í samráði við eiganda. Í töflu 5 má finna samantekt yfir æskileg álagstílfelli sem þarf að taka tillit til eftir því í hvaða notkunarflokki brúin er, sbr. kafla 3.

Sjö mismunandi álagstílfelli eru skilgreind, þar af eitt með láréttu álagi. Svörun brúarinnar við álaginu er borin saman við þær kröfur um hröðun sem skilgreindar eru í kafla 4. Það er háð því í hvaða flokki brúin er, hvaða álagstílfelli þarf að skoða. Jafnframt er mögulegt að gera mismunandi kröfur fyrir álagstílfellin, þ.e. að leyfa hærri hröðun fyrir hópálag en fyrir álag frá stökum vegfaranda.

Með því að skoða svörun brúarinnar fyrir þessi álagstílfelli er hegðun brúarinnar vel þekkt og því mögulegt að taka upplýstar ákvarðanir um hvað sé áætlanlegt og hvað ekki.

Álagi frá hópi fólks er flókið að lýsa og er háð því hversu vel fólk gengur í takt. Þau álagstílfelli sem hér er lýst eiga ekki við þau tilfelli þegar fólk gengur viljandi í takt, slíkt þarf að skoða sérstaklega og hvort ástæða sé til að takmarka líkur á þess háttar hegðun. Eitt viðbótar álagstílfelli (álagstílfelli G) hefur verið skilgreint til að taka á skemmdarverkum þar sem að miðað er við að takmarka flot, sprungumyndanir eða óæskilegar formbreytingar í burðarvirkinu.

Tafla 4: Skilgreining álagstílfella

Álagstílfelli	Lýsing	Fjöldi
A	Lóðrétt álag frá stökum gangandi vegfaranda	N=1
B	Lóðrétt álag frá stökum hlaupara	N=1
C	Lóðrétt álag frá litlum hópi gangandi	N=5
D	Lóðrétt álag frá litlum hlaupahópi	N=5
E	Lóðrétt álag frá stærri hóp	
F	Lárétt álagslíkan	
G	Skemmdarverk	N=3

Hversu ítarlegrar greiningar er þörf er háð því hver notkunarflokkur brúarinnar er (sbr. kafla 3). Í töflu 4 má sjá samantekt á æskilegum álagstílfellum sem þarf að taka tillit til eftir því hver notkunarflokkur brúarinnar er. Fyrir brýr í flokki 2 er mælt með því að skoðuð verði svörun vegna lítilla hópa en fyrir brýr í flokki 3 er það ekki talið nauðsynlegt nema í sérstökum tilfellum sem ákvarðast hverju sinni miðað við aðstæður.

Tafla 5: Samantekt á álagstílfellum sem nota skal fyrir mismunandi brúarflokka

Álagstílfelli	Flokkur 1	Flokkur 2	Flokkur 3	Flokkur 4
A	X	X	X	X
B	X	X	X	
C	X	X	(X)	
D	X	X	(X)	
E	X			
F	X	X		
G	X	X	X	(X)

5.1.1 Álagstílfelli A – Lóðrétt álag frá stökum gangandi vegfaranda

Álagstílfelli A á við um stakan vegfaranda sem ferðast yfir brúna á jöfnum hraða v_p . Álagið samanstendur af þremur hreinsveiflubylgjum (sínusbylgjum) við tíðnirnar f_p , $2f_p$ og $3f_p$, þar sem f_p er göngutíðnin:

$$F(t) = G_p \left[\alpha_1 \sin(2\pi f_p t) + \alpha_2 \sin(4\pi f_p t - \pi/2) + \alpha_3 \sin(6\pi f_p t - \pi/2) \right] \quad (7)$$

$$v_p = 0,25 f_p^{1,86} \quad [\text{m/s}]$$

Reikna skal út RMS svörun brúarinnar fyrir tvö mismunandi tilvik:

- A1: Meðalsvörun brúarinnar við gangandi vegfaranda sem gengur á meðalgöngutíðni fólks, $f_p = \mu_f$.
- A2: Kennigildi svörunar við gangandi vegfaranda sem gengur á óhagstæðustu mögulegri göngutíðni, f_p (þó er $f_p < 2.8\text{Hz}$). Í flestum tilvikum skal taka $f_p = f_0$ þar sem f_0 er eigintíðni fyrsta lóðréttu sveifluforms. Ef $f_0 > 2.8\text{Hz}$, skal velja $f_p = 1/2f_0$ eða $1/3f_0$.

Álagstílfelli A1 lýsir líklegustu svörun brúarinnar vegna staks gangandi vegfaranda á meðan álagstílfelli A2 lýsir mestu svörun sem reiknað er með að stakur vegfarandi geti valdið. Inntaksstærðir fyrir álagstílfellin eru gefin í töflu 6.

Tafla 6: Inntaksstærðir fyrir álagstílfelli A

Tilvik	Göngutíðni (f_p)	Þyngd (G_p)	Álagsstuðull, (α_1)	Álagsstuðull, (α_2)	Álagsstuðull, (α_3)
A1	μ_f	780 N	$0,37(f_p - 0,95) \leq 0,50$	$0,054 + 0,0088f_p$	$0,010 + 0,0153f_p$
A2	f_0	780 N	$0,41(f_p - 0,95) \leq 0,56$	$0,069 + 0,0102f_p$	$0,033 + 0,0192f_p$

Meðalgöngutíðnina skal almennt velja sem óhagstæðustu meðalgöngutíðni í hvert skipti skv. eftirfarandi jöfnu:

$$\mu_f = \begin{cases} 1,80\text{Hz} & \text{þegar } f_0 \leq 1,80\text{Hz} \\ f_0 & \text{þegar } 1,80\text{Hz} < f_0 < 2,00\text{Hz} \\ 2,00\text{Hz} & \text{þegar } f_0 \geq 2,00\text{Hz} \end{cases} \quad (8)$$

Þar sem f_0 er lægsta eigintíðni lóðréttu sveifluforms eða eigintíðni þess sveifluforms sem talið er ráðandi.

Þegar svörunin er reiknuð skal taka tillit til allra sveifluforma sem kunna að örvast við álagið. Fyrir göngubrýr með vel aðskildum sveifluformum, má nota einfaldaða aðferð sem gefin er í viðauka A til að reikna út svörun brúarinnar.

5.1.2 Álagstílfelli B – Lóðrétt álag frá stökum hlaupara

Álagstílfelli B á við fyrir stakan hlaupara og má lýsa á samskonar hátt og fyrir gangandi vegfaranda í álagstílfelli A nema með öðrum álagsstuðlum:

$$F(t) = G_p \left[\alpha_1 \sin(2\pi f_p t) + \alpha_2 \sin(4\pi f_p t - \pi/2) + \alpha_3 \sin(6\pi f_p t - \pi/2) \right] \quad (9)$$

$$v_p = 1,0 f_p \quad [\text{m/s}]$$

Reikna skal út RMS svörun brúarinnar fyrir tvö mismunandi tilvik:

- B1: Meðalsvörun brúarinnar við hlaupandi vegfaranda sem hleypur á venjulegum hraða, þ.e. $f_p = f_{m,\text{hlaup}}$. Velja skal óhagstæðasta gildið á $f_{m,\text{hlaup}}$ á bilinu 2,2 – 2,7 Hz.
- B2: Kennigildi svörunar við hlaupandi vegfaranda sem hleypur á óhagstæðustu mögulegri hlaupatíðni, f_p (þó er $f_p < 3,3\text{Hz}$). Í flestum tilvikum skal taka $f_p = f_0$ þar sem f_0 er eigintíðni fyrsta lóðréttu sveifluforms. Ef $f_0 > 3,3\text{Hz}$, skal velja $f_p = 1/2f_0$ eða $1/3f_0$.

Álagstílfelli B1 lýsir almennri svörun brúarinnar við stökum hlaupandi vegfaranda meðan álagstílfelli B2 lýsir mestu svörun sem reiknað er með að stakur hlaupari geti valdið. Inntaksstærðir fyrir álagstílfellin eru gefin í töflu 7.

