

Þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls

Samantektarskýrsla

Verkefnið er styrkt af Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar
Júlí 2023



Lykilsíða

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.

| Númer skýrslu/gerð skýrslu | Fjöldi síðna | Dagsetning | Dreifing |
|--|--------------|------------|----------|
| Nr. 1800-931/Samantektarskýrsla | 50 | 26.7.2023 | Opin |
| Heiti skýrslu | | | |
| Þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls | | | |
| Report Title in English | | | |

Development of a New Connection Between Precast Abutment Wall and Cast-In-Place Foundation

| Höfundur/ar | Verkefnastjóri | Tengiliður Vegagerðarinnar |
|---|-----------------|---|
| Rúnar Steinn Smáráson Franz Sigurjónsson Ching-Yi Tsai Bjarni Bessason Ólafur Sveinn Haraldsson | Bjarni Bessason | Guðmundur Valur Guðmundsson |
| Styrktaraðili | | Samvinnuaðilar |
| Rannsóknasjóður Vegagerðarinnar BM Vallá Vista verkfræðistofa | | Háskóli Íslands BM Vallá Vista verkfræðistofa |

Útdráttur

Í þessari rannsókn var þróuð ný tenging milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls með því markmiði að hraða brúarframkvæmdum. Smíðuð voru tvö prófstykki í 63% skala í Vegagerðinni og í BM Vallá og þau prófuð á tilraunagólfi Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands. Fyrri stykkið var útfært hefðbundið þar sem bæði sökkull og stöpulveggur eru staðsteyptir. Síðara prófstykkið var útfært með nýju tengingunni þar sem forsteyptum stöpulvegg er stungið niður í staðsteyptan sökkul. Bæði prófstykki fóru í gegnum 11 færslustýrt álagspróf. Þessi áfangaskýrsla lýsir þróun nýju tengingarinnar, smíði prófstykkjanna, efnisprófunum sem fóru fram, uppsetningu tilrauna og prófun þeirra. Nýja tengingin hentar líka fyrir stoðveggi.

Abstract in English

This report describes development of a new connection between a precast abutment wall and a cast-in-place foundation for Accelerated Bridge Construction.

Lykilorð

Tenging, brýr, landstöpull, hraðar brúarframkvæmdir, stoðveggir, forsteypa, staðsteypa, prófun

Undirskrift verkefnastjóra

Yfirfarið af

ÓSH/BB

Efnisyfirlit

| | |
|---|-----------|
| Lykilsíða | 2 |
| Efnisyfirlit | 3 |
| 1 Inngangur | 4 |
| 1.1 Ný tækni til brúargerðar til að hraða framkvæmdum á verkstað..... | 4 |
| 1.2 Markmið rannsóknar og uppbygging skýrslunnar | 5 |
| 2 Þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls | 7 |
| 3 Hönnun prófstykkja | 11 |
| 3.1 Hönnun stöpulveggja..... | 12 |
| 3.2 Hönnun sökkla | 14 |
| 4 Smíði prófstykkja | 16 |
| 5 Aðferðarfræði rannsókna | 23 |
| 5.1 Uppsetning tilrauna | 23 |
| 5.2 Mælitæki og annar búnaður | 24 |
| 5.3 Álagspróf ²⁴ | |
| 6 Ástandsskoðun prófstykkja | 26 |
| 6.1 Þróun skemmda..... | 27 |
| 7 Mældar niðurstöður | 31 |
| 7.1 Efnispróf stáls og steypu..... | 31 |
| 7.1.1 Þrýstistyrkur steypu..... | 31 |
| 7.1.2 Kleyfnipróf steypu | 32 |
| 7.1.3 Togstyrkur steypustyrktarjarna | 34 |
| 7.2 Samanburður prófstykkja - vægi sem fall af láréttri hlutfallsfærslu | 36 |
| 7.3 Samanburður prófstykkja – kraftur sem fall af færslu..... | 38 |
| 7.4 Normaliserað vægi sem fall af hlutfallsfærslu | 39 |
| 7.5 Orkulosun | 40 |
| 8 Samantekt og helstu niðurstöður | 42 |
| Heimildaskrá | 44 |
| Viðauki A: Teikningar | 47 |

1 Inngangur

1.1 Ný tækni til brúargerðar til að hraða framkvæmdum á verkstað

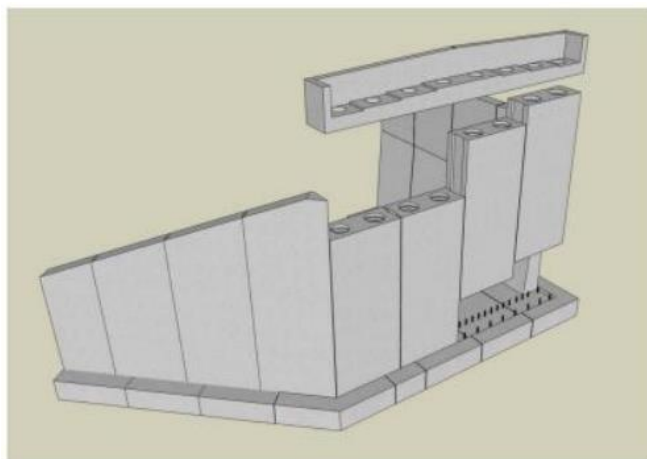
Í samgöngukerfi Íslands þjóna brýr mikilvægu hlutverki. Margar þeirra eru komnar til ára sinna og þarf að vera skipt út í náninni framtíð. Meðalaldur brúa á Íslandi eru um 40 ár en meðalaldur einbreiðra brúa er heldur meiri, eða meira en 50 ár. Margar af þessum einbreiðum brúm uppfylla ekki lengur reglur samtímans hvað varðar burðarþol og umferðaröryggi. Þessar sömu brýr eru komnar með mikla uppsafnaða viðhaldsþörf (Samtök iðnaðarins, 2021). Einbreiðar brýr á Hringveginum eru sérstakt umhugsunarefni vegna aukins umferðarþunga sem rekja má til ferðamannastraums. Ljóst er að í náninni framtíð er mikil vinna fram undan við að skipta út þessum brúm. Eitt af markmiðum Samgönguáætlunar 2020-2034 er að fækka einbreiðum brúm á þjóðvegum landsins (Guðmundur Valur Guðmundsson, 2018).

Á Íslandi eru helst notaðar tvær byggingaraðferðir í brúargerð. Annars vegar eru stöplar staðsteyptir og brúardekkið eftirspennt og hins vegar staðsteypta stöpla og brúardekkið samanstandur af forsteyptum plötum sem sitja ofan á stálbitum. Í síðari byggingaraðferðinni er samverkandi hegðun náð með því að steypa yfirlag á forsteyptu plötunum. Notkun staðsteypu í brúargerð er hefðbundin byggingaraðferð sem er tímafrek og veldur gjarnan umferðartöfum á framkvæmdatímanum. Í þéttbýli þarf oft beina umferð um hjáleiðir og fækka akreinum á meðan að á framkvæmdum stendur. Umferðatafir eru kostnaðarsamar fyrir samfélagið og eykur útblástur gróðurhúsalofttegunda, sérstaklega CO₂ (Ólafur Sveinn Haraldsson, 2015).

Tækifæri eru til staðar til þess að hraða þessum framkvæmdum á verkstað með nýrri brúartækni. Ein lausn er að forsteypa einingar í land- og millistöpla og setja þær upp um leið og þær koma á verkstaðinn. Þessi lausn hefur aðra jákvæða þætti eins og aukið öryggi starfsmanna á verkstað og meiri byggingargæði (Hieber, o.fl., 2005; Pang, o.fl., 2008).

Það er áskorun að nota forsteyptar einingar á jarðskjálftasvæðum þar sem tengingarnar þurfa að geta borið jarðskjálftaálagið. Tengingarnar eru gjarnan þar sem búast má við mesta vægi sem og miklum ólínulegum formbreytingum. Það helgast af því að tengingarnar eru settar við undirstöður brúarinnar og við brúardekkið til að auðvelda bæði smíði einingar og gera flutning hennar auðveldari (Khaleghi, o.fl., 2012).

Margar rannsóknir hafa verið gerðar í Bandaríkjunum við þróun nýs brúarkerfis úr forsteyptum einingum til að hraða framkvæmdinni á verkstað. Þessar rannsóknir hafa þó eingöngu miðað að annars vegar þróun nýrra tenginga milli brúarsúlna og undirstaða og hins vegar milli brúarsúlna og brúargólfs (Haraldsson, o.fl., 2013; Hieber, o.fl., 2005; Matsumoto, o.fl., 2001; Mashal, o.fl., 2016; Pang, o.fl., 2008; Wacker, o.fl., 2005). Minna hefur þó verið um rannsóknir á landstöplum til að stytta framkvæmdatímann á verkstað en vegagerðir í ýmsum ríkjum Bandaríkjanna hafa þróað slíkar lausnir. (Federal vegagerðunum í Utah ríki og í New Hampshire (Culmo, 2011). Í þessu kerfi eru bæði sökkull og stöpulveggur úr forsteyptum einingum. Tengingin milli þessara eininga gengur út á að járn úr sökkli eru grautuð í rifluð rör í veggnum.



↑ **Mynd 1.1**

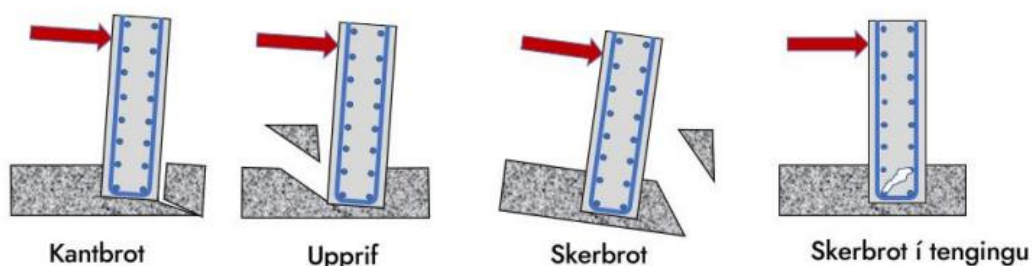
Forsteyptur landstöplurkerfi þróuð af vegagerðunum í Utah og í New Hampshire (Culmo, 2011)

Í þessu verkefni er þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls lýst. Tengingin er hentug fyrir gerð landstöpla til að hraða framkvæmdinni á verkstað. Í kafla 1.2 er markmiði rannsóknarinnar lýst og uppbygging skýrslunnar kynnt. Tengingin ætti sömuleiðis að henta vel fyrir stoðveggi.

1.2 Markmið rannsóknar og uppbygging skýrslunnar

Markmið þessa verkefnis er að þróa nýja tengingu milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls til þess að stytta framkvæmdartíma á verkstað. Tengingin er hentug fyrir gerð landstöpla og er hugmyndin að framleiða veggeiningu sem er með hrjúft yfirborð sem stingst niður í staðsteyptan sökkul. Veggeiningin er einnig framleidd með göt fyrir efri járnagrind sökkulsins til að komast í gegnum vegginn óhindrað.

Aðal rannsóknaspurningin í þessu verkefni er hvort að tengingin geti yfirfært álag (eða vægi) frá vegg yfir í sökkul án þess að tengingin gefi sig. Um er að ræða álag frá fyllingu og eftir atvikum jarðskjálftaálags. Óæskilegar brotmyndir í tengingu eru sýndar á mynd 1.2.



↑ **Mynd 1.2**

Mögulegar brotmyndir í tengingu

Eins og sést á mynd 1.2 voru fjórar brotmyndir til skoðunar en þau voru kantbrot, upprif, skerbrot og skerbrot í tengingunni sjálfri (e. joint shear).

Tvö sköluð (63%) prófstykki voru byggð í Vegagerðinni og í BM Vallá vorið 2022. Fyrra prófstykkið var hannað eins og um staðsteypta útfærslu væri um að ræða (skv. Eurocode 2 og

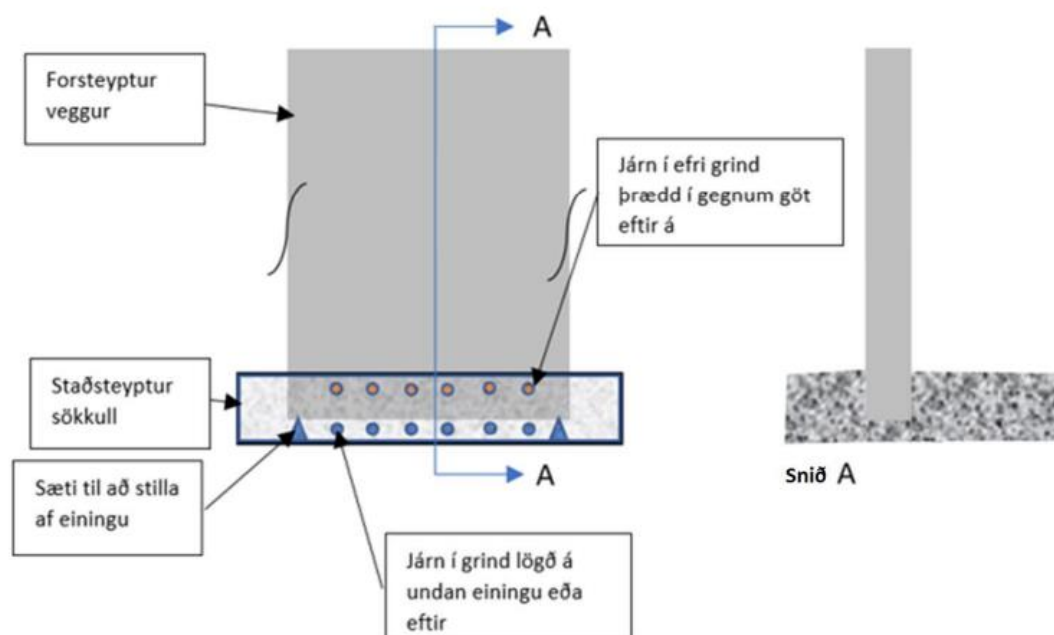
brúarhönnunarleiðbeiningum Vegagerðarinnar). Stuðst var við stærðir landstöpla brúarinnar yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði sem var hönnuð af dr. Ólafi Sveini Haraldssyni og dr. Baldvini Einarssyni hjá Eflu verkfræðistofu. Síðara prófstykkið var útfært með nýju tengingunni og stuðst var við sömu hönnunarstaðla.

Í kafla tvö verður fjallað um þróun nýju tengingarinnar milli forsteypts stöpulveggs og staðsteypts sökkuls í Háskóla Íslands sem gerð var í samvinnu við Vegagerðina, BM Vallá og Vistu verkfræðistofu. Kaflar þrjú og fjögur fjalla annars vegar um hönnun prófstykkjanna og hins vegar um smíði prófstykkjanna. Í kafla fimm verður sagt frá uppsetningu tilraunanna, mælitækjum og álagsáætlun. Kafli sex fjallar um sprungumyndanir og skemmdir á prófstykkjum meðan að á álagspröfunum stóð og niðurstöður eru kynntar í kafla sjö. Að lokum verða rannsóknarniðurstöður dregnar saman í kafla átta.

