



Lárétt stífní staura

INGA RUT HJALTADÓTTIR

Verkfræðideild
Háskóla Íslands
Febrúar 2007

Lárétt stífní staura

INGA RUT HJALTADÓTTIR

15 eininga meistaraverkefni

Leiðbeinendur:

Bjarni Bessason
Jón Skúlason

Umhverfis- og byggingaverkfræðiskor
Verkfræðideild
Háskóli Íslands
Reykjavík, mars 2007

Lárétt stífní staura

© Inga Rut Hjaltadóttir, 2007

Umhverfis og byggingaverkfræðiskor

Verkfræðideild

Háskóli Íslands

Hjarðarhaga 2-6

107 Reykjavík, Ísland

Sími: +354 525 4000

Útdráttur

Verkefnið fjallar um lárétta stífni staura, sérstaklega við jarðskjálftaáraun. Samvirkni jarðvegs, staura og burðarvirkis er afar flókið fyrirbæri og er reynt á sem einfaldastan hátt að skilgreina hana og nota þær niðurstöður til að meta stífni stauranna. Stuðst var við mælingar sem gerðar voru á Skeiðarársandi 1974 og í Hrótafirði sumarið 2006. Með því að bera saman niðurstöður mælinganna kom í ljós að þrátt fyrir mismunandi mælistaði voru þær að gefa nokkuð svipaðar niðurstöður sem styrkti þær vonir að hægt væri að þróa aðferðarfræði sem nota mætti til að heimfæra á önnur brúarstæði og fá þannig nálgun á svörun staura í jarðvegi.

Meðaltalsgröf fyrir skúfbylgjuhraða jarðvegsins og stífni stakra staura voru gerð út frá niðurstöðum mælinganna og þau síðan notuð til að meta stífni staura við svipaðar aðstæður annars staðar. Nokkur tilbúin dæmi voru sett upp til þess að sýna hvernig nota megi aðferðarfræðina sem lýst er í verkefninu. Auk þess var gert líkan af brú í einingarforriti þar sem notast var við teikningar af fyrirhugaðri brú sem byggja á yfir Hrótafjarðará í Hrótafirði. Á hana voru keyrðar skráðar hröðunar tímaraðir frá Helli síðan í jarðskjálftanum 17. júní árið 2000. Niðurstöður voru í lokin dregnar saman og mat lagt á hvað hægt sé að gera í framhaldi þessa verkefnis.

English abstract

Lateral stiffness of piles is the main subject of this project, especially under seismic loading. Interaction between soil, pile and structure is very complicated suspect and in this project the interaction is defined in a simplicated way and the outcome then used to estimate the stiffness of a pile. Measurements from 1974 from Skeiðarársandur and from Hrótafjörður 2006 was used in this case. Comparisons of these results were interesting because of the similarity between these different places of the measurements. It gave hopes for continuation of developing this method wich may then be used for another cases and thereby get estimation for reaction of piles in soil.

Lateral stiffness of piles with respect to seismic loading is the main subject of this project,. Seismic interaction between soil, pile and structure is a very complicated problem. In this project simplified methods are adopted and used to estimate the lateral stiffness of piles using measurements from from two sites on Skeiðarársandur in 1974 and from one site in Hrótafjörður in 2006. Similar results were obtained for these three sites which indicates that methodology can be used for other comparable sites as well.

From the results of the measurements, average graphs for shear wave velocity and lateral pile stiffness were presented and examples were given where these graphs were used to estimate stiffnesses of piles for other alike sites. sFurthermore, a finite element model of a new bridge in Hrótafjörður was created. Recorded acceleration time histories from Hella from the South Iceland earthquake of 17 June 2000 was used to show the behavior of the bridge in an earthquake. In the end the results were summarized and evaluted what is interesting in a continuation of this project.

FORMÁLI

Þegar brýr eru hannaðar á jarðskjálftasvæði þarf að taka tillit til þess við hönnun þeirra. Þó nokkuð er um að brýr hérlendis séu grundaðar á staurum. Lárétt stífni staura hefur hins vega alltaf verið erfitt að meta m.a. vegna erfiðleika við að skilgreina hvernig staurar, jarðvegur og burðarvirki verka saman við jarðskjálfta. Viðfangsefni þessa verkefnis er því að reyna að skilgreina einfalda aðferðarfræði til að meta lárétta stífni staura við lárétt álag.

Í lok verkefnisins er raunverulegt dæmi skilgreint þar sem aðferðarfræðin er notuð. Tekið er dæmi um brú sem búið er að hanna yfir Hrutafjarðará í Hrutafirði og reiknað með að hún sé á jarðskjálftasvæði.

Verkefnið er lokaverkefni til meistaraþrófs við umhverfis- og byggingarverkfræði við Háskóla Íslands. Leiðbeinandi í verkefninu var Bjarni Bessason prófessor og fær hann bestu þakkir fyrir góð ráð og ómælda aðstoð. Jón Skúlason fær einnig bestu þakkir fyrir afnot af mæligögnum sem hann hafði undir höndum og fyrir yfirlestur á lokasprettinum. Einar Hafliðason hjá Vegagerðinni veitti aðstoð við gagnasöfnun og á hann þakkir skildar fyrir það.

Verkefnið var styrkt af Rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar.

EFNISYFIRLIT

ÚTDRÁTTUR.....	V
FORMÁLI.....	VII
EFNISYFIRLIT	IX
MYNDALISTI.....	XI
TÖFLULISTI	XIII
TÁKNASKRÁ	XIV
1 INNGANGUR.....	1
1.1 BAKGRUNNUR.....	1
1.2 MARKMIÐ	1
1.3 TENGD VERKEFNI.....	1
1.4 EFNISTÖK VERKEFNIS	2
2 FRÆÐI.....	3
2.1 SAMVIRKNI BURÐARVIRKIS, STAURS OG JARÐVEGS VIÐ JARÐSKJÁLFTAÁRAUN	3
2.1.1 Fjarsviðsáhrif.....	4
2.1.2 Tregðuáhrif.....	4
2.1.3 Nærsviðsáhrif.....	4
2.2 ÁKVÖRÐUN Á JARÐVEGSEIGINLEIKUM	6
2.3 LÁRÉTTAR FORMBREYTINGAR STAKS STAURS	7
2.3.1 Staur frjáls að ofan.....	7
2.3.2 Innspenntur staur	11
2.3.3 Innspenntur staur - laus	13
2.4 STÍFNI STAKS STAURS	13
2.5 STAURABYRPINGAR	15
2.5.1 Einföld aðferð.....	15
2.5.2 Stefnuháð, einföld aðferð	16
2.5.3 Tíðni- og stefnuháð aðferð	18
2.6 DEYFING	19
2.7 BLÝGÚMMÍLEGUR.....	21
3 MÆLINGAR Á STÍFNI OG BURÐARÞOLI STAURA	23
3.1 ELDRI MÆLINGAR	23
3.2 NÝJAR MÆLINGAR	25
3.3 ÚRVINNSLA MÆLINGA	28
3.3.1 Bakreiknaður skúfbylgjuhraði miðað við mælda færslu við jarðvegsyfirborð.....	28
3.3.2 Skúfbylgjuhraði bakreiknaður miðað við mælda færslu við efri enda staura.....	33
3.3.3 Stífni stakra staura	35
4 TÖLULEG DÆMI	39
4.1 STAKUR STAUR – HÖNNUNARFÆRSLA 0,4 CM.....	39
4.1.1 Staur með frjálsan enda	39
4.1.2 Innspenntur staur	40
4.2 STAURABYRPING MEÐ FJÓRUM STAURUM – HÖNNUNARFÆRSLA 0,4 CM	41
4.2.1 Einföld aðferð.....	42
4.2.2 Stefnuháð, einföld aðferð	42
4.3 ÞEKKT STÆRÐ AF STAUR VIÐ SVIPAÐAR AÐSTÆÐUR OG VIÐ SKEIÐARÁ	43
4.4 ÓÞEKKT STÆRÐ Á STAUR VIÐ SVIPAÐAR AÐSTÆÐUR OG VIÐ SKEIÐARÁ.....	43

5	TÖLVULÍKAN AF BRÚ	45
5.1	BAKGRUNNUR.....	45
5.2	KENNISTÆRÐIR BRÚARINNAR.....	46
5.2.1	<i>Þversnið yfirbyggingar</i>	46
5.2.2	<i>Landstöplar</i>	46
5.2.3	<i>Millistöpull</i>	47
5.2.4	<i>Staurar</i>	47
5.2.5	<i>Blygúmmilegur</i>	51
5.3	JARÐSKJÁLFTAÁLAG.....	51
5.4	UPPSETNING TÖLVULÍKANS	53
5.5	NÍÐURSTÖÐUR	53
6	LOKAORÐ.....	57
	HEIMILDASKRÁ.....	59
	VIÐAUKI A	

MYNDALISTI

<i>Mynd 1. Samvirkni jarðvegs, stauris og burðarvirkis vegna jarðskjálftaörvunar [byggt á Malhotra, 2004].</i>	4
<i>Mynd 2. Bilmyndun milli jarðvegs og stauris [byggt á Malhotra, 2004].</i>	5
<i>Mynd 3. Ferill sem sýnir skúfstuðul sem fall af skúfstreitu [Kramer, 1996].</i>	6
<i>Mynd 4. Winkler líkan.</i>	7
<i>Mynd 5. Staur í jarðvegi sem verður fyrir láréttum krafti Q_g og vægi M_g við yfirborð jarðvegs. a) formbreytingarferill, b) hallaferill, c) vægisferill, d) skúfkraftsferill, e) ferill fyrir svörun jarðvegs [Prakash, ártal vantar].</i>	8
<i>Mynd 6. Skilgreining hnitakerfis staur [GeoSpectra, 1997].</i>	14
<i>Mynd 7. Graf sem sýnir samvirknistuðul α sem fall af hlutfallinu bil milli staura/þvermál staura fyrir staura sem eru frjálssir að ofan [GeoSpectra, 1997].</i>	17
<i>Mynd 8. Graf sem sýnir samvirknistuðul α sem fall af hlutfallinu bil milli staura/þvermál staura fyrir staura sem eru innspenntir að ofan [GeoSpectra, 1997].</i>	17
<i>Mynd 9. Fjögurra staura þyrping [Bjarni Bessason og Jón Snæbjörnsson, 2005]</i>	18
<i>Mynd 10. Dæmi um hysteretíska deyfingu þar sem grafið sýnir kraft sem fall af færslu [Wang o.fl., 1998].</i>	19
<i>Mynd 11. Þrjár mismunandi útfærslur á geislunardeyfingu. c) er besta nálgunin sem notuð er í þessari heimild þar sem hún sýnir nokkuð vel hvernig bylgjurnar eru í raun en þó með vissum einföldunum [Wang o.fl., 1998].</i>	19
<i>Mynd 12. Vinstra megin má sjá líkan sem hefur deyfingarnar hliðtengdar en hægra megin líkan með deyfingarnar raðtengdar [Wang o.fl., 1998].</i>	20
<i>Mynd 13. Deyfingarstuðullinn ξ sem fall af skúfstreitunni γ_c [Kramer, 1996].</i>	21
<i>Mynd 14. Uppbygging blýgúmmilegu [Eggert V. Valmundsson, 2004].</i>	22
<i>Mynd 15. Hysteretísk slaufa sem lýsir stífni blýgúmmilegu ($D = y$: færsla) [Naeim og Kelly, 1999].</i>	22
<i>Mynd 16. P-y ferill fyrir Skeiðará.</i>	24
<i>Mynd 17. P-y ferill fyrir Gígju.</i>	25
<i>Mynd 18. Aðstæður á mælistað. Staur 1 lengst til hægri og staur 2 í miðjunni. Staurinn lengst til vinstri var ekki prófaður.</i>	25
<i>Mynd 19. Aðstæður á mælistað, staur 3.</i>	26
<i>Mynd 20. Staur 1 prófaður. Sjá má hvernig gamli landstöpullinn var notaður sem viðspyrna.</i>	26
<i>Mynd 21. Uppsetning við mælingar</i>	27
<i>Mynd 22. P-y ferill fyrir Selá.</i>	28
<i>Mynd 23. Samanburður á P-y gröfum fyrir alla staurana.</i>	28
<i>Mynd 24. V_s-y ferill fyrir Skeiðará.</i>	31
<i>Mynd 25. V_s-y ferill fyrir Gígju.</i>	31
<i>Mynd 26. V_s-y ferill fyrir Selá.</i>	32
<i>Mynd 27. Ferlar allra stauranna auk meðaltalslínu (svarta línan).</i>	32
<i>Mynd 28. Nálgun staura sem bita.</i>	33
<i>Mynd 29. V_s-y ferill fyrir Selá miðað við færslur við efri enda stauris.</i>	34
<i>Mynd 30. Stífni – færsluferill, K_{11}-y, fyrir Skeiðará, steypur staur 29x29 cm, ásamt meðaltalsferli.</i>	36
<i>Mynd 31. Stífni - færsluferill, K_{11}-y, fyrir Gígju, steypur staur 29x29 cm, ásamt meðaltalsferli.</i>	36
<i>Mynd 32. Stífni – færsluferill, K_{11}-y, fyrir Selá, steypur staur 27x27 cm, ásamt meðaltalsferli.</i>	37

Mynd 33. Stífni – færsluferill, K_{11} -y, meðaltalsferill fyrir alla mælistaðina	37
Mynd 34. Ferlar fyrir færsluna (y), vægið (M), hallann (S), skúfkraftinn (V) og svörun jarðvegsins (p). Ferlarnir eru bara sýndir niður á 6 metra dýpi þar sem að þar fyrir neðan er engin breyting.....	40
Mynd 35. Ferlar fyrir færsluna (y), vægið (M), hallann (S), skúfkraftinn (V) og svörun jarðvegsins (p). Ferlarnir eru bara sýndir niður á 6 metra dýpi þar sem að þar fyrir neðan er engin breyting.....	41
Mynd 36. Uppsetning 2x2 stauraþyrpingu í dæmum í köflum 4.2.1 og 4.2.2 (málsetningar í mm).	41
Mynd 37. Núverandi brú yfir Hrutafjarðará [Gunnar H. Jóhannesson, 2006].....	45
Mynd 38. Þversnið yfirbyggingar, málsetning í mm.	46
Mynd 39. Þversnið landstöpsuls og staðsetning staura, málsetning í mm.	47
Mynd 40. Staðsetning staura í millistöpli, málsetning í mm.	47
Mynd 41. Tímaröð jarðskjálftans á Hellu, 17. júní 2000, kl. 15.40 í langátt brúarinnar.....	52
Mynd 42. Tímaröð jarðskjálftans á Hellu, 17. júní 2000, kl. 15.40 í þverátt brúarinnar.....	52
Mynd 43. Tímaröð jarðskjálftans á Hellu, 17. júní 2000, kl. 15.40 í lóðrétta stefnu.....	52
Mynd 44. Líkan 1 sem notað var í SAP2000 til nálgunar á brúnni.	53
Mynd 45. Líkan 2, einfaldara líkan sem notað var í SAP2000 til nálgunar á brúnni.....	53
Mynd 46. Færsla fyrir líkan 1 undir millistöpli, efst í staurunum, sem fall af tíma.	54
Mynd 47. Færsla fyrir líkan 1 í yfirbyggingu, yfir millistöpli, sem fall af tíma.	54
Mynd 48. Ferlar fyrir færsluna (y), vægið (M), hallann (S), skúfkraftinn (V) og viðspyrnu jarðvegsins (p). Ferlarnir eru bara sýndir niður á 6 metra dýpi þar sem að þar fyrir neðan gætir engra áhrifa.....	55
Mynd 49. Færsla fyrir líkan 2 í yfirbyggingu, yfir millistöpli, sem fall af tíma.	56

TÖFLULISTI

<i>Tafla 1. Gildi fyrir A-stuðla [Prakash, 1990].</i>	11
<i>Tafla 2. Gildi fyrir B-stuðla [Prakash, 1990].</i>	11
<i>Tafla 3. Minnkunarstuðlar vegna þyrpinga áhrifa [Prakash, 1990].</i>	16
<i>Tafla 4. Kennistærðir staura, Skeiðará [Jón Skúlason, 1975].</i>	23
<i>Tafla 5. Kennistærðir staura, Gígja [Jón Skúlason, 1974].</i>	23
<i>Tafla 6. Niðurstöður mælinga fyrir Skeiðará [byggt á: Jón Skúlason, 1975].</i>	23
<i>Tafla 7. Niðurstöður mælinga fyrir Gígju [byggt á Jón Skúlason, 1974].</i>	24
<i>Tafla 8. Kennistærðir staura í Selá</i>	27
<i>Tafla 9. Niðurstöður mælinga fyrir Selá.</i>	27
<i>Tafla 10. Niðurstöður útreikninga á skúfbylgjuhraða fyrir Skeiðará.</i>	30
<i>Tafla 11. Niðurstöður útreikninga á skúfbylgjuhraða fyrir Gígju.</i>	30
<i>Tafla 12. Niðurstöður útreikninga á skúfbylgjuhraða fyrir Selá.</i>	30
<i>Tafla 13. Niðurstöður útreikninga á skúfbylgjuhraða fyrir Selá miðað við færslur við efri enda staura.</i>	34
<i>Tafla 14. Niðurstöður útreikninga á stífni staura í Skeiðará, steiptur staur 29x29 cm.</i>	35
<i>Tafla 15. Niðurstöður útreikninga á stífni staura í Gígju, steiptur staur 29x29 cm.</i>	35
<i>Tafla 16. Niðurstöður útreikninga á stífni staura í Selá, steiptur staur 27x27 cm.</i>	35
<i>Tafla 17. Útreikningar á α - stuðli fyrir staur nr 10 í landstöpli þegar álag er í þverátt brúar.</i>	48
<i>Tafla 18. Útreikningar á α - stuðli fyrir staur nr. 10 í landstöpli þegar álag er í langátt brúar.</i>	49
<i>Tafla 19. Útreikningar á α - stuðli fyrir staur nr. 14 í millistöpli þegar álag er í þverátt brúar.</i>	49
<i>Tafla 20. Útreikningar á α - stuðli fyrir staur nr. 14 í millistöpli þegar álag er í langátt brúar.</i>	50
<i>Tafla 21. β - minnkunarstuðlar fyrir land- og millistöpul.</i>	50

TÁKNASKRÁ

a :	mæld færsla við jarðvegsyfirborð
A :	flatarmál staur
A_m :	vægisfasti vegna lárétts krafts, töflugildi
A_p :	fasti fyrir svörun jarðvegs vegna lárétts krafts, töflugildi
A_S :	hallafasti vegna lárétts krafts, töflugildi
A_v :	skúfkraftsfasti vegna lárétts krafts, töflugildi
A_y :	færslufasti vegna lárétts krafts, töflugildi
b :	mæld færsla við efsta enda mælistiku
B_m :	vægisfasti vegna vægis, töflugildi
B_p :	fasti fyrir svörun jarðvegs vegna vægis, töflugildi
B_S :	hallafasti vegna vægis, töflugildi
B_v :	skúfkraftsfasti vegna vægis, töflugildi
B_y :	færslufasti vegna vægis, töflugildi
c :	dempunarfasti
c_{cr} :	kítískur dempunarstuðull
C_m :	vægis fasti fyrir innspenntan staur
C_S :	halla fasti fyrir innspenntan staur
C_v :	skúfkrafts fasti fyrir innspenntan staur
C_y :	færslu fasti fyrir innspenntan staur
d :	þvermál staur
D_i :	vægisarmur staur i um tilheyrandi snúningsás
E_p :	fjaðurstuðull staur
E_s :	fjaðurstuðull jarðvegs
f_1 :	færslufall vegna lárétt krafts
f_2 :	færslufall vegna vægis
F_y :	flotkraftur blýs
G_e :	minnkunarstuðull vegna þyrpingaráhrifa
G_{max} :	hreyfðarfræðilegur skúfstuðull
h_1 :	fjarlægð frá jarðvegsyfirborði að punkti sem krafturinn verkar í
h_2 :	fjarlægð frá jarðvegsyfirborði að punkti sem færsla b var mæld
h_3 :	fjarlægð frá álagspunkti að punkti sem færsla b var mæld
i :	tvinntölu i
I_y :	hverfitregða um y -ás
I_z :	hverfitregða um z -ás
I_p :	hverfitregða staur
K :	stífni staur
k_h :	stífnistuðull fyrir lárétta viðspyrnu jarðvegs við enda staur
k_x :	stífnistuðull fyrir lárétta viðspyrnu jarðvegs sem fall af dýpi x
K_{II} :	lárétt stífni staur
K_{eff} :	virk stífni legu
K_d :	skúfstífni blýgúmmilegu fyrir flot
K_u :	skúfstífni blýgúmmilegu fyrir flot

K_{HGjj} :	lárétt stífni stauraþyrpingar eftir j-ás
K_{pij} :	lárétt stífni staks stauris eftir j-ás
K_{RGjj} :	ruggustífni (vindustífni) stauraþyrpingar um j-ás
$K_{P,i}$:	lárétt stífni staks stauris í stauraþyrpingu
L :	lengd stauris
m :	massi kerfis
M :	vægi í staur
M_g :	vægi sem verkar á staur
M_A :	vægi í staur vegna lárétts krafts
M_B :	vægi í staur vegna vægisáraunar
n :	fjöldi staura í stauraþyrpingu
n_h :	fasti fyrir viðspyrnu jarðvegs
p :	svörun jarðvegs
p :	viðspyrna jarðvegs
p_A :	svörun jarðvegs vegna lárétts krafts
p_B :	svörun jarðvegs vegna vægis
P :	mældur kraftur sem verkar á staur
Q_b :	hönnunarflotkraftur blýs
Q_g :	láréttur kraftur sem verkar á staur
Q_u :	burðargeta staks stauris
$(Q_u)_G$:	heildarburðargeta stauraþyrpingar
s :	fjarlægð frá miðju stauris að miðju stauris
S :	halli í staur
S_A :	halli stauris vegna lárétts krafts
S_B :	halli stauris vegna vægis
T :	hlutfallslegur stífnistuðull
V :	skúfkraftur í staur
V_A :	skúfkraftur í staur vegna lárétts krafts
V_B :	skúfkraftur í staur vegna vægis
V_{La} :	skúfbylgjuhraði samþjöppunarbylgna
V_S :	skúfbylgjuhraði
x :	dýpi neðan við jarðvegsyfirborð
y :	formbreyting stauris
y_A :	færsla vegna lárétts krafts
y_B :	færsla vegna vægis
y_1 :	færsla staks stauris
y_2 :	færsla stauris í tveggja staura þyrpingu
Z :	dýpistfasti
$\alpha_{j,i}$:	samvirknistuðull fyrir staur i í þyrpingu eftir j-ás
α_r :	samvirknistuðull fyrir staur samsíða álagsstefnunni
α_s :	samvirknistuðull fyrir staur hornrétt á álagsstefnuna
β :	deyfingarhlutfall
β_{eff} :	virkur dempunarstuðull legu
β_j :	minnkunarstuðull stauraþyrpingar
θ :	horn milli álagsstefnu og miðlínu milli staura í gráðum
λ :	hlutfallsstuðull innspennu
ζ :	dempunarstuðull
ρ :	eðlismassi
ν :	Poisson hlutfall
ω :	horneigintíðni

1 INNGANGUR

1.1 Bakgrunnur

Stauraundirstöður eru oft notaðar við grundun mannvirkja á stöðum þar sem djúpt er á klöpp eða annað fast undirlag. Þannig aðstæður eru algengar við brúargerð á láglandi þar sem árframburður hefur byggt upp setlög á löngum tíma, en einnig þar sem verið er að reisa hefðbundnar byggingar. Staurarnir þurfa að ráða við lóðrétt áraun frá viðkomandi mannvirki sem og lárétta krafta vegna jarðskjálfta, vindálags og straumkrafta eftir því sem við á.

Margar brýr Vegagerðarinnar eru grundaðar á staurum ásamt því að vera staðsettar á virkum jarðskjálftasvæðum. Samvirkni jarðvegs, staura og mannvirkis í jarðskjálfta er flókið fyrirbæri og margir þættir sem þar hafa áhrif. Lárétt stífni og deyfni stakra staura og stauraþyrpinga eru lykilstærðir í þessu sambandi. Ýmsar líkingar eru til í erlendum heimildum sem kveða á um hvernig ákvarða skuli þessar stærðir en breytileikinn er mikill og erfitt að meta hvað hentar fyrir mannvirkjagerð hér á landi. Til að komast nær kjarna málsins er því nauðsynlegt að geta stuðst við mælingar sem framkvæmdar eru við íslenskar aðstæður.

1.2 Markmið

Meginmarkmið þessa verkefnis er að þróa líkingar og aðferðarfræði sem byggja á íslenskum mæligögnum sem nota má til að ákvarða lárétta stífni staura. Leitast er við að hafa aðferðarfræðina sem einfaldasta þannig að hún sé notendavæn. Vonast er til að niðurstöður verkefnisins geti nýst við jarðskjálftahönnun brúa eða annarra mannvirkja sem grunduð eru á staurum á jarðskjálftasvæðum.