Tafla 7: Inntaksstærðir fyrir álagstílfelli B

Tilvik	Göngutíðni (f_p)	Þyngd (G_p)	Álagsstuðull, (α_1)	Álagsstuðull, (α_2)	Álagsstuðull, (α_3)
B1	$f_{m,\text{hlaup}}$	780 N	$0,313(f_p + 1,2) \leq 1.25$	0,2	0,1
B2	f_0	780 N	$0,375(f_p + 1,2) \leq 1.50$	0,4	0,2

Hlaupatíðnin fyrir vegfaranda sem hleypur á venjulegum hraða skal velja skv. eftirfarandi jöfnu:

$$f_{m,\text{hlaup}} = \begin{cases} 2,20 \text{ Hz} & \text{þegar } f_0 \leq 2,20 \text{ Hz} \\ f_0 & \text{þegar } 2,20 \text{ Hz} < f_0 < 2,70 \text{ Hz} \\ 2,70 \text{ Hz} & \text{þegar } f_0 \geq 2,70 \text{ Hz} \end{cases} \quad (10)$$

Þar sem f_0 er lægsta eigintíðni lóðréttu sveifluforms eða eigintíðni þess sveifluforms sem talið er ráðandi.

Þegar svörunin er reiknuð skal taka tillit til allra sveifluforma sem kunna að örvast við álagið. Fyrir göngubrýr með vel aðskildum sveifluformum, má nota einfaldaða aðferð sem gefin er í viðauka A til að reikna út svörun brúarinnar.

5.1.3 Álagstilfelli C – Lóðrétt álag frá litlum hópi gangandi vegfarenda

Álagstilfelli C tekur tillit til þess að minni hópar gangandi vegfarenda örvi brúna. Álagslíkanið fyrir hópinn er:

$$F(t) = \sqrt{N}G_p \left[\alpha_1 \sin(2\pi f_p t) + \alpha_2 \sin(4\pi f_p t - \pi/2) + \alpha_3 \sin(6\pi f_p t - \pi/2) \right] \quad (11)$$

$$v_p = 0,25 f_p^{1,86} \quad [\text{m/s}]$$

Álagslíkanið er íhaldsöm nálgum á meðalálagi frá hópi af N vegfarendum sem ferðast yfir brúna í einum hóp á sama hraða við sömu göngutíðni. Þar sem líkanið gerir ráð fyrir að allir í hópnum gangi við sömu göngutíðni er líkanið meira íhaldsamt fyrir stóra hópa, þ.e. ef $N > 5-10$ manns. Ekki er tekið tillit til þess að hópurinn gangi viljandi í takt. Í þessu álagstilfelli skal reikna út RMS svörun brúarinnar í eftirfarandi tilviki:

C1: Kennigildi svörunar við hóp af gangandi vegfarendum sem ganga á meðalgöngutíðni fólks, $f_p = \mu_f$.

Inntaksstærðir í álagslíkanið eru skilgreindar í töflu 8. Stærð hópsins getur verið breytileg, háð staðsetningu brúarinnar og notkunar hennar og því má nota önnur gildi fyrir N í hverju tilviki. Þyngd vegfarendanna skal tekin sem $G_p = 780$ N.

Tafla 8: Inntaksstærðir fyrir álagstilfelli C

Tilvik	Göngutíðni (f_p)	Stærð hóps (N)	Álagsstuðull, (α_1)	Álagsstuðull, (α_2)	Álagsstuðull, (α_3)
C1	μ_f	5	$0,41(f_p - 0,95) \leq 0,56$	$0,069 + 0,0102f_p$	$0,033 + 0,0192f_p$

Meðalgöngutíðnina skal almennt velja sem óhagstæðustu meðalgöngutíðni í hvert skipti, t.d. samkvæmt eftirfarandi jöfnu:

$$\mu_f = \begin{cases} 1,80 \text{ Hz} & \text{þegar } f_0 \leq 1,80 \text{ Hz} \\ f_0 & \text{þegar } 1,80 \text{ Hz} < f_0 < 2,00 \text{ Hz} \\ 2,00 \text{ Hz} & \text{þegar } f_0 \geq 2,00 \text{ Hz} \end{cases} \quad (12)$$

Þar sem f_0 er lægsta eigintíðni lóðréttis sveifluforms eða eigintíðni þess sveifluforms sem talið er ráðandi.

Þegar svörunin er reiknuð skal taka tillit til allra sveifluforma sem kunna að örvast við álagið. Fyrir göngubryr með vel aðskildum sveifluformum, má nota einfaldaða aðferð sem gefin er í viðauka A til að reikna út svörun brúarinnar.

5.1.4 Álagstílfelli D – Lóðrétt álag frá litlum hópi hlaupara

Álagstílfelli D tekur tillit til þess að minni hópar hlaupandi vegfarenda örvi brúna. Álagslíkanið fyrir hópinn er á sams konar formi og fyrir minni hópa gangandi vegfarenda í tilfelli C:

$$F(t) = \sqrt{N}G_p \left[\alpha_1 \sin(2\pi f_p t) + \alpha_2 \sin(4\pi f_p t - \pi/2) + \alpha_3 \sin(6\pi f_p t - \pi/2) \right] \quad (13)$$

$$v_p = 1,0 f_p \quad [\text{m/s}]$$

Álagslíkanið er íhaldsöm nálgun á meðalálagi frá hópi af N vegfarendum sem ferðast yfir brúna í einum hóp á sama hraða og við sömu hlaupatíðni. Í þessu álagstílfelli skal reikna út RMS svörun brúarinnar í eftirfarandi tilvik:

D1: Kennigildi svörunar við hóp af hlaupandi vegfarendum sem hlaupa á venjulegum hraða, þ.e. $f_p = f_{m,hlaup}$. Velja skal óhagstæðasta gildið á $f_{m,hlaup}$ á bilinu 2,2 – 2,7 Hz.

Inntaksstærðir í álagslíkanið eru skilgreindar í töflu 9. Stærð hópsins getur verið breytileg, háð staðsetningu brúarinnar og notkunar hennar og því má nota önnur gildi fyrir N í hverju tilviki. Þyngd vegfarendanna skal tekin sem $G_p = 780$ N.

Tafla 9: Inntaksstærðir fyrir álagstílfelli D

Tilvik	Göngutíðni (f_p)	Stærð hóps (N)	Álagsstuðull, (α_1)	Álagsstuðull, (α_2)	Álagsstuðull, (α_3)
D1	$f_{m,hlaup}$	5	$0,375(f_p + 1,2) \leq 1,50$	0,4	0,2

Meðalhlaupatíðnina skal almennt velja sem óhagstæðustu tíðnina í hvert skipti, t.d. samkvæmt eftirfarandi jöfnu:

$$f_{m,hlaup} = \begin{cases} 2,20 \text{ Hz} & \text{þegar } f_0 \leq 2,20 \text{ Hz} \\ f_0 & \text{þegar } 2,20 \text{ Hz} < f_0 < 2,70 \text{ Hz} \\ 2,70 \text{ Hz} & \text{þegar } f_0 \geq 2,70 \text{ Hz} \end{cases} \quad (14)$$

Þar sem f_0 er lægsta eigintíðni lóðréttis sveifluforms eða eigintíðni þess sveifluforms sem talið er ráðandi.

Þegar svörunin er reiknuð skal taka tillit til allra sveifluforma sem kunna að örvast við álagið. Fyrir göngubrýr með vel aðskildum sveifluformum, má nota einfaldaða aðferð sem gefin er í viðauka A til að reikna út svörun brúarinnar.

5.1.5 Álagstilfelli E – Lóðrétt álag frá jafndreifðum stórum hópi

Fyrir göngubrýr í þéttbýli þar sem búast má reglulega við að margir noti brúna á sama tíma þarf að meta svörun brúarinnar stórum hópi af fólki. Til dæmis nálægt verslunum eða annari þjónustu, samgöngumiðstöð eða öðru slíku. Einnig þar sem búast má reglulega við stórum hópum, s.s. almenningshlaupum, skrúðgöngum o.s.frv. eiga álagstilfelli A-D ekki við og þarf því meta svörun brúarinnar með öðrum aðferðum.

