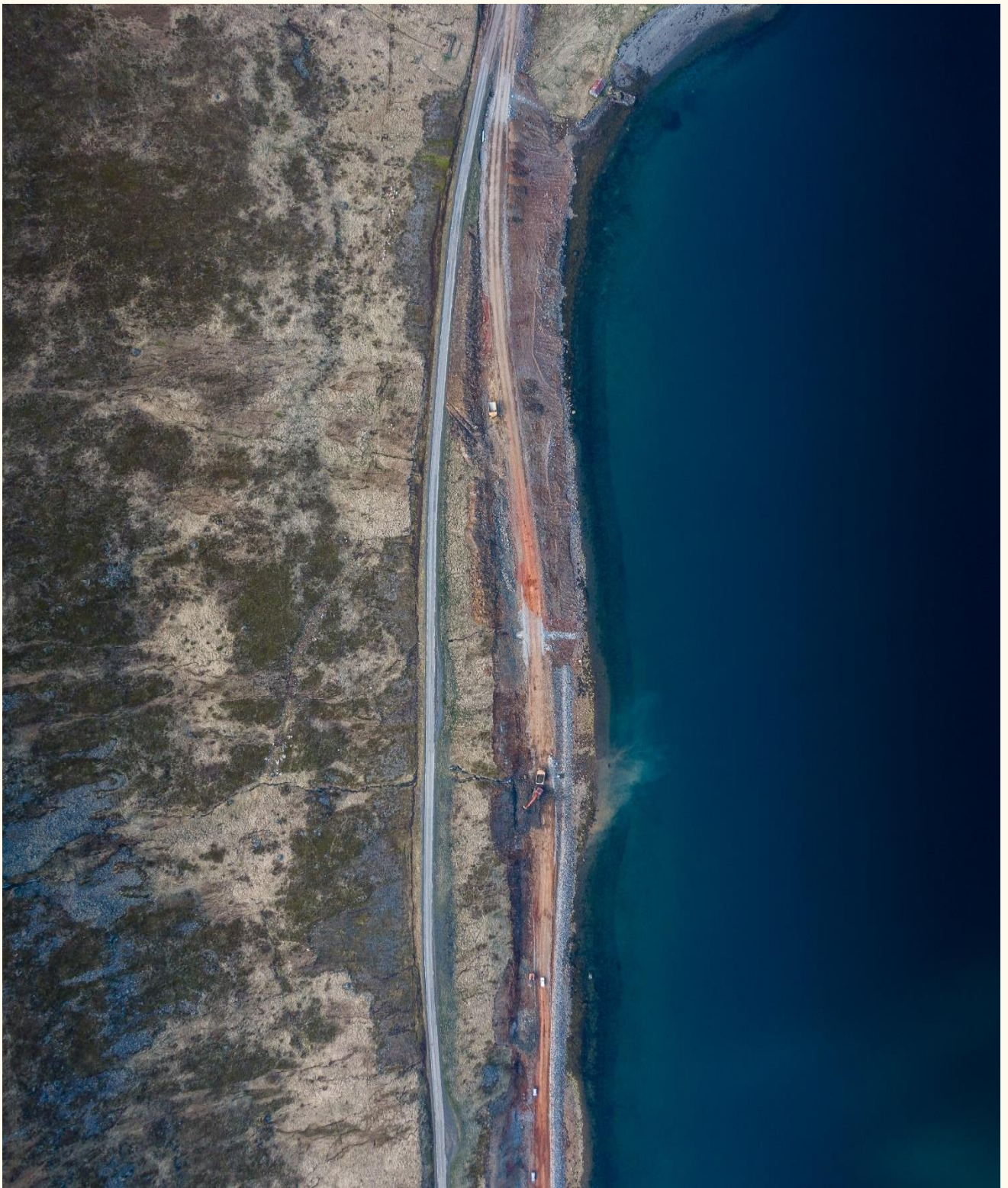




Tenging milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls með stórum steypustyrktarjárnnum

Lokaskýrsla

Verkefnið er styrt af Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar
Júní 2024



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/Lokaskýrsla	110	01.6.2024	Opin
Heiti skýrslu			
Tenging milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls með stórum steypustyrktarjárnnum			

Report Title in English

Large-Bar Connection Between Precast Abutment and Cast-in-Place Foundation

Höfundur/ar	Verkefnastjóri	Tengiliður Vegagerðarinnar
Ingi Sigurður Ólafsson Ólafur Sveinn Haraldsson Bjarni Bessason Ching-Yi Tsai	Bjarni Bessason	Guðrún Þóra Garðarsdóttir
Styrktaraðili		Samvinnuaðilar
Rannsóknasjóður Vegagerðarinnar BM Vallá Vista verkfræðistofa		Háskóli Íslands BM Vallá Vista verkfræðistofa

Útdráttur

Þessi rannsókn er framhald af verkefninu Þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls. Markmiðið er að hraða byggingu brúa á verkstað. Hugmyndin gengur út á að sökkull er steypur utan um forsteyptar einingar. Þannig er hægt að byggja landstöpul á sama tíma og það tekur að búa til sökkulinn sjálfan. Í þessari rannsókn voru smíðuð tvö ný prófstykki. Bæði prófstykki nýttu nýju tenginguna. Fyrri prófstykkið var smíðað nákvæmlega eins og í fyrri tilraunum nema skerleggjum var komið fyrir á markvissan hátt í veggnum til að stýra brotmyndinni í fullt vægisbrot. Í síðari

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 using Large-Bar concept.

Lykilorð

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

Undirskrift verkefnastjóra	Yfirfarið af
	ÓSH/BB

Tenging milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls með stórum steypustyrktarjárnnum

Ingi Sigurður Ólafsson

Ritgerð unnin sem hluti af
Magister Scientiarum gráðu í byggingarverkfræði

Leiðbeinendur
Dr. Ólafur Sveinn Haraldsson
Dr. Bjarni Bessason
Dr. Ching-Yi Tsai

Prófdómari
Guðrún Þóra Garðarsdóttir

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, maí 2024

Tenging milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls með stórum steypustyrktarjárnnum

Ritgerð unnin sem hluti af námi til M.S. gráðu í byggingarverkfræði

Höfundarréttur © 2024 Ingi Sigurður Ólafsson
Öll réttindi áskilin

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
VR-II Hjarðarhaga 2-6
107 Reykjavík
Íslandi

Sími: 525-4000

Skráningarupplýsingar:
Ingi Sigurður Ólafsson, 2024, Tenging milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls
með stórum steypustyrktarjárnnum, M.S.ritgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild,
Háskóli Íslands, 110 bls.

Höfundur ORCID:
ISBN:

Prentun: Prentun: Háskólaprent
Reykjavík, Íslandi, maí 2024

Ágrip

Þessi rannsókn fjallar um prófanir á tengingu milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls með því markmiði að hraða byggingu brúa á verkstað. Hugmyndin gengur út á að sökkull er steypdur utan um forsteyptar einingar. Þannig er hægt að byggja landstöpul á sama tíma og það tekur að búa til sökkulinn sjálfan.

Markmið prófana er að sýna fram á að tengingin sé jafn áreiðanleg og hefðbundin staðsteypt tenging sem er notuð í gerð landstöpla. Byggingarröð landstöpla sem nýta tenginguna er eftirfarandi: Veggeiningar er forsteyptar og sá hluti yfirborðs veggeininga sem stungið er í sökkul er gerður hrjúfur. Á verkstað er fyrst neðri járnagrind sökkuls bundin og komið fyrir. Veggeiningar eru síðan hífðar í sökkulmót og stilltar af. Járn í efri járnagrind eru þrædd í gegnum göt í veggeiningum. Gengið er svo frá efri járnagrind sökkulsins og hann steypdur á staðnum.

Þróun tengingarinnar hófst árið 2022 með smíði tveggja prófstykkja þar sem fyrra prófstykkið nýtti nýju tenginguna og það síðara var hefðbundin staðsteypt lausn til viðmiðunar. Niðurstöður sýndu að tengingin virkar vel og engar skemmdir sjáanlegar. Brotmyndin í veggnum við yfirborð sökkuls var hins vegar mismunandi. Fullt vægisbrot fékkst í staðsteypta veggnum en brotmynd forsteypta veggins var blanda af vægis- og skerbroti.

Í þessari rannsókn voru smíðuð tvö ný prófstykki. Bæði prófstykki nýttu nýju tenginguna. Fyrra prófstykkið var smíðað nákvæmlega eins og í fyrri tilraunum nema skerleggjum var komið fyrir á markvissan hátt í veggnum til að stýra brotmyndinni í fullt vægisbrot. Í síðari prófstykkinu var tengingin einfölduð enn frekar. Í stað þess að nota mörg lítil steypustyrktarjárn í efri grind sökkul, sem eru þrædd í gegnum forsteypta stöpulvegginn, eru notuð færri og þar með stærri steypustyrktarjárn. Markmiðið er að einfalda smíði forsteyptra stöpulveggja og einfalda uppsetningu þeirra á verkstað. Prófstykkið var einnig með skerleggi í stöpulveggnum.

Prófstykkin voru álagsprófuð á tilraunagólfi Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands og niðurstöður bornar saman við hefðbundna staðsteypta lausn. Niðurstöður rannsóknarinnar er að nýja tengingin sem nýtir stór steypustyrktarjárn er sambærileg á við hefðbundna staðsteypta lausn.

Abstract

This thesis describes tests of a connection between a precast abutment wall and a cast-in-place foundation with the goal of accelerating bridge construction on site. The connection concept entails the fabrication of the precast (PC) wall element in a controlled environment, featuring a roughened outer surface in the wall region, which will eventually become embedded in the foundation. The PC wall also features wide horizontal ducts at the bottom that allow top-mat reinforcement of the foundation to go through the wall to provide sufficient moment resistance. The ducts' inner surface is rough. This system's primary advantage over conventional cast-in-place construction is its construction speed; it can build a foundation and an abutment wall slightly faster than casting the foundation alone.

Connection development began in 2022 with the construction of two test specimens, with the first using the new connection and the second using a traditional cast-in-place solution for reference. Test results showed that the connection worked well and the foundation was undamaged. However, the failure mode in the wall differed between the specimens. The reference specimen developed a full plastic hinge in the wall, whereas the precast wall experienced a combination of moment and shear failure.

This study involved the construction of two new test specimens. Both specimens utilized the new connection. The first specimen's construction was identical to the previous experiments, with the exception of the strategic placement of shear legs in the wall to create a hinge above the foundation. The later specimen further simplified the connection details. The top mat threads through the PC wall using fewer but larger reinforcing bars instead of many small ones. The goal is to simplify PC wall construction and installation on the job site. This specimen also included the shear legs in the PC wall.

Results show that the simplified new connection is comparable to the traditional cast-in-place connection.

Þakkir

Ég vil byrja á að þakka leiðbeinendum mínum, Ólafi Sveini Haraldssyni, Bjarna Bessasyni, Ching-yi Tsai fyrir góða skilvirka leiðsögn og samstarf í gegnum verkefnið. Einnig vil ég þakka Agli Arnari Valssyni og Guðna Jónssyni fyrir hjálp í verklegum framkvæmdum. Ekki síður vil ég þakka samstarfsaðilum sem lögðu sitt af mörkum í þessu verkefni en það voru Vegagerðin, Háskóli Íslands, Vista verkfræðistofa, BM-Vallá, Efla og Cowi. Verkefnið var styrkt af Rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar (Styrknr. 1800-931) og vil ég þakka þeim stuðninginn sem það veitti.

