



# **Tjónagreining á brúnni yfir Steinavötn í Suðursveit**

Halldór Bogason



**Umhverfis- og  
byggingarverkfræðideild  
Háskóli Íslands**



# Tjónagreining á brúnni yfir Steinavötn í Suðursveit

Halldór Bogason

30 eininga ritgerð sem er hluti af  
*Magister Scientiarum* gráðu í byggingarverkfræði

Leiðbeinendur  
Bjarni Bessason  
Guðmundur Valur Guðmundsson  
Sigurður Erlingsson

Prófdómari  
Magnús Arason

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild  
Verkfræði- og náttúruvísindasvið  
Háskóli Íslands  
Reykjavík, maí 2018

Tjónagreining á brúnni yfir Steinavötn í Suðursveit  
30 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í byggingarverkfræði

Höfundarréttur © 2018 Halldór Bogason  
Öll réttindi áskilin

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild  
Verkfræði- og náttúruvísindasvið  
Háskóli Íslands  
VRII, Hjarðarhaga 2-6  
107 Reykjavík

Sími: 525 4600

Skráningarupplýsingar:  
Halldór Bogason, 2018, *Tjónagreining á brúnni yfir Steinavötn í Suðursveit*,  
meistararitgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóli Íslands, 80 bls.

Prentun: Háskólaprent  
Reykjavík, júní 2018

# Útdráttur

Á síðustu árum hefur tjónum á brúarmannvirkjum fjölgað á heimsvísu vegna skorts á eftirliti og nauðsynlegu viðhaldi sem og vegna aukningar á náttúruhamförum og aftakaatburðum. Vatnavextir í ám á Suðurlandi eru tíðir og geta orðið vegna aftakaúrkomu, hlýindakafli að vetri með leysingum, og vegna jökulhlaupa af völdum jarðhitavirkni eða eldgoss undir jökli. Þessir atburðir eru oftast handahófskenndir. Það getur því reynst erfitt að taka að fullu tillit til þessara atburða við hönnun brúa og annarra mannvirkja. Þetta verkefni fjallar um að skrásetja og greina tjón á brúnni yfir Steinavötn í Suðursveit sem eyðilagðist í flóðum haustið 2017. Áin gróf undan millistöpli sem seig við það og skemmdi yfirbyggingu. Brúin var í kjölfarið dæmd ónýt og bráðabirgðabrá byggð í staðinn. Í verkefninu var bakgrunnur stauraprófa á Íslandi kannaður. Gerður var samanburður á niðurstöðum eldri timburstauraprófana í nánd við Steinavötn, við stöðufræðilega útreikninga. Allir brúarstöplar brúarinnar yfir Steinavötn voru grundaðir á timburstaura og var burðarþol þeirra reiknað. Til þess að líkja við sigi millistöpuls var reiknað burðarþol hans sem fall af skolunardýpt með aðferð Meyerhof. Samkvæmt útreikningum þá bendir til þess að skolast hafi undan millistöpli allt frá 4,25 m til 4,75 m sem leiddi til sigs. Í þessu verkefni var einnig gert líkan af brúnni með forritinu SAP2000 og reiknaðir voru helstu sniðkraftar. Vettvangsferð Vegagerðarinnar og prófanir gáfu til kynna að flotliður hefði myndast við ásetur millistöpla. Útreikningar styðja við þá kenningu en reiknað beygjuvægi, sem myndaðist vegna eiginþyngdar og sigs millistöpuls, var hærra en sjálft vægisþol brúarinnar við ásetur millistöpla sitthvorum megin við hann.



# Abstract

In recent years, damages to bridges have increased worldwide due to lack of supervision and necessary maintenance as well as due to an increase in natural disasters. Frequent increase in water discharge on the south coast of Iceland can occur because of high precipitation, high temperature during winter and glacier run-off due to volcanic activity or geothermal activity. These events can be rather unpredictable, both in terms of timing and in size. It can therefore be difficult to take full account of these events when designing bridges and other structures. The aim of this thesis is to analyze and document the event, in the fall of 2017, which damaged the bridge over Steinavötn. The soil around the foundation of one of the bridge piers was eroded which caused settlement of the pier and damage to the bridge superstructure. The bridge abutments and piers were all resting on timber piles and the ultimate bearing capacity of the timber piles was calculated as a function of scour depth. According to calculations the scour depth was approximately 4,25 m to 5 m which caused the settlement of the pier. When the pier stops working as a support it starts to drag down the superstructure and that case was simulated using the program SAP2000. The model calculations showed that the moment capacity was exceeded over pier 1 and 3. The calculations matched the field tests and observations made by the Icelandic road and coastal administration on the bridge superstructure.





*„Þetta er bara eins og hvert annað verkefni“ -Birgir Pétursson*



# Efnisyfirlit

Myndir .....	xi
Töflur .....	xv
Breytuheiti .....	xvii
Þakkir .....	xix
<b>1 Inngangur .....</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunnur .....	1
1.2 Markmið .....	2
1.3 Skipulag ritgerðar .....	3
<b>2 Rof .....</b>	<b>5</b>
2.1 Vatnsrof .....	5
2.2 Roflíkan .....	6
2.3 Rof undir brúarmannvirkjum .....	7
2.4 Frágangur við brúarstöpul .....	11
2.5 Ástandsskoðun og búnaður .....	13
<b>3 Staurationirstöður .....</b>	<b>17</b>
3.1 Almennt .....	17
3.2 Timburstaurar .....	18
3.3 Burður timburstaura með stöðufræðilegum jöfnum .....	19
3.4 Prófanir á Íslandi .....	23
<b>4 Greining á tjóni .....</b>	<b>27</b>
4.1 Umhverfi, aðstæður og bakgrunnur .....	27
4.1.1 Veðurfar .....	29
4.2 Lýsing á brú .....	34
4.3 Vettvangsferð og álagspróf .....	35
4.4 Burðarþolsgreining staura .....	36
4.4.1 Samanburður við prófanir á Íslandi .....	36
4.4.2 Timburstaurar við Steinavötn .....	38
4.5 Burðarþolsgreining brúar .....	43
4.5.1 Þversnið yfirbyggingu .....	44
4.5.2 Samanburður við EN 1992-1-1 .....	46
4.5.3 Burðarþol .....	47
4.6 Bráðabirgðabré og núverandi ástand .....	51
<b>5 Rannsóknir á steinsteyptum brúm .....</b>	<b>53</b>
5.1 Bakgrunnur .....	53
5.2 Tillögur að rannsóknum .....	56
<b>6 Samantekt og lokaorð .....</b>	<b>58</b>
<b>Heimildir .....</b>	<b>59</b>

<b>Viðauki A – Teikningasett Steinavötn .....</b>	<b>63</b>
<b>Viðauki B – Heildarborun .....</b>	<b>66</b>
<b>Viðauki C – Borroborun.....</b>	<b>78</b>

# Myndir

Mynd 2-1: Steinasamstæða verður fyrir ýmsum áhrifum vegna vatns. Unnin út frá Briaud (2008).....	5
Mynd 2-2: Rofhraði mismunandi jarðvegsgerða við mismunandi straumhraða (Briaud, 2008).....	6
Mynd 2-3: Undirstaða brúarinnar ýtir flæði vatns frá sér sem mynda svo hvirfla í lóðréttu og láréttu plani (May o.fl., 2002). ....	8
Mynd 2-4: Heildarúrskolun við undirstöðu (May o.fl., 2002).....	8
Mynd 2-5: Leiðigarðar við brúnna yfir Morsár. ....	11
Mynd 2-6: Myndin sýnir frágang á grjótvörn og síulagi (Lagasse, 2006). ....	13
Mynd 2-7: Tæki og tól til þess að vakta rof undan undirstöðum brúarmannvirkis á einni mynd (Prendergast & Gavin, 2014).....	15
Mynd 2-8: Undirstaða missir lóðréttu stífni og spenna eykst vegna úrskolunar (Prendergast & Gavin, 2014).....	16
Mynd 3-1: Dæmi um aðstæður þar sem þörf er á staurum. Lóðrétt álag er táknað með „V“ og lárétt álag er táknað með „H“.....	17
Mynd 3-2: Á myndum a) og b) er endaburður ráðandi og c) burður vegna viðnáms ráðandi. ....	19
Mynd 3-3: Burðarþolsstuðull, $Nq^*$ , sem fall af viðnámshorni. ....	20
Mynd 3-4: Viðnámsstuðull, $f$ , eykst sér nánast línulega niður að dýpi $L'$ en er fasti eftir það. Byggt á Das (2011). ....	21
Mynd 3-5: Týpísk 3 x 3 stauraþyrping, Byggt á (Das, 2011).....	23
Mynd 3-6: Rannsóknarstaðir úr samantekt Almennu verkfræðistofunnar (Jón Skúlason, 1993). ....	24
Mynd 4-1: Brúin yfir Steinavötn. Rauðar píllur sýna stefnu rennslis undir lok septembermánaðar 2017. Kortið var gert með aðstoð map.is. ....	27
Mynd 4-2: Helstu kennileiti og mælistöðvar sem fram koma í þessari ritgerð. Reiknað rennslis er tilgreint með * fyrir aftan mælistað. Grunnkort fengið af lmi.is. ....	29
Mynd 4-3: Mesta sólarhringsúrskoma fyrir september á Höfn í Hornafirði frá upphafi mælinga. Mælingum var hætt fyrir septembermánuð 1985 til 2006. Gögn fengin frá Veðurstofu Íslands (2018).....	30

Mynd 4-4: Heildarúrkoma mánaða frá upphafi mælinga á Höfn í Hornafirði. Alls eru 12 gildi fyrir hvert ár fyrir utan árin 1965 og 1985. Hlé var á mælingum 1985 til 2007. Gögn fengin frá Veðurstofu Íslands (2018). .....	30
Mynd 4-5: Skráð sólarhringsúrkoma dag frá degi í september 2017 á völdum mælistöðvum á Suðausturlandi Gögn fengin frá Veðurstofu Íslands (2018). .....	31
Mynd 4-6: Meðalhitastig daga í september árið 2017 við Ingólfshöfða og Höfn á Hornafirði. Gögn fengin frá Veðurstofu Íslands (2018).....	32
Mynd 4-7: Reiknað rennsli út frá vatnshæðarmæli í Geithellná í lok september 2017 (Veðurstofa Íslands, 2017c). .....	32
Mynd 4-8: Reiknað rennsli út frá vatnshæðarmæli í Fossá við Eyjólfstaði í lok september 2017 (Veðurstofa Íslands, 2017c). .....	33
Mynd 4-9: Mælt rennsli frá Laxá í Nesjum í september 2017 (Veðurstofa Íslands, 2018).....	33
Mynd 4-10: Teikning af brúnni úr teikningasetti Vegagerðarinnar. Sigstöpull er merktur með rauðum hring og millistöpull sem skekkist árið 1966 er merktur með gulum hring.....	34
Mynd 4-11: Brúin yfir Steinavötn. Mynd tekin eftir atburð. Sigstöpull er merktur með rauðum hring og millistöpull sem skekkist árið 1966 er merktur með gulum hring (Vegagerðin, 2018). .....	34
Mynd 4-12: Sprungur gengu 5 metra sitthvoru megin við ásetu á millistöpli 1 og 3. ....	35
Mynd 4-13: Kraftyfírfærsla frá mannvirki yfir í jarðveg í gegnum staur. ....	37
Mynd 4-14: Sökkull eða fótur millistöpuls hefur 18 staura og þar af eru 2 hallandi. Mynd tekin úr teikningasetti Vegagerðarinnar. Ómerktar málsetningar eru í cm. ....	39
Mynd 4-15: Sniðmynd af millistöpla brúarinnar. Járnbentu „súlurnar“ má sjá á myndinni og hvernig þær ná úr sökkli og upp í yfirbyggingu. Tekin úr teikningasetti Vegagerðarinnar. Málsetningar eru í cm. ....	40
Mynd 4-16: Fræðileg uppsetning staks stauris við Steinavötn.....	40
Mynd 4-17: Burðarþol staks timburstauris sem fall af viðnámshorni. ....	41
Mynd 4-18: Burðarþol staks stauris við Steinavötn á móti skolunardýpt. ....	41
Mynd 4-19: Öryggisstuðull, FS, sem fall af skolunardýpt fyrir stauraþyrpingu við Steinavötn. ....	42
Mynd 4-20: Öryggisstuðull sem fall af skolunardýpt ef gert er ráð fyrir að 44 tonna vagnlest (L<18,5 m) sé staðsett fyrir ofan millistöpul 2. ....	43

Mynd 4-21: Myndin sýnir líkan sem var gert í SAP2000. ....	44
Mynd 4-22: Á myndinni má sjá millistöpul hanga í yfirbyggingu.....	44
Mynd 4-23: Hliðar- og grunnmynd af brúnni. Sjá má mismunandi þversnið brúarinnar á grunnmynd. Myndin er tekin úr teikningasetti Vegagerðarinnar. Allar málsetningar eru í cm. ....	45
Mynd 4-24: Málsett þversnið yfirbyggingar sithvoru megin við ásetur. Þetta þversnið gengur 4 metra út á höfin frá ásetum. Myndin er tekin úr teikningasetti Vegagerðarinnar. Allar málsetningar eru í cm. ....	45
Mynd 4-25: Mismunandi þversnið brúarinnar á einni mynd teiknuð í forritinu SAP2000. Málsetningar eru í mm. ....	46
Mynd 4-26: Réttþyrnd spennudreifing í brotmarkaástandi (EN1991-1-1, 2004).....	48
Mynd 4-27: Virk breidd flanga á T-þversniði (EN1991-1-1, 2004).....	48
Mynd 4-28: Vægisáraun á móti þoli yfirbyggingar fyrir ástand 1 og 2. Millistöpull 2 sem er ekki til staðar fyrir ástand 2 er merktur með appelsínugulum lit. Reiknuð gildi eru svartir punktar og lína dregin á milli þeirra. ....	50
Mynd 4-29: Skerkræðing fyrir ástand 1 og 2 gegn þoli yfirbyggingar. Undirstöðum er stillt neðar en þær eru í raun til þess að leyfa skerferlum að njóta sín.....	50
Mynd 4-30: Bráðabirgðabruin reis á fimm dögum. Úr myndasafni Vegagerðarinnar.....	51
Mynd 4-31: Yfirlitsmynd af núverandi og bráðabirgðabru (Vegagerðin, 2017).....	51
Mynd 4-32: Núverandi ástand millistöpuls 2. Líklegt er að nokkrir af timburstaurunum séu brotnir (Vegagerðin, 2018). ....	52
Mynd 5-1: Brotmyndir steyptra brúa reyndust í mörgum tilvikum með öðrum hætti en við mátti búast (Bagge o.fl., 2017). ....	54
Mynd 5-2: Aðferðarfræði prófana sett fram sem flæðirit, byggt á Bagge o.fl. (2017).....	55
Mynd 5-3: Tillögur að prófunum.....	56





# Töflur

Tafla 2-1: Áætluð breidd undirstöðu við Steinavötn miðað við breytilegt horn sem að vatn flæðir að undirstöðu. ....	10
Tafla 2-2: Kostir og gallar af helsta rofbúnaði sem völ er á þessa stundina, byggt á Zanini o.fl., (2017). ....	15
Tafla 3-1: Hlutstuðull, K, fyrir mismunandi innsetningu staura samkvæmt (Das, 2011). ....	22
Tafla 3-2: Mælt brotálag staura úr samantekt Almennu verkfræðistofunnar (Jón Skúlasonar, 1993). ....	24
Tafla 4-1: Helstu stærðir og lengdir staurana við prófstaðina þrjá (Jón Skúlason, 1993). ....	36
Tafla 4-2: Forsendur reikninga fyrir Skeiðará, Sandgígjukvísl, Núpsvötn og Súlu. Burðarþolsstuðul, $N_q^*$ , má finna á mynd 3-3 fyrir mismunandi viðnámshorn. ....	37
Tafla 4-3: Samanburður við mæld gildi frá Jóni Skúlasyni (1993). Sleppt var að birta reiknuð gildi fyrir viðnámshorn á bilinu $32^\circ$ til $37^\circ$ þar sem þau þóttu langt frá mældum gildum. ....	38
Tafla 4-4: Helstu eiginleikar timburstaurana. ....	39
Tafla 4-5: Eiginþyngd þversniða sem var sett sem álag á módelið í SAP2000. Inni eiginþyngd þversniða er þyngd vegna handriðs og malbiks. ....	46
Tafla 5-1: Áætlaður brotkraftur, Qtest, fyrir tillögurnar þrjár. Krafturinn fyrir tillögu 1 er umtalsverður og jafnvel óraunhæfur. ....	57



# Breytuheiti

$\dot{z}$	Rofhraði
$\tau$	Skerspenna milli jarðvegs og vatns
$u$	Straumhraði
$\tau_c$	Krítísk skerspenna staðsett fyrir neðan rof
$\rho$	Rúmþyngd efnis
$\Delta\tau$	Breyting á skerspennu vegna iðustreymis
$\Delta\sigma$	Breyting á heildarupplyftikrafti normalstreitu vegna iðustreymis
$z_s$	Skolunardýpt
$\dot{z}_l$	Upphaflegt rofmagn
$z_{s,max}$	Hámarksskolunardýpt
$B'$	Áætluð breidd brúarstöpsuls
$K_{pw}$	Vatnsdýptarstuðull
$K_{psh}$	Lögunarstuðull brúarstöpsuls
$K_{pa}$	Útlitsstuðull brúarstöpsuls
$K_{psp}$	Fjarlægðarstuðull
$Fr$	Froude tala fyrir árfarveg ef stöpull væri ekki til staðar
$Fr_c$	Froude tala sem byggir á hámarkshraða vatns
$\varphi$	Rennsli vatns stefnir að undirstöðu með horninu, $\varphi$ .
$B$	Breidd undirstöðu
$L$	Lengd undirstöðu
$D_{50}$	Meðalsteinaþvermál grjótvarnar
$K_f$	Lögunarstuðull undirstöðu
$V_{lokal}$	Staðbundinn straumhraði
$K_v$	Leiðréttingastuðull meðalstraumhraða
$V$	Meðalstraumhraði
$Q_{all}$	Leyfilegt álag á timburstaur
$A_p$	Meðalþversniðsflatarmál staur
$f_w$	Leyfileg spenna á timbur
$Q_u$	Hámarksburðargeta staur
$Q_p$	Endaburður staur
$Q_s$	Burður staur vegna viðnáms
$A_p$	Flatarmál stauraenda
$c'$	Samloðun jarðvegs
$q'$	Virk lóðrétt spenna við stauraenda
$N_q^*$	Burðarþolsstuðull
$N_c^*$	Burðarþolsstuðull
$q_l$	Hámarksspenna samkvæmt aðferð Meyerhof

$p_a$	Loftþrýstingur
$\theta'$	Virkt viðnámshorn jarðvegs
$\delta'$	Leiðrétt viðnámshorn á mörkum jarðvegs og staurs
$K$	Hlutstuðull lárétrar og lóðrétrar virkrar spennu
$K_0$	Hvílustuðull
$\gamma_{\text{sat}}$	Rúmþyngd mettaðs jarðvegs
$\gamma_{\text{vatn}}$	Rúmþyngd vatns
$p$	Ummál þversniðs
$f$	Viðnámsstuðull milli jarðvegs og staurs
$D$	Þvermál staurs
$\sigma'_0$	Virk spenna á tilteknu dýpi
$i$	Nýtni staurasamstæðu
$n_1, n_2$	Fjöldi staura í lengdar og breiddarstefnu
$d$	Millibil staura
$FS$	Öryggisstuðull
$f_{ctm}$	Meðaleinásatogstyrkur
$b_t$	breidd þversniðs í togi
$d$	Fjarlægð frá þrýstisvæði að miðju togjárna
$f_{yk}$	Flotstyrkur stáls
$f_{yd}$	Hönnunarflotstyrkur stáls
$X$	Fjarlægð að núllínu þversniðs
$A_{s, bal}$	Jafnvægisjárnarmagn
$b_{eff}$	Virk breidd flanga T-þversniða
$M_{Rd}$	Vægisburðargeta þversniðs
$V_{Rd}$	Skerburðargeta þversniðs
$A_s$	Flatarmál steypustyrktarstáls
$\lambda$	Leiðréttingastuðull á hæð núllínu í brotmarkaástandi, ULS
$\eta$	Leiðréttingastuðull á breidd þrýstistyrks í brotmarkaástandi, ULS
$V_{Rd, s}$	Skerburðargeta með skerbendingu
$s$	Fjarlægð á milli lykkja, miðju í miðju
$z$	Fjarlægð á milli miðju þrýstisvæðis og togsvæðis
$A_{sw}$	Flatarmál lykkju
$\cot(\theta)$	Horn sem að ræðst af fjölda skerlykkja. Er á bilinu 1 – 2,5.
$f_{ywd}$	Reikningslegur stálstyrkur lykkjuleggja
$V_{Rd, max}$	Hámarksskerburðargeta
$\alpha_{cw}$	Uppspennustuðull
$b_w$	Breidd kropps
$v_1$	Lækkunarstuðull skerstyrks rifinnar steypu

# Þakkir

Mig langar til þess að þakka fjölskyldu minni og kærustu, Lilju Snæðísi Guðjónsdóttur, fyrir yfirlestur og hvatningarorð.

Bjarna Bessasyni og Sigurði Erlingssyni vil ég þakka fyrir góð ráð og rýni á öllum stigum verkefnisins. Mig langar einnig til þess að þakka Guðmundi Val Guðmundssyni, forstöðumanni hjá Vegagerðinni, fyrir hjálpssemi, nauðsynleg gögn og fundi yfir önnina.

Gunnari Sigurðssyni og Guðrúnu Þórunni Gísladóttur hjá Veðurstofu Íslands þakka ég fyrir gögn og nytsamlegar upplýsingar sem urðu hluti af ritgerðinni.

Síðast en ekki síst vil ég þakka Guðrúnu Helgu Agnarsdóttur, verkefnisstjóra grunnnáms í Verkfræði, fyrir hennar aðstoð þegar að ég skipti úr námi frá Bandaríkjunum yfir til Íslands.

Vegagerðin styrkti verkefnið og þakka ég þeim fyrir þeirra framlag.



# 1 Inngangur

## 1.1 Bakgrunnur

Úrskolun undan undirstöðum brúa (e. bridge scour) er ein algengasta ástæða skemmda á brúm í heiminum (Zanini o.fl., 2017). Þetta fyrirbrigði er einnig tiltölulega algengt á Íslandi en margir brúarstöplar eru grundaðir á staura. Þegar að þeir missa stuðning frá umlykjandi jarðvegi, vegna úrskolunar eða graftar frá straumvatni, reynir meira á burðargetu þeirra en ella. Ýmsar fræðilegar aðferðir eru þekktar við að reikna burðarþol þeirra en það skiptir einnig máli að hafa jarðtæknilegar upplýsingar um jarðveg sem mannvirkið stendur á. Álagsprófanir á staurum við náttúrlegar aðstæður eru sömuleiðis mikilvægar til að sannreyna og kvarða fræðilegar aðferðir en þær eru almennt dýrar í framkvæmd. Vegagerðin hefur framkvæmt nokkur slík próf á Suðurlandi meðal annars við Skeiðará, Múlakvísl, Núpsvötn og Sandgígjukvísl. Jón Skúlason birti samantekt á burðarþolsrannsóknnum staura fyrir Vegagerðina árið 1993 (Jón Skúlason, 1993).

Brúin yfir Steinavötn í Suðursveit eyðilagðist í flóðum haustið 2017 en hún var byggð árið 1964. Brúin er einbreið, 102 m löng steinsteypt bitabré, með sex höf sem eru 14 m, 4 x 18,5 m og 14 m á lengd. Brúin var mikilvægur liður í að tengja Þjóðveg 1 en 10 árum eftir byggingu hennar var hringvegurinn að fullu tengdur. Yfirbyggingin situr á tveimur endastöplum og fimm millistöplum sem hvíla á timburstaurum sem ganga um það bil fimm metra niður í jarðveginn. Í vatnavöxtunum í lok septembermánaðar 2017, gróf áin undan millistöpli sem við það seig og skemmdi yfirbyggingu. Brúin var í kjölfarið dæmd ónýt og bráðabirgðabré byggð í staðinn. Ný brú verður svo hönnuð og byggð á næstu misserum.

Gagnlegt er, þegar mikilvæg mannvirki skemmast, að greina tjónið og orsakir þess. Draga þarf lærdóm af slíkum atburðum og skrásetja fyrir seinni tíma. Það á einnig við þegar rífa á niður ónýt eða skemmd mannvirki, þá opnast tækifæri til að framkvæma burðarþolsrannsóknir og önnur próf, þar sem í lagi er að skemma eða brjóta prófeiningu. Slík próf eru eðli málsins dýr ef smíða þarf prófhluti frá grunni. Niðurstöður slíkra prófana má síðan bera saman við fræðilega útreikninga og nota til að kvarða reiknilíkön. Í þessu samhengi má nefna rannsókn sem gerð var við Tækniháskólann í Luleå. Þar var tekið saman yfirlit yfir 40 prófanir á brúm (Bagge, Popescu & Elfgren, 2017). Í því yfirliti kom í ljós að þriðjungur prófanna endaði með brotmynd sem var með öðrum hætti en reiknað hafði verið með.

Með aukinni hlýnun jarðar munu jöklar Íslands halda áfram að hopa en spáð er t.d. að syðri hluti Vatnajökuls minnki um ein 60% á þessari öld. Hopun jökla ýtir undir breytingar á farvegi jökuláa sem getur haft áhrif á brúarmannvirki og gera þarf því ráð fyrir þeim breytingum á jökulám Íslands í framtíðinni. Líklegt þykir að úrkomuákefð fari hækkandi og þ.a.l. atburðum eins og í lok september 2017 (Veðurstofa Íslands, 2018).

## 1.2 Markmið

Meginmarkmið þessa verkefnis er að greina og skrásetja tjónið sem varð á brúnni yfir Steinavötn í flóðunum í lok september 2017. Áhersla verður lögð á að skoða eins og kostur er alla áhrifaþætti, hér má nefna úrkomumagn og einkenni flóðs, rof og skolun undan millistöplum, sig stöpla og hvaða áhrif það hafði á yfirbyggingu brúarinnar. Mikilvægt er að læra af atburðum sem þessum og kanna hvað hefði mátt gera öðruvísi til að bæta öryggi brúarinnar. Annað markmið verkefnisins er að gera tillögur að álagsprófi sem hægt er að gera á brúnni áður en henni verður fargað. Niðurstöður slíkra prófa má síðan bera saman við útreikninga og líkanagerð.

Í verkefninu verður gerð ítarleg greining á brúnni. Reynt verður að leggja mat á hversu afbrigðilegt flóðið var í ánni með því að skoða veður- og flóðagögn frá nærliggjandi mæli- og veðurstöðum. Stíllt verður upp reiknilíkani af stauraundirstöðum þar sem skoðað verður hve mikið fræðilega mátti skola undan millistöpli brúarinnar áður en hann fór að síga. Einnig verður byggt upp reiknilíkan af allri brúnni með hjálp einingaaðferðarinnar (e. Finite Element Method) til að ákvarða sniðkrafta og tengja þá saman við sig á undirstöðum. Polútreikingar verða gerðir á þversniði yfirbyggingar og þeir bornir saman við reiknaða áraun og skemmdir. Gerð verður heimildakönnun til að skoða hvaða mælitæki og tól megi nota til að vakta gröft og skolun undan undirstöðum og auka þannig eftirlit með ástandi brúa við krítískar aðstæður. Að lokum verður lögð vinna í að skilgreina hvaða próf og rannsóknir megi gera á brúnni áður en hún verður rifin og fjarlægð.

Ávinningur verkefnisins er meðal annars aukin þekking varðandi úrskolun og gröft undan undirstöðu sem er eitt algengasta tjón á brúm í heiminum. Mikilvægt er að draga lærdóm af atburðinum sem gerði brúna ófæra og skrásetja hann. Yfirlit yfir möguleika varðandi vöktun á skolun og greftri undan stöplum er einnig gagnlegt að þekkja. Loks geta próf á brúnni, áður en hún verður rifin, aukið þekkingu á styrk brúa. Niðurstöður verkefnisins ættu að nýtast Vegagerðinni við hönnun á nýjum brúm og við mat á hættu vegna úrskolunar.



## 1.3 Skipulag ritgerðar

Ritgerðin skiptist í fimm meginkafla. Í öðrum kafla verður fjallað um fyrirbærið rof (e. erosion) og settar fram líkingar og fræðin þar á bakvið útskýrð. Rætt verður sérstaklega um úrskolun undan brúarstöpli (e. bridge scour). Kynntar verða til leiks, helstu aðferðir til þess að verja brúarundirstöðu fyrir úrskolun og útfærslur þeirra. Síðast en ekki síst verður fjallað um búnað sem hægt er að nota til þess að vakta og meta úrskolun undan brúarstöpli. Þessi búnaður hefur sína kosti og galla og eru þeir teknir saman í töflu.

Í þriðja kafla verða gerð skil á stauraundirstöðum þ.e. hvernig þær eru og virkni þeirra. Farið verður yfir helstu eiginleika timburstaura en notkun þeirra hefur minnkað til muna hér á landi. Fræðilegur kafla varðandi ákvörðun á burðarþoli timburstaura fylgir svo á eftir en staurarnir undir brúnni yfir Steinavötn voru úr timbri. Til þess að kanna bakgrunn þeirra hefur verið tekið saman yfirlit yfir helstu prófanir á timburstaurum hér á Íslandi og hvað þær leiddu í ljós.

Í fjórða kafla verður svo gerð grein fyrir tjóninu á brúnni yfir Steinavötn. Umhverfi, aðstæðum og veðurfari verður lýst en margvíslegar mælingar bárust frá nærliggjandi úrkomu-, rennslis- og hitamælum. Burðarþol stauranna við Steinavötn var reiknað með aðferð Meyerhof. Til þess að styðja við útreikningana þá var gerður samanburður á gildum, sem fengust úr álagsprófum á nálægum prófstöðum, við reiknuð gildi höfundar. Tölvutækt líkan var búið til með aðstoð forritsins SAP2000 og reynt var að herma eftir hvernig brúin eyðilagðist með aðstoð einingaaðferðarinnar. Með niðurstöðum úr líkaninu verður gerð grein fyrir þoli yfirbyggingar brúarinnar og álaginu sem á hana verkaði. Fjallað verður um bráðabirgðabrána sem byggð var eftir að brúin yfir Steinavötn var dæmd ónýtt og framtíðarhorfur svæðisins.

Í fimmta kafla verður skoðaður bakgrunnur rannsókna á steiptum brúm. Fjallað verður um mismunandi aðferðir við prófanir á steiptum þversniðum og niðurstöður rannsókna kynntar á svipuðum brúm og við Steinavötn. Að lokum verða gerðar tillögur varðandi prófanir sem áætlað er að gera á brúnni en fjárstyrkur hefur fengist í það verkefni.

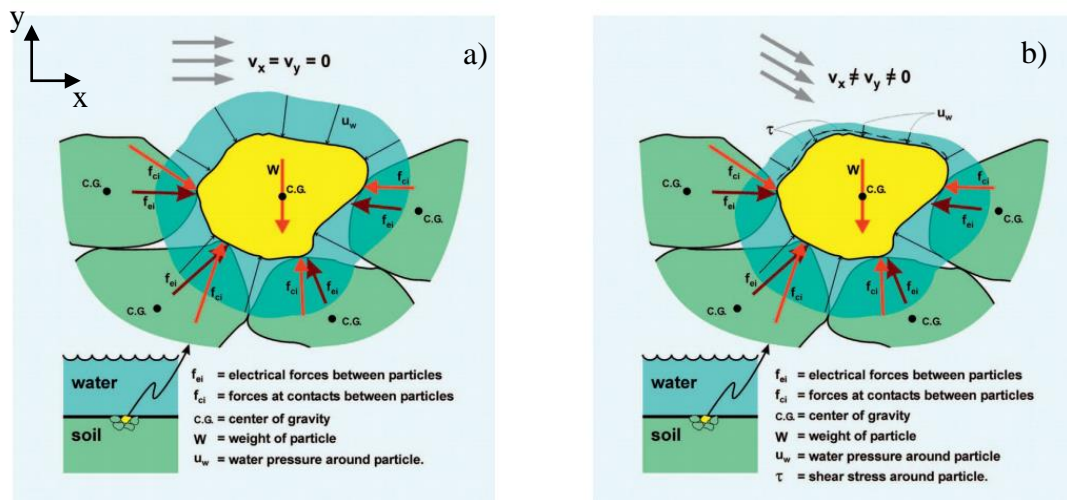
Í sjötta og síðasta kafla ritgerðarinnar verða helstu niðurstöður dregnar saman.



## 2 Rof

### 2.1 Vatnsrof

Rof er skilgreint sem flutningur á bergmylsnu og uppleystum efnum á milli staða en flutningsgeta ár er meðal annars háð kornastærð og straumhraða. Rof vegna vatns er útskýrt samkvæmt Briaud (2008) sem jarðvegur eða steinasamstæða sem verður fyrir áhrifum flókinna kraftverkunar vegna vatnsstraumsins, sjá mynd 2. Á mynd 2-1a er sýndur steinn í lygnu vatni (hraði vatns enginn) en á mynd 2-1b er sami steinn í straumharðri á. Á jarðveginn verkar normalspenna sem er tilkomin vegna vatnsþrýstings (e. hydrostatic pressure) sem umvefur steinasamstæðuna. Ef steinninn í miðjunni er skoðaður sérstaklega sést að hann hefur ákveðna þykt og því er hærri spenna fyrir neðan hann heldur en fyrir ofan hann. Þessi munur skilar sér svo í flotkrafti sem hefur þau áhrif að þyngd steinsins minnkar. Mynd 2-1b sýnir svo steinasamstæðuna þegar að hún er í vatni með ákveðnum straumhraða en vegna hans þá myndast á yfirborði steinsins viðnámskraftur og skerspenna. Normalspenna minnkar því á yfirborði steinsins vegna straumhraðans. Iðustreymi (e. turbulence) sem myndast í vatninu veldur síðan því að áður nefndar spennur breytast stöðugt við yfirborð steinsins. Þessi tíða breyting er talin vera stór partur af rofi á jarðvegi. Rofgeta eykst því með auknum straumhraða og iðustreymi. Þessir kraftar sem verka á steina og steinagnir geta orðið það stórir að færsla á jarðvegi og steinum getur átt sér stað.

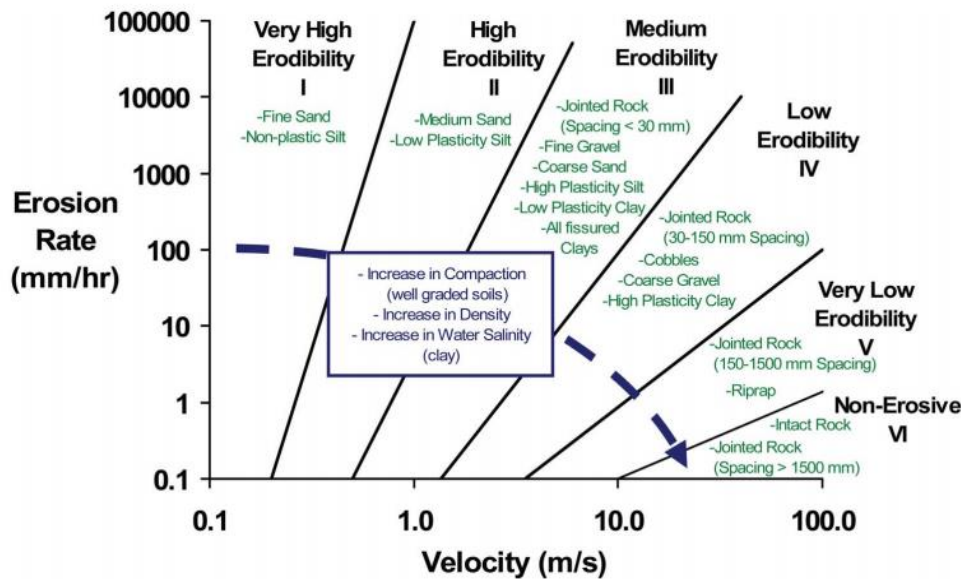


Mynd 2-1: Steinasamstæða verður fyrir ýmsum áhrifum vegna vatns. Unnin út frá Briaud (2008).

Hreint vatn vinnur illa á bergi en ef það flytur með sér set eða bergmylsnu er auðveldlega hægt að nota viðbótarefnin sem tól til þess að dýpka eða breikka farveg árinna. Jökulár eru oftast gruggugar en það er þekkt að framburður jökuláa er yfirleitt meiri heldur en hjá dragám. Rof af völdum jökuláa eru því yfirleitt stórbrotnari heldur en hjá dragám (Þorleifur Einarsson, 1968). Flutningsgeta ár er háð straumhraða og einnig vatnsmagni. Ef vatnavextir

eiga sér stað sem tvöfalda straumhraða má sjá að flutningsgeta árinnað eykst gífurlega (Jóhann Ísak Pétursson & Jón Gauti Jónsson, 2003).

Rof er almennt talið flókið fyrirbrigði en vegna flækjustigs þess þá setti Briaud (2008) fram tillögu að flokkun jarðvegs sem byggir á rofhraða (e. erosion rate) sem fall af straumhraða vatns. Mynd 2-2 sýnir rofhraða jarðvegs gagnvart mismunandi straumhraða.



