

Ólínuleg töluleg greining á brotmörkum steinsteyprar brúar yfir Steinavötn



Þorkell Jón Tryggvason, Dórotea Høeg Sigurðardóttir,
Ching-Yi Tsai og Bjarni Bessason

22. Rannsóknarráðstefna Vegagerðarinnar
27. október 2023

Markmið

Tilgangur verkefnisins var að auka skilning á hegðun járnbentra steinsteypra bita undir stígvaxandi álagi allt að brotmörkum og þá sérstaklega varðandi skerþöl.

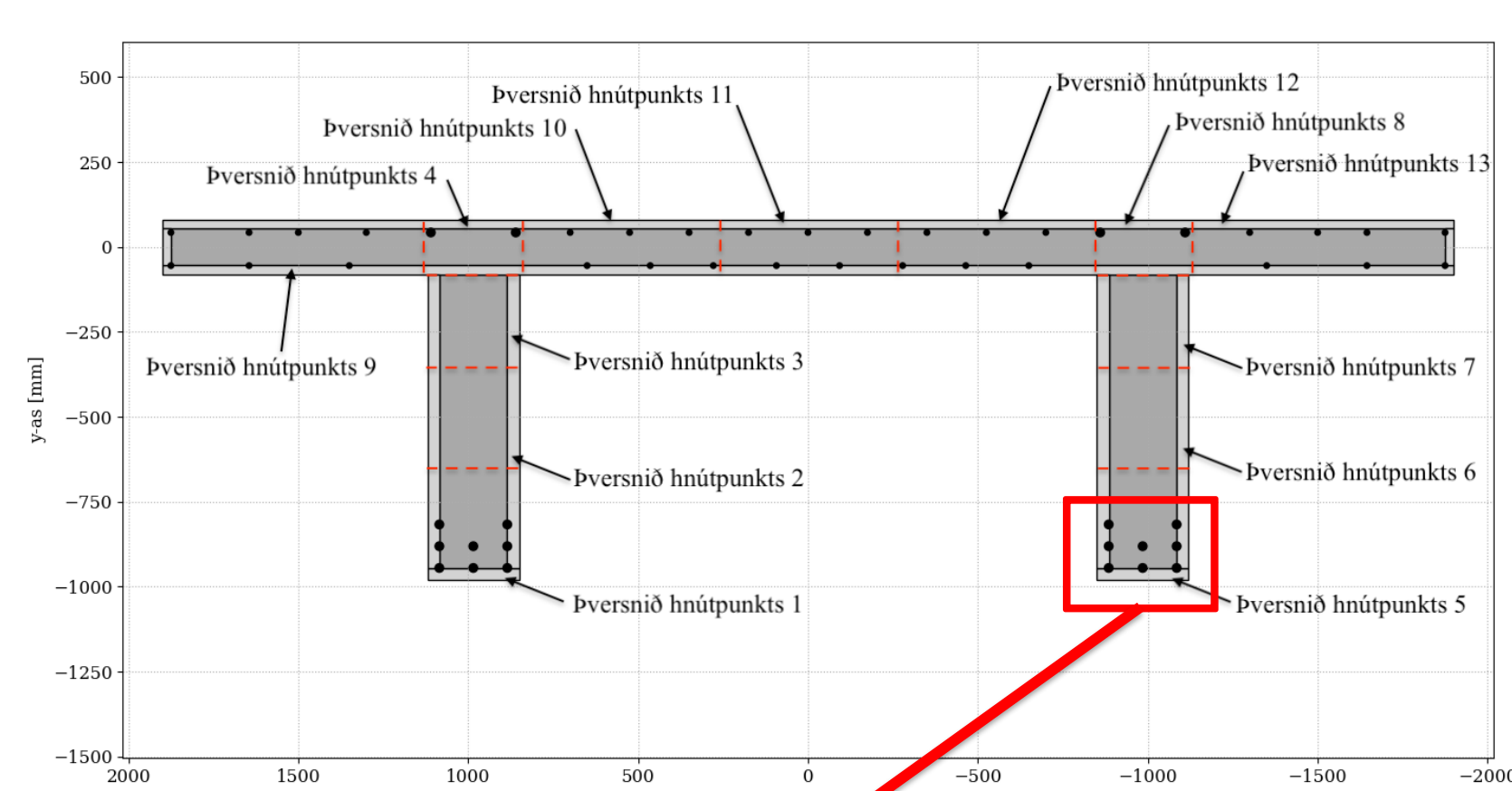
Bakgrunnur

Einstakt tækifæri til rannsókna og þekkingarsköpunar skapaðist þegar brú yfir Steinavötn í Suðursveit skemmdist illa í vatnavöxtum árið 2017. Það gróf undan einum af fimm brúarstöplum hennar og brúin var dæmd ónýtt í kjölfarið. Áður en brúin var rifin var framkvæmt álagspróf sem verður að teljast einstakt á Íslandi og þó víðar væri leitað, því sjaldan skapast þær aðstæður að hægt sé að gera tilraunir á mannvirkjum í fullri stærð að brotmörkum. Margvísleg mæligögn voru skráð í álagsprófinu. Í þessu verkefni var farið yfir þau gögn sem fengust úr mælingum á brúnni. Í framhaldinu var gerð ítarleg greining á henni þar sem tveimur mismunandi ólínulegum bitalíkönum var stillt upp. Í fyrsta lagi svokölluðu trefjabitalíkani þar sem skoðuð var formbreyting á miðju hafi brúarinnar og niðurstöður bornar