Bent er á að nánari lýsingu, gagnauðvinnslu og niðurstöður úr þessu rannsóknarverkefni má finna í meistararitgerð Franz Sigurjónssonar í byggingarverkfræði við Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands (Franz Sigurjónsson, 2023) og í lokaritgerð Rúnar Steins Smárásonar í byggingartæknifræði við Iðn- og tæknifræðideild Háskólans í Reykjavík (Rúnar Steinn Smáráson, 2022).

2 Þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls

Nýja tengingin gengur út á að framleiða forsteyptan stöpulvegg sem stingst niður í staðsteyptan sökkul. Tengingin sem var þróuð í Háskóla Íslands í samráði við Vegagerðina, BM Vallá og Vistu verkfræðistofu og er sýnd á mynd 2.1.



↑ Mynd 2.1

Tillaga að nýrri tengingu

Hugmyndin er að stöpulveggurinn er forsteyptur og sá hluti veggjarins sem stingst niður í staðsteypta sökkulinn er með hrjúfu yfirborði sem eykur bindingu milli hans og staðsteypta sökkulsins. Einingin er jafnframt framleidd með rifluðum götum svo efri járnagrind sökkulsins komist í gegnum hana óhindrað. Fyrirhuguð byggingaröð er eftirfarandi:

1. Veggeining er forsteypt.
2. Slegið upp fyrir sökkli og neðri járnagrind komið fyrir.
3. Veggeining hífð á sinn stað og hún stillt af.
4. Efri járnagrind í sökkli komið fyrir og þau þrædd í gegnum göt forsteyptrar veggeiningar.
5. Gengið frá járnagrind í sökkli og hann steypur á staðnum.

Í þessari útfærslu standa engin járn út úr tengingunni sem auðveldar smíði eininganna. Þetta jafnframt gerir meðhöndlun og flutninga eininga auðveldari. Með nýju tengingunni er hægt að byggja landstöpul á sama tíma og það tekur að byggja sökkul í hefðbundinni staðsteyptri útfærslu. Í hefðbundinni framkvæmd er svo slegið upp fyrir stöppulveggjum, járnabundið og síðan er veggurinn staðsteyptur.

Nýja tengingin er skyld tengingu milli forsteyptar súlu í staðsteyptan sökkul sem var þróuð í University of Washington í Seattle. Í þeirri tengingu var forsteypt súla framleidd og sá hluti hennar sem stakst niður í staðsteyptan sökkul var með hrjúfu yfirborði til að auka bindingu milli súlunnar og sökkulsins. Í tengingunni voru engin járn sem gengu á milli súlunnar og staðsteypta sökkulsins (Khaleghi, o.fl., 2012). Sjá mynd 2.2 af tengingunni sem þróuð var í University of Washington á árunum 2009-2010.

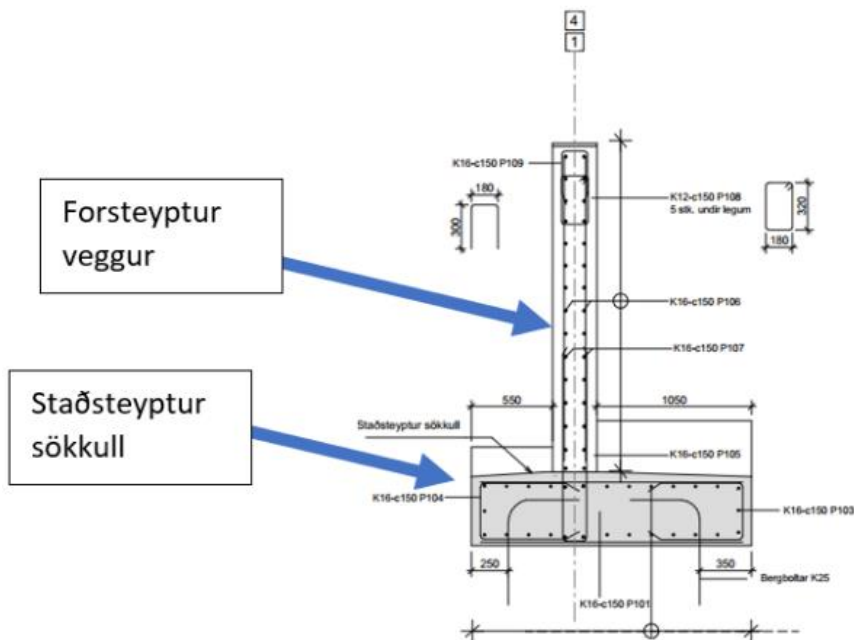


↑ Mynd 2.2

Smíði og prófun tengingar milli forsteyptar súlu og staðsteypts sökkuls í University of Washington (Khaleghi, o.fl., 2012)

Tengingin í þessari rannsókn milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls var þróuð af Franz Sigurjónssyni við Háskóla Íslands undir handleiðslu dr. Bjarna Bessasonar og dr. Ólafs Sveins Haraldssonar byggir á tengingu sem var hönnuð af þeim síðarnefnda ásamt dr. Baldvini Einarssyni hjá Eflu verkfræðistofu. Þeir hönnuðu árið 2017 nýja brú yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði í tengslum við framkvæmdir á Kröflulínu 3, brúin sem um ræðir er 53 metra löng í þremur höfum. Vegagerðin var með umsjón með hönnun og byggingu brúarinnar en Landsnet fjármagnaði verkefnið. Verktaki brúarinnar óskaði eftir að landstöplar brúarinnar væru forsteyptir til að flýta fyrir framkvæmdum á verkstað. Útfærslan sem var notuð er sýnd á mynd 2.3. Stöpulveggirnir voru forsteyptir og framleiddir þannig að járn (U-lykkjur) stóðu niður úr veggeiningunni sem var sökk ofan í sökkulmótin og síðan voru veggur og sökkul samtengdir í einni steypulotu á verkstað. Samkvæmt verktakanum hraðaði þessi útfærsla byggingu landstöplanna um a.m.k. helming miðað við hefðbundna útfærslu. Verktakinn benti þó á að það væri heppilegra að einfalda tenginguna. Það var

áskorun að koma einingunum fyrir í sökkulmótin með U-járn standandi niður úr forsteyptu einingunni. Myndir 2.4 og 2.5 sýna landstöpla brúarinnar fullbúna.



↑ **Mynd 2.3**

Almennt þversnið í landstöplum brúarinnar yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði



↑ **Mynd 2.4**

Vesturstöpull brúarinnar yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði (Vegagerðin)



↑ **Mynd 2.5**

Austurstöpull brúarinnar yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði (Vegagerðin)

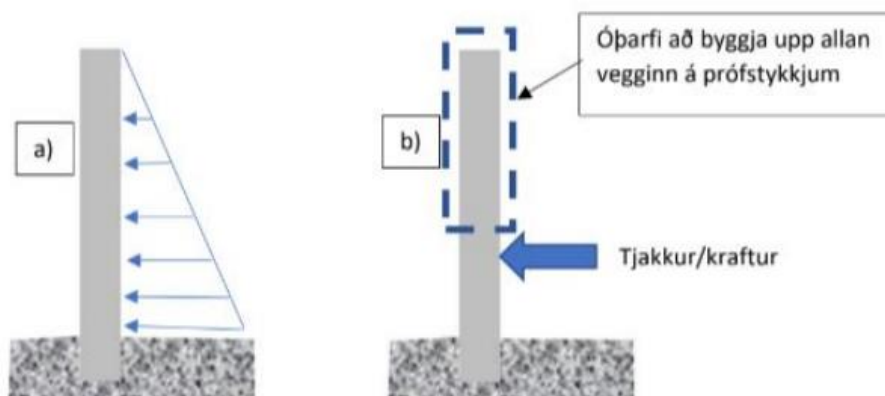
Vesturstöpullinn var gerður úr þremur einingum en austurstöpull brúarinnar gerður úr tíu einingum þar sem burðargeta gömlu brúarinnar var ekki næg til að flytja stærri einingar.

3 Hönnun prófstykkja

Tvö prófstykki voru hönnuð, smíðuð og prófuð sem hluti af þessari rannsókn. Þau voru sköluð 63% frá landstöplum við Jökulsá á Dal við Hákonarstaði. Það var tvennt sem réði þessu hlutfalli en það var álagsgeta vökvatjakkans (100 kN) í tilraunastofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands og að minnsta þvermáls kambstáls sem hægt er að kaupa án þess sérpanta á Íslandi er 10 mm (K10). Kambstál í landstöplum brúarinnar yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði var 16 mm (K16) svo hlutfallið 10/16 er um 63%.

Teikningar af prófstykkjunum má finna í viðauka A. Það sem prófstykkinn áttu sameiginlegt var eftirfarandi:

- Hæð og breidd stöpulveggjar voru 650 mm og 1000 mm. Veggþykktin var 190 mm með kápuþykktina 38 mm. Sett var jafngilt álag á stykkinn 730 mm fyrir ofan yfirborð sökkuls eins og mynd 3.1 sýnir. Hlutfallið milli hæðar (h) og þykktar einingarinnar (t) var því $h/t = 3,8$. Hins vegar var hlutfallið milli hæðar (h) og skerdýpis (d) $h/d = 5,0$. Stöpulveggirnir voru því á mörkunum að verða fyrir annað hvort vægis- eða skerbroti. (Wight, 2015)
- Sökkull var staðsteyptur og málin voru 290 mm á hæð, 1190 mm á lengd og breiddin var 900 mm. Kápuþykkt var 38 mm. Þessi mál fengust eftir að skala niður mál landstöpla brúarinnar yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði 63%.
- Fyrirskrifaður þrýstistyrksflokkur fyrir steypu sökkla og stöpulveggja var C35/45 og allt kambstál var B500NC.



↑ **Mynd 3.1**
Samánburður milli álags (a) í feltri og (b) í tilraunastofu

Prófstykkinn voru frábrugðin hvort öðru að því leiti að fyrra prófstykkið (**Staðsteyptur Landstöpull eða Prófstykki SL**) var hannað eins og um staðsteypta útfærslu væri um að ræða. Í hefðbundinni útfærslu er sökkullinn bundinn og steypdur. Því næst er veggurinn járnabundinn og staðsteyptur. Síðara prófstykkið (**Forsteyptur Landstöpull eða Prófstykki FL**) var byggt þannig að fyrst var veggurinn

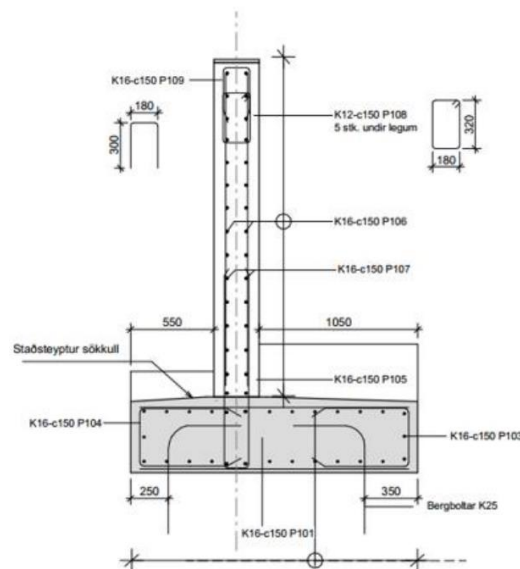
forsteyptur. Sá hluti veggjarins sem stakkt niður í staðsteyptan sökkulinn var með hrjúft yfirborðsflatarmál til að auka við bindingu við staðsteyptan sökkulinn. Forsteypti veggurinn var enn fremur með 30 mm götum til að leyfa efri járnagrind sökkulsins að fara óhindrað í gegnum vegginn.

3.1 Hönnun stöpulveggja

Steypumál og járnabinding í báðum prófstykkjum SL (Staðsteyptur Landstöpull) og FL (Forsteyptur Landstöpull) voru sköluð (63%) af landstöplum brúarinnar yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði. Brúin var hönnuð samkvæmt Evrópustöðlum (ÍST-EN 1990:2002; ÍST-EN 1991-2; ÍST-EN 1992-1-1; ÍST-EN 1992-2; ÍST-EN 1997-1 og ÍST-EN 1998-5) og reglum Vegagerðarinnar um hönnun brúa.

Á mynd 3.2 er sýnt almennt þversnið landstöpla brúarinnar yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði. Þykkt veggjarins var 300 mm með steypuhuluna 60 mm. Eins og má sjá á myndinni var veggurinn bundinn með K16-cc 150 mm lóðrétt sem samvarar járnahlutfallinu, ρ_l , 0,4%. Veggirnir voru bundnir lárétt einnig með K16-cc 150mm.

Veggirnir í prófstykkjunum voru skalaðir 63% beint niður. Veggirnir voru 190 mm með steypuhuluna 38 mm. Veggirnir voru járnbundnir með K10-cc 94 mm lóðrétt og þar með haldið sama járnahlutfallinu 0,4%. Þeir voru jafnframt bundnir lárétt með K10-cc 94 mm.

