

Reykjavík, 3. apríl 2024

Lokaskýrsla til Rannsóknasjóðs Vegagerðarinnar

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

Verkefni: Brotskúfáraun notuð til burðarvirkisauðkenningar á steinsteyptri bitabré yfir Steinavötn

Verkefnanúmer: 1800-946

Verkefnastjóri: Dórótea Høeg Sigurðardóttir, lektor, umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands

Þátttakendur:

Bjarni Bessason, prófessor, umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands

Ching-Yi Tsai, rannsóknasérfræðingur, umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands

Guðmundur Valur Guðmundsson, framkvæmdastjóri Vegagerðarinnar

Ólafur Sveinn Haraldsson, forstöðumaður rannsóknadeildar Vegagerðarinnar

Þorkell Jón Tryggvason, meistaraneandi, umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands

Markmið:

Tilgangur rannsóknaverkefnisins er að auka skilning á hegðun steinsteyptra brúa undir stigvaxandi álagi allt að brotmörkum, þá sérstaklega skúfhegðun járnbennta steypubita. Markmiðið er að herma með tölvutækum reiknilíkönum hegðun á brúnni yfir Steinavötn sem skemmdist í aftakaflóðum haustið 2017 og var metin ónýt eftir þá atburði. Brúin var prófuð til brots sumarið 2019 þar sem mikilvæg gögn voru skráð áður en hún var rifin og fjarlægð af upprunalegu brúarstæði.

Verkefnið hefur eftirfarandi markmið:

- Bera saman tvær ólínulegar líkanagerðir og hæfni þeirra til þess að herma skúfsvörun allt að brotmörkum.
- Meta hæfni og kröfur til slíkra líkana.
- Auðkenna burðarvirki steinsteyptar bitabréar með kvörðun á reiknilegum líkönum út frá mældum gögnum þar sem einkum verður stuðst við gögn frá ljósleiðarastreitunum.

Leitast var við að svara eftirfarandi rannsóknarspurningum:

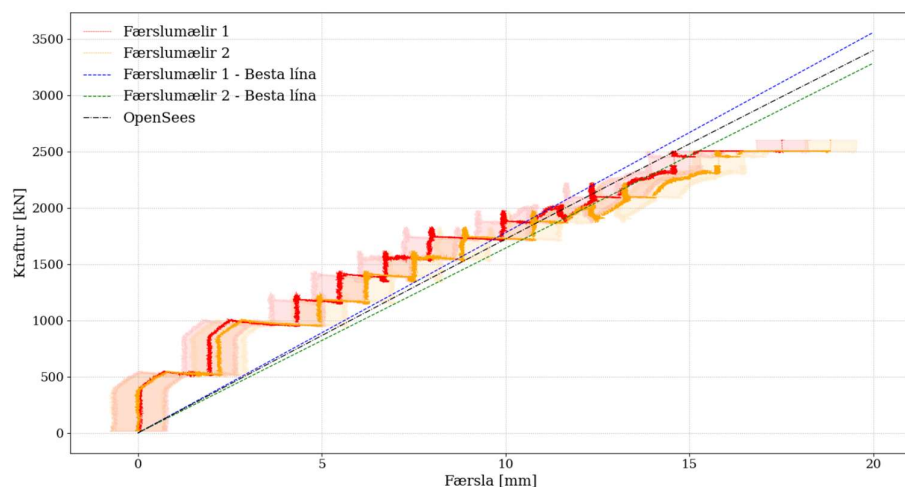
1. Hvort er trefjabita- eða bitastangalíkan betur til þess fallið að herma skúfbrot járnbenntar steinsteyptar bitabréar?
2. Hver er raunhegðun járnbennta steinsteypubita í fullri stærð undir skúfáraun allt að brotmörkum?