Mynd 2-2: Rofhraði mismunandi jarðvegsgerða við mismunandi straumhraða (Briaud, 2008)

Jarðvegur hefur mismunandi rofhraða en Briaud (2008) flokkar í sex flokka frá I til VI. Frá meiri rofhraða til minni. Fínkorna sandur er í flokki I, en grjótvörn eða rofvörn (e. riprap) er í flokki V. Vel þjappaður jarðvegur hefur hærra rofþol en minna þjappaður jarðvegur. Einnig eykst rofþol leirs samhliða aukningu saltmagns í vatni.

## 2.2 Roflíkan

Erfitt er að herma eftir rofi á jarðvegi vegna vatns í tilraunastofu eða í felti en það er mjög flókið fyrirbæri (Muzzammil o.fl., 2015) en þekking á því er takmörkuð (Briaud, 2013). Í raun má segja að straumhraði sé enginn á milli yfirborðs jarðvegs og vatns. Rofhraða,  $\dot{z}$ , er því lýst með jöfnu 2-1 sem falli af skerspennu,  $\tau$ , sem er á milli jarðvegs og vatns vegna vatnsþrýstings eða

$$\dot{z} = f(\tau) \quad (2-1)$$

Það má segja að þetta fall sé undirstaða hugmyndafræðinnar varðandi rof í vatnsfarvegi. Þessi lýsing er hinsvegar ekki fullkomin þar sem rof er flókið fyrirbæri og margir þættir sem stuðla að rofhraða jarðefnis. Betri lýsingu má sjá með jöfnu 2-2.

$$\frac{\dot{z}}{u} = \alpha \left( \frac{\tau - \tau_c}{\rho u^2} \right)^m + \beta \left( \frac{\Delta \tau}{\rho u^2} \right)^n + \gamma - \left( \frac{\Delta \sigma}{\rho u^2} \right)^p \quad (2-2)$$

Þar sem  $u$  er straumhraði,  $\tau_c$  er krítísk skerspenna en ekkert rof á sér stað við minni skerspennu en  $\tau_c$ ,  $\rho$  er rúmþyngd vatns,  $\Delta \tau$  er breyting á skerspennu vegna iðustreymis og  $\Delta \sigma$  er breyting á heildarupplýftikrafti normalstreitu vegna iðustreymis. Aðrir stuðlar í jöfnu 2-2 tengjast jarðefninu sem er rofið. Oftast er jafna 2-3 talin nægjanleg ef ekki eru til ítarlegar rannsóknir á jarðvegi (Briaud, 2013).

$$\frac{\dot{z}}{u} = \alpha \left( \frac{\tau - \tau_c}{\rho u^2} \right)^m \quad (2-3)$$

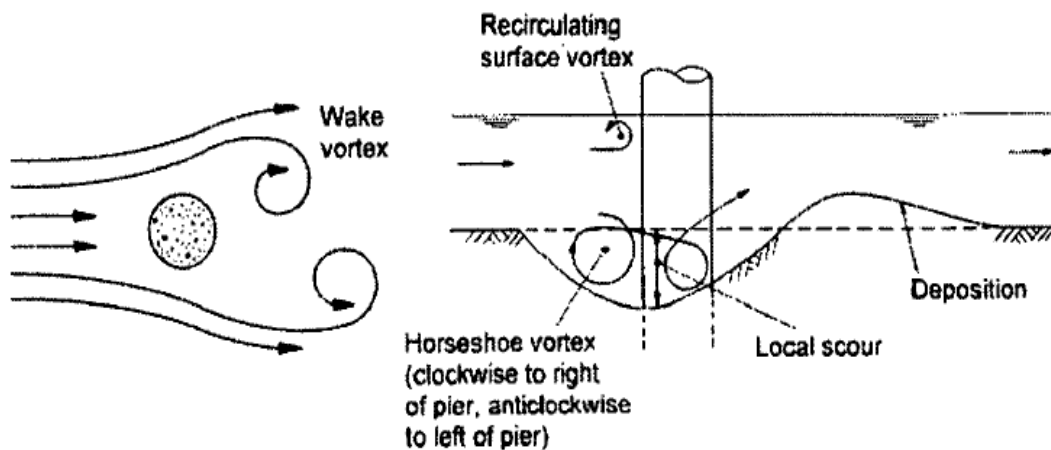
## 2.3 Rof undir brúarmannvirkjum

Ein helsta ógn við brýr í heiminum er rof undir undirstöðum þeirra (Lamb, Aspinall, Odbert & Wagener, 2017; Mazumder & Kumar, 2006). Nánar tiltekið er rof undir brúarundirstöðum kallað úrskolon (e. bridge scour). Ef mannvirki eru staðsett í ám eða straumvatni geta þau orðið fyrir áhrifum úrskolonar. Úrskolon er flókið fyrirbæri en það lýsir sér þannig að á tilteknum tímapunkti verða kraftar, vegna rennsli vatns, það miklir er verka á jarðveg við og undan undirstöðu, að á endanum grefst undan henni. Ef slíkt á sér stað þá getur ástand brúarinnar, ásamt notendum hennar, verið í mikilli hættu (Lamb o.fl., 2017). Erfitt er að herma úrskolon við undirstöðu brúa, sérstaklega þar sem eru breytilegir jarðvegseiginleikar (Ettema o.fl., 2004). Samkvæmt handbók CIRIA (May, Ackers & Kirby, 2002) þá er úrskolon háð:

- Staðsetningu og gerð undirstöðu
- Eiginleikum vatnsrennslis
- Eiginleika árfarvegs sem er við eða fyrir ofan undirstöðu

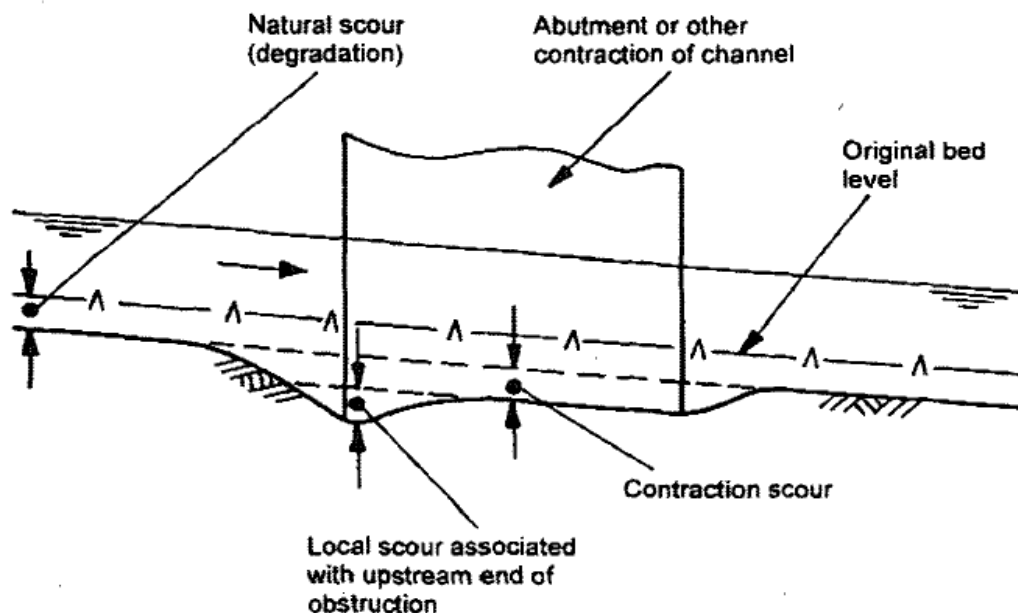
Til eru þrjár gerðir af úrskolon undir brúarstöpli. Mikilvægt er að greina á milli þeirra til þess að hönnun brúa og eftirlit með úrskolon sé sem hagkvæmast. Þessar þrjár aðferðir nefnast hefðbundin, staðbundin og samdráttarúrskolon (Prendergast & Gavin, 2014).

Hefðbundin úrskolon (e. general scour) gerist náttúrulega í árfarvegi en dýpkun og breikkun á árfarveginum er ein afleiðing hennar. Það getur stafað af breytingum á straumhraða og rennsli sem hefur áhrif á setburð árinna (Forde o.fl., 1999). Úrskolon vegna samdráttar (e. contraction scour) verður vegna þess að þversniðsflatarmál árinna minnkar skyndilega t.d vegna brúarmannvirkis og lýsir sér þannig að straumhraðinn eykst og þar með rofhraði (Jenssen & Tesaker, 2009). Líkt og þegar þrengt er að opi garðslöngu með stöðugt rennsli þá eykst hraði vatnsins. Til eru dæmi þar sem hraðinn er mældur tvöfalt meiri fyrir neðan brúarundirstöðu heldur en við sama dýpi áður en það kemur að undirstöðunni (Briaud, 2013). Staðbundin úrskolon á sér stað við enda- og millistöpla þegar að vatnið flæðir staðbundið um þá. Flæði vatns þegar það mætir brúarstöpli er kastað til hliðar sem að veldur því að það skapar hvirfla (e. vortex) í bæði lóðréttu og láréttu plani og þessir hvirflar auka hættu á úrskolon í kringum undirstöðuna (sjá mynd 2-3) (May o.fl., 2002).



Mynd 2-3: Undirstaða brúarinnar ýtir flæði vatns frá sér sem mynda svo hvirfla í lóðréttu og láréttu plani (May o.fl., 2002).

Hvirflarnir grípa með sér jarðveg í kringum undirstöðuna og flytja hann svo neðar í ána. Svokallaðir skeifuhvirflar (e. horseshoe vortex) eru taldir valda mestri úrskolun við tær undirstaðna í ám eða fljótum (May o.fl., 2002). Heildarúrskolun er svo þegar samdráttar, staðbundin og hefðbundin úrskolun öll lögð saman. Sjá má lýsingu á fyrirbærinu á mynd 2-4.



Mynd 2-4: Heildarúrskolun við undirstöðu (May o.fl., 2002)

Almennt þá getur úrskolun undir undirstöðu átt sér stað þegar aðkomustraumhraði er heldur lágur sem er þá áður en flutningur á seti hefst í árfarveginum. Með þessum hætti skolast

undan með vatni sem ber lítið eða ekkert set með sér og getur náð talsverðri skolunardýpt við undirstöðu. Þessi aðferð nefnist úrskolun vegna tærs vatns en notast verður við skammstöfunina CWS (e. Clear Water Scour) hér eftir. Þegar að rennsli vatnsins eykst og byrjar að taka með sér jarðveg ofar í ánni getur náðst jafnvægi en það þýðir að flutningur á jarðvegi úr skolunarholu er sá sami og flutningur ofan í hana (Briaud, 2013). Þessi aðferð nefnist á íslensku árfarvegsúrskolun (e. live bed scour) en notast verður við skammstöfunina LBS hér eftir.

Hámarksskolunardýpi (e. maximum scour depth) næst yfirleitt fljótar með LBS en getur sveiflast til eða frá. CWS á það til að ná hámarksskolunardýpt jafnt og þétt yfir tíma og verður yfirleitt 10 prósentum hærri en hámarksskolunardýpt undir LBS (Richardson & Davis, 1995). Þegar að CWS á sér stað þá þýðir það ekki endilega að áin sé tær heldur eru oft fín efni sem fljóta á yfirborði árinna sem hafa þó engin áhrif á úrskolun. Fyrir minni brýr þá eru endastöplar brúar í meiri hættu vegna úrskolunar þar sem millistöplar eru fáir eða jafnvel ekki til staðar (Ettema, Yoon, Nakato & Muste, 2004).

Úrskolunarhraði (e. scour rate) eykst þegar jarðvegurinn er samsettur af grófkornóttu efni eins og mól og sandi heldur en af fínefni eins og silti og leir. Lauslega þjöppuðu grófkorna efni er því skolað burt heldur auðveldlega og hámarksskolunardýpt næst á mun styttri tíma heldur en hjá efni með samloðun (e. cohesion). Það ber þó að minnast á að sama skolunardýpt næst fyrir þessar jarðvegsgerðir þrátt fyrir mismunandi rofhraða (Muzzammil, Alama & Danish, 2015).

Erfitt er að meta hámarksskolunardýpt þar sem fáar prófanir, í fullum skala, hafa verið gerðar (Briaud, 2013). Rannsóknir hafa þó sýnt að ferillinn, skolunardýpi sem fall af tíma, þar sem vatn flæðir óendanlega lengi í kringum hringlaga undirstöðu með þvermál  $B$  má lýsa með jöfnunni:

$$z_s = \frac{t}{\frac{1}{z_l} + \frac{t}{z_{s,max}}} \quad (2-4)$$

þar sem  $z_s$  er skolunardýpt,  $z_l$  er upphaflegt rofmagn þegar  $t = 0$  undir hraða  $v$ ,  $z_{s,max}$  er hámarksskolunardýpt við  $t = \infty$  undir hraða  $v$  og  $t$  er tíminn sem vatnið hefur flætt með hraða  $v$ . Hámarksskolunardýpt í kringum undirstöðu samkvæmt Briaud (2012) er sýnd með jöfnu 2-5.

$$\frac{z_{s,max}}{B'} = 2,2K_{pw}K_{psh}K_{pa}K_{pssp}(2,6Fr - Fr_c)^{0,7} \quad (2-5)$$

þar sem  $B'$  er áætluð (e. projected) breidd brúarstöpsuls þvert á rennsli vatns,  $K_{pw}$  er vatnsdýptarstuðull,  $K_{psh}$  er lögunarstuðull (e. shape factor) fyrir brúarstöpul,  $K_{pa}$  er útlitsstuðull eða jafn hlutfalli lengdar og breiddar stöpsuls  $L/B$ ,  $K_{pssp}$  tekur tillit til fjarlægðar milli undirstaðna,  $Fr$  er Froude tala fyrir stöpul en hún byggir á straumhraða árfarvegsins ef stöpullinn væri ekki til staðar.  $Fr_c$  er Froude tala sem byggir á krítískum straumhraða,  $v_c$ , árinna. Ekki verður farið í fræðin bakvið  $K$  eða  $Fr$  stuðla í jöfnu 2-5. Þá má finna í Briaud (2013). Áætlaða breiddin  $B'$  er gefin með jöfnunni:

$$B' = B(\cos\varphi + \frac{L}{B} \times \sin\varphi) \quad (2-6)$$

þar sem  $B$  er breidd undirstöðu,  $L$  er lengd undirstöðu og  $\varphi$  er hornið sem að flæði vatns streymir að undirstöðu. Eitt af fjölmörgum atriðum sem er talið vert að kanna við hönnun brúar er undir hvaða horni stefnir flæði ár að undirstöðu (Lamb o.fl, 2017). Undirstaða brúarinnar við Steinavötn er með breidd 1,1 m og lengd 5,6 m. Þegar áætluð breidd hennar er reiknuð með jöfnu 2-6 miðað við breytilegt horn,  $\varphi$ , þá fást eftirfarandi niðurstöður:

Tafla 2-1: Áætluð breidd undirstöðu við Steinavötn miðað við breytilegt horn sem að vatn flæðir að undirstöðu.

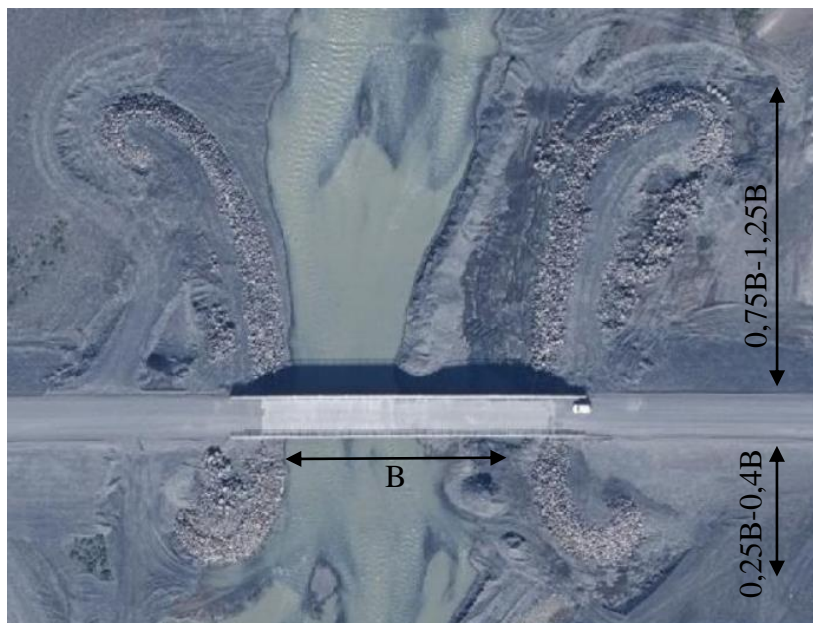
$\theta'$ [°]	$B'$ [m]
0	1,10
15	2,51
30	3,75
45	4,74
60	5,40
75	5,69
90	5,60

Tafla 2-1 gefur til kynna að versta aðkomuhorn rennslis að undirstöðu brúar (við Steinavötn) sé  $75^\circ$ . Með einungis  $15^\circ$  horni þá má sjá áætlaða breidd meira en tvöfaldast miðað við rennsli sem er samsíða undirstöðu. Ef áætluð breidd undirstöðunnar hækkar þá mun það leiða til möguleika á hærri skolunardýpt en ella. Eins og sést í töflu 2-1 þá fimmfaldast áætluð breidd undirstöðu ef flæði vatns stefnir þvert á hana miðað við ef flæði vatns er samsíða undirstöðunni. Mikilvægi leiðigarða (e. guide banks) getur því skipt gríðarlegu máli.

Leiðigarðar eru gjarnan sporöskjulaga (e. elliptical) og þeirra hlutverk er að stýra rennsli árinna undir brúarmannvirki á öruggan hátt. Með því að beina rennsli árinna undir brúarmannvirkið þá minnkar aðurnefnd áætlaða breidd brúarstöpsuls og hámarksskolunardýpt minnkar. Leiðigarðarnir eru gjarnan sitthvorum megin við árfarveginn en ef hætta er á að flæði yfir bakkann öðrum megin þá getur einn leiðigarður verið talinn nægjanlegur. Ef breidd árfarvegarins er táknuð  $B$  þá er almenn viðmiðunarlengd leiðigarða um  $0,75B - 1,25B$  ef leiðigarðar eru staðsettir fyrir ofan brúarmannvirki. Þeir eru heldur minni fyrir neðan brúarmannvirkið en þar er lengd þeirra á bilinu  $0,25B - 0,4B$  (May o.fl., 2002). Leiðigarða við brúnna yfir Morsá má sjá á mynd 2-5. Nánari umfjöllun um brúnna má sjá í kafla 4.1.

Það má áætla að því meiri straumhraði sem er í ánni, þeim mun meiri úrskolun eigi sér stað. Vegna flóða hefur skolað undan þónokkrum brúm á Íslandi. Evrópustaðallinn, EN1997-1, bendir hönnuðum á að kanna möguleika og umfang úrskolunnar. Leyfilegt er t.d. að gera ráðstafanir vegna rofdýptar við stoðveggi (e. retaining walls) eða stálþil (e. sheet pile wall) (Eurocode 7, 2011). Því þarf hönnuður að afla sér upplýsinga og taka upplýsta ákvörðun varðandi hættur á skolun undan brúarstöpli.





Mynd 2-5: Leiðigarðar við brúna yfir Morsár.

## 2.4 Frágangur við brúarstöpul

Brýr eru dýr mannvirki og sprungur í yfirbyggingu eða annars staðar geta haft verulegar afleiðingar á stöðugleika mannvirkis. Fyrir lengri brýr eru meiri líkur á að þörf sé á brúarstöplum sem að styðja við yfirbyggingu þeirra. Eins og áður var greint frá þá eykst straumhraði við það að mæta þrengingu farvegs síns eins og garðslanga þegar hennar op er minnkað. Iðustreymi (e. turbulence) myndast við slíkar aðstæður sem að eykur rofgetu í kringum brúarstöpla. Þess vegna er mikilvægt að skoða úrskolun þegar brúarhönnun á sér stað.

Brúarstöpull sem er grundaður á illa þjappaðan og slæman jarðveg getur reynst auðvelt að skola burt. Það er því gríðarlega mikilvægt að ganga frá jarðvegi í kringum undirstöðu á viðeigandi hátt. Vegagerðin notar m.a. leiðbeiningar frá May o.fl. (2002) og Jenssen og Tesaker (2009) til að meta frágang við brúarstöpla. Aðferðir til þess að minnka hættu á úrskolun eru t.d.

- Auka lengd milli brúarstöpla og minnka því hættu á auknum straumhraða og iðustreymi í kringum undirstöðu.
- Fæti brúarstöpla gæti verið komið fyrir á auknu dýpi þar sem rof nær ekki til eða á klöpp.
- Hægt er að verja undirstöðu með tilheyrandi jarðvegsgerðum og steinastærðum sem tryggja öryggi hennar gagnvart úrskolun.
- Passa að staðsetning mannvirkis sé ekki í beygju eða við ármót.

Fleiri aðferðir til þess að minnka úrskolun má sjá í riti May o.fl. (2002). Staðbundna úrskolun má koma í veg fyrir með því að koma fyrir rofvörn utan um fót brúarstöpuls. Dæmi um

rofvarnir má nefna grjótvörn (e. riprap), málmottur fylltar af jarðgrýti (e. gabion mattresses), steypar einingar og stálþil (e. sheet piles) (May o.fl., 2002). Grjótvörn er algengasta rofvörn sem notuð er í Bandaríkjunum en mottur, steypar einingar og stálþil eru taldar takmarkaðri aðgerðir þ.e. ekki hægt að nota aðferðirnar við jafn fjölbreyttar aðstæður (Barkdoll, Ettema & Melville, 2007).

Grjótvörn er gjarnan komið fyrir við undirstöðu brúarstöpsuls sem ver hana fyrir sterkum hvirflum vatns. Helstu erfiðleikar gætu verið að valdir steinar eru of smáir og rofgeta árinna flytur þá burt. Einnig getur jarðvegi skolað undan eða við ytri hlið grjótvornar sem veldur því að hún rennur til hliðar, flyst burt (Jenssen & Tesaker, 2009) eða ofan í úrskolunarholu. (May o.fl., 2002). Til þess að hindra að hvirflarnir grafi jarðveginn burt með sér þá hafa ýmsir rannsakað steinastærðir grjótvorna en til dæmis má nefna Escarameia & May (1992), Pilarczyk (1990) og einnig Richardson & Davies (1995). Í riti Jenssen og Tesaker (2009) má finna eftirfarandi jöfnu til ákvörðunar á meðalstærð rofvarnar í ferskvatni:

$$D_{50} = K_f \frac{0.692V_{lokal}^2}{(\rho - 1)2g} \quad (2-7)$$

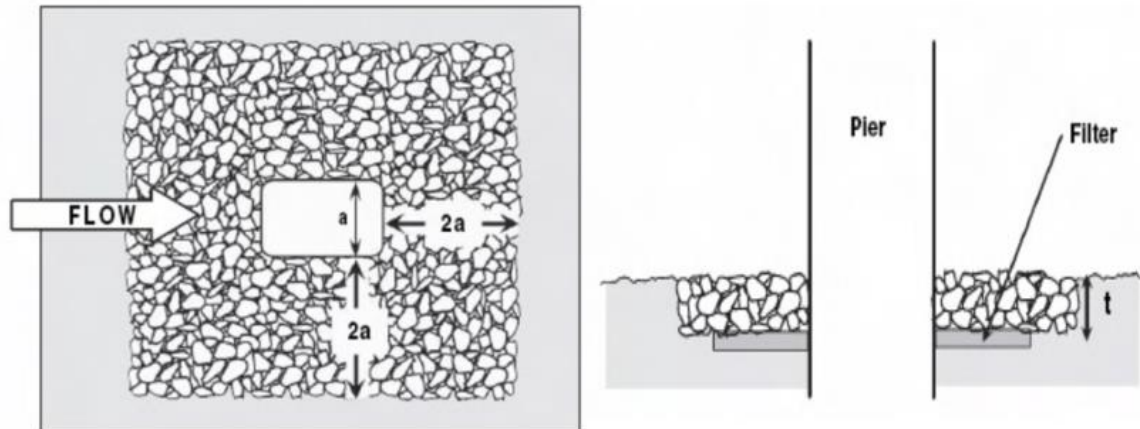
þar sem  $D_{50}$  er þvermál meðalsteins grjótvornar,  $K_f$  er lögunarstuðull,  $V_{lokal}$  er straumhraði rétt fyrir ofan stöpul,  $\rho$  er eðlisþyngd rofvarnar (e. specific gravity) og  $g$  er þyngdarhröðun ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ). Lögunarstuðullinn  $K_f$  er jafn 2,3 fyrir undirstöðu með oddalaga eða hringlaga nef en 2,9 fyrir rétthyrnt. Straumhraða rétt uppstreymis undirstöðu má nálga sem:

$$V_{lokal} = K_v V \quad (2-8)$$

þar sem  $K_v$  er leiðréttingarstuðull og  $V$  er meðalstraumhraði árfarvegs. Ef árfarvegur er minnkaður með tilkomu brúar er gagnlegt að leiðrétta hraðann.  $K_v$  er 1,0 ef brúarstöpull er staðsettur í innri beygju eða á beinum kafla en svo er mælt með 1,7 ef stöpull er við ytri hluta beygju (Jenssen & Tesaker, 2009).

Þykkt grjótvornar skal vera minnst  $3D_{50}$  þar sem stærsti steinn má ekki vera stærri en  $2D_{50}$ . Ef grjótvörninni er komið fyrir þegar að vatn er til staðar skal tvöfalda þykkt hans. Grjótvörn skal setja ofan á síulag (e. filter) eða jarðdúk (e. geotextiles) sem heldur jarðefnum aðskildum fyrir ofan og neðan og gætir þess að grafist ekki undan grjótvörninni sjálfri. Grjótvörnin skal ganga það sem nemur tvöfaldri breidd undirstöðu í báðar áttir. Sjá má fyrirkomulag á mynd 2-6 (Jenssen & Tesaker, 2009).

Grjótvörn skal komið þannig fyrir að holrými varninnar sé sem minnst. Ef henni er komið fyrir ofan á jarðdúk þá skal fyrsta lagið vera lagt varlega ofan á til þess að skemma ekki dúkinn. Jarðdúkurinn skal liggja það sem um nemur 2/3 af lengd grjótvornar í allar áttir og tryggja skal að hún sé fest nægjanlega við undirstöðu (Lagasse, 2006). Jarðdúkar eru oftast jafnan úr trefjaefnum og eiga það til að vera ofnir eða saumaðir. Jarðdúkar eru ekki gerðir úr náttúrulegum efnum þar sem þau brotna niður fljótar (Das, 2011). Eins og áður kom fram þá er þeirra helsta hlutverk að skilja að mismunandi jarðvegsefni, styrkja umlykjandi jarðveg, sía og sinna vatnsræsingu (Línuhönnun, 2003).



Mynd 2-6: Myndin sýnir frágang á grjótvörn og síulagi (Lagasse, 2006).

Sleppt verður að fjalla um rof undan endastöpli brúar í þessari ritgerð en leiðbeiningar varðandi undirbúning og frágang við hann má sjá í ritum Barkdoll o.fl. (2007), May o.fl. (2002), Lagasse (2006) og Jenssen og Tesaker (2009).

## 2.5 Ástandsskoðun og búnaður

Hingað til hefur vöktun gegn úrskolun verið gerð með sjónlægu mati þar sem fylgt er ákveðinni einkunnagjöf. Erlendis hafa kafarar verið notaðir til þess að meta ástand undirstöðu vegna úrskolunar. Fáir staðlaðir gátlistar eru til í heiminum en þá eru notuð viðmið frá opinberum stofnunum. Það verður að ástandsskoða til að meta hversu mikið hefur grafið frá millistöplum eða endastöplum brúa og hvort hætta sé á ferðum (Zanini o.fl., 2017).

Ástandsskoðun með þessum hætti er erfið þegar rof er annars vegar. Kafarar eiga erfitt með að fara á kaf í straumharðri á, hvað þá í jökulá sem er full af gruggi. Rof getur einnig gerst hratt og án mikillar viðvörðunar. Þar sem að áin grefur undan undirstöðu í flóði en fyllir svo jafnan aftur undir hana þegar að dregur úr vatnsaganum þá veldur það erfiðleikum að meta rofmagn eftir að flóði slotar. Þetta getur reynst misvísandi þar sem skolunardýpt gæti verið hærri heldur en mælist eftir á. Erfitt er að meta hámarksskolunardýpt við slíkar aðstæður. Þetta hefur ýtt undir þróun á tækjum og búnaði sem hjálpar til við að meta úrskolunarhættu (Prendergast & Gavin, 2014). Tæki og búnaður til þess að meta úrskolun út frá dýptarmælingum eru flokkuð í eftirfarandi flokka samkvæmt Prendergast og Gavin (2014):

- Einnota búnaður (e. Single use devices)
- Púls- eða rafsjárbúnaður (e. Pulse or radar devices)
- Streitumælir (e. Fiber-Bragg grating)
- Rekinn eða grafinn stangarbúnaður (e. Driven or buried rod devices)
- Hljóðbylgjutæki (e. Sound wave devices)
- Rafleiðnitæki (e. Electrical conductivity devices)

Þeir sem hafa rannsakað tæki og búnað til þess að meta úrskolun má nefna Marr (2014), Zanini o.fl. (2017) og Prendergast og Gavin (2014).

Dæmi um einnota búnað má nefna til dæmis flottæki sem er komið fyrir lóðrétt undir ákveðna hæð jarðvegs. Þegar að skolast af og undan honum þá losnar hann og flýtur á yfirborð. Einnig snýst flotbúnaðurinn lárétt og gefur merki um að hann sé ekki lengur í sinni upphaflegu stöðu með að senda boð í móttakara sem getur verið í vaktstöð. Auðvelt er að koma búnaðinum fyrir í þurrum jarðvegi. Með því að koma fyrir mörgum flottækjum á mismunandi dýpi geta náðst áreiðanlegar heimildir um hversu djúpt hefur grafist undan undirstöðu. Hugsanlegur galli gæti hinsvegar verið að flottækið gefur einungis merki frá sér ef það grefst frá honum en ekkert merki berst frá honum ef það verður bilun í búnaði og því getur grafist frá undirstöðu án þess að viðvörðun sé gefin (Prendergast & Gavin, 2014). Púls eða rafsjárbúnaður notast við eins og nafnið gefur til kynna rafsegulbylgjur (e. electromagnetic pulse) og eða rafsjártækni til þess að sjá breytta leiðnieiginleika milli efna til þess að meta dýpt vegna úrskolunar í tiltekinni staðsetningu.

Úrskolunaraðgerðir sem notast við streitumæla virka þannig að stálstöng er komið fyrir í jarðvegi við undirstöðu og streitumælir festur við hana sem að mælir þegar að vatnið grefur frá henni. Stöngin er fest í annan endan (e. cantilever) og er því laus að ofan. Þegar að stöngin missir stuðning umlykjandi jarðvegs og vatnið flæðir á hlið stangarinnar mun streita aukast í stönginni sökum þess (Prendergast & Gavin, 2014).

Rekinn eða grafinn stangarbúnaður er útbúinn þannig að rennidiskur er utan um lóðrétt stöng sem lætur vita af hæð sinni með segulboðum. Þeim mun meira sem að grefst undan stönginni því neðar fer rennidiskurinn og á leið sinni niður virkjar hann tækjabúnað inn í stönginni sem sendir svo boð um hæð hans (Schall & Davies, 1999).

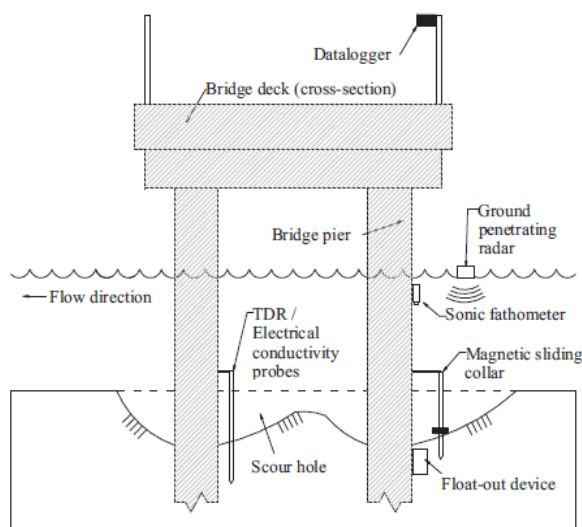
Hljóðbylgjutæki eða bergmálsdýptarmæli er komið fyrir neðan yfirborð vatns við undirstöðu þar sem að tækið sendir frá sér hljóðbylgju til þess að meta ástand úrskolunar. Bylgjan ferðast niður að dýpi þar sem að vatn og jarðvegur mætast en þar greinir á milli mismunandi eðlisþyngdar sem að tækið nemur. Skolunardýpt er svo reiknuð út frá tímanum sem bylgjuna tekur að berast niður og til baka. Með þessum hætti getur tækið metið ástand með því að senda bylgjur reglulega (Fisher o.fl., 2013).

Rafleiðnitæki er komið fyrir lóðrétt ofan í jarðveginn eins og stangarbúnaðinum. Tækið mælir breytingu á rafleiðni milli yfirborðs jarðvegsins og vatnsins og metur þannig dýpt niður að jarðveginum. Sendur er straumur frá efri enda tækis og niður að botni tækisins og þar sem að breyting verður á leiðni er hægt að áætla að þar mætist vatn og jarðvegur (Hayes & Drummond, 1995).

Teknir voru saman kostir og gallar af Zanini o.fl., (2017) af helsta rofbúnaði er völ er á. Niðurstöður þessar má sjá þýddar í töflu 2-2 og mynd af rofbúnaði má sjá á mynd 2-7.

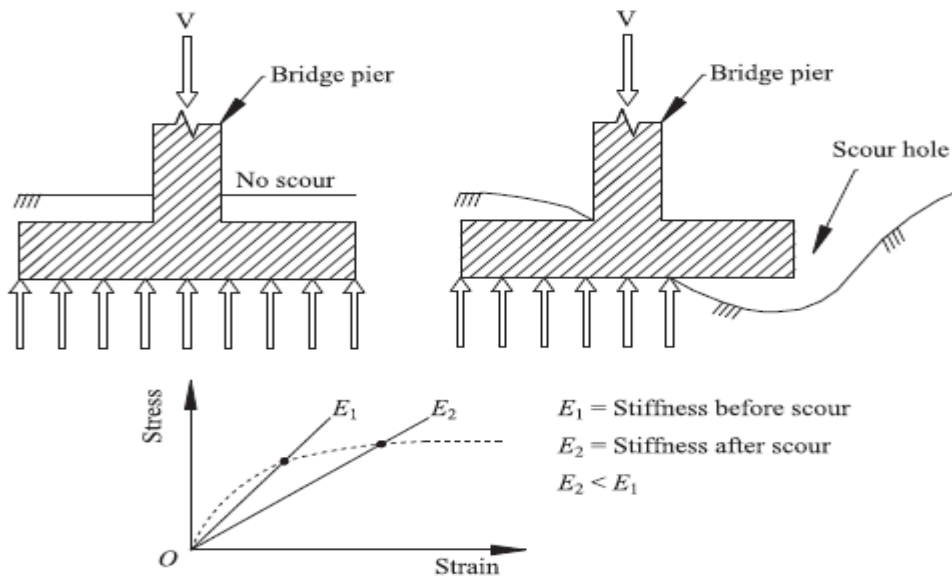
Tafla 2-2: Kostir og gallar af helsta rofbúnaði sem völ er á þessa stundina, byggt á Zanini o.fl., (2017).

Gerð	Kerfi	Kostir	Gallar
Einnota tæki	Flottæki	Auðveld notkun og ísetning	Kostnaðarsöm ísetning, einnota og getur einungis metið skolunardýpt þar sem tæki er komið fyrir.
Púls- eða rafsjárbúnaður	Rafsegulbylgjusendir	Auðvelt að lesa niðurstöður sem gefa góða yfirsýn yfir skolunardýpt	Ísetning nema í árfarveg getur reynst erfitt, mælingar eru nærmar fyrir salti og hitastigi.
Rekinn eða grafinn stangarbúnaður	Segulmagnaður rennidiskur	Auðvelt að lesa gögn	Mælir úrskolun einungis við staðsetningu stangarinnar, ástand annarsstaðar óvitað.
Hljóðbylgjutæki	Bergmálsdýptarmælir	Samfelld mæling í nálægð við undirstöðu sem gerir notanda auðvelt að lesa niðurstöðu	Við iðustreymi getur mælirinn ruglast vegna magn lofts í vatni.



Mynd 2-7: Tæki og tól til þess að vakta rof undan undirstöðum brúarmannvirkis á einni mynd (Prendergast & Gavin, 2014).

Það er misjafnt hvernig brýr standast áreiti úrskolunar. Það fer eftir gerð brúar, umferð, gerð undirstöðu og jarðvegseiginleikum í kringum hana (Zanini o.fl., 2017). Mestmegnis hafa mælingar á úrskolun verið gerðar undir vatnsyfirborði og fáar rannsóknir hafa skoðað að mæla viðbrögð mannvirkis við úrskolun undan brúarstöpli. Til eru þó tæki eins og hröðunarmælir (e. accelerometer) og hallamælir (e. tiltmeters) sem geta mælt svörun mannvirkis vegna breytinga á jaðarskilyrðum og mælt sig undir brúarstöpli. Hallamælir gefa þó ekki upp skolunardýpt. Með auknu rofi undan undirstöðu missir hún stuðning sem leiðir til minnkandi lóðréttrar stífni og aukinnar spennu (Prendergast & Gavin, 2014), sjá má mynd 2-8.