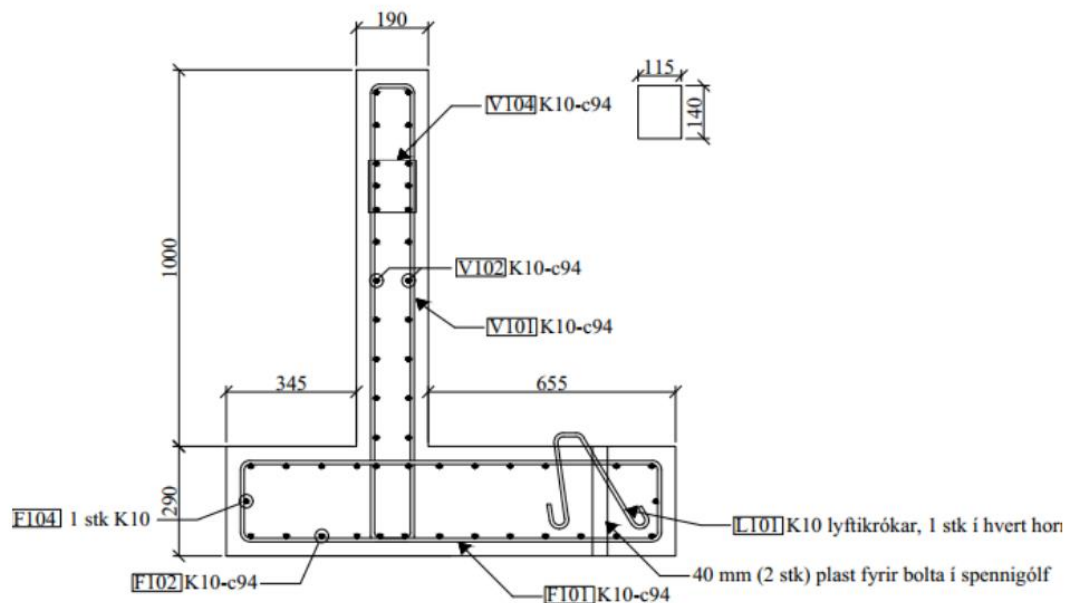


↑ **Mynd 3.2**

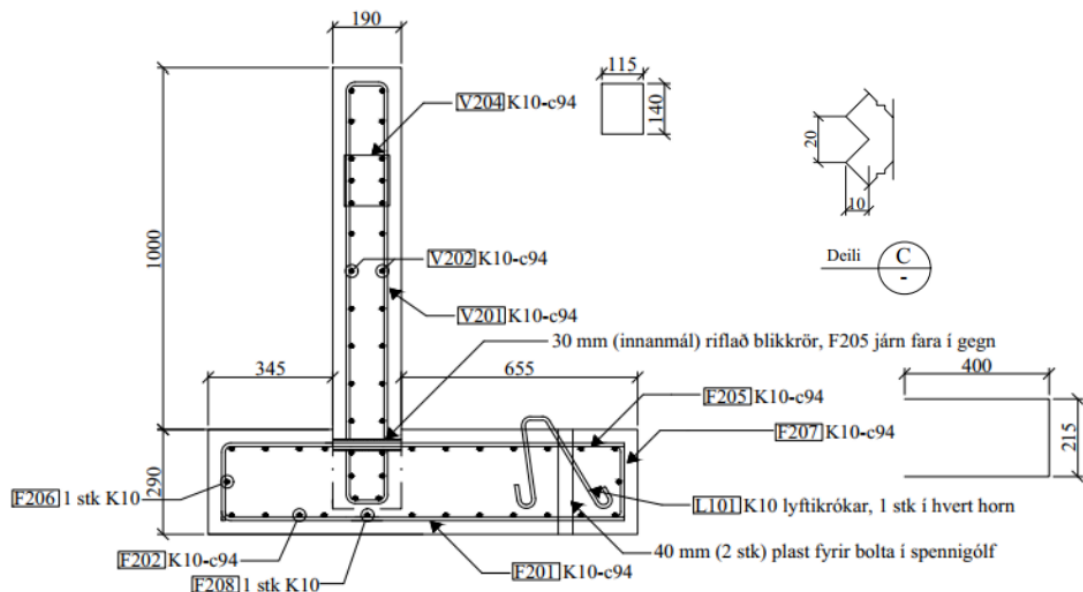
Almennt þversnið stöplis í brúnni yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði

Prófstykkjin voru frábrugðin hvort öðru á eftirfarandi hátt: fyrra prófstykkið (Staðsteyptur landstöpull eða Prófstykki SL) var hannað eins og um hefðbundna útfærslu væri um að ræða. Í hefðbundinni útfærslu er sökkulinn bundinn og steypdur. Því næst er veggurinn járnbundinn og svo steypdur. Mynd 3.3 sýnir járnabindingu prófstykkis SL sem var viðmiðunartengingin. Síðara prófstykkið (Forsteyptur landstöpull eða Prófstykki FL) var byggt þannig að fyrst var veggurinn forsteyptur. Það yfirborð veggjarins sem stakkt niður í staðsteyptan sökkulinn var með hrjúft yfirborðsflatarmál til að auka við bindingu við staðsteyptan sökkulinn. Útfærslan sem var valin er úr Brúarhandbók vegagerðarinnar í Washington ríki fyrir enda forsteypta og forspenntra brúarbita (Washington State

department of Transportation, 2022). Það var gert til að gæta samræmis við fyrri rannsóknir dr. Ólafs Sveins Haraldssonar (Haraldsson, o.fl., 2013). Forsteypti veggurinn var með 30 mm götum til að leyfa efri járngrind sökkulsins að fara óhindrað í gegnum vegginn. Yfirborðið innan gatanna var með rákum til að auka binding steypunnar milli kambstálsins og forsteyptu einingarinnar. Mynd 3.4 sýnir Prófstykki FL eða nýju tenginguna. Deili C á sömu mynd sýnir hrýfi yfirborðsflatarmálsins sem stakkt niður í sökkulinn.



↑ **Mynd 3.3**
Járnabindin Prófstykkis SL (viðmiðunartenging)

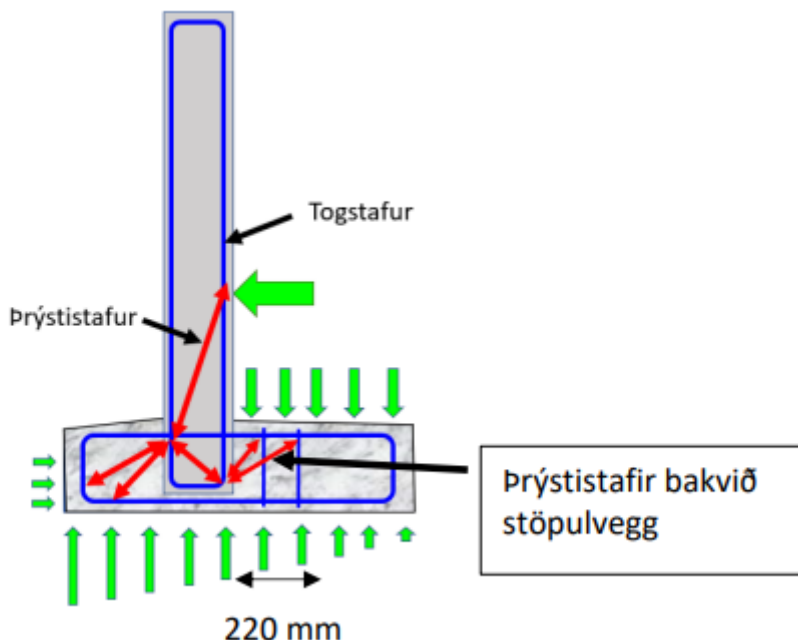


↑ **Mynd 3.4**
Járnabinding Prófstykkis FL (nýja tengingin)

3.2 Hönnun sökkla

Sökkularnir í brúnni yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði voru einnig útfærðir samkvæmt Evrópustöðlum (ÍST-EN 1990:2002; ÍST-EN 1991-2; ÍST-EN 1992-1-1; ÍST-EN 1992-2; ÍSTEN 1997-1 og ÍST-EN 1998-5) og reglum Vegagerðarinnar um hönnun brúa.

Bæði prófstykki SL og FL voru eins útfærð og fyrirmyndin nema þau voru sköluð 63% niður eins og fyrr segir. Prófstykkinn voru í báðar áttir járnabundin í efri og neðri járnagrind með K10-cc 94 mm. Járnun beggja prófstykkja má sjá á myndum 3.3 og 3.4. Hins vegar þurfti að huga að tvennu aukalega fyrir prófstykki FL. Eins og sjá má á mynd 3.4 voru fyrirskrifuð 30 mm rífluð blikkrör fyrir efri grind sökkulsins að fara í gegn. Það var valið vegna þess að stærsta þvermál steinefna í steinsteypunni var 16 mm. Gengið var út frá því að kambstál efri grindarinnar, K10 járn, væri ekki fullkomlega staðsett í miðju gatinu og því ætti steinefni greiða leið í gegn þegar steypan var víbruð. Annað sem þurfti að huga að var að ákveða hversu langt niður í sökkulinn forsteypta einingin myndi stingast. Rannsókn Haraldsson o.fl. (2013) sýndi fram á að nægjanleg stungudýpt, l_e , forsteyptrar súlu í staðsteyptan sökkul væri $l_e = 1,1 * \text{þvermál súlunnar}$. Valið var að nota þetta hlutfall en miða við stungudýpt kambstáls veggjarins, þ.e. kambstál veggjarins nær 205 mm niður í staðsteypta sökkulinn. Veggurinn sjálfur náði 220 mm niður (eða 205 mm + 15 mm kápa). Þó gegn skerbroti í tengingu var athugað með hönnunarjöfnu sem má finna í AASHTO Bridge Design Manual. Í prófstykki FL ná langjárn veggjarins ekki undir neðri grind staðsteypta sökkulsins eins og í prófstykki SL. Á mynd 3.4 má sjá einfalt grindarlíkan af nýju tengingunni.



↑ Mynd 3.4

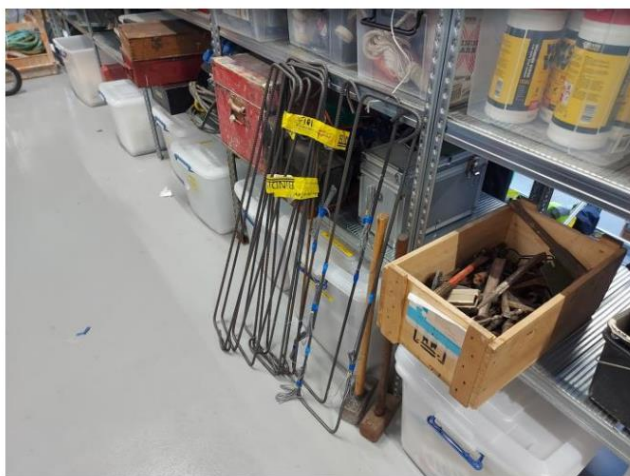
Einfalt grindarlíkan (e. strut and tie model) af nýju tengingunni (teiknuð af dr. Ólafi Sveini Haraldssyni 2022)

Mynd 3.4 sýnir að á bakvið sökkulinn myndast þrýstistafir sem geta valdið upprifi. Moon o.fl. (2013) þróðu einfalda hönnunarlíkingu til að ákvarða stungudýpt stálsúlu innfylltri með steinsteypu í

staðsteyptan sökkul svo það myndist vægisbrot í súlunni fyrir ofan sökkul. Með því að nota jöfnuna þeirra, stungudýpt kambstálsins sé 205 mm í prófstykki FL og vænta brotspennu kambstálsins ($f_u = 670$ MPa) var skerspennan reiknuð sem $\tau_c = 0,7$ MPa sem er minna en $0,55\sqrt{f_{ck}} = 0,55\sqrt{35} = 2,9$ MPa. Samkvæmt þessari líkingu var ekki þörf á skerjárnnum til að varna upprifi. Hins vegar var ákveðið að setja tvær raðir af skerjárnnum bakvið vegginn til þessa að grindarlíkanið myndi gagna upp. Sett voru samtals átta K10 skerjárn og voru þau staðsett innan fjarlægðar 220 mm frá veggnum eins og mynd 3.4 sýnir. Skerjárnin mynduðu auka skerburð um $0,37\sqrt{f_{ck}} = 0,37\sqrt{35} = 2,2$ MPa.

4 Smíði prófstykkja

Hönnun prófstykkjanna fór fram í Háskóla Íslands, en smíði sjálfra prófstykkjanna fór fram hjá Vegagerðinni í Suðurhrauni 3 Garðabæ með aðstoð vitaflokks Vegagerðarinnar. Eftir að kambstálið barst til Vegagerðarinnar var hafist handa við að setja streitumæla á völd járn í stöpulveggjum og sökklum. Mynd 4.1 sýnir hluta kambstálsins með streitumælum.



↑ **Mynd 4.1**

Hluti kambstáls með streitumælum

Næsta skref var að byggja upp mótin fyrir bæði prófstykkinn og binda kambstálið eins og myndir 4.2 til 4.7 sýna.



↑ **Mynd 4.2**

Smíði sökkulmóta



↑ **Mynd 4.3**

Mót fyrir stöpulvegg prófstykkis FL. Á myndinni má sjá göt fyrir eftir járnagrind sökkulsins. Hrífi var útbúið með því að saga út lista með þríhyrntu þversniði



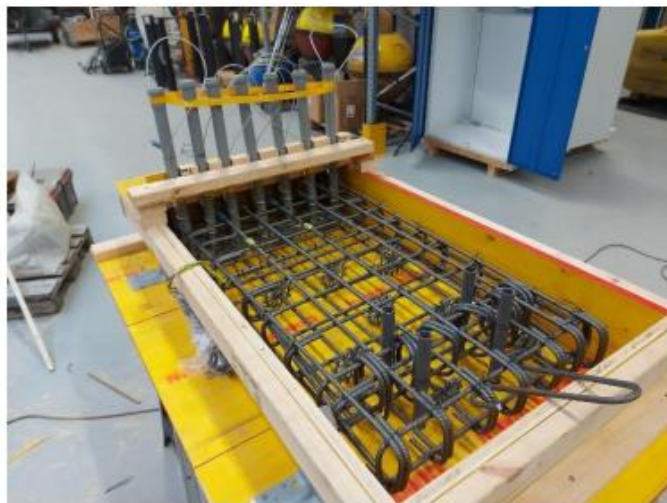
↑ **Mynd 4.4**

Vitaflokkur Vegagerðarinnar aðstoðaði við að binda járn í prófstykkin



↑ **Mynd 4.5**

Prófstykki SL tilbúið til flutnings til BM Vallá



↑ **Mynd 4.6**

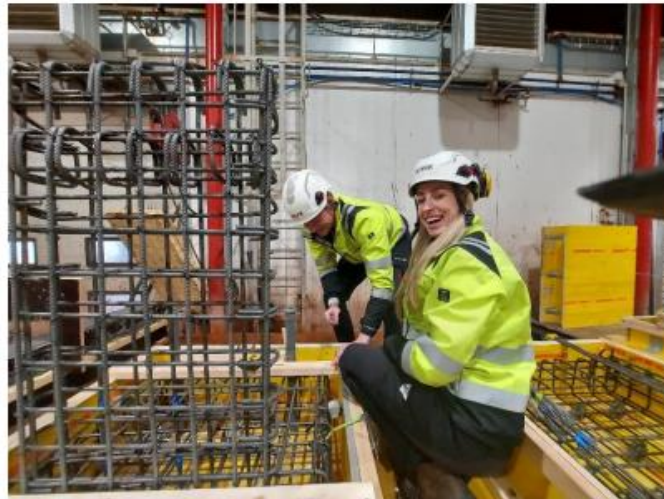
Stöpulveggur prófstykkis FL tilbúinn til flutnings til BM Vallá



↑ **Mynd 4.7**

Göt í gegnum stöpulvegg prófstykkis FL voru gerð með því að nota 32 mm PVC rör og vefja utan um það stálvír með þykktina 4 mm

Starfsmenn Vegagerðarinnar fluttu svo prófstykkin í einingaverksmiðju BM Vallá á Breiðhöfða 3 í Reykjavík þar sem þau voru steipt. Samtals voru gerðar tvær steypur. Í fyrri steypu þann 3. mars 2022 var sökkull prófstykkis SL (viðmiðunartengingin) og stöpulveggur prófstykkis FL (nýja tengingin) steipt. Í þeirri síðari 7. mars var stöpulveggur SL steiptur og sökkull FL. Myndir 4.8 til 4.10 sýna frá aðgerðum í BM Vallá þegar fyrri steypa fór fram.