Fyrsta skrefið til að meta svörun brúarinnar er að ákvarða álagið, þ.e. hversu þétt fólk gengur yfir brúna, hversu lengi fólk er að ganga yfir brúna og hversu oft brúin verður fyrir þessu álagi. Þetta er gert með því að skilgreina flæði vegfarenda, λ , sem meðalfjöldi sem fer inn á brúna á sekúndu. Þessa stærð má ákvarða út frá áætluðum meðal þéttleika fólks á brúnni, q [menn/m²], á brúnni á eftirfarandi hátt:

$$\lambda = \frac{qbL}{T_0} \quad (15)$$

þar sem b er breidd brúarinnar, L er heildarlengdin og T_0 er tíminn sem það tekur meðalvegfaranda að ganga yfir brúna:

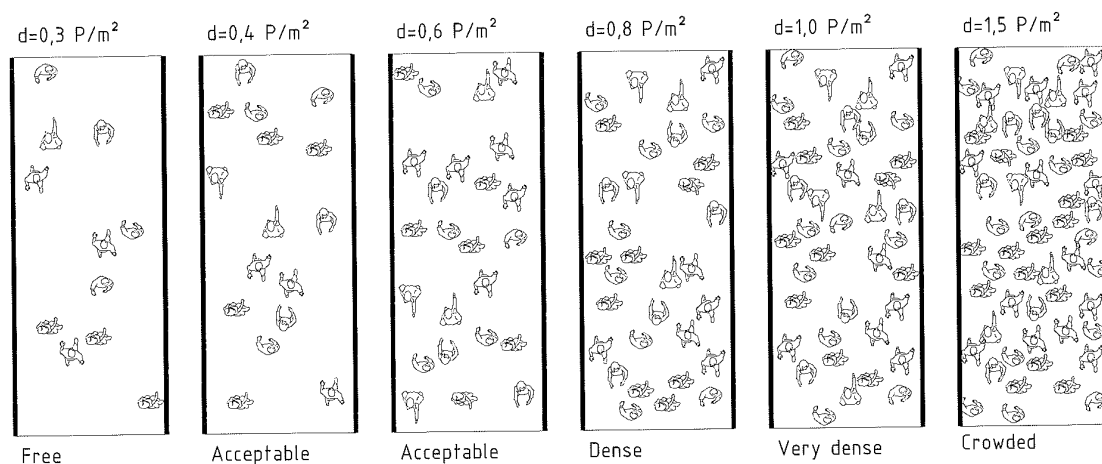
$$T_0 = \frac{L}{\mu_v} = 4L\mu_f^{-2,86} \approx 0,64L \quad (16)$$

$$\lambda = 1,56qb, \quad [\text{pers/s}] \quad (17)$$

Í jöfnunni er μ_f meðalgöngutíðni hópsins. Meðalþéttleikann, q , skal hönnuður ákvarða í samráði við eiganda brúarinnar og hér má nota mynd 4 til hliðsjónar þegar þéttleikinn er ákvarðaður.

Einnig skal metið hversu oft þessi þéttleiki komi fyrir á brúni og hversu lengi í senn. Sem dæmi má taka göngubrú sem tengir saman samgöngukerfi (t.d. strætisvagnstöð) og stærra atvinnuhverfi þar sem búast má við mikilli umferð á annatímum eða brú sem tengir saman sýningarsal (bío, leikhús, tónleikasal) og bílastæði. Í báðum tilvikum má búast við mikilli umferð í takmarkaðan tíma í senn.

Þegar búið er að skilgreina álagið, má meta svörunina annað hvort með tölulegum Monte Carlo hermunaraðferðum eða með því að nota einfaldari aðferð úr viðauka B. Í viðauka C er jafnframt gefið dæmi um notkun þessarar aðferðar.



Mynd 4: Mismunandi þéttleika fólks á göngubrú. Mynd úr [FIB, 2005]

5.1.6 Álagstilfelli F – Lárétt álag frá jafndreifðum stórum hópi

Fyrir göngubrýr þar sem eigintíðni láréttra sveifluforma er nálægt meðalgöngutíðni fólks (t.d. þar sem $f_L < 1,5\text{Hz}$) er hættá á að stórar hliðarsveiflur eigi sér stað þegar stærri hópar af fólki ganga yfir brúna á sama tíma. Hliðarsveiflurnar er afleiðing af samvirkni gangandi fólks og sveiflum brúarinnar (e. *lock-in*). Til að meta hvort göngubrú sé í hættu á að verða fyrir stórum hliðarsveiflum vegna gangandi vegfarenda þarf að reikna út eftirfarandi stærð, S_c (Scruton tala vegfarendanna):

$$S_c = \frac{m_{\text{brú}} \zeta}{m_{\text{hópur}}} \quad (18)$$

Þar sem

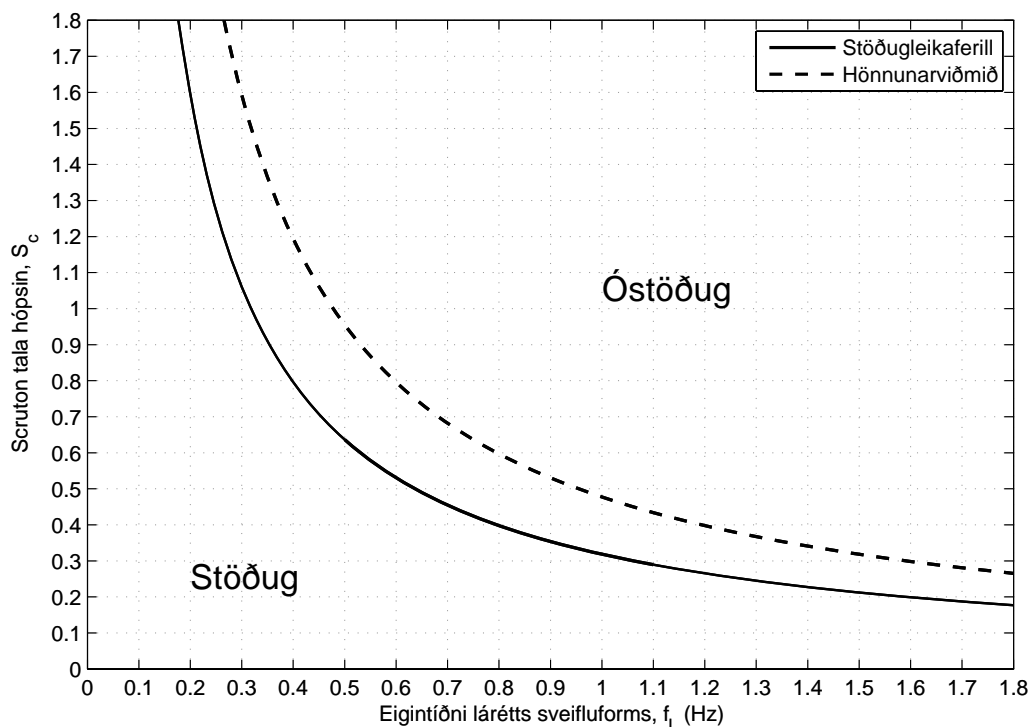
$m_{\text{brú}}$: er þyngd brúarinnar pr. m [kg/m]

$m_{\text{hópur}}$: er þyngd hópsins pr. m [kg/m]

ζ er deyfing brúarinnar sem hlutfall af krítísku deyfingarhlutfalli [-]

Fyrir öll lárétt sveifluform, með eigintíðni $f_L < 1,5\text{ Hz}$ skal bera Scruton töluna við stöðugleikaferilinn á mynd 5. Ef Scruton talan fellur neðan við ferilinn á mynd 5 má gera ráð fyrir stórum hliðarsveiflum þegar hópur með massann $m_{\text{hópur}}$ ferðast yfir brúna. Ef Scruton talan er neðan við línuna, má gera ráð fyrir að stöðugleiki brúarinnar sé tryggður.

Einnig má nota stöðugleikaferilinn á mynd 5 til að reikna út þá hópstærð sem getur valdið stórum hliðarsveiflum þegar eigintíðni sveifluformsins og þyngd brúarinnar er þekkt.



Mynd 5: Stöðugleikaferill fyrir láréttar sveiflur í göngubrúm vegna samvirkni (e. lock-in) vegfarenda og brúarinnar .