1.3 Tengd verkefni

Lárétt stífni staura hefur lítið verið skoðuð hérlendis. Jón Snæbjörnsson (2005) gerði meistaraverkefni á þessu sviði sem bar heitið Jarðskjálftagreining brúar á stauraundirstöðum. Það verkefni var að mörgu leyti kveikjan að þessu verkefni. Í verkefni Jóns er gerð ólínuleg greining á brú á stauraundirstöðum þar sem tekið er tillit til þess að svörun hennar er tíðniháð. Þar voru hins vegar engar mælingar til stuðnings en farið dýpra í fræðin en í þessu verkefni.

Jón Skúlason skoðaði burðarþol staura í undirstöðum á tveimur brúm á Skeiðarásandi árið 1974 (1974, 1975, 1980). Þar mældi hann færslu stauranna fram að broti við bæði lárétt og lóðrétt álag sem sett var á þá og skoðaði brot þeirra. Þessar mælingar nýtast vel í þessu verkefni auk nýrra mælinga á staurum í Selá í Hrútafirði sem prófaðir voru sumarið 2006. Þá fóru Bjarni Bessason og Jón Skúlason og mældu færslu staura við lárétt álag. Þar mátti hins vegar ekki brjóta staurana og því var ekki eins mikið álag sett á þá staura eins og sett var á staurana á Skeiðarásandi.

1.4 Efnistöð verkefnis

Til að ná því markmiði að geta sett fram líkingar sem nota má til að ákvarða lárétta stífni staura þarf fyrst að velja og stilla upp aðferðarfræði sem styðjast skal við og síðan að kvarða aðferðina með íslenskum mæligögnum. Í framhaldinu eru svo tekin fyrir töluleg dæmi.

Verkefninu má skipta upp í nokkra hluta þar sem farið er yfir aðferðarfræðina, mælingarnar kynntar og úrvinnsla þeirra sýnd. Í lokin eru tekin nokkur töluleg dæmi, bæði nokkur tilbúin og eitt raunverulegt. Verkefnið skiptist upp í eftirfarandi kafla:

Annar kafli:

Fræði og aðferðarfræði verkefnis eru útskýrð í þessum kafla. Gripið er á helstu þáttum sem snúa að samvirkni jarðvegs, staura og burðarvirkis. Farið er nánar út í hegðun staura undir láréttum krafti, stífni þeirra og áhrif vegna þyrpinga. Komið inn á deyfingu og uppbyggingu og virkni blýgúmmilega.

Þriðji kafli:

Í þessum kafla er mælingar kynntar, bæði eldri mælingar sem gerðar voru árið 1974 á Skeiðarársandi og nýjar mælingar sem gerðar voru sumarið 2006 í Hrótafirði. Úrvinnsla mælinganna er veigamikil í kaflanum þar sem skúfbylgjuhraði jarðvegsins er bakreiknaður auk stífni stakra staura, þar sem byggt er á aðferðarfræðinni úr kafla 2.

Fjórði kafli:

Töluleg dæmi eru viðfangsefni þessa kafla. Þar eru tekin tilbúin dæmi sem sýna hvernig aðferðarfræði verkefnisins má nota á einfaldan hátt.

Fimmti kafli:

Tölvulíkan af brú er sett upp í þessum kafla. Notast er við teikningar af brú sem ekki hefur verið reist ennþá. Sett er á hana jarðskjálftaálag þar sem stuðst er við hröðunartímaraðir sem skráðust í Suðurlandsskjálftanum 17. júní árið 2000 á Hellu.

Sjötti kafli:

Samantekt, niðurstöður og lokaorð verkefnisins.

Til útreikninganna á aðferðarfræðinni var bæði notast við forritið Excel og reikniforritið Matlab. Öll gröf eru teiknuð upp í Matlab þar sem myndræn framsetning er mun skýrari í því en Excel. Einfalt reikniforrit, sem sett var upp í Matlab, sem reiknar stífni staks staura er birt í Viðauka A. Brúarlíkan er skilgreint í einingarforritinu SAP2000 þar sem reynt er að nálgast raunverulega brú á sem bestan hátt.

2 FRÆÐI

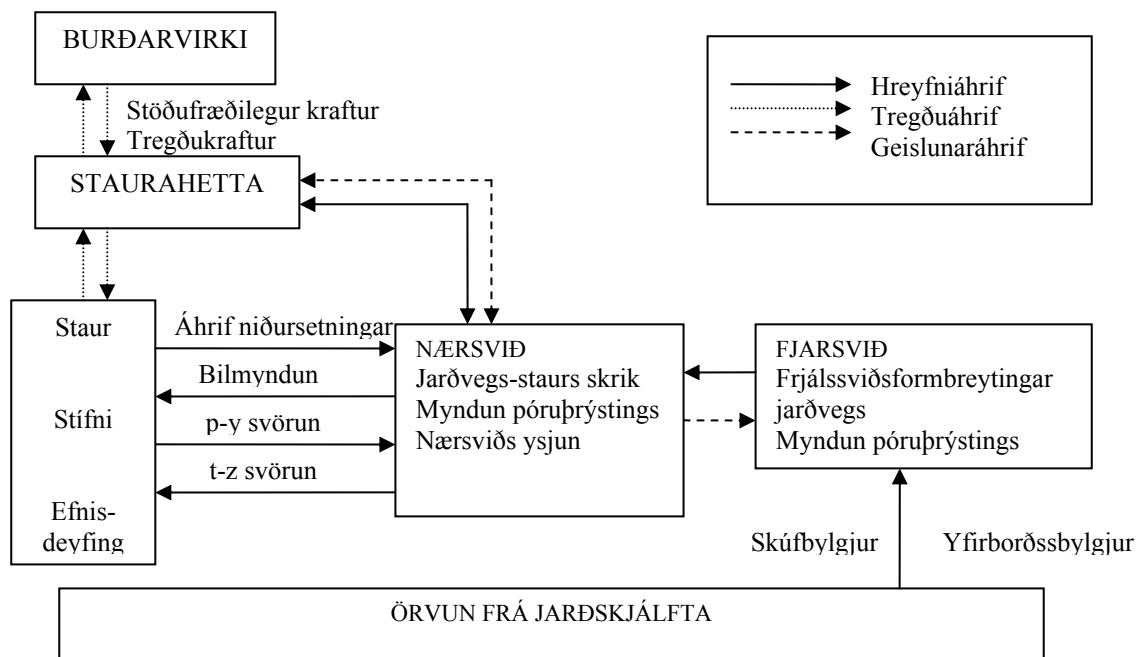
2.1 Samvirkni burðarvirkis, staurs og jarðvegs við jarðskjálftaáraun

Samvirkni burðarvirkis, staurs og jarðvegs við jarðskjálftaáraun er afar flókið fyrirbæri. Aðallega er það vegna óvissunnar um hvernig jarðvegurinn hegðar sér. Margar aðferðir hafa verið þróaðar til að lýsa þessari samvirkni. Algengt er að nota gorma og dempara í þessu sambandi. Bæði eru til líkön þar sem þessar einingar eru tengdar við viðkomandi staur og þannig ætlað að líkja eftir jarðveginum sem umlykur staurinn, en einnig líkön þar sem gormar og demparar koma í stað bæði staura og jarðvegs. Í sumum líkönum eru gormarnir og dempararnir tíðniháðir [sjá t.d. Markis og Gazetas, 1992] og í öðrum líkönum er jarðvegurinn næst staurunum ólínulegur [Chang og Yang, 2005].

Í þessu verkefni er ákveðið að styðjast við aðferð sem skiptir svæðinu upp umhverfis staurinn og skilgreinir áhrif hvers svæðis fyrir sig og er þá að mestu leyti stuðst við heimild eftir Malhorta (2004). Til að skilja betur ferli samvirkninnar má skipta því uppí þrjá flokka:

- fjarsviðsáhrif (e. far field effects)
- tregðuáhrif (e. inertial effects)
- nærsviðsáhrif (e. near field effects)

Yfirleitt eru allir þessir flokkar að verka samtímis við jarðskjálftaálag og hafa þá áhrif á áslæga svörun og hliðarsvörun stauraundirstöðunnar. Á mynd 1 má sjá myndræna uppsetningu á þessari samvirkni.



Mynd 1. Samvirkni jarðvegs, staura og burðarvirkis vegna jarðskjálftaörvunar [byggt á Malhotra, 2004].

2.1.1 Fjarsviðsáhrif

Fjarsviðsáhrif kallast það þegar jarðskjálftabylgja breiðist út í jarðveginn og veldur þar skúfformbreytingum og myndun viðbótar póruþrýstings. Þessi áhrif eru oft einnig nefnd frjálssviðsáhrif vegna þess að reiknað er með að þau virki það langt frá undirstöðum mannvirkis og burðarvirkinu að það hafi engin áhrif á svörun og hreyfingar jarðvegsins.

Fjarsviðsáhrifin geta valdið aukningu á póruþrýsingi í sandi, sérstaklega nálægt grunnvatnsyfirborði. Þar sem að lárétt svörun staura byggist aðallega á efstu lögum jarðvegsins þá veldur þessi aukni póruþrýstingur því að lárétt mótstaða jarðvegs og staura minnkar og dregur þannig úr láréttri stífni undirstöðunnar [Malhorta, 2004].

2.1.2 Tregðuáhrif

Þegar jarðskjálftabylgjur sem orðið hafa til í frjálssviðinu lenda á undirstöðum, sem hafa aðra stífnieiginleika en jarðvegurinn sem umlykur þær, endurkastast þær og brotna á undirstöðunum og valda þannig hreyfingu á þeim. Þessar hreyfingar valda tregðukröftum og hreyfingum í burðarvirkinu sjálfu sem að svo breytir hreyfingum undirstaðnanna og jarðvegsins. Því má segja að svörun burðarvirkisins sé raunverulega vegna tregðukrafta. Þessi áhrif frá tregðukröftum hafa helst áhrif á samvirkni staura og jarðvegs á grunnu dýpi.

2.1.3 Nærsviðsáhrif

Nærsviðsáhrif eru ríkjandi í áhrifum á samvirkni staura og jarðvegs. Þau má greina nálægt staurnum og við hann. Nærsviðsáhrifunum má skipta upp í eftirfarandi fjóra flokka [Malhorta, 2004]:

- Streitu - hraða áhrif (e. strain rate effect; soil pile slippage)
- Lotubundið niðurbrot (e. cyclic degradation)
- Bilmyndun milli jarðvegs og staura við yfirborð (e. gap/slap mechanism)
- Myndun póruþrýstings (e. pore pressure generation)

2.1.3.1 Streitu - hraða áhrif

Fyrir samloðunarefni getur álagshraðinn skipt miklu máli þegar snertiviðnám (e. skin friction) milli jarðvegs og stauris er skoðað. Eftir því sem álagshraðinn eykst þeim mun meiri verða áhrifin og snertiviðnámið hækkar.

Hins vegar, eins og við íslenskar aðstæður, þar sem jarðvegurinn hefur yfirleitt enga samloðun eru streitu-hraða áhrif lítil.

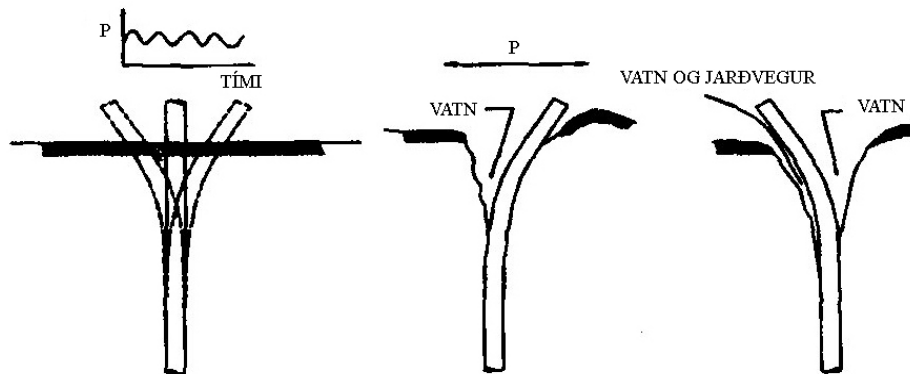
2.1.3.2 Lotubundið niðurbrot

Rannsóknir hafa sýnt [Malhorta, 2004] að við lotubundið álag minnkar mótstaða staura eftir því sem loturnar verða fleiri. Þær hafa einnig sýnt að eftir 5 til 10 lotur hefur mesta minnkunin oftast átt sér stað. Þar sem líkja má jarðskjálftaálagi við lotubundið álag með misstórum lotum verða áhrif jarðskjálftans svipuð, þ.e.a.s. mótstaða staura minnkar við álagið. Venjulega valda jarðskjálftar u.þ.b. 10 til 20 lotum, sem þó eru ekki allar jafnstórar. Því má gera ráð fyrir að við hátt jarðskjálftaálag geti orðið veruleg minnkun á mótstöðu stauranna.

Þetta niðurbrot á mótstöðu staura við lotubundið álag má rekja til breytinga sem verða á póruþrýstingi og umröðun og niðurbroti jarðvegskorna. Þessir þættir geta valdið bæði minnkun á mótstöðu jarðvegsins við hliðarþrýstingi og minnkun á núningi staurisins.

2.1.3.3 Bilmyndun við yfirborð milli jarðvegs og stauris

Lotubundið jarðskjálftaálag hefur þau áhrif á staur í jarðvegi að hann fer að sveiflast fram og til baka og formbreytingar verða í aðliggjandi jarðvegi. Þegar sú formbreyting er komin út fyrir fjaðursviðið fer binding milli stauris og jarðvegs að minnka. Þetta veldur því að bil milli stauris og jarðvegs byrjar að myndast, sjá mynd 2.



Mynd 2. Bilmyndun milli jarðvegs og stauris [byggt á Malhotra, 2004].

Þegar þetta gerist á litlu dýpi veldur það því að lárétt stífni staurisins minnkar. En ef bilin fara að ná niður á mikið dýpi getur þetta einnig farið að hafa áhrif á áslægan styrk staurisins.

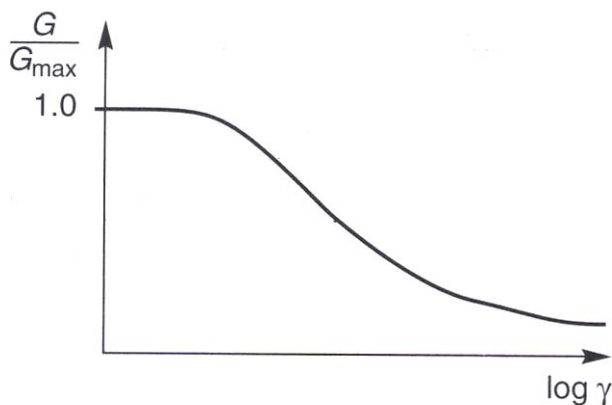
2.1.3.4 Myndun póruþrýstings

Póruþrýstingur uppvið staurinn hækkar venjulega þegar skrik (e. slippage) verður milli stauris og jarðvegs. Þessi hækkun verður vegna tregðukrafta sem koma frá burðarvirkinu niður í undirstöðurnar og valda minnkun á virkri láréttri spennu og þ.a.l. minnkun á skúfburðargetu.

2.2 Ákvörðun á jarðvegseiginleikum

Í jarðtækni er nauðsynlegt að hafa þekkingu á aflfræðilegum eiginleikum jarðvegs. Lykilstærð í því sambandi er stífni jarðvegs sem oft er lýst með fjaðurstuðli. Til þess að ákvarða hann þarf að afla upplýsinga um skúfbylgjuhraða, Poisson hlutfall og eðlismassa. Þegar skoða á jarðveg með tilliti til áhrifa frá jarðskjálfta hafa þeir tveir síðastnefndu ekki svo mikil áhrif þar sem dreifni þeirra er mun minni en skúfbylgjuhraðans [Bjarni Bessason, 1998].

Jarðvegsgerð, pökkun hans og spennuástand hafa áhrif á stífnina. Þegar mælingar eru gerðar á vettvangi fléttast þessir þættir inni mæliniðurstöðurnar. Þess má einnig geta að stífni jarðvegsins er háð formbreytingum. Við litlar formbreytingar er stífnin mest og minnkar eftir því sem formbreytingar aukast, sjá mynd 3 [Jón Skúlason o.fl., 1999].



Mynd 3. Ferill sem sýnir skúfstuðul sem fall af skúfstreitu [Kramer, 1996].

Til að ákvarða stífnistuðla jarðvegs er skúfbylgjuhraðinn, V_s , yfirleitt mældur og hreyfifræðilegur skúfstuðull, G_{max} , svo reiknaður út frá honum með jöfnunni:

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (1)$$

Út frá þessu má svo ákvarða fjaðurstuðul jarðvegsins, E_{max} , með eftirfarandi jöfnu:

$$E_{max} = G_{max} \cdot 2(1 + \nu) \quad (2)$$

þar sem

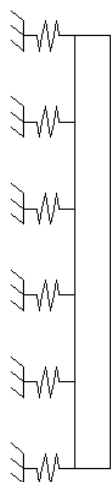
- ρ : eðlismassi jarðvegsins
- ν : Poisson hlutfall jarðvegsins

Varðandi þessar líkingar er rétt að taka fram að gera þarf greinarmun á stöðufræðilegum langtímaeiginleikum og hreyfðarfræðilegra skammtímaeiginleikum fyrir stífni sem eiga við þegar jarðskjálftaálag er annars vegar [Bjarni Bessason, 1998].

Skúfbylgjuhraði hefur verið mældur á nokkrum stöðum á Íslandi á undanförunum árum með yfirborðsbylgjumælingu (e. Spectral Analysis of Surface Waves – SASW method) sjá nánar Bjarni Bessason, (1998) og Jón Skúlason o.fl., (1999).

2.3 Láréttar formbreytingar staks staurs

Í verkefninu verður að mestu leyti stuðst við aðferð sem Prakash (1990) setti fram til að reikna út láréttar formbreytingar staks staurs á stöðufræðilegan hátt. Aðferðin nálgar staurinn sem bita á fjaðrandi undirstöðum, nálgun viðspyrnu jarðvegs (e. subgrade reaction approach) [Prakash, 1990]. Notast er við Winkler líkan þar sem bitinn hvílir á óendanlega nálægum, fjaðrandi gormum sem eru innbyrðis óháðir [sjá t.d. Makris og Gazetas, 1992], sjá mynd 4.



Mynd 4. Winkler líkan.

Stífni gormanna er sett fram á eftirfarandi hátt :

$$k_x = \frac{p}{y} \quad (3)$$

þar sem

k_x : stífni á lengdareiningu sem fall af dýpinu x [Pa]

p : viðspyrna jarðvegs á lengdareiningu (N/m)

y : formbreyting staurs

Valið er að nálga stífni gorma með eftirfarandi líkingu [Gazetas o.fl., 1993]. :

$$k_h = 1,2 \cdot E_{\max} \quad (4)$$

þar sem

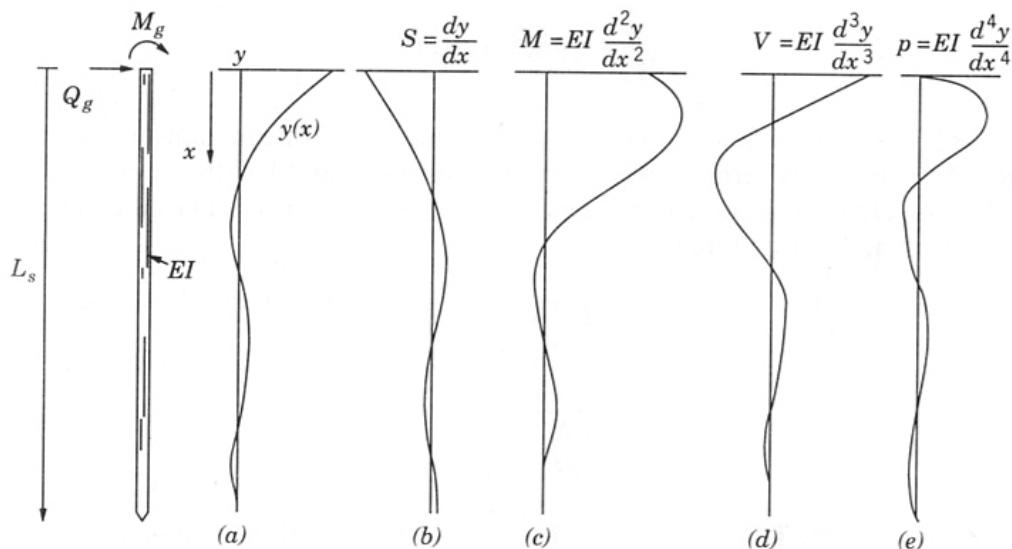
k_h : stífni á lengdareiningu við neðsta hluta staurs [Pa]

E_{\max} : hæsta gildi á fjaðurstuðli jarðvegsins [Pa]

Þess má geta að til eru mun fleiri líkingar til að meta stífni gormanna en þessi þótti hentugust í þessu tilfalli.

2.3.1 Staur frjáls að ofan

Skoðum fyrst staur sem er frjáls að ofan. Ef sett er efst á staurinn láréttur kraftur, Q_g , og vægi M_g formbreyttist hann eins og sjá má á mynd 5a.



Mynd 5. Staur í jarðvegi sem verður fyrir láréttum krafti Q_g og vægi M_g við yfirborð jarðvegs. a) formbreytingarferill, b) hallaferill, c) vægisferill, d) skúfkraftsferill, e) ferill fyrir svörun jarðvegs [Prakash, ártal vantar].

Þegar formbreytingarferill staurins $y(x)$ er þekktur má með deildun finna ferla fyrir halla staurins $S(x)$, beygjuvægisdreifingu hans $M(x)$, skúfkraftadreifinguna $V(x)$ og viðspyrnu jarðvegsins $p(x)$. Dæmi um þessa ferla má sjá á myndum 5b-e.

Formbreyting staur er háð ýmsum breytum, m.a. dýpi, stífni, álagi o.fl. Hana má setja fram á eftirfarandi hátt:

$$y = f(x, T, L, k_x, E_p I_p, Q_g, M_g) \quad (5)$$

þar sem:

x : dýpi neðan við jarðvegsyfirborð

T : hlutfallslegur stífnistuðull

L : lengd staur

k_x : $n_h x$ stuðull fyrir lárétt viðspyrnu jarðvegs

n_h : fasti fyrir viðspyrnu jarðvegs

$E_p I_p$: stífni staur (margfeldi fjaðurstuðuls og hverfitregðu staur)

Q_g : láréttur kraftur sem verkar á efst á staurinn

M_g : vægi sem verkar efst á staurinn

Þegar stuðst er við fjaðurfræði má gera ráð fyrir að færslur séu litlar samanborið við stærð staurins. Þá gildir samliðunarreglan (e. the principle of superposition), þ.e. færslur vegna lárétta kraftsins Q_g , y_A , og færslur vegna vægisins M_g , y_B , má reikna í sitthvoru lagi og leggja þær svo saman.

Heildarfærsla staurins er þá:

$$y = y_A + y_B \quad (6)$$

þar sem

$$\frac{y_A}{Q_g} = f_1(x, T, L, k_x, E_p I_p) \quad (7)$$

$$\frac{y_B}{M_g} = f_2(x, T, L, k_x, E_p I_p) \quad (8)$$

f_1 og f_2 eru ólík föll sem innihalda samt sem áður sömu breytur. Önnur er háð lárétta kraftinum og hin væginu. Breyturnar í jöfnunum hafa aðeins tvær víddir, þ.e. lengd (m) og kraft (N) og því má á einfaldan hátt skilgreina einingalaugar breytur

$$\frac{y_A E_p I_p}{Q_g T^3}, \frac{x}{T}, \frac{L}{T}, \frac{k_x T^4}{E_p I_p} \quad (9)$$

$$\frac{y_B E_p I_p}{M_g T^2}, \frac{x}{T}, \frac{L}{T}, \frac{k_x T^4}{E_p I_p} \quad (10)$$

Táknum nú breytur:

$$A_y = \frac{y_A E_p I_p}{Q_g T^3} \text{ (færslufasti vegna lárétts krafts)} \quad (11)$$

$$B_y = \frac{y_B E_p I_p}{M_g T^3} \text{ (færslufasti vegna lárétts vægis)} \quad (12)$$

$$\frac{x}{T} = Z \text{ (dýpifasti)} \quad (13)$$

$$\frac{L}{T} = Z_{\max} \text{ (hæsta gildi á dýpifasta)} \quad (14)$$

$$\frac{k_x T^4}{E_p I_p} = \phi(x) \text{ (jarðvegs modulus jafna)} \quad (15)$$

Út frá jöfnum (11) og (12) má þá segja að heildarfærsla staurisins verður:

$$y = y_A + y_B = A_y \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} + B_y \frac{M_g T^2}{E_p I_p} \quad (16)$$

Á sama hátt má setja fram jöfnur fyrir hallann, vægið, skúfkraftinn og viðspyrnu jarðvegsins:

$$M = M_A + M_B = A_m Q_g T + B_m M_g \quad (17)$$

$$S = S_A + S_B = A_s \frac{Q_g T^2}{E_p I_p} + B_s \frac{M_g T}{E_p I_p} \quad (18)$$

$$V = V_A + V_B = A_v Q_g + B_v \frac{M_g}{T} \quad (19)$$

$$p = p_A + p_B = A_p \frac{Q_g}{T} + B_p \frac{M_g}{T^2} \quad (20)$$

Fastana, A_y , B_y , A_m , B_m , A_s , B_s , A_v , B_v , A_p og B_p , má finna í töflum 1 og 2.