Samantekt:

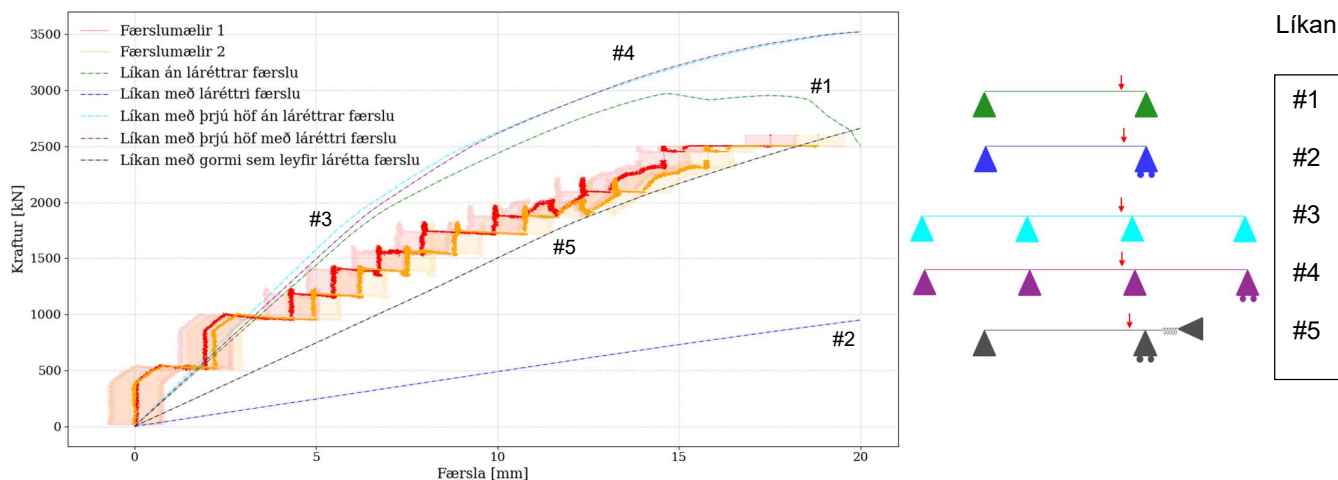
Megin rannsóknarafurð verkefnisins er meistararitgerð skrifuð af Þorkatli Jóni Tryggvasyni sem var samþykkt 31. maí 2023 og má finna á eftirfarandi vefslóð: <http://hdl.handle.net/1946/44558>. Verkefnið var kynnt með plakati á rannsóknaráðstefnu Vegagerðarinnar og á Meistaradegi Verkfræðistofnunar. Auk þess er vinna með ljósleiðaranemastreitugögnin hafin og frumniðurstöður greiningar á þeim gefa ástæðu til hóflegar bjartsýni.

Tölulegar greiningar

Álagsprófið á brúnni var framkvæmt 17. september 2019. Lóðréttum krafti var beitt í tveggja metra fjarlægð frá millistöpli og var krafturinn aukinn eftir skilgreindri álagsáætlun, sjá fyrstu þrjá dálkana á mynd 4. Í meistaraverkefninu var gerð ítarleg greining á brúnni yfir Steinavötn í OpenSees hugbúnaðinum. Tveimur líkönum var stillt upp. Annars vegar trefjabitalíkani og hins vegar bitastangalíkani. Í trefjabitalíkani er hægt að skipta þversniðinu upp í þræði með mismunandi efniseiginleika. Þar með er hægt að áætla nákvæma dreifingu skemmda í byggingareiningum. Í bitastangalíkani eru burðareiningar settar upp í líkani á þann hátt að þeim er skipt niður í smærri einingar með hnútpunktum sem hafa sex frelsisgráður. Lóðréttar, láréttar og skáhallar bita- og stangaeiningar eru notaðar til þess að tengja hnútpunktana saman. Niðurstöður úr líkönunum voru bærar saman við niðurbeygjur á miðju hafi brúarinnar. Trefjabitalíkanið hermí niðurstöður álagsprófanna sem gerð voru á brúnni illa, sjá mynd 1. Þó má geta þess að niðurbeygjan sem líkanið spáir fyrir um fellur á milli bestu línu úr gögnum færslunemanna. Líkanið ofmetur einnig styrk brúarinnar. Bitastangalíkanið hermí niðurstöður álagsprófanna betur með tilliti til niðurbeygju á miðju hafi og brotstyrkur brúarinnar er mun líklegri en í trefjabitalíkani, sjá mynd 2. Greining á undirstöðuskilyrðum leiddi í ljós að líklega gefur millistöpullinn næst kraftinum eitthvað eftir þegar álagið er orðið mikið og leyfir því einhverja lárétta færslu. Ekki vannst tími innan meistaraverkefnisins að greina þessa hegðun til hlítar. Bitastangalíkanið veitir líka möguleika á ítarlegri greiningu á skersvörun brúarinnar en trefjabitalíkanið.