Vegna óvissu í álagi frá fótgangandi vegfarendum er mælt með að efri línan (hönnunarlínan) á mynd 4 sé notuð við hönnun göngubrúa.

Rétt er að taka fram að einungis má nota hönnunarlínu fyrir brýr þar sem þyngdin er nálægt því að vera jafndreifð eftir lengdinni og að nálga megi sveifluformið með sínuslaga bylgju. Ef aðrir þættir en brúardekkið hafa mikil áhrif á almassa kerfisins, t.d. kaplar, bogar og/eða stöplar, má ekki nota ofangreinda jöfnu. Í slíkum tilvikum skal meta stöðugleika brúarinnar sérstaklega.

5.1.7 Álagstilfelli G – Skemmdarverk

Ef hönnuðir göngubrúa vilja taka tillit til þess að fólk á brúnni hoppi viljandi í takt við eigintíðni hennar má nota eftirfarandi álagslíkan:

$$F(t) = G_p \left[K_1 \alpha_1 \sin(2\pi f_p t) + K_2 \alpha_2 \sin(4\pi f_p t - \pi/2) + K_3 \alpha_3 \sin(6\pi f_p t - \pi/2) \right] \quad (19)$$

Þetta álag skal setja sem punktkraft á óhagstæðasta stað brúarinnar. Tekið skal fram að álagstilfellið er álag í brotástandi og því þarf ekki að bera svörunina saman við hönnunarkröfurnar í kafla 4, heldur skal einungis tryggt að burðarvirki brúarinnar þoli áraunina og að óæskilegar formbreytingar, sprungumyndanir eða staðbundið flot eigi sér ekki stað. Álagið má því líta á sem óhappaálag. Álagslíkan þetta er tekið úr danska staðlinum DS410:1998 og hefur verið notað við hönnun áhorfendastúka. Þyngd vegfarendanna skal tekin sem 780 N en aðrir stuðlar í álagslíkaninu eru gefnir upp í töflu 10.

Tafla 10: Inntaksstærðir fyrir álagstilfelli G

	Tíðni f_p , (Hz)	α_1	α_2	α_3	K_1	K_2	K_3
Hoppálag	0,5 – 3,0	1,6	1,0	0,2	N	$\sqrt{0,3N^2 + 0,86N}$	$\sqrt{0,03N^2 + 1,20N}$

Fyrir göngubrýr með vel aðskildum sveifluformum, má í staðinn fyrir álagslíkanið í jöfnu (19) nota stakan statískan kraft sem reiknast á eftirfarandi hátt:

$$F_s = (1 + k_F) F_p \quad (20)$$

Þar sem k_F er dýnamískur mögnunarstuðull og F_p er þyngd eins vegfaranda (780 N). Mögnunarstuðullinn ákvarðast fyrir hverja álagstíðni (f_p , $2f_p$ og $3f_p$) og fyrir hvert sveifluform $n=1,2,\dots,N_{\text{Sveifluform}}$ með eftirfarandi jöfnu:

$$k_{F,n} = \sqrt{(\alpha_1 K_1 H_{1,n})^2 + (\alpha_2 K_2 H_{2,n})^2 + (\alpha_3 K_3 H_{3,n})^2} \quad (21)$$

$$H_{j,n} = \frac{1}{\sqrt{(1 - [j\beta_n])^2 + (2\zeta_n j\beta_n)^2}}, \quad \begin{cases} j = 1, 2, 3 \\ n = 1, 2, \dots, N_{\text{Sveifluform}} \end{cases} \quad (22)$$

$$\beta_n = f_p / f_n, \quad n = 1, 2, \dots, N_{\text{Sveifluform}} \quad (23)$$

Heildarmögnunarstuðullinn fæst með eftirfarandi jöfnu:

$$k_F = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_{\text{Sveifluform}}} k_{F,n}^2}, \quad n = 1, 2, \dots, N_{\text{Sveifluform}} \quad (24)$$

Mögnunarstuðullinn skal ákvarðaður fyrir óhagstæðustu hopptíðni sem brúin getur orðið fyrir, þ.e. velja skal:

1. Hæsta mögulega gildi á f_p , þ.e. 3,0 Hz
2. Allar tíðnir þar sem f_p er jafn eigintíðni lóðrétts sveifluforms
3. Allar tíðnir þar sem $2f_p$ er jafn eigintíðni lóðrétts sveifluforms
4. Allar tíðnir þar sem $3f_p$ er jafn eigintíðni lóðrétts sveifluforms

6 LOKAORÐ

Hér hafa verið skilgreind álagstílfelli sem lýsa álagi frá gangandi og hlaupandi vegfarendum á göngubrýr ásamt því að skilgreind hafa verið viðmiðunargildi fyrir mestu hröðun sem brúin getur orðið fyrir háð hver notkun og staðsetning brúarinnar er.

Með því að beita þessum leiðbeiningum fást fram mun betri upplýsingar um svörun göngubrúa heldur en mögulegt er samkvæmt núgildandi stöðlum sem einungis taka tillit til álags frá einum gangandi vegfaranda sem gengur á eigintíðni brúarinnar. Hér hefur verið tekið tillit til breytileika álagsins ásamt því að nákvæmari og betri álagslíkön eru notuð og að tekið er tillit til hærri sveifluforma en þess fyrsta.

Með því að reikna svörun fyrir þau álagstílfelli sem skilgreind eru hér er hægt að bera saman svörun þegar gengið eða hlaupið er á mismunandi tíðni ásamt því að hægt er að meta hversu líklegt er að þessi svörun verði. Með því að reikna svörun ekki einungis fyrir meðalgildi heldur einnig óhagstæðustu gildi er mögulegt að sjá hversu brúin er næm fyrir umferð gangandi og hlaupandi vegfaranda og því betri upplýsingar fyrir hönnuði og eigendur mannvirkjanna til að meta hvort hreyfingarnar séu ásættanlegar.

Innsæi þarf til að skilgreina hæfilegar kröfur sem ætlast er til að brúin standist og við hvaða aðstæður, þ.e. hvaða álagstílfelli skuli beita. Sé þeim aðferðum beitt sem lagðar eru til hér þá ætti að vera litlar líkur að til vandræða komi eftir að brúin hefur verið tekin í notkun. Sé talið líklegt að óæskilegur titringur finnist á brúnum sökum umferðar gangandi og/eða hlaupandi vegfarenda er mögulegt að gera ráð fyrir því á hönnunarstigi að hægt sé að koma fyrir deyfingarbúnaði í brúnni með viðeigandi ráðstöfunum. Slíkt er mun hagkvæmara heldur en ef koma þarf fyrir deyfingarbúnaði eftir að byggingu lýkur og ekki hefur verið gert ráð fyrir slíku í hönnun brúarinnar. Með einföldum sveiflumælingum þegar byggingu brúarinnar er lokið má jafnvel staðfesta sveifluhegðun brúarinnar áður en hún er tekin í notkun og er mælt með því að slíkt sé gert þegar talið er að brúin sé viðkvæm fyrir sveiflum og/eða að eignitíðni hennar sé innan við 4 Hz.

7 HEIMILDIR

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

FIB, Guidelines for the design of footbridges, federation internationale du béton (fib) bulletin 32, November 2005.

Georgakis C.T. & Ingólfsson E.T., Vertical footbridge vibrations: the response spectrum methodology, *Footbridge 2008 / Third International Conference*, Porto, 2008

Ingólfsson E.T., Georgakis C.T. & Svendsen M.N., Vertical footbridge vibrations: details regarding and experimental validation of the response spectrum methodology, *Footbridge 2008 / Third International Conference*, Porto, 2008

Línuhönnun h.f., *Göngubrýr – sveiflumælingar*, Rannsóknarskýrsla fyrir vegagerðarina, Febrúar. Á vef *Vegagerðarinnar* <http://www.vegagerdin.is/upplýsingar-og-utgafa/rannsoknarskyrslur/>.