Efnisyfirlit

Myndir xi

Töflur xix

1 Inngangur	1
1.1 Bakgrunnur	1
1.2 Fyrri rannsóknir á notkun forsteyputækni	3
1.3 Umfang og markmið ritgerðar	8
2 Hönnun og smíði prófstykkja	10
2.1 Hönnun	10
2.1.1 Hönnun stöpulveggja	11
2.1.2 Hönnun sökkla	14
2.2 Smíði	16
3 Aðferðafræði rannsókna	23
3.1 Uppsetning tilrauna	23
3.2 Tækjabúnaður og önnur mælitæki	25
3.3 Álagspróf	27
4 Sjónrænt mat og þróun skemmda í álagsprófum	29
4.1 Skilgreining á skemmdarstigum	29
4.2 Prufukeyrsla	30
4.3 Álagspróf	30
4.4 Sögun prófstykkja	40
5 Mældar niðurstöður	43
5.1 Efniseiginleikar	43
5.1.1 Þrýstistyrkur steypu	43
5.1.2 Togstyrkur steypu	44
5.1.3 Steypustyrktarjárn (kambstál)	45
5.2 Vægi sem fall af hlutfallsfærslu	46
5.3 Kraftur sem fall af færslu	48
5.4 Streitumælingar í kambstáli	49
5.4.1 Streitumælar í stöpulvegg	49
5.4.2 Streitunemar í sökkulfót	53
6 Greining á mældum niðurstöðum	58
6.1 Vægisburðargeta veggjar	58
6.2 Skerburðargeta veggjar	59
6.3 Öryggi gegn veltu og skriði	61
6.4 Vægisburðargeta sökkuls	63
6.5 Skerburðargeta sökkuls	65

6.6	Normaliserað vægi sem fall af hlutfallsfærslu og stífní	66
6.7	Orkulosun.....	69
7	Samantekt og niðurstöður	71
7.1	Samantekt.....	71
7.2	Niðurstöður	72
7.3	Ábendingar um hönnun tengingar.....	74
7.4	Ábendingar um samsetningu tengingar.....	76
7.5	Tillögur að frekari rannsóknum	76
	Heimildir	79
	Viðauki A: Teikningar	83
	Viðauki B: Smíði prófstykkja.....	90
	Viðauki C: Efnisprófanir.....	94
	Viðauki D: Álagspróf	97
	Viðauki E: Streitungælingar í sökkli.....	107
	Viðauki F: Útreikningar	110

Myndir

Mynd 1-1: Frágangur járna úr forsteyptri einingu.....	2
Mynd 1-2: Þversnið stöpulveggs – Jökulsá á Dal (Efla, 2018).	2
Mynd 1-3: Austurstöpull (vinstri) og vesturstöpull (hægri) brúar yfir Jökulsá á Dal (Vegagerðin).	3
Mynd 1-4: Tengingar prófaðar af Matsumoto o.fl. (2001).	3
Mynd 1-5: Tenging milli forsteyptar súlu og forsteypts þverbita með stórum járnum (Pang o.fl., 2008).	4
Mynd 1-6: Tenging milli forsteyptar brúarsúlu og staðsteypts sökkuls ásamt notkun forsteypts þverbita (Haraldsson o.fl., 2013).	5
Mynd 1-7: Hugmynd að nýrri forsteyptri einingu og tengingu við staðsteypts sökkuls.	6
Mynd 1-8: Þverskurður prófstykkja -Staðsteyptur landstöpull, SSL (vinstri) og forsteyptur landsstöpull, FSL (hægri).	7
Mynd 1-9: Uppfærð veggeining (í prófstykki FSL-SS) ásamt K16 járnum sem þrædd eru í gegn.	8
Mynd 2-1: Burðarþolsteikning prófstykkja, öll mál eru í mm.	11
Mynd 2-2: Samanburður milli álags (a) í felti og (b) í tilraunastofu. Átakspunktur punktkrafts er í 1/3 af hæð veggjar.	12
Mynd 2-3: FSL-LS (vinstri) og FSL-SS (hægri) ásamt íþræddum steypustyrktarjárnum.	12
Mynd 2-4: Flotsvæði togjárna undan beygjuvægi.	13
Mynd 2-5: Kverkjárn lykkja í járnbendingu sökkuls.	15
Mynd 2-6: Einfalt grindarlíkan (e. Strut and tie) af stöpulvegg (Haraldsson ofl., 2023).	15
Mynd 2-7: Sökkulmót prófstykkja samansett.	16
Mynd 2-8: Þríkantslistum komið fyrir sökkulmegin í mótum FSL-LS. Listarnir ná upp að götum.	17
Mynd 2-9: Þríkantslistar festir á platta sem þrýst er ofan í steypu þar sem veggur er steyptur liggjandi.	17

Mynd 2-10: Járnagrind veggjar. Streitungemar eru varðir með bláu límbandi.....	18
Mynd 2-11: Járnagrind sökkuls í smíði.....	18
Mynd 2-12: Veggeining fyrir FSL-SS klár til steypu. Rörin þrjú eru fyrir K16 járnin sem þrædd verða í gegn eininguna. Færri rör einfalda mótasmíðina.	19
Mynd 2-13: Veggeining fyrir FSL-LS klár til steypu. Rörin sjö eru fyrir K10 járnin sem þrædd verða í gegn eininguna.	19
Mynd 2-14: FSL-SS daginn eftir steypu. Hrjúfi flöturinn sem stingst ofan í sökkulinn sést vel.	20
Mynd 2-15: Langjárnnum komið fyrir í FSL-LS áður en veggur er hífður í sökkulgrind.	20
Mynd 2-16: Búið er að koma veggjum fyrir í sökkulgrind og báðir klárir til steypu.	21
Mynd 2-17: Byrjað var að steypa FSL-LS.	21
Mynd 2-18: Steypuvinna í gangi. Steypa að flæða í gegnum göt á FSL-SS einingunni.	22
Mynd 3-1: Uppsetning prófstykkja og viðspyrnu.	23
Mynd 3-2: FSL-SS í undirbúning & viðspyrnu komið fyrir við prófstykki.....	24
Mynd 3-3: Uppsetning vökvatjakks til að eftirspenna snitteina.....	24
Mynd 3-4: Prófstykki, FSL-SS klárt til prófunar.	25
Mynd 3-5: Staðsetning streitungema á prófstykki FSL-SS.....	26
Mynd 3-6: Staðsetning streitungema á prófstykki FSL-LS.	26
Mynd 3-7: Markmiðsfærsla Instron tjakks við álagsprófun.....	28
Mynd 4-1: Samanburður á raunfærslum FSL-SS og markmiðsfærslum.....	31
Mynd 4-2: Samanburður á raunfærslum FSL-LS og markmiðsfærslum.	31
Mynd 4-3: Stöplarit sem sýnir samanburð á hlutfallsfærslu veggja á lykilstigum skemmda.....	34
Mynd 4-4: Merkingar á prófstykkjum fyrir skemmdarrakningu.....	35
Mynd 4-5: Framhlið og bakhlið prófstykkis FSL-SS fyrir álagsprófun.....	35
Mynd 4-6: Framhlið og bakhlið prófstykkis FSL-LS fyrir álagsprófun.	36
Mynd 4-7: Skemmdir á norður-og vesturhliðhlið prófstykkis FSL-SS eftir 4 álagslotur (hlutfallsfærsla 0,51%).	36

Mynd 4-8: Skemmdir á norður-og vesturhlið prófstykkis FSL-LS eftir 4 álagslotur (hlutfallsfærsla 0,48%).	37
Mynd 4-9: Skemmdir á norður-og austurhlið FSL-SS eftir 8 álagslotur (hlutfallsfærsla 2,70%).	37
Mynd 4-10: Skemmdir á norður-og suðurhlið FSL-LS eftir 8 álagslotur (hlutfallsfærsla 3.66%).	37
Mynd 4-11: Skemmdir á prófstykki FSL-SS eftir 11 lotur (hlutfallsfærsla 10,77%).	38
Mynd 4-12: Skemmdir á prófstykki FSL-LS eftir 11 lotur (hlutfallsfærsla 11,77%).	39
Mynd 4-13: Norðurhlið prófstykkja FSL-LS (vinstra megin) og FSL-SS (hægra megin) eftir álagspróf.	39
Mynd 4-14: Suð-austurhlið prófstykkja FSL-SS (vinstra megin) og FSL-LS (hægra megin) eftir álagspróf.	40
Mynd 4-15: Þverskurður FSL-SS.....	40
Mynd 4-16: Þverskurður FSL-LS. Neðst í vegg má sjá hversu mikið steypa hefur flagnað vinstra megin.	41
Mynd 4-17: Nærmynd af þverskurði prófstykkja. FSL-SS (uppi til vinstri), FSL-LS (uppi til hægri), FSL (niðri til vinstri) og SSL (niðri til hægri). Áberandi mikil flögnun prófstykkja FSL-SS og FSL-LS átti sér stað í 12. lotu (aukalotu).....	42
Mynd 5-1: Stærðir notaðar við vægisútreikninga.....	46
Mynd 5-2: Vægi sem fall af hlutfallsfærslu í prófstykki FSL-SS við álagspröfun.	47
Mynd 5-3: Vægi sem fall af hlutfallsfærslu í prófstykki FSL-LS við álagspröfun.	47
Mynd 5-4: Kraftur sem fall af færslu fyrir FSL-SS í álagspröfun. Lotur 6 til 11 eru merktar inn til glöggvunar.	48
Mynd 5-5: Kraftur sem fall af færslu fyrir FSL-LS í álagspröfun. Lotur 6 til 11 eru merktar inn til glöggvunar.	48
Mynd 5-6: Streitugildi í vegg FSL-SS.....	50
Mynd 5-7: Streitugildi í vegg FSL-LS.	50
Mynd 5-8: Streitugildi í vegg FSL-SS, nemi V1-401. Streitunemi staðsettur 150 mm ofan við sökkulyfirborð.	51
Mynd 5-9: Streitugildi í vegg FSL-SS, nemi V1-402. Streitunemi staðsettur við sökkulyfirborð.....	52