Eins og áður hefur komið fram má nálga staur í jarðvegi sem fjaðrandi bita á fjaðrandi undirstöðum (mynd 4). Fyrir fjaðrandi bita á fjaðrandi undirstöðum gildir eftirfarandi jafna fyrir hegðun hans [sjá t.d. Megson, 1996]:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} = p \quad (21)$$

Þar sem að $p = -k_x y$ fæst að:

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{k_x y}{E_p I_p} = 0 \quad (22)$$

Þetta mun þá vera grunnjafnan fyrir bita á elastískum undirstöðum. Henni má skipta upp á sambærilegan hátt og áður sem:

$$\frac{d^4 y_A}{dx^4} + \frac{k_x y_A}{E_p I_p} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{d^4 y_B}{dx^4} + \frac{k_x y_B}{E_p I_p} = 0 \quad (24)$$

Nota nú jöfnur (11), (12), (13) og (15) og set inni jöfnur (23) og (24):

$$\frac{d^4 A_y}{dZ^4} + \phi(Z) A_y = 0 \quad (25)$$

$$\frac{d^4 B_y}{dZ^4} + \phi(Z) B_y = 0 \quad (26)$$

Í jarðvegi án samloðunar má gera ráð fyrir að jarðvegsstífni aukist með dýpi, $k_x = n_h x$, og þá megi setja $\phi(x) = Z = x/T$ [Prakash, ártal vantar]. Með því að stinga þessu inni jöfnu (15) fæst:

$$\frac{n_h x T^4}{E_p I_p} = \frac{x}{T} \quad (27)$$

eða

$$T = \left(\frac{E_p I_p}{n_h} \right)^{1/5} \quad (28)$$

Jöfnur (25) og (26) má leysa t.d. með finite – difference aðferð til að ákvarða fasta A og B [Matlock, Reese 1961]. Niðurstöður þessa reikninga má sjá í töflum 1 og 2.

Tafla 1 Gildi fyrir A-stuðla [Prakash, 1990].

Z	A _v	A _s	A _m	A _v	A _p
0,0	2,435	-1,623	0,000	1,000	0,000
0,1	2,273	-1,618	0,100	0,989	-0,227
0,2	2,112	-1,603	0,198	0,956	-0,422
0,3	1,952	-1,578	0,291	0,906	-0,586
0,4	1,796	-1,545	0,379	0,840	-0,718
0,5	1,644	-1,503	0,459	0,764	-0,822
0,6	1,496	-1,454	0,532	0,677	-0,897
0,7	1,353	-1,397	0,595	0,585	-0,947
0,8	1,216	-1,335	0,649	0,489	-0,973
0,9	1,086	-1,268	0,693	0,392	-0,977
1,0	0,962	-1,197	0,727	0,295	-0,962
1,2	0,738	-1,047	0,767	0,109	-0,885
1,4	0,544	-0,893	0,772	-0,056	-0,761
1,6	0,381	-0,741	0,746	-0,193	-0,609
1,8	0,247	-0,596	0,696	-0,298	-0,445
2,0	0,142	-0,464	0,628	-0,371	-0,283
3,0	-0,075	-0,040	0,225	-0,349	0,226
4,0	-0,050	0,052	0,000	-0,106	0,201
5,0	-0,009	0,025	-0,033	0,013	0,046

Tafla 2. Gildi fyrir B-stuðla [Prakash, 1990].

Z	B _v	B _s	B _m	B _v	B _p
0,0	1,623	-1,750	1,000	0,000	0,000
0,1	1,453	-1,650	1,000	-0,007	-0,145
0,2	1,293	-1,550	0,999	-0,028	-0,259
0,3	1,143	-1,450	0,994	-0,058	-0,343
0,4	1,003	-1,351	0,987	-0,095	-0,401
0,5	0,873	-1,253	0,976	-0,137	-0,436
0,6	0,752	-1,156	0,960	-0,181	-0,451
0,7	0,642	-1,061	0,939	-0,226	-0,449
0,8	0,540	-0,968	0,914	-0,270	-0,432
0,9	0,448	-0,878	0,885	-0,312	-0,403
1,0	0,364	-0,792	0,852	-0,350	-0,364
1,2	0,223	-0,629	0,775	-0,414	-0,268
1,4	0,112	-0,482	0,688	-0,456	-0,157
1,6	0,029	-0,354	0,594	-0,477	-0,047
1,8	-0,030	-0,245	0,498	-0,476	0,054
2,0	-0,070	-0,155	0,404	-0,456	0,140
3,0	-0,089	0,057	0,059	-0,213	0,268
4,0	-0,028	0,049	-0,042	0,017	0,112
5,0	0,000	0,011	-0,026	0,029	-0,002

2.3.2 Innspenntur staur

Skodum nú staur sem er innspenntur að ofan. Randskilyrðið sem þá er þekkt er að hallinn við jarðvegisyfirborðið er enginn. Jafna (18) verður þá:

$$S = S_A + S_B = A_S \frac{Q_g T^2}{E_p I_p} + B_S \frac{M_g T}{E_p I_p} = 0 \quad (29)$$

eða

$$\frac{M_g}{Q_g T} = - \left(\frac{A_S}{B_S} \right)_{Z=0} \quad (30)$$

Í töflum 1 og 2 má finna gildin á A_S og B_S og má sjá að fyrir $Z = 0$ þá er:

$$\frac{A_S}{B_S} = -\frac{1,623}{1,75} = -0,93$$

Með því að stinga þessu inni jöfnu (30) fæst:

$$\frac{M_g}{Q_g T} = -0,93 \quad (31)$$

Með því að nota þessa niðurstöðu með jöfnu (16) fæst jafna fyrir formbreytinguna fyrir innspenntan staur sem:

$$y = (A_y - 0,93B_y) \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} \quad (32)$$

Setjum nú:

$$C_y = A_y - 0,93B_y \quad (33)$$

Þá verður jafna (32):

$$y = C_y \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} \quad (34)$$

Á sama hátt fæst að:

$$M = C_m Q_g T \quad (35)$$

þar sem $C_m = A_m - 0,93B_m$

$$S = C_s \frac{Q_g T^2}{E_p I_p} \quad (36)$$

þar sem $C_s = A_s - 0,93B_s$

$$V = C_v Q_g \quad (37)$$

þar sem $C_v = A_v - 0,93B_v$

$$p = C_p \frac{Q_g}{T} \quad (38)$$

þar sem $C_p = A_p - 0,93B_p$

2.3.3 Innspenntur staur - laus

Að lokum má aðeins líta á það þegar staur er að hluta til innspenntur, þ.e. snúningur staurisins við jarðvegsyfirborð er einhver en þó ekki eins og hann sé laus í endann. Til þess að ákvarða færslur þannig staura þarf að leiðrétta C -stuðlana á eftirfarandi hátt:

$$C_y = (A_y - 0,93\lambda B_y) \quad (39)$$

$$C_m = (A_m - 0,93\lambda B_m) \quad (40)$$

Þar sem $\lambda = 1$ þegar staurinn er fullkomlega innspenntur og $\lambda = 0$ þegar staurinn er fullkomlega frjálss [Prakash, 1990]. Þennan stuðul verður hönnuður að meta sjálfur miðað við aðstæður á hverjum stað.

2.4 Stífni staks stauris

Ef skoðaðar eru saman jöfnur (16) og (18) fyrir færslu og snúning staks stauris má setja þær fram á fylkjaformi á eftirfarandi hátt:

$$\begin{bmatrix} y \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_y T^3}{E_p I_p} & \frac{B_y T^2}{E_p I_p} \\ \frac{A_s T^2}{E_p I_p} & \frac{B_s T}{E_p I_p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q \\ M \end{bmatrix} \quad (41)$$

Með því að leysa Q og M út úr jöfnunni fæst að:

$$\begin{bmatrix} Q \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_y T^3}{E_p I_p} & \frac{B_y T^2}{E_p I_p} \\ \frac{A_s T^2}{E_p I_p} & \frac{B_s T}{E_p I_p} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y \\ S \end{bmatrix} = \frac{E_p I_p}{T^3 (A_y B_s - A_s B_y)} \begin{bmatrix} B_s & -B_y T \\ -A_s T & A_y T^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ S \end{bmatrix} \quad (42)$$

Berum þessa lausn saman við einfalda hreyfifræði þar sem eftirfarandi líking gildir [sjá t.d. Chopra, 2001]:

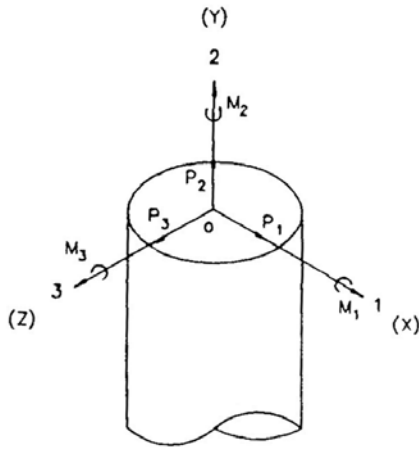
$$Q = K \cdot y \quad (43)$$

þar sem

Q : kraftur

K : stífni stuðull [N/m]

y : færsla



Mynd 6. Skilgreining hnitakerfis staur [GeoSpectra, 1997].

Þegar virki verður fyrir álagi frá bæði krafti og vægi, mynd 6, má skrifa jöfnu (43) á forminu [GeoSpectra, 1997]:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{16} \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & K_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{43} & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ K_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Til einföldunar má nálga jöfnu (44) þar sem aðeins eru skoðuð færsla í ein átt og snúningur um einn ás, þá fæst:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{16} \\ K_{61} & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (45)$$

Með því að bera saman jöfnur (42) og (45) má setja fram jöfnur fyrir stífniustuðlana á eftirfarandi hátt:

$$K_{11} = \frac{B_s E_p I_p}{T^3 (A_y B_s - A_s B_y)} \quad (46)$$

$$K_{16} = \frac{B_y E_p I_p}{T^2 (A_y B_s - A_s B_y)} \quad (47)$$

$$K_{61} = \frac{A_s E_p I_p}{T^2 (A_y B_s - A_s B_y)} \quad (48)$$

$$K_{66} = \frac{A_y E_p I_p}{T (A_y B_s - A_s B_y)} \quad (49)$$

Þessar jöfnur gilda bæði fyrir staura sem eru frjálsir að ofan og innspenntir. Þegar staurar eru notaðir í undirstöður fyrir brýr eru þeir yfirleitt notaðir nokkrir saman þar sem endar þeirra eru steyptir saman í stífa plötu. Þeir eru því innspenntir og snúningur hvers og eins mjög lítill. Því

er í þessu verkefni aðeins lögð áhersla á lárétta stífnina, þ.e. K_{11} . Útreikningar á stífninni miðast því við jöfnu (46).

Meymand (1998) setti fram fjórar mismunandi jöfnur fyrir stífni stakra staura. Þrjár þeirra voru settar fram með föstum sem ekki var hægt að nota beint vegna mismunandi einingakerfis og aðstæðna. Fjórðu og síðustu jöfnuna mætti hins vegar hugsanlega notast við. Jón Snæbjörnsson (2005) studdist t.d. við hana í sínum útreikningum. Hún er sett er fram á eftirfarandi hátt [Gazetas, 1991]:

$$K_{11} = d \cdot E_s \cdot \left(\frac{E_p}{E_s} \right)^{0,21} \quad (50)$$

Hins vegar er mjög erfitt að meta hvort hægt sé að styðjast við þessar jöfnur því þær gefa mjög mismunandi niðurstöður. Jafna (50) gefur t.d. 10 – 100 sinnum hærri stífni en hinar þrjár jöfnurnar [Meymand, 1998].

Þess má einnig geta að til er aðferðarfræði sem lýst er í skýrslunni: Líkan af staur í viðnámsjarðvegi [Guðrún Þóra Garðarsdóttir, 2002] sem byggir á því að gera líkan í einingarforriti af burðarþoli fljótandi stauris í viðnámsjarðvegi. Lóðrétt og lárétt burðargeta stauris og viðnám sökkulbotnsins er reiknað þar sem viðnám sökkulbotnsins er nálgæð með eftirgefanlegum gormum. Vegagerðin hefur að einhverju leyti stuðst við þetta.

2.5 Stauraþyrpingar

Í lang flestum tilfellum þar sem staurar eru notaðir sem undirstöður eru notaðir fleiri en einn staur. Oftast eru þetta nokkrir staurar sem mynda stauraþyrpingu. Taka þarf tillit til þessa við athugun á stífni stauraundirstaða þar sem staurarnir hafa áhrif hver á annan ef ekki er þeim mun meira bil á milli þeirra. Ekki má reikna stífni staks stauris og margfalda svo með fjölda staura heldur þarf að minnka stífni hvers stauris með tilliti til m.a. fjarlægð milli staura, þvermáls þeirra og uppsetningu þeirra miðað við álagsstefnu. Ýmsar aðferðir hafa verið notaðar til að meta þessa stífni. Skoðum þrjár aðferðir í þessu verkefni, misflóknar.

2.5.1 Einföld aðferð

Skoðum fyrst afar einfalda aðferð. Tilraunir hafa sýnt að ef fjarlægð milli staura er meira en 6-8 sinnum þvermál stauris þá hegða staurarnir sér eins og stakir staurar, þ.e.a.s. þegar staurarnir liggja samsíða álagsstefnunni. Aftur á móti þegar staurarnir liggja þvert á álagsstefnuna þá þurfa að vera að minnsta kosti 2,5 sinnum þvermál stauris á milli þeirra til að þeir hegði sér eins og stakir staurar [Prakash, 1990]. Prakash (1990) skilgreinir minnkunarstuðul þar sem eftirfarandi líking er notuð:

$$G_e = \frac{(Q_u)_G}{nQ_u} \quad (51)$$

þar sem

$(Q_u)_G$: heildarburðargeta stauraþyrpingarinnar

n : fjöldi staura í þyrpingunni

Q_u : burðargeta staks stauris

Í töflu 3 má sjá minnkunarstuðlana.

Tafla 3. Minnkunarstuðlar vegna þyrpinga áhrifa [Prakash, 1990].

s/d	G _e
3	0,50
4	0,60
5	0,68
6	0,70

þar sem

s: fjarlægð milli miðju tveggja samliggjandi staura
d: þvermál staur

2.5.2 Stefnuháð, einföld aðferð

Skoðum nú aðeins flóknari aðferð þar sem meiri áhersla er lögð á stefnu staura miðað við álagsstefnuna. Stuðst er við handbók GeoSpectra (1997).

2.5.2.1 Lárétt og lóðrétt stífni

Eftirfarandi jafna er sett fram fyrir lárétta og lóðrétta stífni fyrir staur í stauraþyrpingu, k_{Gjj} :

$$k_{HGjj} = nk_{pjj}\beta_j \quad j = 1, 2, 3 \quad (52)$$

þar sem

k_{HGjj} : lárétt stífni stauraþyrpingar eftir *j*-ás
 k_{pjj} : lárétt stífni staks staur eftir *j*-ás
n: fjöldi staura í þyrpingunni
 β_j : minnkunarstuðull þyrpingar, $0 \leq \beta_j \leq 1$

Minnkunarstuðull þyrpingar er skilgreindur á eftirfarandi hátt:

$$\beta_j = \frac{1}{1 + \left(\sum \alpha_{j,i}\right)} \quad i = 1, 2, \dots, n-1; \quad j = 1, 2, 3 \quad (53)$$

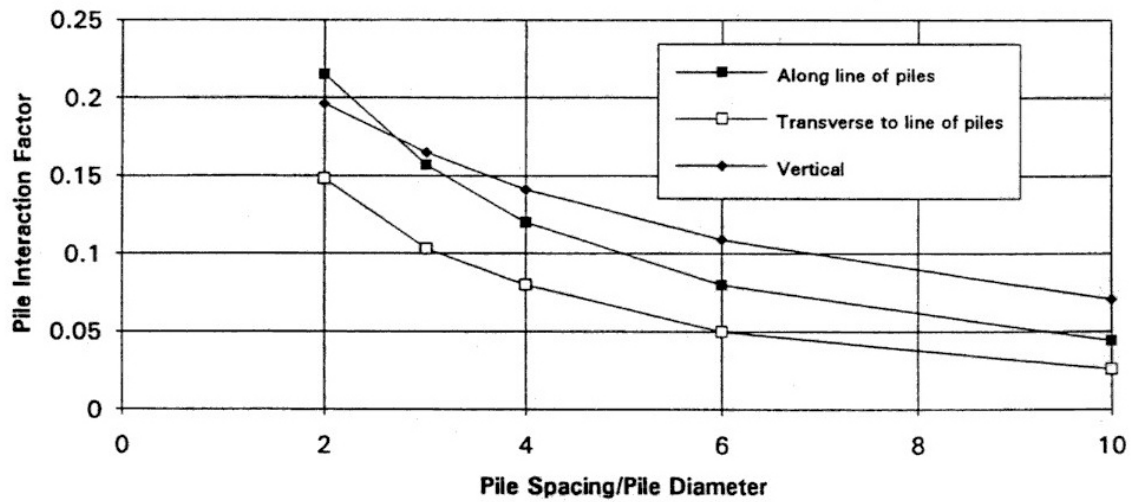
þar sem

$\alpha_{j,i}$: samvirknustuðull fyrir staur *i* í þyrpingu eftir *j*-ás

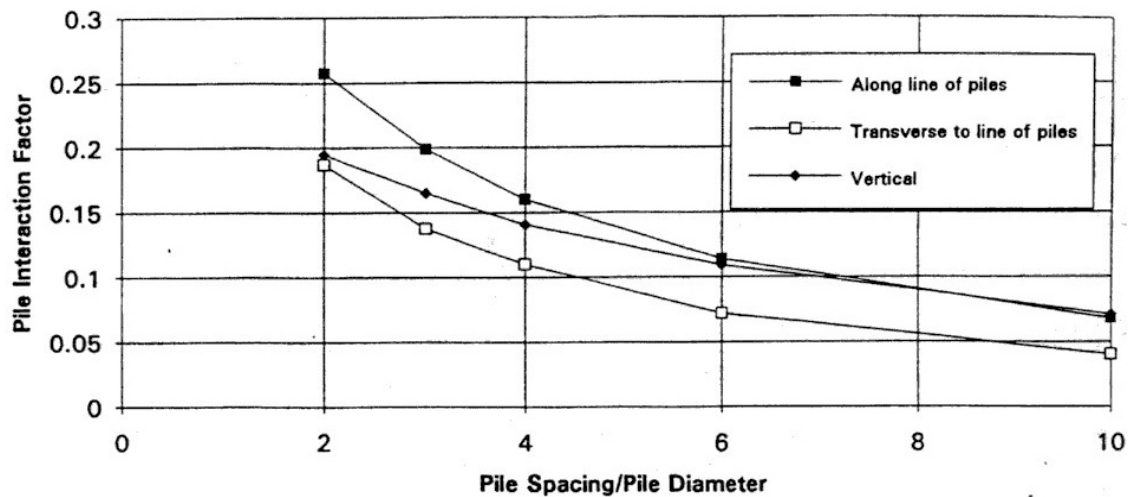
Í þessari heimild eru samvirknustuðlarnir gefnir í gröfum, mismunandi gröf eftir mismunandi jarðveg. Í þessu verkefni er stuðst við þau gröf sem eru fyrir þann jarðveg sem talinn var vera líkastur þeim jarðvegi sem mælingar voru teknar í hérlendis. Sá jarðvegur kallast S4 og er honum lýst á eftirfarandi hátt:

9,1 metrar (30 fet) af meðal þéttu til ágætlega þjöppuðu áreyraefni sem liggur ofan á þéttu jökulsárseti (grunnvatnsstaða er á 3 metra (10 feta) dýpi) [GeoSpectra, 1997].

Á myndum 7 og 8 má sjá gröfin sem notast er við til að áætla α – stuðlana fyrir þessa tegund jarðvegs, annars vegar fyrir staura sem eru frjálsir að ofan, mynd 7, og hins vegar fyrir innspennta staura, mynd 8.



Mynd 7. Graf sem sýnir samvirknistuðul α sem fall af hlutfallinu bil milli staura/þvermál staura fyrir staura sem eru frjálssir að ofan [GeoSpectra, 1997].



Mynd 8. Graf sem sýnir samvirknistuðul α sem fall af hlutfallinu bil milli staura/þvermál staura fyrir staura sem eru innspenntir að ofan [GeoSpectra, 1997].

α – stuðullinn er skilgreindur sem hlutfallið milli færslu staura í tveggja staura þyrpingu og færslu staks staura mínus 1 eða:

$$\alpha = \frac{y_2}{y_1} - 1 \quad (54)$$

Þessi aðferð gildir fyrir tilvik þegar staurarnir eru annað hvort samsíða álagsstefnunni eða hornrétt á hana. Þegar staurarnir uppfylla ekki þau skilyrði er líkingin fyrir samvirknistuðulinn:

$$\alpha_j = \alpha_r + (\alpha_s - \alpha_r) \cdot \frac{\theta}{90^\circ} \quad (55)$$

þar sem

- α_r : samvirknistuðull fyrir staur samsíða álagsstefnunni
- α_s : samvirknistuðull fyrir staur hornrétt á álagsstefnuna
- θ : hornið í gráðum sem álagsstefnan myndar við miðlínu stauranna

2.5.2.2 Ruggu- og vindustífnir

Með því að leggja saman lóðréttu stífnina (eða láréttu) fyrir alla staurana í þyrpingunni og margfalda það með vægisarminum í öðru veldi fæst ruggu stífnin (eða vindu) eða:

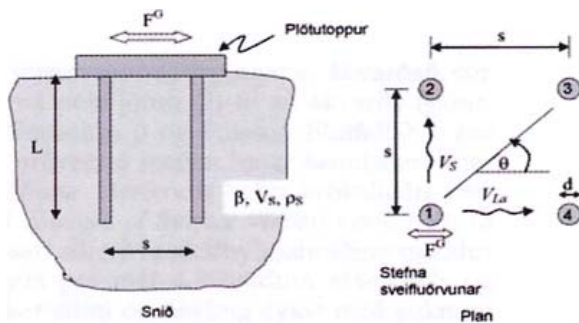
$$k_{RGjj} = \sum k_{P,i} D_i^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 4, 5, 6 \quad (56)$$

þar sem

k_{RGjj} : ruggustífnir (tregðustífnir) stauraþyrpingar um j -ás
 $k_{P,i}$: “translational” stífnir staks staura i í þyrpingunni
 D_i : vægisarmur staura i um tilheyrandi snúningsás
 n : fjöldi staura í þyrpingu

2.5.3 Tíðni- og stefnuháð aðferð

Með þessari aðferð er tekið tillit til þess að samvirkni milli staura er tíðniháð. Stuðst er við meistarverkefni Jóns Snæbjörnssonar (2005). Skoðaðir eru tveir staurar sem ekki verða fyrir áhrifum annarra staura úr þyrpingunni. Staurinn sem verður fyrir sveifluörvuninni kallast virkur en hinn óvirkur. Líking fyrir samvirknina þar sem θ er hornið milli stauranna og sveifluörvunarinnar, sjá mynd 9, er sett fram á eftirfarandi hátt:



Mynd 9. Fjögurra staura þyrping [Bjarni Bessason og Jón Snæbjörnsson, 2005]

$$\alpha_h(\theta^\circ) \cong \alpha_h(0^\circ) \cos^2 \theta + \alpha_h(90^\circ) \sin^2 \theta \quad (57)$$

þar sem

$$\alpha_h(0^\circ) = \alpha_{h0} \cong \sqrt{\frac{d/2}{s}} \exp(-\beta \cdot \omega \cdot s / V_{La}) \exp(-i \cdot \omega \cdot s / V_{La}) \quad (58)$$

$$\alpha_h(90^\circ) = \alpha_{h90} \cong \sqrt{\frac{d/2}{s}} \exp(-\beta \cdot \omega \cdot s / V_s) \exp(-i \cdot \omega \cdot s / V_s) \quad (59)$$

V_s : skúfbylgjuhraði S-bylgna í jarðvegi sem myndast þegar hornið milli sveifluörvunar virks staura og óvirks staura er 90°

V_{La} : skúfbylgjuhraði samþjöppunarbylgna í jarðvegi sem myndast þegar virki staurinn og óvirki staurinn mynda beina línu miðað við sveifluörvunina

$$V_{La} = 3,4 \frac{V_s}{\pi(1-\nu)} \quad (60)$$

d : þvermál staura

s : fjarlægð milli staura

β : deyfnihlutfall

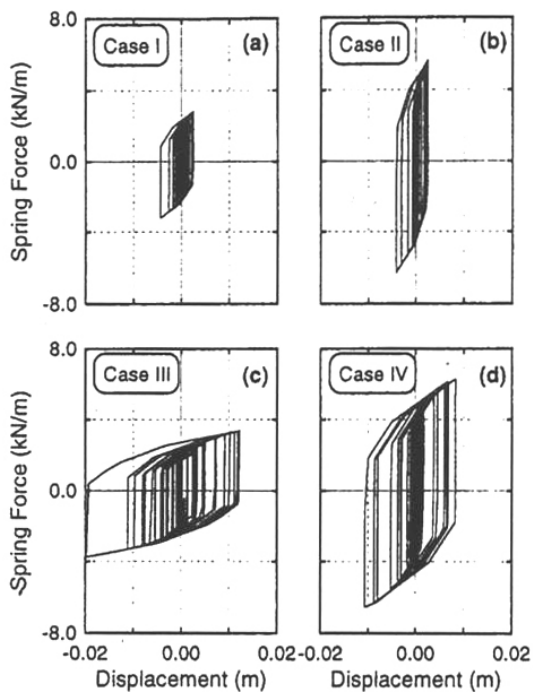
$$\omega = 2\pi f : \text{eigintíðni}$$

$$i = \sqrt{-1}$$

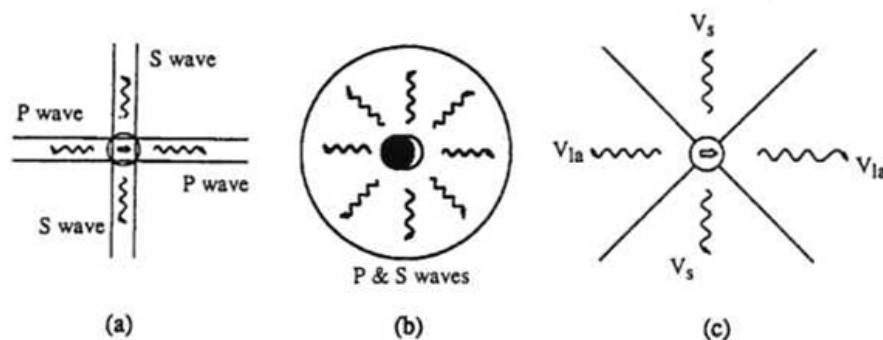
Í þessu verkefni er látið liggja milli hluta að fara ítarlegar í þessa aðferð en í stað þess í Jón Snæbjörnssonar (2005) og Bjarni Bessason og Jón Snæbjörnsson (2005).