Mynd 1: Kraftur sem fall af niðurbeygju á miðju hafi brúar með notkun trefjabitalíkans borinn saman við mælingar. Skyggð svæði sýna óvissu í mælingum [1].

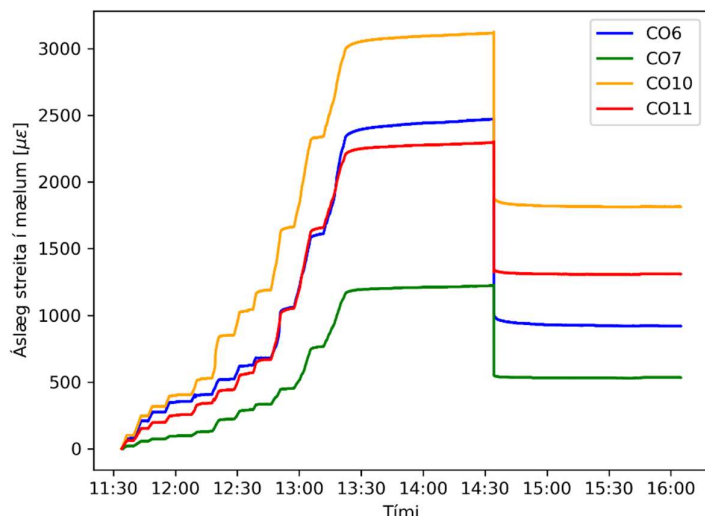


Mynd 2: Niðurstöður bitastangalíkans í OpenSees. Litur ferils samsvarar sama lit á undirstöðuskilyrðum í líkani [1].

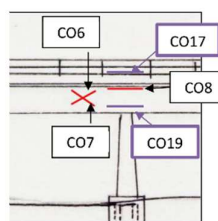
Ljósleiðaranemagögnin

Frumvinnsla gagnanna úr krosslögðu ljósleiðaranemunum er vel á veg komin, sjá mynd 3. Gæði og innihald allra gagnanna er ekki þekkt að fullu. Þó er ljóst að nokkur skekkja getur verið í þeim þar sem mælingar á hitastigsbreytingum átti sér aðeins stað á tveimur stöðum samhliða streitumælingunum. Það er því ekki mögulegt að leiðrétta að fullu fyrir hitastigsáhrifum í sjálfum ljósleiðaranum. Til dæmis má sjá af myndum að stundum nýtur sólar á neðri hluta bitans en sá efri er í skugga. Þetta getur haft töluverð áhrifa á mælinguna. Hvað krosslögðu ljósleiðaranemana varðar þá geta þessi áhrif verið minni en fyrir hina nemana þar sem skúfstreitan er fundin með mismun á áslægum streitumælingum.

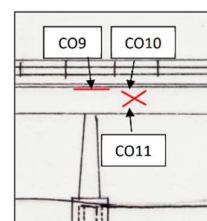
Það er krefjandi áskorun að túlka mæligögnin vegna þess hvernig tilraunin var hönnuð. Staki krafturinn er beint yfir krosslögðu streitunemunum, þeir eru því að mæla streitu í mjög trufluðu streituástandi. Sem fyrsta nálgun verður litið fram hjá þessu og ályktanir dregnar út frá mynd 3. Töluverð varanleg formbreyting verður á brúnni, þetta sést af því að streitan helst föst hátt yfir núll eftir að álagið er tekið af. Þó er varanlega formbreytingin breytileg milli nema, allt milli 500-2000 $\mu\epsilon$. Stökkin sem streitan tekur í hverju álagsprepi eru einnig mismikil milli nemanna, þetta gefur til kynna að sprungur myndist þvert á nemana.