Mackenzie D., Barker C., McFadyen N. & Allison B., Footbridge pedestrian vibration limits, Part 2: Human sensitivity, *Footbridge 2005 – Second International Conference*, Venice, 2005

ISO/CD 10137:2005, Basis for design of structures – Serviceability of buildings against vibration, International Standard Organisation, Committee draft, 2005

The Steel Construction Institute (SCI) (2007), Design of floors for vibration: A new approach, SCI Publication 319, 2007

Willford, M. & Young, P. (2006), Design guide for the footfall induced vibration of structures. CCIP-016. The concrete Centre, Camberley, 2006

VIÐAUKI A: EINFÖLD AÐFERÐ TIL AÐ REIKNA SVÖRUN GÖNGUBRÚA

Almennt

Þessa einföldu aðferð má nota til að reikna svörun göngubrúa við álagi frá stökum vegfarenda sem og litlum hóp af vegfarendum (bæði gangandi og hlaupandi), þ.e. fyrir álagstíffelli A,B,C og D. Aðferðinni sem lýst er hér á við þegar sveifluform brúarinnar eru vel aðskilin. Álaginu er lýst með Fourier röð á eftirfarandi hátt:

$$F(t) = \alpha_1 G_p \sin(2\pi f_p t) + \alpha_2 G_p \sin(4\pi f_p t - \pi/2) + \alpha_3 G_p \sin(6\pi f_p t - \pi/2) \quad (25)$$

Álagið samanstendur því af þremur hreinsveiflubylgjum (sínusbylgjum) við tíðnirnar f_p , $2f_p$ og $3f_p$, kallaðar tíðnir álagsins (einnig ritað sem jf_p , $j=1,2,3$). Við hverja álagstíðni, skal reikna út svörun hvers sveifluforms (hér er sveifluformin táknuð með i , þar sem $n=1,2,\dots,N_{\text{sveifluform}}$) með eftirfarandi jöfnu:

$$a_{RMS,j,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{N_{\text{fólk}}} \frac{G_p \alpha_j}{M_n} (j\beta_n)^2 H_{j,n} \psi_{j,n}, \quad \begin{cases} j = 1, 2, 3 \\ n = 1, 2, \dots, N_{\text{sveifluform}} \end{cases} \quad (26)$$

Þar sem $N_{\text{fólk}}$ er fjöldi fólks í hópnum, G_p er meðalþyngd vegfarenda (780 N), α_j er Fourier stuðull álagstíðni j og $H_{j,i}$ er svörunarstuðull sveifluforms n við álagstíðni j og $\psi_{j,n}$ er minnkunarstuðull:

$$H_{j,n} = \frac{1}{\sqrt{(1 - [j\beta_n]^2)^2 + (2\zeta_n j\beta_n)^2}}, \quad \begin{cases} j = 1, 2, 3 \\ n = 1, 2, \dots, N_{\text{sveifluform}} \end{cases} \quad (27)$$

$$\beta_n = f_p / f_n, \quad n = 1, 2, \dots, N_{\text{sveifluform}} \quad (28)$$

$$\psi_{j,n} = 1 - e^{-2\pi\zeta_n N_j}, \quad \begin{cases} j = 1, 2, 3 \\ n = 1, 2, \dots, N_{\text{sveifluform}} \end{cases} \quad (29)$$

$$N_j = 0,75 jL, \quad j = 1, 2, 3 \quad (30)$$

Þar sem

M_n : er almassi (e. modal mass) sveifluforms n [kg]

f_p : er göngutíðni vegfarandans [Hz] (skref á sekúndu)

f_n : er tíðni sveifluforms númer n [Hz]

ζ_n : er deyfing sveifluforms n sem hlutfall af krítískri deyfingu

L : er haflengd brúarinnar í [m]

Fyrir hverja álagstíðni skal reikna út heildarsvörun (RMS) brúarinnar:

$$a_{RMS,j} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_{\text{sveifluform}}} a_{RMS,j,n}^2}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (31)$$

Svörunarstuðullinn R skal reiknaður fyrir hverja álagstíðni j með eftirfarandi jöfnu:

$$R_j = \frac{a_{RMS,j}}{a_{b,RMS,j}}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (32)$$

Þar sem $a_{b,RMS}$ reiknast skv. jöfnu (1) og notað er $f=jf_p$:

$$a_{b,RMS,j} = \begin{cases} 0.010/\sqrt{jf_p} & \text{þegar } 1\text{ Hz} \leq jf_p \leq 4\text{ Hz} \\ 0.005 & \text{þegar } 4\text{ Hz} \leq jf_p \leq 8\text{ Hz}, \\ 625 \cdot 10^{-6} / jf_p & \text{þegar } jf_p > 8\text{ Hz} \end{cases} \quad j = 1, 2, 3 \quad (33)$$

Heildar svörunarstuðullinn R skal reiknaður á eftirfarandi hátt og borinn saman við leyfilega svörunarstuðul úr kafla 4: $R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2} < k_1 \times k_2 \times k_3 \times R_{\max}$.

Svörun vegna eins sveifluforms

Mögulegt er að einfalda aðferðina hér að framan enn frekar með að líta einungis á svörun vegna eins sveifluforms og það er einungis ein tíðni (f_p) sem örvar sveifluna. Þá má rita stuðlana í jöfnum (26)-(29) á eftirfarandi hátt (fyrir $j=1$ og $n=1$).

$$H_{1,1} = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta_1^2)^2 + (2\zeta_1\beta_1)^2}} \quad (34)$$

$$\beta_1 = f_p / f_1 \quad (35)$$

$$\psi_{1,1} = 1 - e^{-2\pi\zeta_1 N_1} \quad (36)$$

$$N_1 = 0,75L \quad (37)$$

$$a_{RMS,j,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{N_{fólk}} \frac{G_p \alpha_1}{M_1} \beta_1^2 H_{1,1} (1 - e^{-1.5\pi\zeta_1 L}) \quad (38)$$

Ef tíðni álagsins er sú sama og eigintíðni brúarinnar þá einfaldast jafnan fyrir svörun við fyrsta sveifluform enn frekar og verður:

$$\beta_1 = f_p / f_1 = 1$$

$$H_{1,1} = \frac{1}{2\zeta}$$

$$a_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{N_{fólk}} \frac{G_p \alpha_1}{M_1} \frac{1}{2\zeta_1} (1 - e^{-1.5\pi\zeta_1 L})$$

Svörunarstuðullinn R er svo reiknaður eins og í jöfnu (31) og borinn saman við leyfilegan svörunarstuðul í samræmi við kafla 4.

Í töflu 11 hér fyrir neðan má sjá algeng gildi á deyfingarhlutfalli sem nota má við hönnun. Fyrir nákvæmara mat á deyfingu kerfisins má nota aðferðina sem greint er frá í FIB ritinu 'Guidelines for design of footbridges' [FIB 2005].

Tafla 11: Algeng gildi á deyfingarhlutfalli ζ [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	--

* Stálbrýr þar sem mikið er af boltuðum tengingu eru oft mun meira deyfðar en fram kemur í töflunni

VIÐAUKI B: SVÖRUN GÖNGUBRÚA VIÐ ÁLAGI FRÁ STÆRRI HÓPUM AF GANGANDI VEGFARENDUM

Til að meta mestu svörun göngubrúar vegna gangandi vegfarenda sem ganga inn á brúna í stöðugum straumi má nota aðferðina sem lýst er hér á eftir. Aðferðin byggir á tölulegum hermunum þar sem álagið frá stökum vegfaranda er reiknað samkvæmt [Ingólfsson et.al. 2008; Georgakis & Ingólfsson 2008]:

$$F_V^i(x,t) = \begin{cases} G_p^i \left[1 + \sum_{j=1}^{N_g} \alpha_j \sin(j2\pi f_p (t-t_{ar}) - \theta_k) \right] \delta(x - v_p (t-t_{ar})) & \text{þegar } t_{ar} \leq t \leq T_{0,i} \\ 0 & \text{annars} \end{cases} \quad (39)$$