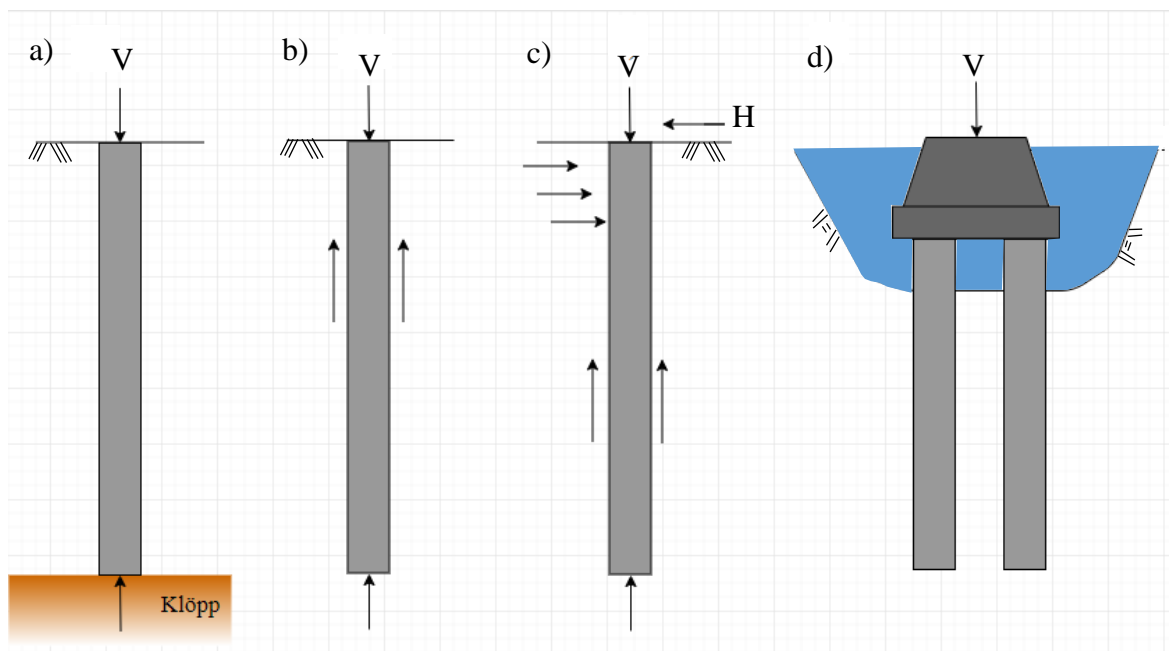
Mynd 2-8: Undirstaða missir lóðréttu stífni og spennu eykst vegna úrskolunar (Prendergast & Gavin, 2014).

Hægt er einnig að mæla breytingu á eigintíðni brúar en hún tengist stífni hennar. Mögulega getur það leitt í framtíðinni til tækni sem gerir okkur kleyft að fylgjast með skolunardýpt undirstöðu (Foti & Sabia, 2011; Salawu, 1997)

## 3 Staurationirstöður

### 3.1 Almennt

Undirstöðum er skipt í tvo flokka. Það eru grunnar undirstöður og djúpar undirstöður. Dæmi um grunnar undirstöður eru hefðbundnir sökklar undir húsbyggingum sem hvíla á eða í grófu jarðefni eða klöpp. Oftast eru grunnar undirstöður ódýrari heldur en djúpar undirstöður (Briaud, 2013; Sigurður Erlingsson, 2016). Dæmi um djúpar undirstöður (e. deep foundations) má nefna staura, súlur eða t.d. keilusúlur. Undirstöður grundaðar á staura eru oft nauðsynlegar þegar stærri mannvirki eru byggð á mjúk setlög. Á mynd 3-1 má sjá staura undir mismunandi kringumstæðum. Ef jarðvegur er slæmur eða ekki með nægjanlega burðargetu til þess að bera mannvirki er hægt, í sumum tilfellum, að reka niður staur þar til hann kemur niður á fast berg eða klöpp. Þetta er sýnt á mynd 3-1a. Ef dýpi niður á fast er mikið er þetta ekki framkvæmanlegt. Á Íslandi eru gjarnan notaðir fljótandi staurar við brúargerð (Jón Skúlason, 1977) en þeir eru helst notaðir þegar að djúpt er niður á fast berg. Fljótandi staurar bera lóðrétt álag með hjálp endaburðs og viðnáms milli jarðvegs og yfirborðs þeirra, sjá mynd 3-1b. Hlutfall endaburðar af heildarburðarþoli staura fer að stórum hluta eftir jarðefni. Í fínefnaríku efni getur hlutfall hans verið lágt miðað við í grófkornóttu efni eins og sandi og möl. Í silti og leir er burður staurisins að stórum hluta kominn til vegna viðnáms. Yfirleitt er öryggistuðull á burðarþoli stauraþyrpingar 2,5 – 4 (Sigurður Erlingsson, 2016).



Mynd 3-1: Dæmi um aðstæður þar sem þörf er á staurum. Lóðrétt álag er táknað með „V“ og lárétt álag er táknað með „H“.

Mannvirki sem verða fyrir hliðarálagi vegna vind- eða jarðskjálftaálags flytja krafta niður í stauraundirstöðu. Staurarnir streitast á móti hliðarálagi,  $H$ , með vægisþoli sínu en styðja áfram í lóðréttu stefnu. Þessar aðstæður má sjá á mynd 3-1c en yfirleitt eru þetta undirstöður

hærrí mannvirkja sem verða fyrir miklu vind- eða jarðskjálftaálagi. Brúarstöplar eru gjarnan grundaðir á staura hér á landi, sjá mynd 3-1d, þar sem þeir eru við eða í ám og er það gert til þess að tryggja öryggi brúarmannvirkis gagnvart rofi.

Staurar geta verið úr steinsteypu, stáli, timbri og einnig geta þeir verið samsettir úr mismunandi efnum. Þetta er stundum gert með skeytingu (e. splicing) en oft verða þeir veikari fyrir vikið og því er sú lausn varasöm, sérstaklega ef staur verður fyrir togkröftum eða hliðarálagi (Das, 2011). Þversnið stauranna getur verið kringlótt, ferningslaga eða sexhyrningslaga.

Staurum getur verið komið fyrir á mismunandi hátt. Þeir geta verið reknir niður með högghamri eða víbrunarhamri (e. driven piles). Einnig er hægt að bora holu og koma fyrir steypustyrktarjárnagrind og svo fyllt með steypu (e. bored piles). Algengast er þó að staurar séu forsteyptir og járnbentir og reknir niður vegna kostnaðar. Vegagerðin notar falllógðstæki við niðurrekstur sinna staura í dag sem heitir SC-30 og kemur frá fyrirtækinu IHC.

## 3.2 Timburstaurar

Timburstaurar voru mikið notaðir hér á landi á árum áður en í seinni tíð hefur notkun þeirra minnkað til muna. Þeir henta vel í vatnsmettuðum jarðvegi en þó ekki í snertingu við salt. Þeir hafa þó verið notaðir í saltvatni en það er þá helst vegna þess hve illa staurar úr stáli og steypu standa sig í saltvatni (Reynolds, 2003). Æskilegt er að verja timbur gegn útþornun en hún getur valdið sprungum eða rýrnun efnisins. Þegar timburstaurar eru staðsettir í söltu vatni eiga þeir á hættu að skemmast innan fárra mánuða. Er það vegna áreitiss ýmissa lífvera. Timburstaurar eru því gjarnan þrýstivarðir með creosote. Þá aðferð var byrjað að nota um 1838 í Englandi (Reynolds, 2003). Einnig er hægt að nota blöndu af kopar, króm og arsenic (e. CCA) til þess að verja þá (Collin, 2002). Flestar gerðir af mjúkvið og harðvið er hægt að efnaverja. Creosote er samblanda hundruða efna sem verða eftir þegar að allur vökví hefur verið eimaður úr koltjöru (e. distillation). Creosote hefur reynst vel til þess að verja timburmannvirki og staura og getur líftími þeirra varað yfir eitthundrað ár (Reynolds, 2003).

Timburstaurar eru oftast 10 – 20 metra langir. Börkur og kvistir eru varlega fjarlægðir við framleiðslu. Gallað timbur er ekki notað en staurarnir verða að vera beinir, heillegir og án allra galla. Timburstaurar hafa ekki hátt þol gagnvart mikilli þrýstispennu við niðurrekstur. Gjarnan er stálhatti eða stálhring komið fyrir á efri stauraenda til þess að sporna gegn kústun (e. brooming) eða skemmda við niðurrekstur timburstaura. Einnig má koma fyrir stálskó á neðri enda staura til þess að koma í veg fyrir skemmdir við botn hans (Das, 2011). Ef nauðsyn krefst þá er hægt að skeyta timburstaurum saman með járn múffu (e. pipe sleeves) eða með boltuðum festingum (e. metal straps).

Helstu kostir timburs og timburstaura eru að þeir eru auðvinnanlegir, hafa háan styrkleika miðað við þyngd og það er auðvelt að vinna timbrið svo sem að hefла, saga, bora og fræsa. Einnig getur ending þeirra verið góð ef þeir eru notaðir við réttar aðstæður. Dæmi eru um að timburstaurar getið haldist óskemmdir í tæplega 1900 ár ef þeir eru umluktir vatni eða vatnsmettuðum jarðvegi (Collin, 2002). Helstu gallar timburs eru að það er viðkvæmt gagnvart náttúrulegu niðurbroti eins og fúa eða skordýrum. Á það einkum við þar sem súrefni kemst að staurnum. Einnig er timbur anísótropískt eða missterkt í mismunandi áttir. Þar sem timbur er náttúrulegt efni geta verið gallar í því t.d. kvistir sem veikja þversniðið staðbundið (Bjarni Pálsson, 2016).



### 3.3 Burður timburstaura með stöðufræðilegum jöfnum

Þversniðsþoli timburstaura má lýsa með:

$$Q_{all} = A_p f_w \quad (3-1)$$

þar sem að  $A_p$  er meðalþversniðsflatarmál staura og  $f_w$  er leyfileg þrýstispena (e. stress) á timbur. Burðarþol staura ákvarðast af endaburði ásamt hliðaburði vegna viðnáms við yfirborðskápu staurans. Hámarksburðargeta staura (e. ultimate pile load) er því lýst með jöfnunni:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (3-2)$$

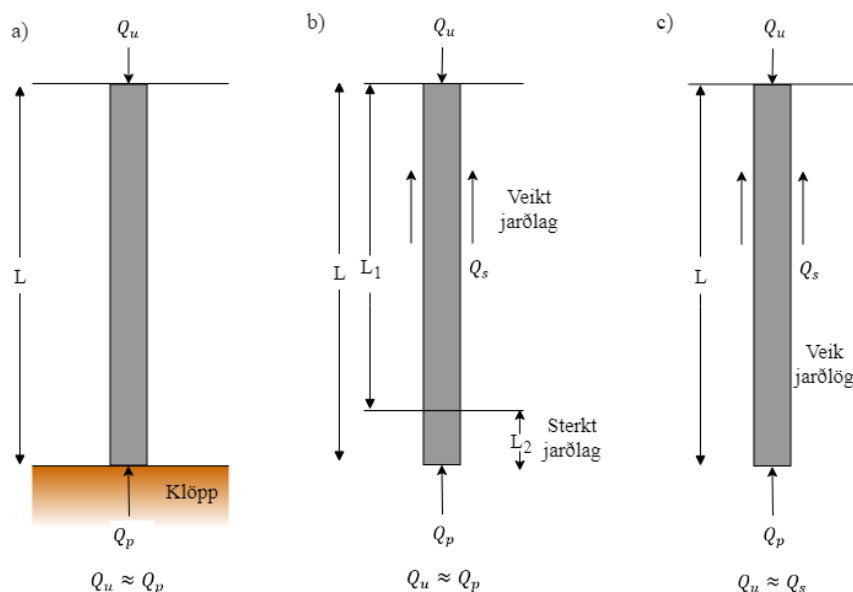
Þar sem  $Q_u$  táknar hámarksburðargetu hans,  $Q_p$  stendur fyrir endaburð og  $Q_s$  viðnám við yfirborð staura. Ef endaburður,  $Q_p$ , er lítil þá má nálga burðargetuna sem:

$$Q_u \approx Q_s \quad (3-3)$$

Hinsvegar ef viðnám við yfirborð staura er lítið þá er burðargeta staura:

$$Q_u \approx Q_p \quad (3-4)$$

Staur sem að nær niður á fast berg eða klöpp er sýndur á mynd 3-2 a), á mynd 3-2b) má svo sjá fljótandi staur komið niður á sterkt jarðlag í gegnum veikt lag. Fljótandi staur í slæmum jarðvegi má svo sjá á mynd 3-2 c). Fyrir fyrstu tvö tilvikin er endaburður ráðandi en burður vegna viðnáms er ráðandi í því síðasta.



Mynd 3-2: Á myndum a) og b) er endaburður ráðandi og c) burður vegna viðnáms ráðandi.

Endaburð staurs má áætla með jöfnunni:

$$Q_p = A_q q_p = A_p (c' N_c^* + q' N_q^*) \quad (3-5)$$

þar sem  $A_p$  er flatarmál stauraenda,  $q'$  er virk lóðrétt spenna við stauraenda,  $N_q^*$  og  $N_c^*$  eru burðarþolsstuðlar sem eru fengnir út frá viðnámshorni og  $c'$  táknar samloðun. Burðarþolsstuðul,  $N_q^*$ , má svo sjá á mynd 3-3. Þegar samloðun er engin ( $c' = 0$ ) þá má einfalda jöfnuna í:

$$Q_p = A_p q' N_q^* \quad (3-6)$$

Nokkrir hafa rannsakað burðarþol stauraundistaðna. Þar má nefna Meyerhof, Vesic, Coyle og Castello (Das, 2011). Aðferð Meyerhof hefur sýnt fram á góða nálgun á burðarþoli staurs í möl og sandi og því er valið að fjalla um og nota þá aðferð. Endaburður staurs samkvæmt Meyerhof hefur ákveðið hámarksgildi. Það er gefið með jöfnunni:

$$Q_{p,max} = A_p q_l \quad (3-7)$$

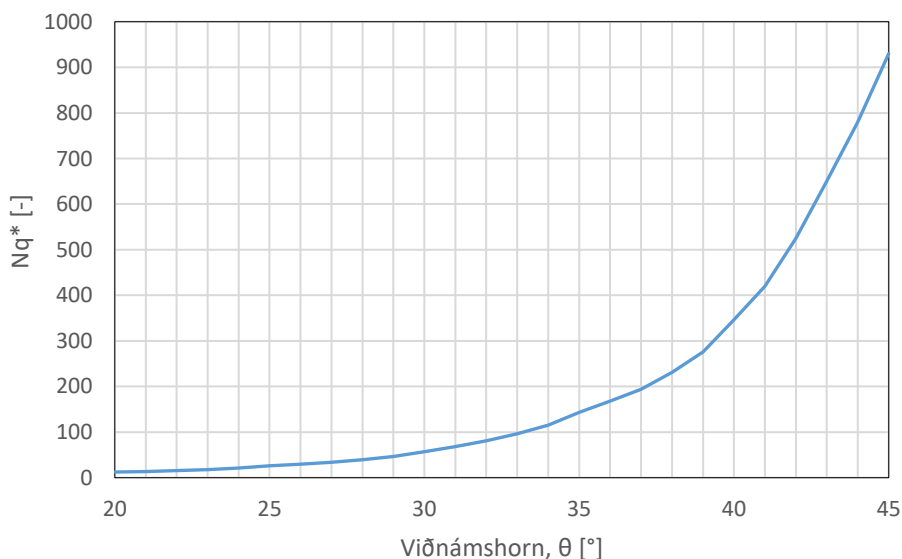
þar sem hámarksspennan er gefin sem:

$$q_l = 0,5 p_a N_q^* \tan \theta' \quad (3-8)$$

því má skrifa endaburð staurs í sandi samkvæmt fræðum Meyerhof sem:

$$Q_p = A_p q' N_q^* \leq A_p q_l \quad (3-9)$$

Þar sem  $p_a$  er loftþrýstingur ( $100 \text{ kN/m}^2$ ) og  $\theta'$  er virkt viðnámshorn umlykjandi jarðvegs.



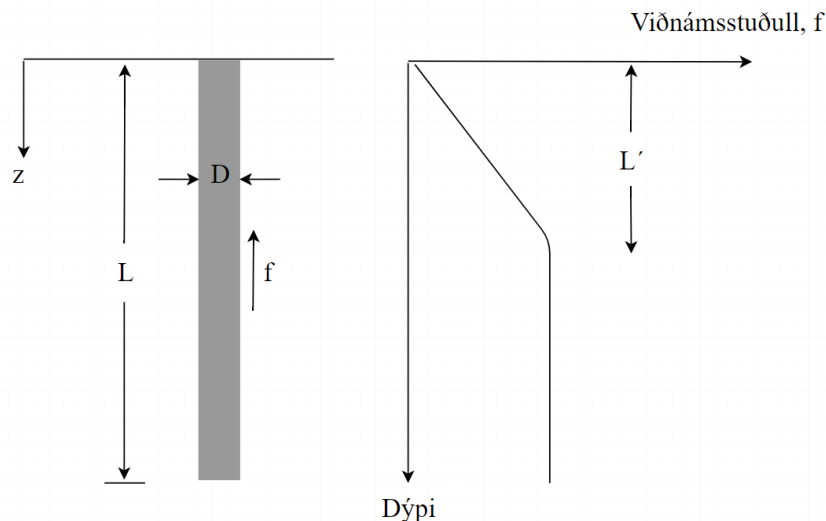
Mynd 3-3: Burðarþolsstuðull,  $N_q^*$ , sem fall af viðnámshorni.

Burð vegna viðnáms við yfirborð staurs má rita sem:

$$Q_s = \sum p \Delta L f \quad (3-10)$$

Þar sem  $p$  er ummál þversniðs staursins,  $\Delta L$  er lengd þversniðshluta og  $f$  er viðnámsstuðull. Viðnámsstuðul,  $f$ , getur verið erfitt að meta. Samkvæmt Das (2011) þá eru gefin fjögur skref til þess að meta  $f$ .

1. Það skiptir máli hvernig staurnum er komið fyrir. Yfirleitt verður meiri þjöppun á jarðvegi í kringum staurinn þegar að hann er rekinn niður og því hækkar viðnámsstuðullinn,  $f$ .
2. Það hefur verið bent á í prófunum að  $f$  hegði sér eins og má sjá á mynd 3-4. Viðnámsstuðull,  $f$ , eykst línulega niður að dýpi  $L'$  en fer aldrei fram úr því gildi. Gjarnan er miðað við að  $L'$  sé jafnt og  $15D$  þar sem  $D$  er þvermál staurs.
3. Í lausum sandi fæst hærri viðnámsstuðull,  $f$ , fyrir staur sem rekinn er niður með stærri færslum (e. high displacement) en styttri færslum (e. low displacement).
4. Lægri viðnámsstuðull,  $f$ , fæst fyrir staura sem eru boraðir niður (e. bored) í samanburði við rekna staura (e. driven).



Mynd 3-4: Viðnámsstuðull,  $f$ , eykst sér nánast línulega niður að dýpi  $L'$  en er fasti eftir það. Byggt á Das (2011).

Á bilinu  $0 \leq z < L'$  má ákvarða  $f$  með jöfnunni:

$$f = K \sigma'_0 \tan \delta' \quad (3-11)$$

Og á bilinu  $L' < z \leq L$  er

$$f = f_{z=L'} \quad (3-12)$$

Þar sem  $K$  er hlutstuðull lárétrrar og lóðrétrrar virkrar spennu,  $\sigma'_0$  er virk spenna á tilteknu dýpi og  $\delta'$  er leiðrétt viðnámshorn á mörkum jarðvegs og staurs. Gildi fyrir  $K$  varðandi mismunandi innsetningaraðferðir staurs má sjá í töflu 3-1.

Tafla 3-1: Hlutstuðull,  $K$ , fyrir mismunandi innsetningu staura samkvæmt (Das, 2011).

Gerð staura	$K$
Grafinn (e. bored or jetted)	$K_0$
Rekinn með lítilli færslu (e. low displacement)	$K_0$ til $1,4K_0$
Rekinn með hárrí færslu (e. high displacement)	$K_0$ til $1,8K_0$

Þar sem  $K_0 = 1 - \sin \delta'$ . Leiðrétt viðnámshorn  $\delta'$  er svo á bilinu  $0.5\theta'$  til  $0.8\theta'$ . Erfitt getur verið að reka niður staura í seinni röð, undir brúarundirstöðu, í lauspökkuðum sandi ef fjarlægð í fyrri staura er lítil. Það er vegna þess að þegar staurinn er rekinn niður þá eykst samþjöppun sandsins og viðnámshorn hans eykst (Jón Skúlason, 1993).

Í flestum tilfellum er notast við fleiri en einn staur fyrir tiltekna undirstöðu og því þarf að meta burðargetu staurasamstæðu í heild sinni. Venjan er að láta staurana ganga inn í steiptan botn undirstöðu. Það getur reynst flókið að meta burð staurapýrpingar en það er vegna þess að þegar staurarnir eru staðsettir nálægt hvor öðrum þá getur spenna sem flyst frá staurum yfir í jarðveg gengið ofan í hvor aðra sem minnkar burðarþol þeirra. Nýtni staurasamstæðu má skilgreina sem:

$$i = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u} \quad (3-13)$$

Þar sem  $Q_u$  er burðarþol sérhvers staura þar sem ekkert tillit er tekið til staurasamstæðunnar og  $Q_{g(u)}$  er burðarþol staurasamstæðunnar. Samkvæmt (Das, 2011) má leiða út jöfnu fyrir nýtni staurasamstæðu í sandi sem:

$$i = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u} = \frac{2(n_1 + n_2 - 2)d + 4D}{pn_1n_2} \quad (3-14)$$

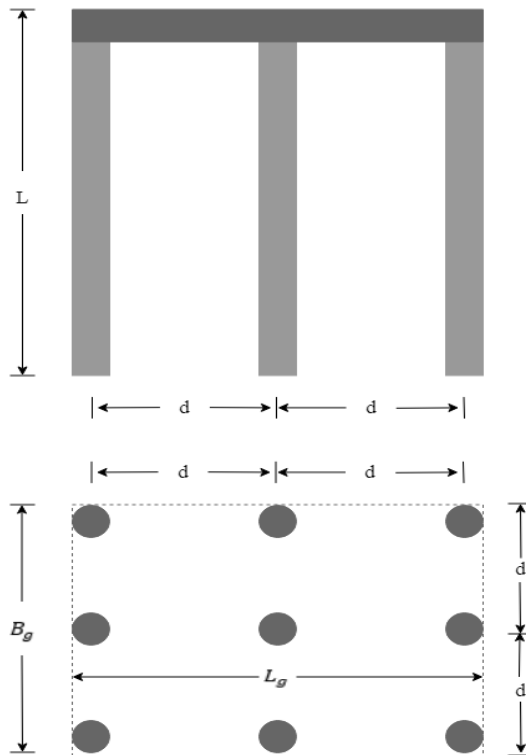
Ef  $i < 1$  þá er burður samstæðunnar

$$Q_{g(u)} = i\sum Q_u \quad (3-15)$$

En ef  $i \geq 1$  þá er

$$Q_{g(u)} = \sum Q_u \quad (3-16)$$

Þar sem  $n_1$  og  $n_2$  tákna fjölda staura í lengdar og breiddarstefnu. Þvermál staura er táknað með  $D$ ,  $p$  er ummál (e. perimeter) þeirra og  $d$  er bil á milli þeirra. Nánari skýringu má sjá á mynd 3-5.



Mynd 3-5: Týpísk 3 x 3 stauraþyrping, Byggt á (Das, 2011).

Góð regla við hönnun staura er að bil á milli staura, miðju í miðju, sé að minnsta kosti  $d = 2,5D$  þar sem  $D$  er þvermál staura sem um ræðir. Stefna skal hinsvegar á að fjarlægðin sé á bilinu  $3D$  til  $3,5D$  (Das, 2011).

### 3.4 Prófanir á Íslandi

Rannsóknir á burðarþoli stauraundirstaða hafa verið framkvæmdar á Íslandi og í þessum undirkafla verður farið stuttlega yfir þær. Rannsakað hefur verið samband burðarþols og bormótstöðu um nánast allt land við mismunandi aðstæður en þó er fjöldi prófana talinn almennt takmarkaður. Áður fyrr, við hönnun stauraundirstaða, var fjöldi og gerð staura ákvarðaður frá fyrri verkum og erlendum hönnunarreglum.

Árið 1977 tók Jón Skúlason saman rannsóknir á stauraundirstöðum sem gerðar höfðu verið. Rannsóknarstaðirnir voru við Skeiðará, Gígju, Súlu, Hnausakvísl, á Akureyri og í Borgarfirði en aðstæður voru kannaðar með borunum og sýnatöku. Staurarnir voru ýmist úr timbri eða steinsteypu. Niðurstöður sýndu meðal annars að timburstaur sé heppilegri en steypitir staurar í lauspökkuðum sandi og möl. Þetta átti helst við vegna kostnaðar við efniskaup, orkunotkun við rekstur, burðarþol og kostnað við flutning (Jón Skúlason, 1977).

Jón Skúlason (1980) gerði einnig athuganir á burði staura við lárétt álag en hliðstæð próf höfðu ekki verið gerð áður á Íslandi. Prófanir voru gerðar við Skeiðará og við Gígju og voru staurarnir steypitir og úr timbri. Ein af niðurstöðum prófana var að ef reiknuð gildi samkvæmt fjaðurfraeðum (e. beam-on-elastic-foundation) voru borin saman við mæld gildi þá lýsa þau sæmilega sigálgagsfleti staura í laust pökkuðum sandi og möl.

Almenna verkfræðistofan (sem nú tilheyrir Verkís) tók saman árið 1993 allar tiltækar prófanir og gögn varðandi staura á landinu. Prófanir voru 53 talsins og fóru fram mestmegnis á Suður og Norðurlandi. Allar staðsetningar þeirra má sjá á mynd 3-6.



Mynd 3-6: Rannsóknarstaðir úr samantekt Almennu verkfræðistofunnar (Jón Skúlason, 1993).

Staurarnir voru í flestöllum tilfellum reknir niður með díselhömrum að nafni Delmag D-12 eða Hera 1250. Þó voru til dæmi um að falllóð með þyngd frá 1000 kg til 2300 kg voru notuð eða aðrar gerðir af díselhömrum til þess að reka niður staura. Þar sem oftast eru tvær raðir af staurum undir undirstöðum í brúargerð á Íslandi þá bentu niðurstöður skýrslunnar á að það sé erfiðara að reka niður staur í seinni röð heldur en þá fyrri (Jón Skúlason, 1993). Brotálag timburstaura samkvæmt samantekt Jón Skúlasonar má sjá í töflu 3-2.

Tafla 3-2: Mælt brotálag staura úr samantekt Almennu verkfræðistofunnar (Jón Skúlasonar, 1993).

Staður	Jarðvegur	Brotálag, $Q_{90}$ [t/m <sup>2</sup> ]
Borgarfjörður	Fínn sandur	9
Borgarfjörður	Fínn sandur	7.6
Búrfellslína	Fínn sandur	>5.1
Hvalfjörður	Siltríkur lífrænn sandur	>1.6
Hnausakvísl	Lífrænt silt	2.9
	Lífrænt silt	2.9
	Lífrænt silt	3.1
Lagarfljót	Lífrænt silt*	2.9
	Lífrænt silt*	2.6
Skeiðará	Sandur og möl	10.8
	Sandur og möl	12.5
	Sandur og möl	18.4
Núpsvötn og Súla	Sandur og möl	11.1
Sandgígjukvísl	Grófur sandur	11.8
	Grófur sandur	7
	Grófur sandur	8.7
Svarfaðardalsá	Grófur sandur	>5.8

Þar sem burðarþol staurs eykst í beinu hlutfalli við yfirborðsflatarmál staurs í jarðvegi er þolið oft normað með flatarmálinu og birt sem kraftur á yfirborðsflatarmál staurs. Brotálagið,  $Q_{90}$ , er ákvarðað út frá norskri aðferð sem skilgreinir brotálagið sem það álag sem veldur tvöfalt meira sigi en álag sem er 90% af  $Q_{90}$  (Jón Skúlason, 1993).

Sett var fram tillaga að vali á efnisstuðlum við útreikninga á lóðréttri burðargetu staurs með notkun forritsins PIA I. Efnisstuðlar jarðvegs voru fundnir með því að endurreikna álagspróf á staura í PIA I (Jón Skúlason & Einar Hafliðason, 1992). Við burðarþolshönnun staura hjá Vegagerðinni eru notuð forrit sem heita Ansys og SAP2000. Þar er stífni og mótstaða jarðvegs sett inn sem gormar.

Samanburður bormótstöðu við niðurrekstur og burðarþol staura var meginviðfangsefni verkefnis Guðmundar Bergssonar (2014). Niðurstöður þess verkefnis voru til dæmis að erfitt er að áætla rekmótstöðu út frá niðurstöðum höggboranna í fínefnaríkum jarðlögum og að hægt sé að áætla burðarþol staura gróflega út frá bormótstöðu.

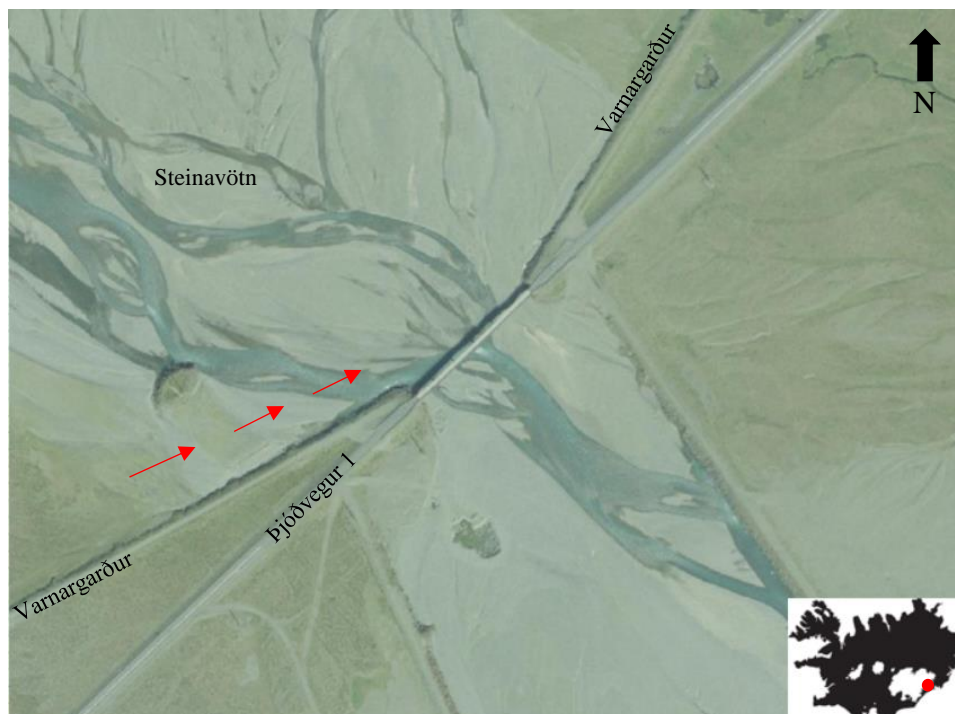




## 4 Greining á tjóni

### 4.1 Umhverfi, aðstæður og bakgrunnur

Steinavötn renna undan Brókarjökli, sem er einn angi Vatnajökuls, og falla um Kálfafellsdal og Steinasand á leið sinni til sjávar (sjá mynd 4-1). Vatnasvið Steinavatna er 150 km<sup>2</sup> og er hluti jökulsins 25 km<sup>2</sup> af því (Tómas Helgason & Magnús Helgason, 1989). Í heimildum er hún bæði flokkuð sem jökulá og dragá (Tómas Helgason & Magnús Helgason, 1989) en áin verður að mestu til við leysingu jökulíss eins og jökulár hafa tilhneigingu til. Vatnsmagn jökuláa er háð hitastigi og getur verið margfalt meira á sumrin heldur en á veturna enda er nær engin leysing á veturna. Þar sem að úrkoma er yfirleitt meiri síðsumars en á öðrum árstímum þá getur sambland af leysingu og úrkomu endað með afar miklu rennsli á þeim tíma. Rennsli Steinavatna fylgir ofangreindri hegðun og eykst yfir sumar og haustmánuðina. Síðustu áratugi hefur rennsli vatns aukist í jökulám um allt land vegna hlýrra veðurfars (Snorri Zóphóníasson, 2015). Í jökulám er setflutningur meiri heldur en í venjulegum ám. Yfirleitt er nóg af jarðefnum við eða undir jökli sem getur borist með rennsli þeirra (Langley, 2006; Þorleifur Einarsson, 1968). Þar sem straumhraði í jökulám er hærri yfir sumar og haust þá berst meira efni með þeim á þeim tíma en á öðrum árstímum. Jökulár geta verið skolgráar vegna efnisburðarins.



Mynd 4-1: Brúin yfir Steinavötn. Rauðar pílur sýna stefnu rennslis undir lok septembermánaðar 2017. Kortið var gert með aðstoð map.is.

Þegar landhalli og straumhraði minnkar þá fyllast farvegir jökuláa af framburði og kvíslarnar reika um aurana og mynda því ekki stöðugan farveg. Vatnið rennur á svipuðum slóðum til langs tíma þar til aurarnir hafa hlaðist svo hátt að áin skiptir um farveg (Þorleifur Einarsson, 1968). Í lok september 2017 kom meirihluti rennslis Steinavatna úr vestanátt og kom þvert á brúarstöpla eins og sýnt er á mynd 4-1 en engir leiðigarðar eru við brúnna. Einnig má sjá varnargarða sem eru við aðliggjandi veg til þess að tryggja að áin flæði ekki yfir veginn.

Jarðvegsprófanir hafa verið framkvæmdar við Steinavötn. Prófanirnar áttu sér stað um miðbik októbermánaðar árið 2017 af Vegagerðinni en heildarborun og borroborun voru framkvæmdar (Sjá viðauka B og C). Lýsingar á aðferðum má sjá í verkefni Guðmundar Bergssonar (2014) en ekki verður fjallað um þær hér, einungis niðurstöður þeirra. Niðurstöður borroborunar gefa til kynna að mótstaða vaxi línulega en þó með augljósum frávikum af og til. Heildarborun gefur til kynna að ekki hafi náðst niður á fast berg eða klöpp en yfirleitt var borað niður á tæplega 20 m dýpi. Einnig gefur hún til kynna að þarna séu til staðar mismunandi þétt malarlög.

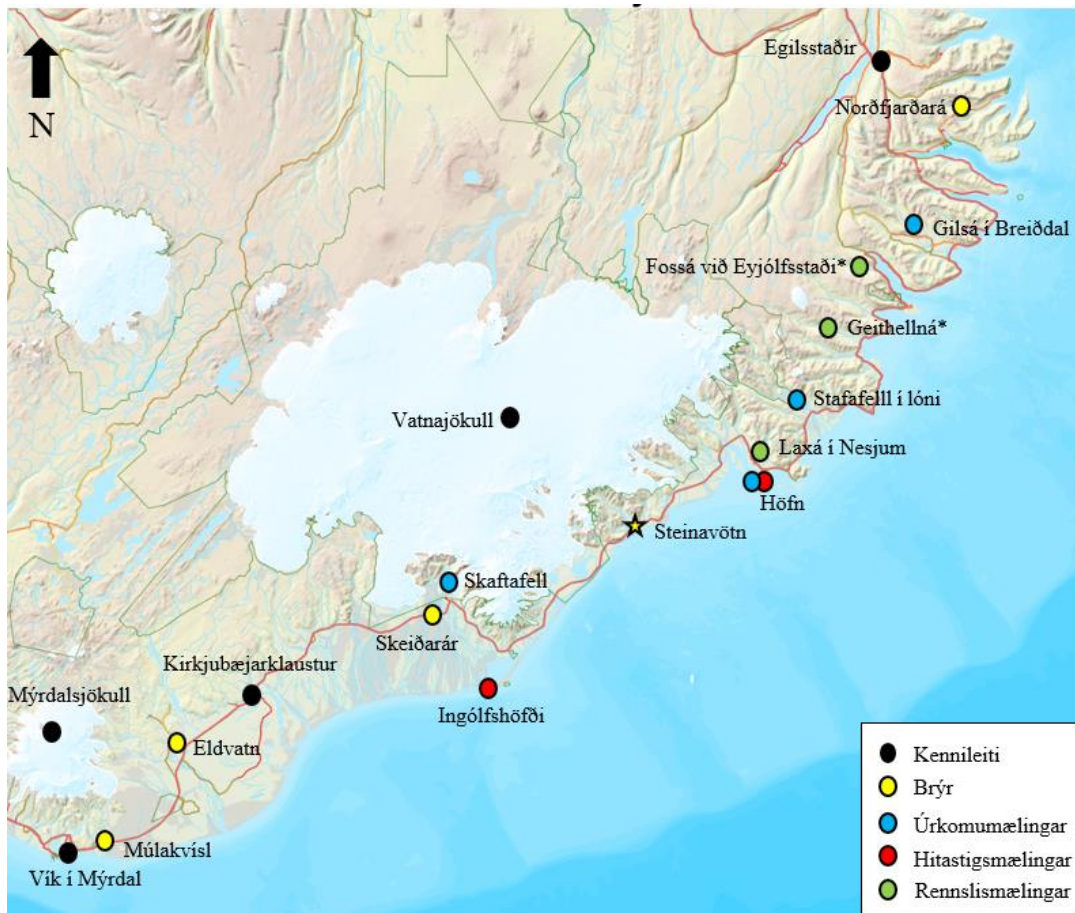
Á síðustu tæplega tuttugu árum hafa þó nokkrar brýr skemmd vegna úrkomu, leysinga, jökulhlaupa eða vegna þess að ár breyta farvegi sínum. Til dæmis má nefna Norðfjarðará, Múlakvísl, Eldvatn, Skeiðará og Steinavötn (sjá mynd 4-2). Hér verður gerð stuttlega grein fyrir atburðunum sem skemmdu þessar brýr eða gerði þær ónothæfar. Í framhaldinu verður kastljósinu beint að brúnni yfir Steinavötn og reynt að varpa ljósi á hvað varð þess valdandi að hún skemmdist.