2.6 Deyfing

Þegar skoðuð er samvirkni milli stauris og jarðvegs undir jarðskjálftaálagi þarf að taka tillit til deyfingar. Í jarðskjálfta hreyfast staurarnir alltaf á einhverjum tímápunktum á móti hreyfingu jarðvegsins og þannig tapast hluti af orkunni sem fylgir jarðskjálftabylgjunum og veldur þannig deyfingu í kerfinu. Skipta má deyfingunni upp í tvennt þar sem um er að ræða hysteretíska deyfingu (e. hysteretic damping) sem verður á því svæði sem næst er staurnum, þ.e. á nærsvæði, sjá mynd 10 og geislunardeyfingu (e. radiation damping) sem verður fjarsvæði staurisins, sjá mynd 11 [Wang o.fl. 1998].



Mynd 10. Dæmi um hysteretíska deyfingu þar sem grafið sýnir kraft sem fall af færslu [Wang o.fl., 1998].

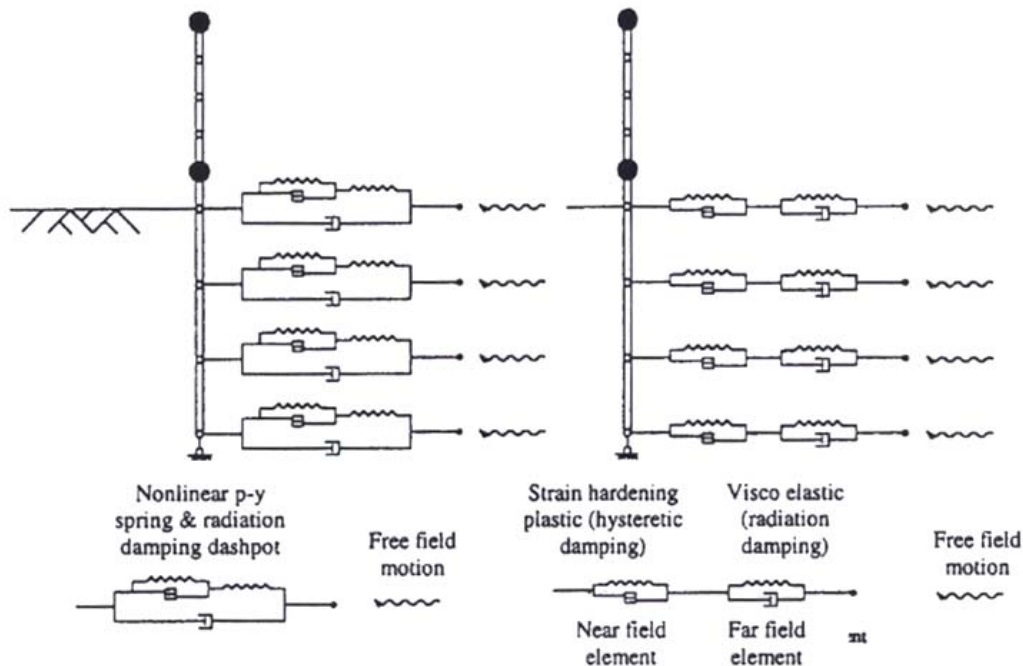


Mynd 11. Þrjár mismunandi útfærslur á geislunardeyfingu. c) er besta nálgunin sem notuð er í þessari heimild þar sem hún sýnir nokkuð vel hvernig bylgjurnar eru í raun en þó með vissum einföldunum [Wang o.fl., 1998].

Skoðum nú tvö mismunandi líkön til að reikna út áhrif deyfingar:

- hysteretíska deyfingin og geislunardeyfingin samsíða hvor annarri (e. parallel damping)
- hysteretíska deyfingin og geislunardeyfingin raðtengdar hvorri annarri (e. series damping)

Þessi tvö mismunandi líkön má sjá á mynd 12.

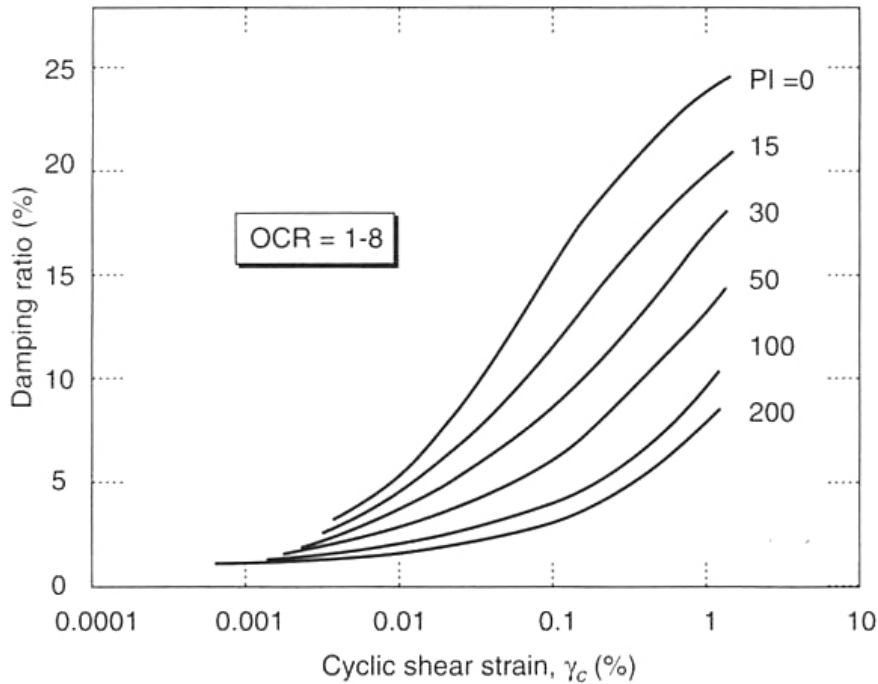


Mynd 12. Vinstra megin má sjá líkan sem hefur deyfingarnar hliðtengdar en hægra megin líkan með deyfingarnar raðtengdar [Wang o.fl., 1998].

Wang o.fl. (1998) prófuðu þessi tvö mismunandi líkön fyrir leir með þunnu sandlagi ofan á. Þegar niðurstöður líkananna eru bornar saman má sjá að þegar líkanið sem er sett upp með raðtengingu gefur betri niðurstöður en þegar það er sett upp samsíða. Enda má segja að raðtengda líkanið sé nær raunveruleikanum, því að í raun er önnur deyfingin á nærsvæðinu og hin á fjarsvæðinu. Hins vegar er það oftast þannig þegar deyfing er metin að þá er aðeins geislunardeyfingin metin, því mjög erfitt er að meta hysteretíska deyfinguna. Í þessu tilviki þar sem líkan fyrir staur í leir er prófað þá fékkst eftirfarandi líking fyrir deyfingarfastann c :

$$c = 4d\rho v_s \quad (61)$$

Ætla má að þessa niðurstöðu megi nota sem nálgun fyrir íslenskar aðstæður þar sem hún gefur gildi á deyfingarstuðlinum öruggu megin við “réttu” gildið þar sem leirinn hefur mun hærri plastískan stuðul (e. plasticity index) en það jarðefni sem er héraendis. Eftir því sem plastíski stuðullinn hækkar þeim mun minni verður deyfingin, sjá mynd 13.



Mynd 13. Deyfingarstuðullinn ξ sem fall af skúfstreitunni γ_c [Kramer, 1996].

Við hönnun á mannvirkjum er oft stuðst við deyfingarstuðulinn ξ . Hann er skilgreindur á eftirfarandi hátt [Chopra, 2001]:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (62)$$

þar sem

$\omega_n = \sqrt{K/m}$: eigintíðni kerfisins

K : stífni kerfisins

m : massi kerfisins

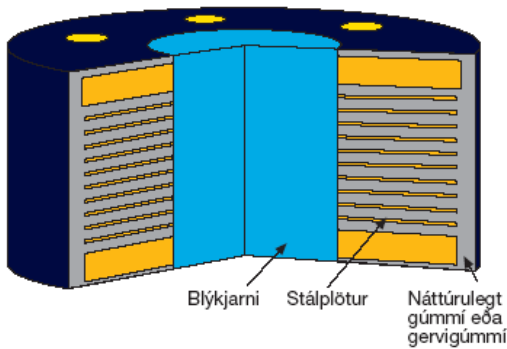
c : deyfingarstuðull kerfisins

c_{cr} : kritiskur deyfingarstuðull kerfisins

2.7 Blýgúmmílegur

Ekki verður hjá því komist að fjalla aðeins um svokallaðar blýgúmmílegur, en Vegagerðin hefur í nokkurn tíma notað þær til jarðskjálftaeinangrunar. Ágætis yfirlit um legurnar má fá í Bjarna Bessasyni og Einar Hafliðasyni (2004). Notkun leganna hefur mikil áhrif á svörun brúar við jarðskjálftaálagi og þá áraun sem stauraundirstaða verður fyrir í jarðskjálfta.

Blýgúmmílegurnar eru uppbyggðar af lögum úr gúmmíi og stálplötum. Í miðju þeirra er steypur blýkjarni sem við miklar færslur fer að fljóta og eyðir þannig orku jarðskjálftans. Stálplöturnar eru bæði til að halda blýkjarnanum og einnig að legurnar gefi sig ekki við lóðrétt álag. Þessar legur eru yfirleitt settar milli stöpla og brúardekks. Mynd 14 sýnir uppbyggingu blýgúmmílegu.



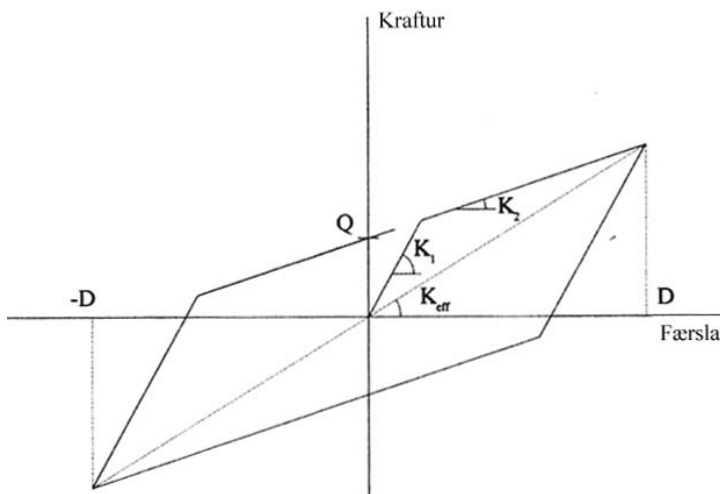
Mynd 14. Uppbygging blýgúmmilegu [Eggert V. Valmundsson, 2004].

Stífni blýgúmmilegu má lýsa með hysteretískri slaufu eins og sjá má á mynd 15. Finna má virka stífni hennar með eftirfarandi jöfnu [Naeim og Kelly, 1999]:

$$K_{eff} = K_d + \frac{Q}{y} \quad (63)$$

þar sem

- K_d : skúfstífni fyrir flot
- Q_b : hönnunarflotkraftur blýs
- y : færsla



Mynd 15. Hysteretísk slaufa sem lýsir stífni blýgúmmilegu ($D = y$: færsla) [Naeim og Kelly, 1999].

Deyfingarstuðullinn β_{eff} má í framhaldinu skilgreina á eftirfarandi hátt:

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(y - Q/9K_2)}{2\pi(K_2y + Q)y} \quad (64)$$

Þessi deyfingarstuðull er væntanlega mun hærri en deyfingarstuðull mannvirkis og má því segja að hann verði ráðandi fyrir burðarkerfið í heild.

3 MÆLINGAR Á STÍFNI OG BURÐARÞOLI STAURA

3.1 Eldri mælingar

Áður en ráðist var í þetta verkefni voru til burðarþolsmælingar á staurum á Skeiðarársandi sem gerðar voru árið 1974 [Jón Skúlason, 1974; 1975]. Mælingar voru bæði gerðar á steiptum staurum og tréstaorum. Í þessu verkefni eru aðeins steiptu staurarnir skoðaðir. Mældir voru fimm ferhyrmdir steiptir staurar, tveir við brúna yfir Skeiðará og þrír við brúna yfir Sandgígjukvísl, hér á eftir kölluð Gígja. Aðstæður á tilraunastöðum voru þannig að við Skeiðará er lagskiptur laust pakkaður sandur og möl, en við Gígju lagskiptur laust pakkaður malarkenndur sandur [Jón Skúlason, 1980]. Brotálag þeirra var ákvarðað, bæði gagnvart lóðréttu og láréttu álagi, lárétta álagið er eingöngu skoðað hér. Tjakkur var notaður til að setja lárétta álagið á staurana. Álagið var sett á í þrepum með 12 mínútna álagstíma. [Jón Skúlason, 1974]. Lengd stauranna og ummál þeirra má sjá í töflum 4 og 5, annars vegar fyrir Skeiðará og hins vegar Gígju.

Tafla 4. Kennistærðir staura, Skeiðará [Jón Skúlason, 1975].

Staur	Heildarlengd [m]	Lengd í jörð [m]	Meðal ummál [cm]	Þvermál [cm]
1-1S	11,00	10,80	116	29
2-1S	11,00	10,75	116	29

Tafla 5. Kennistærðir staura, Gígja [Jón Skúlason, 1974].

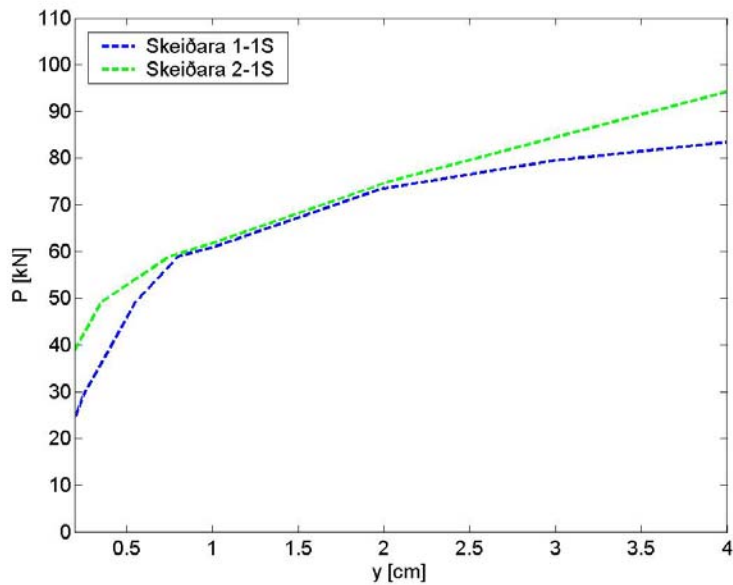
Staur	Heildarlengd [m]	Lengd í jörð [m]	Meðal ummál [cm]	Þvermál [cm]
1-2S	11,00	10,70	116	29
2-2S	11,00	10,75	116	29
3-2S	11,00	10,70	116	29

Niðurstöður mælinganna má sjá í töflum og gröfum í skýrslum Jóns Skúlasonar frá 1975 og 1974 um álagsprófun staura í Skeiðará og Gígju, sjá heimildaskrá. Gröfin sýna færsluna sem fall af krafti, þar sem krafturinn byrjar í núlli og þar til staurinn brotnar. Í töflunum er búið að taka saman gildin á kraftinum sem þarf á hvern staur til að ná 1, 2, 3 og 4 cm færslum. Í töflum 6 og 7 má sjá samantekt þessara mælinga þar sem búið er að lesa af gröfunum fyrir minna álag en það sem veldur 1 cm færslu, þ.e. 2, 3, 4 og 5 tonn, og svo gildin úr töflunum í áður nefndum skýrslum eftir Jón Skúlason.

Tafla 6. Niðurstöður mælinga fyrir Skeiðará [byggt á: Jón Skúlason, 1975].

Staur 1-1S		Staur 2-1S	
y [cm]	P [kN]	y [cm]	P [kN]
0,15	19,6	0,10	19,6
0,25	29,4	0,15	29,4
0,40	39,2	0,20	39,2
0,55	49,1	0,35	49,1
0,80	58,9	0,75	58,9
1,00	60,8	1,00	61,8
2,00	73,6	2,00	74,6
3,00	79,5	3,00	84,4
4,00	83,4	4,00	94,2

Á mynd 16, má sjá kraftinn P sem fall af færslunni y fyrir mælingarnar í Skeiðará. Minnsta gildi á færslunni sem sett er inná grafið er 0,2 cm þar sem reiknað er með að mikil óvissa sé í mælingum á færslum sem eru minni en það. Þetta gildir fyrir öll P-y gröfin sem á eftir koma.

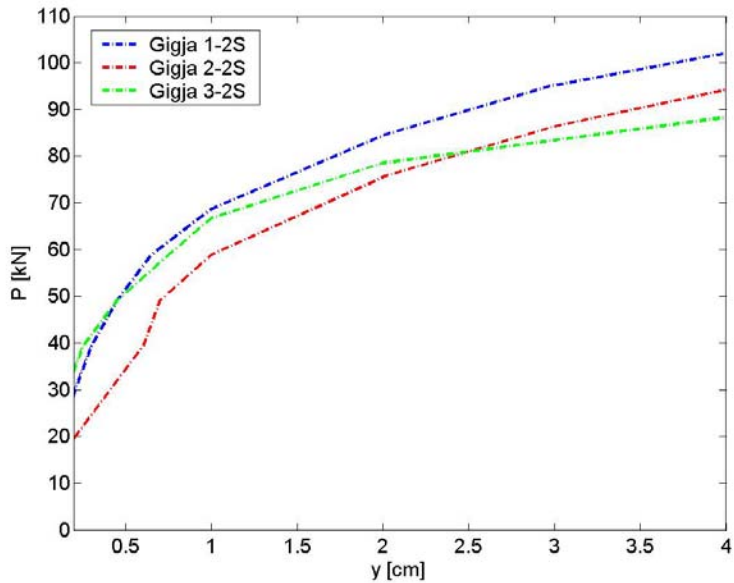


Mynd 16. P-y ferill fyrir Skeiðará.

Tafla 7. Niðurstöður mælinga fyrir Gígju [byggt á Jón Skúlason, 1974].

Staur 1-2S		Staur 2-2S		Staur 3-2S	
y [cm]	y [cm]	P [kN]	P [kN]	y [cm]	P [kN]
0,15	19,6	0,20	19,6	0,05	19,6
0,20	29,4	0,40	29,4	0,15	29,4
0,30	39,2	0,60	39,2	0,25	39,2
0,45	49,1	0,70	49,1	0,45	49,1
0,65	58,9	1,00	58,9	0,75	58,9
1,00	68,7	2,00	75,5	1,00	66,7
2,00	84,4	3,00	86,3	2,00	78,5
3,00	95,2	4,00	94,2	3,00	83,4
4,00	102,0			4,00	88,3

Kraftinn P sem fall af færslunni y fyrir Gígju má sjá á mynd 17.



Mynd 17. P-y ferill fyrir Gíjju.

3.2 Nýjar mælingar

Auk mælinganna á Skeiðarársandi var ráðist í að gera nýjar mælingar. Þann 18 júlí 2006 voru prófaðir fjórir staurar í undirstöðum brúar yfir Selá í Hrútafirði. Staurarnir eru steypfir, ferhyrdir 27x27cm. Á myndum 18, 19 og 20 eru sýndar aðstæður mælinga við Selá.



Mynd 18. Aðstæður á mælistað. Staur 1 lengst til hægri og staur 2 í miðjunni. Staurinn lengst til vinstri var ekki prófaður.



Mynd 19. Aðstæður á mælistað, staur 3.

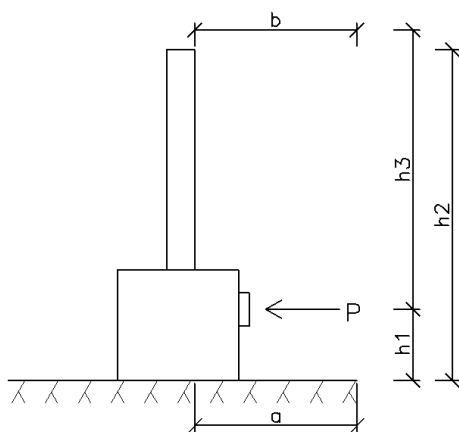
30 tonna vökvatjakkur frá Rannsóknastofnun Byggingariðnaðarins (RB) var notaður til að setja lárétt álag á staurana. Hann er u.þ.b. 30 cm langur með 10 cm slaglengd. Á tjaknum er þrýstingsmælir sem nemur vökvaprýstinginn. Til að umbreyta þrýstingnum yfir í áslægan kraft var tjakkurinn kvarðaður áður en mælingarnar voru gerðar. Eftir að mælingum var lokið var tjakkurinn kvarðaður aftur til að bera saman við fyrri kvörðun. Munurinn var ekki nema 1-2% svo að fyrri gildum fyrir álagið var ekki breytt.



Mynd 20. Staur 1 prófaður. Sjá má hvernig gamli landstöpullinn var notaður sem viðspyrna.

Landstöpull var notaður sem viðspyrna og þeir staurar sem voru næst honum voru prófaðir, sjá myndir 18 - 20. Ekki mátti brjóta staurana og því var ekki hægt að setja á þá mikið álag og voru

færslurnar þ.a.l. ekki mjög miklar. Færsla var mæld á tveimur stöðum, annars vegar við jarðvegysfirborð (a) og hins vegar við efri enda staurans (b), sjá mynd 21.



Mynd 21. Uppsetning við mælingar

Kennistærðirnar h_1 , h_2 og h_3 fyrir staurana fjóra má sjá í töflu 8.

Tafla 8. Kennistærðir staura í Selá

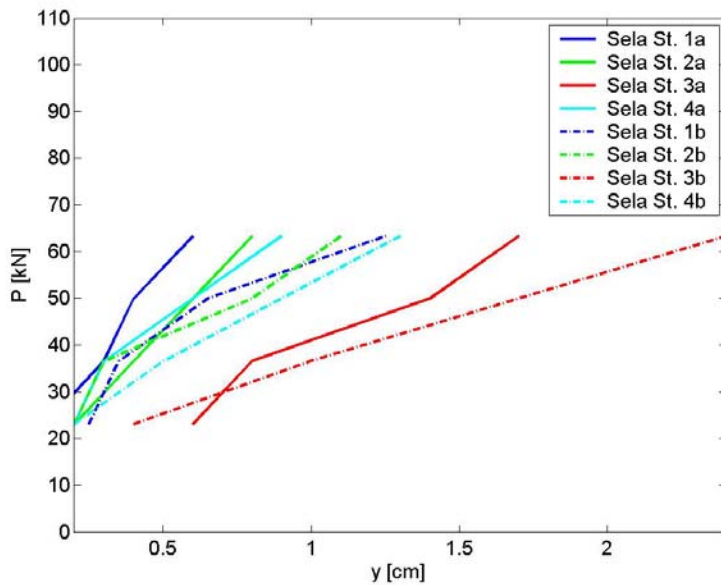
Staur nr.	Lengd [m]	h_1 [cm]	h_2 [cm]	h_3 [cm]
1	12	14	78	64
2	12	15	80,5	65,5
3	12	20	100	80
4	10	19	81,5	62,5

Álag var sett á staurana í þrepum og mælingar teknar eftir 1, 2, 5 og 10 mín. Í úrvinnslunni var notast við mælingarnar eftir 10 mín þar sem oft var svo lítil breyting eftir styttri tíma og því erfitt að meta færsluna. Í töflu 9 má sjá niðurstöður mælinganna, þ.e.a.s færslurnar sem mældar voru 10 mínútum eftir að álagið var aukið, bæði fyrir a og b.