Þar sem G_p^i er þyngd vegfarandans, α_j er Fourier stuðull álagstíðni jf_p , ($j = 1,2$), t_{ar} er komutími vegfarandans á brúna og v_p er gönguhraðinn. Álagi frá hópi gangandi vegfarenda er lýst á eftirfarandi hátt:

$$F(x,t) = \sum_{i=1}^N F_V^i(x,t) \quad (40)$$

Göngutíðni vegfarendanna eru normaldreifðar með meðalgöngutíðni μ_{fp} á bilinu $1,80 \text{ Hz} \leq \mu_{fp} \leq 2,00 \text{ Hz}$. Til að nota aðferðina skal hönnuður því velja þá meðalgöngutíðni sem er óhagstæðust fyrir brúna sem til skoðunar er. Í sumum tilvikum þarf að skoða fleiri en eina meðalgöngutíðni. Fyrir hverja álagstíðni j (f_p og $2f_p$) skal reikna út heildarsvörun brúarinnar sem SRSS summu af svörun hvers sveifluforms, þ.e.:

$$a_{RMS,j} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_{\text{sveifluform}}} a_{RMS,n}^2}, \quad j = 1, 2 \quad (41)$$

Fyrir hvert sveifluform og hverja álagstíðni er stuðullinn r skilgreindur:

$$r = \frac{f_n}{j\mu_{f_p}} \quad (42)$$

Svörun hvers sveifluforms má reikna á eftirfarandi hátt:

$$\hat{a}_{RMS,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{a}_R \cdot \beta_L \cdot \beta_\zeta \cdot \beta_\phi \cdot \beta_M \cdot \beta_\lambda \cdot \beta_R \cdot \beta_f, \quad n = 1, 2, \dots, N_{\text{sveifluform}} \quad (43)$$

Þar sem:

\hat{a}_R : grunnhröðun sveifluforms n (m/s^2)

β_L : Haf lengdar stuðull

β_ζ : Deyfingar stuðull

β_ϕ : Sveifluforms stuðull

β_M : Massa stuðull

β_λ : Þéttleika stuðull

β_f : Göngutíðni stuðull

β_R : Endurkomutíma stuðull

Grunnhróðun sveifluformsins má ákvarða með eftirfarandi jöfnu þar sem stuðlarnir A-E ákvarðast út frá töflu 11:

$$\hat{a}_R = A \exp\left\{\frac{-(1-r)^2}{B}\right\} + C \exp\left\{\frac{-(1-r)^2}{D}\right\} + E \quad (44)$$

Ef stuðullinn r uppfyllir ekki kröfuna í töflu 11, má gera ráð fyrir að það sveifluform örvist ekki við gangandi vegfarendur.

Tafla 12: Mismunandi álagstíðni fyrir stakan vegfarenda

Álagstíðni, j	A	B	C	D	E	Krafa
1	0,6113	0,0151	0,0661	0,0202	0,0338	$0,5 \leq r \leq 1,5$
2	0,1501	0,0146	0,0159	0,0243	0,0097	$1,5 \leq r$

Margföldunarstuðlana, β , skal ákvarða með eftirfarandi jöfnum:

$$\beta_L = \left(\frac{L}{50} \right)^{\eta_L} \quad (45)$$

$$\eta_L = -0.11 + 0.622r \quad r = f / \bar{f}_p \leq 1 \quad (46)$$

$$\eta_L = 1.134 - 0.622r \quad r = f / \bar{f}_p > 1 \quad (47)$$

$$\beta_\zeta = \left(\frac{0.005}{\zeta} \right)^{\eta_\zeta} \quad (48)$$

ζ : deyfingarstuðull sveifluformsins sem hlutfall af krítískri deyfingu

$$\eta_\zeta = 1.25r - 0.743 \geq 0 \quad r = f / \bar{f}_p \leq 1 \quad (49)$$

$$\eta_\zeta = 1.758 - 1.25r \geq 0 \quad r = f / \bar{f}_p > 1 \quad (50)$$

$$\beta_\phi = \sqrt{\frac{2L\varepsilon}{\pi}} \quad (51)$$

$\Phi(x)$: sveifluform brúarinnar, kvarðað þannig að $\max |\phi(x)| = 1$

$$\varepsilon = \int_0^L |\phi(x)| dx \quad (52)$$

Ath: íhaldsamt má taka $\beta_\phi = 1$.

$$\beta_M = \frac{100,000 \text{ kg}}{M} \quad (53)$$

M : almassi kerfisins, kvarðaður miðað við að $\max |\phi(x)| = 1$

$$\beta_\lambda = \sqrt{\lambda} \quad (54)$$

λ : Fjöldi vegfarenda sem ferðast yfir brúna per sekúndu

$$\beta_r = 1 + 0.56(\mu_r - 1.8) \quad (55)$$

μ_r : Meðalgöngutíðni hópsins

Hröðunin sem reiknuð er miðast við 10 mínútna endurkomutíma. Fyrir önnur gildi má nota eftirfarandi nálgunarformúlu:

$$\beta_R = \left(0.77 + \frac{\ln(T_R/60)}{10} \right) + \gamma \quad (56)$$

$$\gamma = 0.3 \sin(\ln(T_R)(2\pi)0.02 - 0.1) - 0.19,$$

$$T_R: \text{Endurkomutíminn í sekúndum. Gildir þegar } 10 < T_R < 10^{11} \text{ sekúndur} \quad (57)$$

Svörunarstuðullinn R skal reiknaður fyrir hverja álagstíðni j með eftirfarandi jöfnu:

$$R_j = \frac{a_{RMS,j}}{a_{b,RMS,j}}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (58)$$

Þar sem $a_{b,RMS}$ reiknast skv. jöfnu (1) og notað er $f = jf_p$:

$$a_{b,RMS,j} = \begin{cases} 0.010 / \sqrt{jf_p} & \text{þegar } 1 \text{ Hz} \leq jf_p \leq 4 \text{ Hz} \\ 0.005 & \text{þegar } 4 \text{ Hz} \leq jf_p \leq 8 \text{ Hz,} \\ 625 \cdot 10^{-6} / jf_p & \text{þegar } jf_p > 8 \text{ Hz} \end{cases} \quad j = 1, 2, 3 \quad (59)$$

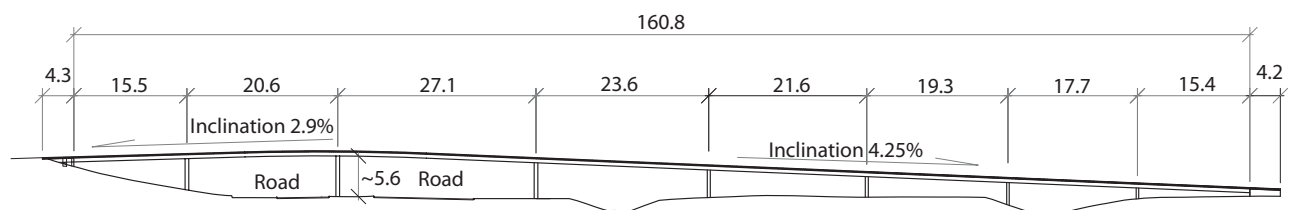
Heildar svörunarstuðullinn R skal reiknaður á eftirfarandi hátt og borinn saman við leyfilega svörunarstuðul úr kafla 4: $R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2} < k_1 \times k_2 \times k_3 \times R_{\max}$.

VIÐAUKI C: DÆMI UM NOTKUN

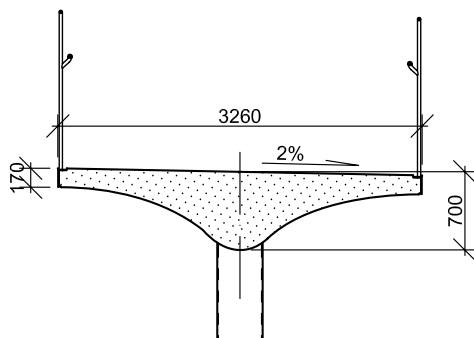
Eftirfarandi er dæmi um notkun hönnunarviðmiðanna fyrir brýr sem hafa verið til skoðunar, þ.e. göngubrú yfir Hringbraut við Njarðargötu.

Lýsing á brúnni

Brúin er eftirspennt samfelld bitabrá í 9 höfum. Heildarlengd brúarinnar er 170m með lengsta hafi 27,1m. Langsnið brúarinnar má sjá á mynd 6. Þversnið brúarinnar er það sama alla leið, þ.e. dýpt bitans er 700 mm í miðju en 170 mm út við brúarkantinn. Handrið brúarinnar eru fest við innsteyptan stálvinkil í brúarkantinum eins og sjá má á mynd 7 og er heildarbreidd brúardekksins 3,2m.