Mynd 5-10: Streitugildi í vegg FSL-SS, nemi V1-403. . Streitunemi staðsettur 150 mm neðan við sökkulyfirborð.....	52
Mynd 5-11: Streitugildi í vegg FSL-LS, nemi V2-402. Streitunemi staðsettur við sökkulyfirborð.	53
Mynd 5-12: Streitugildi í vegg FSL-LS, nemi V2-403. Streitunemi staðsettur 150 mm neðan við sökkulyfirborð.....	53
Mynd 5-13: Streitugildi í nemum F1-201 og F1-101 í prófstykki FSL-SS fyrir hverja álagslotu. Flotstreitumörk eru 2600με.....	54
Mynd 5-14: Streitugildi í nemum F1-202 og F1-102 í prófstykki FSL-SS fyrir hverja álagslotu. Flotstreitumörk eru 2600με.....	54
Mynd 5-15: Streitugildi í nema F1-403 í prófstykki FSL-SS fyrir hverja álagslotu. Flotstreitumörk eru 2600με.	55
Mynd 5-16: Streitugildi í nemum F1-401 og F1-201 í prófstykki FSL-LS fyrir hverja álagslotu. Flotstreitumörk eru 2600με.....	56
Mynd 5-17: Streitugildi í nemum F1-4012 og F1-202 í prófstykki FSL-LS fyrir hverja álagslotu. Flotstreitumörk eru 2600με.....	56
Mynd 5-18: Streitugildi í nema F1-403 í prófstykki FSL-LS fyrir hverja álagslotu. Flotstreitumörk eru 2600με.	57
Mynd 6-1: Spennudreifing undir sökkli undan kröftum í álagsprófi.	62
Mynd 6-2: Snið í sökkli fyrir kraftaútreikninga.	64
Mynd 6-3: Samanburður á normaliseruðu vægi beggja prófstykkja sem fall af hlutfallsfærslu.	67
Mynd 6-4: Samanburður á normaliseruðu vægi prófstykkja FSL-SS, FSL-LS, FSL og SSL.	68
Mynd 6-5: Uppsöfnuð orkulosun fyrir tilheyrandi lotu i [J].	68
Mynd 6-6: Samanburður á orkulosun prófstykkja.	70
Mynd 6-7: Samanburður orkulosunar á prófstykkjum FSL-SS, FSL-LS, FSL og SSL.	70
Mynd 7-1: Prófstykki FSL-SS (vinstri) og Prófstykki FSL-LS (hægri).	72
Mynd 7-2: Tillaga að nýrri viðspyrnu sem hindrar skrið prófstykkis.	77
Mynd A 1: Steypumál fyrir prófstykki FSL-SS og FSL-LS. Ásýnd framan á prófstykki. Öll mál eru í mm.	83

Mynd A 2: Steypumál fyrir prófstykki FSL-SS og FSL-LS. Snið A, hliðarásýnd. Öll mál eru í mm.....	84
Mynd A 3: Steypumál fyrir prófstykki FSL-SS og FSL-LS. Snið B, ásýnd ofan á. Öll mál eru í mm.....	85
Mynd A 4: Steypumál forsteyptra veggja FSL-SS og FSL-LS. Ásýnd framan á. Öll mál eru í mm.....	85
Mynd A 5: Járnbending FSL-SS, hliðarásýnd. Öll mál í mm.	86
Mynd A 6: Járnbending FSL-SS, snið 1. Öll mál í mm.	87
Mynd A 7: Járnbending FSL-SS, snið 2. Öll mál í mm.	87
Mynd A 8: Járnbending FSL-LS, hliðarásýnd. Öll mál í mm.	88
Mynd A 9: Járnbending FSL-LS, snið 1. Öll mál í mm.	89
Mynd A 10: Járnbending FSL-LS, snið 2. Öll mál í mm.	89
Mynd B 1: Smíði steypumóta fyrir FSL-LS í vinnslu.....	90
Mynd B 2: Járnagrindur fyrir bæði prófstykki í vinnslu á verkstæðisgólfi Vegagerðarinnar.	90
Mynd B 3: Steypumót veggja klár fyrir steypuvinnu. Hér sitja þau á gólfi BM Vallarétt fyrir steypuvinnu.....	90
Mynd B 4: Stöpulveggir eftir steypuvinnu.	91
Mynd B 5: Stöpulveggur FSL-LS eftir fráslátt steypumóta. Verið er að reisa vegg og gera hann kláran fyrir næstu steypuvinnu.....	91
Mynd B 6: Stöpulveggur FSL-LS eftir að búið var að koma fyrir K10 járnum í gegnum göt. Verið er að hífa vegg ofan í steypumót sökkuls.	92
Mynd B 7: Stöpulveggur FSL-SS eftir að búið er að koma honum fyrir í steypumótum sökkuls.	92
Mynd B 8: Prófstykki FSL-SS eftir steypuvinnu. Einnig má sjá hluta prófstykkis FSL-LS eftir steypuvinnu vinstra megin á mynd.....	93
Mynd B 9: Landstöplar FSL-SS og FSL-LS komnir á gólf VRIII, klárir til undirbúningsvinnu álagsprófa.	93
Mynd C 1: Togpolspróf K6 kambstáls, spenna á móti streitu ferill.	95

Mynd C 2: Togþolspróf K10 kambstáls, spennna á móti streitu ferill.....	95
Mynd C 3: Togþolspróf K16 kambstáls, spennna á móti streitu ferill.....	96
Mynd D 1: FSL-SS eftir lotu 1 (hlutfallsfærsla 0,11%). Engar sjáanlegar skemmdir.	97
Mynd D 2: FSL-SS eftir lotu 2 (hlutfallsfærsla 0,16%). Engar sjáanlegar skemmdir.	97
Mynd D 3: FSL-SS eftir lotu 3 (hlutfallsfærsla 0,30%). Hárfínar sprungur taka að myndast í 1-8cm hæð frá efri brún sökkuls.	97
Mynd D 4: FSL-SS eftir lotu 4 (hlutfallsfærsla 0,51%). Hárfínar sprungur halda áfram að myndast ofar á vegg. Fyrsta sprungan neðarlega á vegg teygir sig þvert yfir vegginn. Ný sprunga nær u.þ.b. 8cm inn á vesturhlið veggjar.	98
Mynd D 5: FSL-SS eftir lotu 5 (hlutfallsfærsla 0,73%). Sprungur halda áfram að teygja sig á austur- og vesturhlið veggjar. Engar sjáanlegar skemmdir á sökkli.	98
Mynd D 6: FSL-SS eftir lotu 6 (hlutfallsfærsla 1,01%). Ný sprunga myndast við samskeyti sökkuls og veggjar. Nýjar sprungur myndast frá vegg í sökkul á austur- og vesturhlið.	99
Mynd D 7: FSL-SS eftir lotu 7 (hlutfallsfærsla 1,62%). Sprunga í sökkli tekur að lengjast. Ný sprunga ofarlega í vegg, u.þ.b. 45cm fyrir ofan sökkul.	99
Mynd D 8: FSL-SS eftir lotu 8 (hlutfallsfærsla 2,70%). Sprungur lengjast á veggghliðum. Stærsta sprungustærð er um 1,1mm á sprungu 5 cm fyrir ofan sökkul.	99
Mynd D 9: FSL-SS eftir lotu 9 (hlutfallsfærsla 4,34%). Stærsta sprungustærð er um 3mm á sprungu 5 cm fyrir ofan sökkul.	100
Mynd D 10: FSL-SS eftir lotu 10 (hlutfallsfærsla 6,95%). Flögnun hefst neðanverðu á suðurhlið veggjar. Flögnun nær um 10cm upp vegginn.....	100
Mynd D 11: FSL-SS eftir lotu 11 (hlutfallsfærsla 10,77%). Áberandi formbreyting stöpulveggjar. Stærsta sprunga um 13-15mm.	100
Mynd D 12: FSL-SS eftir lotu 12 (aukalota: 120mm færsla, 16,4% markmiðshlutfallsfærsla). Þrjú lóðrétt kambstál í vegg slitnuðu við lotuna.	101
Mynd D 13: FSL-LS eftir lotu 1 (hlutfallsfærsla 0,10%). Engar sjáanlegar skemmdir....	102
Mynd D 14: FSL-LS eftir lotu 2 (hlutfallsfærsla 0,14%). Hárfínar sprungur myndast á vegghornum norðurhliðar.	102
Mynd D 15: FSL-LS eftir lotu 3 (hlutfallsfærsla 0,27%). Hárfínar sprungur teygja sig þvert yfir vegg í um 5 og 20cm hæð.	102

Mynd D 16: FSL-LS eftir lotu 4 (hlutfallsfærsla 0,48%). Ný sprunga myndast ofarlega á vegg og við samskeyti sökkuls og veggjar á norðurhlið.....	103
Mynd D 17: FSL-LS eftir lotu 5 (hlutfallsfærsla 0,83%). Núverandi sprungur lengjast og nýjar hárfínar myndast. Mesta sprunguvídd er 0,35mm í sprungu 20cm frá yfirborði sökkuls.	103
Mynd D 18: FSL-LS eftir lotu 6 (hlutfallsfærsla 1,35%). Mesta sprunguvídd er 0,5mm í sprungu 20cm frá yfirborði sökkuls.	103
Mynd D 19: FSL-LS eftir lotu 7 (hlutfallsfærsla 2,38%). Nýjar myndast frá vegg í sökkul. Sprungur lengjast víða.	104
Mynd D 20: FSL-LS eftir lotu 8 (hlutfallsfærsla 3,66%). Flögnun fyrst sjáanleg á suðurhlið veggjar. Stærsta sjáanleg sprunga er 4mm í vídd.	104
Mynd D 21: FSL-LS eftir lotu 9 (hlutfallsfærsla 5,49%). Ný sprunga í sökkulfót við T40. Stærsta sprunga við veggenda mæld 6mm.	105
Mynd D 22: FSL-LS eftir lotu 10 (hlutfallsfærsla 8,07%). Mikið farið að sjást á vegg. Stærsta sprunga um 8mm.	105
Mynd D 23: FSL-LS eftir lotu 11 (hlutfallsfærsla 11,77%). Meiri flögnun á sér stað á suðurhlið veggjar. Samband við streitunema rofið.....	105
Mynd D 24: FSL-LS eftir lotu 12 (aukalota: 120mm færsla, 16,4% markmiðshlutfallsfærsla). Eitt lóðrétt kambstál í vegg slitnaði við lotuna.....	106
Mynd E 1: Streitugildi í sökkul FSL-SS, nemi F1-201. Streitunemi staðsettur í efri brún, 75mm fyrir aftan vegg.	107
Mynd E 2: Streitugildi í sökkul FSL-SS, nemi F1-202. Streitunemi staðsettur í efri brún, 75mm fyrir framan vegg.....	107
Mynd E 3: Streitugildi í sökkul FSL-SS, nemi F1-403. Streitunemi staðsettur í neðri brún, 75mm fyrir aftan vegg.	108
Mynd E 4: Streitugildi í sökkul FSL-LS, nemi F2-401. Streitunemi staðsettur í efri brún, 75mm fyrir aftan vegg.	108
Mynd E 5: Streitugildi í sökkul FSL-LS, nemi F1-402. Streitunemi staðsettur í efri brún, 75mm fyrir framan vegg.....	109
Mynd E 6: Streitugildi í sökkul FSL-LS, nemi F1-403. Streitunemi staðsettur í neðri brún, 75mm fyrir aftan vegg.	109
Mynd F 1: Niðurstaða úr vægi-krappa greiningu í Open Sees.	136

Töflur

Tafla 2-1: Langjárnahlutfall sökkla.	14
Tafla 3-1: Nöfn streitunema í FSL-SS.....	27
Tafla 3-2: Nöfn streitunema í FSL-LS.	27
Tafla 3-3: Hlutfallsfærslur ásamt færslum fyrir álagsprófun.	28
Tafla 4-1: Lýsing á mismunandi stigum skemmda.	29
Tafla 4-2: Raunverulegar færslur álagsprófa ásamt hlutfallsfærslum fyrir prófstykki FSL-SS og FSL-LS.....	32
Tafla 4-3: Stærstu áfangar skemmda ásamt hlutfallslegri færslu (e.drift) veggjar fyrir bæði prófstykki (FSL-SS: prófstykki með stórum steypustyrktarjárnnum & FSL-LS: prófstykki með smáum steypustyrktarjárnnum).	33
Tafla 5-1: Steypustyrkur sívalninga.	44
Tafla 5-2: Steypustyrkur sívalninga.	45
Tafla 5-3: Niðurstöður úr togþolsprófi. Efniseiginleikar kambstáls.	45
Tafla 5-4: Hámarksvægi ásamt tilheyrandi hlutfallsfærslum.	47
Tafla 5-5: Hámarkskraftar í álagsprófi ásamt tilheyrandi færslum.	48
Tafla 6-1: Vægisáraun og vægisburðargeta veggja.	59
Tafla 6-2: Skeráraun og skerburðargeta veggja.....	61
Tafla 6-3: Veltuvægi veggja og nýtni.....	62
Tafla 6-4: Styrkur, áraun og nýtni snittteina.....	63
Tafla 6-5: Spenna undir sökkli við hámarkskraft í álagsprófun.	64
Tafla 6-6: Vægisáraun og vægisburðargeta sökkla.	65
Tafla 6-7: Reiknuð sniðilstífni (e. secant stiffness) fyrir prófstykki FSL-SS, FSL-LS, FSL og SSL.	69
Tafla C 1: Niðurstöður mælinga á ferskri steypu.	94
Tafla C 2: Þrýstistyrkur steypusívalninga eftir 28 og 90 daga.	94
Tafla C 3: Þrýstistyrkur steypusívalninga á prófdegi FSL-SS (fyrri prófdagur).	94