saman við mæld gildi. Í öðru lagi var byggt upp bitastangalíkan af einu hafi brúarinnar til að ákvarða niðurbeygju á miðju hafi brúarinnar, ásamt skerkröftum í langbitum brúarinnar. Seinna líkanið hentaði betur til að greina skerhegðun.

Aðferðir

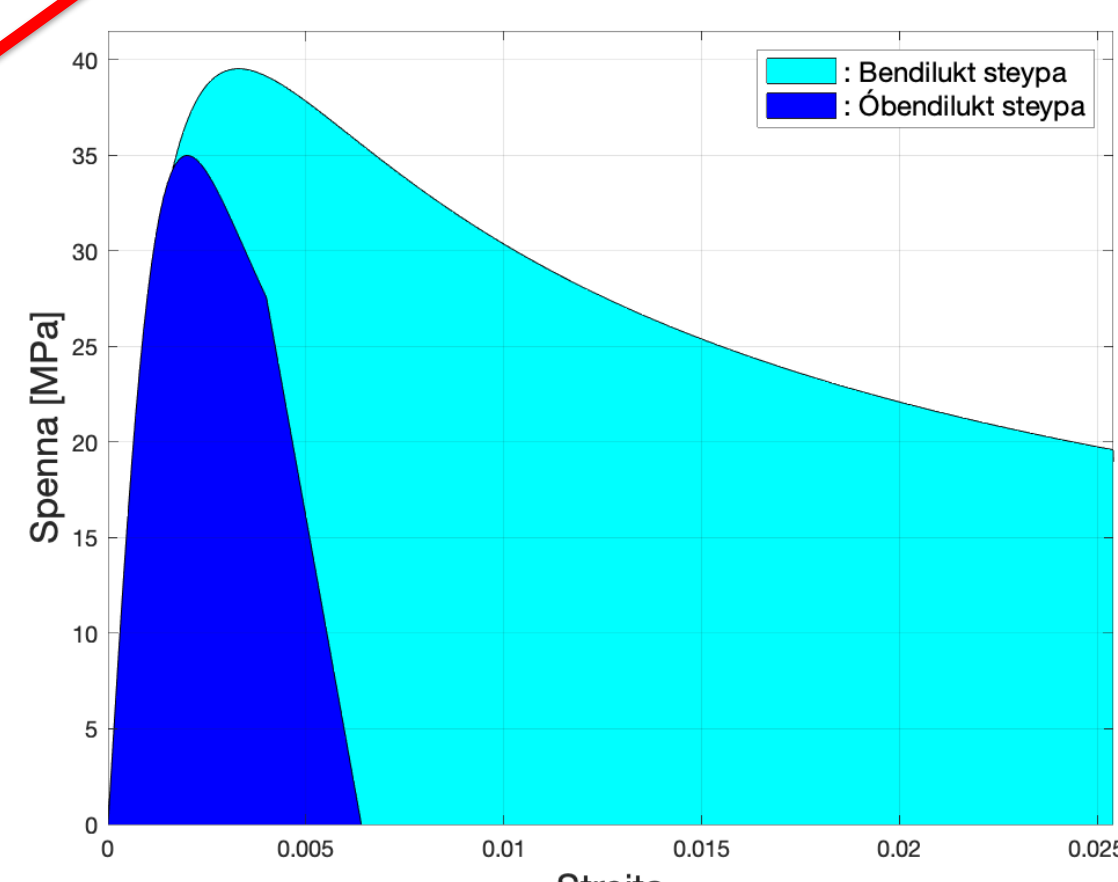
Brúin var fyrst sett upp í OpenSees með því að nota trefjabitalíkan. Þá var þversniði brúarinnar skipt upp í þræði þar sem hver þræður hefur sinn efniseiginleika, hvort sem það er stál eða steypa. Ekki er hægt að setja inn skerjárn í slíkt líkan svo notast var við mismunandi þrýstistyrk fyrir steypuna, eftir því hvort hún var bendilukt eða ekki. Bendilukt steypa er sá partur þversniðsins sem er innan skerbendingar. Hægt er að segja að skerbendingin haldi utan um steypukjarnann og auki þar með þrýstistyrk hans. Skilgreina þurfti undirstöður brúarinnar á þeim stöðum sem brúarstöplar voru staðsettir. Nokkrar útfærslur af undirstöðum voru skoðaðar, en ákveðið að skilgreina brúna líkt og einfalt studdan samfelldan bita með sex höfum og undirstöðum sem leyfa ekki lárétta færslu. Alls voru skilgreindir 21 hnútpunktur yfir brúna, en hnútpunktar brúarinnar voru tengdir saman með 20 kraftagrundvölluðum bitasúlueiningum (e. force based beam-column element).