Mynd 6: Langsnið göngubrúar yfir Hringbraut við Njarðargötu



Mynd 7: Þversnið brúar

Inntaksstærðir

Fjaðurstuðull steypunnar

Við sveifflugreiningu 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.

Steypan 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 herra heldur en kröfurnar voru. Það hefur þau áhrif að fjaðurstuðull steypunnar er einnig mun hærri en gert var ráð fyrir við hönnun. 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 handbók frá FIB¹.

¹ 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.

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 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 13 sýnir tregðuvægi þversniðsins fyrir mismunandi staðsetningu kapla og bendistáls.

Tafla 13: Tregðuvægi þversniðs

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	$36,7 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$

Massi

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

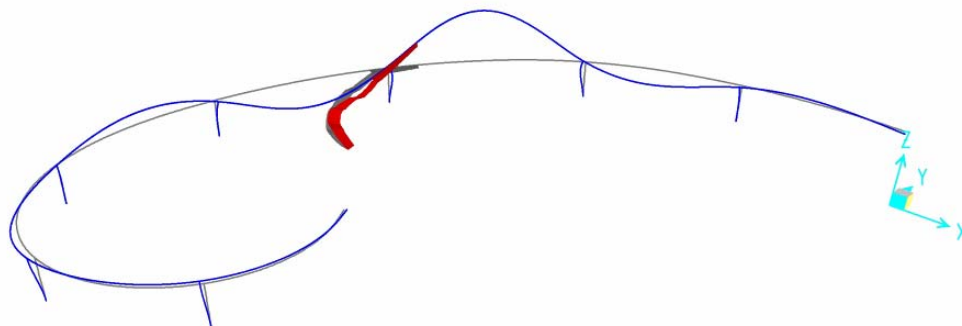
Randskilyrði

Randskilyrði geta haft töluverð áhrif á eiginsveifluform brúarinnar í reiknilíkaninu. Undirstöður brúarinnar eru annars vegar á súlum sem eru steypar saman við brúardekkið að ofan og jafnframt í steypa undirstöðu sem grunduð er á þjappaðri fyllingu. Við endastöpla situr yfirbyggingin á blýgúmmilegum en er haldið gagnvart láréttum kröftum með stálfestingum. Göngubrúnni er haldið í lang- og þverátt á báðum endastöplum.

Hér er fyrst og fremst verið að skoða lóðrétt sveifluform brúarinnar og breytingar á randskilyrðum, þ.e. hvort að súlur séu innspenntar í undirstöður hefur lítil áhrif á fyrsta lóðréttu grunnsvæiflutímann en hefur mikil áhrif á lárétta sveifluformin. En þó að áhrifin á lóðréttu sveifluformið sé lítið hafa breytingar á randskilyrðum nokkur áhrif á stífni brúarinnar og þar með svörun hennar.

Niðurstöður sveiflugreiningar

Fyrsta lóðréttu sveifluform samkvæmt eiginsveiflugreiningu var $f = 2,32 \text{ Hz}$ sem er mjög nálægt mældri eigintíðni sem var $f_{melt} = 2,3 \text{ Hz}$. Almassi (e. modal mass) fyrir fyrsta lóðréttu sveifluformið er $M = 56000 \text{ kg}$ (miðað við að mesta færsla í sveifluforminu er 1).



Mynd 8– Fyrsta lóðréttu sveifluform samkvæmt eiginsveiflugreiningu ($f=2,32 \text{ Hz}$ og $M= 56000 \text{ kg}$)

Skilgreining hönnunarviðmiða og álagslíkana

Flokkun göngubrúar (sbr. kafla 3)

Staðsetning: Brúin er göngubrú í þéttbýli yfir stofnbraut

Notkun: Almenn lítill umferð, stakir litlir hópar gangandi eða hlaupara en ekki líkur á stórum hópum.

Á grundvelli staðsetningar og ætlaðrar notkunar er valinn **flokkur 2**.

Leyfileg hröðun (sbr. kafla 4)

Ekki er talin ástæða til að setja strangar kröfur til hreyfinga brúarinnar og því valið að setja meðal kröfur til hreyfingar vegna titrings.

Margföldunarstuðull á grunnferil samkvæmt jöfnum 1 og 2 er því:

$$\text{Meðal kröfur} \Rightarrow \mathbf{R=100}$$

Grunnferillinn fyrir lóðréttan titring er ákvarðaður samkvæmt jöfnu 1, fyrir $f=2,32$ Hz fæst:

$$a_{b,RMS} = \frac{0,01}{\sqrt{f}} = \frac{0,01}{\sqrt{2,32}} = 0,00657 \text{ m/s}^2$$

$$a_{b,RMS} = \frac{0,01}{\sqrt{2,00}} = 0,00707 \text{ m/s}^2 \quad (\text{fyrir } f_p = 2,0 \text{ Hz})$$

Miðað skal við að gangandi vegfarandi skynji svörunina $\Rightarrow \mathbf{k_1 = 1,0}$

Hröð umferð er undir brúna sem hefur áhrif á öryggistilfinningu notenda $\Rightarrow \mathbf{k_2 = 0,8}$

Notendur brúarinnar eru fullfrískt fólk, þ.e. brúin er ekki staðsett nálægt sjúkrahúsi, dvalarheimili aldraðra eða grunnskóla $\Rightarrow \mathbf{k_3 = 1,0}$

Viðmiðunarhröðun sem bera skal saman við svörun brúarinnar er því:

$$a_{leyfileg} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times a_0 = 1,0 \times 0,8 \times 1,0 \times (0,00657 \times 100) = 0,525 \text{ m/s}^2$$

Mesta leyfilega hröðun vegna umferðar gangandi eða hlaupandi er

$$\mathbf{a_{leyfileg} = 0,53 \text{ m/s}^2}$$

Álagstílfelli (sbr. kafla 5)

Álagstílfelli sem þarf að skoða samkvæmt kafla 5 byggist á flokkun brúarinnar í flokk 2, þ.e. samkvæmt töflu 5 þarf að reikna svörun brúarinnar vegna eftirfarandi álagstílfella:

Álagstílfelli A	-	Stakur vegfarandi
Álagstílfelli B	-	Stakur vegfarandi
Álagstílfelli C	-	Lítill hópur gangandi (5 manns)
Álagstílfelli D	-	Lítill hlaupahópur (5 manns)
Álagstílfelli F	-	lárétt álagslíkan
Álagstílfelli G	-	skemmdarverk

Reiknuð svörun samkvæmt einfaldri aðferð

Í viðauka A er gefin einföld aðferð til að meta svörun frá stökum vegfaranda þegar tekið er einungis tillit til fyrsta lóðréttu sveifluforms. Hafi hærri sveifluform áhrif á svörun brúarinnar þá er ekki tryggt að þessi aðferð gefi niðurstöður sem eru öruggu megin.

Álagstilfelli A – Lóðrétt álag frá stökum gangandi vegfaranda:

Inntaksstærðir fyrir álagslíkan A eru gefnar í töflu 14 að neðan. Tilvik A1 á við fyrir meðal vegfaranda sem gengur á meðalgöngutíðni, meðan álagstilfelli A2 lýsir mestu svörun sem reiknað er með að stakur vegfarandi orsaki.