Tafla C 4: Þrýstistyrkur steypusívalninga á prófdegi FSL-LS (seinni prófdagur).....	95
---	----

1 Inngangur

1.1 Bakgrunnur

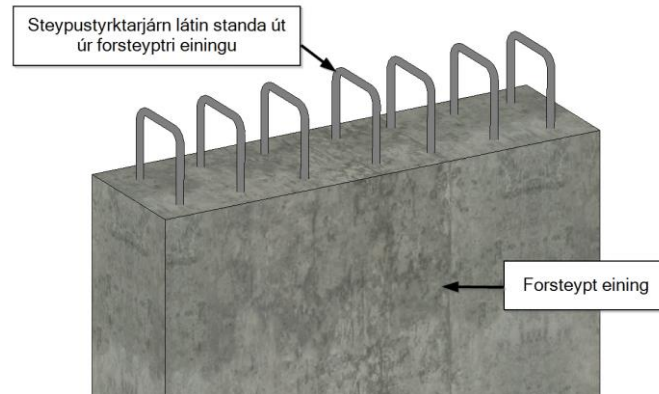
Brýr hafa verið einn af mikilvægustu innviðum mannkynsins í gegnum aldirnar og hafa spilað lykilhlutverk í flutningi mannfólks, vara og þjónustu. Frá einföldustu brúm yfir litlar ár og læki til þeirra meistarasmíða sem þvera stórfljót og firði með löngum haflengdum og flóknum og margbreytilegum burðarformum, hafa brýr ávallt verið mikilvægur þáttur í lífi fólks. En þróun brúarframkvæmda hefur ekki verið einsleitt, heldur hefur hún þróast samhliða þeim áhrifum og áskorunum sem marka samtíma þess.

Þegar rýnt er í brúarsafn Vegagerðarinnar þá má sjá að stofnunin hefur umsjón með um 1.200 brúm á landinu öllu og er meðalaldur þeirra yfir 40 ár. Ef einbreiðar brýr eru skoðaðar sérstaklega þá er meðalaldur þeirra um 50 ár og er fjórðungur þeirra eldri en 60 ára. Ljóst er að margar þeirra uppfylla ekki kröfur dagsins í dag um öryggi og/eða burðarþol (Franz Sigurjónsson, 2023). Í skýrslu Samtaka iðnaðarins frá 2021 um innviði á Íslandi kemur fram að brýr hafa ekki verið endurnýjaðar eins og hratt og æskilegt væri (Samtök iðnaðarins, 2021). Það er því mikill ávinningur í því að þróa nýjar byggingaraðferðir sem hraða brúarframkvæmdinni á verkstaðnum og lækka kostnað.

Það er til mikils að vinna ef hægt er stytta byggingartíma brúa til að koma samgöngulausn fyrr í notkun. Byggingariðnaður breytist með tímanum og nýjar lausnir koma til sögunnar, ein slík lausn er að nota forsteyptar einingar. Forsteyptar einingar hafa skapað nýja möguleika í byggingarframkvæmdum á mörgum sviðum, aukið öryggi og oft dregið úr kostnaði (Pang o.fl. 2008; Haraldsson o.fl., 2013; Rúnar Steinn Smáráson 2022; Breki Þórðarson, 2023; Franz Sigurjónsson, 2023). Forsteyptar einingar takmarkast þó meðal annars af stærð og þyngd þeirra, en mikilvægt er að hægt sé bæði að flytja þær á verkstað og hífa þær. Þar að leiðandi þarf oft að skipta steypum hlutum upp í fleiri en eina forsteypta einingu og útfæra tengingu þeirra með staðsteypum hætti. Það er þó áskorun að nota forsteyptar einingar á jarðskjálftasvæðum því tengingar milli eininga eru iðulega staðsettar þar sem gera má ráð fyrir mesta vægi og ólínulegum formbreytingum. Það getur verið því snúið að þróa tengingar sem bæði eru hentugar til að flýta verkframkvæmdinni og geta staðist jarðskjálftaálag.

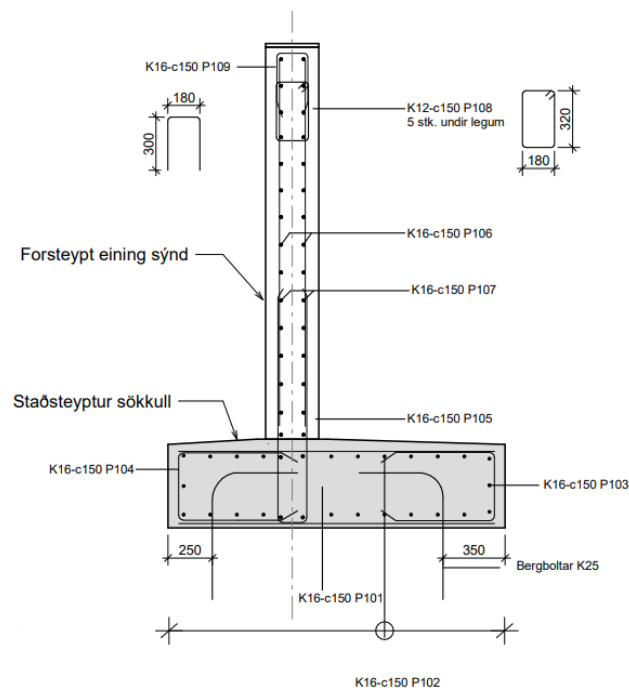
Innbyrðis tenging á milli forsteyptra eininga eða tenging á forsteyptri einingu við staðsteypa einingu hérlandis hafa hingað til oft verið útfærðar á þann hátt að steypustyrktarjárn, beygð í U-lykkjur eru látnar ganga út úr þeim hliðum á forsteyptu einingunum sem ætlað er að tengjast öðrum byggingareiningum. Þessar U-lykkjur eru svo járnabundnar gjarnan með járnteinum sem rennt er í gegnum lykkjurnar og þannig samtengdar áður en sjálf tengingin er staðsteypd (Rúnar Steinn Smáráson, 2022; Franz Sigurjónsson, 2023). Mynd 1.1 sýnir þversnið af dæmigerðri forsteyptri einingu með umræddum lykkjum. Eftir atvikum geta

lykkjurnar staðið út úr öllum hliðum forsteyptu einingarinnar og ræðst af því hvernig einingin raðast í viðkomandi burðarvirki.



Mynd 1-1: Frágangur járna úr forsteyptri einingu.

Nýleg einbreið brú yfir Jökulsá við Klaustursel var hönnuð árið 2017. Brúin er 53 metra löng og spannar þrjú höf. Landsnet var verkkaupi en Vegagerðin hafði umsjón með hönnun og byggingu brúarinnar. Til að flýta smíði brúarinnar og stytta verktímann óskaði verktaki eftir því að stöpulveggir í landstöplum brúarinnar yrðu forsteyptir. Ákveðið var því að nota sambærilega tengingu og sýnd er á Mynd 1-1, þar sem lóðréttar lykkjur voru látnar standa niður úr stöpulveggeiningum og þær tengar saman við járnagrind í staðsteyptum sökkli. Þessa útfærslu var hægt að nota vegna þess að hegðun tengingarinnar er eins og í staðsteyptri útfærslu. Tenginguna hönnuðu þeir dr. Baldvin Einarsson og dr. Ólafur Sveinn Haraldsson á Eflu verkfræðistofu. Mynd 1-2 sýnir þversnið af þeirri útfærslu sem var notuð (Efla, 2018).



Mynd 1-2: Þversnið stöpulveggs – Jökulsá á Dal (Efla, 2018).

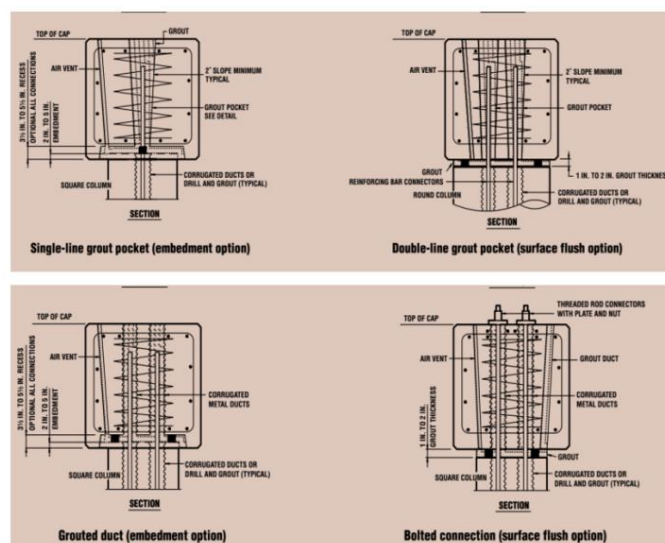
Vesturstöpull brúarinnar samanstóð af þremur einingum (framveggur og tveir vængir) en austurstöpull samanstóð af tíu einingum. Það þurfti að nota fleiri og minni einingar í austurstöplinn vegna þess að gamla brúin við Klaustursel var takmarkandi í burðarþoli. Mynd 1-3 sýnir landstöplana hlið við hlið. Talið er að þessi útfærsla hafi stýtt byggingartíma landstöplanna um a.m.k. helming miðað við hefðbundna staðsteypta framkvæmd. Með því að forsteypa stöpulveggina var hægt að framleiða einn landstöpul á sama tíma og það tekur að staðsteypa sökkulinn sjálfan. Þessi útfærsla hafði þó í för með sér ýmsar áskoranir eins og það að stilla einingunum upp og þar gerðu U-lykkjur sem stóðu niður úr einingunum mönnum erfitt fyrir (Franz Sigurjónsson, 2023).



Mynd 1-3: Austurstöpull (vinstri) og vesturstöpull (hægrri) brúar yfir Jökulsá á Dal (Vegagerðin).