↑ **Mynd 4.8**

Franz Sigurjónsson með aðstoð vitaflokks Vegagerðarinnar er að undirbúa prófstykkin fyrir steypu



↑ **Mynd 4.9**

Sökkull prófstykkis SL steypur



↑ **Mynd 4.10**

Stöpulveggur FL steypur

Viku síðar var hafist handa við að undirbúa steypu stöpluveggjar SL og stökkuls prófstykkis FL. Eins og sést á mynd 4.11 var yfirborð veggjar prófstykkis FL sem stingst niður í staðsteypta sökkullinn með hrjúfu yfirborði til að ná betri bindingu við staðsteypta sökkullinn. Jafnframt sjást götin sem efri grind sökkulsins fara í gegnum. Myndir 4.11 til 4.14 sýna þegar forsteypta stöpluveggnum FL var komið fyrir í sökkli.



↑ **Mynd 4.11**

Stöpluveggur FL tilbúinn til að vera settur í sökkulmót



↑ **Mynd 4.12**

Vitaflökkur Vegagerðarinnar eru að koma fyrir forsteypta stöpluveggnum FL fyrir í sökkli



↑ **Mynd 4.13**

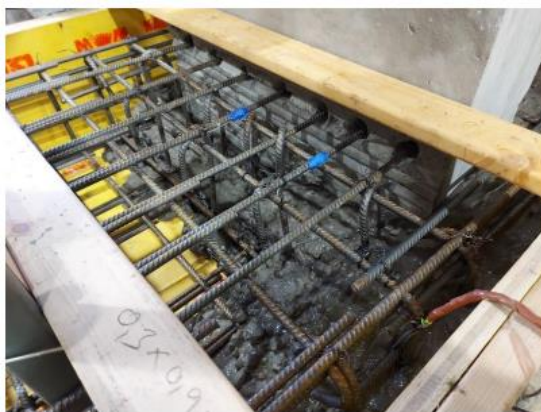
Horft ofan í sökkulmót prófstykkis FL að framan



↑ **Mynd 4.14**

Horft ofan í sökkulmót prófstykkis FL að aftan

Þegar prófstykki FL var steypur var ákveðið að setja steypuna í mótin öðrum megin við vegginn. Það var gert til þess að geta gengið úr skugga um að steypa pakkaðist undir veggnum sem og að steypa flæddi í gegnum götin á veggnum. Myndir 4.15 til 4.17 sýna þegar sökkull prófstykkis FL var steypur.



↑ **Mynd 4.15**

Steypa kemur undan vegg prófstykkis FL



↑ **Mynd 4.16**

Steypa flæðir í gegnum göt í stöpulveggi FL



↑ **Mynd 4.17**

Bæði prófstykkinn fullsteypt

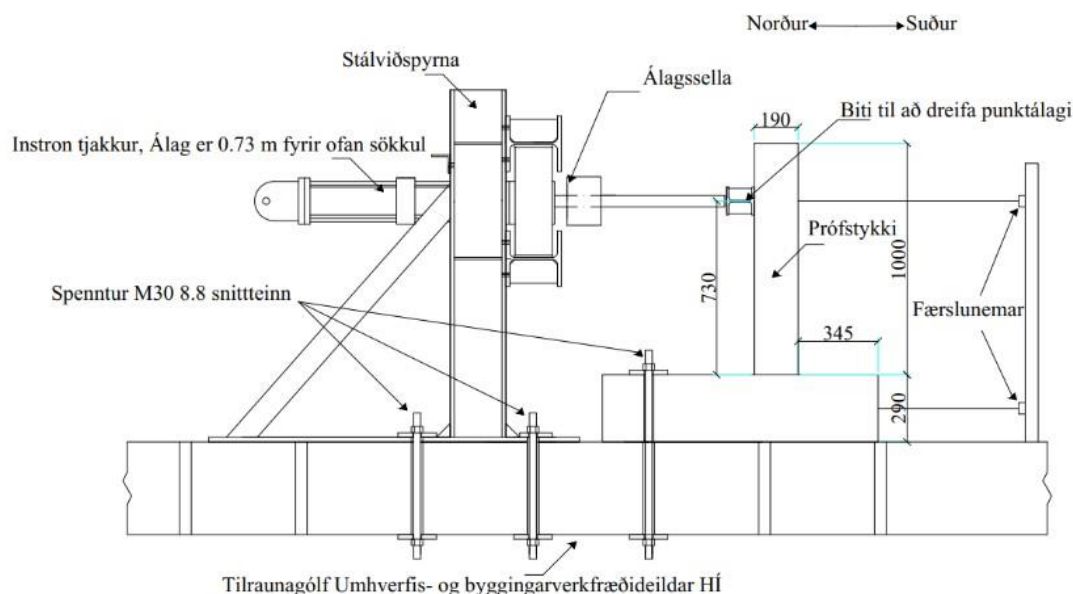
Prófstykkinn voru svo flutt viku síðar af starfsmönnum BM Vallá í tilraunastofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands, nánar tiltekið í skála 1 í VR-III byggingunni við Suðurgötu/Hjarðarhaga.

5 Aðferðarfræði rannsóknar

Tvö sköluð (63%) prófstykki voru byggð í Vegagerðinni og í BM Vallá vorið 2022. Fyrra prófstykkið var hannað eins og um staðsteypta útfærslu væri um að ræða (skv. Eurocode 2 og brúarhönnunarleiðbeiningum Vegagerðarinnar). Síðara prófstykkið var útfært með nýju tengingunni og stuðst var við sömu hönnunarstaðla. Próf fóru fram í september 2022 á tilraunagólfi Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands í VR-III.

5.1 Uppsetning tilrauna

Í tilraunastofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands í VR-III er sérútbúið spennigólf með mörgum götum fyrir festingar sem er hentugt fyrir próf eins og þessi. Smíðuð var sérstök viðspyrna til þess að koma Instron 100 kN vökvatjakkni lárétt fyrir þannig hægt væri að prófa tengingarnar statískt (e. quasi-static). Þetta var í fyrsta skiptið sem vökvatökkunum var beitt var lárétt á spennigólfinu. Uppsetning tilraunarinnar má sjá á mynd 5.1. Á myndinni má sjá að festur var biti á stöpulvegginn til að dreifa punktálagi frá Instron tjakknum jafnt yfir breidd veggjarins. Bitinn var staðsettur 730 mm fyrir ofan yfirborð sökkulsins.



↑ **Mynd 5.1**

Uppsetning tilraunar í tilraunastofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands

5.2 Mælitæki og annar búnaður

Til þess að framkvæma álagsprófunina var notaður 100 kN vökvatjakkur frá Instron Corporation sem Háskóli Íslands á. Tjakknum er stjórnað með sérstökum stýribúnaði frá sama framleiðanda. Stýribúnaðurinn mælir bæði kraft og færslu vökvatjakkisins. Notaðir voru samtals 12 YFLA-5-5L streitunemar frá Tokyo Measuring Instruments Lab í hvoru prófstykki. Sex nemar í stöpulveggnum og sex í sökkli. Þessum nemum var ætlað að mæla hvort járn í nýju tengingunni sýndi meiri streitu en í viðmiðunartengingunni. Frekari upplýsingar um streitunema, staðsetningu þeirra og niðurstöður streitumælinga má finna í meistararitgerð Franz Sigurjónssonar.

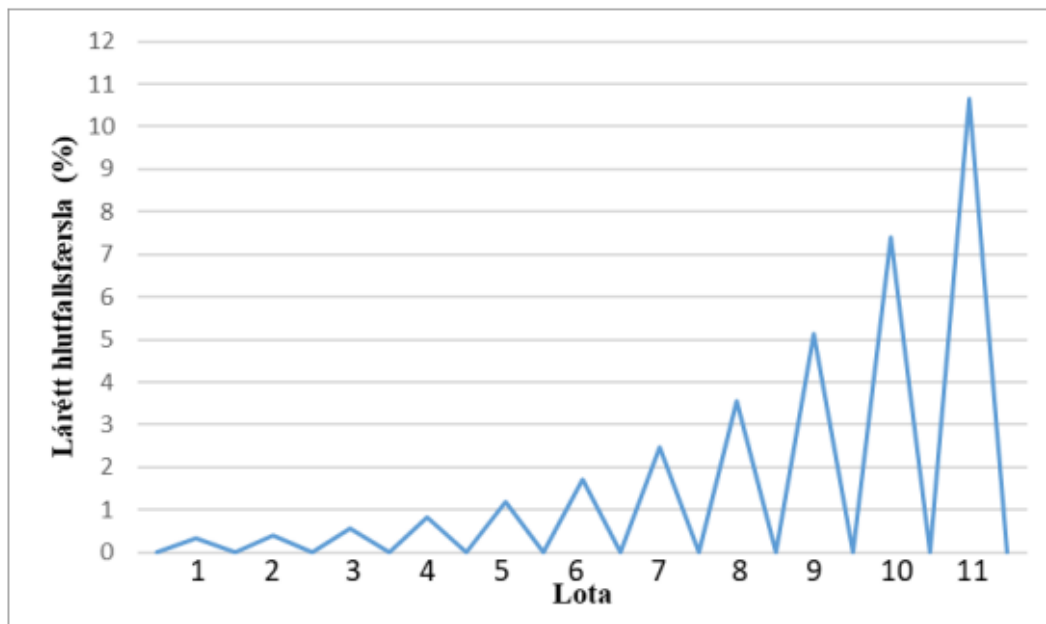
5.3 Álagspróf

Keyrðar voru ellefu stigvaxandi færslustýrðar lotur á bæði prófstykkin (sjá mynd 5.2). Hver lárétt færsla var $1,41 \cdot A$ þar sem A var hámarksfærsla úr fyrri lotu. Það var auðvelt að forrita Instron vökvatjakkinn til þess fylgja þessu álagsmynstri. Tafla 1 sýnir töluleg gildi lotanna annars vegar sem lárétta hlutfalls færslu í prósentum (þ.e. lárétt færsla með hæð vökvatjakkis yfir sökkli) og hins vegar sem láréttri færslu í millimetrum. Töluleg gildi lotanna eru gefin í töflu 5.1. Loturnar eru einnig sýndar á myndum 5.2 og 5.3. Í öllum lotum færðist tjakkurinn í hámarksfærslu á 20 sekúndum. Tilraunirnar í Háskóla Íslands voru gerðar á sama hátt.

↓ Tafla 5.1

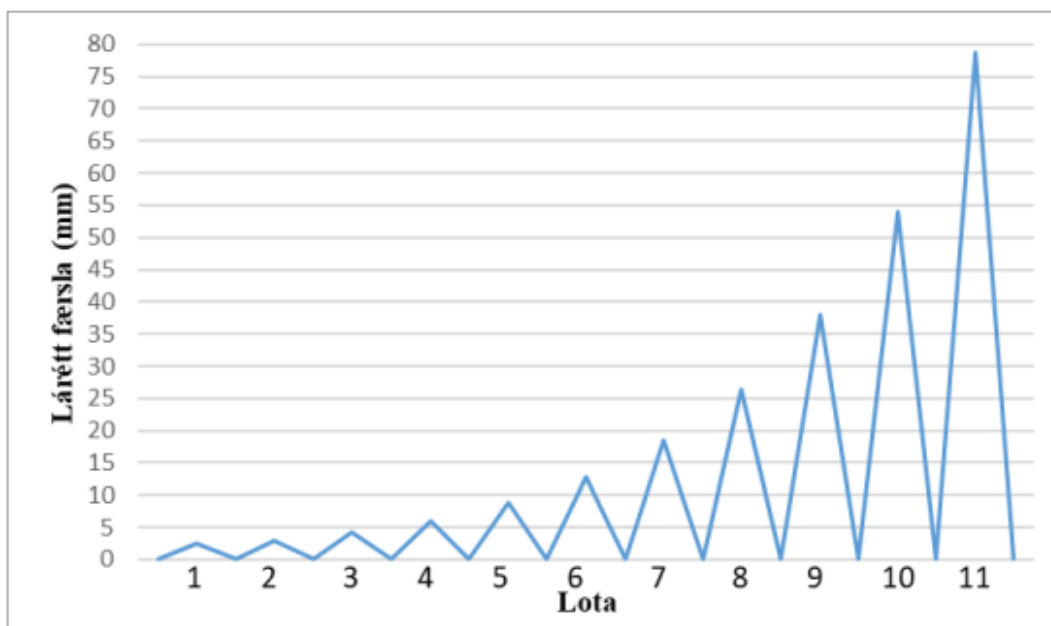
Hámarksfærsla vökvatjakkis í hverri lotu í átakshæð 730 mm

| Lota | Lárétt hlutfallsfærsla (%) | Lárétt færsla (mm) |
|------|----------------------------|--------------------|
| 1 | 0,33 | 2,4 |
| 2 | 0,4 | 2,9 |
| 3 | 0,58 | 4,2 |
| 4 | 0,83 | 6,1 |
| 5 | 1,19 | 8,7 |
| 6 | 1,72 | 12,6 |
| 7 | 2,48 | 18,1 |
| 8 | 3,57 | 26,1 |
| 9 | 5,14 | 37,5 |
| 10 | 7,4 | 54,0 |
| 11 | 10,65 | 77,7 |



↑ Mynd 5.2

Lárétt hlutfallsfærsla í prósentum sem fall af lotum



↑ Mynd 5.3

Lárétt færsla í millimetrum sem fall af lotum

6 Ástandsskoðun prófstykkja

Í þessum kafla verður ástandi prófstykkjanna lýst á meðan prófunum stóð og þau borin saman. Áður en próf hófust voru prófstykkinn máluð hvít og á þau rúðustrikuð með tússpenna til þess að auðvelda kortlagningu sprungna. Hver rúða var 10 cm x 10 cm að stærð. Prófstykkinn fóru í gegnum samtals ellefu álagspróf eða lotur. Í hverri lotu var ýtt á prófstykkið í hámarksfærslu og álagi haldið meðan sprungur voru merktar og ljósmyndir teknar. Eftir að álagi var sleppt var prófstykkið skoðað aftur og athugað hvort sprungur væru lokaðar.

Til þess að geta borið saman prófstykkinn á kerfislægan hátt var stuðst við lýsingu á skemmdum sem sjá má í töflu 6.1. Lýsingin var aðlöguð fyrir þetta verkefni út frá lýsingu sem má finna í UW/PEER Structural Performance Database fyrir brúarsúlur og var þróað af Berry o.fl. (2003).