Tafla 9. Niðurstöður mælinga fyrir Selá.

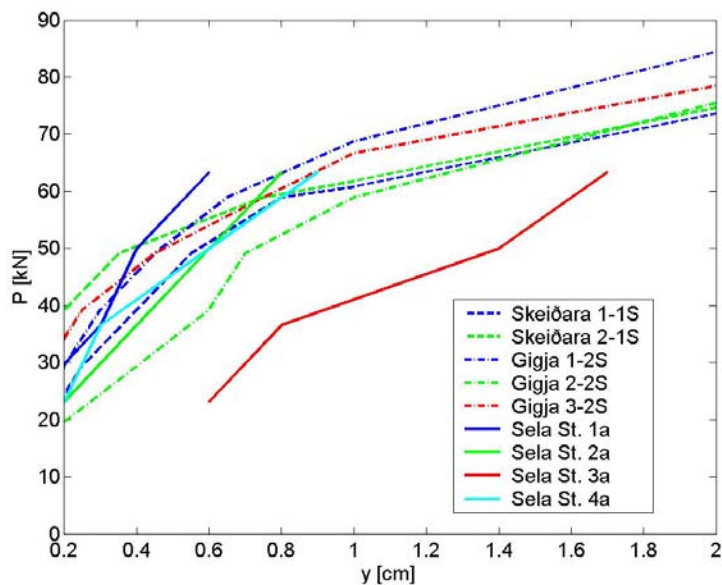
Tjakkur	Álag[kN]	Staur 1		Staur 2		Staur 3		Staur 4	
		a[cm]	b[cm]	a[cm]	b[cm]	a[cm]	b[cm]	a[cm]	b[cm]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	9,7	0	0,05	0	0	0,3	0,2	0,1	0,1
800	23,1	0,1	0,25	0,2	0,2	0,6	0,4	0,2	0,2
1200	36,5	0,3	0,35	0,4	0,3	0,8	1,0	0,3	0,5
1600	49,9	0,4	0,65	0,6	0,8	1,4	1,7	0,6	0,9
2000	63,3	0,6	1,25	0,8	1,1	1,7	2,4	0,9	1,3
0	0	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	1,0	0,2	0,3

Á mynd 22, má sjá kraftinn P sem fall af færslunni y.



Mynd 22. *P-y ferill fyrir Selá.*

Á mynd 23 má svo sjá þar sem búið er að taka saman alla ferlana fyrir Skeiðará, Gígju og Selá. Færslan er sýnd frá 0,2 cm uppí 2 cm.



Mynd 23. *Samanburður á P-y gröfum fyrir alla staurana.*

Sjá má af þessari mynd að ferlarnir falla nokkuð vel saman, utan staurs 3 í Selá, miðað við það að mælingarnar voru gerðar á þremur mismunandi stöðum þar sem aðstæður voru ekki eins sem og að staurarnir sjálfir af mismunandi gerð.

3.3 Úrvinnsla mælinga

3.3.1 Bakreiknaður skúfbylgjuhraði miðað við mældu færslu við jarðvegsyfirborð

Til að kvarða aðferðarfræðina sem stillt var upp í kafla 2, við íslensku mæligögnin, liggur beinast við að ákvarða jafngildan skúfbylgjuhraða sem er mælikvarði á stífni jarðvegsins. Aðferðarfræðin byggist á því að jarðvegurinn sem umlykur staurana sé einsleitur, þ.e. ekki háður

dýpi og því ber að túlka hann sem slíkan. Nokkra efnisfasta þarf hins vegar að meta á hverjum stað og í þessu tilfalli voru þeir áætlaðir út frá reynslu manna og áður mældum gildum.

$$\begin{aligned} \rho_s &= 2000 \text{ kg/m}^3 - \text{rúmpýngd jarðvegsins} \\ \nu &= 0,3 - \text{Poisson hlutfall jarðvegsins} \\ E_p &= 36,8 \text{ GN/m}^2 - \text{fjaðurstuðull steypst staurs} \\ I_p &= 4,43 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 - \text{hverfitregða staura í Selá} \\ I_p &= 5,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 - \text{hverfitregða staura í Skeiðará og Gígju} \\ L_p &= 10 \text{ og } 12 \text{ m} - \text{lengdir staura í Selá} \\ L_p &= 11 \text{ m} - \text{lengd staura í Skeiðará og Gígju} \end{aligned}$$

Þessir efnisfastar voru notaðir fyrir alla staðina sem mælt var á þar sem að munurinn er væntanlega ekki mikill milli staða og lítil breyting á þessum gildum hefur ekki mikil áhrif á niðurstöður útreikninganna.

Til þess að bakreikna skúfbylgjuhraðann er færslan y reiknuð með jöfnu (16) þar sem gískað er á skúfbylgjuhraðann og hún svo borin saman við mælda færslu. Svo er ágískaða skúfbylgjuhraðanum breytt þar til útreiknaða færslan verður sambærileg við mældu færsluna. Í þessum útreikningum er færslan bara skoðuð við yfirborðið.

Tökum eitt dæmi til að sýna hvernig þessi aðferð er notuð. Skoðum staur 2 í Selá við álagið $Q_g = 63,3 \text{ kN}$ þar sem að færslan mældist $0,8 \text{ cm}$ við jarðvegysfirborðið.

Til þess að geta byrjað að reikna þarf að gíska á skúfbylgjuhraðann. Prófum fyrst að setja skúfbylgjuhraðann, $V_s = 200 \text{ m/s}$. Þá má reikna G_{max} og E_{max} með jöfnum (1) og (2). Stífni k_h er síðan fundin með nálgunarjöfnunni (3).

Þá má reikna:

$$\begin{aligned} G_{max} &= 2000 \text{ kg/m}^3 \cdot (200 \text{ m/s})^2 = 8,0 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \\ E_{max} &= 8,0 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \cdot 2 \cdot (1 + 0,3) = 20,8 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \\ \Rightarrow k_h &= 1,2 \cdot 20,8 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 = 25,0 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Þá má reikna stuðulinn $n_h = k_h/L_p$:

$$n_h = \frac{25,0 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2}{12 \text{ m}} = 2,08 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3$$

og T (hlutfallslegur stífnistuðull) skv. jöfnu (28)

$$T = \left(\frac{36,8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2 \cdot 4,43 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4}{2,08 \cdot 10^7 \text{ N/m}^3} \right)^{1/5} = 0,952 \text{ m}$$

Nú þarf að reikna vægið sem lárétti krafturinn Q_g veldur. Í töflu 16 má sjá að armurinn er 15 cm . Þá má reikna vægið M_g :

$$M_g = 63,3 \text{ kN} \cdot 0,15 \text{ m} = 9,49 \text{ kNm}$$

Þá eru einu stærðirnar sem vantar til að geta reiknað færslurnar töflugildin A_y og B_y . Í töflum 1 og 2 má sjá að $A_y = 2,435$ og $B_y = 1,623$ þegar $Z = 0$.

Notum nú jöfnu (16) til að reikna út færsluna y :

$$y = 2,435 \cdot \frac{63,3 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot (0,952 \text{ m})^3}{36,8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2 \cdot 4,43 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4} + 1,623 \cdot \frac{9,49 \cdot 10^3 \text{ Nm} \cdot (0,952)^2}{36,8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2 \cdot 4,43 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4} = 0,902 \text{ cm}$$

Mælda færslan var eins og áður sagði 0,8 cm. Því þarf að hækka skúfbylgjuhraðann til að reyna að nálgast þá færslu. Með því að setja skúfbylgjuhraðann $V_s = 222$ m/s og fara aftur í gegnum þessa reikninga fæst að $y = 0,799$ cm sem er nægjanlega nálægt mælda gildinu.

Þessir reikningar voru svo framkvæmdir fyrir alla staurana. Í töflum 10, 11 og 12 má sjá niðurstöður þessara útreikninga.

Tafla 10. Niðurstöður útreikninga á skúfbylgjuhraða fyrir Skeiðará.

1-1S		2-1S	
y [cm]	V _s [m/s]	Y [cm]	V _s [m/s]
0,15	294	0,10	419
0,25	268	0,15	419
0,40	229	0,20	419
0,55	211	0,35	314
0,80	179	0,75	190
1,00	158	1,00	155
2,00	99	2,00	100
3,00	75	3,00	79
4,00	61	4,00	68

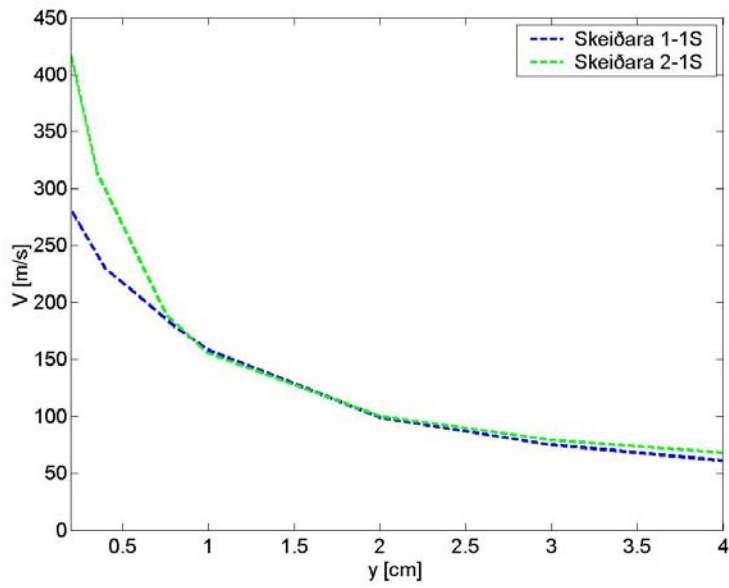
Tafla 11. Niðurstöður útreikninga á skúfbylgjuhraða fyrir Gígju.

1-2S		2-2S		3-2S	
y [cm]	V _s [m/s]	Y [cm]	V _s [m/s]	y [cm]	V _s [m/s]
0,15	288	0,20	237	0,05	829
0,20	319	0,40	185	0,15	449
0,30	288	0,60	167	0,25	368
0,45	247	0,70	177	0,45	267
0,65	211	1,00	151	0,75	200
1,00	166	2,00	104	1,00	173
2,00	110	3,00	82	2,00	110
3,00	86	4,00	69	3,00	81
4,00	72			4,00	66

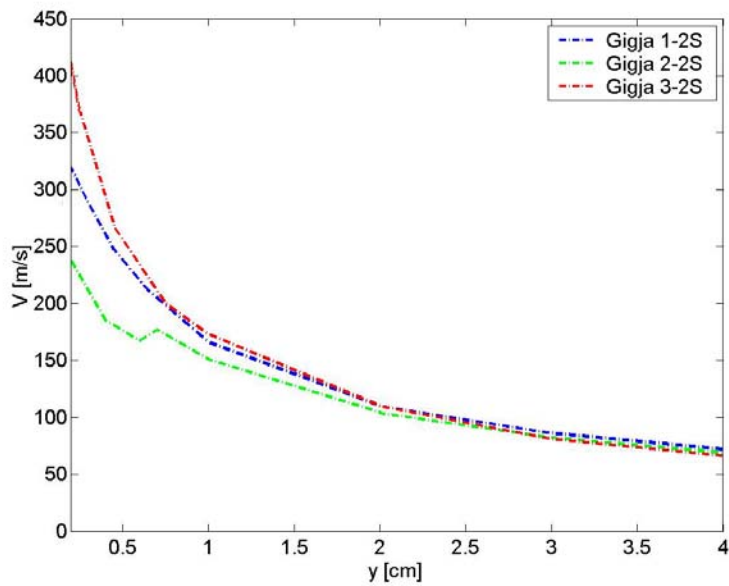
Tafla 12. Niðurstöður útreikninga á skúfbylgjuhraða fyrir Selá.

Staur 1		Staur 2		Staur 3		Staur 4	
y [cm]	V _s [m/s]	y [cm]	V _s [m/s]	y [cm]	V _s [m/s]	y [cm]	V _s [m/s]
0,10	556	0,20	308	0,60	122	0,20	288
0,30	320	0,40	251	0,80	141	0,30	301
0,40	327	0,60	232	1,40	114	0,60	216
0,60	282	0,80	222	1,70	119	0,90	187

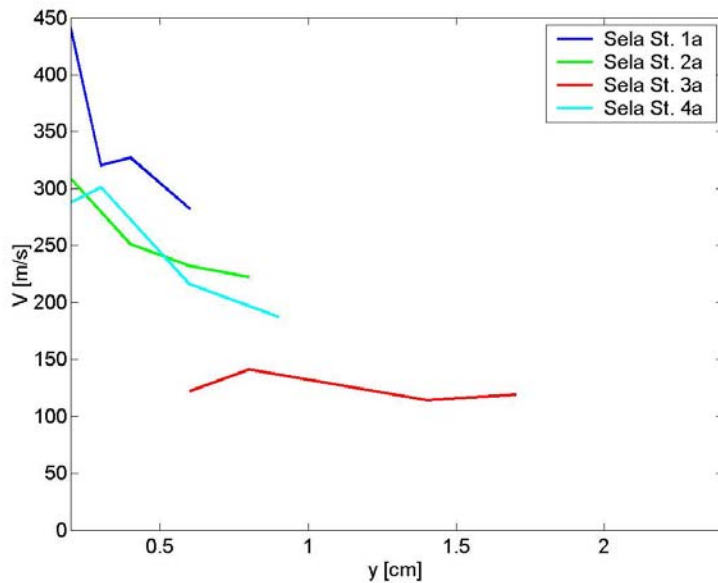
Á myndum 24 - 27 má sjá skúfbylgjuhraðann sem fall af færslunni y . Af fyrrgreindum ástæðum voru aðeins skoðuð gildi fyrir færslur 0,2 cm og stærri.



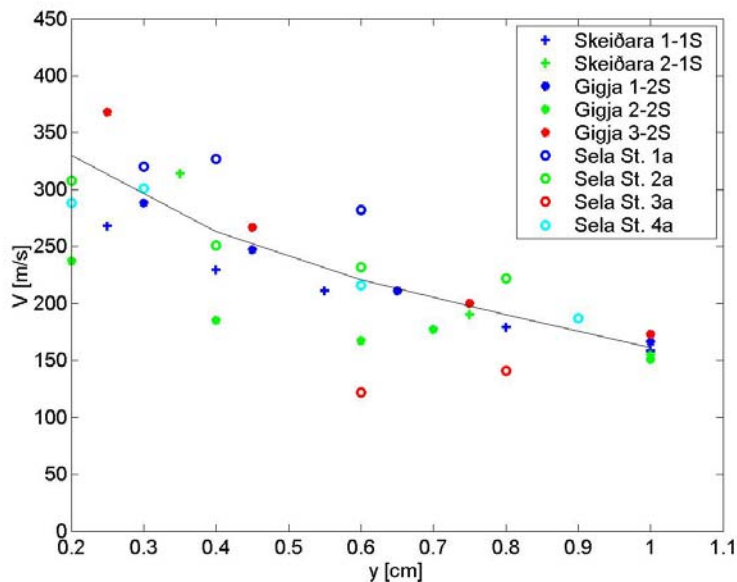
Mynd 24. V_s - y ferill fyrir Skeiðará.



Mynd 25. V_s - y ferill fyrir Gígju.



Mynd 26. V_s - y ferill fyrir Selá.



Mynd 27. Ferlar allra stauranna auk meðaltalslínu (svarta línan).

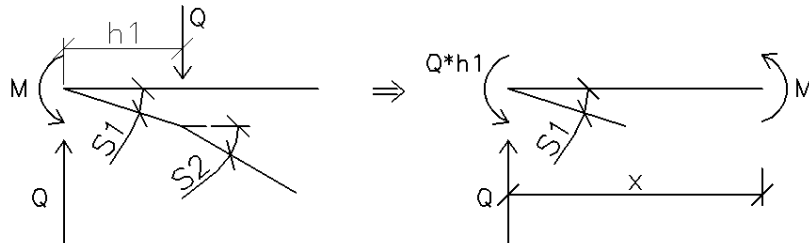
Eins og sjá má á mynd 27 fellur þetta nokkuð vel saman fyrir utan staur 3 í Selá sem sker sig úr eins og áður. Væntanlega hefur e-ð farið úrskeiðis við mælingu á honum eða að hann hafi verið skemmdur á einhvern hátt. Reyndar eru gildin á skúfbylgjuhraðanum frekar há við litlar formbreytingar en þegar formbreytingin eykst lækkar skúfbylgjuhraðinn niður í líklegri gildi. Þess má einnig geta að við útreikninga á skúfbylgjuhraðanum er miðað við að hann breytist ekki með dýpi, þ.e. jafngildur skúfbylgjuhraði. Það er hins vegar ekki þannig í raun því vitað er að skúfbylgjuhraði hækkar með dýpi og skýrir það að vissu leyti af hverju þessi útreiknaði skúfbylgjuhraði er svona hár. Hins vegar má sjá af niðurstöðunum að skúfbylgjuhraðinn lækkar við aukið álag og aukna formbreytingu eins og reikna mátti með, samanber mynd 3.

Ef grafið er skoðað með tilliti til þess að mælingarnar voru gerðar á þremur stöðum þar sem aðstæður eru mismunandi milli staða má segja að grafið sýni að gildin séu ekki á breiðu bili miðað við það. Því má reikna með að nægjanleg nálgun sé að styðjast við meðaltalskúrfu þessa grafs þegar velja á skúfbylgjuhraða fyrir tiltekin dæmi.

3.3.2 Skúfbylgjuhraði bakreiknaður miðað við mældu færslu við efri enda staur

Þegar mælingar voru gerðar við Selá voru tvær færslur mældar, annars vegar færslan við jarðvegsyfirborð sem hefur verið notast við hér á undan og svo hins vegar færslan við efri enda staur.

Til þess að geta reiknað út færsluna við enda staurins, til að bera saman við þá mældu, þarf að beita smá auka útreikningum. Nálgum staurana sem bita með lárétu álagi á hafi (Q) og vægi á enda á eftirfarandi hátt:



Mynd 28. Nálgun staura sem bita.

Höfum þá jafnvægislíkinguna á bilinu $0 < x < h_1$:

$$M + Qh_1 - Qx = 0 \Rightarrow M = -Qh_1 + Qx = Q(x - h_1) \quad (65)$$

Þar sem h_1 er armurinn frá yfirborði að kraftinum, samanber h_1 í töflu 8.

Fyrir bita gildir eftirfarandi diffurjafna:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \Rightarrow \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{Q(x - h_1)}{EI} \quad (66)$$

þar sem y er formbreyting.

Með því að heilda jöfnu (66) fæst líking fyrir hallann:

$$\frac{dy}{dx} = S(x) = \frac{Q}{EI} \left(\frac{x^2}{2} - h_1 x \right) + C_1 \quad (67)$$

Höfum randskilyrðið að í $x = 0$ þar er hallinn $S = S_1$ sem má reikna með jöfnu (18). Líkingin verður þá:

$$S(x) = \frac{Q}{EI} \left(\frac{x^2}{2} - h_1 x \right) + S_1 \quad (68)$$

Til að finna hallann í hæðinni h_1 þar sem krafturinn verkar er h_1 sett inn fyrir x í jöfnu (68):

$$S_2(x = h_1) = \frac{Q}{EI} \left(\frac{h_1^2}{2} - h_1^2 \right) + S_1 = -\frac{Qh_1^2}{2EI} + S_1 \quad (69)$$

Til að finna færsluna í punktinum sem krafturinn verkar er jafna (68) heilduð:

$$y(x) = \frac{Q}{EI} \left(\frac{x^3}{6} - \frac{hx^2}{2} \right) + S_1 x + C_2 \quad (70)$$

Höfum randskilyrðið að í $x = 0$ þá er færslan jöfn reiknuðu færslunni við jarðvegryfirborðið, $C_2 = y$ sem fékkst úr útreikningum í síðasta kafla. Þá fæst færslan í punktinum sem krafturinn verkar með því að stinga h_1 inni jöfnu (70) ásamt $C_2 = y_x$.

$$y(x = h_1) = \frac{Q}{EI} \left(\frac{h^3}{6} - \frac{h^3}{2} \right) + S_1 h_1 + y = \frac{Q}{EI} \left(-\frac{h^3}{3} \right) + S_1 h_1 + y \quad (71)$$

Að lokum má svo nota hornafræði til að finna færsluna við enda staurisins þar sem færslan eykst línulega ofan við punktinn sem krafturinn verkar. Hallinn á færslunni er ϕ_2 og hæðin frá kraftinum að enda staurisins, h_3 , sem fæst úr töflu 8. Færsluna við enda staurisins má þá setja fram með eftirfarandi líkingu:

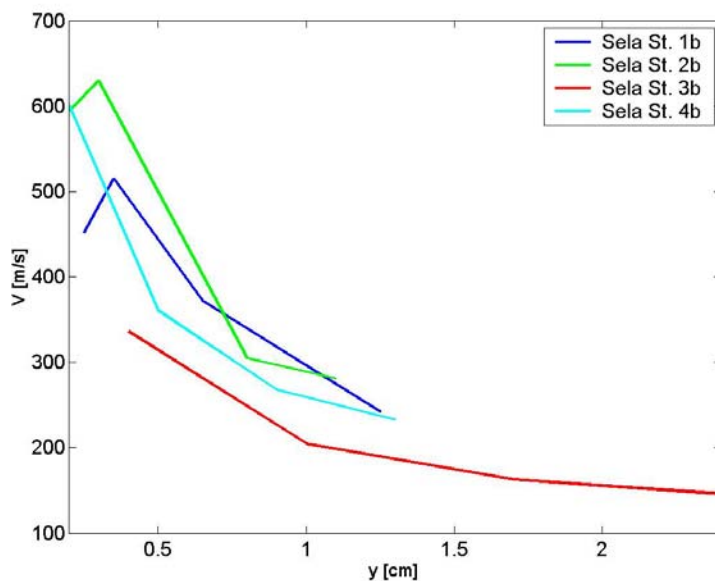
$$y(x = h_3) = y(x = h_1) + h_2 \tan S_2 \quad (72)$$

Niðurstöður þessara útreikninga má sjá hér að neðan í töflu 13.

Tafla 13. Niðurstöður útreikninga á skúfbylgjuhraða fyrir Selá miðað við færslur við efri enda stauris.

Staur 1		Staur 2		Staur 3		Staur 4	
y [cm]	V _s [m/s]	y [cm]	V _s [m/s]	y [cm]	V _s [m/s]	y [cm]	V _s [m/s]
0,25	452	0,20	595	0,40	336	0,20	601
0,35	515	0,30	630	1,00	205	0,50	361
0,65	372	0,80	305	1,70	163	0,90	268
1,25	242	1,10	281	2,40	146	1,30	233

Á mynd 29 má sjá skúfbylgjuhraðann sem fall af færslunni y .



Mynd 29. V_s - y ferill fyrir Selá miðað við færslur við efri enda stauris.

Svo virðist ekki vera sem þessir útreikningar gefi neitt betri niðurstöður svo að í framhaldinu verður notast við útreikninga miðaða út frá færslum við jarðvegryfirborðið.

3.3.3 Stífni stakra staura

Reiknum nú stífni stauranna með aðferðinni sem lýst er í kafla 2.4. Þar sem stífni stauranna ætti að minnka eftir því sem formbreyting þeirra eykst var ákveðið að skoða stífni stauranna við mismunandi færslur. Valið var að skoða stífnina þegar formbreytingin var $y = 0,2$ cm, $y = 0,4$ cm, $y = 0,6$ cm, $y = 0,8$ cm og $y = 1,0$ cm. Eins og sjá má af niðurstöðum mælinga fyrir Selá, tafla 7, þá ná mælingarnar ekki alltaf allan færsluskalann sem skoðaður er við þessa útreikninga. Jafna (46) er svo notuð til að reikna út stífni stauranna. Niðurstöður útreikninganna má sjá í töflum 14 - 16.

Tafla 14. Niðurstöður útreikninga á stífni staura í Skeiðará, steypur staur 29x29 cm.