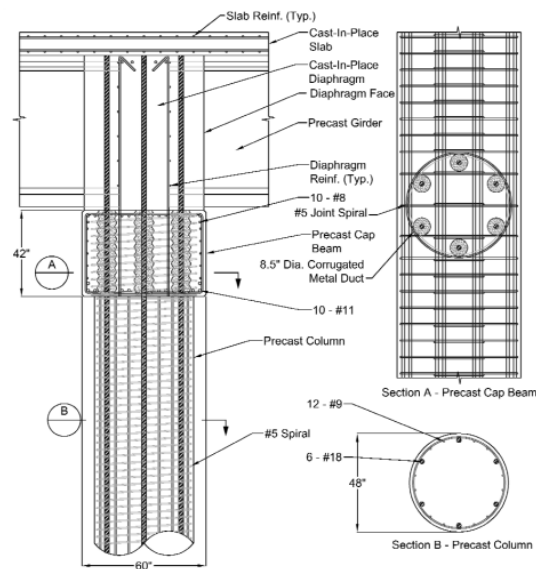
1.2 Fyrri rannsóknir á notkun forsteypuþækni

Á síðustu tveimur áratugum í Bandaríkjunum hefur verið mikil þróun í notkun forsteyptra eininga í brúargerð með það sem markmið að hraða framkvæmdum á verkstað. Mikil áhersla hefur verið í að þróa forsteyppt kerfi fyrir millistöpla brúa. Matsumoto o.fl. (2001) í Texas-ríki þróuðu fjórar tengingar milli staðsteyptra brúarsúlna og forsteyppts þverbita sem eru hentugar til notkunar á svæðum með litla sem enga jarðskjálftavirkni. Tengingarnar eru sýndar á Mynd 1-4.



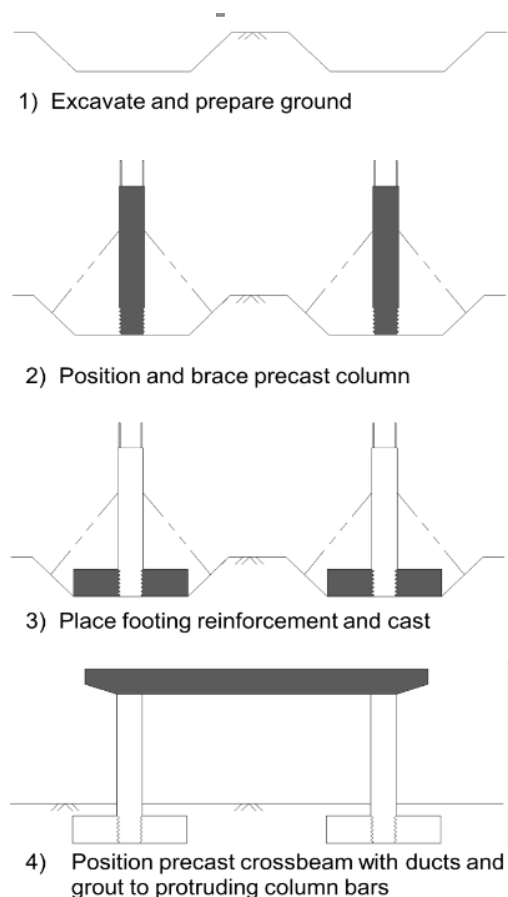
Mynd 1-4: Tengingar prófaðar af Matsumoto o.fl. (2001).

Í Washington ríki hefur farið fram þróun á forsteyptu brúarkerfi sem er hentugt til notkunar á svæðum með mikla jarðskjálftavirkni. Hieber o.fl. (2005) tóku saman stöðu þekkingar á notkun forsteyptra eininga og skýrsla þeirra inniheldur mikilvægar upplýsingar um hvað þarf að hafa í huga við notkun forsteyptra eininga á jarðskjálftasvæðum. Í framhaldinu þróðu Pang o.fl. (2008) tengingu milli forsteyptar súlu og forsteypts þverbíta. Tillaga þeirra svipaði mikið til einnar lausnar sem má finna í rannsókn Matsumoto o.fl. (2001) og er sýnd á Mynd 1-4 fyrir ofan, svokölluð „Grouted duct“ lausn. Hugmyndin er að forsteypta súlu með stórum langjárnnum (þvermál kambstáls um 50 mm) og þar sem færri. Það gerir það að verkum að ekki þarf að þræða mörg járn inn í blikkrör og grauta í forsteyptum þverbíta. Stueck o.fl. (2007) sýndu fram á með togprófum á stóru kambstáli (með þvermál >50 mm) væri hægt að ná bæði flot- og brotstyrk stálsins með þeirri festilengd sem er til staðar í hefðbundnum brúarbita. Mynd 1-5 sýnir lausnina sem var þróuð af Pang o.fl. (2008).



Mynd 1-5: Tenging milli forsteyptar súlu og forsteypts þverbíta með stórum járnnum (Pang o.fl., 2008).

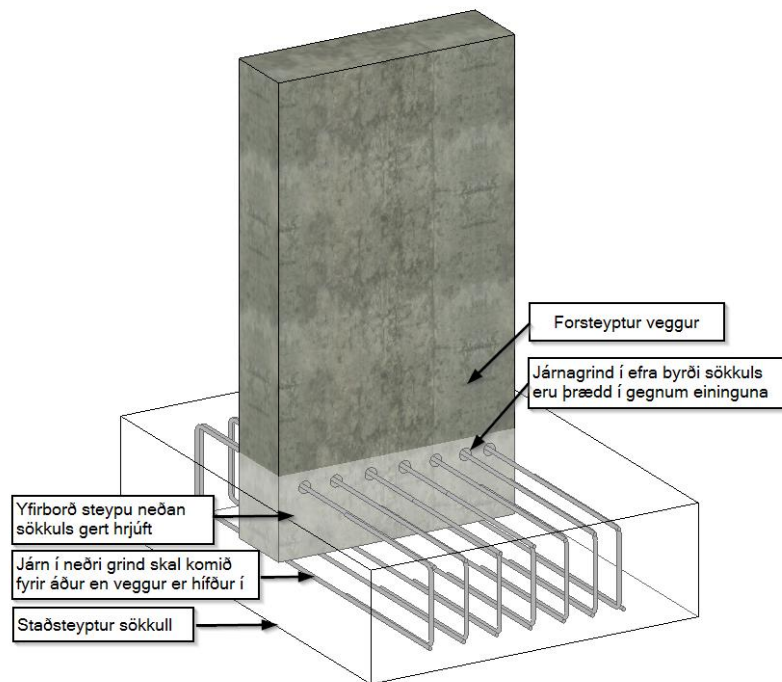
Haraldsson o.fl. (2013) þróðu svo tengingu milli forsteyptar brúarsúlu og staðsteypts sökkuls fyrir sama kerfi og Pang o.fl. (2008). Hugmyndin er að forsteypa súlu með riffluðu yfirborði sem stingst niður í staðsteyptan sökkul. Það ganga engin járn úr staðsteyptum sökkli inn í brúarsúluna. Rannsóknir sýndu að tengingin er jafngóð ef ekki betri en staðsteypt útfærsla (Haraldsson o.fl., 2013). Mynd 1-6 sýnir hugmyndina á bakvið tenginguna sem er einskonar vasatenging (e. socket connection). Brúarkerfið var svo notað í brú yfir hraðbraut nr. 5 (e. Interstate 5) suður af Olympia í Washington-ríki með góðum árangri (Khaleghi o.fl., 2012). Mashal o.fl. (2016) þróðu samskonar tengingu og Haraldsson o.fl. (2013) á Nýja Sjálandi en í þeirra tengingu var sökkullinn einnig staðsteyptur. Í Idaho ríki í Bandaríkjunum þróðu Acharya o.fl. (2023) nýtt forsteypt brúarkerfi sem er hentugt til notkunar á jarðskjálftasvæðum. Kerfið inniheldur annars vegar nýja vasatengingu milli súlu og sökkuls og milli súlu og þverbíta hins vegar. Vegagerðin í Idaho ríki hefur þegar byggt brú með þessari tækni Acharya o.fl. yfir hraðbraut 15 (e. Interstate 15) við Hall.



Mynd 1-6: Tenging milli forsteyptar brúarsúlu og staðsteypts sökkuls ásamt notkun forsteypts þverbita (Haraldsson o.fl., 2013).

Þróun á forsteyptum landstöplum er komin skemur á veg en veghaldarar í hinum ýmsum ríkjum í Bandaríkjunum hafa þó þróað slíkar lausnir (Culmo o.fl., 2011). Hér á Íslandi fjalla meistararitgerð Franz Sigurjónssonar (2023) og lokaverkefni Rúnars Steins Smárásonar (2022) um rannsóknir á forsteyptum stöpulvegg. Verkefnið var samstarfsverkefni milli Háskóla Íslands, Vegagerðarinnar, BM-Vallá og Vistu verkfræðistofu. Markmið þeirra var að hanna og prófa nýja tengingu milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls með því markmiði að einfalda samsetningu slíks kerfis og stytta verktíma. Horft var sérstaklega til þess að nota ekki útistandandi U-járn.

Unnið var með þá hugmynd að forsteypa stöpulveggina án sérstakra tengijárna en í staðinn skilja eftir göt í neðri brún veggeininga til að þræða steypustyrkarjárn sökkuls í gegn. Sá hluti veggjar sem hverfur ofan í staðsteyptan sökkul yrði ennfremur gerður hrjúfur til að auka samvirkni eininga í steypuskilum, Mynd 1-7 sýnir lausnina ásamt sökkulbendingu sem kemur til með að tengjast íþræddum járnnum. Með þessari aðferð eykst stöðugleiki veggeininga þegar verið er að koma þeim fyrir í sökkli þar sem veggur stendur á einföldum stólum í stað járnalykkja. Einnig er einfaldara að flytja veggeiningar þar sem þær er síður viðkvæmar fyrir hnjaski.



Mynd 1-7: Hugmynd að nýrri forsteyptri einingu og tengingu við staðsteypst sökkul.

Byggingarröðin er eftirfarandi:

1. Slegið er upp fyrir sökkli og neðri járngrind komið fyrir.
2. Veggeining hífð á sinn stað og hún stillt af.
3. Efri járngrind í sökkli komið fyrir og þrædd í gegnum göt forsteyptar veggeiningar.
4. Gengið frá járngrind í sökkli og hann steypur á staðnum og um leið tengingin við forsteyptu veggeininguna. Allt í einni steypuvinnulotu.

Ástæður þess að velja það að staðsteypa sökkul í stað þess forsteypa hann er einkum tvær. Í fyrsta lagi eru sökkulir í brúargerð einingar sem eru stórar og þar með massamiklar. Það gerir það að verkum að erfitt er að flytja þær í vegakerfinu í hagkvæmum stærðum fyrir verkframtækni. Í öðru lagi þarf að undirbúa grundunina mjög vel svo að forsteyptur sökkull leggist rétt út og sitji jafnt.

Í verkefnum Franz og Rúnars voru tvö prófstykki hönnuð, smíðuð og prófuð. Annars vegar forsteypt lausn sem kölluð var **FSL** og er lýst á Mynd 1-7 og hins vegar hefðbundin staðsteyp lausn, kölluð **SSL**. Prófstykkin voru sköluð niður í 63% skala af þeirri lausn sem var notuð í brúarframkvæmdinni yfir Jökulsá á Dal við Klaustursel. Skölunarstærð réðist bæði af kraftgetu vökvatjakks við Háskóla Íslands og annars vegar járnastærð, en ákveðið var að nota K10 í járnendinguna sem er minnsta fánleg stærð af kambstáli án þess að sérpanta.