↓ Tafla 6.1

Markverðar skemmdir og lýsing á þeim

| Skemmdir | Lýsing |
|---|---|
| Fyrsta áberandi lárétt sprunga í vegg | Sprunguvídd $\geq 0,5$ mm |
| Fyrsta áberandi sprunga í $\sim 45^\circ$ á vegg | Lengd sprungu er jöfn eða lengri en 1/4 af þykkt veggjar. Sprunguvídd $\geq 0,5$ mm |
| Fyrsta áberandi sprunga í $\sim 45^\circ$ í sökkli | Lengd sprungu er jöfn eða lengri en 1/4 af þykkt sökkuls. Sprunguvídd $\geq 0,5$ mm |
| Fyrsta sprunga í vegg sem lokast ekki eftir að álag er tekið af | Sprunguvídd $\geq 0,25$ mm |
| Fyrsta flögnun steypu í sökkli | Fyrsta flögnun steypu séð sjónrænt |
| Fyrsta flögnun steypu í stöpulvegg | Fyrsta flögnun steypu séð sjónrænt |
| Fyrsta áberandi flögnun steypu í stöpulvegg | Hæð flögnunar er jöfn eða lengri en 1/4 af þykkt veggjar |
| Flögnun steypu í stöpulvegg hættir | Flögnun hættir þó að lárétt færsla veggjar aukist |
| Lóðrétt járn í stöpulvegg sýnileg | Langjárn í stöpulvegg sýnilegt sjónrænt |
| Kiknun lóðréttis járn í stöpulvegg | Kiknun lóðréttis járn í stöpulvegg séð sjónrænt |
| Slit lóðréttis járn í stöpulvegg | Slit járn sýnilegt eða hljóð heyrist |

6.1 Þróun skemmda

Áður en tilraunir hófust voru teknar myndir af prófstykkjunum og athugað hvort sprungur væru til staðar. Mynd 6.1 sýnir prófstykkinn áður en tilraunir hófust. Stuðst var við lýsingu á skemmdum í töflu 6.1 og niðurstöður teknar saman og settar fram í töflu 6.2. Í töflunni má sjá í hvaða lotu komu fyrst fram skemmdir ásamt tilsvarendi hlutfallsfærslu. Hlutfallsfærsla er skilgreind sem lárétt færsla veggjar í þeim punkti sem tjakkurinn ýtir á og svo lárétta færsla veggjar deilt með hæð tjakksins frá yfirborði sökkulsins.



Prófstykki SL



Prófstykki FL

↑ **Mynd 6.1**

Prófstykkinn borin saman áður en tilraunir hófust

Í upphafi prófanna mynduðust hárfínar sprungur (sprunga minni en 0,1 mm) sem lokuðust jafnóðum eða um leið og álag var tekið af. Fyrsta áberandi sprunga myndaðist í lotu 6 (1,77% hlutfallsfærsla) fyrir prófstykki SL en fyrr í FL eða í lotu 4 (0,85% hlutfallsfærsla). Í lotu 6 í báðum prófstykkjum var fyrst tekið eftir að sprunga lokaðist ekki alveg eftir að álagi var létt og tekið af veggnum. Flögnun steypu í vegg prófstykkjanna varð fyrst vart við og tekið eftir í lotu 8 (3,67% hlutfallsfærsla) í SL en í FL var það í lotu 7 (2,55% hlutfallsfærsla). Flögnun steypunnar var staðsett við yfirborð sökkulsins á þeirri hlið veggjarins þar sem þrýstingur var á meðan að það var verið að ýta á vegginn. Hins vegar var fyrst tekið eftir 45 gráðu sprungu á stöpulvegg prófstykkis FL í lotu 8 (3,67% hlutfallsfærsla). Það gaf til kynna að sker væri ráðandi og eftir þessa uppgvötun fór álagsgeta FL minnkandi. Þessi sprunga tengdist lárétttri sprungu sem hafði myndast um það bil 11 cm fyrir ofan sökkul. Sprunga í 45 gráður myndaðist hins vegar í SL í lotu 9 (5,28% hlutfallsfærsla).

↓ **Tafla 6.2**

Þróun skemmda í prófstykkjunum

| Skemmdir | Prófstykki SL | | Prófstykki FL | |
|---|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| | Lota | Hlutfallsfærsla (%) | Lota | Hlutfallsfærsla (%) |
| Fyrsta áberandi lárétt sprunga í vegg | 6 | 1,77 | 4 | 0,85 |
| Fyrsta áberandi sprunga í ~ 45° á vegg | 9 | 5,28 | 8 | 3,67 |
| Fyrsta áberandi sprunga í ~ 45° í sökkli | - | - | - | - |
| Fyrsta sprunga í vegg sem lokast ekki eftir að álag er tekið af | 6 | 1,77 | 6 | 1,77 |
| Fyrsta flot í líðréttu járni | 5 | 1,22 | 5 | 1,22 |
| Fyrsta flögnun steypu í vegg | 8 | 3,67 | 7 | 2,55 |
| Fyrsta flögnun steypu í sökkli | 8 | 3,67 | 7 | 2,55 |
| Mikil flögnun steypu í stöpulvegg | 9 | 5,28 | 10 | 7,6 |
| Flögnun steypu í stöpulvegg hættir | - | - | - | - |
| Lóðrétt járn í stöpulvegg sýnileg | 9 | 5,28 | - | - |
| Kiknun lóðréttis járn í stöpulvegg | - | - | - | - |
| Slit lóðréttis járn í stöpulvegg | 11 | 10,94 | - | - |

Á mynd 6.2 má sá prófstykkin borin saman eftir lotu 8 en myndin er tekin á þeirri hlið sem álagið verkaði á.



Prófstykki SL



Prófstykki FL

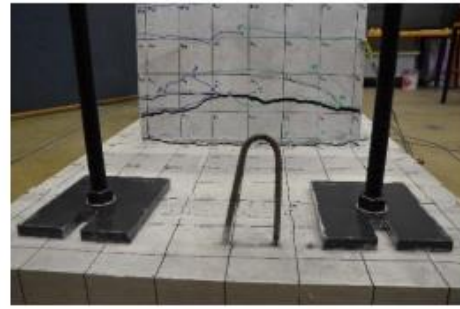
↑ **Mynd 6.2**

Prófstykkin borin saman í lotu 8 (álag er á veggnum)

Þegar það kom að lotu 10 (7,4% hlutfallsfærsla) í báðum prófstykkjum voru sprungur nægilegar stórar svo það var hægt að greina lóðrétt járn. Í lotu 11 í prófun SL slitnuðu tvö langjárn en slit á járni átti sér ekki stað í FL. Prófstykkin eru borin saman á mynd 6.3 og þar má sjá sprunguna sem myndaðist í prófstykki FL eftir lotu 8. Sprungan er staðsett u.þ.b. 11 cm fyrir ofan sökkul. Í hvorugum sökkli voru engar skemmdir sjáanlegar eftir álagspróf.



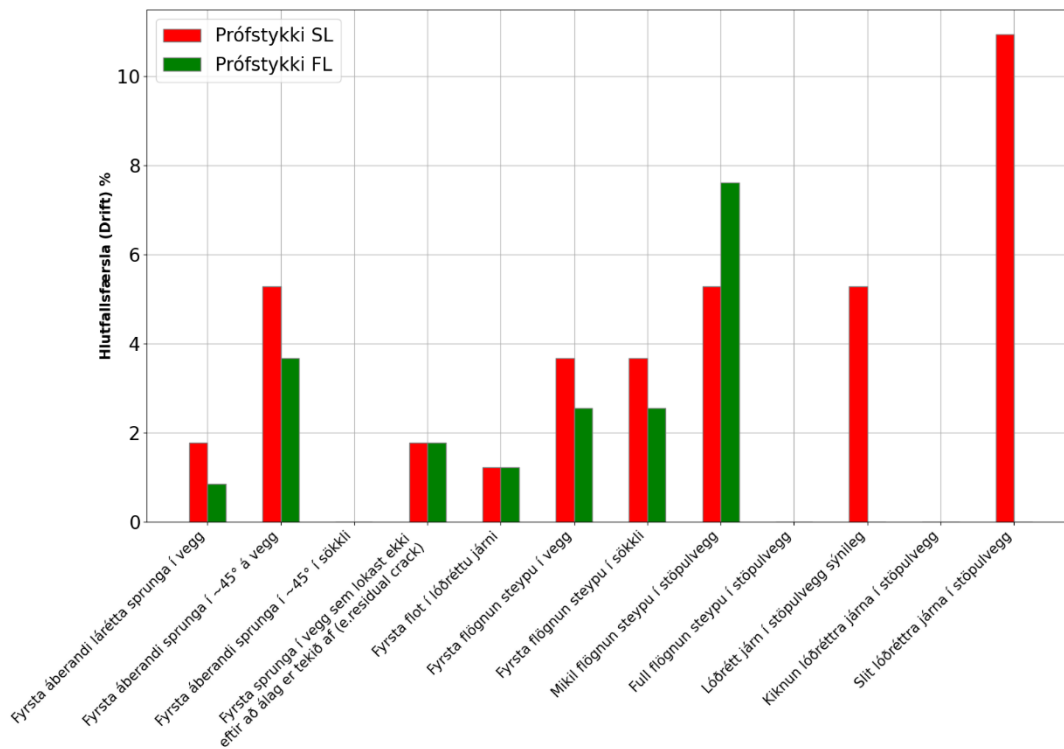
Prófstykki SL



Prófstykki FL

↑ Mynd 6.3

Prófstykkinn borinn saman í lotu 8 (álag er á veggnum)



↑ Mynd 6.4

Samanburður á þróun skemmda í prófstykkjum

Að tilraunum loknum voru prófstykkinn söguð í tvennt til að skoða tengingarnar í miðjum vegg. Tengingarnar eru bornar saman á mynd 6.5. Engar sjáanlegar skemmdir eru í tengingunum en brotmynd veggjanna er mismunandi. Í vegg prófstykkis SL er vægisbrot á meðan blanda af vægis- og skerbroti er sjáanlegt í vegg prófstykkis FL.



Prófstykki SL



Prófstykki FL

↑ **Mynd 6.5**

Samanburður á tengingum eftir að tilraunum lauk (prófstykkinn eru söguð í tvennt)

7 Mældar niðurstöður

Í þessum kafla verður efnisprófunum steypu og stáls lýst sem og niðurstöður úr álagsprófum kynntar.

7.1 Efnispróf stáls og steypu

Prófstykkinn tvö voru steypst í tveimur steypum hjá BM Vallá. Í fyrri steypunni þann 3. mars 2022 var veggur prófstykkis FL og sökkull prófstykkis SL steypst og í þeirri síðari var sökkull FL og veggur SL steypst. Síðari steypan fór fram nokkrum dögum síðar eða 7. mars. Fyrirskrifaður þrýstistyrksflokkur steypunnar var C35/45 með mestu fylliefnisstærðina 16 mm. Stærðin var fengin með því að skala niður (63%) mestu fylliefnisstærðina sem var notuð í brúnni yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði. Allt kambstál var K10 B500NC skv. ÍST NS 3576-3 og keypt hjá fyrirtækinu Bindivír ehf.

Framkvæmd voru efnispróf á steypu og stáli. Gerð voru bæði próf á þrýstistyrk og togstyrk steypunnar. Prófanir á þrýstistyrk steypunnar fóru fram í BM Vallá en próf á togstyrk hennar fóru fram hjá Eflu verkfræðistofnu. Próf á togstyrki kambstáls voru gerð í tilraunastofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands í VR-III.

7.1.1 Þrýstistyrkur steypu

Þrýstistyrkur steypunnar var prófaður samkvæmt staðli ÍST EN 12390-3:2009. Tekin voru samtals sex sívalningar úr hvorri steypu til að meta þrýstistyrk steypunnar á prófdögum SL og FL. Stærð sívalninganna var 100 mm x 200 mm. Samkvæmt staðli skal brjóta þrjá sívalninga og taka meðaltal styrks þeirra. Á prófdegi SL voru þrjú sýni úr sökklinum brotin og þrjú úr veggnum. Hins vegar voru einungis brotin tvö sýni úr hvorri steypu í prófstykki FL. Það var gert til þess að geta metið togstyrk steypunnar úr þessum tveimur steypum í prófstykkjunum. Í töflu 7.1 má sjá niðurstöður úr þrýstiprófunum fyrir prófstykki SL. Sýni úr sökkli voru 195 daga gömul og sýni úr vegg 191 daga gömul.

↓ **Tafla 7.1**

Mældur þrýstistyrkur steypu í prófstykki SL

| Prófstykki | Sýni | Dagar | Þrýstistyrkur (MPa) | Meðaltal (MPa) |
|------------|---------|-------|---------------------|----------------|
| SL | Sökkull | 195 | 61,5 | 59 |
| | | 195 | 57,9 | |
| | | 195 | 57,7 | |
| | Veggur | 191 | 74,1 | 70,3 |
| | | 191 | 69,3 | |
| | | 191 | 67,4 | |

Tafla 7.2 sýnir niðurstöður þrýstiprófana úr prófstykki FL en eins og áður sagði voru aðeins tvö sýni prófuð úr hvorri steypu þar sem geymdir voru tveir sívalningar fyrir togstyrkspróf. Sýni úr vegg voru 201 daga gömul og sýni úr sökkli 191 daga gömul.

↓ **Tafla 7.2**

Mældur þrýstistyrkur steypu í prófstykki FL

| Prófstykki | Sýni | Dagar | Þrýstistyrkur (MPa) | Meðaltal (MPa) |
|------------|---------|-------|---------------------|----------------|
| FL | Sökkull | 197 | 67,2 | 67,3 |
| | | 197 | 67,4 | |
| | Veggur | 201 | 59 | 60,5 |
| | | 201 | 62 | |

Eins og sést í töflum 7.1 og 7.2 var þrýstistyrkur steypunnar vel yfir C35/45. Ástæðan getur verið meðal annars að prófstykkinn höfðu við bestu aðstæður. Þau voru steipt inn í einingarverksmiðju BM Vallá, sem er staðsett á Breiðhöfða 3. Prófstykkinn sátu inni í verksmiðjunni í viku þangað til þau voru flutt á tilraunstofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands.

7.1.2 Kleyfnipróf steypu

Togstyrkur steypunnar var metinn í kleyfniprófi sem fór fram hjá Eflu verkfræðistofu. Framkvæmdin var þannig að fyrst voru tekin mál af sívalningum þar sem mæld var hæð og þvermál. Sívalningur var svo komið fyrir á hliðinni inn í sérstakt tæki sem er sérhannað fyrir kleyfnipróf. Þessu var svo komið fyrir undir pressu eins og myndir 7.1 og 7.2 sýna.



↑ **Mynd 7.1**

Sívalningur undirbúinn fyrir kleyfnipróf



↑ **Mynd 7.2**

Sívalningur inn í pressu (mynd tekin eftir prófun)

Prófaðir voru aðeins tveir sívalningar til þess að fá hugmynd um togstyrk steypunnar í steypunum tveimur. Í töflu 7.3 eru mæld gögn.