Brúin yfir Norðfjarðará, á þjóðvegi 92 á milli Reyðarfjarðar og Neskaupsstaða, eyðilagðist í ágústmánuði árið 2001 þegar það skolaði undan brúarstöpli hennar vegna mikilla vatnavaxta í ánni. Einn millistöpull seig um 80 cm og annar aðeins minna. Meiri úrkoma hafði ekki mælst í þrjú ár. Léttri umferð var hleypt yfir hana til að byrja með en því var svo snögglega hætt og hún metin sem ónýt. Brúin var endurbyggð í kjölfarið á nýjum stað.

Brúin yfir Múlakvísl eyðilagðist í hlaupi í júlímánuði árið 2011 og er deilt um hvort flóðið hafi verið vegna hlaups í jarðhitakötluum í Kötlu eða hvort lítið eldgos hafi valdið því. Vatnssýni voru tekin á staðnum en þau bentu fremur til að hlaup í Kötlu hefði verið að verki. Veðurstofa Íslands greindi frá því að hlaupið hefði verið ógnvænlega stórt og að vatnsyfirborðið hefði mælst hækka um fimm metra á nokkrum mínútum (Veðurstofa Íslands, 2011). Flóðið reif með sér brúna og einnig hluta af þjóðveginum. Ný brú var byggð árið 2014 og var yfirbygging hækkuð um tvo metra til þess að reyna að sporna við að slíkur atburður ætti sér stað aftur.

Brúin yfir Eldvatn skemmdist vegna rofs undir undirstöðu hennar árið 2015. Orsakavaldurinn var stærsta Skaftárhlaup frá því að mælingar hófust. Brúin var þó uppistandandi eftir hlaupið og léttri umferð hleypt yfir á daginn en nauðsynlegt þykir að vakta austari bakka árinna þar sem að endastöpull hangir enn í tiltölulega lausu lofti. Talið er að áframhaldandi rof muni skaða brúnna enn frekar. Leyfilegur heildarþungi farartækis eru fimm tonn en einungis ein bifreið er leyfð í einu (Vegagerðin, 2015).

Brúin yfir Skeiðará stendur á þurru eftir að áin skipti um farveg og fór yfir í Gígjukvísl vegna breytinga á Skeiðarárjökli. Þetta þýðir að lengsta brú landsins til margra ára var tekin úr notkun árið 2017. Þess í stað var byggð ný tvíbreið brú yfir Morsá sem leysti af gömlu Skeiðarárbrúnna.



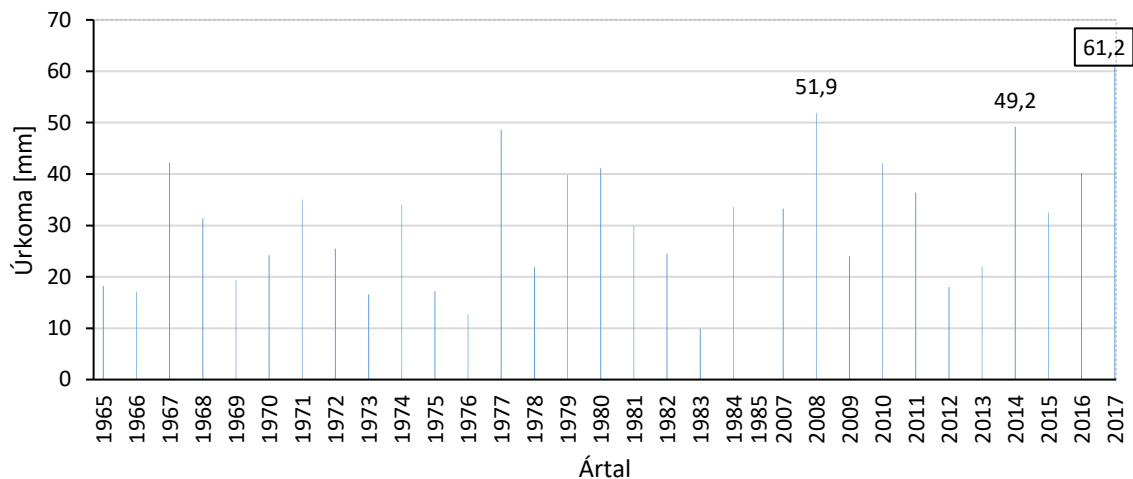
Mynd 4-2: Helstu kennileiti og mælistöðvar sem fram koma í þessari ritgerð. Reiknað rennsli er tilgreint með \* fyrir aftan mælistað. Grunnkort fengið af lmi.is.

#### 4.1.1 Veðurfar

Gagnlegt er að rýna í veðurgögn og aðgengilegar rennslismælingar til að átta sig á hversu afbrigðilegt rennslið var í Steinavötnum, í lok september 2017 þegar brúin yfir ána skemmdist. Eins og áður kom fram ræður stjórna jökulbráð og úrkoma mestu um vatnsmagn Steinavatna og því er gagnlegt að skoða úrkomu, hita og rennslismælingar frá svæðinu. Enginn rennslis- eða úrkomumælir er til við Steinavötn en næsti rennslismælir er við Kolgrímu en hann hefur ekki verið virkur síðan haustið 2009 vegna fjárskorts (Veðurstofa Íslands, 2017c). Vegna þessa verða skoðuð gögn frá nærliggjandi mælistöðvum.

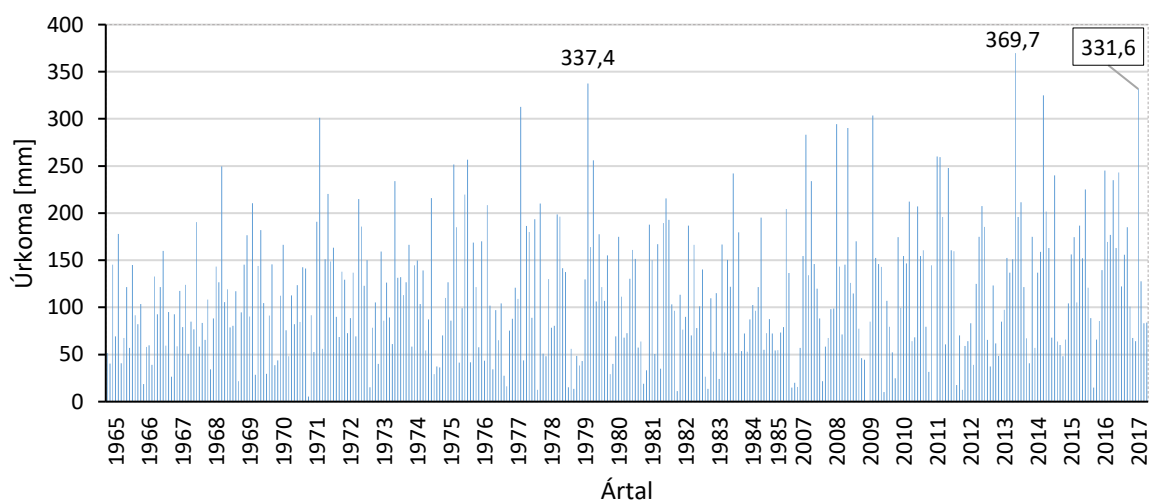
Tilkynnt var að kvöldi til þann 27. september um að vatnspollar hefðu myndast á yfirbyggingu brúarinnar yfir Steinavötn (Vegagerðin, 2017a). Miklir vatnavextir voru á Suð- og Austurlandi m.a. í Álftafirði, Hamarsdal, Berufirði og í Fljótsdal. Þjóðvegur 1 fór, um þetta leyti, í sundur við Hólmsá á Mýrum og á nokkrum stöðum var vegur grafinn í sundur til þess að hleypa vatni í gegn. Vatn náði m.a. að brúargólfi brúarinnar yfir Hamarsá í Hamarsdal (Halldór Björnsson o.fl., 2018). Gögn í þessum kafla voru fengin frá Veðurstofu Íslands og innihalda skráðar úrkomumælingar frá Höfn, Skaftafelli, Stafafelli í Lóni og Gilsá í Breiðdal. Enn fremur skráðar hitastigsmælingar frá Höfn og Ingólfshöfða. Einnig fékkst aðgangur að rennslismælingum frá Laxá í Nesjum (óyfirfarin), Geithellná og Fossá við Eyjólfstaði. Staðsetningu mælistaða má sjá á mynd 4-2.

Úrkoma mældist yfir meðallagi á flestum stöðvum landsins í september 2017 (Veðurstofa Íslands, 2017a). Nokkur septemberúrkomumet voru slegin. Hér má nefna á Höfn í Hornafirði (332 mm), Gilsá í Breiðdal (492 mm), Stafafelli í Lóni (383 mm) og Skaftafelli (384 mm). Á Höfn var tvisvar sinnum mæld hæsta sólarhringsúrkoma fyrir september frá því að mælingar hófust. Fyrst 59,1 mm þann 24. september og svo mældist hún 61,2 mm þann 28. september (sjá mynd 4-3). Mælt hefur verið á Höfn frá júní 1965 til júní 1985 en svo voru mælingar færðar í Hjarðarnes og Akurnes áður en þær færðust aftur á Höfn árið 2007. Mynd 4-3 sýnir mestu sólarhringsúrkomu í september frá upphafi mælinga á Höfn.



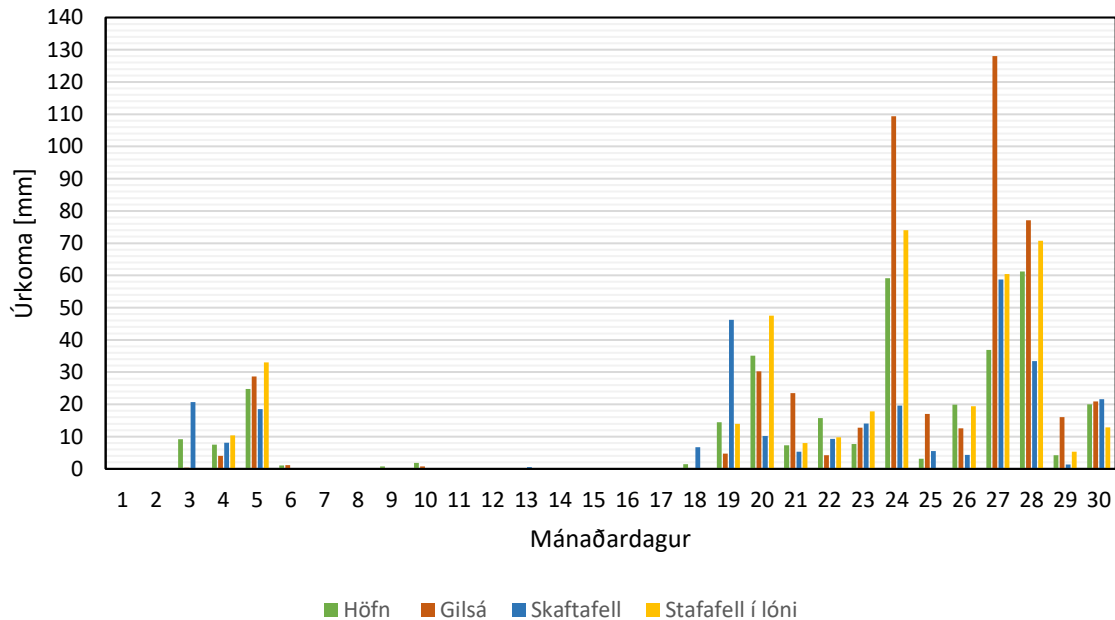
Mynd 4-3: Mesta sólarhringsúrkoma fyrir september á Höfn í Hornafirði frá upphafi mælinga. Mælingum var hætt fyrir septembermánuð 1985 til 2006. Gögn fengin frá Veðurstofu Íslands (2018).

Mesta sólarhringsúrkoma (bæði 24. og 28. september) í september árið 2017 var talsvert hærri en næst hæstu sólarhringsgildi í september árin 2008 og 2014 eða um tæplega 20%. Á mynd 4-4 má sjá heildarúrkomu mánaða frá upphafi mælinga. Alls eru tólf gildi fyrir hvert ár fyrir utan árin 1965 og 1985. Engar mælingar eru svo til milli 1985 og 2006 frá Höfn.



Mynd 4-4: Heildarúrkoma mánaða frá upphafi mælinga á Höfn í Hornafirði. Alls eru 12 gildi fyrir hvert ár fyrir utan árin 1965 og 1985. Hlé var á mælingum 1985 til 2007. Gögn fengin frá Veðurstofu Íslands (2018).

Mælingin fyrir septembermánuð árið 2017 sýndi þriðja hæsta mánaðargildi frá upphafi mælinga á Höfn en hæsta mánaðargildi fékkst í janúar 2014 sem var 369,7 mm og næst hæsta gildi var 337,4 mm í október 1979. Samanburður á mældri sólarhringsúrkomu frá Höfn, Gilsá, Skaftafelli og Stafafelli í lóni fyrir septembermánuð 2017 má svo sjá á mynd 4-5.



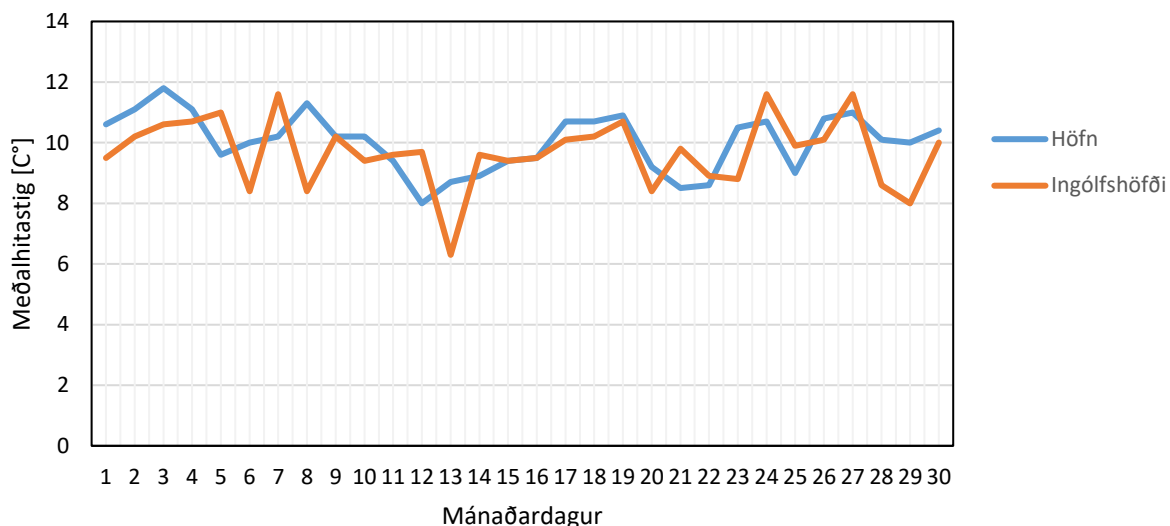
Mynd 4-5: Skráð sólarhringsúrcoma dag frá degi í september 2017 á völdum mælistöðvum á Suðausturlandi Gögn fengin frá Veðurstofu Íslands (2018).

Stærstu sólarhringsúrkomutopparnir eru 24., 27. og 28. september. Úrkoma mælist mest við Gilsá en hæsta gildið mælist 128 mm þann 27. september og er það rúmlega tvöfalt herra en hæsta sólarhringsúrcoma við Höfn. Inn á heimasíðu Veðurstofu Íslands má finna eftirfarandi tilkynningu:

„Að öllum líkindum hefur einnig mikið ringt til fjalla á Suðaustur- og Austurlandi í lok mánaðar sem kemur ekki nægilega vel fram í mælingum þar sem fáar úrkomustöðvar eru á því svæði.“ (Veðurstofa Íslands, 2017a).

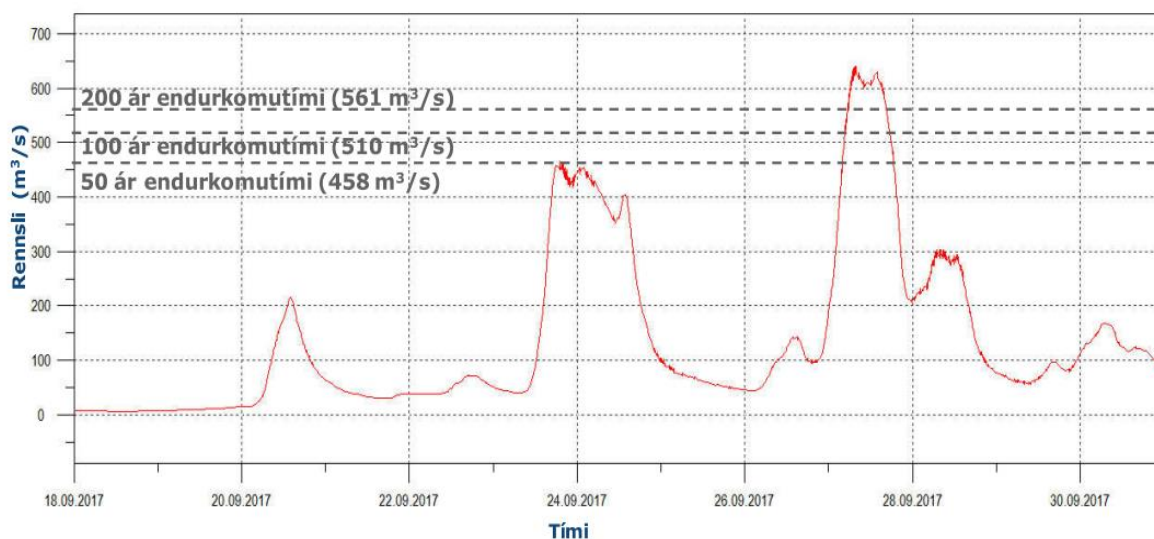
Meðalhitastig frá Höfn og Ingólfshöfða fyrir septembermánuð má sjá á mynd 4-6 en eins og greint var frá áður þá er hitastig oft ráðandi varðandi bráðnun á jökli. Meðalhitastig á báðum stöðvum var í kringum 10°C og því má áætla að september hafi verið nokkuð hlýr með tilheyrandi jökulbráðnun.





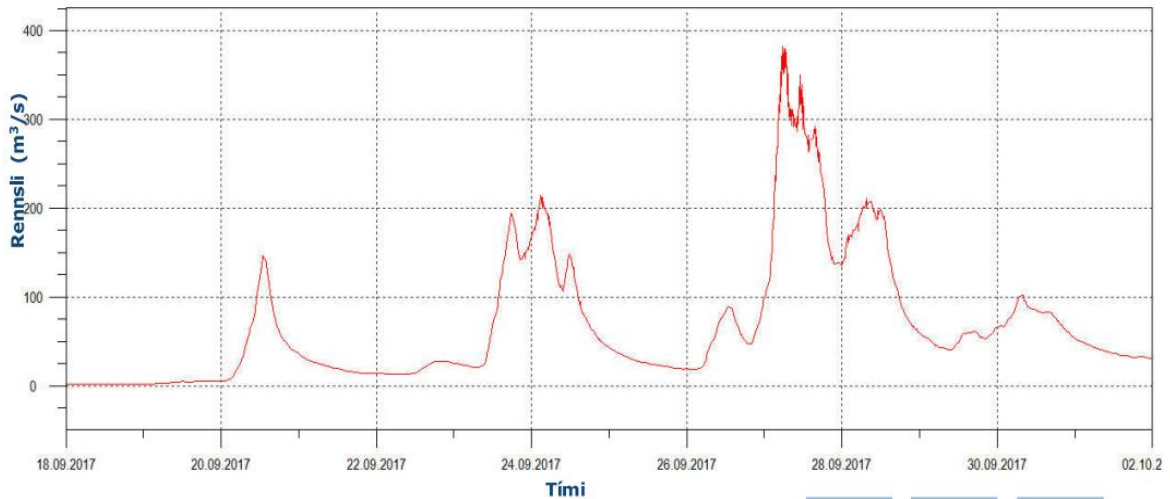
Mynd 4-6: Meðalhitastig daga í september árið 2017 við Ingólfshöfða og Höfn á Hornafirði. Gögn fengin frá Veðurstofu Íslands (2018)

Vatnshæðamælir er staðsettur í Geithellná og í lok september voru reiknaðir háir rennslistoppar sem sýndir eru á mynd 4-7. Þar sést að rennslið þann 24. september nær gildi sem hefur 100 ára meðalendurkomutíma og 27. september fer rennslið yfir 200 ára meðalendurkomutímagildið. Hæst reiknaða rennsli fram að september 2017 var frá árinu 1980 en það var reiknað  $454 \text{ m}^3/\text{s}$ .



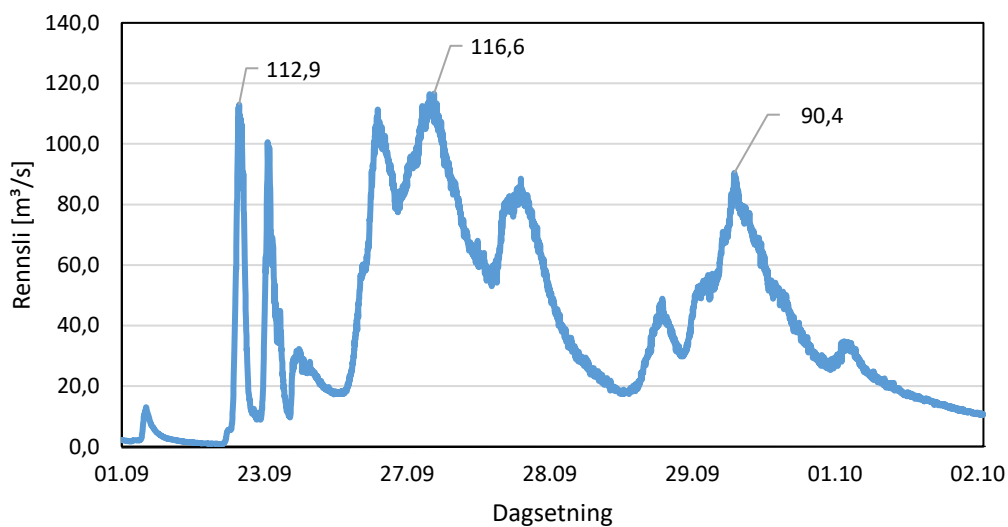
Mynd 4-7: Reiknað rennsli út frá vatnshæðarmæli í Geithellná í lok september 2017 (Veðurstofa Íslands, 2017c).

Mælingar og gögn úr Geithellná eru götótt og því er ekki hægt að fullyrða hvort þetta sé hæsta rennsli sem hefur verið í ánni frá upphafi mælinga sem hófust árið 1970. Það er einnig til gögn um reiknað rennsli út frá vatnshæðarmæli í Fossá við Eyjófsstaði en niðurstöður fyrir lok septembermánaðar má sjá á mynd 4-8. Eins og sést eru toppar 24. og 27. september.



Mynd 4-8: Reiknað rennsli út frá vatnshæðarmæli í Fossá við Eyjólfsstaði í lok september 2017 (Veðurstofa Íslands, 2017c).

Að lokum voru skoðaðar rennismælingar úr Laxá í Nesjum sem er staðsett rétt vestan við Höfn. Niðurstaða mælinganna má sjá á mynd 4-9. Mesta rennsli tímabilsins 1. september til 2. október 2017 mældist 116,6 m<sup>3</sup>/s þann 27. september en næsta hágildi var 112,9 m<sup>3</sup>/s þann 22. september.



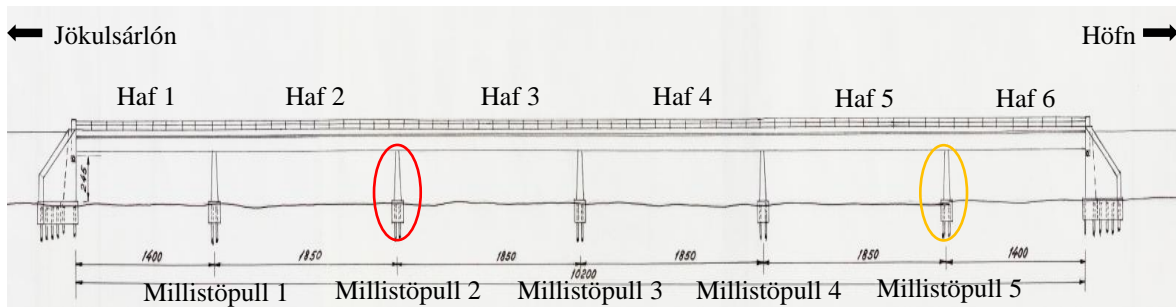
Mynd 4-9: Mælt rennsli frá Laxá í Nesjum í september 2017 (Veðurstofa Íslands, 2018).

Samkvæmt skýrslu Veðurstofu Íslands þá voru þetta eingöngu rigningaflóð í Fossá og Geithellná þ.e.a.s. engin snjóbráð átti sér stað og talið er að jarðvegurinn hafi verið mettaður eftir rennlistoppa 20. og 24. September (Veðurstofa Íslands, 2017c). Rennsli í Fossá og Geithellná hefur ekki mælst hærra frá upphafi og einnig í Fellsá í Fljótssdal (Veðurstofa Íslands, 2017b). Stærsti flóðtoppurinn í Fossá þann 27. september er sá hæsti frá upphafi mælinga. Líklegt þykir að í t.d. Kolgrímu, Hólmsá og Jökulsá í Lóni hafi verið hlutfallslega hærra rennsli þar sem jökulbráðnun hafði átt sér stað (Veðurstofa Íslands, 2017c).

Ljóst er að öll veðurgögn, úrkoma, hitastig og rennsli frá nærliggjandi veðurstöðvum benda til að aftakaflóð hafi orðið í Steinavötnum í kringum 27. september þegar tilkynnt var um tjón á brúnni.

## 4.2 Lýsing á brú

Brúin yfir Steinavötn í Suðursveit er steipt bitabré sem var byggð árið 1964 af Vegagerðinni. Yfirbygging brúar hvílir á fimm millistöplum og tveimur endastöplum. Haf lengdir eru 14 m + 4 x 18,5 m + 14 m sem gerir hana 102 metra langa. Bæði endastöplar og millistöplar eru grundaðir á timburstaura en þeim verður lýst nánar í kafla 4.4 eða Burðarþolsgreining staura. Á mynd 4-10 má sjá teikningu af brúnni. Nefna má að einn brúarstöpull skekkist í flóðum 1966 og í framhaldinu var sett gúmmílega milli yfirbyggingar og stöpsulsins til þess að rétta hann af (Minnisbréf Árni Pálsson, 1966). Millistöpull sem seig í lok september 2017 er merktur með rauðum hring og sá sem að skekkist árið 1966 merktur með gulum hring. Teikningasett Vegagerðarinnar má svo finna í Viðauka A.



Mynd 4-10: Teikning af brúnni úr teikningasetti Vegagerðarinnar. Sigstöpull er merktur með rauðum hring og millistöpull sem skekkist árið 1966 er merktur með gulum hring.

Fjögur mismunandi brúarþversnið voru notuð fyrir yfirbyggingu brúarinnar en grunnþversnið hennar er svokallað tvöfalt T-þversnið. Yfirbygging er tengd við millistöpla með útfærslu sem minnir á tvær járnbentar súlur (lýst seinna) en ekki eru notaðar gúmmílegur eins og oftast eru notaðar fyrir stærri brýr sem byggðar eru í dag. Brúna má sjá á mynd 4-11 sem tekin var eftir að hún skemmdist.



Mynd 4-11: Brúin yfir Steinavötn. Mynd tekin eftir atburð. Sigstöpull er merktur með rauðum hring og millistöpull sem skekkist árið 1966 er merktur með gulum hring (Vegagerðin, 2018).



## 4.3 Vettvangsferð og álagspróf

Í kjölfar flóðanna og skemmdana á brúni í lok september 2017 fóru starfsmenn Vegagerðarinnar í vettvangsferð 2. október 2017 til að meta ástand hennar. Skoða átti hvort óhætt væri að hleypa léttri umferð yfir brúna á meðan smíði bráðabirgðabráar stæði yfir. Áður hafði verið ákveðið að gangandi umferð yrði leyfð í fylgd lögreglu en á þeim tímapunkti hafði millistöpull 2, sem að grófst undan, verið festur.

Úttektin sýndi að skolað hafði undan millistöpli 2. Mældist sig stöpulins um 200 mm. Stöpulinn skekkist einnig en hann hallaði því sem nemur 70 mm/1000 mm eða 7% frá lóðréttu. Á yfirbyggingu brúarinnar mátti sjá sprungur yfir ásetum millistöpla 1 og 3 (sjá mynd 4-12) sem gengu 5 m út á höfnin. Sprungumyndanir yfir millistöplunum bentu eindregið til að flotliðir hefðu myndast á þessum stöðum.



Mynd 4-12: Sprungur gengu 5 metra sitthvoru megin við ásetu á millistöpli 1 og 3.

Álagspróf voru gerð í kjölfarið sem fóru þannig fram að á Höfn í Hornafirði voru fjögur fiskiker fyllt með mól og komið á staðinn. Eitt karið var vigtað og þyngd þess var um 1120 kg. Heildarþungi karanna var því áætlaður sem 4500 kg eða 4,5 tonn. Fyrst var körunum komið fyrir á mitt haf milli millistöpla 1 og 2 og látið vera í 15 mínútur. Sig hafsins var svo mælt og reyndist það vera 2 mm við þetta álag. Þegar álaginu var létt af og aftur mælt lyftist yfirbygging til baka um 2 mm.

Næst var körunum komið fyrir á mitt haf milli millistöps 2 og 3 og látin vera í 40 mínútur. Sig mældist 3 mm á hafi við þetta álag sem skilaði sér ekki til baka þegar að körin voru tekin í burtu eins og gerðist á hafi milli millistöpla 1 og 2. Ákveðið var að gera aftur sömu tilraun en láta körin standa í lengri tíma, nánar tiltekið í 90 mínútur. Aftur var mælt en ekki hafði sigið lengra en áður nefndir 3 mm. Körin voru svo tekin af en engin hreyfing mældist. Því næst var körunum komið fyrir aftur á milli millistöpla 1 og 2 og látin vera í 90 mínútur. Mældist sig upp á 7 mm í þetta skiptið sem kom svo ekki til baka þegar álaginu var létt af.

Fylgst var með sprunguvíddum við ásetu sigstöps allan tímann sem og millistöpla 1 og 3. Sprungunet brúarinnar var kortlagt þar sem fjarlægðir og sprunguvíddir allra greinilegra þversprungna voru mældar. Við álag víkkuðu þversprungur í brúargólfi og við ásetur var útvíkkunin um allt að 0,2 mm. Stundum gekk ferlið til baka en þó ekki alltaf.

Ályktun starfsmanns Vegagerðarinnar var að ekki væri öruggt að keyra yfir brúna þar sem brúin seig varanlega við endurtekið álag og erfitt væri að tryggja öryggi vegfarenda. Einnig var ljóst að flotliður hafði myndast í yfirbyggingu brúar yfir millistöplum 1 og 3 og náði hann 5 metra inn á hafið sitthvoru megin við stöplanna.

## 4.4 Burðarþolsgreining staura

### 4.4.1 Samanburður við prófanir á Íslandi

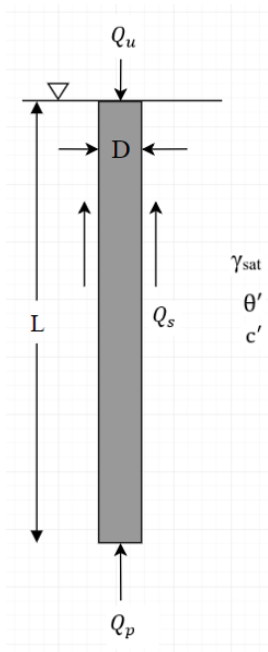
Til þess að ná sem áreiðanlegustu reikningum fyrir burðarþol staura í millistöpla brúarinnar var ákveðið að reikna burðarþol timburstaura við Sandgígjukvísl, Skeiðará, Núpsvötn og Súlu út frá mismunandi viðnámshornum og bera saman við brotálag frá prófunum (Jón Skúlasonar, 1993). Staðsetning þeirra allra er á Suðurlandi við rætur Vatnajökuls og því gætu efniseiginleikar jarðvegs verið svipaðir og við Steinavötn. Við Sandgígjukvísl er meira og minna grófur sandur en við Skeiðará, Núpsvötn og Súlu er bæði sandur og mól. Jarðefnið getur verið mismunandi pakkað á stöðunum og þess vegna gæti viðnámshorn verið breytilegt milli staða. Eins og áður var minnst á hafa verið gerðar prófanir á jarðvegi sem sýndu að jarðvegurinn við Steinavötn er af svipaðri gerð og við Skeiðará, Núpsvötn og Súlu. Forsenda fyrir reikninga er að jarðvegurinn sé einsleitt efni og mótstaða hans vaxi línulega með dýpi eins og jarðvegsprófanir Vegagerðarinnar gáfu til kynna. Þvermál, þversniðsflatarmál og rekdýpt fyrir timburstaura staðanna má finna í töflu 4-1. Allir staurarnir eru hringlaga.

Tafla 4-1: Helstu stærðir og lengdir staurana við prófstaðina þrjá (Jón Skúlason, 1993).

Staðsetning, Heiti	Þvermál [m]	Þversniðsflatarmál [m <sup>2</sup> ]	Rekdýpt [m]	Jarðvegur [-]
Skeiðará, 1-2T	0.28	0.06	10.2	S&M
Skeiðará, 2-2T	0.25	0.05	9.82	S&M
Skeiðará, 3-1T	0.16	0.02	9.85	S&M
Núpsvötn og Súla, T	0.32	0.08	9.70	S&M
Sandgígjukvísl, 1-1T	0.24	0.04	9.78	Gs
Sandgígjukvísl, 2-1T	0.24	0.04	9.85	Gs
Sandgígjukvísl, 3-1T	0.26	0.05	9.75	Gs

\*Gs = Grófur sandur, S&M = Sandur og mól.

Útreikningar á burðarþoli timburstauranna miðast við rekdýpt en ekki heildarlengd þeirra þar sem þeir ganga uppúr jarðveginum. Nánari upplýsingar varðandi forsendur staurareikninga við prófstaðina þrjá má sjá á mynd 4-13. Viðnámshorn er svo valið út frá samanburði við mæld gildi til þess að styðjast við þegar ákvarða skal burð timburstaurana við Steinavötn. Ekki er tekið tillit til þess hvar staurinn er staðsettur í undirstöðu.



Mynd 4-13: Kraftyfirfærsla frá mannvirki yfir í jarðveg í gegnum staur.

Samloðun,  $c'$ , er engin fyrir sand eða mól og gera má ráð fyrir að, viðnámshornið,  $\theta'$ , sé á bilinu  $32^\circ - 42^\circ$ , Hvílustuðull,  $K$ , er reiknaður fyrir staur sem er rekinn niður með hárrí færslu. Viðnámshorn á milli jarðvegs og staura,  $\delta'$ , er gjarnan á bilinu  $0,5\theta'$  til  $0,8\theta'$  en valið var að nota  $0,8\theta'$ . Frekari forsendur reikninga má sjá í töflu 4-2. Flatarmál og lengd eða rekdýpt staurana má sjá í töflu 4-1.

Tafla 4-2: Forsendur reikninga fyrir Skeiðará, Sandgígjukvísl, Núpsvötn og Súlu. Burðarþolsstuðul,  $N_q^*$ , má finna á mynd 3-3 fyrir mismunandi viðnámshorn.

Stuðull	Gildi	Eining
$\theta'$	32-42	°
$K$	$1,4(1-\sin\theta')$	-
$\tan \delta'$	$\tan(0,8*\theta')$	-
$\gamma_{sat}$	21	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{vatn}$	9.81	kN/m <sup>3</sup>
$p_a$	100	kPa
$N_q^*$	Mynd 3-3	-
$c'$	0	kPa

Brotálag mældist minna við Sandgígjukvísl heldur en við hina staðina og er það líklega vegna þess að jarðvegurinn samanstendur mestmegnis af grófum sandi en ekki sandi og mól. Samanburður á reiknuðum gildum vegna mismunandi viðnámshorna jarðvegs við brotálag

timburstauranna,  $Q_{90}$ , má sjá í töflu 4-3. Sleppt var að birta reiknuð gildi fyrir viðnámshorn á bilinu  $32^\circ$  til  $37^\circ$  þar sem þau þóttu ekki sambæránleg við mæld gildi.

Tafla 4-3: Samanburður við mæld gildi frá Jóni Skúlasyni (1993). Sleppt var að birta reiknuð gildi fyrir viðnámshorn á bilinu  $32^\circ$  til  $37^\circ$  þar sem þau þóttu langt frá mældum gildum.