Prófanir á forsteypta prófstykkinu sýndi að tengingin þoldi heldur lægra álag en staðsteypa prófstykkið eða um 90% af burðarþoli staðsteypa prófstykkisins. Brotmynd forsteypta

prófstykkisins var blanda af vægisbroti og skerbroti á meðan það var fullt vægisbrot í staðsteypa prófstykkinu (Franz Sigurjónsson, 2023). Það skal bent á það að þrátt fyrir þennan mun milli prófstykkjanna þá stóðst forsteypa prófstykkið kröfur hvað varðar styrk og seiglu. Prófstykkið hélt styrk sínum yfir 80% af hámarksstyrk fram í lok álagsprófs. Ýmsar ástæður geta legið á bakvið þessa niðurstöðu. Í fyrsta lagi var þykkt veggjar á staðsteypa prófstykkinu þykkari niður við sökkul þar sem gliðnun steypumóta átti sér stað við steypuvinnu (þ.e. mót bólgnuðu út af þrýstingi). Í öðru lagi var styrkur steypu örlítið lægri á forsteypa veggnum en þeim staðsteypa, þessi atriði ýta undir aukinn skerstyrk á staðasteypa stykkinu. Annað sem má hafa í huga er að forsteypa prófstykkið var ekki með steypuskil milli veggjar og sökkuls eins og finna má í staðsteypa prófstykkinu. Það var því í upphafi prófs með stífari og heillegri tengingu en staðsteypa prófstykkið sem var með innbyggða veikleika í steypuskilunum. Í báðum prófum var skersspanið það sama (hæð vökvatjaks yfir sökkli deilt með skerdýpi stöpulveggs) eða um 5.0 en á því sviði geta óskerbentir veggir fengið annað hvort vægisbrot eða skerbrot (Wight, 2015).

Eftir prófanir voru bæði prófstykkin söguð í tvennt og var þá ekki að sjá nein ummerki um veikleika í nýrri tengingu (sjá Mynd 1-8). Hér er mikilvægt að undirstrika að brotmyndin kom fram í veggeiningunni en ekki í tengingunni ofan í sökklinum.



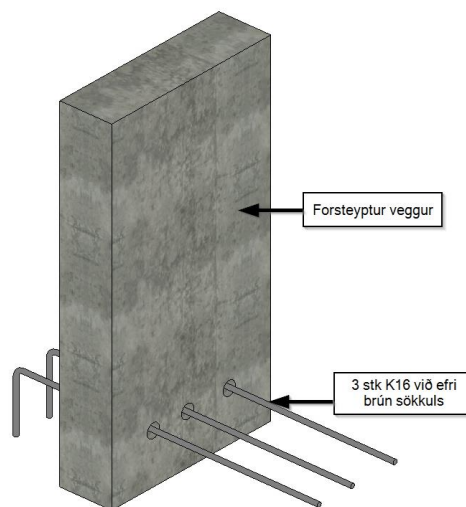
Mynd 1-8: Þverskurður prófstykkja -Staðsteypur landstöpull, SSL (vinstri) og forsteypur landsstöpull, FSL (hægri).

1.3 Umfang og markmið ritgerðar

Í þessu meistaraverkefni verður tengingin milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls þróuð frekar. Horft verður sérstaklega til niðurstaðna úr rannsóknum Franz Sigurjónssonar (2023) og Rúnars Steins Smárásonar (2022). Ljóst er að í hinum ýmsu brúarverkefnum Vegagerðarinnar getur verið að ætlað skerspan (þ.e. þar sem heildarkraftur verkar á stöpulvegginn yfir yfirborði sökkuls) sé innan þeirra marka að skerbrot fáið í óskerbentum stöpulvegg. Ákveðið var að prófa forsteyptu útfærslu Franz og Rúnars en að styrkja vegginn með skerleggjum á því svæði sem veikast er fyrir skerbroti með það sem markmið að stýra brotmyndinni í fullt vægisbrot. Einnig var ákveðið að smíða annað prófstykki sem notar stærri og færri steypustyrktarjárn sem þræða þarf í gegnum einingu og samtengja við járnagrind sökkuls. Þetta einfaldar vinnuna á verkstað sem og einfaldar smíða- og steypuvinnu stykkisins. Ákveðið var að nota 3stk. K16 járn sem jafnast á við K25 í 63% skala. Götin í veggnum eru enn fremur stærri og auka sveigjanleikann (e. tolerance) í samsetningu tengingarinnar. Járnagrind veggeiningar og sökkuls er að öðru leyti sú sama og hér að ofan, þ.e. með viðbótar skerleggjum. Loks gefur það einnig nákvæmari og áreiðanlegri mynd af niðurstöðum að hafa prófað fleiri en eitt prófstykki. Mynd 1-9 sýnir þrívíddar teikningu af uppfærðri veggeiningu ásamt K16 járnnum sem þrædd eru í gegn fyrir steypu sökkuls. Framkvæmd álagsprófsins var einnig betrubætt. Fremsti hluti stálstautsins, sem festur er við tjakkin og ýtir á prófstykkið, var rúnaður í kúluform til þess að koma í veg fyrir mögulegt viðbótarvægi sem getur myndast í þverskornum stauti þegar prófstykkið byrjar að halla og einugis neðsti hluti stauts ýtir þá á prófstykkið. Slíkt vægi getur mögulega haft áhrif á álagsaflesturinn í kraftskynjaranum (e. load cell) í tjakknum.

Í þessu verkefni voru tvö sköluð (63%) prófstykki með mismunandi hönnurforsendur, smíðuð og prófuð á tilraunagólfi Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands í VR-III:

1. ForSteyptur Landstöpull með Litlum Steypustyrktarjárnnum - Prófstykki FSL-LS
2. ForSteyptur Landstöpull með Stórum Steypustyrktarjárnnum - Prófstykki FSL-SS



Mynd 1-9: Uppfærð veggeining (í prófstykki FSL-SS) ásamt K16 járnnum sem þrædd eru í gegn.

Markmið þessarar rannsóknar er að meta frammistöðu tengingarinnar eftir uppfærða hönnun og bera hana saman við staðsteypa tengingu sem lýst var í verkefnum Franz Sigurjónssonar (2023) og Rúnars Steins Smárásonar (2022).

Aðal rannsóknarspurningarnar í þessari rannsókn eru fjórar talsins:

- 1. Er hægt að framkalla fullt vægisbrot í tengingunni milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteyppts sökkuls með því að bæta við skerbendingu í vegginn fyrir ofan yfirborð sökkulsins?**
- 2. Er hægt að útfæra forsteyptu tenginguna með færri og stærri steypustyrktarjárnnum sem ganga í gegnum vegginn?**
- 3. Hefur það áhrif á frammistöðu tengingarinnar að fækka járnum í sökklinum, t.d. með því að fækka langjárnum í efri grind og skerjárnnum í sökklinum?**
- 4. Hvaða áhrif hefur það að lækka hrýfishluta veggjar þannig að hann nái aðeins upp að járnagötum í stað yfirborð sökkuls?**

Ritgerðin er byggð upp með eftirfarandi hætti. Kafli 2 inniheldur lýsingar á hönnun og smíði beggja prófstykkja. Kafli 3 fjallar um uppsetningu tilrauna á spennigólfini Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands og gerir grein fyrir álagsprófum. Kafli 4 fer yfir skemmdir prófstykkja við tilraunir í máli og myndum. Mældar niðurstöður í álagsprófum eru kynntar og greindar í kafla 5 og greiningar á mældum niðurstöðum og samanburður við hönnunarlíkingar tekin fyrir í kafla 6. Loks fjallar kafli 7 um samantekt og niðurstöður.

2 Hönnun og smíði prófstykkja

2.1 Hönnun

Tvö prófstykki voru hönnuð, smíðuð og prófuð í þessu meistaraverkefni. Bæði prófstykki nota sömu tengingu milli forsteypts stöpulveggis og staðsteyptrar undirstöðu og var þróuð af Franz Sigurjónssyni (2023) og Rúnari Steini Smárasyni (2022). Fyrri prófstykkið (í þessari rannsókn kallað **Prófstykki FSL-LS**) var smíðað nákvæmlega eins og gert var í fyrri tilraunum nema bætt við skerleggjum í vegginn á völdum stað með því markmiði að stýra brotmynd tengingarinnar í fullt vægisbrot. Í síðara prófstykki var tengingin prófuð með stórum steypustyrktarjárnnum sem ganga í gegnum forsteypta stöpulvegginn (**Prófstykki FSL-SS**). Hugmyndin er að minnka smíðavinnu veggja þannig enn frekar, en færri járn þarf þá að þræða í gegn og þar að leiðandi minnkar mótavinna í kringum göt. Vinna á verkstað þegar veggur er reistur ætti einnig að einfaldast í kjölfarið sem og steypuvinna þar sem steypa flæðir léttar í gegnum stærri göt. Líkt og í rannsóknum Franz Sigurjónssonar (2023) og Rúnar Steins Smárasonar (2022) voru bæði prófstykki hönnuð miðað við 63% hlutfallsstærð brúarstöplis við Jökulsá á Dal við Klaustursel.

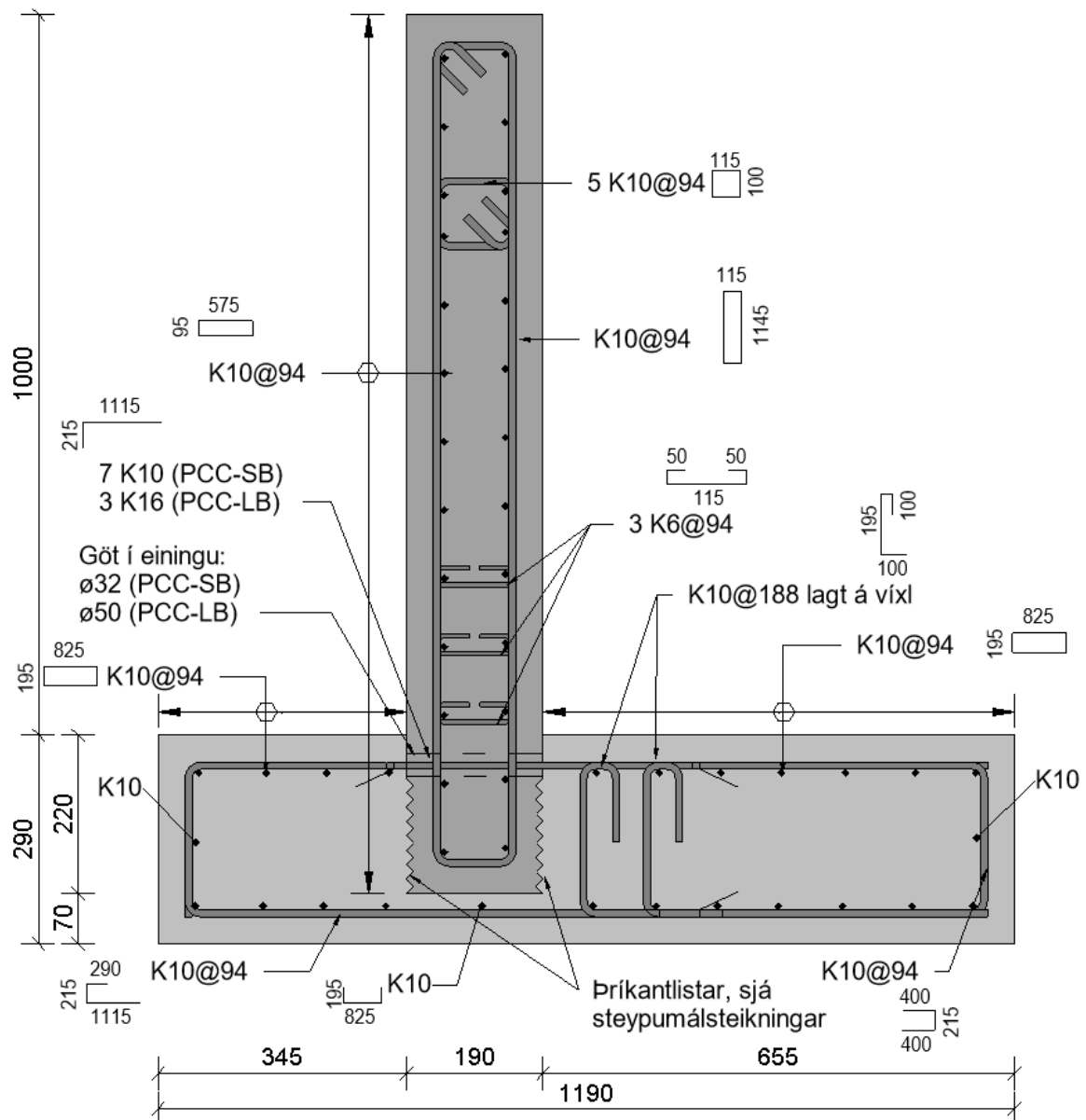
Öll hönnun fylgdi gildandi Evrópustöðlum ásamt þjóðarviðaukum og reglum Vegagerðarinnar um hönnun brúa (2018). Eftirfarandi EC staðlar eru notaðir í verkefninu:

- Hönnunarforsendur: Eurocode 1990 ásamt þjóðarviðaukum
- Álagsforsendur: Eurocode 1991 ásamt þjóðarviðaukum
- Hönnun járnbentrar steinsteypu: Eurocode 1992 ásamt þjóðarviðaukum
- Hönnun stálvirkis: Eurocode 1993 ásamt þjóðarviðaukum
- Jarðskjálftahönnun: Eurocode 1998 ásamt þjóðarviðaukum

Burðarþolsteikningar af prófstykkjum má finna í Viðauka A en sameinað þversnið fyrir bæði prófstykki má sjá á Mynd 2-1. Sameiginlegar forsendur prófstykkja eru eftirfarandi:

- Lengd, breidd, þykkt stöpulveggjar (1000 mm, 650 mm, 190 mm).
- Hæð, breidd og þykkt sökkuls (1190 mm, 900 mm, 290 mm).
- Kápuþykkt sökkla og veggja (38 mm).
- Staðsetning vökvatjakks er 730 mm fyrir ofan yfirborð sökkuls.
- Efnisgæði
 - Kambstál: B500NC
 - Steinsteypa: C35/45: XF4-16

Hönnunarstyrkur steypu í bæði stöpulvegg og sökkli er C35/45 eins og í brúnni yfir Jökulsá á Dal við Klaustursel. Hins vegar til að auka ekki skerstyrk steypunnar í prófstykkjunum var mesta stærð fylliefnis (D_{max}) í blöndunni sköluð einnig niður 63%. Stærsta fylliefni var minnkað úr 25 mm niður í 16 mm.

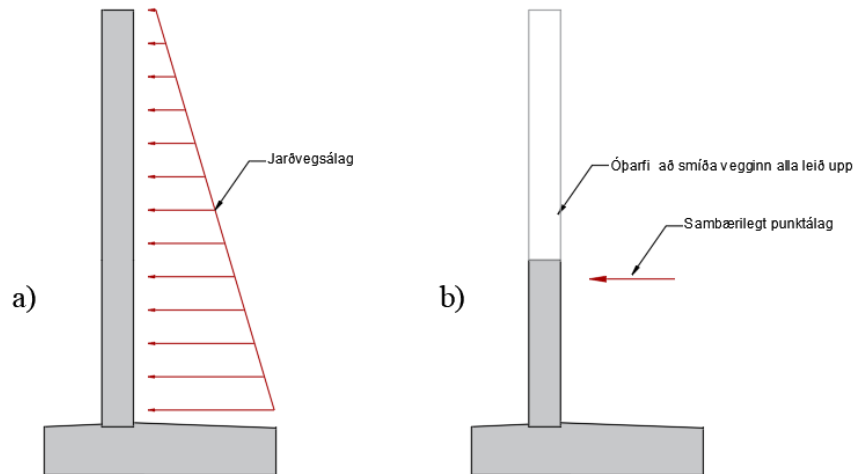


Mynd 2-1: Burðarþolsteikning prófstykkja, öll mál eru í mm.

2.1.1 Hönnun stöpulveggja

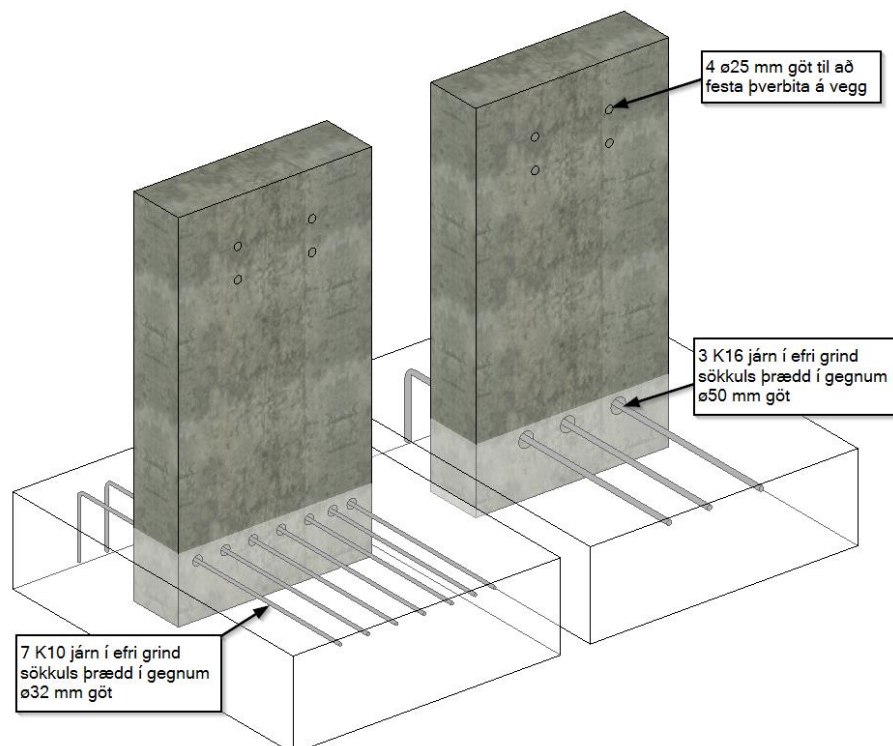
Í báðum prófstykkjum gengur forsteypti veggurinn 220 mm ofan í staðsteyptan sökkul eins og sjá má á Mynd 2-1, en þessi stungudýpt var valin til að vera í samræmi við rannsóknir Franz Sigurjónssonar (2023) og Rúnar Steins Smárásonar (2022). Hins vegar er stungudýpt U-járna stöpulveggis 205 mm (í neðri brún U-járna) og þar með er 15 mm steypukápa í veggnum sjálfum. Þeir ákvörðuðu þessar tvær stungudýptir með hliðsjón á rannsóknum Haraldsson o.fl. (2013). Þeir sýndu fram á að til þess að liður myndist í forsteyptri brúarsúlu ofan við sökkul þarf stungudýpt að vera $1,1 \times$ þvermál súlu. Hér er því miðað við stungudýpt veggjar sem $l_{veggur} = 1,16 \times$ þykkt veggjar og stungudýpt U-járna sem $l_{Ujárn} = 1,08 \times$ þykkt veggjar. Þannig ætti að vera tryggt að sökkullinn skemmist lítið eða ekki neitt. Hægt er að færa rök fyrir því að U-járn geti náð niður 220 mm niður eins og veggurinn sjálfur því steypukápa er tryggð eftir að sökkullinn er steypur.

Hæð stöpulveggja smíðaðra prófstykkja yfir sökkli ákvarðaðist út frá þríhyrningslaga jarðvegsálagi sem verkar á raunverulegan vegg, en ef jarðvegsálaginu er umbreytt í jafngildan kraft/álag (punktálag) sem er staðsett er í 1/3 af hæð veggs er óþarfi að smíða vegg prófstykkis alveg upp í topp. Þessu er betur lýst á Mynd 2-2.



Mynd 2-2: Samanburður milli álags (a) í felti og (b) í tilraunastofu. Átakspunktur punktkrafts er í 1/3 af hæð veggjar.

Báðir stöpulveggir eru eins uppbyggðir að öllu leyti nema FSL-LS hefur 7 stk. 32 mm göt fyrir K10 járn en FSL-SS hefur 3 stk. 50 mm göt fyrir K16 járn. Miðja gata á báðum prófstykkjum eru í sömu fjarlægð frá neðri brún veggjar. Í veggina var einnig komið fyrir fjórum $\varnothing 25$ mm götum til þess að hægt væri að festa þverbíta á vegg sem tekur við álagi frá viðspyrnu í prófun, Mynd 2-3 sýnir prófstykkinn hlið við hlið í þrívídd.



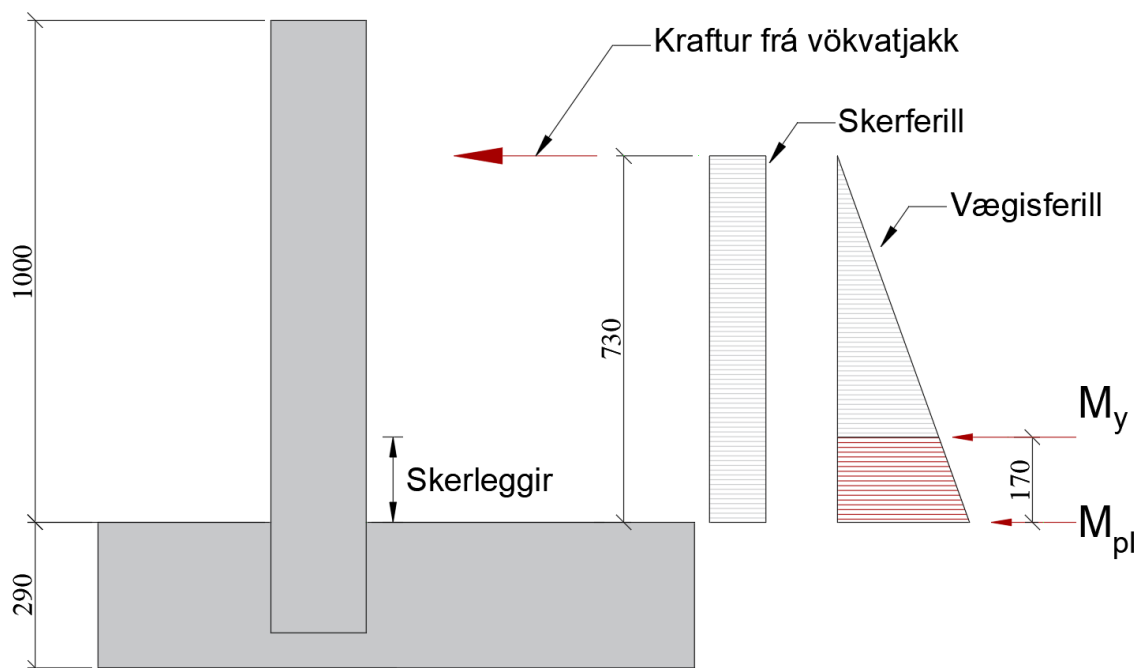
Mynd 2-3: FSL-LS (vinstri) og FSL-SS (hægri) ásamt íþræddum steypustyrktarjárnnum.