Seinni líkanið var líka byggt upp í OpenSees, en nú var notast við bitastangaaðferð. Líkanið innihélt mikinn fjölda af hnútpunktum og burðareiningum, því var aðeins eitt haf á brúnni skoðað, vegna þess hve flókið líkanið var og tímafrekt í keyrslu. Þversniði brúarinnar var skipt upp í 13 hnútpunkta. Þessir 13 punktar voru endurteknir með 300 mm bili eftir lengd hafnsins sem var 18,5 m að lengd. Fjöldi hnútpunkta var því 806 og voru þeir allir með sex frelsisgráður.



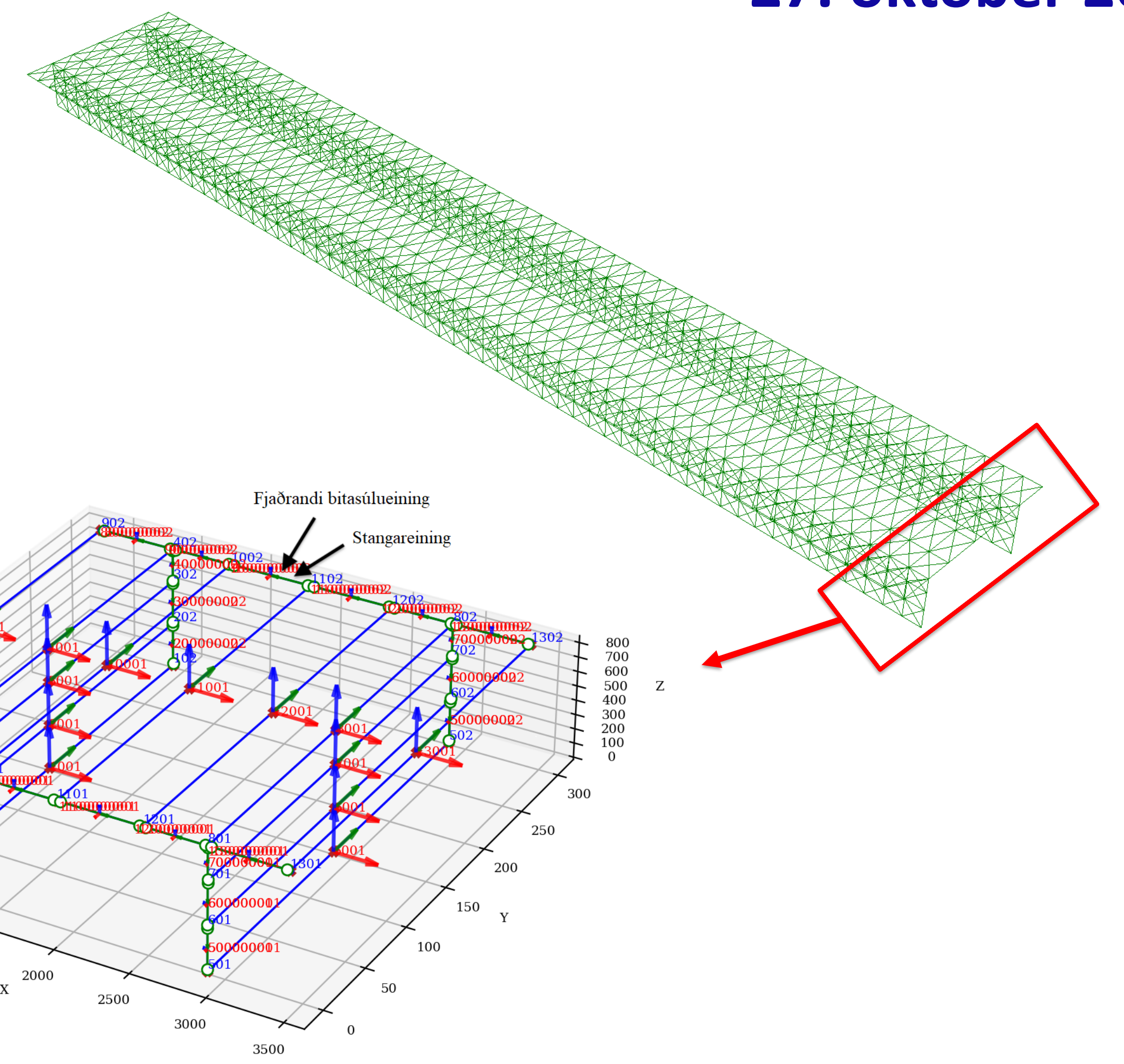
Bendilukt steypa

Óbendilukt steypa



Mynd 1 Þversniðsuppygging brúar með bitastangaaðferð í OpenSees.

Notaðar voru fjórar tegundir af burðareiningum í líkaninu. Færslugrundvölluð bitasúlueining (e. displacement based beam-column element) tengdi saman hnútpunkta eftir lengd brúarinnar. Fjaðrandi bitasúlueining (e. elastic beam-column) tengdi saman hnútpunkta þversniðsins yfir breidd brúarinnar ásamt stangareiningum. Fjórða tegund burðareininga sem notuð var í líkaninu voru stangir sem skilgreindar voru sem Stöng2 (e.Truss2) í OpenSees. Þessi stangareining var notuð til að herma tvíása áhrif í einása burðareiningu og var notuð með efnislíkaninu steypawBeta. Stangirnar voru skáhallt á milli hnútpunkta eftir lengd brúarinnar, bæði á langbita brúar og brúargólfi.