Tafla 14: Álagsstuðlar fyrir álagstilfelli A1 og A2

Tilvik	Göngutíðni (f_p)	Álagsstuðull (α_1)	Hlutfall tíðna ($\beta = f_p/f_1$)	Svörunarstuðull ($H_{1,1}$)
A1	2,00 Hz	$0,37(f_p - 0,95) = 0,39$	0,862	$H_{1,1} = \left[(1 - \beta_1^2)^2 + (2\zeta_1\beta_1)^2 \right]^{-0,5} = 3,9$
A2	2,32 Hz	$0,41(f_p - 0,95) = 0,56$	1,00	$H_{1,1} = 1/2\zeta_1 = 50$

Aðrar inntaksstærðir eru:

Fjöldi fólks:	$N=1$
Almassi (modal mass):	$M_1 = 56000 \text{ kg}$
Áætlað deyfingarhlutfall:	$\zeta_1 = 0,01$
Haflengd (aðalhaf):	$L = 27,1 \text{ m}$
Fjöldi skrefa:	$N_1 = 0,75L = 20,325$

Hröðunin fyrir tilvik A1 og A2 er nú reiknuð út frá eftirfarandi jöfnu

$$\mathbf{A1:} \quad a_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{0,39 \cdot 780N}{56000kg} \cdot 0,862^2 \cdot 3,9 \cdot (1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 20,325}) = \mathbf{0,01m/s^2}$$

$$\mathbf{A2:} \quad a_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{N_{fólk}} \frac{G_p \alpha_1}{M_1} \beta_1^2 H_{1,1} (1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot \zeta_1 N_1}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{0,56 \cdot 780N}{56000kg} \cdot 50 \cdot (1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 20,325}) = \mathbf{0,20m/s^2}$$

Mögnunarstuðullinn verður því:

$$\mathbf{A1:} \quad R = a_{RMS} / a_{b,RMS} = 0,01 / 0,00707 = \mathbf{1,4} < \mathbf{100}$$

$$\mathbf{A2:} \quad R = a_{RMS} / a_{b,RMS} = 0,20 / 0,00657 = \mathbf{30} < \mathbf{100}$$

Fyrir meðal kröfur sem skilgreindar voru fyrr er leyfilegur mögnunarstuðull $R=100$ og því stent brúin kröfurnar fyrir stakan gangandi vegfaranda sem gengur á óhagstæðustu göngutíðni (álagstilfelli A2) sé reiknað með einfaldaðri aðferð samkvæmt viðauka A. Einnig sést að svörun vegna meðalvegfaranda sem gengur yfir brúna er mjög lítil og varla greinanleg (álagstilfelli A1).

Álagstilfelli B - Lóðrétt álag frá stökum hlaupara:
Tafla 15: Álagsstuðlar fyrir álagstilfelli B1 og B2

Tilvik	Göngutíðni (f_p)	Álagsstuðull (α_1)	Hlutfall tíðna ($\beta = f_p/f_1$)	Svörunarstuðull ($H_{1,1}$)
B1	2,32 Hz	$0,313(f_p + 1,2) = 1,10$	1,00	$H_{1,1} = 1/2\zeta_1 = 50$
B2	2,32 Hz	$0,375(f_p + 1,2) = 1,32$	1,00	$H_{1,1} = 1/2\zeta_1 = 50$

Aðrar inntaksstærðir eru:

Fjöldi fólks: $N=1$

Þyngd: $G_p = 780 \text{ N}$

Almassi (modal mass): $M_1 = 56000 \text{ kg}$

Áætlað deyfingarhlutfall: $\zeta_1 = 0,01$

Fjöldi skrefa: $N_1 = 0,75L = 20,325$

Hröðunin fyrir tilvik A1 og A2 er nú reiknuð út frá eftirfarandi jöfnu

$$\mathbf{B1:} \quad a_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1,10 \cdot 780 \text{ N}}{56000 \text{ kg}} \cdot 50 \cdot (1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 20,325}) = \mathbf{0,39 \text{ m/s}^2}$$

$$\mathbf{B2:} \quad a_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1,32 \cdot 780 \text{ N}}{56000 \text{ kg}} \cdot 50 \cdot (1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 20,325}) = \mathbf{0,47 \text{ m/s}^2}$$

Mögnunarstuðullinn verður því:

$$\mathbf{B1:} \quad R = a_{RMS} / a_{b,RMS} = 0,39 / 0,00657 = \mathbf{59} < \mathbf{100}$$

$$\mathbf{B2:} \quad R = a_{RMS} / a_{b,RMS} = 0,47 / 0,00657 = \mathbf{72} < \mathbf{100}$$

Fyrir meðal kröfur sem skilgreindar voru fyrr er leyfilegur mögnunarstuðull $R=100$ og því stenst brúin kröfurnar fyrir stakan hlaupara (álagstilfelli B1 og B2) sé reiknað með einfaldaðri aðferð samkvæmt viðauka A. Hafi hærrí sveifluform áhrif á svörun brúarinnar þá er ekki tryggt að þessi aðferð gefi niðurstöður sem eru öruggu megin.

Fyrir álagstilfelli C – Lóðrétt álag frá litlum hópi gangandi:

Í þessu álagstilfelli er gert ráð fyrir að 5 manns gangi við meðalgöngutíðni fólks. Inntaksgildi í líkanið eru gefin í töflu 16 að neðan.

Tafla 16: Álagsstuðlar fyrir álagstilfelli C1

Tilvik	Göngutíðni (f_p)	Álagsstuðull (α_1)	Hlutfall tíðna ($\beta = f_p/f_1$)	Svörunarstuðull ($H_{1,1}$)
C1	2,00 Hz	$0,41(f_p - 0,95) = 0,56$	0,862	$H_{1,1} = \left[(1 - \beta_1^2)^2 + (2\zeta_1\beta_1)^2 \right]^{-0,5} = 3,9$

Svörun brúarinnar við þessu tilviki verður því:

$$C1: \quad a_{RMS} = \sqrt{5} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{0,56 \cdot 780N}{56000kg} \cdot 0,862^2 \cdot 3,9 \cdot (1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 20 \cdot 325}) = 0,03 m/s^2$$

$$C1: \quad R = a_{RMS} / a_{b,RMS} = 0,03 / 0,00707 = 4,2 < 100$$

Fyrir meðal kröfur sem skilgreindar voru fyrir er leyfilegur mögnunarstuðull $R=100$ og því stent brúin kröfurnar fyrir lítinn hóp gangandi vegfarenda (álagstilfelli C) sé reiknað með einfaldaðri aðferð samkvæmt viðauka A. Hafri hærri sveifluform áhrif á svörun brúarinnar þá er ekki tryggt að þessi aðferð gefi niðurstöður sem eru öruggu megin. Hér er svörunarstuðullinn töluvert lægri en fyrir stakan vegfaranda sem gengur á eigintíðni brúarinnar. Þetta er vegna þess að álagstilfellið tekur tillit til þess að litlar líkur eru á því að heill hópur af fólki ganga nákvæmlega á eigintíðni brúarinnar. Þetta álagstilfelli er því ekki ráðandi fyrir hönnun á brúnni.

Fyrir álagstilfelli D – Lóðrétt álag frá litlum hópi hlaupara:
Tafla 17: Álagsstuðlar fyrir álagstilfelli D1

Tilvik	Göngutíðni (f_p)	Álagsstuðull (α_1)	Hlutfall tíðna ($\beta = f_p/f_1$)	Svörunarstuðull ($H_{1,1}$)
D1	2,32 Hz	$0,375(f_p + 1,2) = 1,32$	1,00	$H_{1,1} = 1/2\zeta_1 = 50$

$$D1: \quad a_{RMS} = \sqrt{5} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1,32 \cdot 780N}{56000kg} \cdot 1,0 \cdot 50 \cdot (1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 20 \cdot 325}) = 1,05 m/s^2$$

$$D1: \quad R = a_{RMS} / a_{b,RMS} = 1,05 / 0,00657 = 160 > 100$$

Fjöldi fólks: $N=5$

$$a_{RMS} = \sqrt{N_{fólk}} \times \text{álagstilfelli} B = \sqrt{5} \times 0,467 = 1,044$$

$$R = a_{RMS} / a_{b,RMS} = 0,443 / 0,00657 = 158,9 > 100$$

Fyrir meðal kröfur sem skilgreindar voru fyrir er leyfilegur mögnunarstuðull $R=100$ og því stent brúin ekki kröfurnar fyrir lítinn hóp hlaupara (álagstilfelli D) sé reiknað með einfaldaðri aðferð samkvæmt viðauka A.

Mögulegt er að skilgreina kröfurnar upp á nýtt fyrir lítinn hóp hlaupara í samráði við eiganda, þ.e. að skilgreina litlar kröfur fyrir viðmiðunarhröðun ($R=200$) fyrir lítinn hóp hlaupara. Það hefur þær afleiðingar að hreyfingar brúarinnar eru vel greinilegar fyrir kyrrstæða og gangandi vegfarendur þegar 5 manna hópur hlaupara fer yfir brúna en fyrir hlaupara eru þessar hreyfingar ekki eins greinilegar og því ekki óbærilegar.