↓ **Tafla 7.3**

Mál sívalninga í kleyfniprófi og mældur hámarkskraftur

| Prófstycki | Sýni | Þvermál (mm) | Hæð (mm) | Hámarkskraftur (kN) |
|------------|------------------|--------------|----------|---------------------|
| SL / FL | Sökkull / Veggur | 100 | 200 | 135 |
| SL / FL | Veggur / Sökkull | 100 | 201 | 151,4 |

Reiknað togþol steypunnar skv. Evrópu staðli ÍST EN 12390-5 er samkvæmt eftirfarandi jöfnu:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (1)$$

þar sem P er hámarkskraftur í pressunni, D er þvermál sívalningsins og L er lengd hans. Tafla 7.4 sýnir niðurstöðurnar sem fengust úr kleyfniprófinu

↓ **Tafla 7.4**

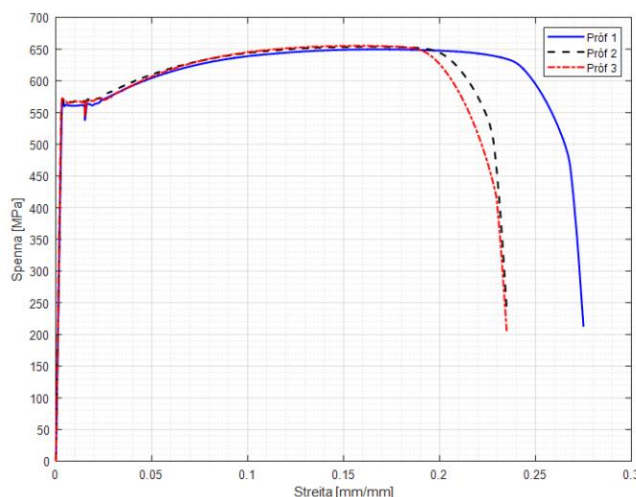
Reiknaður togstyrkur steypu í prófstykkjum SL og FL

| Prófstykki | Mál/Gögn | Togþol (MPa) |
|------------|------------------|--------------|
| SL / FL | Sökkull / Veggur | 4,3 |
| SL / FL | Veggur / Sökkull | 4,8 |

Eins og sést í töflunni er steypu blandan sem var gerð 3. mars heldur veikari en sú seinni sem var gerð 7. mars en eru þó bæði yfir meðaltalsgildi togstyrks steinsteypu fyrir C35/45 steypu sem er $f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$ sem getur verið vegna ofangreinda ástæða í undirkafla 7.1.1.

7.1.3 Togstyrkur steypustyrktarjárna

Allt fyrirskrifað kambstál í prófstykkjunum var B500NC með lágmarksflotmörkin, f_{yk} , 500 MPa, og allt kambstálið sem notað var í verkefninu kom úr sama búnti. Ein 1,5 metra K10 stöng úr búntinu var svo klippt í fimm 30 cm prófstykki. Ákveðið var að gera einungis þrjú togpróf og prófað var samkvæmt staðli EN ISO 6892-1:2009. Stöðluð mælilengd fyrir stál er 5d sem er 5 sinnum þvermál stangarinnar og notast var við þá lengd fyrir þessi próf. Fyrir K10 kambstál er því mælilengdin $5 \times 10 \text{ mm} = 50 \text{ mm}$ (Eiriksson o.fl., 2018). Mynd 7.3 sýnir spennu sem fall af streitu grafi úr prófunum og tafla 8 tekur saman flot- og hámarksspennu sem mæld var.



↑ **Mynd 7.3**

Spenna sem fall af streitu fyrir þrjú K10 sýni

Flotmörk stáls fara eftir gerð þess en venjulegt byggingarstál er á bilinu 200-600 MPa en í þessum prófunum eru flotmörkin um það bil 571 MPa og brotspennan um 653,4 MPa eins

og kemur fram í töflu 7.5. Fjaðurstuðull er tekin út frá grafi og er hann um 196 GPa en það er litlu minna en 200 GPa sem Eurocode 1992 mælir með að nota.

↓ **Tafla 7.5**

Togstyrkur kambstáls í prófstykkjum SL og FL.

| Prófstykki | Sýni | Flotspenna fyk (MPa) | Hámarksspenna ftk (MPa) |
|------------|----------|-------------------------|----------------------------|
| SL / FL | 1 | 567,2 | 650,5 |
| | 2 | 573 | 654,1 |
| | 3 | 573 | 655,5 |
| | Meðaltal | 571,1 | 653,4 |

Mikilvægt er að hafa góða teygju í byggingastáli svo það eyði þeirri orku sem getur myndast þegar tengingar verða fyrir áraun til dæmis vegna jarðskjálfta (Efnafræði byggingarefna, 2020). Lengdarbreyting eða teygjan er reiknuð á eftirfarandi hátt, það er lengdin þegar slit á sér stað deilt með upphaflegri lengd. Lengdarbreyting sýnanna eru tekin saman í töflu 7.6.

↓ **Tafla 7.6**

Togstyrkur kambstáls í prófstykkjum SL og FL.

| Prófstykki | Sýni | Lengdarbreyting (%) |
|------------|------|---------------------------------|
| SL / FL | 1 | $\frac{63,67}{50} * 100 = 27,3$ |
| | 2 | $\frac{61,65}{50} * 100 = 23,3$ |
| | 3 | $\frac{61,85}{50} * 100 = 23,7$ |

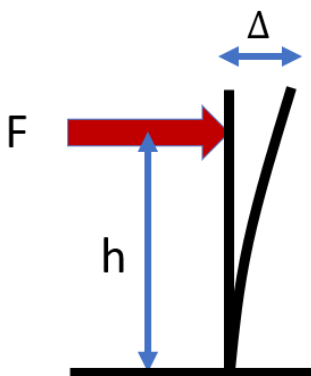
Eins og sést í töflu 7.6 er lengdarbreytingin vel yfir 7,5% sem er lágmarkslenging fyrir kambstál í stálflokki C samkvæmt Eurocode 1992.

7.2 Samanburður prófstykkja - vægi sem fall af láréttri hlutfallsfærslu

Keyrð voru tvö færslustýrð álagspróf á bæði prófstykkinn og þau síðan borin saman. Bæði stykkinn fóru í gegnum ellefu stigvaxandi færslustýrðar lotu. Reiknað var vægi við yfirborð sökkulsins með jöfnu 2:

$$M = F * h \quad (2)$$

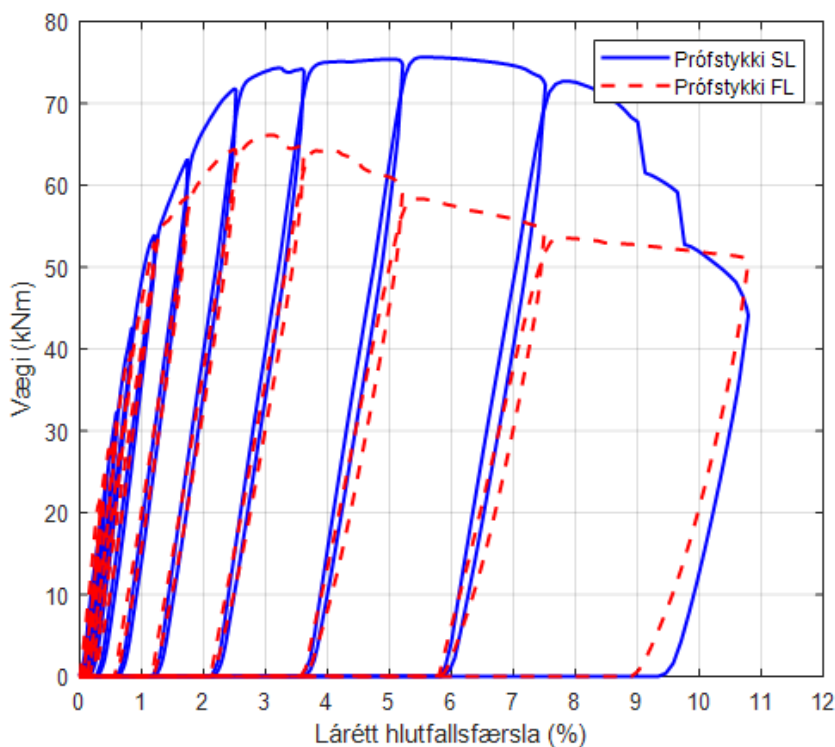
Þar sem M er vægi við yfirborð tengingar, F er mældur kraftur í Instron tjakknum og h er hæðin frá yfirborði sökkuls til tjakksins. Þetta er sýnt myndrænt á mynd 7.4.



Mynd 7.4

Stærðir notaðar í jöfnu 2.

Mynd 7.5 sýnir niðurstöður beggja prófstykkja sem vægi við yfirborð tengingar og fall af hlutfallslegri færslu. Hlutfallsleg færsla er reiknuð sem lárétt færsla Δ deilt með hæðinni h .



↑ **Mynd 7.5**

Vægi sem fall af láréttri hlutfallsfærslu fyrir prófstykki SL og FL.

Á myndinni má sjá að prófstykkin hegðuðu sér svipað fyrstu fimm loturnar eða upp að 1% hlutfallsfærslu en eftir það fer að skilja á milli prófstykkjanna og sjáanlegur munur kemur fram. Tafla 10 ber saman prófstykkin það er hvenær hámarks mótstöðuvægi er náð og þegar mótstöðuvægið er orðið 80 prósent af hámarki. Það síðara er einmitt skilgreiningin á broti, það er brot er skilgreint sem 80% af hámarks mótstöðu tengingarinnar (Pang, o.fl., 2008).

↓ **Tafla 7.7**

Vægi og láréttar hlutfallsfærslur við hámarks mótstöðuvægi og 80% af hámarks mótstöðuvægi.

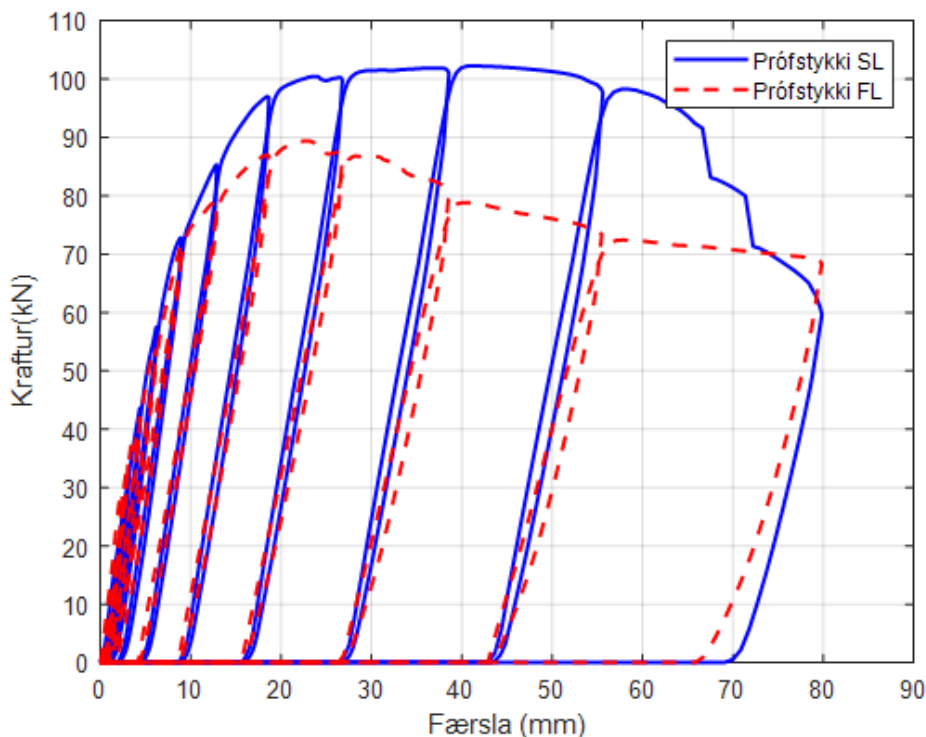
| Mælistika | Prófstykki SL | Prófstykki FL |
|--|---------------|---------------|
| Hámarks mótstöðuvægi við yfirborð sökkuls (kNm) | 74,7 | 65,3 |
| Hlutfallsleg færsla þegar hámarks mótstöðuvægi er náð (%) | 5,6 | 3,1 |
| 80% af hámarks mótstöðuvægi við yfirborð sökkuls (kNm) | 59,7 | 52,2 |
| Hlutfallsleg færsla þegar 80% af hámarks mótstöðuvægi er náð (%) | 9,5 | 8,8 |

Eins og sést í töflu 7.7 er hámarks vægi eða mótstaða í SL 74,7 kNm í 5,6% hlutfallsfærslu en hámarks vægi FL er 65,3 kNm í 3,1% hlutfallsfærslu. Brotmynd prófstykkis SL er flokkað sem vægisbrot meðan brotið sem fékkst í FL er blanda af vægis- og skerbroti. Hlutfallið milli hæðar (h) og skerðýpis (d) veggjanna í prófstykkjunum var $h/d = 5,0$ svo það var líklegra en ekki að fá blöndu

af þessum tveimur brotmyndum (Wight, 2015). Þessi munur á styrk og mismunandi brotmyndir urðu þess valdandi að eftir að prófunum lauk voru prófstykkinn söguð í sundur og gerðar mælingar á þykktum veggjanna. Það kom í ljós að meðalþykkt veggjar SL var um 200 mm meðan FL var 195 mm. Þessi mismunur er skýrður með því að veggur SL var steypdur lóðréttur og þar með myndaðist þrýstingur í mótunum eftir að steypan var lögð í mótin og þau bólgnuðu út. Veggur FL var steypdur lárétt og því stóðst fyrirskrifuð þykkt veggjarins. Annað sem er rétt er að benda á er að steypustyrkur veggjar SL var um 70 MPa en um 60 MPa í FL. Sökkklar beggja prófstykkja voru óskemmdir. Bæði prófstykkinn héldu styrk yfir 80% af mældri hámarks mótstöðu fram í síðustu lotu 11. Prófstykki SL missti styrkinn niður fyrir 80% við láréttu hlutfallsfærsluna 9,5% en prófstykki FL við 8,8%.

7.3 Samanburður prófstykkja – kraftur sem fall af færslu

Prófstykkinn eru borin saman á mynd 7.6 sem kraftur og sem fall af færslu. Myndin sýnir sömu upplýsingar og fékkst í undirkafla 7.2.



↑ **Mynd 7.6**
Kraftur sem fall af færslu af fyrir prófstykki SL og FL

Hérna sjáum við að eins og með vægi á móti hlutfallslegri færslu þá höguðu prófstykkinn sér svipað fyrstu fimm loturnar en eftir það fer að skilja á milli prófstykkjanna og hægt er að sjá mun á milli þeirra á milli. Í töflu 7.8 hér að neðan má sjá kraft og láréttar færslur teknar saman við hámarkskraft og 80% af hámarkskraft.

↓ **Tafla 7.8**

Kraftur og láréttar færslur við hámarks mótsstöðukraft og 80% af hámarks mótsstöðukraft.