	1-1S	2-1S
y [cm]	K_{11} [N/m]	K_{11} [N/m]
0,2	$36,2 \cdot 10^6$	$58,2 \cdot 10^6$
0,4	$28,2 \cdot 10^6$	$37,3 \cdot 10^6$
0,6	$24,5 \cdot 10^6$	$27,0 \cdot 10^6$
0,8	$21,0 \cdot 10^6$	$21,5 \cdot 10^6$
1,0	$17,2 \cdot 10^6$	$17,7 \cdot 10^6$

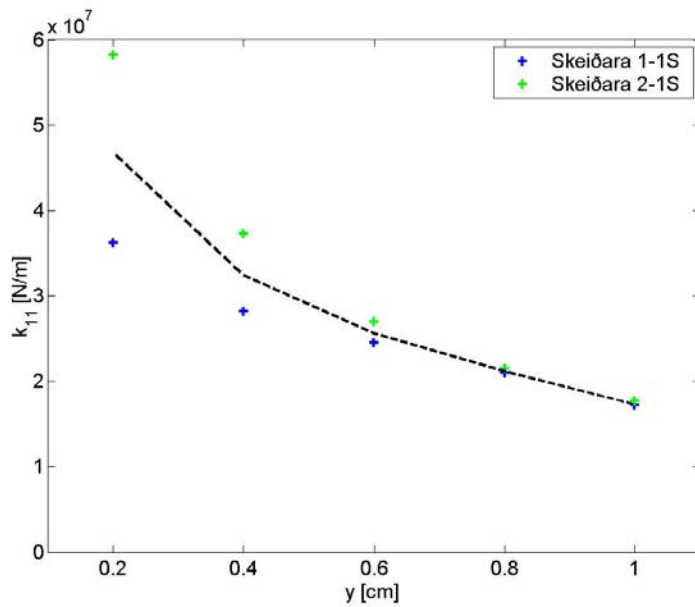
Tafla 15. Niðurstöður útreikninga á stífni staura í Gígju, steypur staur 29x29 cm.

	1-2S	2-2S	3-2S
y [cm]	K_{11} [N/m]	K_{11} [N/m]	K_{11} [N/m]
0,2	$41,9 \cdot 10^6$	$29,4 \cdot 10^6$	$56,1 \cdot 10^6$
0,4	$32,5 \cdot 10^6$	$21,8 \cdot 10^6$	$36,7 \cdot 10^6$
0,6	$26,7 \cdot 10^6$	$19,3 \cdot 10^6$	$27,8 \cdot 10^6$
0,8	$22,4 \cdot 10^6$	$19,4 \cdot 10^6$	$23,3 \cdot 10^6$
1,0	$19,2 \cdot 10^6$	$17,1 \cdot 10^6$	$20,1 \cdot 10^6$

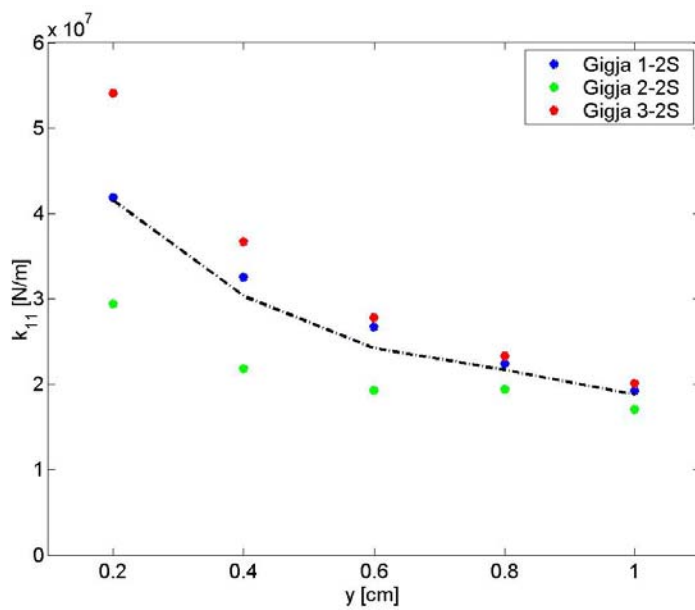
Tafla 16. Niðurstöður útreikninga á stífni staura í Selá, steypur staur 27x27 cm

	Staur 1	Staur 2	Staur 3	Staur 4
y [cm]	K_{11} [N/m]	K_{11} [N/m]	K_{11} [N/m]	K_{11} [N/m]
0,2	$43,4 \cdot 10^6$	$34,1 \cdot 10^6$	-	$35,1 \cdot 10^6$
0,4	$36,6 \cdot 10^6$	$26,7 \cdot 10^6$	-	$31,7 \cdot 10^6$
0,6	$30,7 \cdot 10^6$	$24,3 \cdot 10^6$	$11,2 \cdot 10^6$	$24,8 \cdot 10^6$
0,8	-	$23,0 \cdot 10^6$	$13,3 \cdot 10^6$	$22,0 \cdot 10^6$
1,0	-	-	$12,1 \cdot 10^6$	-

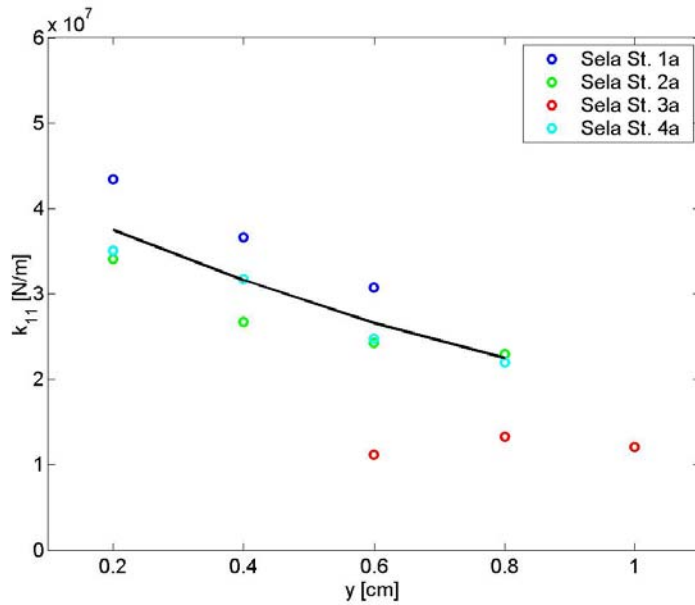
Niðurstöðurnar voru teiknaðar upp í gröfum fyrir hvern mælingastað fyrir sig með meðaltalslínu sem hugsanlega er þá hægt að nota sem viðmið við hönnun á staurum við svipaðar aðstæður. Niðurstöðurnar má sjá á myndum 30 - 33 hér að neðan.



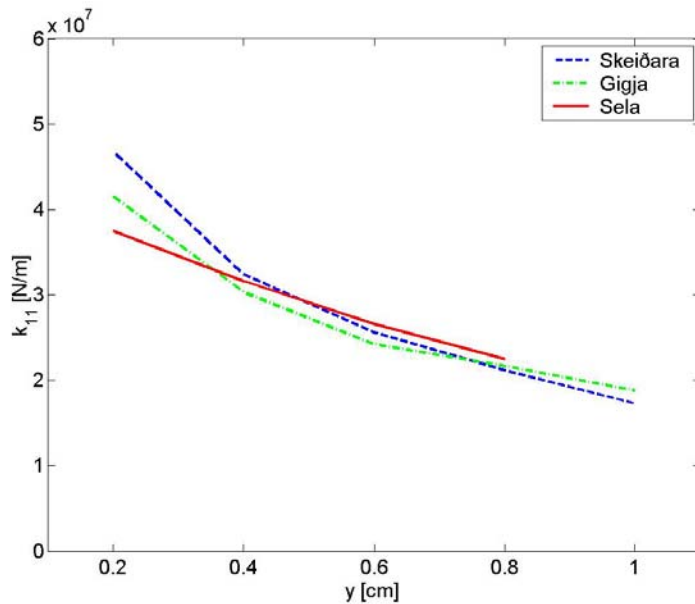
Mynd 30. Stifni – færsluferill, K_{11} -y, fyrir Skeiðará, steypur staur 29x29 cm, ásamt meðaltalsferli.



Mynd 31. Stifni - færsluferill, K_{11} -y, fyrir Gígju, steypur staur 29x29 cm, ásamt meðaltalsferli.



Mynd 32. Stífni – færsluferill, K_{11} -y, fyrir Selá, steyptur staur 27x27 cm, ásamt meðaltalsferli.



Mynd 33. Stífni – færsluferill, K_{11} -y, meðaltalsferill fyrir alla mælistaðina

Eins og sjá má á mynd 33 falla stífni ferlarnir nokkuð vel saman þrátt fyrir þrjá mismunandi mælistaði með mismunandi staurum og mismunandi jarðvegsaðstæðum. Taka má fram að staur 3 í Selá var sleppt við útreikninga á meðaltalslínunni.

4 TÖLULEG DÆMI

Í þessum kafla eru tekin nokkur töluleg dæmi til að sýna hvernig nota megi aðferðarfræðina sem búið er að þróa í köflunum hér að undan.

4.1 Stakur staur – hönnunarfærsla 0,4 cm

4.1.1 Staur með frjálsan enda

Höfum staur eins og notaður var við Gígju, þ.e. steypdur, ferkantaður staur með ummálið 116 cm og þvermálið 29 cm.

Skoðum fyrst hvaða álag má setja á staurinn ef hann er frjálst að ofan, leyfileg færsla hans við efri enda staurisins er skilgreind sem 0,4 cm og vægið þar er núll. Höfum eftirfarandi stærðir:

$$\begin{aligned} E_p &= 36,8 \text{ GN/m}^2 \\ I_p &= 5,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

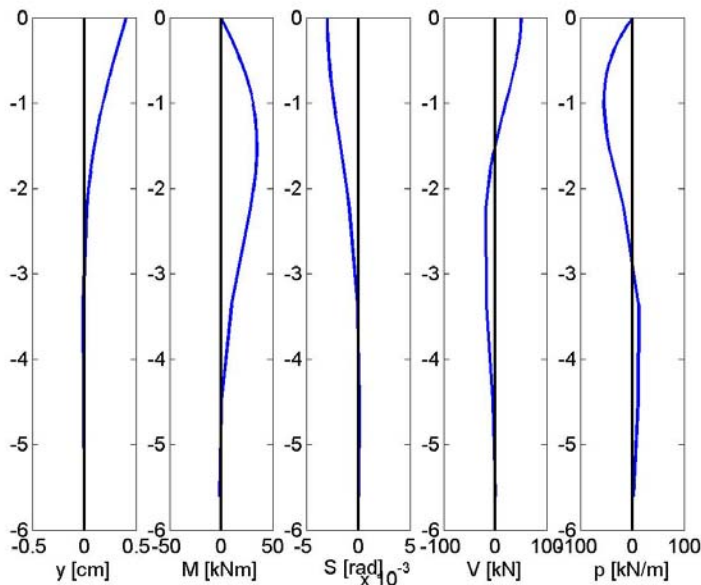
Nota nú mynd 27 til að áætla skúfbylgjuhraðann við þessa færslu, $V_s \approx 260 \text{ m/s}$. Þá má ákvarða E_s út frá jöfnu (2) með $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ og $\nu = 0,3$. Notum svo að $k_h = 1,2 \cdot E_s$ og $n_h = k_h/L_p$. Með þetta í höndunum má ákvarða T með jöfnu (28):

$$T = 0,892 \text{ m}$$

Þá má nota jöfnu (16) til að reikna út leyfilegan kraft á staurinn.

$$\begin{aligned} y &= A_y \frac{Q_g T^3}{EI} + B_y \frac{M_g T^2}{E_p I_p} \\ \Rightarrow 0,004 \text{ m} &= 2,435 \cdot \frac{Q_g \cdot (0,892 \text{ m})^3}{36,8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2 \cdot 5,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4} \\ \Rightarrow Q_g &= \frac{0,004 \text{ m} \cdot 36,8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2 \cdot 5,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4}{2,435 \cdot (0,892 \text{ m})^3} = 50,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

Sjáum nú hvaða áhrif þetta álag hefur á staurinn með því að teikna upp ferla fyrir færsluna, vægið, hallann, skúfkraftinn og svörun jarðvegsins með jöfnum (16) – (20).



Mynd 34. Ferlar fyrir færsluna (y), vægið (M), hallann (S), skúfkraftinn (V) og svörun jarðvegsins (p). Ferlarnir eru bara sýndir niður á 6 metra dýpi þar sem að þar fyrir neðan er engin breyting.

4.1.2 Innspenntur staur

Skoðum nú hvaða kraft má setja á staurinn ef hann er innspenntur að ofan. Þá gildir jafna (34).

$$y = C_y \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} = (A_y - 0,93B_y) \frac{Q_g T^3}{E_p I_p}$$

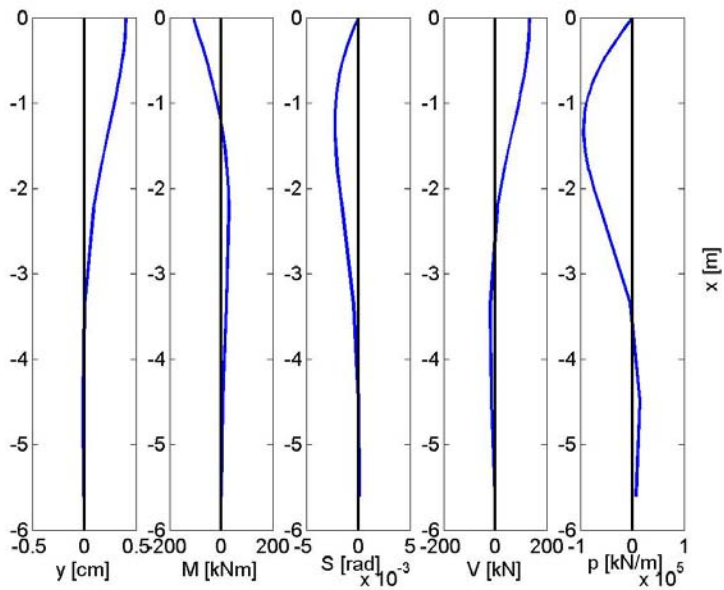
$$\Rightarrow 0,004m = (2,435 - 0,93 \cdot 1,623) \frac{Q_g \cdot (0,892m)^3}{36,8 \cdot 10^9 N/m^2 \cdot 5,89 \cdot 10^{-4} m^4}$$

$$\Rightarrow Q_g = \frac{0,004m \cdot 36,8 \cdot 10^9 N/m^2 \cdot 5,89 \cdot 10^{-4} m^4}{(2,435 - 0,93 \cdot 1,623) \cdot (0,892m)^3} = 132,0kN$$

Af þessu má sjá að þegar staur er innspenntur og verður fyrir álagi frá láréttum krafti en engu vægi þolir hann um 150% meira álag en þegar staurinn er frjáls.

Skoðum ferlana fyrir staurinn núna þegar hann er innspenntur þar sem notast er við jöfnur (34) – (38), sjá mynd 35.

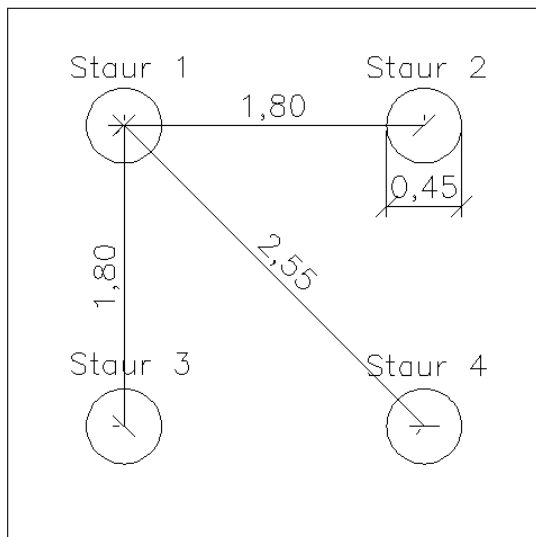
Ef stærsta beygjuvægið er skoðað sést að þegar staurinn er frjáls var útgildið $M_{\max} \approx 35$ kNm og þegar endinn var innspenntur var $M_{\max} \approx 110$ kNm. Því er ljóst að það reynir allverulega meira á staurinn þegar hann er innspenntur miðað við sömu hönnunarfærslu, þ.e. 0,4 cm.



Mynd 35. Ferlar fyrir færsluna (y), vægið (M), hallann (S), skúfkraftinn (V) og svörun jarðvegsins (p). Ferlarnir eru bara sýndir niður á 6 metra dýpi þar sem að þar fyrir neðan er engin breyting.

4.2 Stauraþyrping með fjórum staurum – hönnunarfærsla 0,4 cm

Skoðum nú ef staurinn í dæminu hér á undan er hluti af 2×2 stauraþyrpingu. Miðað er við að stauraendi sé innspenntur eins og eðlilegt er að gera ráð fyrir þegar stauraendar eru steyptir saman með staurahettu (e. pile cap). Þá má skoða heildarstífni þyrpingarinnar með nokkrum aðferðum sem var lýst hér að framan sem sjá má á mynd 35. Skoðum nú heildarstífni stauraþyrpingarinnar með fyrri tveimur aðferðunum sem lýst var í kafla 2.5.



Mynd 36. Uppsetning 2×2 stauraþyrpingu í dæmum í köflum 4.2.1 og 4.2.2 (málsetningar í mm).

4.2.1 Einföld aðferð

Prófum fyrst aðferð Prakish (1990) sem skilgreind er í kafla 2.5.1. Hlutfallið s/d er í þessu tilviki

$$\frac{s}{d} = \frac{1,80m}{0,45m} = 4$$

Þá fæst úr töflu 3 að minnkunarstuðullinn er $G_e = 0,60$. Heildarburðargetu stauraþyrpingarinnar má þá reikna með jöfnu (47) með því að nota burðargetu innspennts staks stauris úr dæminu hér að ofan.

$$G_e = \frac{(Q_u)_g}{nQ_u} \Rightarrow (Q_u)_G = 0,60 \cdot 4 \cdot 132,0kN = 316,8kN$$

4.2.2 Stefnuháð, einföld aðferð

Prófum nú aðferð GeoSpectra (1997) sem lýst er í kafla 2.5.2.

Þurfum að byrja á því að finna α – stuðlana fyrir stauraþyrpinguna. Skilgreinum þyrpinguna þannig að útreikningarnir eru miðaðir við staurinn í efra vinstra horninu, köllum hann staur 1. Staurinn í efra hægra horninu kallast staur 2, staurinn í neðra vinstra horninu staur 3 og staurinn í hægra neðra horninu staur 4. Reiknum með að álagið komi frá vinstri til hægri þ.a. staur 2 liggur í álagsstefnu miðað við staur 1, staur 3 liggur þvert á álagsstefnuna og staur 4 liggur í 45° miðað við staur 1. Af mynd 8 má finna α – stuðlana fyrir innspenntan staur:

$$s/d = \frac{2,55m}{0,45m} = 5,67$$

$$\alpha_2 = 0,16$$

$$\alpha_3 = 0,14$$

Til þess að finna α – stuðulinn fyrir staur 4 þarf að reikna nýtt s/d og nota svo jöfnu (55).

$$s/d = \frac{2,55m}{0,45m} = 5,67$$

þá er

$$\alpha_r = 0,13$$

$$\alpha_s = 0,12$$

$$\Rightarrow \alpha_4 = 0,13 + (0,12 - 0,13) \cdot \frac{45}{90} = 0,125$$

Nú má nota jöfnu (53) til að finna minnkunarstuðul fyrir þennan staur:

$$\beta = \frac{1}{1 + (0,16 + 0,14 + 0,125)} = 0,702$$

Þar sem afstaða allra stauranna er sú sama miðað við hina staurana í þyrpingunni fæst sami minnkunarstuðullinn fyrir alla staurana. Því verður minnkunarstuðull þyrpingarinnar sá sami og fyrir staur 1, þ.e. $\beta = 0,702$.

Heildarburðargeta þyrpingarinnar er þá:

$$(Q_u)_G = 0,704 \cdot 4 \cdot 132,0kN = 371,7kN$$

Ef þessi niðurstaða er borin saman við niðurstöðuna úr einfaldari aðferðina má sjá að munurinn milli lausnanna er 14,5%. Segja má að lausn með einfaldari aðferðin sé öruggari megin þar sem hún er ekki eins nákvæm en gefur hins vegar lægri burðargetu. Því má segja að í ýmsum tilfellum sé hún nægileg nálgun en ef meta þarf þetta nákvæmara væri viturlegra að nota ítarlegri aðferðina.

4.3 Þekkt stærð af staur við svipaðar aðstæður og við Skeiðará

Reiknum með að hanna eigi stauraundirstöðu við svipaðar aðstæður og eru við Skeiðará og eins stauragerð og var notuð þar. Þá má notast við mynd 30 til að áætla líklegt gildi á stífni stausins. Til þess þarf fyrst að velja líklegt gildi á færslunni og notast svo við hana til að lesa af gildið á k_{11} . Ef færslan er valin sem 0,40 cm fæst af mynd 30:

$$K_{11} \approx 3,2 \cdot 10^7 \text{ N/m}$$

4.4 Óþekkt stærð á staur við svipaðar aðstæður og við Skeiðará

Skoðum nú tilvik þar sem staurinn sem á að nota er ekki eins og staurarnir sem hafa verið prófaðir. Prófum staur sem hefur hringlaga þversnið með þvermálið 0,45 m og lengdina 14 m og jarðvegsaðstæður svipaðar og við Selá. Til þess að ákvarða stífnina þarf eins og áður að velja líklegt gildi á færslunni og nota hana svo til að ákvarða skúfbylgjuhraðann út frá meðaltalsferlinum á mynd 27. Ef færslan er valin 0,40 cm eins og áður þá fæst úr grafinu að

$$V_s = 260 \text{ m/s}$$

Svo er notast við aðferðina í kafla 2.4 til að reikna út stífnina út frá þessu, sjá má einfalt reikniforrit í Viðauka A. Eftirfarandi inntaksstærðir þarf að setja inn í forritið:

$$\rho_s = 2000 \text{ kg/m}^3 - \text{rúmþyngd jarðvegsins}$$

$$\nu = 0,3 - \text{Poisson hlutfall jarðvegsins}$$

$$E_p = 36,8 \text{ GN/m}^2 - \text{fjaðurstuðull steypstaus}$$

$$I_p = 20,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 - \text{hverfitregða staus} \left(I_p = \frac{\pi}{64} d^4 \right)$$

$$L_p = 14 \text{ m} - \text{lengd staus}$$

$$V_s = 260 \text{ m/s}$$

Þegar forritið er keyrt fæst eftirfarandi gildi á stífninni:

$$K_{11} \approx 4,6 \cdot 10^7 \text{ N/m}$$

Af þessum dæmum má sjá að á einfaldan hátt má áætla stífnina stakra staura með þessari aðferðarfræði sem hér hefur verið lýst.

5 Tölvulíkan af brú

Að síðustu er nauðsynlegt að taka eitt raunverulegt dæmi til að sýna hvernig nota megi aðferðina til hönnunar á mannvirki á stauraundirstöðum. Líkan af brú er byggt upp í hugbúnaðinum SAP2000, sem byggir á einingaraðferðinni (e. finite element method), og notum aðferðarfræðina sem þróuð hefur verið í þessu verkefni til þess að skilgreina stífni staks staur og stauraþyrpingar. Í samráði við Vegagerðina var ákveðið að skoða brú sem búið er að hanna en á eftir að byggja og sjá hvernig hún hegðar sér við jarðskjálftaálag. Sú brú sem varð fyrir valinu er brú yfir Hrútafjarðará í Hrútafirði. Þó að Hrútafjörðurinn sé ekki á jarðskjálftasvæði var ákveðið að nota þessa brú þar sem að hún hefur nýlega verið hönnuð og ekki svo ólík öðrum brúm sem byggðar eru á Íslandi nú til dags.

5.1 Bakgrunnur

Núverandi brú yfir Hrútafjarðará er á Hringveginum þegar komið er niður af Holtavörðuheiði að norðanverðu. Hún er steipt bogabré byggt árið 1912 og breikkuð árið 1993 [Gunnar H. Jóhannesson o.fl., 2006]. Þar sem aðkoma að brúnni er slæm, vegna krapprar beygju að henni að vestanverðu, hefur verið ákveðið að færa brúarstæðið utar í fjörðinn og út á áreyrnar.



Mynd 37. Núverandi brú yfir Hrútafjarðará [Gunnar H. Jóhannesson, 2006].

Með þessari breytingu kemur nýja brúin í stað gömlu brúarinnar yfir Hrútafjarðará auk einbreiðrar brúar yfir Síká og tvíbreiðrar brúar yfir Ormsá, þannig að þetta er einnig liður í því að fækka einbreiðum brúm á Hringveginum.

5.2 Kennistærðir brúarinnar

Fyrirhuguð brú yfir Hrútafjarðará verður staðsteypt brú með tvo landstöpla og einn millistöpl. Stöplarnir verða grundaðir á staurum sem reknir verða niður á klöpp. Tvær blýgúmmilegur verða svo milli hvers stöpl og yfirbyggingar

Það sem þarf að þekkja þegar gera á einfalt tölvulíkan af svona brú er þversnið yfirbyggingarinnar, landstöpla og millistöpl, stauragerð, stauraþyrpingar í landstöplum og millistöpli og gerð og eiginleika blýgúmmileganna. Bæði stauraþyrpingarnar og blýgúmmilegurnar á hverjum stöpli eru svo nálgáðar sem gormar.