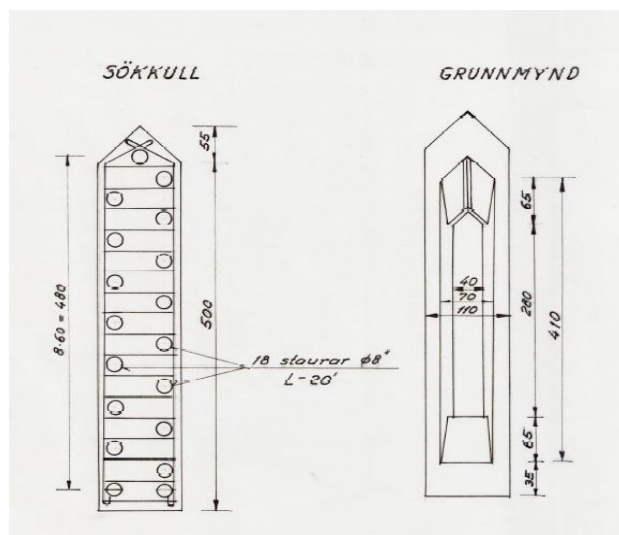
	$\theta' = 38^\circ$	$\theta' = 40^\circ$	$\theta' = 42^\circ$	Mæld gildi
Staur	$Q_u$ [t/m <sup>2</sup> ]	$Q_u$ [t/m <sup>2</sup> ]	$Q_u$ [t/m <sup>2</sup> ]	$Q_{90} / A$ [t/m <sup>2</sup> ]
Skeiðará, 1-2T	7.3	11.0	17.1	10.8
Skeiðará, 2-2T	6.6	10.0	15.7	12.5
Skeiðará, 3-1T	4.4	6.6	10.2	18.5
Núpsvötn og Súla, T	8.6	13.1	20.6	11.1
Sandgígjukvísl, 1-1T	6.4	9.7	15.1	11.8
Sandgígjukvísl, 2-1T	6.5	9.8	15.3	7.0
Sandgígjukvísl, 3-1T	7.1	10.7	16.8	8.7

Staur 3-1T við Skeiðará er með minnsta þvermálið af öllum timburstaurunum og gefur því fræðilega minnsta burðarþol stauris en Núpsvötn og Súla gefa hæsta gildið. Almennit miðast við að viðnámshorn grófs og malarkennds sands sé á bilinu  $32^\circ$  til  $45^\circ$  og samanburður reikninga og prófana Jóns Skúlasonar gefa til kynna að viðnámshorn  $\theta' = 39^\circ$  til  $42^\circ$  gefi ágætis nálgun á burði stauris í sandi og möl og viðnámshorn  $\theta' = 38^\circ$  til  $40^\circ$  gefi ágætis nálgun á burðarþoli stauris í grófum sandi. Viðnámshorn jarðvegs gæti hinsvegar verið á breiðara bili. Ákveðið er því að reikna burð timburstaura við Steinavötn með fjórum viðnámshornum á bilinu  $32^\circ$  til  $42^\circ$  þar sem jarðvegurinn við Steinavötn samanstendur af mismunandi þéttum malarlögum.

#### 4.4.2 Timburstaurar við Steinavötn

Allar undirstöður brúarinnar við Steinavötn þ.e. endastöplar og millistöplar eru grundaðir á timburstaura. Alls hvíla endastöplar brúarinnar á 22 staurum en 18 talsins eru undir millistöplum, samtals eru þeir því 134 talsins. Staurarnir í millistöplum brúarinnar eru allir lóðréttir nema tveir sem halla frá lóðréttu. Hallandi staurar eru í fjarbrún stöplulsins, það er, fjær streymi Steinavatna. Ekki er vitað hversu mikið þeir halla í raun en áætlaður halli er í kringum  $15^\circ$  út frá lóðréttu plani. Það þýðir að lóðréttur burður þeirra er 96,6% af lóðréttum staur miðað við einfalda hornafallareikninga.

Fótur stöplulsins er snýr upp í rennslisátt árinna er oddalaga en breidd, lengd og hæð hans er 1,1 m, 5,55 m og 1,2 m. Timburstaurarnir eru tæplega 6,1 m langir og þvermálið 0,2 m. Grunnmynd af sökkli millistöpluls brúarinnar má svo sjá á mynd 4-14. Timburstaurarnir ganga rúmlega 1 metra inn í sökkul millistöplulsins og miðast burður staurana því við 5 metra.



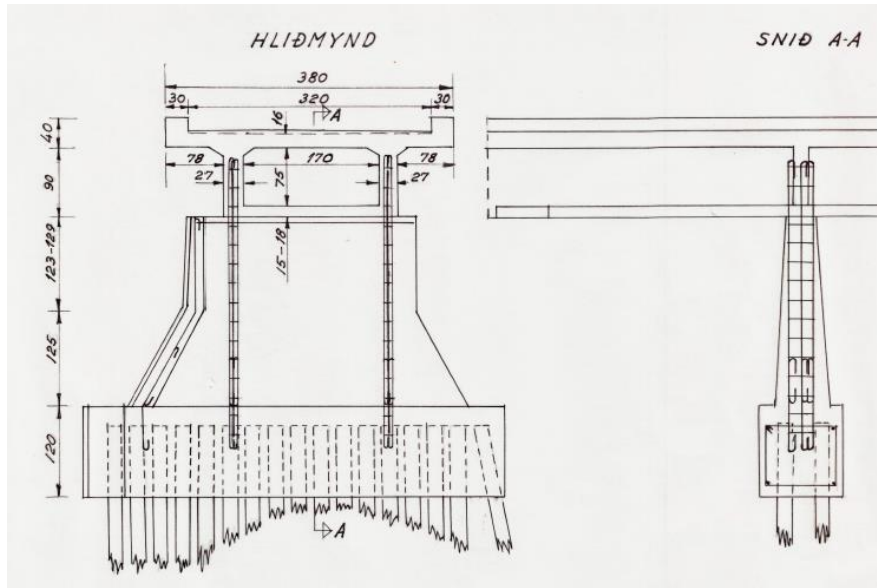
Mynd 4-14: Sökkull eða fótur millistöplu hefur 18 staura og þar af eru 2 hallandi. Mynd tekin úr teikningasetti Vegagerðarinnar. Ómerktar málsetningar eru í cm.

Vegna þess að lóðréttur burður er nálægt fullum styrk er ákveðið að reikna með 18 staurum undir millistöplum brúarinnar. Helstu eiginleikar timburstaurana má sjá í töflu 4-4 og sniðmynd má sjá á mynd 4-15.

Tafla 4-4: Helstu eiginleikar timburstaurana.

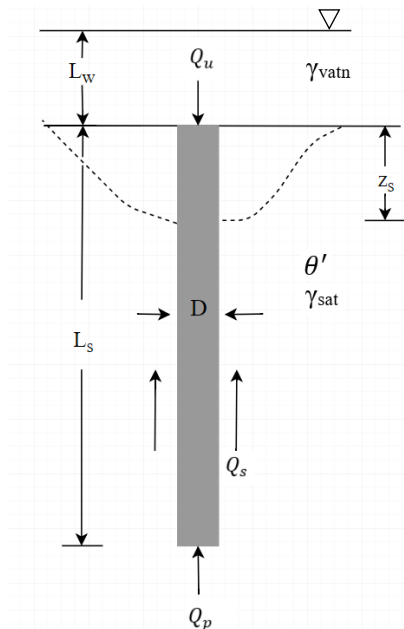
Gerð staura	Rekdýpt [m]	Þvermál [m]	Fjöldi [stk]	Bil á milli staura í langstefnu [m]
Tré	5	0,2	18	0,6

Sjá má á mynd 4-15 útfærslu tengingar staura við sökkul. Sniðmyndin sýnir einnig tengingu millistöpla við yfirbyggingu brúarinnar en það er gert með útfærslu sem minnir á járnþenta súlu. Járnþenta súlan inniheldur sex tengijárn með 25 mm þvermál sem eru látin ganga úr millistöpli í yfirbyggingu. Lykkja með 10 mm þvermál heldur svo utan um tengijárn. Einnig má sjá ísvarnarjárn sem eru lögð í brún millistöpla sem er nær Steinavötnum. Ísvarnarjárnin eru með 25 mm þvermál.



Mynd 4-15: Sniðmynd af millistöpla brúarinnar. Járnbentu „súlurnar“ má sjá á myndinni og hvernig þær ná úr sökkli og upp í yfirbyggingu. Tekin úr teikningasetti Vegagerðarinnar. Málsetningar eru í cm.

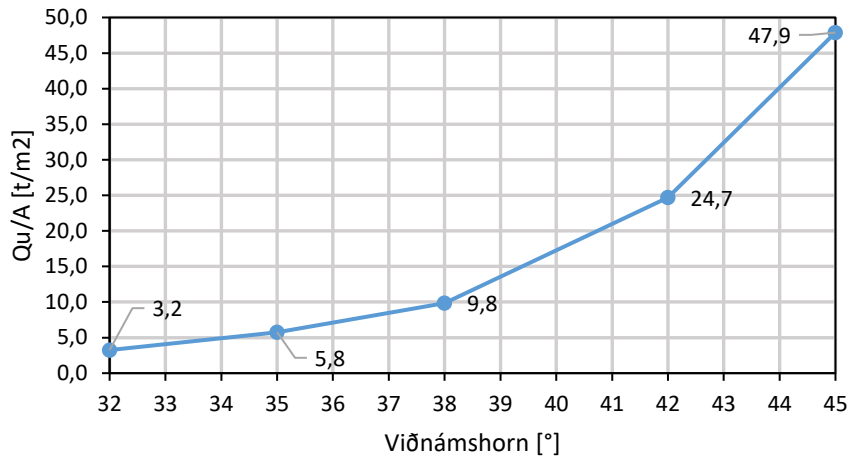
Trúlega er steypan í mannvirkinu af gerð S250 en hún er sambærileg við það sem kallast C25 í dag. Eiginþyngd brúarinnar er reiknuð miðað við 18,5 metra lengd yfirbyggingar að viðbættum millistöplinum sjálfum. Reiknað er með rúmþyngd járnbenstrar steypu upp á 25 kN/m<sup>3</sup>. Þversnið brúarinnar eru fjögur talsins og er tekið tillit til þeirra allra. Forsendur fyrir útreikninga eru þær sömu og áður þ.e. í töflu 4-2, einungis fyrir utan að reiknað er með að vatnsyfirborð er hærra en jarðvegsyfirborð. Ekki er tekið tillit til eiginþyngdar timburstaura. Mynd 4-16 sýnir uppsetningu staks timburstaura við Steinavötn.



Mynd 4-16: Fræðileg uppsetning staks staura við Steinavötn.

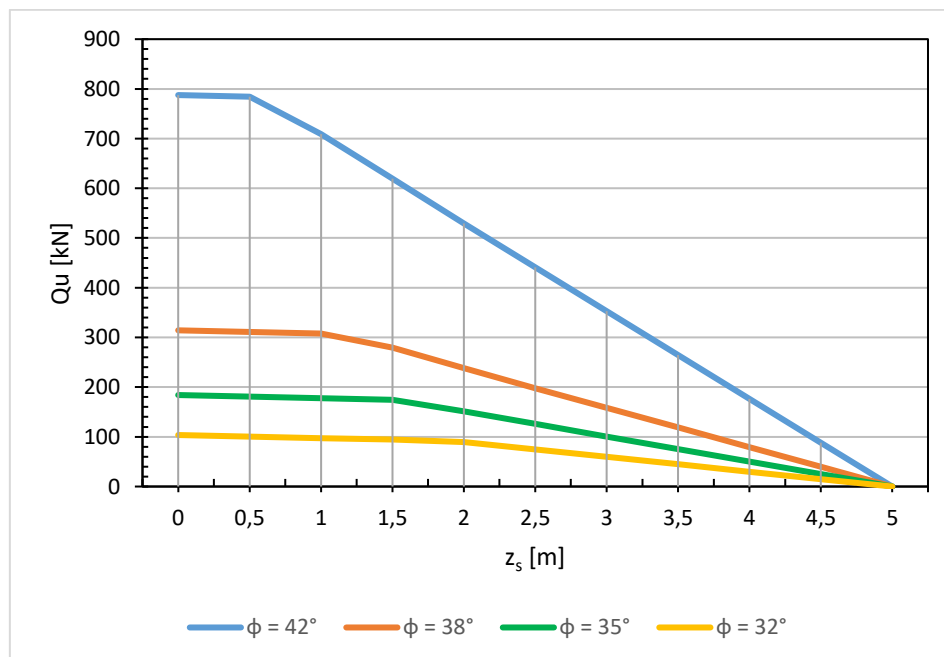
Burðarþol staks timburstaura má sjá sem fall af viðnámshorni jarðvegs á mynd 4-17. Burðarþolið er gefið í tonnum á yfirborðsflatarmál staura. Miðað er við að engin úrskolun á

sér stað og því miðað við fulla rekdýpt. Viðnámshorn voru valin frá 32° til 45° til þess að leggja áherslu á hve mikið þol staursins eykst við aukið viðnámshorn. Seinna verður miðast við 32° til 42° viðnámshorn við hermun á atburði í septemberlok. Burðarþol staurs tvöfaldað þegar að viðnámshorns jarðvegs hækkar úr 38° í 42° og sömuleiðis við 42° til 45°.



Mynd 4-17: Burðarþol staks timburstaurs sem fall af viðnámshorni.

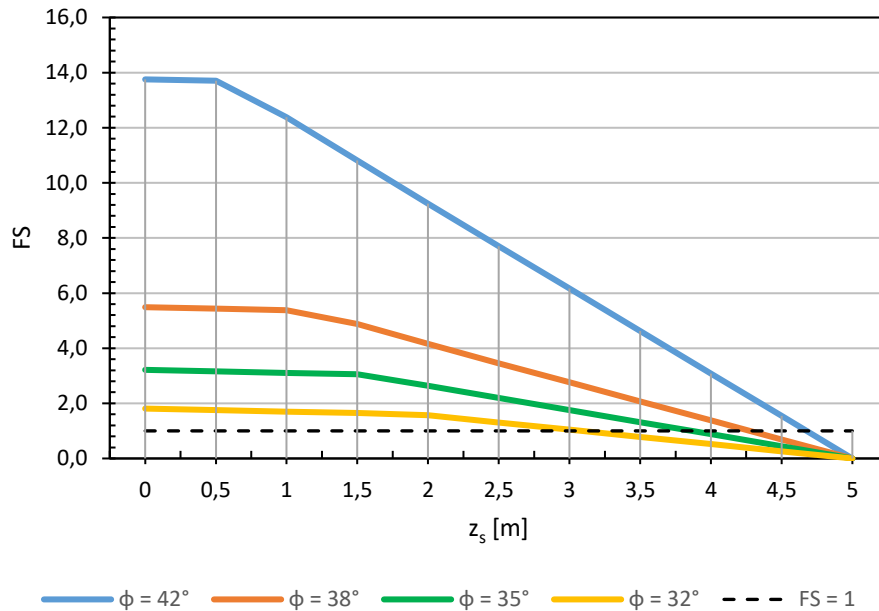
Til þess að herma eftir úrskoloninni við undirstöðu millistöpsuls 2 við Steinavötn þá var ákveðið að reikna burðarþol staurs sem fall af skolunardýpt,  $z_s$ . Þar sem að viðnámshorn malarkennds sands getur verið breytilegt og erfitt að ákvarða, var ákveðið að reikna burðarþol staurs miðað við fjögur viðnámshorn á móti skolunardýpt. Einnig var ákveðið að teikna öryggisstuðul,  $FS$ , timburstauranna gegn skolunardýpt miðað við eiginþyngd brúarinnar sem verkar á stauraþyrpinguna, sjá myndir 4-18 og 4-19.



Mynd 4-18: Burðarþol staks staurs við Steinavötn á móti skolunardýpt.



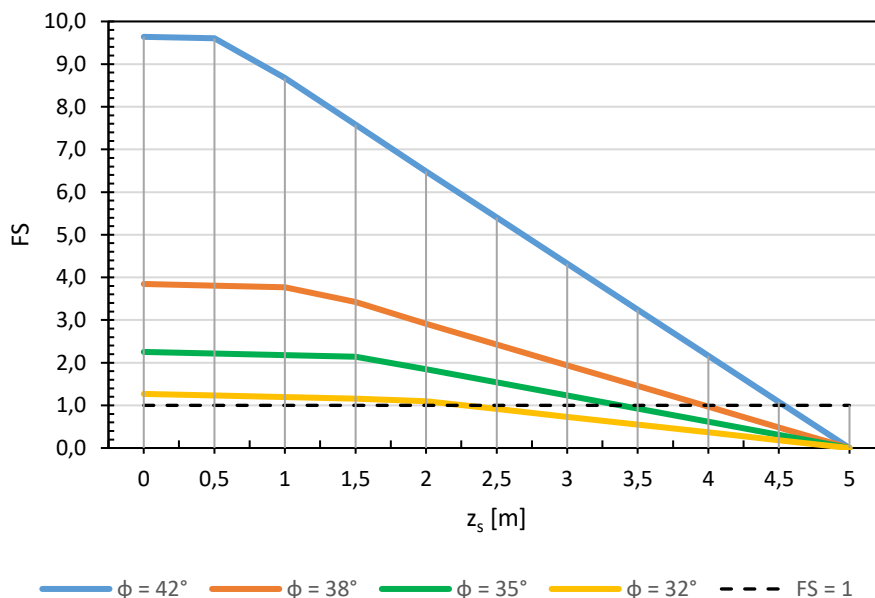
Öryggisstuðull,  $FS$ , er reiknaður sem burðarþol stauraþyrpingar deilt með eiginþyngd sem verkar á hann. Miðast er við 18,5 m lengd yfirbyggingu brúarinnar. Ekki er tekið tillit til umferðarálags. Þegar að öryggisstuðull,  $FS \leq 1$ , má búast við lóðréttu sigi millistöpsuls. Eins og sjá má á mynd 4-19 er að öryggisstuðull fyrir fulla rekdýpt er á bilinu 2 til 14 miðað við viðnámshorn 32° til 42°.



Mynd 4-19: Öryggisstuðull,  $FS$ , sem fall af skolunardýpt fyrir stauraþyrpingu við Steinavötn.

Samkvæmt reglugerð um stærð og þyngd ökutækja nr. 155/2007 þá er hámarks heildarþyngd samkvæmt Viðauka I, 44 tonn. Hægt er að biðja um undanþágu fyrir heildarþyngd upp á 49 tonn. Brúin yfir Steinavötn er flokkuð undir veg sem þolir hámarksþyngdir viðauka I. Ef gert er ráð fyrir að 44 t vagnlest (með lengd undir 18,5 m) hafi farið yfir brúna þá má sjá öryggisstuðul sem fall af skolunardýpt á mynd 4-20. Þá verður öryggisstuðull,  $FS$ , fyrir viðnámshornin 32° til 42° á bilinu 1 til 10.



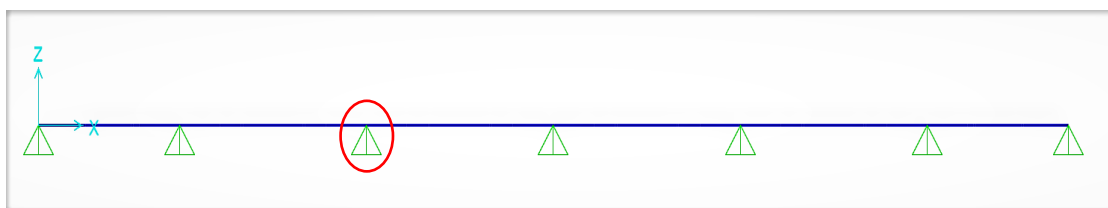


Mynd 4-20: Öryggisstuðull sem fall af skolunardýpt ef gert er ráð fyrir að 44 tonna vagnlest ( $L < 18,5$  m) sé staðsett fyrir ofan millistöplu 2.

Samkvæmt myndum 4-17 til 4-20 er hægt að álykta að burður stauris ráðist af miklu leiti af umlykjandi jarðvegi. Ef mynd 4-17 er skoðuð þá sést að burðarþol stauris í jarðvegi með viðnámshorn,  $\theta' = 45^\circ$ , er tæplega tvöfalt hærra en fyrir viðnámshorn,  $\theta' = 42^\circ$ . Burðarþol stauris sem fall af skolunardýpt (sjá mynd 4-18) hagar sér línulega þar til að hámarksgildi Meyerhof,  $Q_{p,max}$ , næst. Áætla má að jarðvegur við Steinavötn liggji á bilinu  $38^\circ$  til  $42^\circ$  samkvæmt samanburði við niðurstöður Jóns Skúlasonar (1993) en mikill munur er á burði timburstauranna við þær aðstæður. Mynd 4-19 sýnir öryggisstuðull sem fall af skolunardýpt jarðvegs en það er ekki fyrr en skolunardýpt nær 4,25 m sem að öryggisstuðull,  $FS \leq 1$ , fyrir viðnámshorn á bilinu  $38^\circ - 42^\circ$ . Þegar að vagnlest með þyngdina 44 t keyrir yfir brúna má sjá að þegar skolunardýpt er orðin 4 m þá fyrst er öryggisstuðull,  $FS \leq 1$ , fyrir viðnámshorn á bilinu  $38^\circ - 42^\circ$ . Fræðilegir útreikningar gefa því til kynna að skolast hafi undan millistöpli brúarinnar nánast að fullu, áður en hann seig vegna eiginþyngdar brúarinnar.

## 4.5 Burðarþolsgreining brúar

Til þess að ákvarða sniðkrafta í yfirbyggingu var stillt upp tölvutæku reiknilíkani af brúni með aðstoð forritsins SAP2000 sem sjá má á mynd 4-21. Undirstöður yfirbyggingar, það er endastöplar og millistöplar, voru skilgreindar sem liðtengdar undirstöður. Millistöpull sem seig í lok septembermánaðar 2017 er merktur með rauðum hring.



Mynd 4-21: Myndin sýnir líkan sem var gert í SAP2000.

Hermt var eftir atburðinum haustið 2017 með eftirfarandi forsendum:

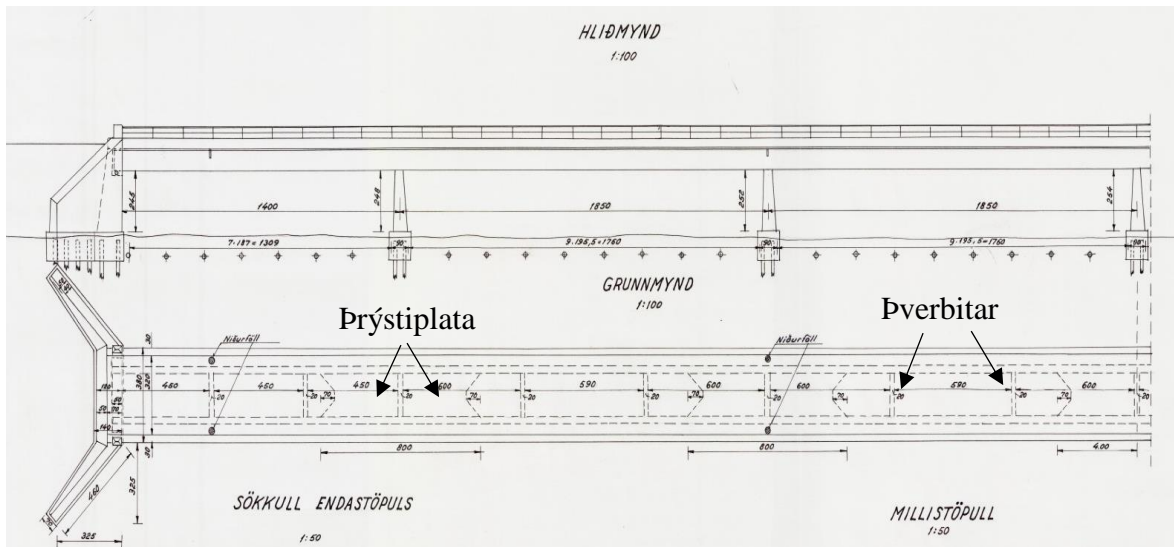
- Einungis verkar eiginþyngd á brúna fyrir sig millistöpul. Eiginþyngd mismunandi þversniða má sjá í töflu 4-5.
- Engir hlutstuðlar voru notaðir fyrir efniseiginleika þversniða og álag.
- Til einföldunar var sleppt að taka með fláa í þversniðum (sjá mynd 4-24) yfirbyggingarinnar við útreikninga á tregðuvægjum. Þeir eru hinsvegar teknir með við ákvörðun á eiginþyngd.
- Við útreikninga á sniðkröftum eftir sig á millistöpli er gert ráð fyrir að hann hangi í brúnni og virki þannig sem auka kraftur sem dregur yfirbyggingu niður.
- Notast var við steypustyrk,  $f_{ck} = 25$  MPa og stálstyrk,  $f_{yk} = 400$  MPa.



Mynd 4-22: Á myndinni má sjá millistöpul hanga í yfirbyggingu.

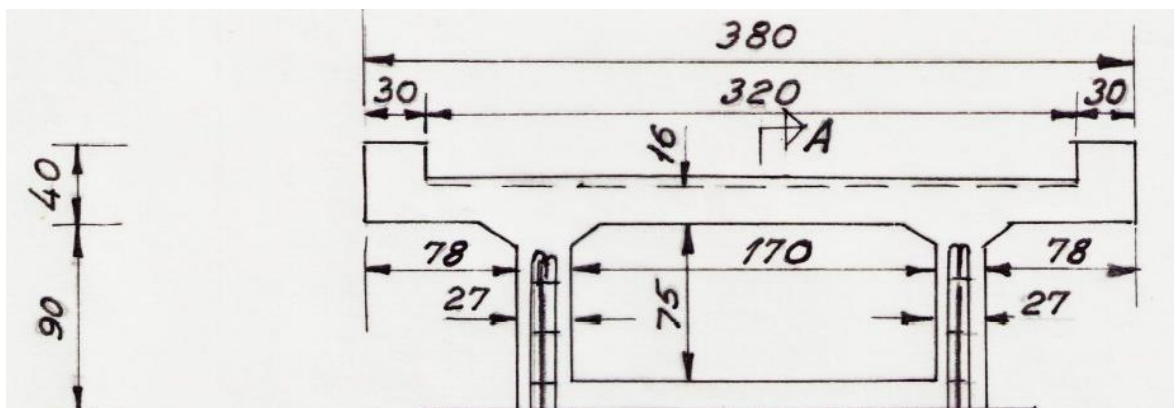
#### 4.5.1 Þversnið yfirbyggingu

Yfirbygging brúar hefur fjögur mismunandi þversnið (sjá töflu 4-5). Grunnþversnið á höfum er tvöfalt T. Yfir ásetum bætist við þrýstiplata neðst og myndar þannig lokað þversnið sem nær 4 metra út á höfin. Til viðbótar koma svo 200 mm þykkir þverbitar með reglulegu millibili, nánar tiltekið 4,5 m við enda brúarinnar og tæplega 6 m við miðju (sjá mynd 4-23).



Mynd 4-23: Hliðar- og grunnmynd af brúnni. Sjá má mismunandi þversnið brúarinnar á grunnmynd. Myndin er tekin úr teikningasetti Vegagerðarinnar. Allar málsetningar eru í cm.

Yfir tvo ystu millistöpla brúarinnar er þrýstiplatan 150 mm en 180 mm yfir þá þrjá innri (millistöpla brúarinnar). Þrýstiplatan er járnabent með 12 mm krossbentum járnum í efri og neðri brún með 110 mm millibili. Þversnið brúarinnar úr teikningasetti Vegagerðarinnar má sjá á mynd 4-24.



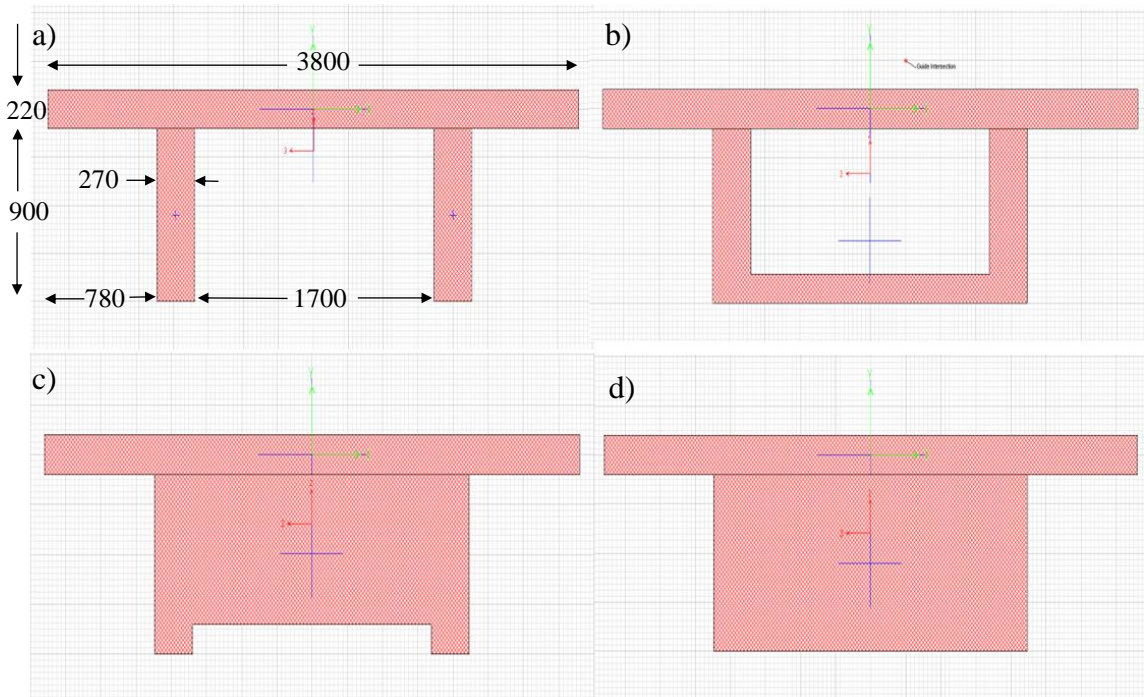
Mynd 4-24: Málsett þversnið yfirbyggingar sitthvorum megin við ásetur. Þetta þversnið gengur 4 metra út á höfn frá ásetum. Myndin er tekin úr teikningasetti Vegagerðarinnar. Allar málsetningar eru í cm.

Ofan á 160 mm þykka plötuna (flanga T-þversniðsins) kemur 30-60 mm malbikslag. Burðarbitarnir á hafi eru 270 mm breiðir og 900 mm háir. Vegrið er einnig á brúnni og er tekið tillit til þess. Þyngd handriðsins var getið sem 20 kg/m í gömlum reikningum Vegagerðarinnar. Þyngd þversniðanna á lengdarmetra er getið í töflu 4-5. Eiginþyngd þversniðanna var stillt sem álagi á yfirbyggingu líkansins í SAP2000.

Tafla 4-5: Eiginþyngd þversniða sem var sett sem álag á módelið í SAP2000. Inni eiginþyngd þversniða er þyngd vegna handriðs og malbiks.

Þversnið	Þyngd [kN/m]
a) Tvöfalt T	20.9
b) Tvöfalt T + Þrýstiplata	24.7
c) Tvöfalt T + Þverbiti	39.6
d) Tvöfalt T + Þverbiti + Þrýstiplata	43.4

Þversniðin voru teiknuð í SAP2000 með þversniðshönnun (e. section design) og má sjá þau á mynd 4-25. Þversniðin eru merkt í samræmi við merkingu á þeim í töflu 4-5. Áhrifum járnabendingar var sleppt og miðað við órifnið þversnið við útreikninga á tregðuvægjum. Staðsetning þversniðanna má svo sjá á mynd 4-23.



Mynd 4-25: Mismunandi þversnið brúarinnar á einni mynd teiknuð í forritinu SAP2000. Málsetningar eru í mm.

#### 4.5.2 Samanburður við EN 1992-1-1

Brúin var byggð 1964 og því ekki hönnuð í samræmi við Evrópustaðla. Fróðlegt er að bera saman hönnun hennar við núverandi Evrópustaðal. Eftirfarandi atriði eru ekki tæmandi listi heldur einföld grunnatriði EN 1992-1-1. Ekki verða skoðuð atriði tengd spennum eða skammtíma- og langtímaálagi.

Lágmarksjárnun þversniða þurfa að uppfylla kröfu EN1992-1-1 eða reglu 9.2.1(1):

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d \geq 0,0013 b_t d \quad (4-1)$$

Þar sem  $f_{ctm}$  er meðaleinásatogstyrkur steypu sem er  $f_{ctm} = 2,9$  MPa samkvæmt töflu 3.1 í EN1992-1-1 fyrir þrýstistyrk steypunnar við Steinavötn. Einnig er  $b_t$  breidd þversniðs í togi þannig að ef flangi þversniðs er í þrýsting ber að taka breidd kropps sem  $b_t$ . Fjarlægð frá efri brún þrýstisvæðis að miðju togjárna er svo táknað með  $d$ . Krafa um lágmarksjárnun þversniða samkvæmt núverand Evrópustaðli var uppfyllt fyrir öll þversnið brúarinnar yfir Steinavötn.

Steypustyrktarjárn liggja í botni bitanna til þess að mæta vægisáraun þegar að komið er út á haf brúarinnar en yfir ásetum eru járnin efst í flanga beint fyrir ofan kropp bitans þar sem þeim er ætlað að þola neikvætt vægi sem myndast þar (e. hogging moment). Samkvæmt 9.2.1.2(2) í EN 1992-1-1 þá er mælt með að dreifa togjárnnum yfir virka breidd flangans yfir ásetum en í lagi er að setja hluta yfir breidd kropp. Samkvæmt 5.3.2.1 í EN1992-1-1 þá byggir virk breidd T-bitá á lengdum flanga og kropp.

Æskilegt er að steinsteypt þversnið hafi teygjanleika sem er forsenda þess að burðarvirki geti eytt orku vegna jarðskjálfta (Haukur J. Eiríksson, 2016). Samkvæmt EN 1992-1-1 þá er gerð krafa um teygjanleika þversniða (e. Ductility of cross sections) í grein 5.6.3(2):

$$\frac{X}{d} \leq 0,45 \text{ fyrir C12 – C50} \quad (4-2)$$

Þar sem  $X$  er fjarlægð að núllínu þversniðs frá efri brún þrýstisvæðis.  $X$  má svo finna með:

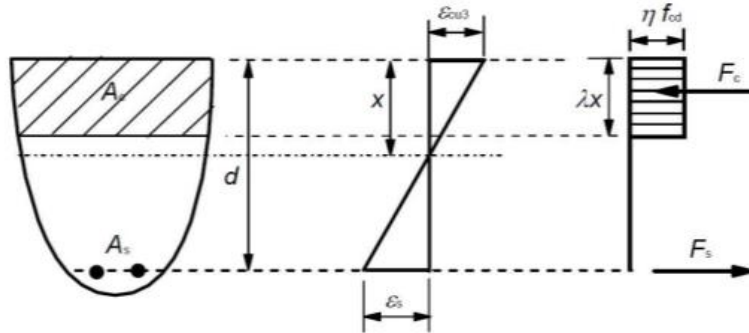
$$X = \frac{f_{yd} A_s}{\eta f_{cd} \lambda b} \quad (4-3)$$

Þar sem að  $f_{yd}$  er hönnunarflotstyrkur stáls,  $A_s$  er flatarmál steypustyrktarstáls í togi,  $b$  er breidd virks þversniðs og  $f_{cd}$  er hönnunarþrýstistyrkur steypu. Fyrir þrýstistyrk steypu  $\leq 50$  MPa þá gildir að  $\lambda = 0,8$  og  $\eta = 1$ . Krafa um teygjanleika EN 1992-1-1 var uppfyllt fyrir öll þversnið brúarinnar við höf og ásetur.

### 4.5.3 Burðarþol

Beygjuvægisþol fyrir þversnið yfirbyggingar var reiknað með plastískri nálgun fyrir brotmarkaástand samkvæmt EN1992-1-1. Reiknað var vægisþol fyrir bæði jákvætt og neikvætt vægi á miðjum höfum og við ásetur. Plastísk nálgun einfaldar útreikninga en gert er ráð fyrir rétthyrndri spennudreifingu í þversniðinu. Streitan í steypunni er í hámarki og er því þekkt. Mynd 4-26 sýnir plastíska nálgun á þversniði samkvæmt EN1992-1-1.





Mynd 4-26: Réttýrind spennudreifing í brotmarkaástandi (EN1991-1-1, 2004).

Í brotmarkaástandi er reiknað með að járnin séu komin á flöt áður en steypa brotnar. Samkvæmt mynd 4-26 má leiða út reikningslega vægisburðargetu þversniðsins með því að taka vægi um kraftinn  $F_c$ . Jafna fyrir vægisburðargetu þversniðsins verður því:

$$M_{Rd} = f_{yd} A_s \left( d - \frac{1}{2} \lambda X \right) \quad (4-4)$$

Ef togjárn eru í neðri brún T-þversniðs þarf að ákvarða virka breidd flangana, þ.e.  $b_{eff}$ . Með jöfnum 4-5 til 4-7 og á mynd 4-27 má sjá hvernig virk breidd flangana,  $b_{eff}$ , er skilgreind samkvæmt Evrópustaðlinum.

$$b_{eff} = (b_w + b_{eff1} + b_{eff2}) \quad (4-5)$$

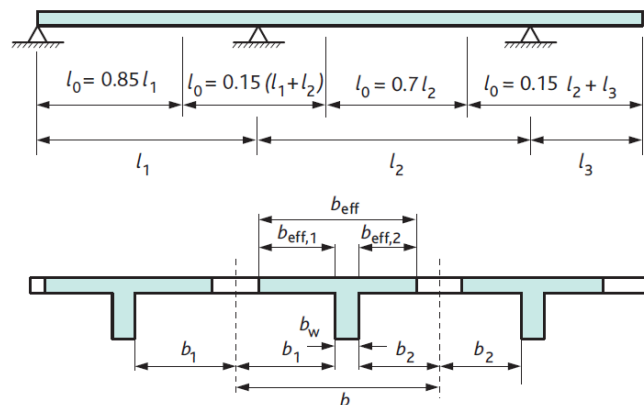
þar sem

$$b_{eff1} = (0,2b_1 + 0,1l_0) \leq 0,2l_0 \leq b_1 \quad (4-6)$$

og

$$b_{eff2} = (0,2b_2 + 0,1l_0) \leq 0,2l_0 \leq b_2 \quad (4-7)$$

Jöfnunum er svo lýst myndrænt hér að neðan eða á mynd 4-27.