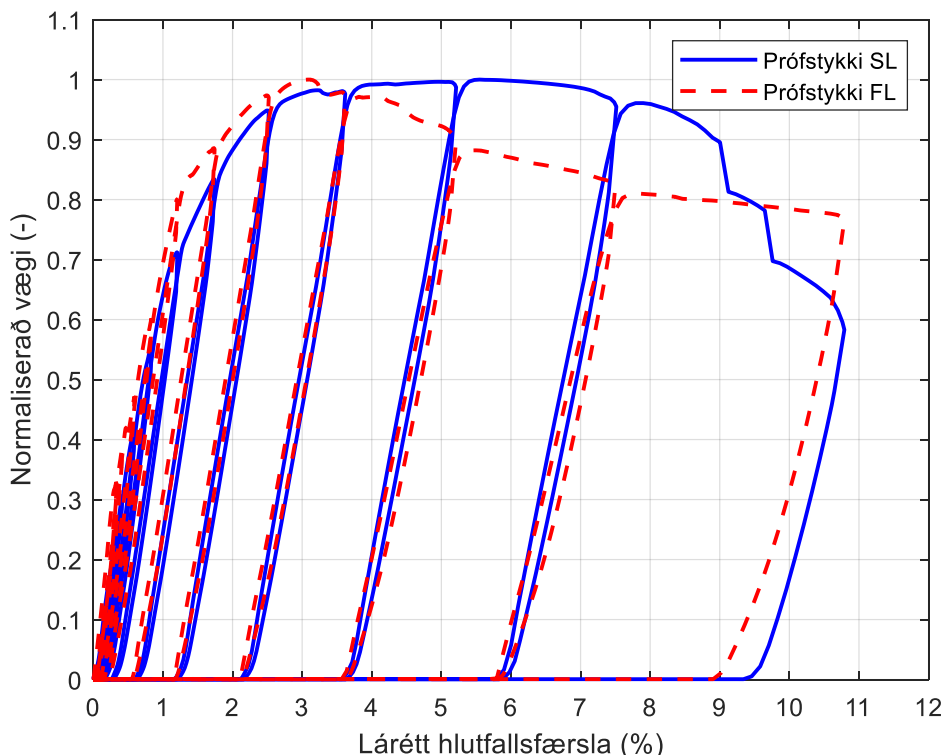
| Mælistika | Prófstycki SL | Prófstycki FL |
|---|---------------|---------------|
| Hámarkskraftur (kN) | 102,3 | 89,4 |
| Færsla þegar hámarkskrafti er náð (mm) | 41,1 | 22,8 |
| 80% af hámarkskrafti (kN) | 81,8 | 71,5 |
| Færsla þegar 80% af hámarkskrafti er náð (mm) | 69,5 | 64,1 |

7.4 Normaliserað vægi sem fall af hlutfallsfærslu

Reiknað var normaliserað vægi í tengingunni sem fall af lárétttri hlutfallsfærslu til að bera saman prófstykkin. Normaliserað vægi var reiknað með eftirfarandi jöfnu:

$$M_{norm} = \frac{F \cdot h}{F_{max}} \quad (3)$$

Þar sem M_{norm} er vægi við yfirborð tengingar, F er mældur kraftur í Instron tjakknum, h er hæðin frá yfirborði sökkuls til tjakksins og F_{max} er mældur hámarkskraftur í prófstykkjum SL og FL. Hámarkskraftur í prófstykki SL mældist 102,3 kN í hlutfallsfærslunni 5,6% á meðan hámarkskrafturinn í FL var 89,4 kN í hlutfallsfærslunni 3,1%. Mynd 8.2 ber saman bæði prófstykkin.



↑ **Mynd 7.7**

Normaliserað vægi sem fall af lárétrri hlutfallsfærslu fyrir prófstykki SL og FL.

Hægt er að sjá á myndinni að í byrjun álagsprófs er prófstykki FL stífara en SL. Það er talið vera vegna þess að það eru engin samskeyti milli veggjarins og sökkulsins. Stöpulveggur FL stingst 220 mm niður í staðsteypta sökkulinn. Hins vegar eru samskeyti til staðar í SL þar sem fyrst var sökkullinn steypdur og síðan veggurinn í annarri steypu. Á myndinni má sjá einnig að prófstykkin haga sér svipað upp að 3% hlutfallsfærslu en þá fer mótstaðan að minnka í prófstykki FL en það var einmitt þegar það var tekið eftir 45 gráðu sprungu í hlið stöpulveggjarins. Prófstykki SL heldur jöfnum styrk fram að 6% hlutfallsfærslu. Í síðustu lotunni hjá prófstykki SL slitnuðu tvö langjárn í veggnum eins og sjá má í mælingunum. Engin járn slitnuðu í FL. Bæði prófstykki héldu styrk yfir 80% af hámarki fram í síðustu lotu en það er einmitt algeng skilgreining hvenær brot eigi sér stað.

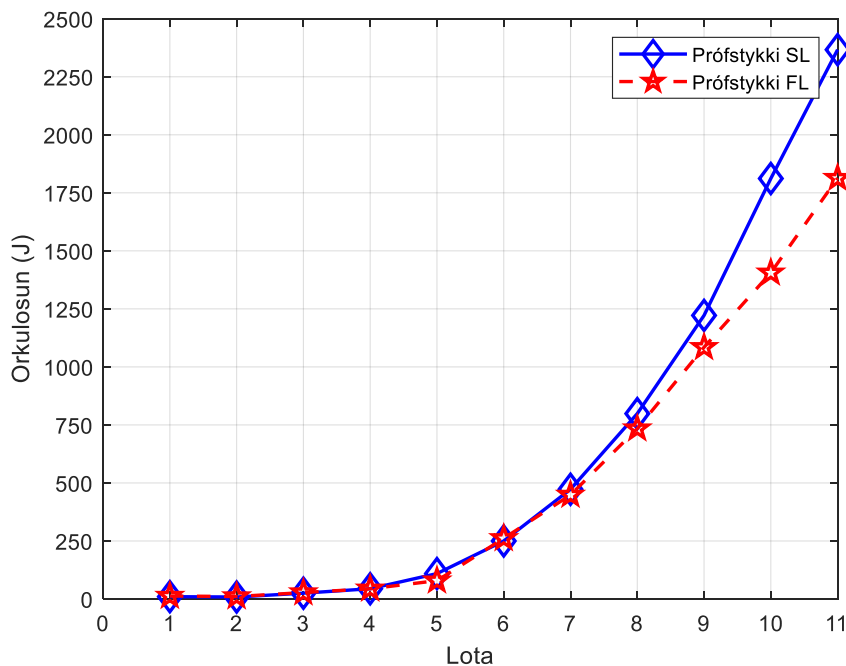
7.5 Orkulosun

Orka er skilgreind sem kraftur sinnum færsla og hægt er að meta orkulosun prófstykkjanna með því að reikna flatarmálið undir ferli í grafi sem sýnir kraft sem fall af færslu. Orkan var reiknuð með jöfnu 4:

$$E_{lota} = \sum_i \frac{F_{i+1} + F_i}{2} (\Delta_{i+1} - \Delta_i) \quad (4)$$

Hér er verið nota trapisuheildun og útreikningarnir voru gerðir í Matlab.

Mynd 8.3 ber saman prófstykkin með tilliti til orkulosunar fyrir hverja lotu. Eins og má sjá á myndinni eru orkulosun þeirra nærri sú sama fram að lotu 7 (2,47% hlutfallsfærsla) en eftir það fer að skilja á milli þeirra. Í lotu 8 myndaðist 45 gráðu sprunga í stöpulvegg FL og styrkurinn fór minnkandi eftir það og þar með var orkulosunin minni en í SL. Prófstykki SL hélt jöfnum styrk fram í síðustu lotuna.



↑ **Mynd 7.8**
Orkulosun fyrir hverja lotu fyrir prófstuykki SL og FL.

8 Samantekt og helstu niðurstöður

Í þessari rannsókn var þróuð ný tengingin á milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls með því markmiði að stytta framkvæmdatíma á verkstað. Verkefnið var samstarfsverkefni Háskóla Íslands, Vegagerðarinnar, BM Vallá og Vistu verkfræðistofu. Hugmyndin með nýju tengingunni er að forsteyptur stöpulveggur er framleiddur þannig að sá hluti veggjar sem stingst niður í staðsteyptan sökkul er með hrjúft yfirborð til að auka bindingu milli veggjar og sökkuls. Veggurinn er jafnframt framleiddur með götum svo að efri járnagrindin komist í gegnum vegginn óhindrað. Byggingaröðin með nýju tengingunni er eftirfarandi:

1. Veggeining forsteypt.
2. Slegið upp fyrir sökkli og neðri járnagrind komið fyrir.
3. Veggeining hífið á sinn stað og hún stillt af.
4. Efri járnagrind í sökkli komið fyrir og þau þrædd í gegnum göt forsteyptrar veggeiningar.
5. gengið frá járnagrind í sökkli og hann steypur á staðnum.

Með nýju tengingunni er hægt að byggja landstöpul á jafnlöngum tíma og það tekur að byggja undirstöðu í hefðbundinni staðsteyptri útfærslu. Í hefðbundinni framkvæmd er fyrst slegið upp fyrir undirstöðu, járnabundið og undirstaðan steypur með útstandandi tengijárnum fyrir stöpulvegg. Tillagan að nýju tengingunni er sýnd á mynd 2.1 í kafla 2.

Tvö prófstykki í 63% skala voru smíðuð fyrir þessa rannsókn og prófuð í tilraunastofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands í VR-III. Fyrri prófstykkið var útfært hefðbundið þar sem bæði sökkul og stöpulveggur eru staðsteyptir. Það síðara var útfært með nýju tengingunni. Bæði prófstykki fóru í gegnum ellefu stigvaxandi færslustýrð álagspróf þar sem sett var álag lárétt á stöpulvegginn með 100 kN vökvatjakki. Samhliða þessum tilraunum voru gerðar efnisprófanir á steypu og kambstáli úr prófstykkjum.

Þessi samantektarskýrsla lýsir þróun nýju tengingarinnar, smíði prófstykkjanna, uppsetningu tilrauna og prófun tenginganna. Efnisprófanir sem fóru voru einnig hluti af þessum rannsóknum, lýsing á skemmdum í prófstykkjum sem og greining á helstu mældum niðurstöðum. Prófstykkjin voru einnig borin saman með tilliti til normaliseraðs vægis og orkulosunar.

Helstu niðurstöður þessarar rannsóknar eru eftirfarandi:

- Brot beggja prófstykkja var í stöpulveggnum fyrir ofan sökkul. Í prófstykki SL var vægisbrot fyrir ofan sökkul á meðan það var blanda af vægis- og skerbroti í FL. Hlutfallið milli hæðar tjakksins (h) og skerdýpis (d) var $h/d = 5,0$ í báðum prófstykkjum svo það var líklegt að fá skerbrot. Mælingar sýndu að þykkt stöpulveggjar SL var 200 mm á meðan þykkt FL var 195 mm. Einnig var styrkur steypunnar í SL hærri en í FL. Meðalþrýstistyrkur steypunnar í vegg SL var 70,3 MPa meðan hann var 60,5 MPa í FL. Þetta gæti hafa átt þátt í því að fullt vægisbrot fékkst í SL.

- Styrkur prófstykkjanna var mismunandi þar sem mældur hámarkskraftur í SL var 102,3 kN en 89,4 kN í FL. Þessi munur er útskýrður með mismunandi veggþykkt stöpulveggjanna og mismunandi þrýstistyrks steypunnar.
- Þegar prófstykkinn eru borin saman sem normaliserað vægi sem fall af hlutfallsfærslu má sjá að prófstykki FL er stífara en SL í byrjun álagsprófs. Talið er að það sé vegna þess að forsteypti stöpulveggur FL er samfelldur ofan í staðsteypta sökkulinn. Það er því engin samskeyti milli yfirborðs sökkulsins og veggjarins eins og er til staðar í prófstykki SL. Prófstykkin haga sér svipað upp að 3% hlutfallsfærslu en eftir það byrjar að skilja á milli þeirra. Í prófstykki FL myndaðist 45 gráðu sprunga sem benti til skerbrots og mótstaða fór því minnkandi. Prófstykki SL hélt styrk sínum alveg fram til enda. Prófstykki SL hélt styrk yfir 80% af hámarks mótstöðu fram til hlutfallsfærslunnar 9,5% en FL var það í 8,8% hlutfallsfærslu.
- Efnispróf á steypu sýndu að þrýstistyrkur steypunnar var töluvert hærri en fyrirskrifaður hönnunarstyrkur C35/45. Mældir styrkir voru á bilinu 60-70 MPa. Talið er að þessi há styrkur stafi af því að prófstykkin voru steipt við bestu aðstæður. Þau voru staðsett inn í einingaverksmiðju. Mældur flotstyrkur kambstálsins var 571 MPa en fyrirskrifaður lágmarksstyrkur er 500 MPa. Brotstyrkur kambstálsins mældist 653,4 MPa.

Markmið þessarar rannsóknar var að athuga hvort nýja tengingin í prófstykki FL stæðist álagspróf. Hún stóðst væntingar þar sem brot myndaðist í stöpulveggnum fyrir ofan sökkulinn. Nýja tengingin ætti því að geta vera góður kostur við hönnun brúa vegna þess að það eru margir kostir við hana. Þeir kostir eru meðal annars:

- Flutningur og meðhöndlun eininga er auðveldur.
- Engin járn standa út úr einingunni svo það einfaldar samsetningu þeirra á verkstað.
- Styttir framkvæmdatíma á verkstað.

Tengingin og aðferðafræðin ætti einnig að vera álitlegur kostur við gerð stoðveggja, til dæmis við gerð vegstokka.

Heimildaskrá

AASHTO LRFD bridge design specifications. (2010). Washington, D.C. :American Association of State Highway and Transportation Officials,

Berry, M. og Eberhard, M. (2003). *Performance Models for Flexural Damage in Reinforced Concrete Columns.* Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center.

Building Seismic Safety Council for the FEMA. (2004). NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations and for new Buildings and Other Structures (FEMA 450). Washington D.C.

Culmo, M.P. (2011). *Accelerated Bridge Construction.* USA: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.

Efnisfræðifræði byggingarefna. (2020). *Heimadæmi 2 lausn.* Reykjavík: Háskólinn í Reykjavík.

Eiriksson, H.J., Bessason, B. og Unnthorsson R. (2018). Uniaxial and lateral strain behavior of ribbed reinforcement bars inspected with digital image correlation. *Structural Concrete*, 19(6), 1992–2003. <https://doi.org/10.1002/suco.201800042>

Franz Sigurjónsson. (2023). Samanburður á tengingu staðsteypts og forsteypts stöðveggjar við staðsteypta undirstöðu. Skemman. <https://skemman.is/handle/1946/44581>

EN ISO 6892-1:2009: Metallic materials—Tensile testing, Part 1: Method of test at room temperature. Brussel, European Committee for Standardization.

Federal Highway Administration. (2013). Accelerated Bridge Construction. Bandaríkin: U.S. Department of Transportation

Guðmundsson, G.V. (2018). Fækkun einbreiðra brúa. *Framkvæmdafréttir 4. tbl. /18*, 1-4.

Haraldsson, Ó.H. (2013). *Precast Bent System for High Seismic Regions.* Washington: University of Washington

ÍST EN 1990:2002: Eurocode 0: Basis of structural design. Brussel, European Committee for Standardization.

ÍST EN 1991-1-2:2002: Eurocode 1: Hönnun brunahluta – Hluti 1-2: Almennnt – Eldvarnarhönnun. Brussel, European Committee for Standardization.

ÍST EN 1992-1-1:2004: Eurocode 2: Hönnun steinsteypuvirkja – Hluti 1-1: Almennar reglur og reglur fyrir byggingar. Brussel, European Committee for Standardization.