Suðurhlið:



Norðurhlið:

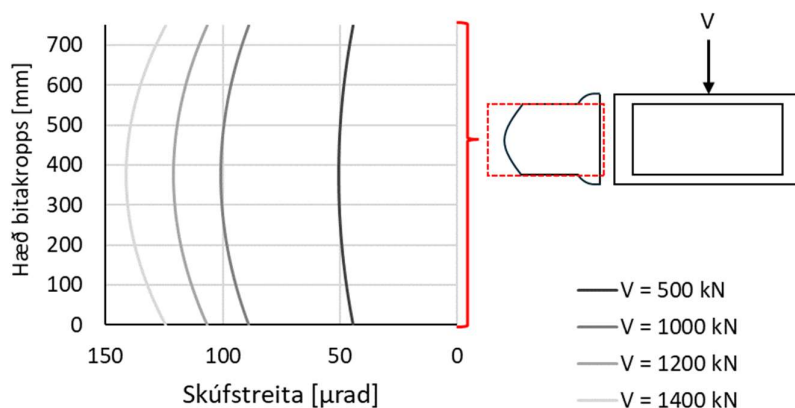


Mynd 3: Vinstri: Streitumælingar með krosslögðum streitunum beint undir álagi. Hægri: Staðsetning nemanna CO6, CO7, CO10 og CO11 samkvæmt skýrslu OSMOS.

Sem fyrstu línulegu nálgun má gera ráð fyrir að brúarbitinn sé holt kassapversnið ef litið er fram hjá að hluti brúargólfsins kragar út fyrir kassann. Þegar gert er ráð fyrir að efnið sé á línulegu fjaðursviði má skrifa skúfstreitu í holu kassapversniði þversniði svona:

$$\gamma = \frac{VA\bar{y}}{2GI_t}$$

þar sem V er skerkraturinn sem verkar á sniðið, A er flatarmálið fyrir ofan þann punkt sem streitan er reiknuð í, $\bar{y}$ er fjarlægð massamiðju A að missamiðju þversniðsins, G er skúfstífni, I er tregðuvægi þversniðsins og t er þykkt kroppsins (heildarþykkt $2t$). Mynd 4 sýnir niðurstöður þessarar fyrstu nálgunnar fyrir fjögur álagsþrep. Taflan á myndinni sýnir einnig meðalskúfstreituna fyrir hvert álagsþrep. Þessi nálgun verður stöðugt lélegri eftir því sem fleiri sprungur myndast og hegðunin verður ólínulegri. Hér er einnig gert ráð fyrir að streituástandið sé ótruflað, sem verður að teljast hæpin forsenda.



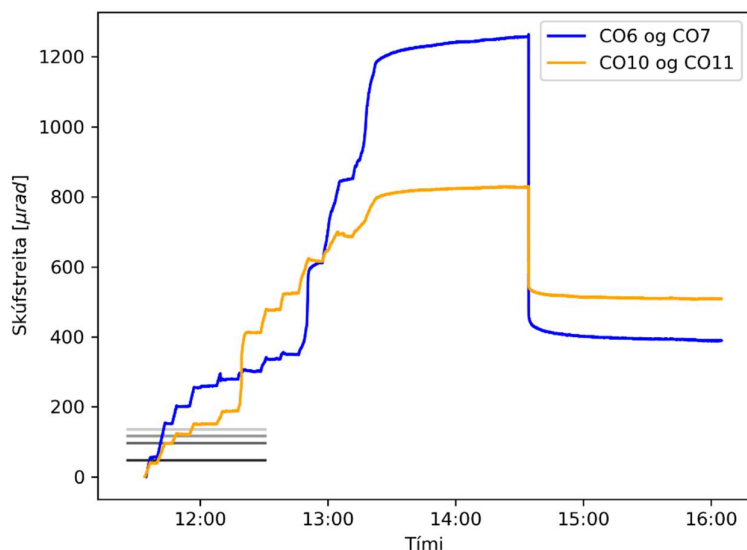
Tími	Próf nr.	V Kraftur [kN]	γ reiknað Skúfstreita [μrad]
11:37:53	1	500	48
11:45:05	2	1000	97
11:50:08	3	1200	116
11:58:29	4	1400	135
12:11:47	5	1600	155
12:22:01	6	1800	174
12:39:58	7	2000	193
12:52:18	8	2200	213
13:07:01	9	2400	232
13:21:29	10	2600	251

Mynd 4: Fyrsta línulega nálgun á reiknilegri skúfstreitu.