Kennistærðir steypunnar eru þær sömu fyrir yfirbygginguna, landstöplana og millistöplinn:

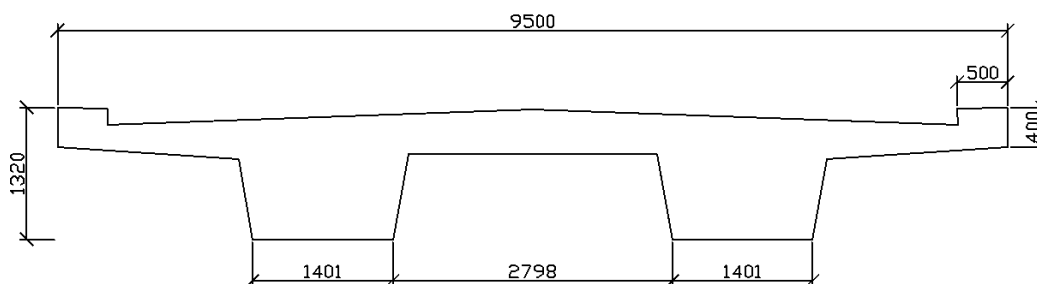
$$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3 - \text{rúmpýngd steypunnar}$$

$$\nu = 0,2 - \text{Poisson hlutfall}$$

$$E = 33,5 \text{ GPa} - \text{fjaðurstuðull steypunnar (C35/45) [Eurocode 2, EC2]}$$

5.2.1 Þversnið yfirbyggingar

Þversnið yfirbyggingarinnar á hafi má sjá á mynd 38.



Mynd 38. Þversnið yfirbyggingar, málsetning í mm.

Yfir milliásetu er þversniðið þykkara, þ.e. opið milli bitanna er fyllt. Í þessu dæmi er hins vegar gerð sú nálgun að sniðið sem er á höfunum gildi fyrir alla yfirbygginguna þar sem breyting á því hefur lítil áhrif á niðurstöðurnar en flækir hins vegar uppsetningu líkansins í forritinu. Kennistærðir þversniðsins eru:

$$A = 6,245 \text{ m}^2 - \text{flatarmál þversniðsins}$$

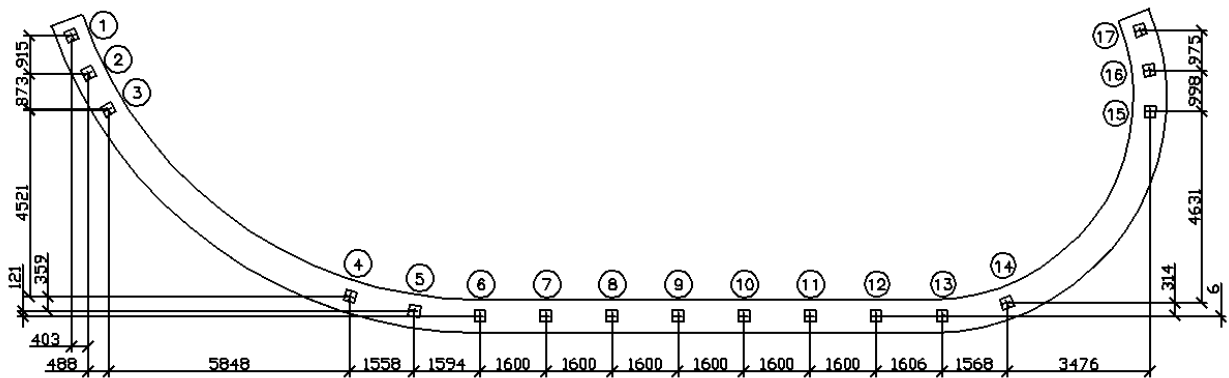
$$I_y = 0,771 \text{ m}^4 - \text{hverfitregða þversniðsins um y-ás}$$

$$I_z = 37,67 \text{ m}^4 - \text{hverfitregða þversniðsins um z-ás}$$

Taka skal fram að x-ásinn er í langátt brúarinnar, y-ásinn þvert á brúnna og z-ásinn lóðrétt.

5.2.2 Landstöplar

Landstöplarnir verða tveir, vestan við brúna og austan við hana. Stærð þeirra og stauraþyrpingar verða alveg eins í þeim báðum svo að nóg er að skoða annan þeirra og nota þær niðurstöður fyrir þá báða. Staurafjöldi undir hvorum stöpli er 17 og má sjá dreifingu þeirra á mynd 39.



Mynd 39. Þversnið landstöpuls og staðsetning staura, málsetning í mm.

Kennistærðir landstöpulsins eru eftirfarandi:

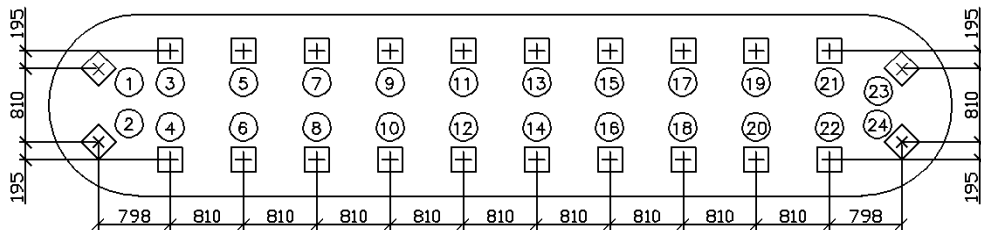
$$A = 27,6 \text{ m}^2$$

$$I_y = 134,9 \text{ m}^4$$

$$I_x = 2177 \text{ m}^4$$

5.2.3 Millistöpull

Einn millistöpull verður á miðju hafi brúarinnar. Staurafjöldi undir honum er 24 og má sjá dreifingu þeirra á mynd 40.



Mynd 40. Staðsetning staura í millistöpli, málsetning í mm.

Kennistærðir millistöpullsins eru eftirfarandi:

$$A = 19,14 \text{ m}^2$$

$$I_y = 6,119 \text{ m}^4$$

$$I_x = 147,1 \text{ m}^4$$

5.2.4 Staurar

Staurarnir sem notaðir verða við grundun þessarar brúar verða steyptrir 270x270 mm og 23 m langir. Notum sömu aðferð og í kafla 4.4 til að meta stífni staks stauris og svo aðferðina sem notuð er í kafla 4.2.2 til að reikna þyrpingaráhrifin.

Nokkrar kennistærðir þarf að skilgreina til að reikna út stífni staks stauris:

$$\rho_s = 2000 \text{ kg/m}^3 - \text{rúmþyngd jarðvegsins}$$

$$\nu = 0,3 - \text{Poisson hlutfall jarðvegsins}$$

$$E_p = 36,8 \text{ GN/m}^2 - \text{fjaðurstuðull steypis staus}$$

$$I_p = 4,42 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 - \text{hverfitregða staus}$$

$$L_p = 23 \text{ m} - \text{lengd staus}$$

Giskum nú á að færslan verði um 0,6 cm og má þá lesa nálgun fyrir skúfbylgjuhraðann af mynd 27, $V_s \approx 220 \text{ m/s}$. Með útreikningum fæst þá með jöfnu (46) að stífni staks staus er:

$$K_{II} = 12,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Til samanburðar má sjá að stífnin sem fæst með jöfnu (50) verður:

$$K_{II} = 193,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Sjá má af þessu að þessi jafna gefur mun hærra gildi en sú stífni sem reiknuð er með aðferðarfræðinni sem skilgreind er í þessu verkefni.

Skoðum nú þyrpingaráhrifin fyrir stöplana. Eins og áður kom fram er nóg að skoða annan landstöpulinn og nota niðurstöðuna fyrir þá báða. Höfum staur nr. 10 sem viðmiðunarstaur í landstöplunum en staur nr. 14 sem viðmiðunarstaur í millistöplinum. Staurarnir sem eru valdir eru fyrir miðju þyrpingarinnar og ættu því að gefa mestu minnkunina. Sá minnkunarstuðul er svo notaður fyrir alla staurana í þyrpingunni þó svo að með réttu ætti að reikna minnkunarstuðul fyrir hvern og einn staur þar sem mismunandi fjarlægðir eru milli staura eftir stöðu þeirra í þyrpingunni. Til einföldunar er það látið liggja milli hluta í verkefninu og notast við gildi sem er lægra en það rétta.

Þegar staurafjöldinn er orðinn þetta mikill, eins og í stöplunum, er auðveldast að setja reikningana fyrir α - stuðulinn uppí töflu. α_r og α_s stuðlana má lesa af mynd 8. Í töflum 17 og 18 má sjá þessa útreikninga fyrir landstöpul og í töflum 19 og 20 fyrir millistöpulinn.

Tafla 17. Útreikningar á α - stuðli fyrir staur nr 10 í landstöpli þegar álag er í þverátt brúar.

Nr. Staus	Fjarlægð í þverátt [mm]	Fjarlægð í langátt [mm]	Horn [°]	Bein fjarlægð [mm]	s/d	α_r	α_s	A
1	16666	7051	22,9	18096	67	0	0	0
2	16265	6135	20,7	17384	64	0	0	0
3	15783	5259	18,4	16636	62	0	0	0
4	9555	462	2,8	9566	35	0	0	0
5	7994	346	2,5	8001	30	0	0	0
6	6400	0	0	6400	24	0	0	0
7	4800	0	0	4800	18	0	0	0
8	3200	0	0	3200	12	0	0	0
9	1600	0	0	1600	6	0,115	0,110	0,115
11	1600	0	0	1600	6	0,115	0,110	0,115
12	3200	0	0	3200	12	0	0	0
13	4800	0	0	4800	18	0	0	0
14	6168	283	2,6	6174	23	0	0	0
15	9227	4141	24,2	10114	37	0	0	0
16	9227	5141	29,1	10563	39	0	0	0
17	9227	6119	33,6	11072	41	0	0	0
							$\Sigma\alpha$	0,23

Tafla 18. Útreikningar á α - stuðli fyrir staur nr. 10 í landstöpli þegar álag er í langátt brúar.

Nr.	Fjarlægð í þverátt [mm]	Fjarlægð í langátt [mm]	Horn [°]	Bein fjarlægð [mm]	s/d	α_r	α_s	A
1	16666	7051	67,1	18096	67	0	0	0
2	16265	6135	69,3	17384	64	0	0	0
3	15783	5259	71,6	16636	62	0	0	0
4	9555	462	87,2	9566	35	0	0	0
5	7994	346	87,5	8001	30	0	0	0
6	6400	0	90	6400	24	0	0	0
7	4800	0	90	4800	18	0	0	0
8	3200	0	90	3200	12	0	0	0
9	1600	0	90	1600	6	0,115	0,110	0,110
11	1600	0	90	1600	6	0,115	0,110	0,110
12	3200	0	90	3200	12	0	0	0
13	4800	0	90	4800	18	0	0	0
14	6168	283	87,4	6174	23	0	0	0
15	9227	4141	65,8	10114	37	0	0	0
16	9227	5141	60,9	10563	39	0	0	0
17	9227	6119	56,4	11072	41	0	0	0
$\Sigma\alpha$								0,22

Tafla 19. Útreikningar á α - stuðli fyrir staur nr. 14 í millistöpli þegar álag er í þverátt brúar.

Nr.	Fjarlægð í þverátt [mm]	Fjarlægð í langátt [mm]	Horn [°]	Bein fjarlægð [mm]	s/d	α_r	α_s	A
1	4848	1005	11,7	4951	18	0	0	0
2	4848	195	2,3	4852	18	0	0	0
3	4050	1200	16,5	4224	16	0	0	0
4	4050	0	0	4050	15	0	0	0
5	3240	1200	20,3	3455	13	0	0	0
6	3240	0	0	3240	12	0	0	0
7	2430	1200	26,3	2710	10	0,070	0,070	0,070
8	2430	0	0	2430	9	0,080	0,080	0,080
9	1620	1200	36,5	2016	7	0,100	0,100	0,100
10	1620	0	0	1620	6	0,115	0,110	0,115
11	810	1200	56,0	1448	5	0,140	0,135	0,143
12	810	0	0	810	3	0,200	0,165	0,200
13	0	1200	90	1200	4	0,160	0,140	0,140
15	810	1200	56,0	1448	5	0,140	0,135	0,143
16	810	0	0	810	3	0,200	0,165	0,200
17	1620	1200	36,5	2016	7	0,100	0,100	0,100
18	1620	0	0	1620	6	0,115	0,110	0,115
19	2430	1200	26,3	2710	10	0,070	0,070	0,070
20	2430	0	0	2430	9	0,080	0,080	0,080
21	3240	1200	20,3	3455	13	0	0	0
22	3240	0	0	3240	12	0	0	0
23	4038	1005	14,0	4161	15	0	0	0
24	4038	195	2,8	4043	15	0	0	0
$\Sigma\alpha$								1,556

Tafla 20. Útreikningar á α - stuðli fyrir staur nr. 14 í millistöpli þegar álag er í langátt brúar.

Nr.	Fjarlægð í þverátt [mm]	Fjarlægð í langátt [mm]	Horn [°]	Bein fjarlægð [mm]	s/d	α_r	α_s	α
1	4848	1005	78,3	4951	18	0	0	0
2	4848	195	87,7	4852	18	0	0	0
3	4050	1200	73,5	4224	16	0	0	0
4	4050	0	90	4050	15	0	0	0
5	3240	1200	69,7	3455	13	0	0	0
6	3240	0	90	3240	12	0	0	0
7	2430	1200	63,7	2710	10	0,070	0,070	0,070
8	2430	0	90	2430	9	0,080	0,080	0,080
9	1620	1200	53,5	2016	7	0,100	0,100	0,108
10	1620	0	90	1620	6	0,115	0,110	0,110
11	810	1200	34,0	1448	5	0,140	0,135	0,142
12	810	0	90	810	3	0,200	0,165	0,165
13	0	1200	0	1200	4	0,160	0,140	0,160
15	810	1200	34,0	1448	5	0,140	0,135	0,142
16	810	0	90	810	3	0,200	0,165	0,165
17	1620	1200	53,5	2016	7	0,100	0,100	0,101
18	1620	0	90	1620	6	0,115	0,110	0,110
19	2430	1200	63,7	2710	10	0,070	0,070	0,070
20	2430	0	90	2430	9	0,080	0,080	0,080
21	3240	1200	69,7	3455	13	0	0	0
22	3240	0	90	3240	12	0	0	0
23	4038	1005	76,0	4161	15	0	0	0
24	4038	195	87,2	4043	15	0	0	0
						$\Sigma\alpha$	1,510	

Þegar búið er að finna α – stuðlana fyrir þessa tilteknu staura má reikna út minnkunarstuðulinn β með jöfnu (53) þar sem, eins og áður var tekið fram, sami minnkunarstuðull er notaður fyrir alla staura í þyrpingunni til að einfalda reikningana. Niðurstöður þeirra reikninga má sjá í töflu 21 hér að neðan.

Tafla 21. β - minnkunarstuðlar fyrir land- og millistöpul.

	Álag í þverátt brúar	Álag í langátt brúar
Landstöpull	0,813	0,820
Millistöpull	0,391	0,398

Af þessu má sjá að þar sem bil milli staura er lítið miðað við þversnið staura, eins og í millistöplinum, er minnkunin hlutfallslega meiri en þar sem bilið á milli staura er meira, eins og í landstöplunum. Af töflunum fyrir landstöplana má sjá að þar eru aðeins tveir staurar sem hafa minnkunarhrif á heildarstífnu. Hins vegar má sjá í töflunum fyrir millistöpulinn að þar eru miklu fleiri staurar sem eru nógu nálægt viðmiðunarstaurnum til að hafa minnkunarhrif á heildarstífnina.

Nú má reikna heildarstífnu þyrpingarinnar með jöfnu (52) fyrir stöplana bæði þegar álagið kemur úr þverátt brúar og langátt hennar.

Fyrir landstöpul verður stífnin eftirfarandi:

$$\text{Þverátt: } K_G = 17 \cdot 12,5 \cdot 10^6 \text{ N/m} \cdot 0,813 = 172,8 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

$$\text{Langátt: } K_G = 17 \cdot 12,5 \cdot 10^6 \text{ N/m} \cdot 0,820 = 174,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Fyrir millistöpul verður stífnin:

$$\text{Þverátt: } K_G = 24 \cdot 12,5 \cdot 10^6 \text{ N/m} \cdot 0,391 = 117,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

$$\text{Langátt: } K_G = 24 \cdot 12,5 \cdot 10^6 \text{ N/m} \cdot 0,398 = 119,4 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Þar sem að stöplarnir mynda 20° horn við miðlínu vegar þarf að taka tillit til þess þegar stífnin er sett inn í tölvulíkanið. Því þarf að umreikna stífnina yfir í x- og y-átt.

Stífni fyrir landstöpul verður þá:

$$\text{Þverátt brúar: } K_{Gy} = 174,3 \cdot 10^6 \cdot \sin^2 20^\circ + 172,8 \cdot 10^6 \cdot \cos^2 20^\circ = 173,0 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

$$\text{Langátt brúar: } K_{Gx} = 172,8 \cdot 10^6 \cdot \sin^2 20^\circ + 174,3 \cdot 10^6 \cdot \cos^2 20^\circ = 174,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Stífni fyrir millistöpul verður:

$$\text{Þverátt brúar: } K_{Gy} = 119,4 \cdot 10^6 \cdot \sin^2 20^\circ + 117,3 \cdot 10^6 \cdot \cos^2 20^\circ = 117,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

$$\text{Langátt brúar: } K_{Gx} = 117,3 \cdot 10^6 \cdot \sin^2 20^\circ + 119,4 \cdot 10^6 \cdot \cos^2 20^\circ = 119,2 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Deyfingu gormanna þarf einnig að skilgreina. Notum því jöfnu (61) til að reikna nálgun á deyfingu þeirra:

$$c = 4 \cdot 0,27 \text{ m} \cdot 2000 \text{ kg/m}^3 \cdot 220 \text{ m/s} = 475200 \text{ Ns/m}^2$$

5.2.5 Blýgúmmílegur

Upplýsingar um blýgúmmílegurnar voru fengnar frá Vegagerðinni. Eftirfarandi kennistærðir voru nauðsynlegar til þess að geta nálgað legurnar með jafngildum línulegum gormum, sjá mynd 44.

$$K_d = 1257 \text{ kN/m} - \text{skúfstífni eftir flot}$$

$$K_u = 12566 \text{ kN/m} - \text{skúfstífni fyrir flot}$$

$$F_y = 113 \text{ kN} - \text{flotkraftur blýs}$$

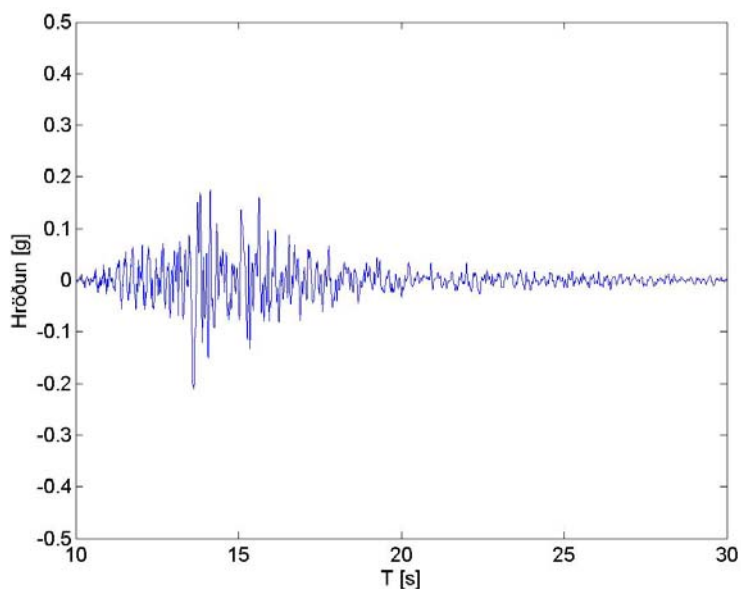
$$Q_b = 102 \text{ kN} - \text{hönnunarflotkraftur blýs}$$

Með jöfnu (63) fæst sú lárétta stífni sem þarf í tölvulíkanið. Það þarf hins vegar að prófa sig áfram með hver færslan er þar til hún passar við þá sem að forritið reiknar út.

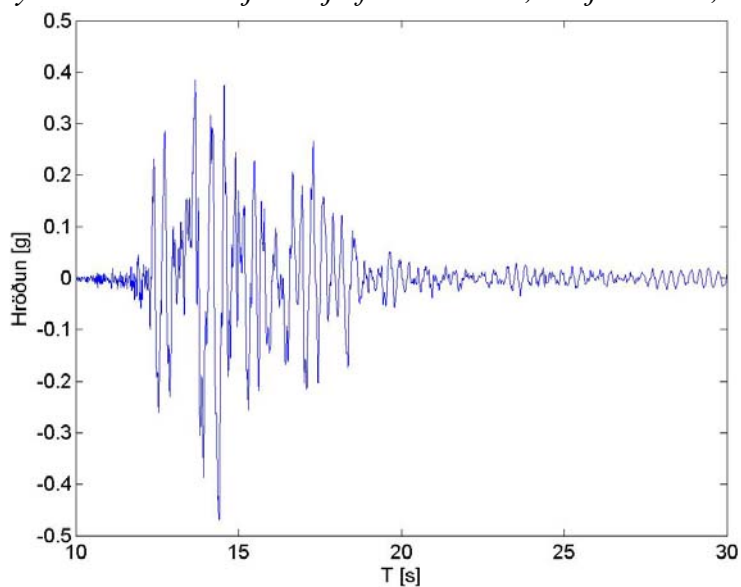
$$K_{eff} = 1257 \text{ kN/m} + \frac{102 \text{ kN}}{y}$$

5.3 Jarðskjálftaálag

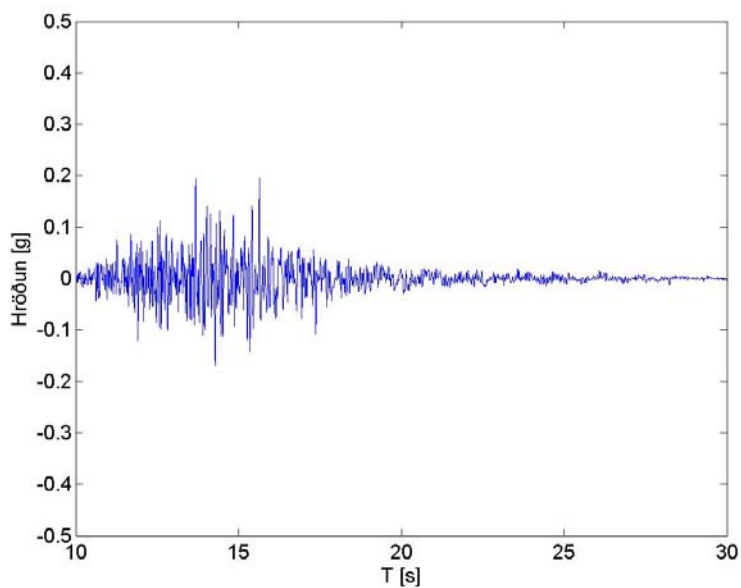
Ákveðið var að nota hröðunartímaraðirnar fyrir jarðskjálftann sem skráðar voru á Hellu í Suðurlandsskjálftanum þann 17. júní árið 2000, kl. 15.40 til að setja á brúna í þessu dæmi. Á myndum 41 og 42 má sjá tímaraðirnar fyrir langstefnu brúarinnar og þvert á hana. Á mynd 43 má hins vegar sjá tímaröðina í lóðrétta stefnu en hún var ekki notuð í þessu dæmi.



Mynd 41. Tímaröð jarðskjálftans á Hellu, 17. júní 2000, kl. 15.40 í langátt brúarinnar



Mynd 42. Tímaröð jarðskjálftans á Hellu, 17. júní 2000, kl. 15.40 í þverátt brúarinnar

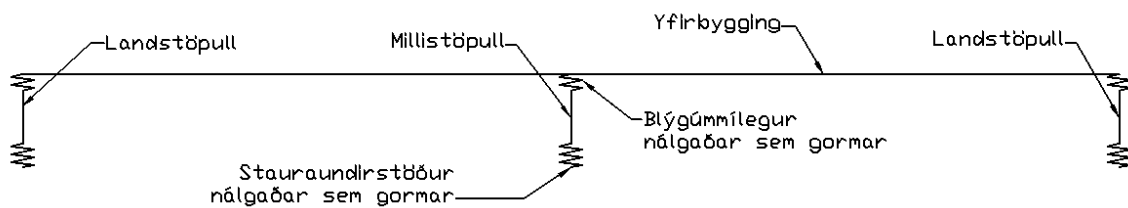


Mynd 43. Tímaröð jarðskjálftans á Hellu, 17. júní 2000, kl. 15.40 í lóðrétta stefnu

Auk þessara tímaráða var sett 0,05 deyfing fyrir kerfið í heild sem er kannski ekki raunhæft þegar blýgúmmílegur eru milli stöpla og yfirbyggingar sem hafa mun meiri deyfingu. Því var þessu gildi breytt þegar leið á verkefnið eins og sjá má í niðurstöðunum hér að neðan.

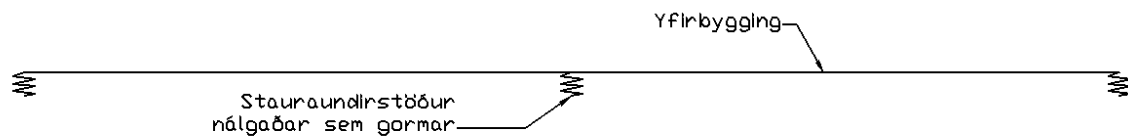
5.4 Uppsetning tölvulíkans

Reynt er að nálga brúna á sem bestan hátt með einföldu líkani í forritinu SAP2000. Eins og áður hefur komið fram eru stauraundirstöðurnar og blýgúmmílegurnar nálgaðar með gormum. Stífni stauraundirstaðanna í lárétta stefnu er skilgreind og stífni blýgúmmíleganna bæði í lárétta og lóðrétta stefnu. Hverfitregða og flatarmál þversniða yfirbyggingar og stöpla er einnig skilgreint í líkaninu. Á mynd 44 má sjá líkanið sem notað var til nálgunar á brúnni.