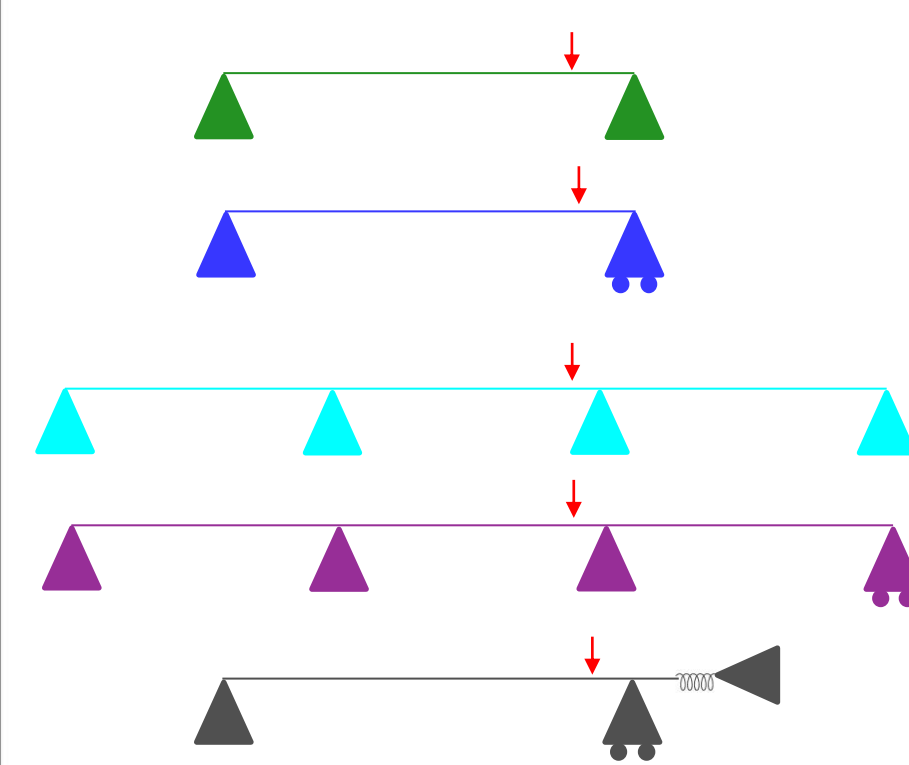
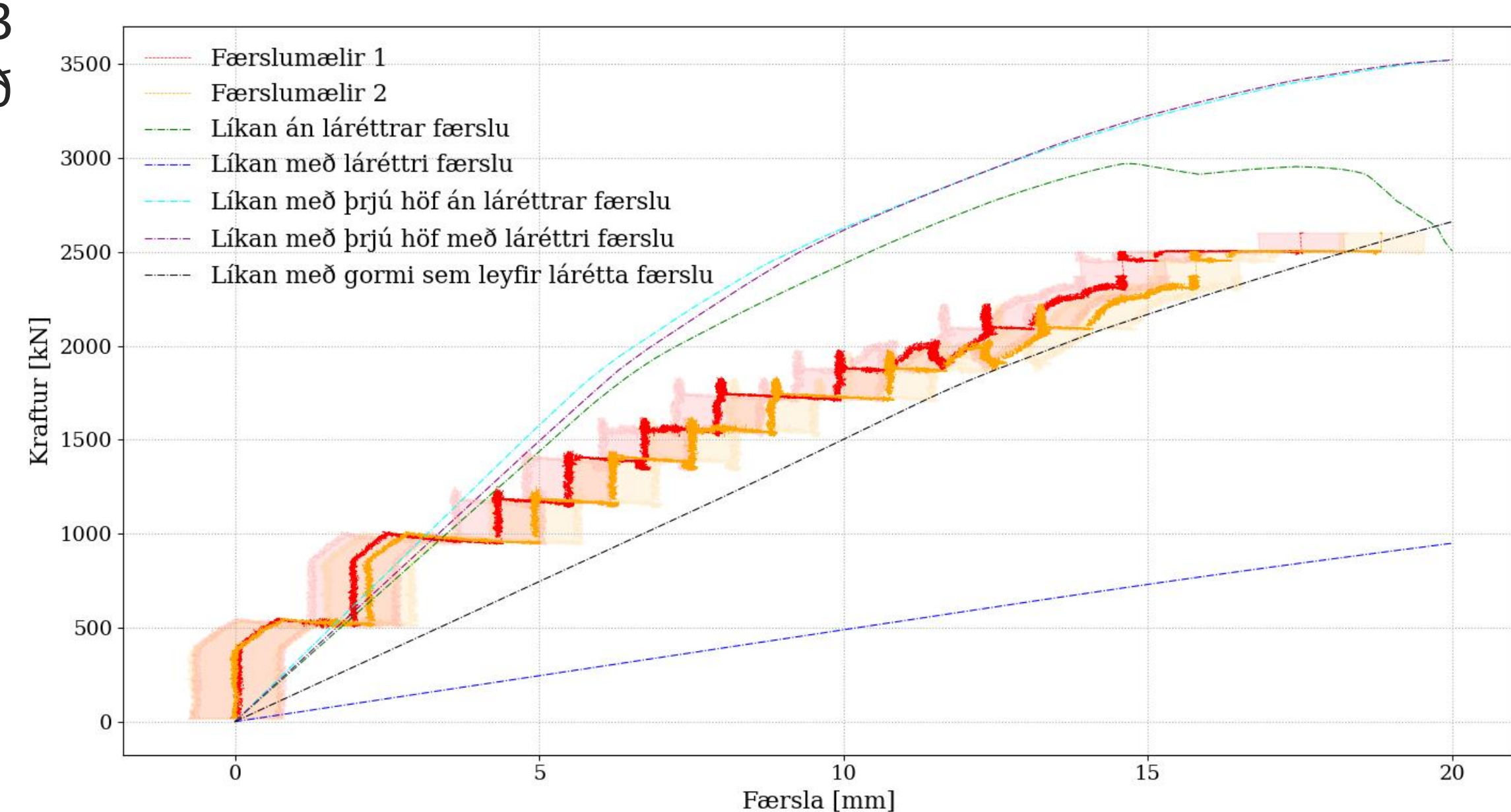
Mynd 2 Uppsetning brúar með bitastangaaðferð í OpenSees.