Mynd 4-27: Virk breidd flanga á T-þversniði (EN1991-1-1, 2004).

Skerbrotþol þversniðs var athugað í brotmarkaástandi. Samkvæmt EN1992-1-1 má nota jöfnu 4-8 til að ákvarða skerburðargetu fyrir þversnið með skerbendingu. Ekki verður skoðuð skerburðargeta án skerbendingar þar sem brúin yfir Steinavötn er með skerbendingu.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot(\theta) \quad (4-8)$$

Hér er  $A_{sw}$  er flatarmál lykkjuleggja,  $s$  er bil á milli lykkjuleggja,  $z$  er lengd arms á milli miðju togsvæðis yfir í þrýstisvæði,  $f_{ywd}$  er flotstyrkur lykkja og  $\theta$  er horn sem ræðst af fjölda skerbendingar. Því hærra sem  $\cot(\theta)$  er valið því færri lykkjur eru til staðar en þau þurfa að vera innan eftirfarandi marka:

$$1 \leq \cot(\theta) \leq 2,5 \quad (4-9)$$

Hámarksskerburðargeta er svo gefin sem:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot(\theta) + \tan(\theta)) \quad (4-10)$$

þar sem  $\alpha_{cw} = 1$  fyrir óuppþennt mannvirki (e. non-prestressed),  $b_w$  er breidd kropp og  $v_1$  er:

$$v_1 = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (4-11)$$

Samkvæmt EN1991-1-1 þá er gerð krafa um að eftirfarandi skilyrði ríki fyrir skerbent þversnið:

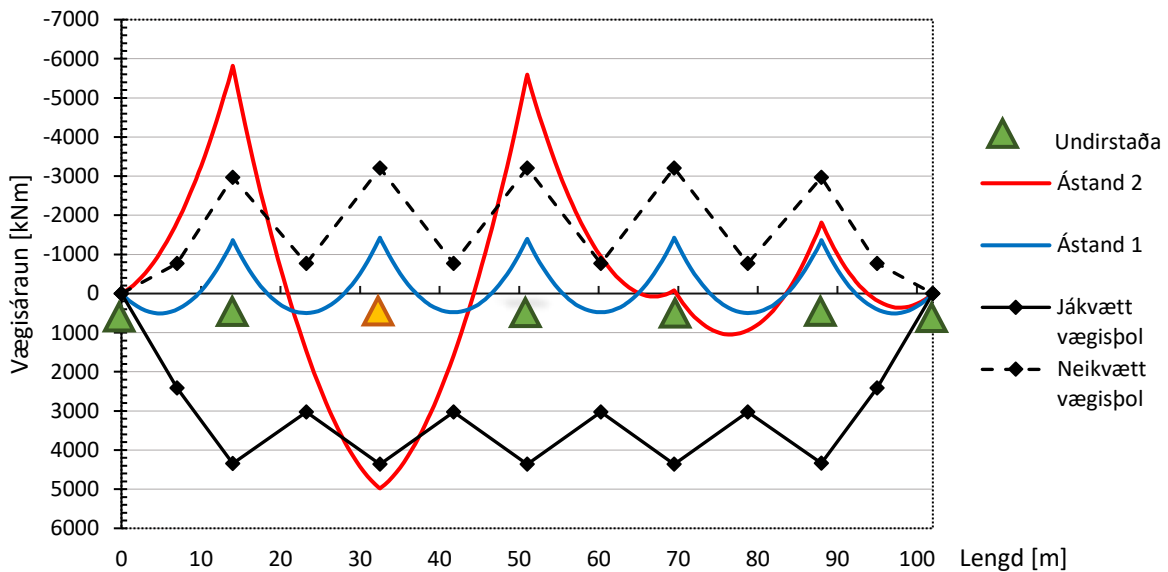
$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s} \quad (4-12)$$

og

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \quad (4-13)$$

þar sem  $V_{Ed}$  er skerkrafturinn sem verkar á þversniðið.

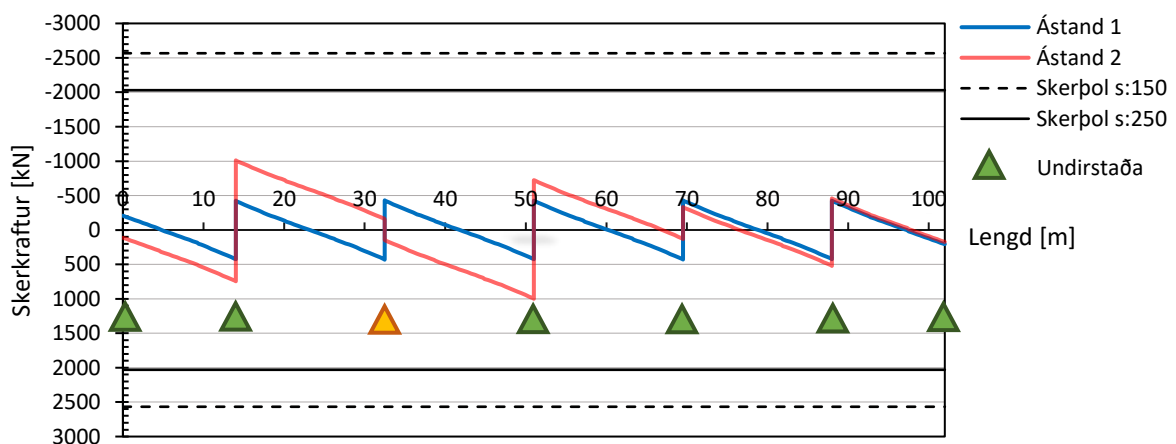
Forritið, SAP2000, sem byggist á einingaaðferðinni var notað til þess að reikna helstu snið- og vægiskrafta sem verka á þversnið yfirbyggingu vegna eiginþyngdar. Fyrir hefðbundnar aðstæður (allir stöplar virkir), ástand 1, þá má sjá beygjuvægi vegna eiginþyngdar á mótí vægisþoli yfirbyggingar á mynd 4-28. Sjá má að hæstu vægistopparnir eru yfir ásetum og næsthæstu á höfum. Þegar að millistöpull 2 sígur, tapast stuðningur og vægis- og skerkraftaferill breytist. Í útreikningum hér er gert ráð fyrir að millistöpull 2 missi allan burð og í stað þess að styðja við yfirbyggingu hangi hann á henni sem auka byrði. Til þess að herma eftir þessu var stökum krafti komið fyrir í stað millistöpuls og er þetta kallað ástand 2 á myndum 4-28 og 4-29. Vægisþol er reiknað á hafi og við ásetur (punktur á mynd 4-28) og dregin lína þar á milli.



Mynd 4-28: Vægisáraun á móti þoli yfirbyggingar fyrir ástand 1 og 2. Millistöpull 2 sem er ekki til staðar fyrir ástand 2 er merktur með appelsínugulum lit. Reiknuð gildi eru svartir punktar og lína dregin á milli þeirra.

Af mynd 4-28 sést að þegar millistöpull 2 missir burð (Ástand 2), fer vægisáraun yfir vægisþol yfir millistöpli 1 og 3 sem og mitt á milli þeirra. Þetta þýðir að reikningslega eru þrír flotliðir komnir og burðargeta því tæmd. Jákvætt vægisþol yfir ásetum er hærra en neikvætt vægisþol. Það er vegna þess að þegar að millistöpull sígur þá hættir þrýstiplate brúarinnar að haga sér sem slík og verður að togplötu.

Skerkraftadreifingu fyrir ástand 1 og 2 má sjá á mynd 4-29. Á teikningum Vegagerðarinnar (Viðauki A) sést að bil á milli skerbendingar í bitum er á milli 150-250 mm en ekki tilgreint hvar það sé. Áætla má að bil skerbendingar,  $s$ , sé minna yfir ásetum en á hafi. Skerþol er þó sýnt á mynd 4-29 fyrir bæði millibil  $s = 150$  mm og  $s = 250$  mm. Í báðum tilvikum var hámarksskerburðargeta,  $V_{Rd,max}$ , ráðandi þar sem hún var lægri en skerbrotþol með skerbendingu,  $V_{Rd,s}$ .



Mynd 4-29: Skerkraftadreifing fyrir ástand 1 og 2 gegn þoli yfirbyggingar. Undirstöðum er stillt neðar en þær eru í raun til þess að leyfa skerferlum að njóta sín.



Mynd 4-29 sýnir skerþol gagnvart ástandi 1 og 2. Fræðilegir útreikningar sýna að ekki er hættu á skerbroti yfirbyggingar sama þótt miðað sé við skerþol lykkja með millibil 150 eða 250 mm.

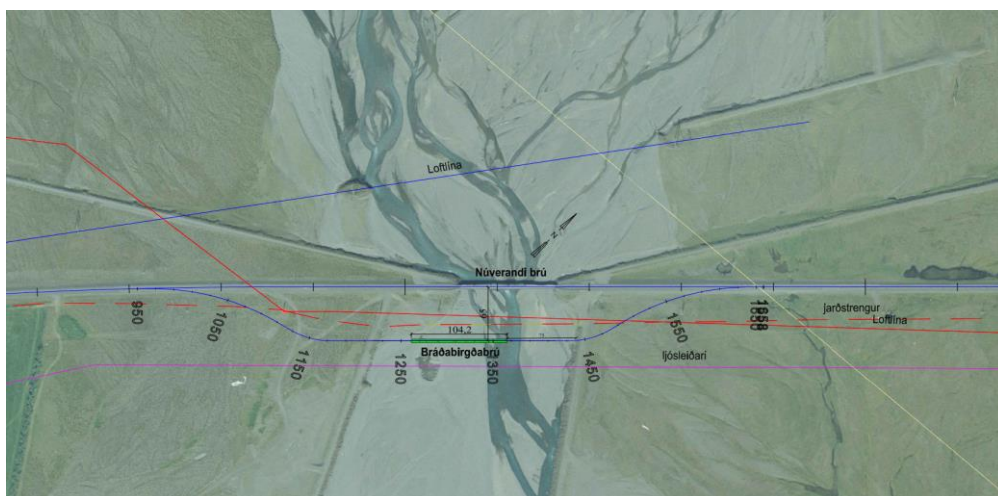
## 4.6 Bráðabirgðabrá og núverandi ástand.

Þegar að vatnspollar sáust á yfirbyggingu brúarinnar var strax hafist handa við að smíða bráðabirgðabrá yfir Steinavötn til þess að ferja vegfarendur yfir Steinavötn. Sérstakt bráðabirgðateymi er til staðar hjá Vegagerðinni sem gerir þeim kleift að byggja bráðabirgðabrá á stuttum tíma. Bráðabirgðabráin var grunduð á timburstaura en hún reis á fimm dögum. Lengd hennar er rúmlega 104 m og er í sjö höfum og þolir hámarksþyngd á hringveginum. Efniviður brúarinnar var að mestu leiti fyrir hendi en brúin er samansett af stálbitum og timburgólfi. Mynd af brúnni má sjá á mynd 4-30 (Vegagerðin, 2017b).



Mynd 4-30: Bráðabirgðabráin reis á fimm dögum. Úr myndasafni Vegagerðarinnar.

Staðsetning bráðabirgðabráarinnar má sjá á mynd 4-31 en hún er 65 m sunnan við núverandi brúar. Ánni hefur verið hliðrað en nú rennur hún fram hjá millistöpli 1 og 2 áður en hún kemur að bráðabirgðabrá (sjá mynd 4-32).



Mynd 4-31: Yfirlitsmynd af núverandi og bráðabirgðabrá (Vegagerðin, 2017).

Til stendur að fækka einbreiðum brúm á landinu þar sem umferðarþungi hefur aukist síðustu ár og slyshætta samhliða því. Síðasta einbreiða brú á hringvegi Íslands var byggð árið 1985 en einbreiðar brýr voru gjarnan hannaðar áður fyrir með hagkvæmasta brúarstæði í huga en ekki öryggi notandans (Guðmundur Valur Guðmundsson, 2018). Hönnun á framtíðarbrú yfir Steinavötn er hafin en staðsetning hennar er áætluð á svipuðum stað og brúin sem eyðilagðist í lok september 2017. Hún verður líklega eftirspennt (e. post tensioned), tvíbreið, bitabru og 105 metrar að lengd. Áætluð verklok eru 2020 ef fjárveitingar verða tryggðar (Guðmundur Valur Guðmundsson, 2018). Núverandi ástand á millistöpli 2 við Steinavötn má sjá á mynd 4-32. Áætla má miðað við sjónlægt mat að nokkrir timburstaurar hafi brotnað og einnig að stöpullinn hafi snúist enn frekar.



*Mynd 4-32: Núverandi ástand millistöpuls 2. Líklegt er að nokkrir af timburstaurunum séu brotnir (Vegagerðin, 2018).*

## 5 Rannsóknir á steinsteypum brúm

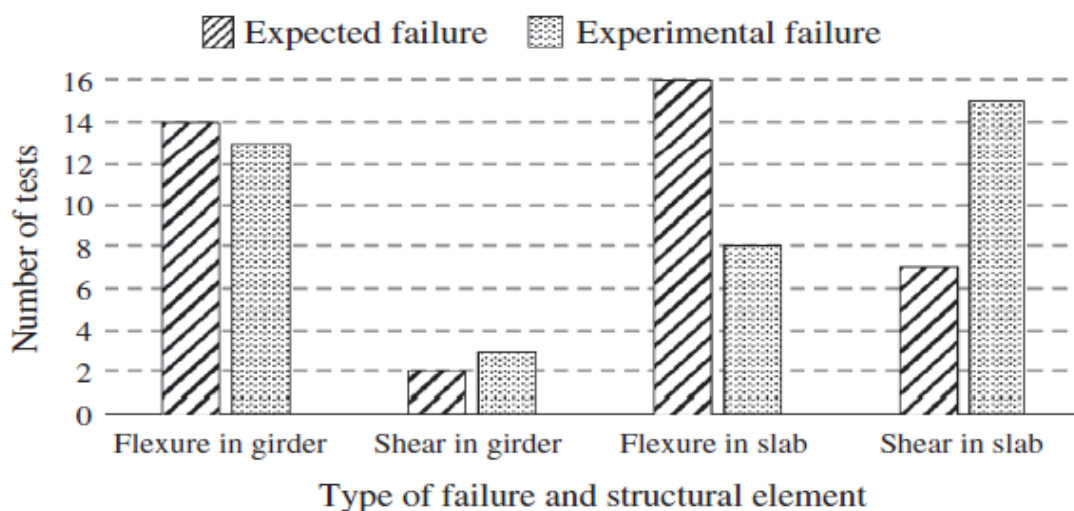
Það þykir gagnlegt þegar að mannvirki eru dæmd ónýtt eða skemmd að framkvæma burðarþolsrannsóknir eða önnur próf á þeim. Tækifæri á burðarþolsprófunum í fullum skala eru af skornum skammti og slík próf þykja jafnan dýr í framkvæmd og eru ekki algeng. Af þessari ástæðu er tilvalið að nýta sér aðstæður við Steinavötn og framkvæma próf á brúnni. Niðurstöður má síðan bera saman við fræðilega útreikninga og nota til þess að öðlast skilning á hegðun brúar í nærri brotmarkaástandi og til að kvarða reiknilíkön. Rannsóknir hafa sýnt að brotmyndir prófana á brúm hafa oft verið með öðrum hætti en reiknað var með. Vegagerðin stefnir á að framkvæma prófanir á brúnni yfir Steinavötn og hefur styrkur fengist til þess. Þessi kafli fjallar um hvaða prófanir hafa verið gerðar á steypum brúm og einnig verður varpað fram tillögum að prófunum á brúnni yfir Steinavötn.

### 5.1 Bakgrunnur

Steyptar einingar skemmast einna helst vegna skerbrots eða vegna vægisbrots (e. flexure). Þegar að skerbrot verður í steypu þversniði þá getur það gerst hratt og án viðvörunar á sér stað. Þegar vægisbrot á sér stað þá gerist það oftast hægt og ummerki þess er hægt að sjá áður en það þá á sér stað. Rannsóknir á steypum mannvirkjum hafa jafnan farið fram á tilraunastofu þar sem óvissu er haldið í lágmarki. Smærri líkön eru gjarnan smíðuð í stað þess að prófa steyptar einingar í fullri stærð. Járnbent steinsteypumannvirki eru ekki einsleit og þess vegna er áhugavert að prófa slík mannvirki í fullum skala.

Hægt er að tala um tvær gerðir af prófunum á steypum mannvirki, það er prófanir sem eru gerðar til brots (e. destructive) og svo án brots (e. non-destructive) eða án þess að eyðileggja prófeiningu (Malek & Kaouther, 2014). Prófanir sem leiða ekki til brots eru einfaldar í framkvæmd og oftast ódýrari. Dæmi um slík próf má nefna hljóðbylgjupróf (e. ultrasonic test) eða hrökkhamarspróf (e. rebound hammer) en þau eru notuð til þess að leggja mat á eiginleika steyptra þversniða (Malek & Kaouther, 2014).

Bagge o.fl. (2017) tóku saman 40 prófanir á 30 steypum brúm þar sem fyrsta prófið var gert árið 1952 í Bretlandi. Hér verða þýddar helstu niðurstöður á samantekt þeirra og lærdómi. Prófanir hafa verið gerðar á bæði forsteypum og staðsteypum einingum þar sem oftast voru járnbentar plötur prófaðar. Fáar prófanir á forsteypum einingum eru í gagnasafninu enda stjórnast prófin einna helst af því hvað er í boði. Járnbent steinsteypa er ekki einsleit og háð mörgum þáttum og er það ein af ástæðum þess að óvissa varðandi steyp þversnið er meiri en varðandi þversnið sem eru úr stáli. Sjá má mynd 5-1 sem að lýsir áætlaðri brotmynd steyptra brúa á móti raunverulegri brotmynd.

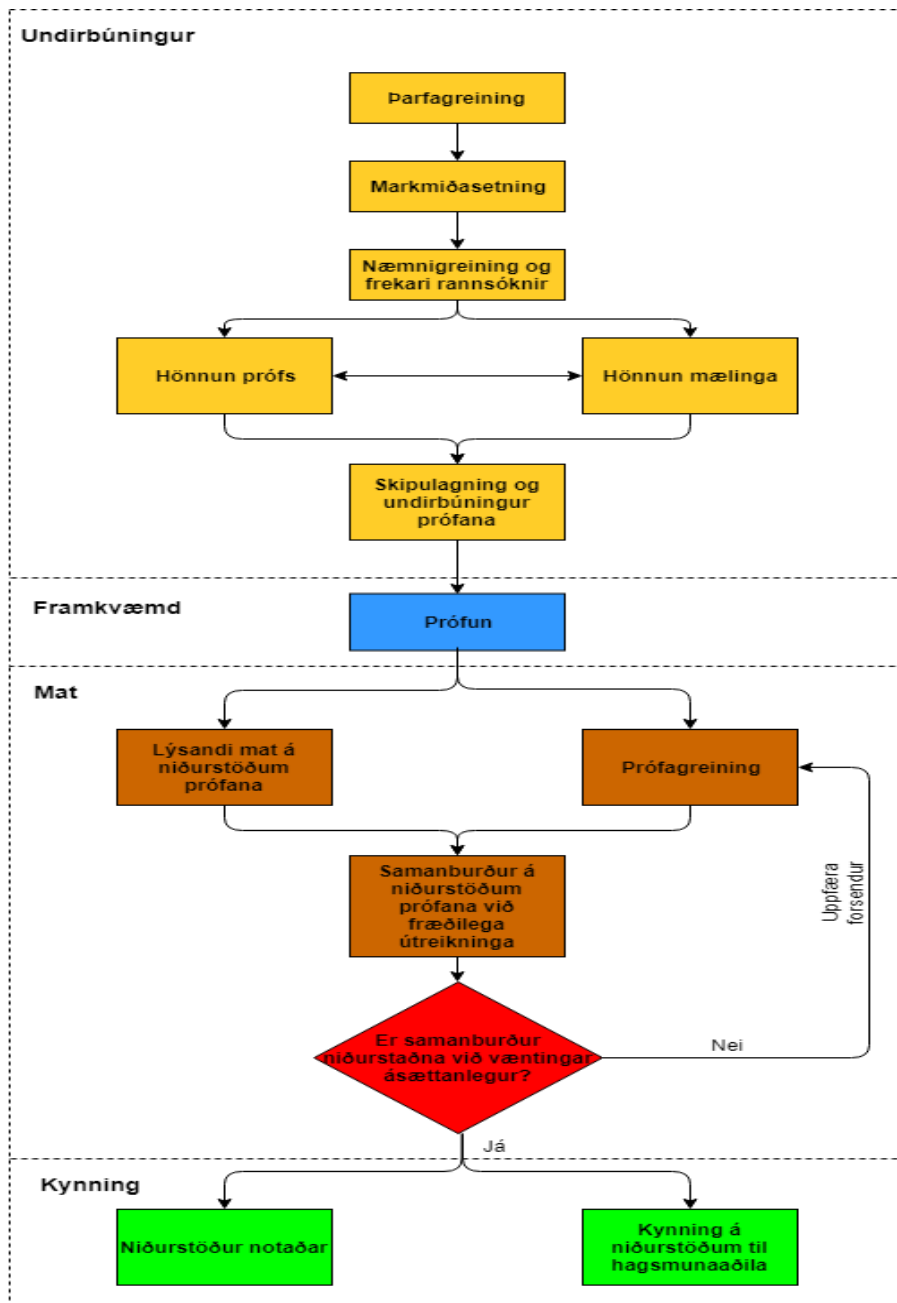


Mynd 5-1: Brotmyndir steyptra brúa reyndust í mörgum tilvikum með öðrum hætti en við mátti búast (Bagge o.fl., 2017).

Í samantekt Bagge o.fl., (2017) reyndist tæplega þriðjungur prófana á steipt brúarmannvirki brotna á annan hátt heldur en reiknað var með og þá helst með sker- eða gegnumbroti (e. punching) í stað vægisbrots. Niðurstöðurnar voru einnig þær að lærdómur sem draga má af framkvæmd prófana hefur ekki verið nýttur nægilega vel og sömu mistökin verið gerð aftur. Helstu niðurstöður úr þessum prófunum eru:

- Hægt er að spá tiltölulega nákvæmt fyrir brot vegna vægis.
- Steipt mannvirki hafa tilhneigingu til þess að reynast sterkari en fræðilegir útreikningar gefa til kynna.
- Skilningur á skerbroti er ábótavant og erfitt reynist að spá fyrir um raunverulegt skerbrot. Mælt er með að greina skerbrotþol með ólínulegum einingaaðferðum (e. Finite element analysis) en of íhaldsamar aðferðir hafa verið notaðar í gegnum tíðina. Einnig er mikilvægt að taka tillit til steyptra eininga án skerjárna.
- Plastrefjastyrkt steinsteypa hefur í tveimur álagsprófum aukið burðargetu en skilningur á eiginleikum hennar er ábótavant.
- Hönnunargildi efniseiginleika fyrir brýr sem eru til í dag eiga það til að vera öðruvísi en raunveruleg gildi segja til um. Til dæmis væri hægt að prófa sýni úr brúnni til þess að leggja mat á efniseiginleika brúarinnar.
- Þegar þol og geta þversniða er metin þá eru útreikningar oft einfaldaðir, það á helst við form eininga eða einingar sem eru ekki talin til burðarvirkisins. Til eru dæmi þess að áhrif vegna vegkants er sleppt og munur er milli prófana og fræðilegra útreikninga vegna þessa.
- Prófanir hafa leitt í ljós mikilvægi undirstaðna og tengingu þeirra við yfirbyggingu brúa. Jaðarskilyrði ættu að vera metin, eins nákvæmt og hægt er, bæði fyrir framtíðarprófanir og við mat á eiginleikum brúar.

Til þess að rannsóknir á steiptum brúm séu sem árangursríkastar þá ber að gera ítarlega greiningu á mannvirkinu fyrir og eftir rannsóknir. Aðferðafræði fyrir prófanir á brúm var sett fram af Bagge o.fl. (2017) en flæðirit af því má sjá á mynd 5-2. Þarfagreiningu skal framkvæma fyrst en í henni er t.d. metið umfang og kostnaður verkefnis. Skýr og raunsæ markmiðasetning skal vera sett í byrjun. Greining á brúnni ætti að vera þrepaskipt og í hverju þrepi ætti að skoða hvaða lærdóm má draga af síðasta þrepi og hvort úrbætur eigi við í því næsta. Næmnigreining gæti verið mikilvæg en hún metur hvort áhrif forsendubreytinga varðandi t.d. efniseiginleika og jaðarskilyrði hafa á niðurstöður rannsóknarinnar.



Mynd 5-2: Aðferðafræði prófana sett fram sem flæðirit, byggt á Bagge o.fl. (2017).

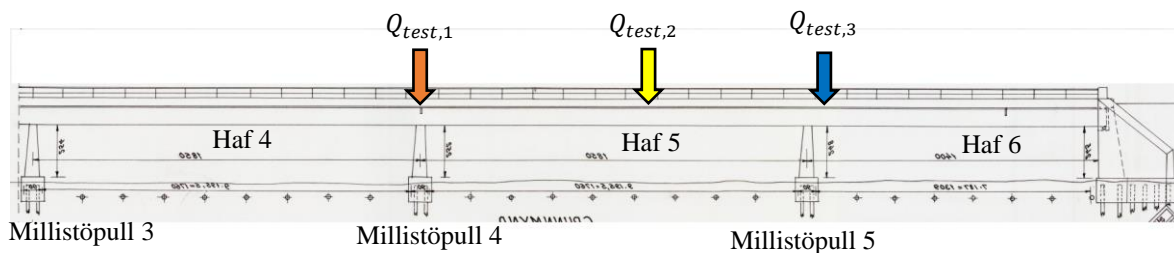


Eftir hönnun prófana og mælinga á brúarmannvirkið ætti framkvæmd þeirra að vera ítarlega skipulögð og tillit tekið til aðstæðna á vettvangi en mikilvægt þykir að kynna sér raunverulegar aðstæður við brúna. Niðurstöður prófana ættu svo að vera greindar með fyrir fram ákveðnu handriti sem listar viðbrögð við mismunandi niðurstöðum. Kynning niðurstaðna og útbreiðsla þeirra er mikilvæg svo hægt sé að læra af þeim og nýta þær til hönnunar og mats á brúarmannvirkjum í framtíðinni.

Álagspróf hafa verið framkvæmd á sambærilegum brúm og þeirri við Steinavötn, það er, á steiptum bitabrum með T-þversnið (e. RC T-shaped girder bridge) og einnig á hefðbundnum steiptum bitabrum (e. RC girder bridge) með kassalagað þversnið. Í flokki bitabrua með T-þversnið má nefna brýrnar yfir árnar Säreveire í Eistlandi, Zuojiabao og Xi Cheng í Kína og í flokki hefðbundna brúa má nefna brýrnar yfir árnar Elk í Bandaríkjunum og Lethbridge í Kanada (Bagge o.fl., 2017). Álagspróf sem voru framkvæmd á hefðbundnar steiptar bitabryr með því markmiði að fá fram brot vegna vægis (álagi stillt á hafi), áttu það sameiginlegt að litlu munaði á milli reiknaðs vægisþols og brotálags þeirra. Brýrnar yfir árnar Säreveire og Zuojiabao voru hinsvegar prófaðar til brots án þess að þeirra reiknað hámarksbrotþol náðist (e. ultimate load-carrying capacity) (Bagge o.fl., 2017), en hér má undirstrika að þær hafa T-þversnið eins og brúin yfir Steinavötn.

## 5.2 Tillögur að rannsóknum

Brúin yfir Steinavötn er steinsteypt og eins og áður hefur komið fram er skilning ábótavant á styrk og brotmyndum járnbenntar steinsteyptþversniða. Áætlað er að framkvæma álagspróf á brúna sem leiðir til brots og hér verður fjallað um þrjár tillögur að prófunum. Samkvæmt niðurstöðum úr kafla 4 sem sýndu að flotliðir mynduðust við millistöpul 1 og 3 má áætla að þversnið brúarinnar við vestari hluta hennar séu ónýt. Af þeim sökum er æskilegt að rannsóknir og prófanir verði framkvæmdar á austurhluta brúarinnar. Tillögurnar þrjár má sjá á mynd 5-3.



Mynd 5-3: Tillögur að prófunum.

Tillaga 1 snýst um að kanna burðarþol millistöpuls með stauraþyrpingu. Lóðréttum krafti verður komið á millistöpul 4 og hækkaður þar til brot í jarðvegi næst. Ef rekdýpt stauranna er 5 metrar má áætla að brotkraftur,  $Q_{test,1}$ , sé umtalsverður. Hægt væri að grafa undan millistöpli 4 til þess að reyna að herma eftir atburðinum í lok september 2017 og minnka þannig burðarþol umlykjandi jarðvegs. Hönnunarkraft má sjá í töflu 5-1 þar sem miðast er við viðnámshorn jarðvegs,  $\theta' = 38^\circ - 42^\circ$ .

Ágætis niðurstöður hafa fengist fyrir prófanir á vægisburðargetu steipts brúarþversniðs en tillaga 2 snýst um að prófa vægisburðargetu þversniðs. Lóðréttum krafti,  $Q_{test,2}$ , sem komið er fyrir á mitt haf 5 eða á milli millistöpla 4 og 5 er aukinn jafnt og þétt þar til flotvægi yfir

ásetum og á miðju hafi er náð og burðargeta yfirbyggingar tæmd. Fræðilega er þol yfir ásetu millistöpul 5 krítískt, þ.e. fyrst ætti að myndast flot þar.

Skerstyrk steinsteypts þversniðs er erfitt að áætla en tillaga 3 snýst um að prófa skerstyrk þversniðs brúarinnar. Lóðréttum krafti,  $Q_{test,3}$ , verður komið fyrir í hliðraðri fjarlægð við millistöpul 5 og hækkaður þar til brot næst.

Áætlaður hönnunarkraftur,  $Q_{test}$ , fyrir allar tillögurnar má finna í töflu 5-1.

Tafla 5-1: Áætlaður brotkraftur,  $Q_{test}$ , fyrir tillögurnar þrjár. Krafturinn fyrir tillögu 1 er umtalsverður og jafnvel óraunhæfur.

Tillaga	$Q_{test}$ [kN]
1	≈10000
2	≈1200
3	≈2200

Í kafla 2.5 voru gerð skil á ýmsum rofmælíbúnaði sem nota má til þess að kanna rofmátt Steinavatna. Á Íslandi eru kröftugar ár og fljót sem hafa átt það til í gegnum tíðina að skola undan undirstöðum, sérstaklega á Suðurlandi. Hægt væri að koma fyrir mælíbúnaði til að skrá úrskolun við framtíðarbrúna eða þá sem eyðilagðist ef hún verður ekki rifin í náinni framtíð. Hér má helst nefna einnota tæki eins og flotbúnað sem gæti verið komið fyrir við fót brúarstöpul á ákveðnu dýpi. Einnig væri fróðlegt að koma fyrir púls- eða rafsjárbúnaði en auðvelt er að lesa niðurstöður frá slíkum búnaði.

## 6 Samantekt og lokaorð

Úrskolun undan undirstöðum brúa er ein algengasta orsök skemmda á brúm. Þann 27. september 2017 skolaði undan einum millistöpli brúarinnar yfir Steinavötn í Suðursveit með þeim afleiðingum að hann seig og skekkist. Vegagerðinni var gert viðvart að kvöldi þess dags þegar að vatnspollar sáust sem höfðu myndast á yfirbyggingu brúarinnar. Samkvæmt vettvangsmælingum Vegagerðarinnar mældist sig millistöpuls 2 um 200 mm. Flotliður myndaðist yfir ásetum millistöpla 1 og 3, þar sem sprungur náðu frá ásetum og 5 metra út á höfn. Framkvæmd voru nokkur álagspróf á yfirbyggingu en þegar að sig mældist, sem ekki skilaði sér til baka þegar álaginu var létt af, var brúin dæmd ónothæf.

Samkvæmt gögnum frá Veðurstofu Íslands var september 2017 hlýr og mjög úrkomusamur mánuður. Mörg septemberúrkomumet féllu og þá helst á Suður- og Austurlandi. Úrkomugögn voru fengin frá Skaftafelli, Stafafelli í Lóni, Gilsá í Breiðdal og á Höfn í Hornafirði. Á Höfn var sólarhringsúrkomumetið fyrir septembermánuð slegið tvisvar sinnum þann 24. og 28. september en þær mælingar voru tæplega 20% hærri en fyrra sólarhringsúrkomumet. Reiknað rennsli úr Geithellná sýndi rennslistoppa 24. og 27. september með 50 og 200 ára meðalendurkomutíma. Að auki var rennslismet slegið í Fossá Berufirði 27. september. Hitastigsmælingar fengust frá Höfn og Ingólfshöfða og reyndist meðalhiti vera tæplega 10°C á svæðunum en leysingar frá jökli eru háðar hitastigi.

Greinilegt er að mikil úrkoma átti sér stað á svæðinu og öll gögn frá nærliggjandi veðurstöðvum benda til að aftakafloð hafi orðið í Steinavötnum í kringum 27. September þegar tilkynnt var um tjón á brúnni. Enginn rennslis- eða úrkomumælir er við Steinavötn eða hefur verið áður. Varnargarðar eru meðfram þjóðvegi 1 þar sem hann þverar Steinavötn en engir leiðigarðar eru til þess að stýra flæði árinna þvert á brúna. Í staðinn kom rennsli Steinavatna mestmegnis samsíða brúni og þvert á brúarstöpulinn eins og sýnt er á mynd 4-1. Fræðilegir útreikningar benda á að ef rennsli stefnir þvert á undirstöðu brúarstöpuls, í stað samsíða henni, þá getur hámarksskolunardýpt hækkað fimmfalt.

Millistöplar brúarinnar eru grundaðir á timburstaura og var burðarþol þeirra reiknað. Bakgrunnur burðarþolsprófana sem til eru á íslenskum staurum var kannaður og borinn saman við fræðilega útreikninga til þess að styðja við forsendur reikninga á timburstaurunum við Steinavötn. Burðarþol stauraþyrpingar var reiknað sem fall af skolunardýpt fyrir mismunandi viðnámshorn jarðvegs við Steinavötn sem áætlað að sé á bilinu 38° - 42°. Öryggisstuðull, *FS*, burðarþols timburstauranna gagnvart eiginþyngd brúarinnar er á bilinu 6-12 ef gert er ráð fyrir að engin úrskolun eigi sér stað undan millistöpli. Fræðilegir útreikningar gáfu til kynna að skolunardýpt undan millistöpli 2 hafi náð 4,25 m – 4,75 m en það er þá þegar að burður timburstauranna var orðinn krítískur gagnvart eiginþyngd brúarinnar.

Tölvutækt líkan var gert af brúnni og sniðkraftar reiknaðir. Ef borið er saman vægisþol yfirbyggingar við beygjuvægi, þegar að millistöpull gaf sig, þá er ljóst að vægisþol var ekki nægjanlegt við ásetur millistöpla 1 og 3 sem og á miðju nýmyndaðs hafs millistöpuls 1 og 3 eftir að millistöpull 2 hafði gefið sig (sjá mynd 4-28).



# Heimildir

Aron Bjarnason (2017). *Óútgefið minnisblað vegna álagsprófana við Steinavötn í Suðursveit*. Reykjavík: Vegagerð Ríkisins.

Árni Pálsson (1966). *Óútgefin orðsending*. Reykjavík: Vegagerð Ríkisins.

Bagge, N., Popescu, C., Elfgren, L. (2017). Failure tests on concrete bridges: Have we learnt the lessons?. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(3), 293-319.

Barkdoll, B.D., Ettema, R., Melville, B.W. (2007). *Countermeasures to protect bridge abutments from scour*. NCHRP Report 587. Transportation Research Board.

Bjarni Pálsson (2016). *Kennslunótur úr Trévirki 1*. Reykjavík: Háskóli Íslands.

Briaud, J. (2008). Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(10), 1425-1447.

Briaud, J. (2013). *Introduction to Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 831-834.

Collin, J.C., (2002). *Timber Pile Design and Construction Manual*. Bandaríkin: American Wood Preservers Institute.

Das, B.M. (2011). *Principles of Foundation Engineering*. Dehli: Cengage Learning.

Ettema, R., Yoon, B., Nakato, T. & Muste, M. (2004). A review of scour conditions and scour-estimation difficulties for bridge abutments. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 8(6), 643-650.

Eurocode 2 (2004). *Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings* (European Standard EN-1992). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.

Eurocode 7 (2011). *Geotechnical Design – Part 1: General Rules, Part 2: Ground Investigation and Testing* (European Standard EN-1997). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.