Mynd 44. Líkan 1 sem notað var í SAP2000 til nálgunar á brúnni.

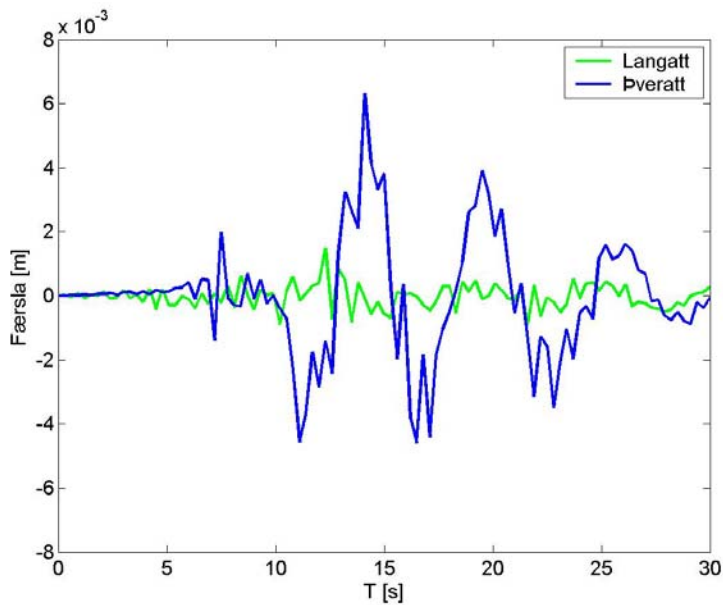
Til samanburðar var líka prófað að gera ennþá einfaldara líkan þar sem stauraundirstöðurnar, eða gormarnir sem nálga þær, eru settar beint undir yfirbygginguna og blýgúmmílegum sleppt eins og sjá má á mynd 45.



Mynd 45. Líkan 2, einfaldara líkan sem notað var í SAP2000 til nálgunar á brúnni.

5.5 Niðurstöður

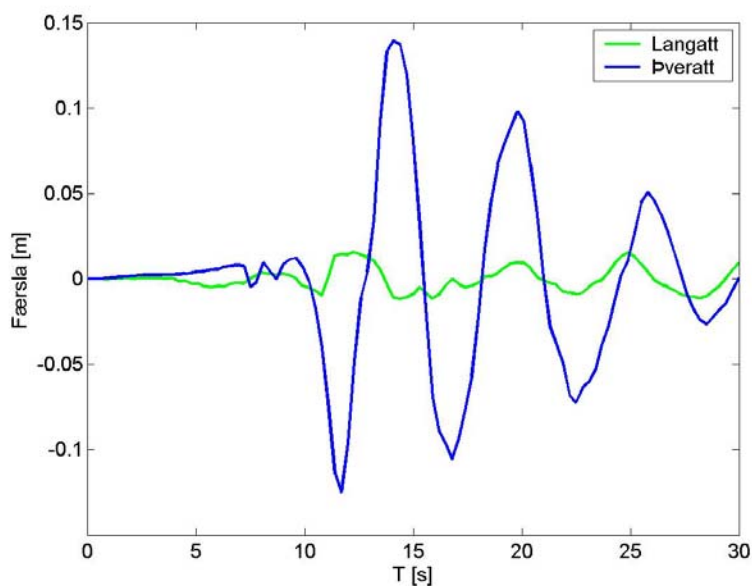
Byrjum á því að skoða líkan 1 sem sjá má á mynd 44. Prófun sýnir að stífni gormanna sem settir eru inn fyrir blýgúmmílegurnar þarf að vera $K_{eff} = 3,971 \cdot 10^6$ N/m sem fæst með jöfnu (63). Þegar líkanið er keyrt kemur í ljós að mesta færslan verður í þverstefnu brúarinnar (eftir y-ás). Á mynd 46 má sjá hvernig færslan undir millistöplinum breytist með tíma. Það er sú færsla sem efsti hluti stauranna verða fyrir.



Mynd 46. Færsla fyrir líkan 1 undir millistöpli, efst í staurunum, sem fall af tíma.

Eins og sjá má á mynd 46 er mesta færslan í staurunum í þverátt brúarinnar rúmlega 0,6 cm sem er alveg innan viðráðanlegra marka og því ekki ástæða til að fara út í einhverjar ráðstafanir til að minnka þær.

Á mynd 47 má svo sjá hvernig færslan í yfirbyggingunni breytist með tíma.



Mynd 47. Færsla fyrir líkan 1 í yfirbyggingu, yfir millistöpli, sem fall af tíma.

Af mynd 47 má sjá að mesta færsla yfirbyggingarinnar í þverátt brúarinnar er tæplega 14 cm sem er óviðunandi þar sem legurnar þola ekki svo miklar færslur. Hins vegar má segja að líkanið sé ekki alveg rétt þar sem deyfingarstuðull virkisins var settur 0,05, sbr. kafla 5.3 en ætti að vera mun meiri vegna blýgúmmileganna. Réttara væri að reikna deyfinguna með jöfnu (64). Til þess að reikna hana út þarf að áætla færsluna og prófa sig áfram þar til hún passar við útreiknaða færslu forritsins. Við prófun fæst að við færsluna 6 cm þá er deyfingin eftirfarandi og gefur sömu færslu við keyrslu á forritinu:

$$\beta_{eff} = \frac{4 \cdot 102 \cdot 10^3 N (0,06m - 102 \cdot 10^3 N / 9 \cdot 1257 \cdot 10^3 N/m)}{2\pi (1257 \cdot 10^3 N/m \cdot 0,06m + 102 \cdot 10^3 N) 0,06m} = 0,31$$

Eins og sjá má á þessu munar mjög miklu á deyfingunni, þar sem deyfingarhlutfallið breytist úr 0,05 í 0,31 þegar tekið er tillit til deyfingar blýgúmmileganna. Þá eru færslurnar líka orðnar ásættanlegar fyrir blýgúmmilegurnar. Færslurnar í staurunum eru einnig orðnar mun minni en áður, u.þ.b. 0,35 cm.

Skoðum nú hvernig staurunum líður við stærsta lárétta kraftinn sem á þá kemur við jarðskjálftaálagið (við 0,05 deyfing). Notum svo jöfnur (34) - (38) til að teikna upp ferla fyrir færsluna, vægið, hallann, skúfkraftinn og svörun jarðvegsins sem fall af dýpi. Stærsti lárétti krafurinn sem forritið reiknar er á staura undir landstöplum.

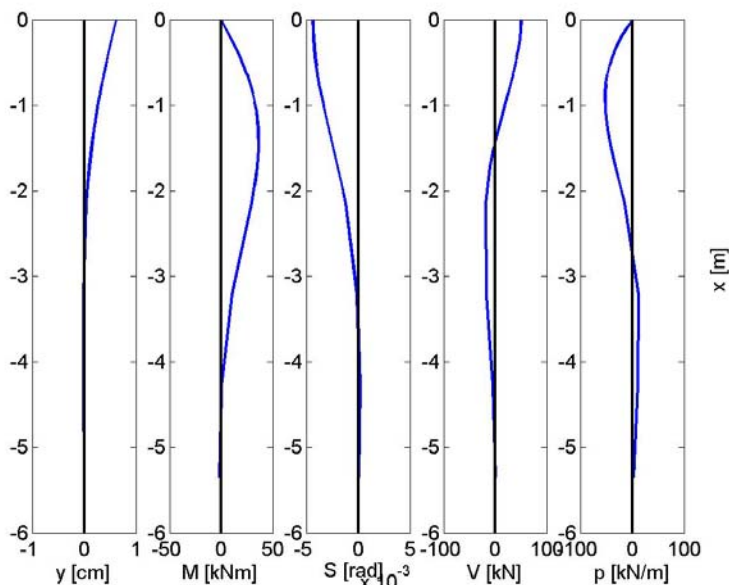
$$Q = 852,1 \text{ kN/stauraþyrping}$$

Þar sem staurarnir eru 17 undir landstöplinum verður krafturinn á hvern staur:

$$Q = 852,1/17 = 50,1 \text{ kN/staur}$$

Þegar þessi kraftur er settur inn í jöfnur (34) – (38) er reiknað með að staurinn sé stakur, sem er hins vegar ekki raunin. Jarðvegur umhverfis stakan staur er mun stífari, þ.e. veitir meiri viðspyrnu, en umhverfis stauraþyrpingu eins og á við í þessu dæmi. Til að taka tillit til þess er stífni jarðvegsins minnkuð þar til útreiknaða færslan verður sambærileg við þá færslu sem fékkst með forritinu, 0,6 cm.

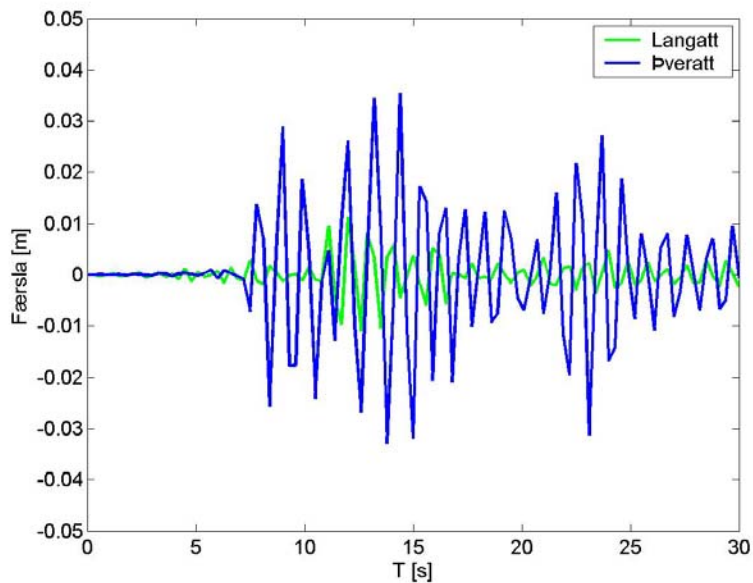
Ferlana má sjá á mynd 48.



Mynd 48. Ferlar fyrir færsluna (y), vægið (M), hallann (S), skúfkraftinn (V) og viðspyrnu jarðvegsins (p). Ferlarnir eru bara sýndir niður á 6 metra dýpi þar sem að þar fyrir neðan gættir engra áhrifa.

Af mynd 48 má sjá að stærsta vægið sem staurinn verður fyrir er tæplega 50 kNm sem er alveg ásættanlegt og staurinn ætti að þola. Deyfingin er einnig skilgreind of lítil í þessu tilviki eins og áður hefur komið fram og því mun vægið í staurunum minnka enn frekar.

Skoðum nú líkan 2 sem sýnt er á mynd 45. Höfum allar forsendur þær sömu og við hitt líkan 1 utan blýgúmmilega og stöpla. Þegar forritið er keyrt með sömu stífni og efnisföstum fæst að færslan efst í staurunum verður tæplega 4 cm eins og sjá má á mynd 49.



Mynd 49. Færsla fyrir líkan 2 í yfirbyggingu, yfir millistöpli, sem fall af tíma.

Sú færsla er væntanlega að gefa brot í staurnum ef niðurstöður mælinganna í Skeiðará og Gígju eru skoðaðar. Þar eru staurarnir allir farnir að brotna við svona mikla færslu. Einnig má geta þess að þar sem forritið gefur 4 cm færslu þegar stífni staks staur var reiknuð við 1 cm færslu þarf að minnka stífni staurins þar til reiknaða færslan verður í samræmi við stífnina. Það mun þá væntanlega valda því að færslan eykst enn frekar.

Það má því segja að greinilegt sé að nauðsynlegt sé að hafa blýgúmmílegurnar í þessari brú. Einnig mætti fjölga staurum til að auka stífnina og reyna þannig að minnka færslurnar.

6 LOKAORÐ

Í þessu verkefni hefur verið þróuð einföld aðferðarfræði til að meta stífni stakra staura og stauraþyrpinga þar sem byggt er á íslenskum mæligögnum. Stuðst var við fjaðurfræðilegt reiknilíkan til að reikna út færslu staura við lárétt álag og það svo borið saman við mæliniðurstöðurnar. Þetta varð til þess að hægt var að meta jafngildan skúfbylgjuhraða jarðvegsins og stífni stakra staura. Sett voru upp meðaltalsgröf, bæði fyrir skúfbylgjuhraða og stífni stakra staura sem fall af færslu sem nota má við mat á þessum stærðum ef aðstæður eru svipaðar og voru við mælingarnar sem gerðar voru. Þegar nota á gröfin þarf að áætla hve mikil færslan í staurunum verður og meta skúfbylgjuhraða eða stífni stakra staura út frá því og prófa svo að keyra reiknilíkan af mannvirki á staurum og ítra þar til útreiknuð færsla verður sú sama og sú sem metið var út frá.

Mælingar sem gerðar voru á láréttri stífni og burðarþoli staura við Gígju og Skeiðará á Skeiðarársandi og við Selá í Hrótafirði gengdu stóru hlutverki í verkefninu og voru notaðar m.a. til að gera meðaltalsgröfin sem áður var getið um. Þegar mælingarnar voru teiknaðar upp sem lárétt álag á móti færslu mátti sjá að niðurstöðurnar féllu mjög vel saman þrátt fyrir þrjá mismunandi mælistaði. Þetta styrkti enn frekar þá von að nota mætti mælingarnar til uppbyggingu á aðferðarfræði til mats á stífni staura. Skúfbylgjuhraði jarðvegsins var bakreiknaður fyrir hverja mælingu og skúfbylgjuhraðinn síðan teiknaður upp sem fall af færslu. Aftur mátti sjá að ferlarnir féllu ótrúlega vel saman miðað við ólíka mælistaði. Þetta var grundvöllur þess að gerð voru gröf fyrir stífni staks stauris fyrir hvern mælistað fyrir sig.

Til að prófa aðferðarfræðina voru tekin nokkur töluleg dæmi þar sem sýnt var hvernig hægt er að nota hana á einfaldan hátt. Við brúarstæði á Íslandi eru jarðvegsaðstæður oft svipaðar því sem var á mælistöðunum er notast var við í þessu verkefni. Því má segja að miðað við hvað ferlarnir féllu vel saman þrátt fyrir mismunandi mælistaði að þá eigi að vera hægt að fá ágætis nálgun á skúfbylgjuhraða eða stífni stakra staura fyrir önnur brúarstæði með meðaltalsferlunum úr þessu verkefni. Munurinn á þessum tveimur meðaltalsgröfum er sá að þegar farið er af stað með staur sem er nákvæmlega eins og notast var við á þessum mælistöðum að þá megi fara beint í stífni grafið og lesa stífni staks staur út frá því. Hins vegar ef um aðra gerð af staur er að ræða þarf að nota skúfbylgjuhraðagrafið til að fá mat á honum og reikna svo út stífni staks stauris á einfaldan hátt eins og sýnt er í forriti í Viðauka A.

Þrjár aðferðir voru skoðaðar til þess að taka tillit til samvirkni staura í stauraþyrpingar en heildarstífni stauraþyrpingar minnkar eftir því sem staurarnir standa þéttar saman. Í tölulegu dæmunum voru tvær af þeim prófaðar og kom í ljós að einfaldari aðferðin gaf minnkunarstuðulinn 0,60 á meðan flóknari aðferðin gaf minnkunarstuðulinn 0,702 en þar var stuðst við bandaríska heimild þar sem valinn var sá jarðvegur talinn var vera líkastur þeim íslenska. Ljóst er að samvirknin skiptir miklu máli og æskilegt væri að geta þróað gröf fyrir íslenskan jarðveg til mats á minnkunarstuðlum.

Líkan af brú yfir Hrótafjarðará var sett upp í forritinu SAP2000 og gert ráð fyrir að hún væri á jarðskjálftasvæði á Íslandi. Líkanið var keyrt með jarðskjálftaálagi þar sem teknar voru inn

skráðar tímaraðir frá Helli síðan í jarðskjálftanum á Suðurlandi 17. júní árið 2000, kl. 15.40. Staurarnir voru nálgaðir með gormum og tillit tekið til áhrifa vegna stauraþyrpingar. Blýgúmmílegur voru einnig nálgaðar sem gormar og kom í ljós að greinilegt er að þær gera mikið fyrir burðarvirkið í heild og minnka verulega krafta á stöpla og stauraundirstöðu. Bæði var prófað að setja deyfingu kerfisins 0,05 eins og gert er fyrir byggingar sem ekki eru á legum. Færslan í legunum varð þá of stór. Því var prófað að hækka deyfinguna í samræmi við legurnar og lækkaði þá færslan umtalsvert svo að ekki þarf að hafa áhyggjur af þeim. Einnig var prófað að setja upp einfaldara líkan í SAP2000 þar sem yfirbygging brúarinnar var sett beint ofan á staurana, þ.e.a.s. blýgúmmílegunum var sleppt. Þá mátti sjá að færsla stauranna hækkaði til muna og burðarþoli þeirra var ofboðið. Því má segja að með svipaða brú og þarna var prófuð sem er á jarðskjálftasvæði er nauðsynlegt að hafa blýgúmmílegur eða að fjölga staurum svo um munar.

Í þessu verkefni var sama þversniðið látið ganga yfir alla yfirbygginguna og þ.a.l. ekki tekið tillit til þykkinga sem eru t.d. yfir millistöpli. Nákvæmari lausn fengist ef líkanið í SAP2000 yrði gert ítarlegra, með því að skilgreina þversnið yfirbyggingar og stöpla á nákvæmari hátt. Mikilvægast væri þó að skilgreina ólínulega hegðun blýgúmmílega betur en hér var gert, en allar forsendur eru fyrir hendi til þess þótt ekki hafi verið gert í þessu verkefni þar sem áherslur þessa verkefnis voru af öðrum meiði.

Í framhaldi af þessu verkefni væri gagnlegt að sjá að mælingar yrðu gerðar á skúfbylgjuhraða á þeim stöðum sem mælingarnar voru framkvæmdar til samanburðar við þessa bakreiknuðu skúfbylgjuhraða sem stuðst var við í þessu verkefni. Einnig væri frjólegt að mæla lárétta stífni staura við aðrar jarðvegsaðstæður og byggja þannig upp stærri gagnagrunn.

Heimildaskrá

Bjarni Bessason; Yfirborðsmælingar við ákvörðun á skúfbylgjuhraða í jarðvegi; grein í *Árbók VFÍ/TFÍ 1997/98*; Reykjavík 1998.

Bjarni Bessason og Jón Snæbjörnsson; Jarðskjálftagreining brúar á stauraundirstöðum; grein í *Árbók VFÍ/TFÍ 2005*; Reykjavík 2005.

B. Bessason, E. Hafliðason; Recorded and Numerical Strong Motion Response of a Base-Isolated Bridge; *Earthquake Spectra*, Volume 20, No.2, bls. 309-332; Earthquake Engineering Research Institute, Maí 2004.

Chau, K.T., Yang, X.; Nonlinear Interaction of Soil-Pile in Horizontal Vibration; *Journal of Engineering Mechanics*; bls. 847-858, ágúst 2005.

Chopra, A.K.; *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering, Second edition*; Prentice Hall; New Jersey 2001.

Computers and Structures, Inc.; *SAP2000*, version 10.1.1; <http://www.csiberkeley.com/>; Computers and Structures, Inc. 1976-2006.

Eggert V. Valmundsson; Ólafsfjarðarbrú jarðskjálftaeinangruð, grein í *Gangverk – fréttabréf Verkfræðistofu Sigurðar Thoroddsen*; Reykjavík 1. maí 2004.

ENV 1992-1-1: 1991; *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings*; European Committee for Standardization; Brussel 1991.

Gazetas, G.; Foundation vibrations; kafli í *Foundation Engineering Handbook*, 2. útgáfa, bls. 553-593 (Ritsjóri: Fang, Y); Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1991.

Gazetas, G., Fan, K., Kaynia, A.; Dynamic response of pile groups with different configurations; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 12 bls. 239-257, 1993

Gazetas, G., Mylonakis, G., Nikolaou, A.; Simple Methods for the Seismic Response of Piles Applied to Soil-Bridge Interaction; ráðstefnugrein frá „*Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*”, Volume III; St. Louis Missouri, U.S.A., apríl 1995.

GeoSpectra; *Design Manual for Foundation Stiffnesses Under Seismic Loading*; Washington State Department of Transportation; Washington State 1997.

Guðrún Þóra Garðarsdóttir; *Líkan af staur í viðnámsjarðvegi*; Vegagerðin; Febrúar 2002.

Gunnar H. Jóhannesson, Helga Aðalgeirsdóttir, Sóley Jónasdóttir; *Hringvegur um Hrútafförð. Brú – Staðarskáli*; Vegagerðin, Veghönnunardeild Akureyri; Mars 2006.

Jón Skúlason; *Athuganir á burðarþoli staura vegna brúargerðar yfir Sandgígjukvísl*, skýrsla, Vegagerðin; janúar 1974.

Jón Skúlason; *Athuganir á burðarþoli staura vegna brúargerðar yfir Skeiðará*, skýrsla; Vegagerðin; janúar 1975.

Jón Skúlason; Athuganir á burðarþoli staurs við lárétt álag; grein í *Tímarit VFÍ 1980*; Reykjavík 1980.

Jón Skúlason, Bjarni Bessason, Eyjólfur Árni Rafnsson, Haraldur Sigursteinsson, Sigfinnur Snorrason; *Túlkun CPT borana og SASW mælinga við íslenskar aðstæður*; Vegagerðin, Rannsóknir og þróun; 1999.

Jón Snæbjörnsson; *Jarðskjálftagreining brúar á stauraundirstöðum*, Meistararitgerð, Verkfræðideild Háskóla Íslands, 2005. <http://www.verk.hi.is/page/msub0503>

Kramer, S.L.; *Geotechnical Earthquake Engineering*; Prentice Hall; New Jersey 1996.

Makris, N., Gazetas, G.; Dynamic Pile-Soil Interaction. Part II: Lateral and Seismic response; *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol. 21, bls. 145-162; 1992.

Malhotra, S.; Soil Pile Structure Interaction during Earthquakes; *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, bls. 428-440, 2004.

Matlock, H., and L., C. Reese.; *Foundation Analyses of Offshore Supported Structures*, Proc. Fifth Int. Conf. Soil Mech. Found. Engin., vol 2, bls. 91-97; Paris 1961.

Megson, T.H.G.; *Structural and Stress Analysis*; Butterworth Heineman; Oxford 1996.

Meymand, P.J.; *Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile Superstructure Interaction in Soft Clay*; <http://nisee.berkeley.edu/meymand>; doktorsritgerð; University of California, Berkeley; 1998.

Naeim, F., Kelly, J.M.; *Design of Seismic Isolated Structures*; John Wiley & Sons, Inc.; Canada 1999.

Prakash, S., Sharma, H.D.; *Pile Foundation in Engineering Practice*; John Wiley & Sons, Inc.; Canada 1990.

Prakash, S.; *Soil Dynamics*; Shamsheer Prakash Foundation; Rolla, Missouri (ártal vantar).

The MathWorks; *Matlab 6.5*; <http://www.mathworks.com/>; The MathWorks, Inc.; 2004-2007.

Wang, S., Kutter, B.L., M.EERI, Chacko, M.J., Wilson, D.W., Boulanger, R.W., M.EERI, Abghari, A.; Nonlinear Seismic Soil-Pile Structure Interaction; *Earthquake Spectra*, Volume 14, No. 2, bls. 377-396, maí 1998.

VIÐAUKI A

% Einfalt reikniforrit til að finna k stuðla þegar skúfbylgjuhraði er þekktur

% Inntaksstærðir, eiginleikar jarðvegs og staurs

% Hönnuður ákvarðar þessar stærðir

V = 150; %Skúfbylgjuhraði [m/s]

hro = 1800; %rúmpyngd jarðvegs [kg/m³]

v = 0.2; %Poisson hlutfall

Ep = 3.68e+10; %fjaðurstuðull staurs [N/m²]

Ip = 2.61e-4; %hverfítregða staurs [m⁴]

Lp = 23; %lengd staurs [m]

%Töflugildi, þessi gildi gilda þegar skoðað er við jarðvegsyfirborð

Ay = 2.435;

By = 1.623;

As = -1.623;

Bs = -1.75;

Am = 0;

Bm = 1;

Av = 1;

Bv = 0;

% Reiknaðar stærðir út frá inntaksstærðunum

G = V²*hro; %skúfstuðull [N/m²]

Es = 2*G*(1+v); %fjaðurstuðull jarðvegs [N/m²]

kh = 1.2*Es; %stífni jarðvegsins [N/m²]

nh = kh/Lp; %subgrade reaction stuðull [N/m³]

T = (Ep*Ip/nh)^(1/5); %hlutfallslegur stífni stuðull [m]

% Þá má reikna út stífnina

k11 = Bs*Ep*Ip/(T³*(Ay*Bs-As*By)) %stífni staurs