ÍST EN 1992-2:2005: Eurocode 2: Hönnun steinsteypuvirkja - Hönnun og úfærslureglur. Brussel, European Committee for Standardization

ÍST EN 1997-1:2004: Þjóðarviðauki við Eurocode 7. Brussel, European Committee for Standardization.

ÍST EN 1998-5:2004: Þjóðarviðauki við Eurocode 8. Brussel, European Committee for Standardization.

Wight, J.K. (2015). *Reinforced concrete mechanics and design (seventh edition)*. USA: Pearson.

Khaleghi, B., Schultz, E., Seguirant, S., Marsh, L., Haraldsson, O., Eberhard, M. og Stanton, J.F. (2012). *Accelerated bridge construction in Washington state – from Research to practice*. Washington: University of Washington.

Mashal, M., White, S., Palermo, A. (2016). Quasi-static cyclic testing of emulative cast-in-place connections for Accelerated Bridge Construction in seismic regions. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 49(3), 267–282. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.49.3.267-282>

Matsumoto, E.E., Waggoner, M.C., Sumen, G., Kreger M.E., Wood, S.L. og Breen, J.E. (2001). *Development of a precast bent cap system*. University of Texas.

Moon, J., Lehman, D.E., Roeder C.W. og Lee, H. (2013). Evaluation of embedded concrete-filled tube (CFT) column-to-foundation connections. *Engineering Structures*, 56, 22-35. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.04.011>.

Ólafur Sveinn Haraldsson. (2015). *A Pre-Tensioned Bridge Bent System for Accelerated Bridge Construction*. Washington: University of Washington.

Pang, J.B.K., Steuck K.P., Cohagen L., Stanton, J.F. og Eberhard M.O. (2008). *Rapidly Constructible Large-Bar Precast Bridge-Bent Seismic Connection*. Washington: Washington State Department of Transportation.

Rúnar Steinn Smárason. (2022). Þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls. Skemman. <https://skemman.is/handle/1946/43178>

Samtök Iðnaðarins. (2021). *Innviðir á Íslandi 2021 – ástand og framtíðarhorfur*. Reykjavík: Samtök iðnaðarins.

Vegagerðin. (2018). *Reglur um hönnun brúa*. Reykjavík: Vegagerðin.

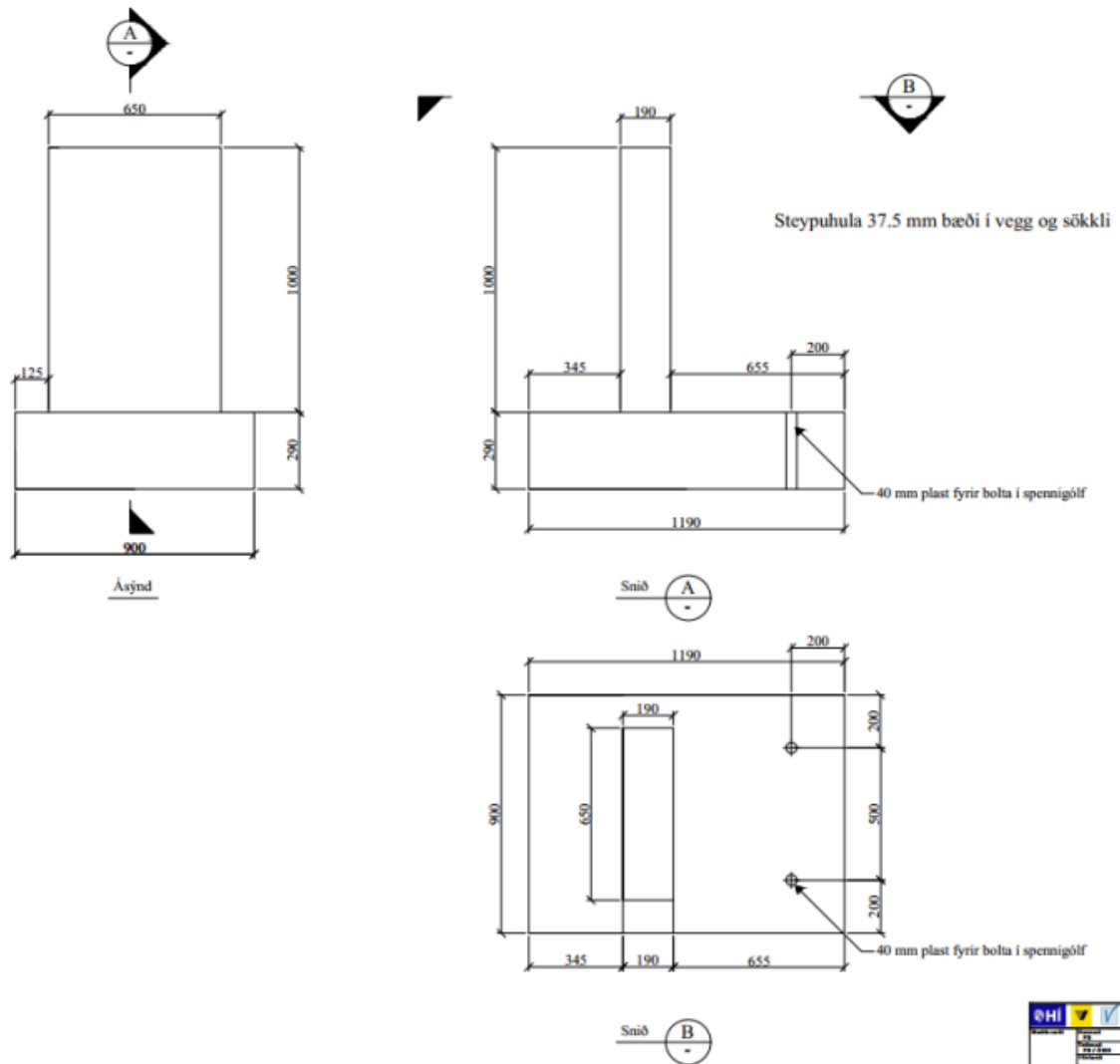
Wacker, J.M., Stanton, J.F., Hieber, D.G., og Eberhard, M. (2005). *Design of Precast Concrete Piers for Rapid Bridge Construction in Seismic Regions*. Washington: Washington State Transportation Center (TRAC).

Wacker, J.M., Stanton, J.F., Hieber, D.G., og Eberhard, M.O. (2005). *Design of Precast Concrete Piers for Rapid Bridge Construction in Seismic Regions*. Washington: Washington State Transportation Center (TRAC).

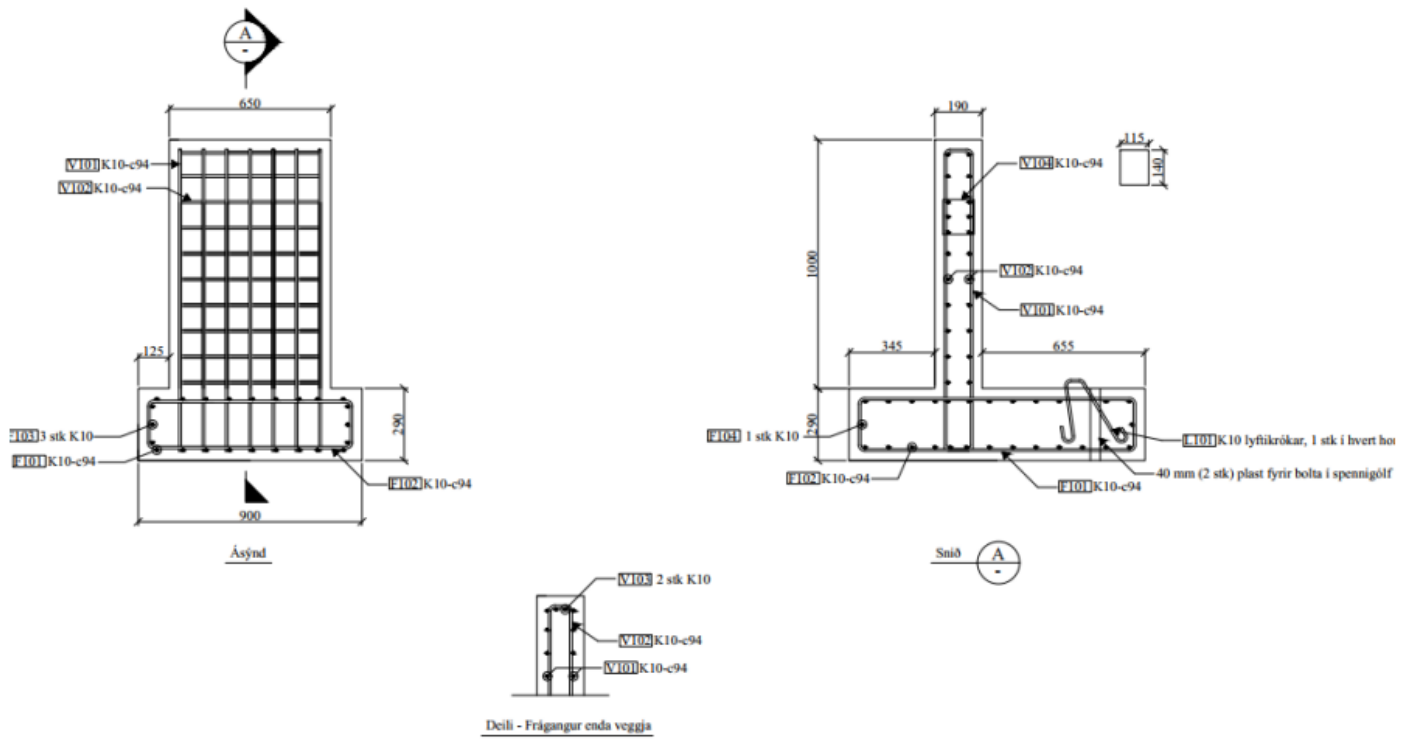
Washington State department of Transportation. (2022). *Bridge Design Manual (LRFD)*. Almennur hluti. Washington: Washington State department of Transportation.

Viðauki A: Teikningar

Prófstykki SL (viðmiðunartenging)

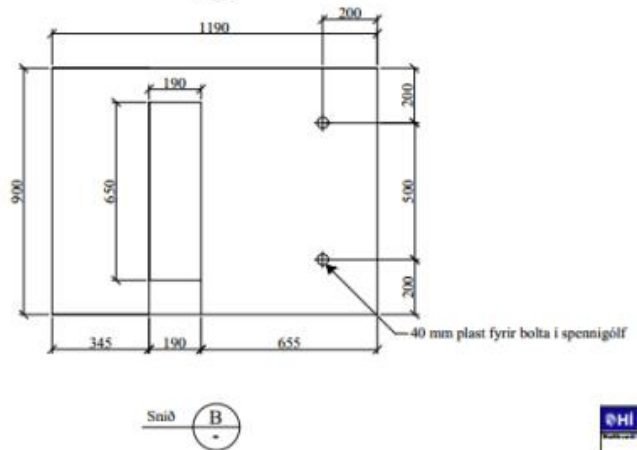
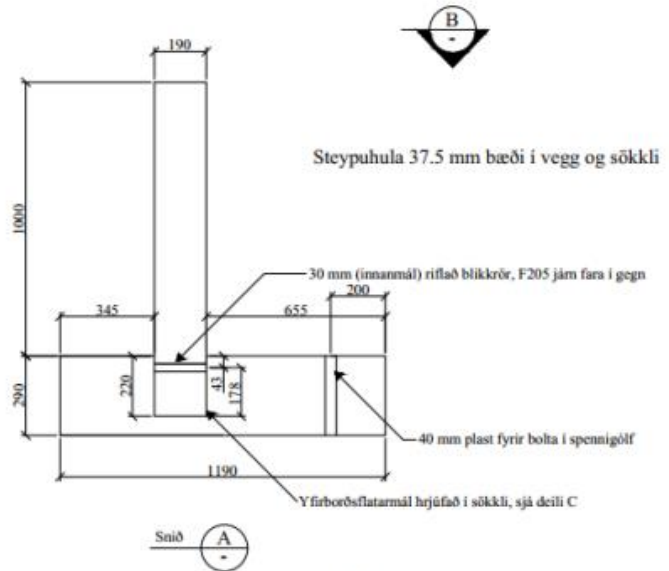
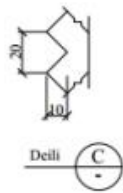
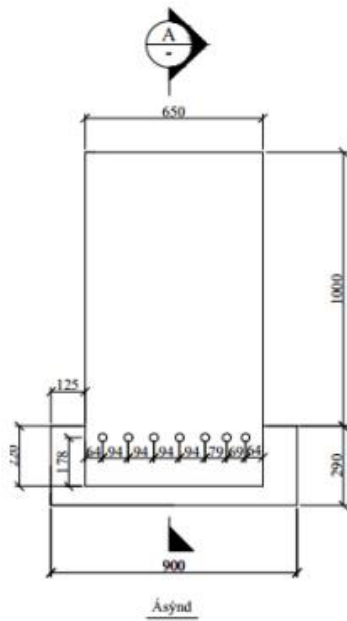


↑ **Mynd A.1**
Steypumál prófstykkis SL

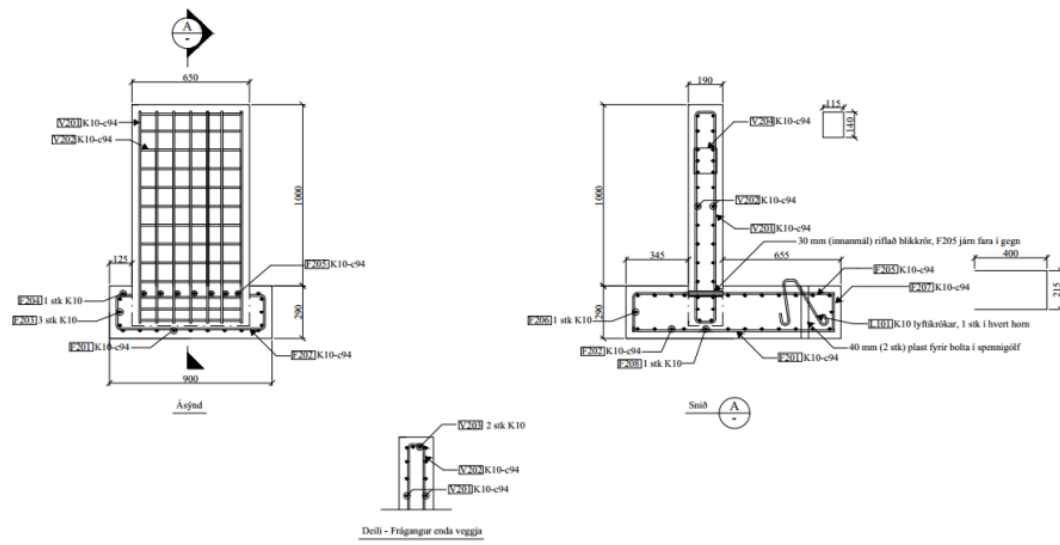


↑ Mynd A.2
Járnun prófstykkis SL

Prófstycki FL (Ný tenging)



↑ **Mynd A.3**
Steypumál prófstykkis FL



↑ **Mynd A.4**
Járnun prófstykkis FL