Forde, M., McCann, D., Clark, M., Broughton, K., Fenning, P., & Brown, A. (1999). Radar measurement of bridge scour. *NDT & E International*, 32(8), 481-492.

Foti, S., & Sabia, D. (2010). Influence of foundation scour on the dynamic response of an existing bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 16(2), 295-304.

Guðmundur Valur Guðmundsson (2018). *Framkvæmdafréttir 4.tbl./18*. Reykjavík: Vegagerðin.

Guðmundur Þorsteinn Bergsson (2014). *Samanburður bormótstöðu við niðurrekstur og burðarþol staura*. Óútgefin meistaraþrófsritgerð, Háskóli Reykjavíkur. Reykjavík.

Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson & Trausti Jónsson (2018). *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.

Haukur Eiríksson (2016). *Kennslunótur úr Steinsteypuvirki 1*. Reykjavík: Háskóli Íslands.

Hayes, D. C., & Drummond, F. E. (1995). *Use of fathometers and electrical-conductivity probes to monitor riverbed scour at bridge piers*. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Jóhann Ísak Pétursson & Jón Gauti Jónsson (2003). *Jarðargæði*. Reykjavík: Iðnú.

Jón Skúlason (1977). Athuganir á burðarþoli stauris við lóðrétt álag. *Tímarit Verkfræðingafélags Íslands*, 62(1), 9-13.

Jón Skúlason (1993). Álagspróf á staura-Burður staks fljótandi stauris við lóðrétt álag. *Árb. VFÍ 1992-93*, 5(1), 308-320.

Jón Skúlason og Einar Hafliðason (1992). Tillaga að vali efnisstuðla við útreikninga á lóðréttri burðargetu stauris með forritinu PIA I. Reykjavík: Almenna verkfræðistofan hf. og Vegagerð Ríkisins.

Lagasse, P. F., Clopper, P.E. Zevenbergen, L.W., Ruff, J.F. (2006). *Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality Control*. NCHRP Report 587. Transportation Research Board.

Lamb, R., Aspinall, W., Odbert, H. & Wagener, T. (2017). Vulnerability of bridges to scour: insights from an international expert elicitation workshop. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(8), 1393-1409.

Landmælingar Íslands. (2018). Kortasjá. Sótt 8. maí 2018 frá <https://kortasja.lmi.is/>

Langley, D. E. (2006). *Calculation of scour depth at the Parks Highway bridge on the Tanana River at Nenana, Alaska, using one-and two-dimensional hydraulic models*. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Lin, Y.B, Lai, J.S, Chang, K.C, Li, L.S. (2006). Flood scour monitoring system using fiber Bragg grating sensors. *Smart Materials and Structures*. 15(6), 1950-1959.

Línuhönnun verkfræðistofa (2003). *Notkun styrkts jarðvegs í mannvirki í vegagerð*. Reykjavík: Vegagerðin.

Loftmyndir ehf. (2018). Sótt 6. maí 2018 frá <https://www.map.is/base/>

Malek, J. & Kaouther, M. (2014). Destructive and Non-destructive Testing of Concrete Structures. *Jordan Journal og Civil Engineering*. 8(4), 432-441.

- Marr, J. (2014). *Scour Monitoring Technology Implementation*. Final Report 37. Minnesota: Minnesota Department of Transportation.
- May, R. W. P., & Escarameia, M. (1992). Channel protection: turbulence downstream of structures. Wallingford: HR Wallingford.
- May, R.W.P., Ackers, J.C., Kirby, A.M. (2002). *Manual on scour at bridges and other hydraulic structures*. London: Ciria.
- Mazumder, S.K. & Kumar, Y.K. (2006). Estimation of scour in bridge piers on alluvial non cohesive soil. *Highway Research Bulletin*, Indland: Panchkula.
- Muzzammil, M., Alama, J., & Danish, M. (2015). Scour Prediction At Bridge Piers In Cohesive Bed Using Gene Expression Programming. *Aquatic Procedia*, 4, 789-796.
- Pilarczyk, K. W. (1990). Design of seawalls and dikes, including overview of revetments. *Coastal protection*. Rotterdam: AA Balkema (útg).
- Prendergast, L. J., & Gavin, K. (2014). A review of bridge scour monitoring techniques. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 138-149.
- Reglugerð um stærð og þyngd ökutækja nr 155/2007 Viðauki I.
- Reynolds, T.N. (2003). Timber piles and foundations. Bretland: BRE Construction division
- Richardson, E. V. & Davis, S. R. (1995). *Evaluating Scour at Bridges (HEC-18)*. Washington Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- Salawu, O.S. (1997). *Detection of structural damage through changes in frequency: a review*. *Engineering structures*, 19(9), 718-723.
- Schall, J.D & Davies, P. (1999). Research pays off: Instrumentation for measuring scour at bridge piers and abutments. *TR News*, 203.
- Sigurður Erlingsson (2016). *Kennslunótur úr Jarðtækni og grundun 2*. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Snorri Zóphóníasson (2015). *Vatnafar í Eldhrauni – Náttúrulegar breytingar og áhrif veitumannvirkja*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Tómas Helgason & Magnús Helgason (1989). *Íslandshandbókin – Náttúra, Saga og Sérkenni*. Reykjavík: Örn og Örlygur.
- Veðurstofa Íslands (2011). *Hlaup úr sigkötlum í Mýrdalsjökli*. Skoðað 4. Apríl 2018 á <http://www.vedur.is/um-vi/frettir/nr/2235>
- Veðurstofa Íslands (2017a). *Tíðarfar í september 2017*. Skoðað 6. Febrúar 2018 á <http://www.vedur.is/um-vi/frettir/tidarfar-i-september-2017>
- Veðurstofa Íslands (2017b). *Tilkynning vegna vatnavaxta á Fljótsdal*. Skoðað 2. Febrúar 2018 á <http://www.vedur.is/um-vi/frettir/tilkynning-vegna-vatnavaxta-a-fljotsdal>

Veðurstofa Íslands. (2017c). *Helstu vatnsföll og vatnsvið á SA-landi*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands

Veðurstofa Íslands 2018: Gagnabanki Veðurstofu Íslands, afgreiðsla nr 2018-02-12/01

Vegagerðin (2015). *Brúin yfir Eldvatn opnuð fyrir léttri umferð*. Skoðað 8. mars á <http://www.vegagerdin.is/upplýsingar-og-utgafa/frettir/nr/12842>

Vegagerðin (2017a). *Framkvæmdafréttir 10 tbl./17*. Reykjavík: Vegagerðin.

Vegagerðin (2017b). *Unnið af krafti við bráðbirgðabru yfir Steinavötn*. Skoðað 8. febrúar á <http://www.vegagerdin.is/upplýsingar-og-utgafa/frettir/unnid-af-krafti-vid-bradabirgdabru-yfir-steinavotn>

Vegagerðin (2018). *Óbirt myndasafn af Steinavötnum*. Reykjavík: Vegagerðin.

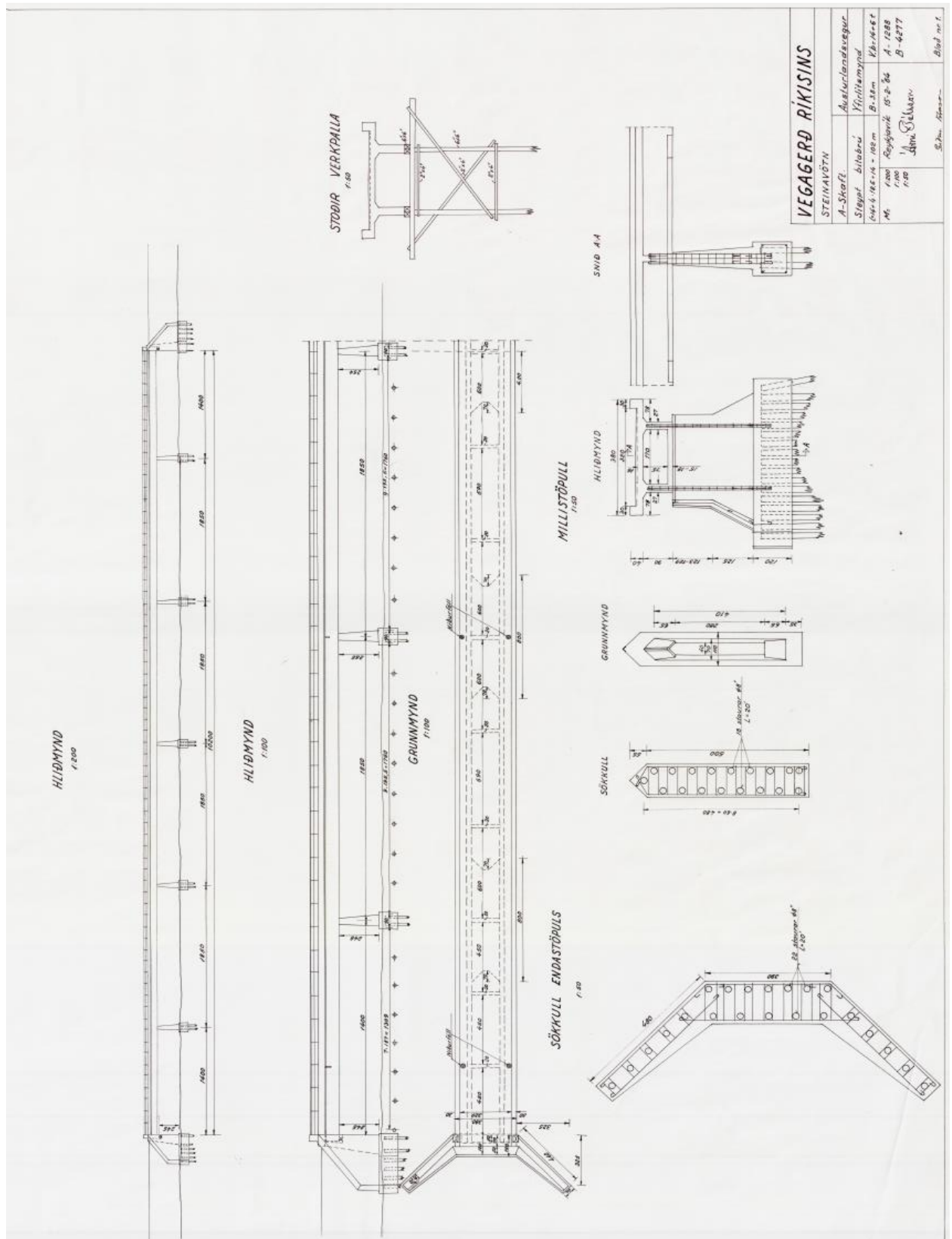
Wilson, E. L. (2002). *Three dimensional static and dynamic analysis of structures*. Computers and Structures, Berkely: CSI.

Porleifur Einarsson (1968). *Jarðfræði – Saga bergs og lands*. Reykjavík: Mál og Menning.

Zanini M.A, Faleschini F, Ademovic N, Prendergast L.J, Gavin K, Limongelli M.P (2017). *Structural Health Monitoring and Design Code compliance for performance assessment of bridges under scour and seismic hazards*. Proceedings of the value of structural Health Monitoring for the reliable Bridge Management conference, Zagreb, Croatia, 2-3 March, 2017.

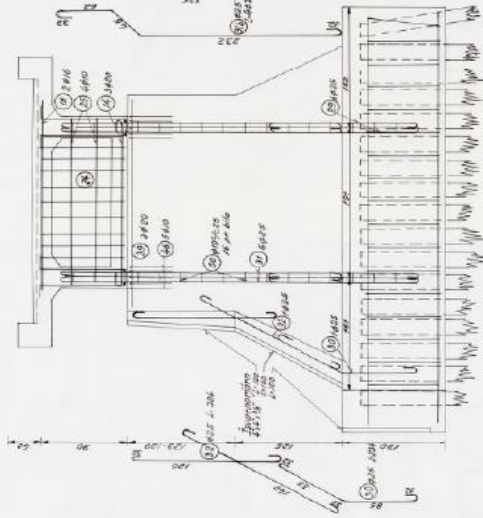
Zhang, J. Q., Ren, H. W., & Yu, B. (2011). Failure testing of a full-scale reinforced concrete T-girder bridge. *Advanced Materials Research*, 243-249.

# Viðauki A – Teikningasett Steinavötn

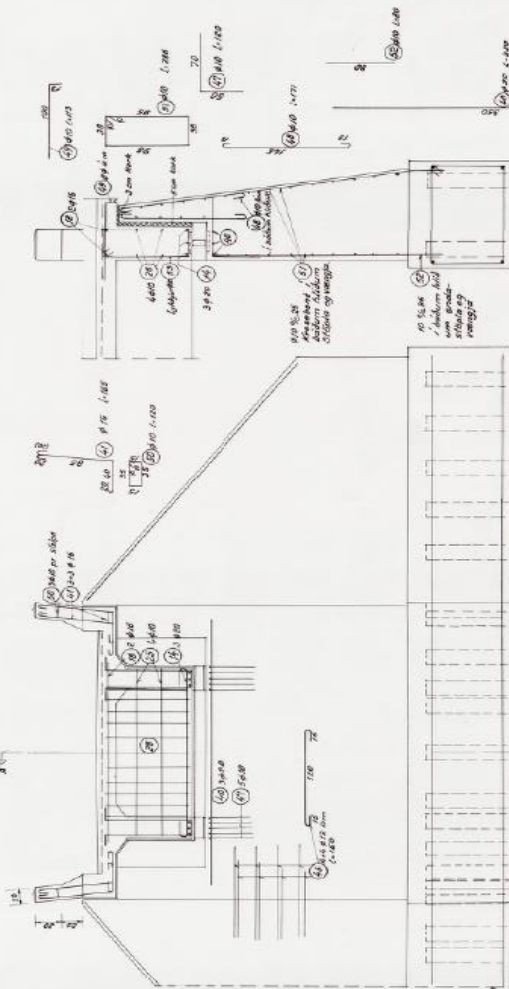


<b>VEGAGERÐ RÍKISINS</b>	
STEINAVÖTN	
A-Stöf. Aukalandsvegur	
Stöpp. bitarú	Yfirfl. mynd
44-4-14-14 - 100 m	B-3.5 m
M: 1:100	Reykjóni 85-8-84
	A-1288
	B-4277
	Stær. Skilv. 1:100
	Stær. Skilv. 1:100
	Bl. nr. 1

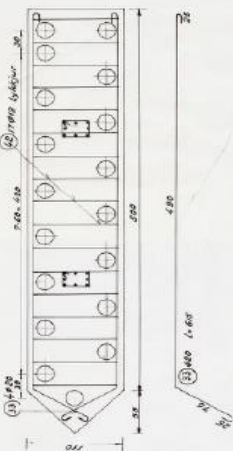
MILLISTÖPULL  
1:25



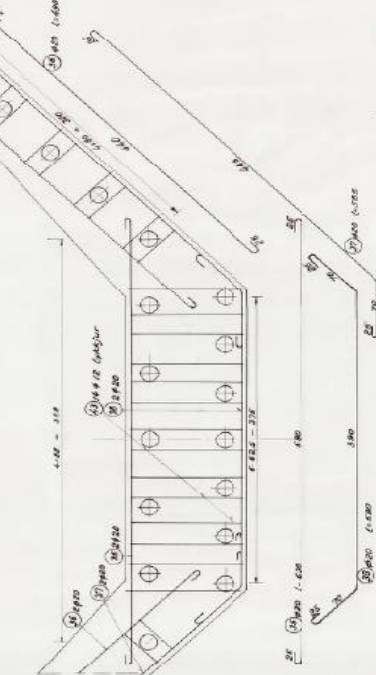
ENDASTÖPULL  
1:25



SÖKKULL MILLISTÖPULLS



SÖKKULL ENDASTÖPULLS



Sendid millist. 1:100

**VEGAGERD RIKISINS**  
STEINAVÖTTUN

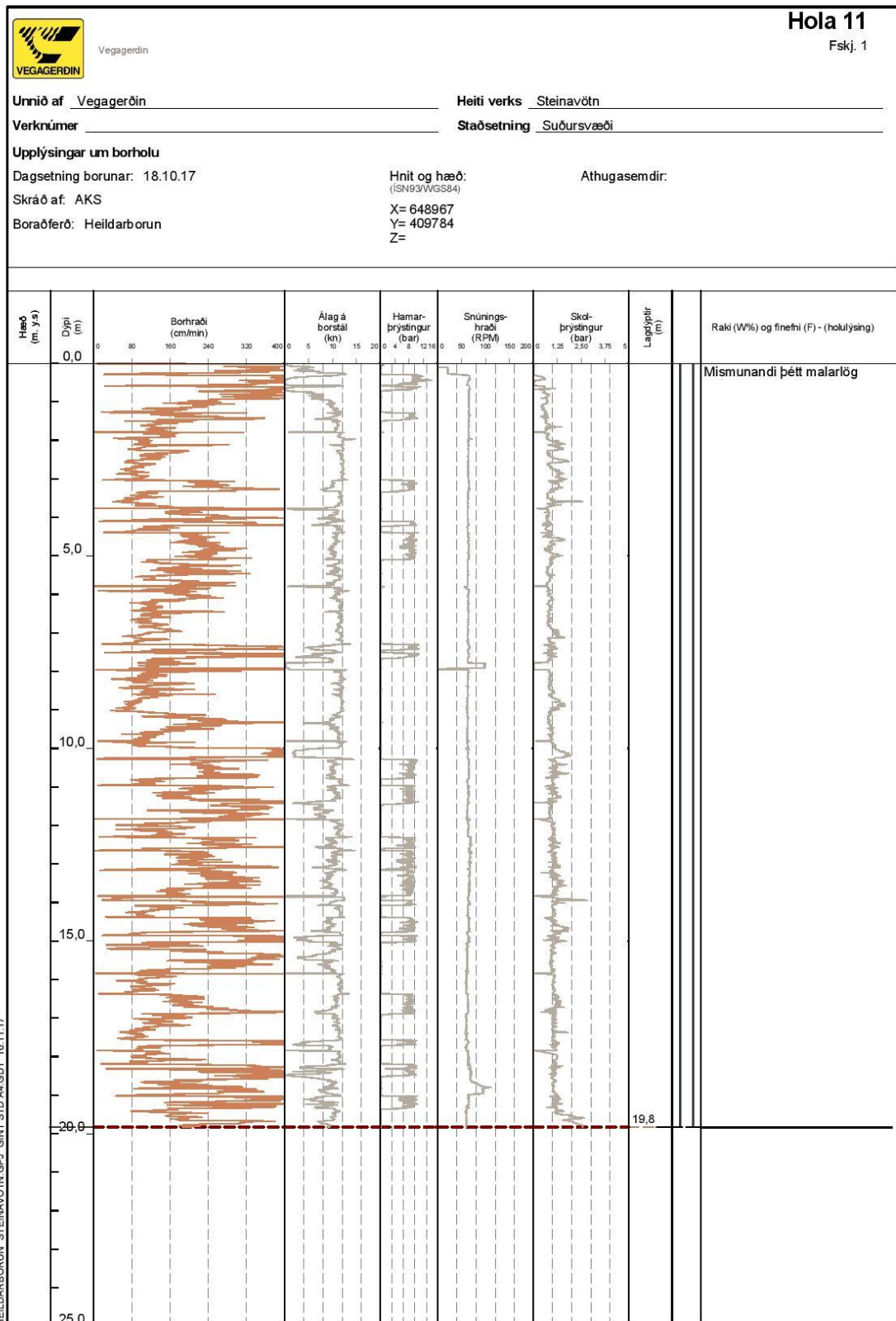
A - Skraffi.	Austur-fornásgæstur
Stærst dítædni	Jörnirólpa stöðla
1:100-1:25 - 1:50 m	B-3:3 - 1/4-1/4 m
M. 103	Þrygjavík 10-2-04 A-120
	Stóri Stúlkví
	B-4:20
	Bull nr. 2

I millistöðla aðra en millistöðla komi,  
 1:100-1:25 og 1:50 m. A-120 m. A-120  
 I endastöðla komi 1:100-1:25 og 1:50 m. A-120 m. A-120





# Viðauki B – Heildarborun







Vegagerðin

Hola 12

Fskj. 2

Unnið af Vegagerðin Heiti verks Steinavötn

Verknúmer \_\_\_\_\_ Staðsetning Suðursvæði

Upplýsingar um borholu

Dagsetning borunar: 18.10.17

Hnit og hæð:  
(ISN93/WGS84)

Athugasemdir:

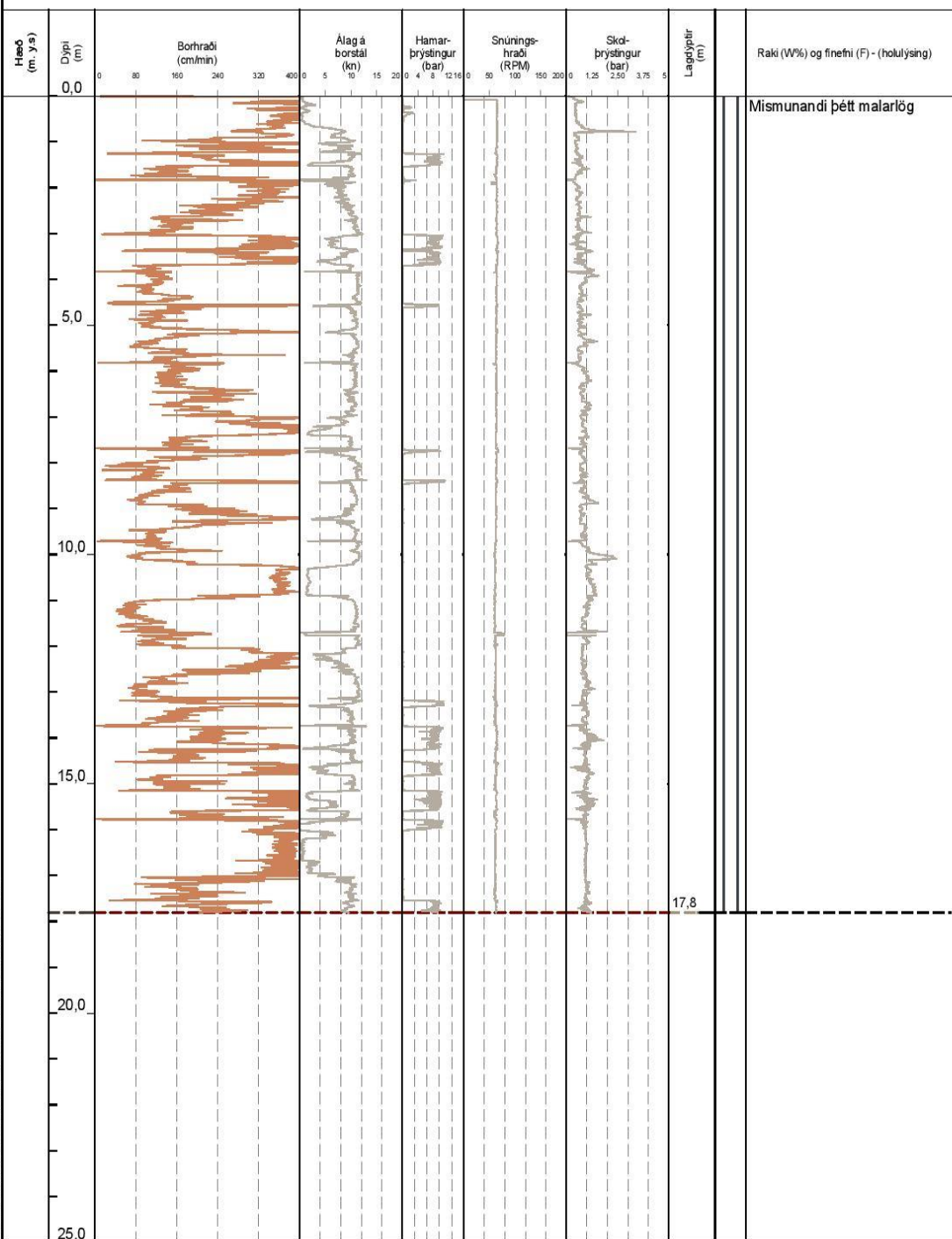
Skráð af: AKS

X= 648978

Y= 409777

Z=

Boraðferð: Heildarborun



HEILDARBORUN STEINAVÖTN.GPJ\_GINT STD A4.GDT 18.11.17



Vegagerðin

Hola 21

Fskj. 3

Unnið af Vegagerðin

Heiti verks Steinavötn

Verknúmer

Staðsetning Suðursvæði

Upplýsingar um borholu

Dagsetning borunar: 17.10.17

Hnit og hæð:  
(ISN93/WGS84)

Athugasemdir:

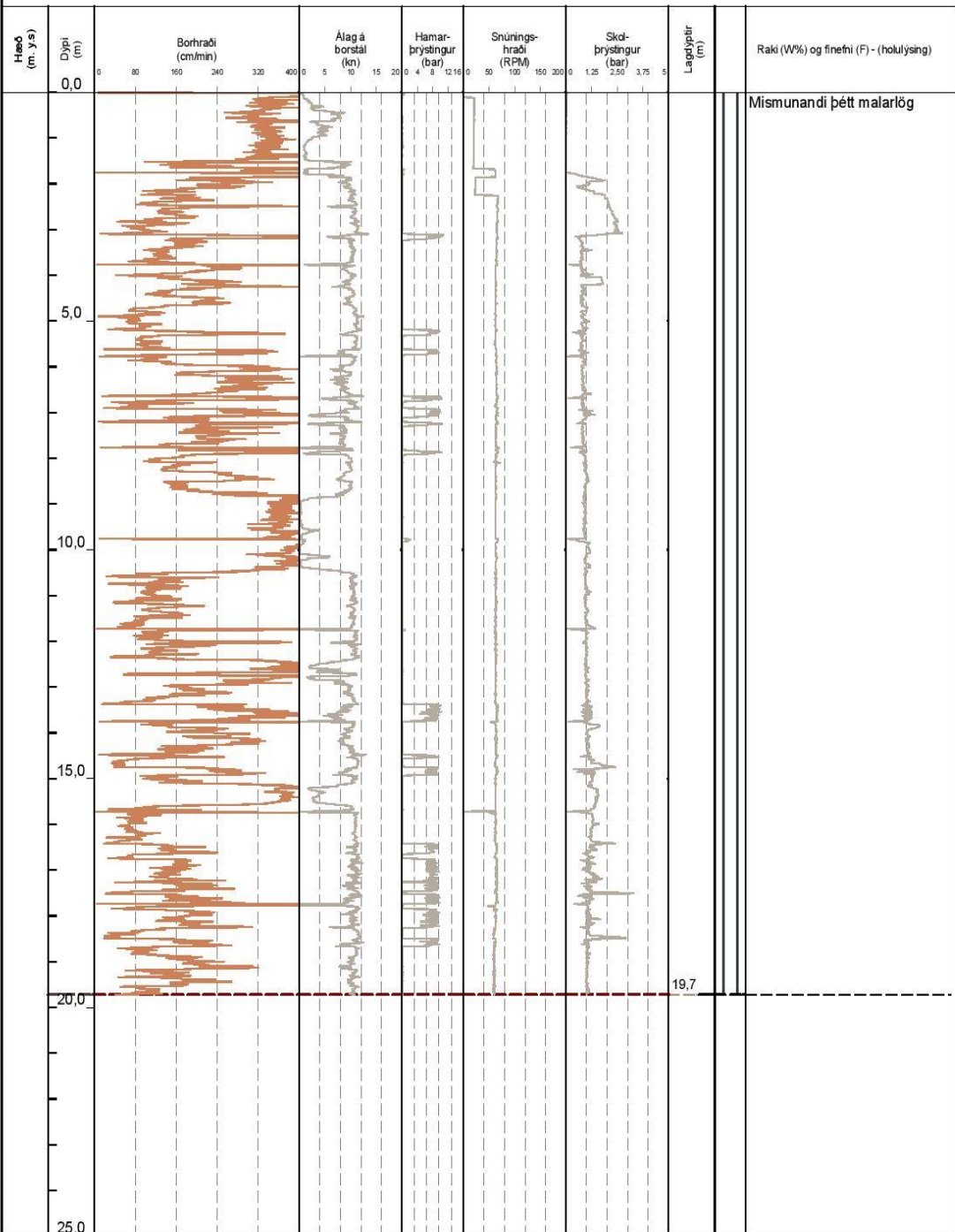
Skráð af: AKS

X= 649001

Y= 409816

Z=

Boraðferð: Heildarborun



HEILDARBORUN STEINAVÖTN.GPJ\_GINT STD A4.GDT\_16.11.17



Vegagerdin

Hola 22

Fskj. 4

Unnið af Vegagerðin Heiti verks Steinavötn

Verknúmer \_\_\_\_\_ Staðsetning Suðursvæði

**Upplýsingar um borholu**

Dagsetning borunar: 17.10.17

Hnit og hæð:  
(ISN93/WGS84)

Athugasemdir:

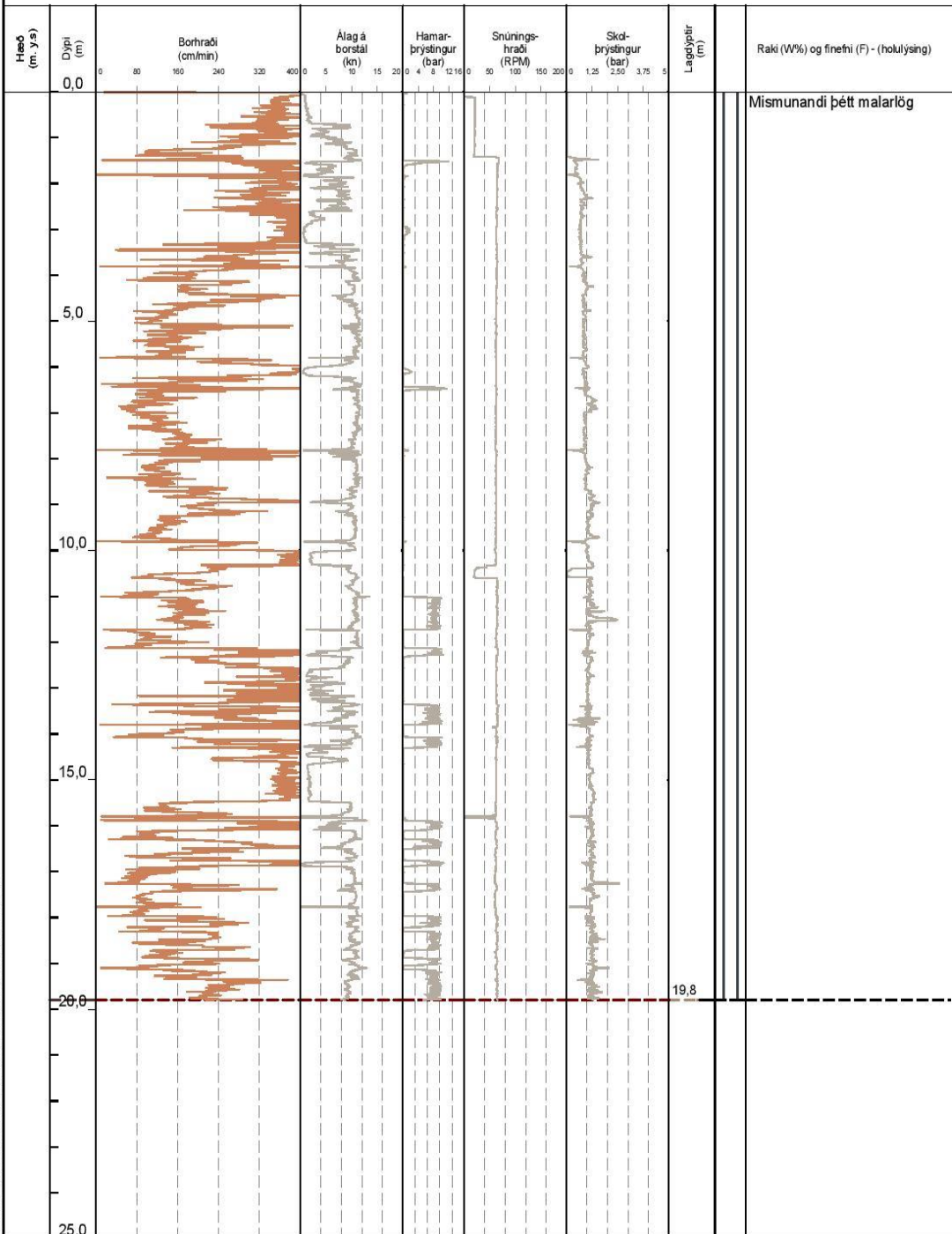
Skráð af: AKS

X= 649009

Y= 409806

Z=

Boraðferð: Heildarborun



HEILDARBORUN STEINAVÖTN GPJ GINT STD A4.GDT 16.11.17



Vegagerðin

Hola 31

Fskj. 5

Unnið af Vegagerðin

Heiti verks Steinavötn

Verknúmer

Staðsetning Suðursvæði

Upplýsingar um borholu

Dagsetning borunar: 17.10.17

Hnit og hæð:  
(ISN93/WGS84)

Athugasemdir:

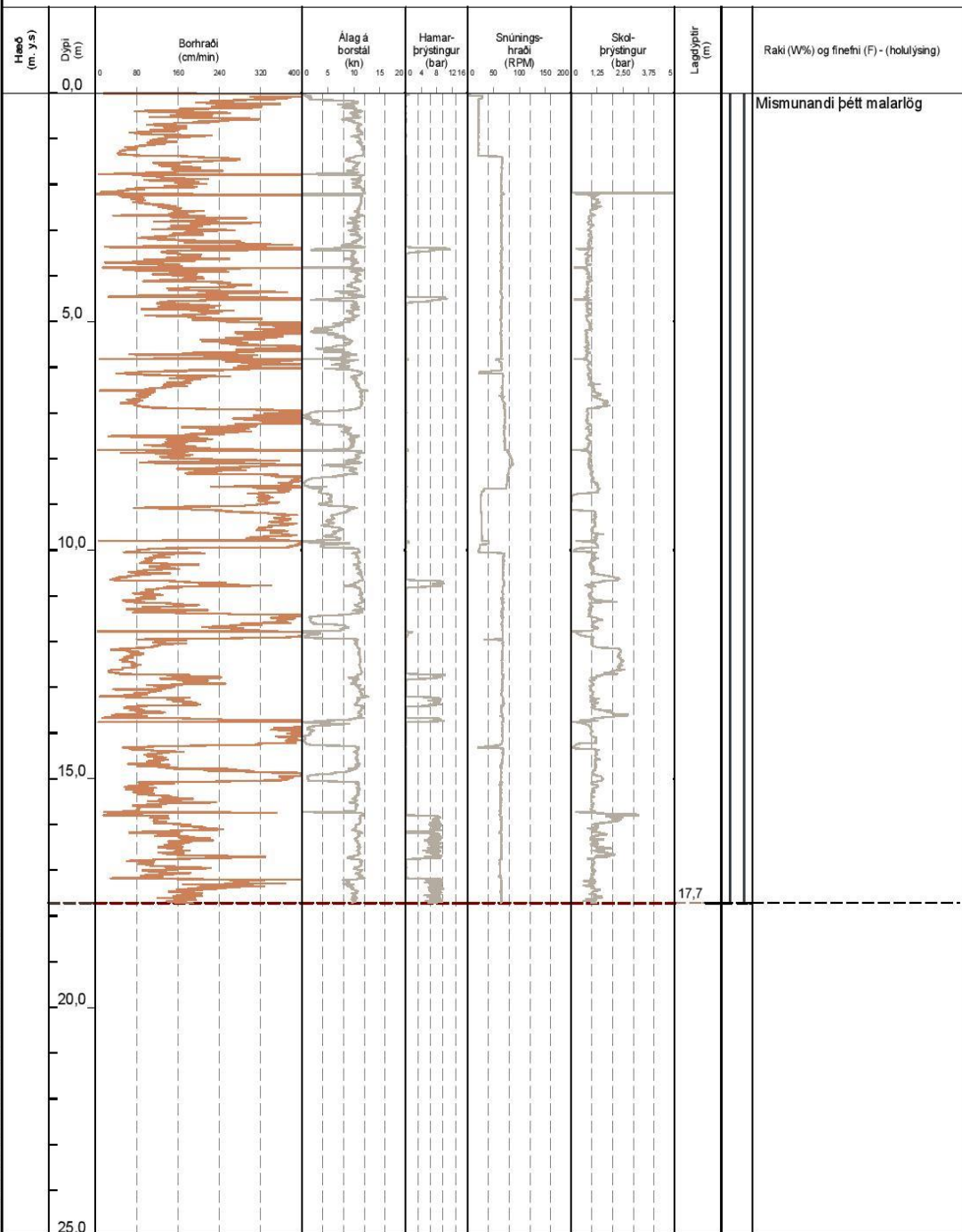
Skráð af: AKS

X= 649023

Y= 409838

Z=

Boraðferð: Heildarborun



HEILDARBORUN\_STEINAVÖTN.GPJ\_GINT\_STD.A4.GDT\_16.11.17



Vegagerðin

Hola 32

Fskj. 6

Unnið af Vegagerðin Heiti verks Steinavötn  
 Verknúmer \_\_\_\_\_ Staðsetning Suðursvæði

Upplýsingar um borholu

Dagsetning borunar: 18.10.17

Hnit og hæð:  
(ISN93/WGS84)

Athugasemdir:

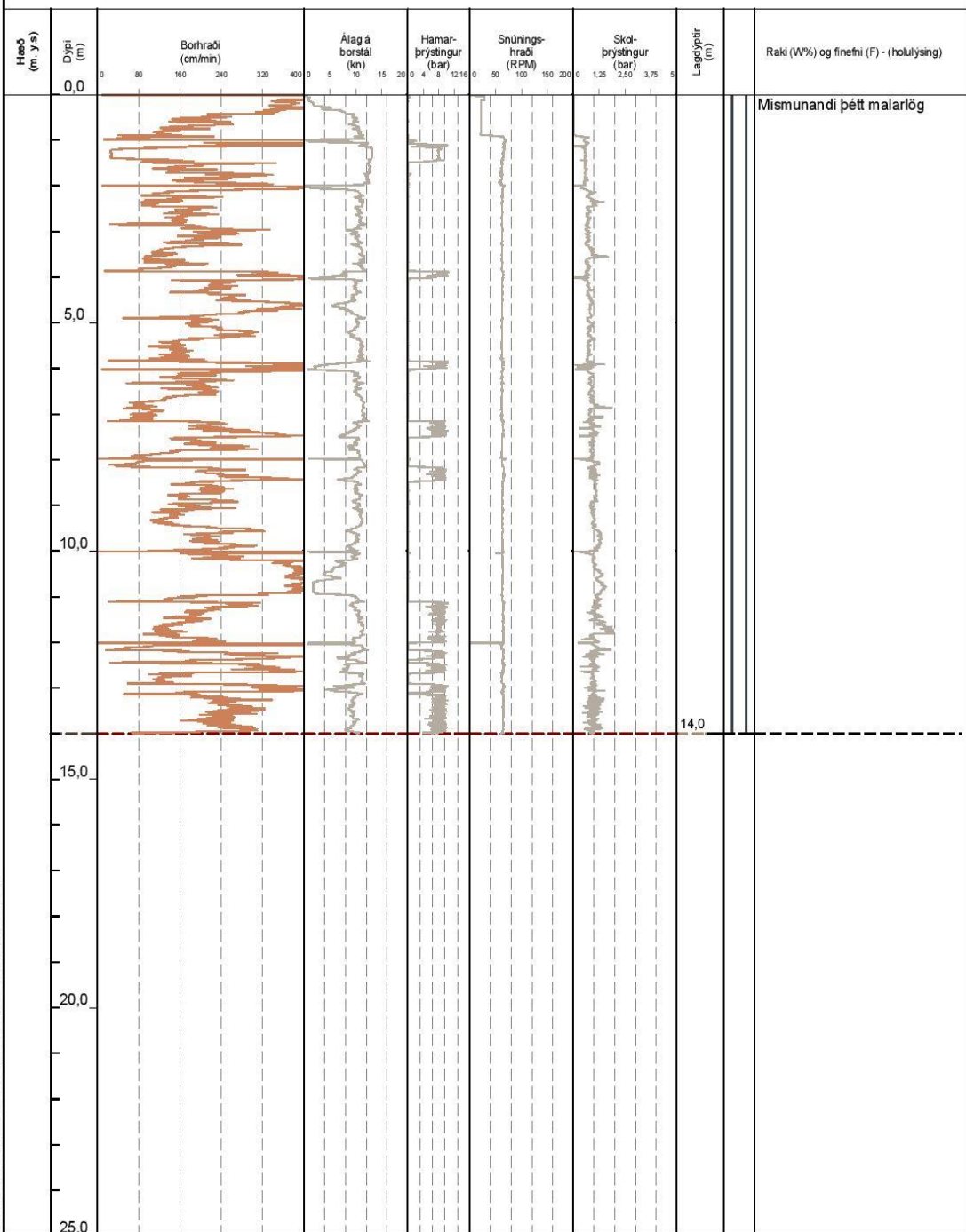
Skráð af: AKS

X= 649030

Y= 409829

Z=

Boraðferð: Heildarborun



HEILDARBORUN STEINAVÖTN.GPJ GINT STD A4.GDT 16.11.17





Vegagerdin

Hola 41

Fskj. 7

Unnið af Vegagerðin Heiti verks Steinavötn

Verknúmer \_\_\_\_\_ Staðsetning Suðursvæði

Upplýsingar um borholu

Dagsetning borunar: 17.10.17

Hnit og hæð:

Athugasemdir:

Skráð af: AKS

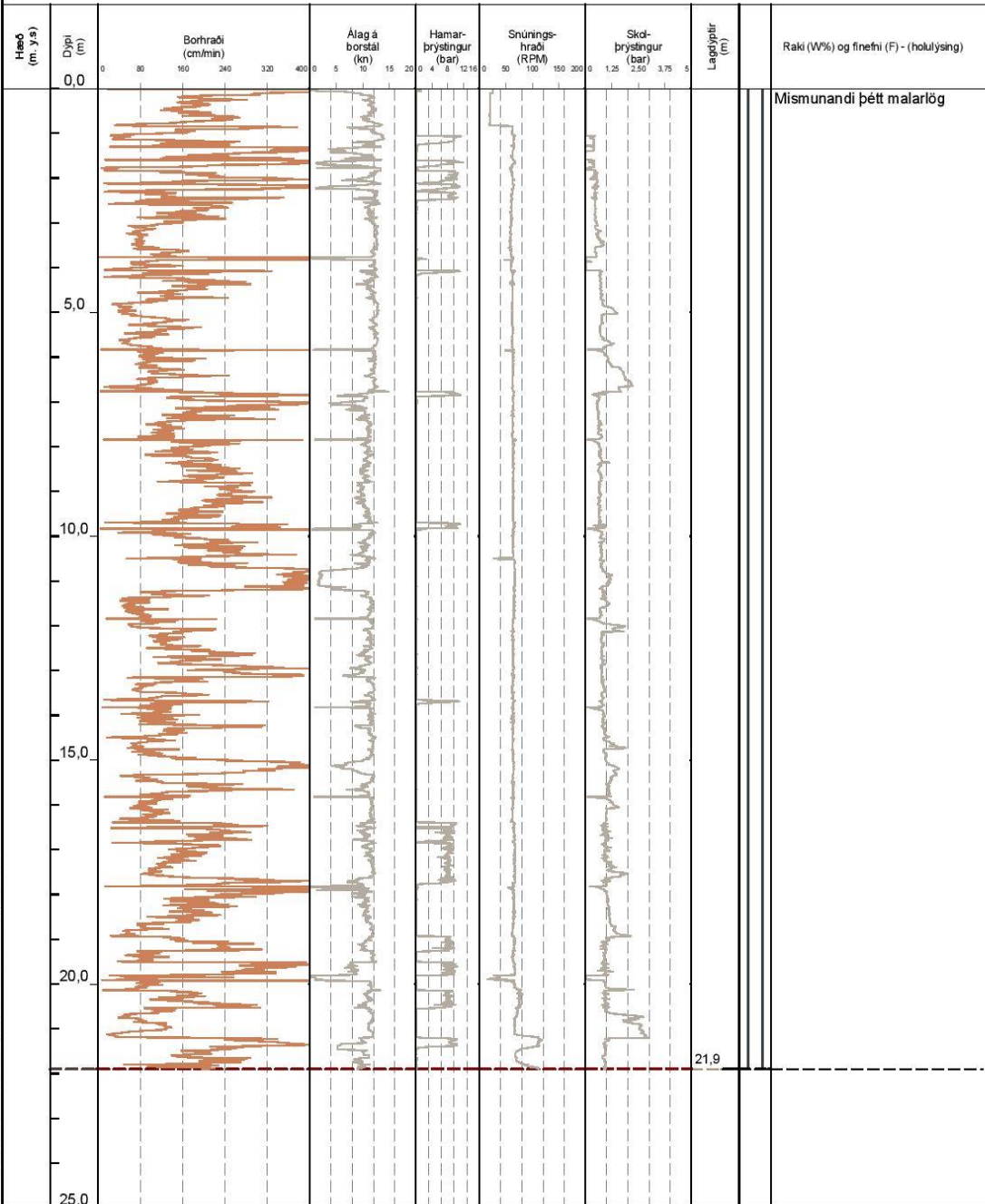
(ISN93/WGS84)

X= 649042

Y= 409854

Z=

Boraðferð: Heildarborun



HEILDARBORUN STEINAVÖTN.GPJ\_GINT.STD.A4.GDT\_16.11.17



Vegagerðin

Hola 42

Fskj. 8

Unnið af Vegagerðin

Heiti verks Steinavötn

Verknúmer

Staðsetning Suðursvæði

Upplýsingar um borholu

Dagsetning borunar: 18.10.17

Hnit og hæð:

Athugasemdir:

Skráð af: AKS

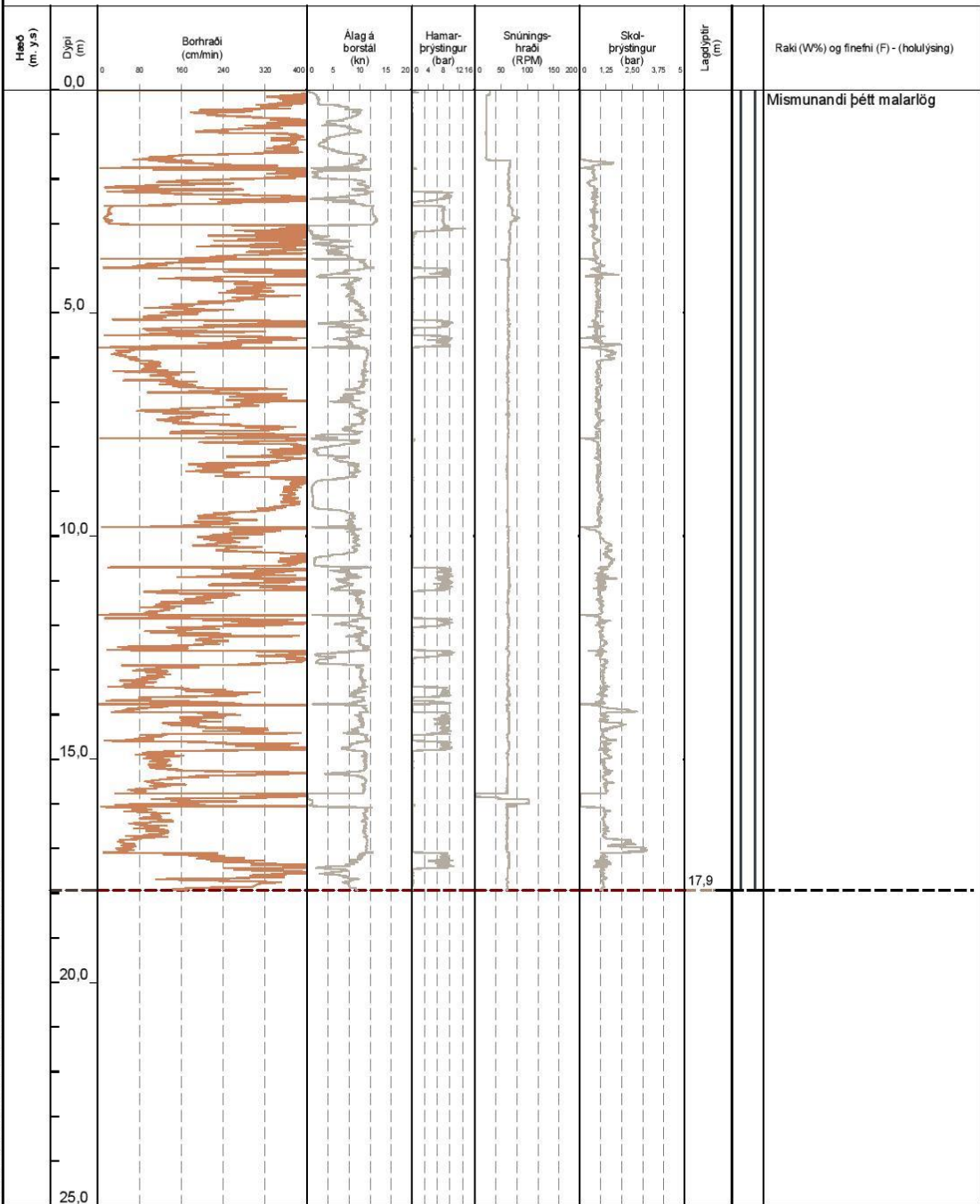
(ISN93/WGS84)

X= 649056

Y= 409849

Z=

Boraðferð: Heildarborun



HEILDARBORUN STEINAVÖTN.GPJ\_GINT STD A4.GDT 18.11.17



Vegagerdin

Hola 51

Fskj. 9

Unnið af Vegagerðin Heiti verks Steinavötn

Verknúmer \_\_\_\_\_ Staðsetning Suðursvæði

Upplýsingar um borholu

Dagsetning borunar: 17.10.17

Hnit og hæð:

Athugasemdir:

Skráð af: AKS

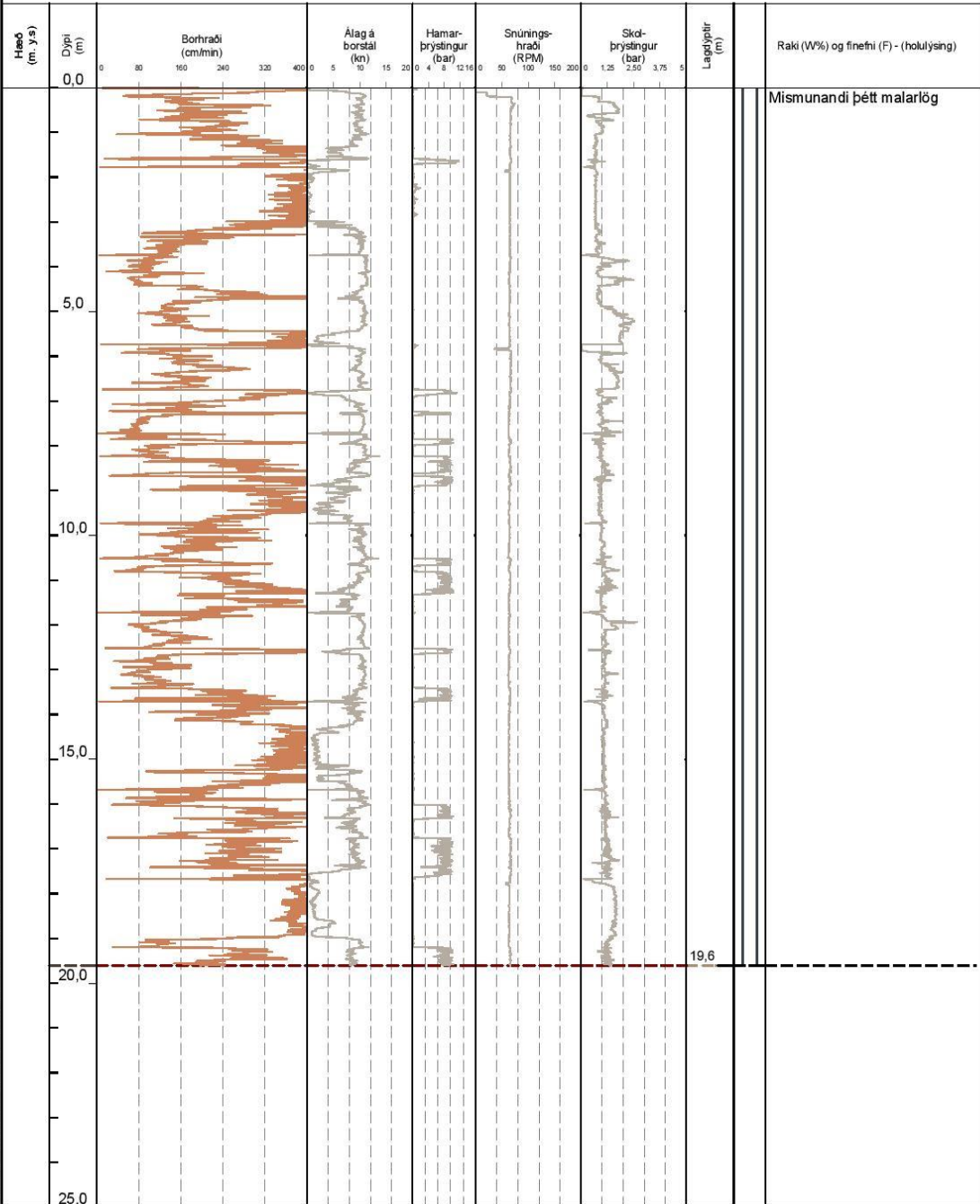
(ISN93/WGS84)

X= 649055

Y= 409867

Z=

Boraðferð: Heildarborun



HEILDARBORUN STEINAVÖTN.GPJ\_GINT.STD.A4.GDT.16.11.17





Vegagerðin

Hola 52

Fskj. 10

Unnið af Vegagerðin Heiti verks Steinavötn  
 Verknúmer \_\_\_\_\_ Staðsetning Suðursvæði

**Upplýsingar um borholu**

Dagsetning borunar: 17.10.17

Hnit og hæð:

Athugasemdir:

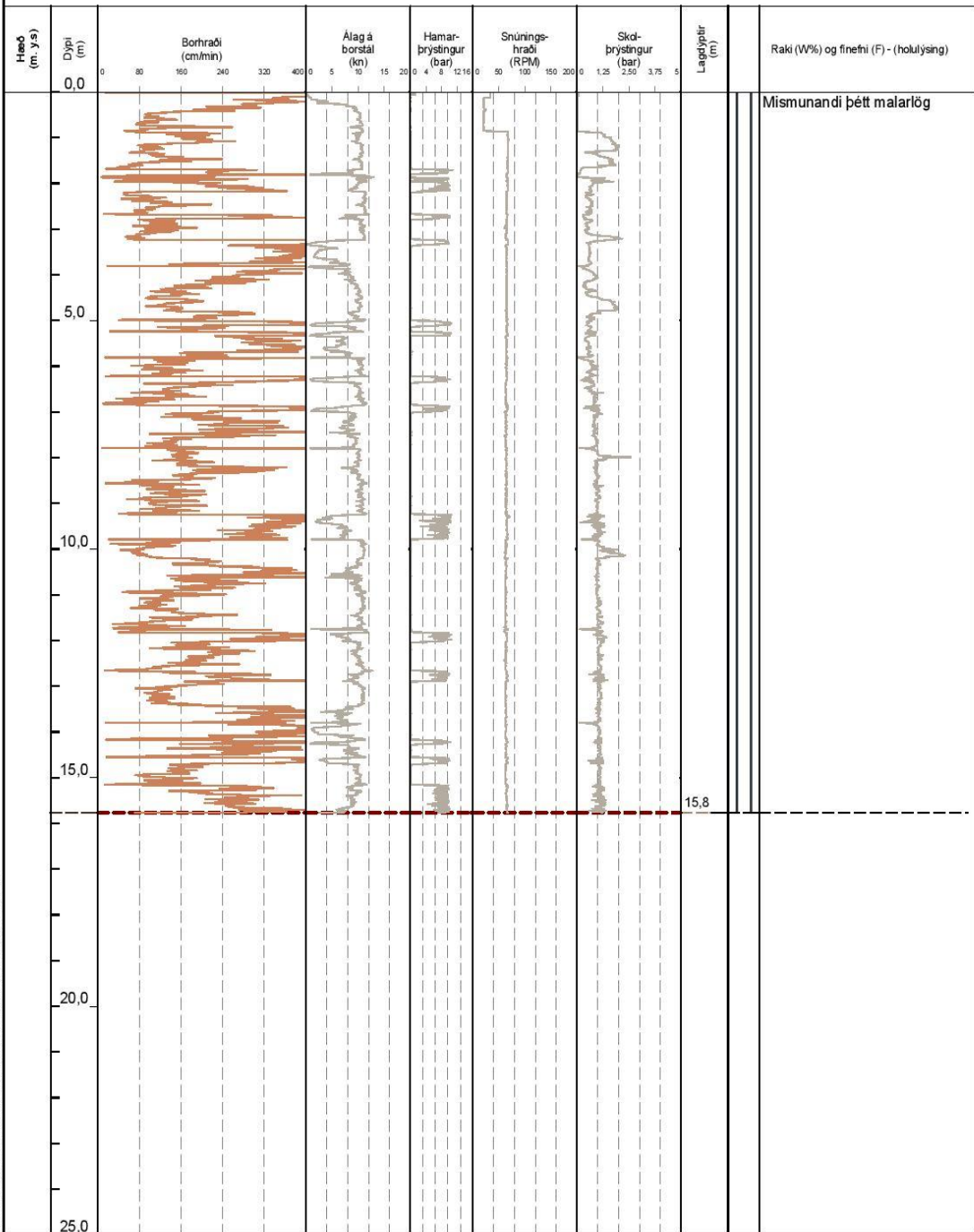
Skráð af: AKS

(ISN93/WGS84)

X= 649066

Y= 409854

Z=



HEILDARBORUN STEINAVÖTN GPJ GINT STD A4.GDT 16.11.17



Vegagerðin

Hola 61

Fskj. 11

Unnið af Vegagerðin

Heiti verks Steinavötn

Verknúmer

Staðsetning Suðursvæði

Upplýsingar um borholu

Dagsetning borunar: 17.10.17

Hnit og hæð:  
(ISN93/WGS84)

Athugasemdir:

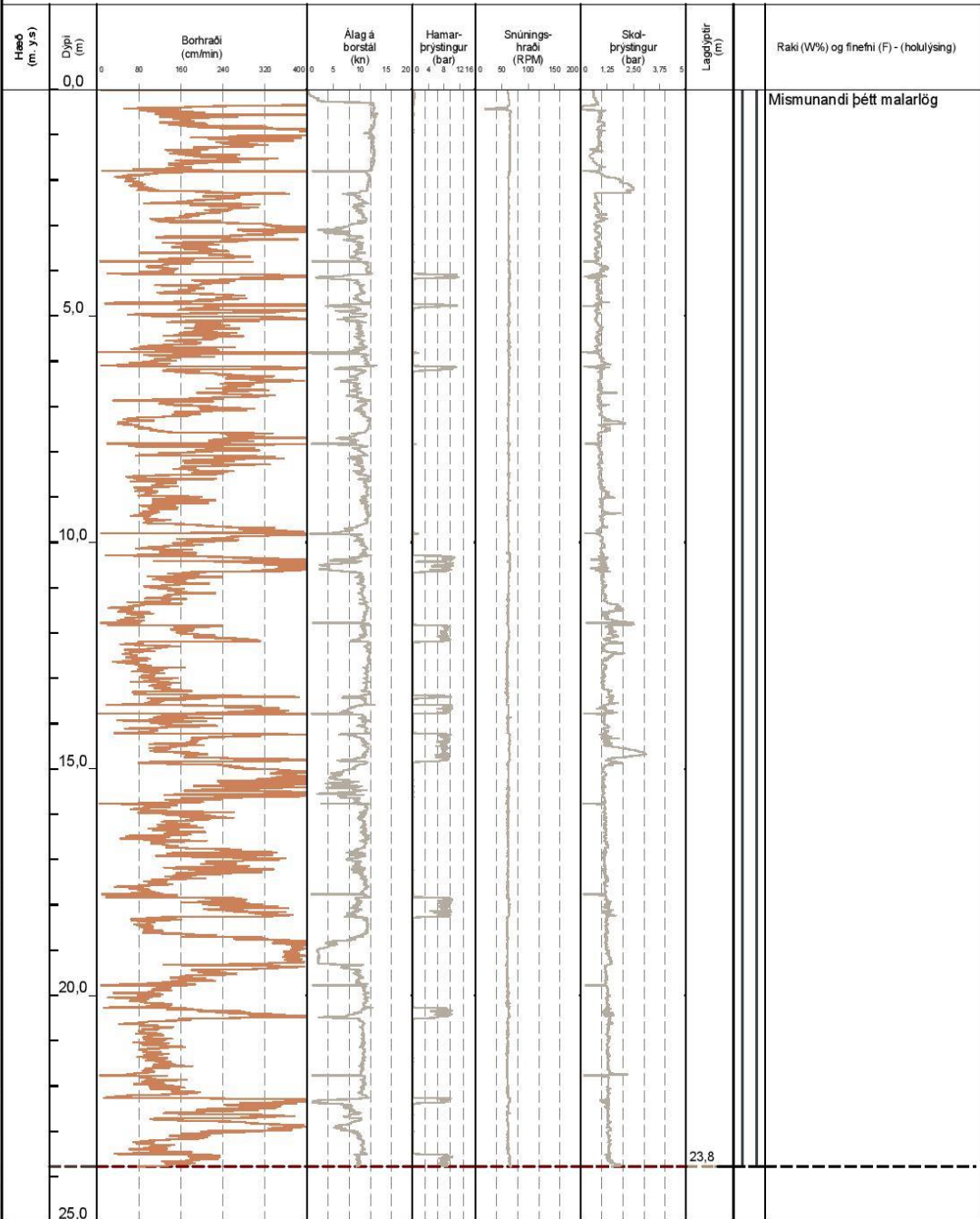
Skráð af: AKS

X= 649097

Y= 409910

Z=

Boraðferð: Heildarborun



HEILDARBORUN\_STEINAVÖTN.GPJ\_GINT\_STD A4.GDT\_16.11.17



Vegagerðin

Hola 62

Fskj. 12

Unnið af Vegagerðin Heiti verks Steinavötn  
 Verknúmer \_\_\_\_\_ Staðsetning Suðursvæði

Upplýsingar um borholu

Dagsetning borunar: 17.10.17

Hnit og hæð:

Athugasemdir:

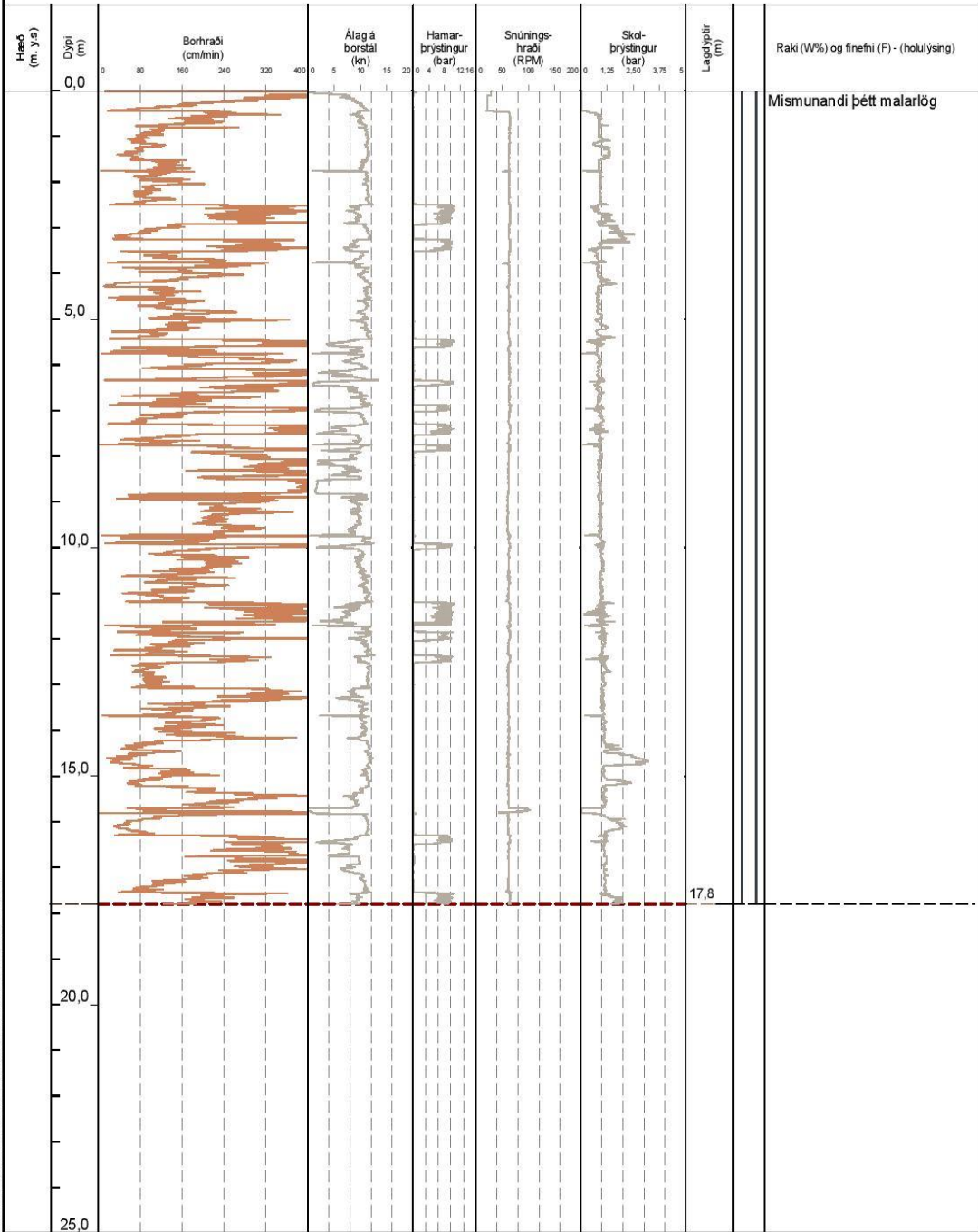
Skráð af: AKS

X= 649110

Y= 409893

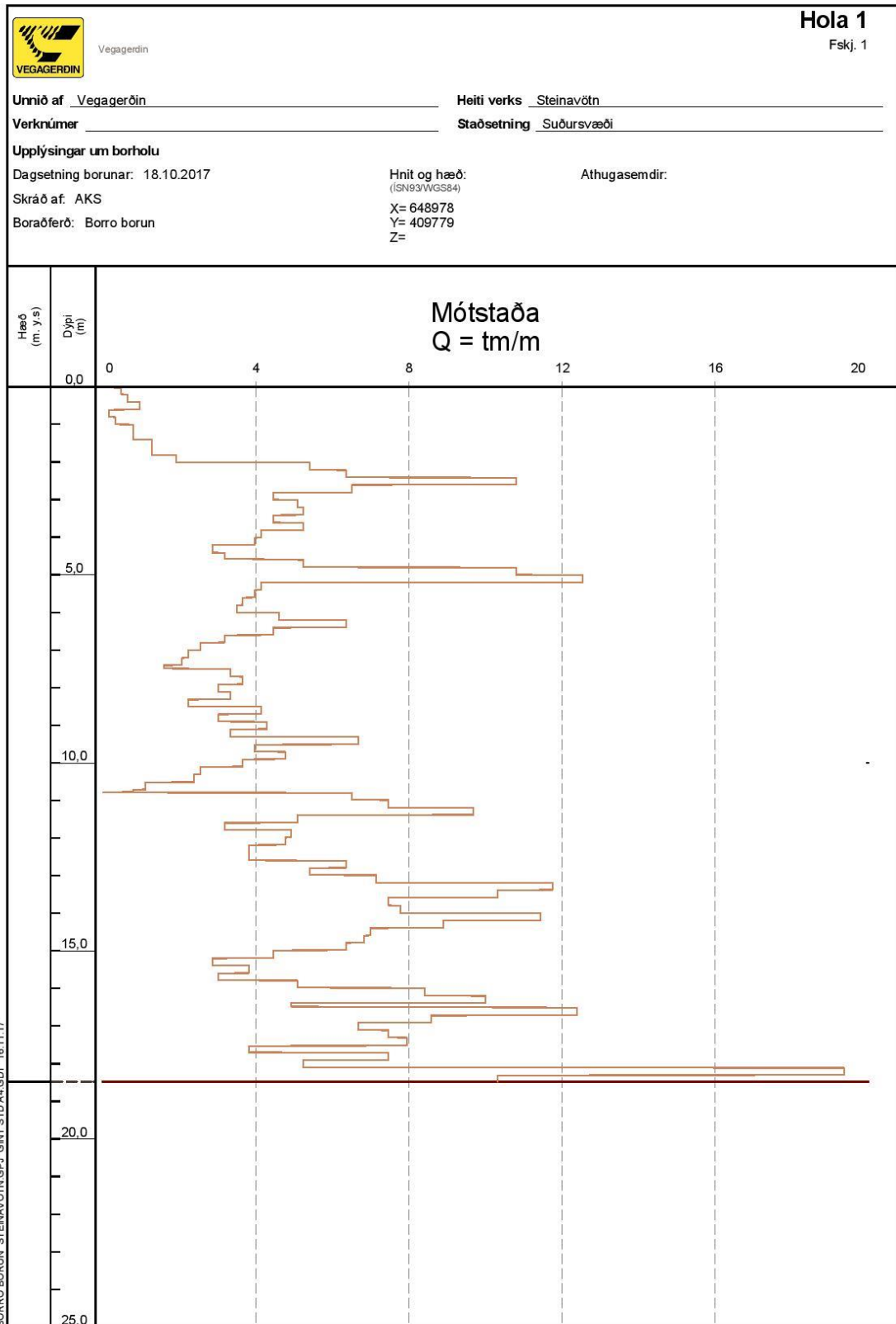
Z=

Boraðferð: Heildarborun



HEILDARBORUN STEINAVÖTN GPJ\_GINT STD A4.GDT 16.11.17

# Viðauki C – Borroborun





Vegagerðin

Hola 4

Fskj. 2

Unnið af Vegagerðin Heiti verks Steinavötn  
Verknúmer \_\_\_\_\_ Staðsetning Suðursvæði

Upplýsingar um borholu

Dagsetning borunar: 19.10.2017

Hnit og hæð:  
(ISN93/WGS84)

Athugasemdir:

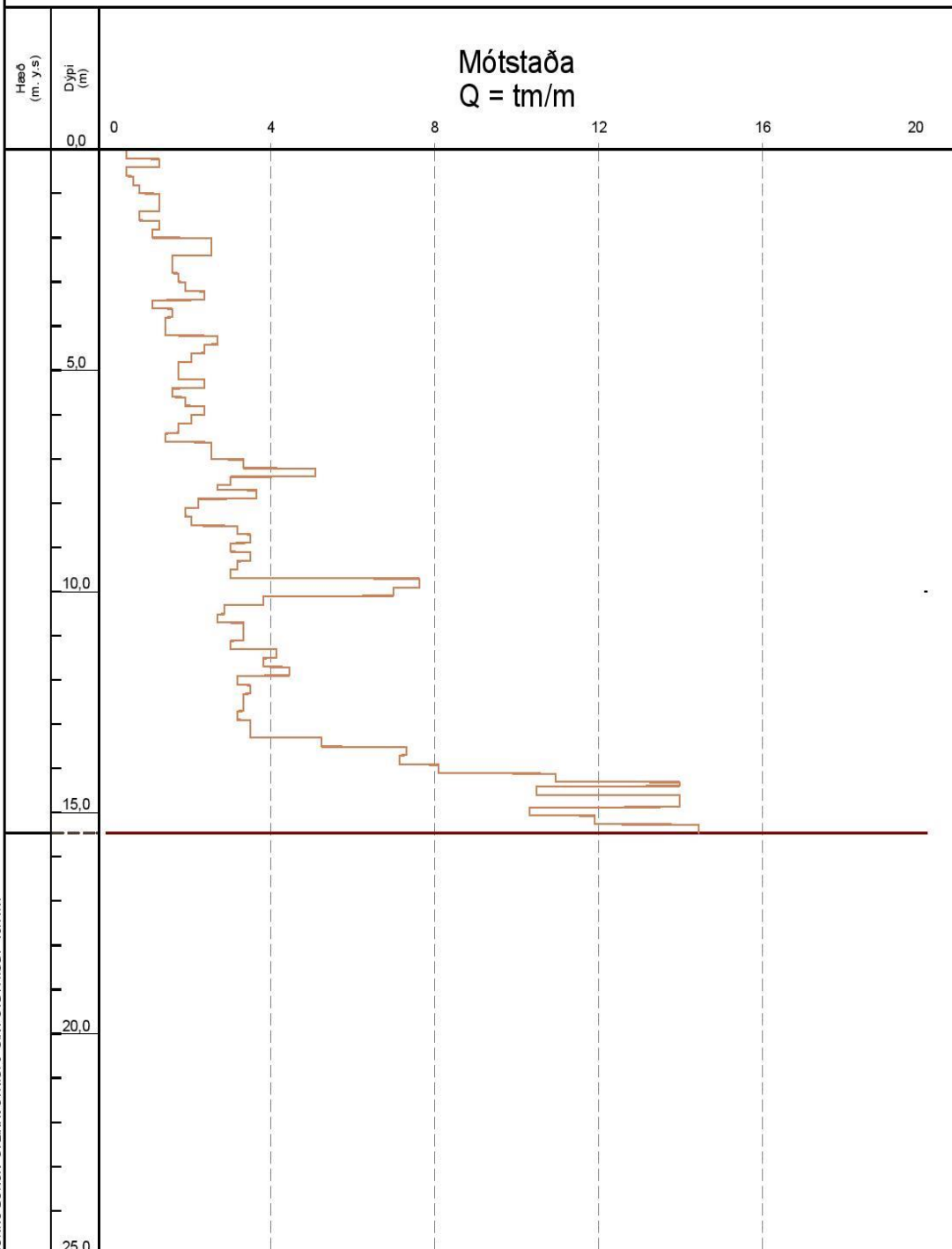
Skráð af: AKS

X= 649040

Y= 409855

Z=

Boraðferð: Borro borun





Vegagerðin

Hola 6

Fskj. 3

Unnið af Vegagerðin

Heiti verks Steinavötn

Verknúmer \_\_\_\_\_

Staðsetning Suðursvæði

**Upplýsingar um borholu**

Dagsetning borunar: 19.10.2017

Hnit og hæð:  
(ISN93/WGS84)

Athugasemdir:

Skráð af: AKS

X= 649095

Y= 409911

Z=

Boraðferð: Borro borun