Notast var við Lobatto tegrúnaraðferð í líkaninu með fimm tegrúnarpunkta milli hvers hnútpunktapars. Við greiningu á brúnni var færslustjórnun greining notuð þar sem miðað var við mestu niðurbeygju sem 20 mm á miðju hafnsins, á því hafi þar sem krafturinn verkar á brúna. Skrefin sem greiningin keyrði voru 0,01 mm og var fjöldi skrefa því 2000.

Niðurstöður

Trefjabitalíkanið hermdi niðurstöður álagsprófanna ekki nægjanlega vel þar sem niðurstöður líkansins voru alveg línulegar fram að 20 mm niðurbeygju, en niðurstöður prófanna sýndu boginn feril. Aftur á móti þegar bestu aðfallandi línur voru teiknaðar fyrir niðurstöður prófanna, sem byrja í núllpunkti og enda í 20 mm niðurbeygju, má segja að líkanið hermdi þær niðurstöður þokkalega, en ferill líkansins lenti á milli ferla bestu línu prófanna.

Bitastangalíkanið hermdi niðurstöður prófanna einnig ekki nógu vel heilt á litið. Til að byrja með hermdi það niðurstöðurnar ágætlega en þegar komið var upp í 10 mm niðurbeygju var krafturinn orðinn of mikill. Samt sem áður beygði líkanið eins og búist var við, en gerði það ekki nógu harkalega til þess að halda í við niðurstöður prófanna.



Mynd 4 Niðurstöður bitastangalíkans í OpenSees. Litur ferils samsvarar sama lit á undirstöðuskilyrðum í líkani.

Trefjabitalíkanið tók ekki tillit til skerformbreytinga og þar sem álagið sem sett var á brúna var staðsett þannig (nálægt stöpli) að það leiddi til skerbrotts, má áætla að líkanið ofmeti styrk brúarinnar eins og niðurstöður sýna. Bitastangalíkanið tók aftur á móti tillit til skerformbreytinga með notkun skástanga í líkaninu. Því má gera ráð fyrir að bitastangalíkanið geti hermt álagsprófið betur en trefjabitalíkanið. Bitastangalíkanið sýndi að sprungumyndun sé byrjuð í langbitum brúarinnar, en þrýstistyrkur þversniðsins er ekki búinn að minnka mikið.

Ef meiri tími væri í boði væri möguleiki á að stilla bitastangalíkanið enn betur af með tilliti til stífni láréttar færslu. Einnig gafst ekki tími til þess að skoða hegðun skástanganna ítarlega og hvort sprungumyndun sem á sér stað sé í líkingu við þá sprungumyndun sem varð á brúnni á meðan álagsprófunum stóð. Það er því ljóst að möguleiki er á að skoða og þróa bitastangalíkanið enn nánar og vonandi nýtast niðurstöður úr þessu verkefni til frekari rannsókna.

Þakkið

Verkefnið var unnið sem meistaraverkefni við Háskóla Íslands og styrkt af Vegagerðinni sem færðu bestu þakkið fyrir.