Krosslögðum streitunum er ætlað að mæla meðalskúfstreitu yfir þá hæð sem krossinn nær. Skúfstreituna má skrifa:

$$\gamma = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2 \cos(\alpha) \sin(\alpha)}$$

þar sem ϵ táknar áslæga streitu í nemunum tveimur og α er hornið sem neminn myndar við lárétta línu. Gert er ráð fyrir að sami halli sé á báðum nemunum [2]. Mynd 5 sýnir skúfstreituna eins og hún mælist með krosslögðu nemapörum tveimur. Gráleitu línurnar eru meðaltölin sem sýnd eru á mynd 4. Sjá má að nemaparið á norðurhlíð brúarinnar (CO10 og CO11) mælir í fyrstu þremur þrepunum mjög svipaða skúfstreitu og áætlað var með kassapversniðsnálguninni. Í fjórða þrepi fer reiknilega nálgunin að vanmeta streituna. Athyglivert er hversu ólík hegðunin er á suður- og norðurhlíð brúarinnar, ekki aðeins er stærðargráðan ólík heldur einnig hvenær stór stökk eiga sér stað. Þessi hegðun getur verið mæliskekkja af völdum truflaðs streituástand, ólíklegt þykir að nemapörin tvö séu staðsett nákvæmlega á sama stað í streitusviðinu. Ítarlegri greining á sprungum sem þvera nemana er þörf til að greina þessa hegðun til hlítar. Hugsanleg skýring á stærðargráðumuninum gæti að hluta verið sú sama og kom fram við greiningu á niðurbeygju á miðju hafi [1]. Millistöpull 5, sá sem er næstur prófkraftinum skekkist í flóði árið 1966. Brúin var rétt við með gúmmilegu milli stöpsuls og yfirbyggingar sem gæti haft áhrif á vindustífni hennar en svona stærðargráðumunur á skúfstreitu á sitt hvorum bitakroppnum sýnir að bitinn vindur sig, þ.e. skúfstreitan er meiri öðru megin en hinu megin.



Mynd 5: Skúfstreita frá tveimur krosslögðum nemapörum. Bláa línan sýnir streituna á suðurhlíð brúarinnar og gula línan sýnir streituna á norðurhlíð brúarinnar. Gráleitu línurnar vísa í reiknilega meðalskúfstreitu samkvæmt mynd 4.

Lokaorð:

Búin voru til tvö grunnlíkön af brúnni, annars vegar trefjabitalíkan og hins vegar bitastangalíkan. Líkönin voru prófuð fyrir mismunandi jaðarskilyrði og efnislíkön. Trefjabitalíkanið hentar illa til að herma hegðun brúarinnar undir álaginu. Bitastangalíkanið sýndi meiri burði til þess að geta veitt raunhæfar upplýsingar um hegðunina. Í ljós kom að lárétt færsla á millistöpli hafði töluverð áhrif á niðurstöðuna. Þegar vinna með ljósleiðaranemagögnin hófst kom einnig í ljós að ýmislegt í eðli þeirra gerir greininguna meira krefjandi en vonir stóðu til í upphafi. Má þar helst nefna að ekki er mögulegt að leiðrétta fyrir hitastigsáhrifum og að krosslögðu nemarnir eru settir upp beint undir álaginu. Að öllu þessu sögðu er ástæða til hóflegrar bjartsýni, vonir standa til að hægt verði að gera ítarlegri greiningu á ljósleiðaranemagögnunum og að hægt verði í framhaldinu að bera þau saman við bitastangalíkanið. Einnig standa vonir til að hægt verði að rýna betur í áhrif stífni undirstaðanna bæði með tilliti til þess að stöpullinn virðist leyfa lárétta færslu og að gúmmilegu hefur verið komið fyrir milli stöpsuls og yfirbyggingar.

Heimildir:

[1] Þorkell Jón Tryggvason. 2023. *Ólínuleg töluleg greining á brotmörkum steinsteyprtar brúar yfir Steinavötn*. Meistarritgerð, Háskóli Íslands. <https://skemman.is/handle/1946/44558>

[2] Branko Glisic og Daniele Inaudi. 2007. *Fibre optic methods for structural health monitoring*. John Wiley & Sons, Ltd.