Til þess að framkalla fullt vægisbrot í tengingunni var ákveðið að koma fyrir skerleggjum í veggnum á því svæði þar sem mikið vægi verkar samtímis skeri. Það svæði er rétt fyrir ofan sökkulyfirborð. Mynd 2-4 sýnir skematískt prófstykki ásamt bæði vægis- og skerferli neðan álags frá vökvatjakk.

Samkvæmt Wight (2012) er bæði hættu á vægis- og skerbroti ef hlutfall milli hæðar vökvatjakkssins, h_v og skerdýpis, d er á bilinu 2,5 – 6. Fyrirskrifað hlutfall á báðum prófstykkjum er því:

$$\frac{h_v}{d} = \frac{730 \text{ mm}}{147,5 \text{ mm}} = 4,95 \approx 5$$

Skerleggjum var því komið fyrir á því svæði veggssins sem flotliður kann að myndast í lóðréttum togjárnnum undan vægisáraun, sjá Mynd 2-4. Þversnið veggjarins var greint í einföldu vægis-krappa forriti (e. moment-curvature) til að ákvarða bæði flotvægið (M_y) og plastíska vægið í þversniðinu (M_{pl}). Fjarlægð staðsetningar flotvægis var ákvörðuð að vera 170 mm fyrir ofan sökkulyfirborð. Þar með duga þrjár raðir af skerleggjum ef miðað er við sama möskva og í vegg, 94 mm. Miðað við áætlaðan skerkraft í vegg var ákveðið að nota K6 bendistál en það samsvarar K10 í raunstærð. Skerstyrkur skerleggjanna samsvaraði $0,3\sqrt{f_{ck}} = 0,3\sqrt{35} = 1,8 \text{ MPa}$.



Mynd 2-4: Flotsvæði togjárna undan beygjuvægi.

Yfirborð veggjarins sem stingst niður í staðsteyptan sökkul var gert hrjúft til að auka bindingu milli forsteypts veggjar og staðsteypts sökkuls. Notuð var sama útfærsla og í fyrri rannsókn (Franz Sigurjónsson, 2023) en það er að nota hrýfi, sem mælt er með að nota, fyrir enda forsteyptra brúarbita og má finna í Brúarhandbók vegagerðarinnar í Washington ríki (Washington State Department of Transportation, 2022). Útfærsla hrýfis má sjá í Viðauka A.

2.1.2 Hönnun sökkla

Efri járnagrind sökkuls í Prófstykki FSL-LS hefur 9-K10 langjárn með 94 mm c/c þar sem sjö þeirra þræðast í gegnum 32 mm göt í forsteypta veggnum. Til samanburðar eru 2-K10 og 3-K16 járn í efri grind Prófstykkis FSL-SS. Langjárn efri grindar beygjast svo í lykkjur og tengjast við 9 langjárn í neðri grind. Prófstykkin hafa því langjárnahlutfall, ρ_l sem var reiknað með jöfnu (2.1), niðurstöður má sjá í Töflu 2-1:

$$\rho_l = n \cdot \frac{A_{sl}}{b_w d} \quad (2.1)$$

Þar sem:

ρ_l : Járnahlutfall [%]

n : Fjöldi járna [–]

A_{sl} : Járnaflatarmál [mm^2]

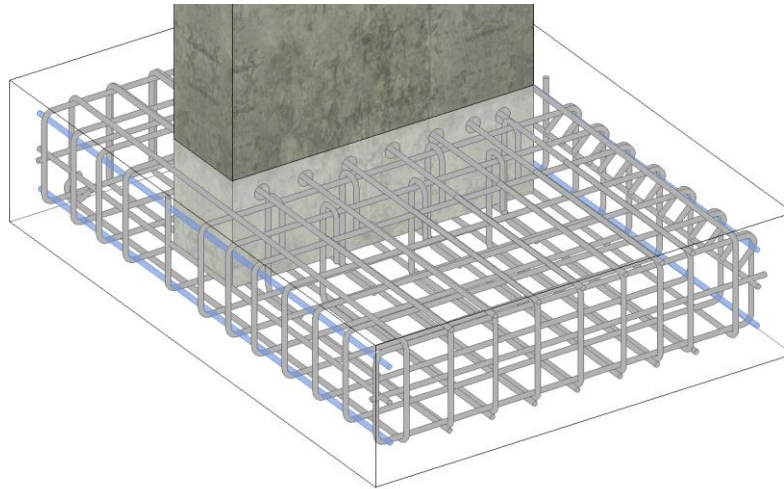
b_w : Breidd þversniðs [mm]

d : Virk hæð járna frá þrýstibrún [mm]

Tafla 2-1: Langjárnahlutfall sökkla.

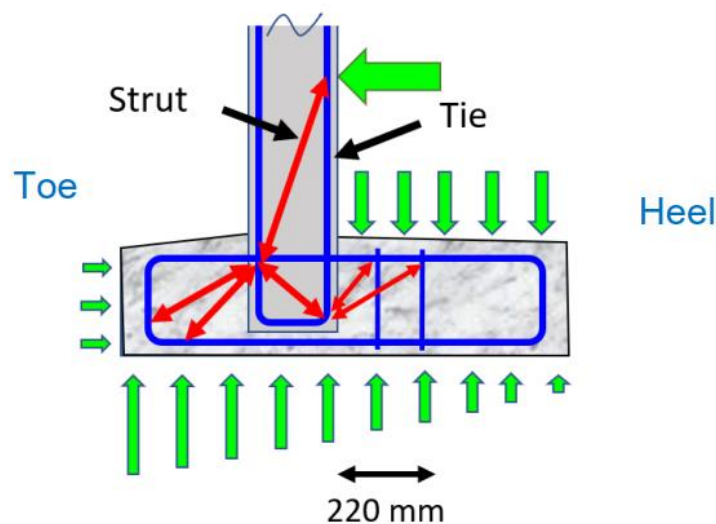
	FSL-SS	FSL-LS
Langjárnahlutfall í efri brún, $\rho_{l,E}$ [%]	0,34	0,32
Langjárnahlutfall í neðri brún, $\rho_{l,N}$ [%]	0,32	0,32

Í þessari rannsókn var ákveðið að sleppa fjórum kverkjárnum í lykkjum sökkla (járn merkt með bláum lit á Mynd 2-5) en þau voru notuð í prófstykkjum SSL og FSL í fyrri rannsókn (Frans Sigurjónsson, 2023). Það var gert til að minnka járnbendingu sökkuls, en nýtni sökkuls í fyrri tilraunum var lítil og sökkulinn því væntanlega ofhannaður. Þverjárn beggja sökkla voru 13 stk. lokaðar K10 lykkjur með 94 mm möskvastærð.



Mynd 2-5: Kverkjárn lykkja í járnbindingu sökkuls.

Mynd 2-6 sýnir einfalt grindarlíkan af flæði krafta í tengingunni. Sjá má að álag á stoðvegg frá vökvatjakk veldur þrýsting á skammhlið sökkuls en upprifskraftar myndast í langhlið. Það getur þurft að járnbinda þar sérstaklega fyrir þessum upprifskröftum.



Mynd 2-6: Einfalt grindarlíkan (e. Strut and tie) af stöpulvegg (Haraldsson ofl., 2023).

Í verkefni Franz Sigurjónssonar (2023) og Rúnars Steins Smárásonar (2022) var ákveðið að járnbinda fyrir þessum upprifskröftum þrátt fyrir að reiknuð spenna væri undir togþoli steypunnar. Það var gert til þess að uppfylla grindarlíkanið á Mynd 2-6 og þar með að ekki gera ráð fyrir togstyrki steypu í hönnun. Settar voru átta K10 skerleggir, staðsettar innan 220 mm frá eins og Mynd 2-6 sýnir. Í þessu verkefni var ákveðið að nota einungis sjö K10 skerleggir til þess að minnka járnbindingu sökkuls og á það ennþá að vera innan marka styrkgetu sökkuls. Skerstyrkur þessara leggja samsvaraði $0,32\sqrt{f_{ck}} = 0,32\sqrt{35} = 1,9$ MPa.

2.2 Smíði

Járnagrind og steypumót fyrir bæði prófstykkinn voru smíðuð á verkstæði Vegagerðarinnar, Suðurhrauni 3, í Garðabæ með aðstoð brúarvinnuflokksins á Hvammstanga. Áður en járnagrind var sett saman voru streitunemum komið fyrir á völdum steypustyrktarjárnnum. Það þurfti að gera að mikilli nákvæmni. Fyrst þurfti að slípa í burtu kamba stálsins með finni og finni sandpappír þar til yfirborð járnins var orðið rennislétt. Einnig þurfti að passa að taka ekki meira af yfirborði járnins en nauðsynlegt til að skerða sem minnst styrk járnins. Þar næst þurfti að sótthreinsa yfirborð slípaða flatarins til þess að lím streitunemans geti bundið sig að fullu við járneð. Lími var leyft að harðna skv. fyrirmælum framleiðanda og tenging streitunema og járna síðan varin með límbandi svo hún yrði ekki fyrir hnaski í smíðinni. Streitunemar voru allir skoðaðir bæði fyrir og eftir steypu með því að mæla viðnám hvers og eins. Nemi taldist í lagi ef viðnámið mældist $\approx 120 \Omega$.

Steypumót úr verkefni Franz Sigurjónssonar og Rúnar Steins Smárásonar voru endurnýtt. Þau voru því tekin í sundur, þrífín og flest notuð aftur. Á mótin var borin mótaolía til þess að auðvelda rifin eftir steypu. Mynd 2-7 sýnir samansett sökkulmót prófstykkja.



Mynd 2-7: Sökkulmót prófstykkja samansett.

Til þess að auka hrýfi í steypuskilum milli veggja og sökkla var þríkantslistum komið fyrir í neðri hluta veggmóta. Þetta þurfti að gera á báðum hluta veggjarins og var því smíðaður sérstakur platti með þríkantslistum sem var síðan þrýst inn í steypu og festur á meðan steypan var blaut.



Mynd 2-8: Þríkantslistum komið fyrir sökkulmegin í mótum FSL-LS. Listarnir ná upp að götum.

Ákveðið var að setja þríkantslista aðeins upp að miðjum götum. Þannig helst þversnið veggjar heilt við efri brún sökkuls og þar að leiðandi talið minni hættu á því að brotmynd veggja nái niður fyrir efri brún sökkuls.



Mynd 2-9: Þríkantslistar festir á platta sem þrýst er ofan í steypu þar sem veggur er steypdur liggjandi.

Þar næst var að setja saman járnagrindur beggja prófstykkja. Mynd 2-10 sýnir fullkláraða veggjargrind með skerleggjum. Mynd 2-11 sýnir járnagrind sökkuls í smíði. Búið er að koma fyrir streitunemum í báðum járnagrindum en þeir eru varðir með bláu límbandi.



Mynd 2-10: Járnagrind veggjar. Streitunemar eru varðir með bláu límbandi.



Mynd 2-11: Járnagrind sökkuls í smíði.

Myndir 2-12 og 2-13 sýna veggeiningar fyrir bæði prófstykkjin klár fyrir steypuvinnu. Bæði prófstykki voru í kjölfarið flutt frá Vegagerðinni yfir á verkstæði BM-Vallá þar sem þau voru steyppt.



Mynd 2-12: Veggeining fyrir FSL-SS klár til steypu. Rörin þrjú eru fyrir K16 járnin sem þrædd verða í gegn eininguna. Færri rör einfalda mótasmíðina.



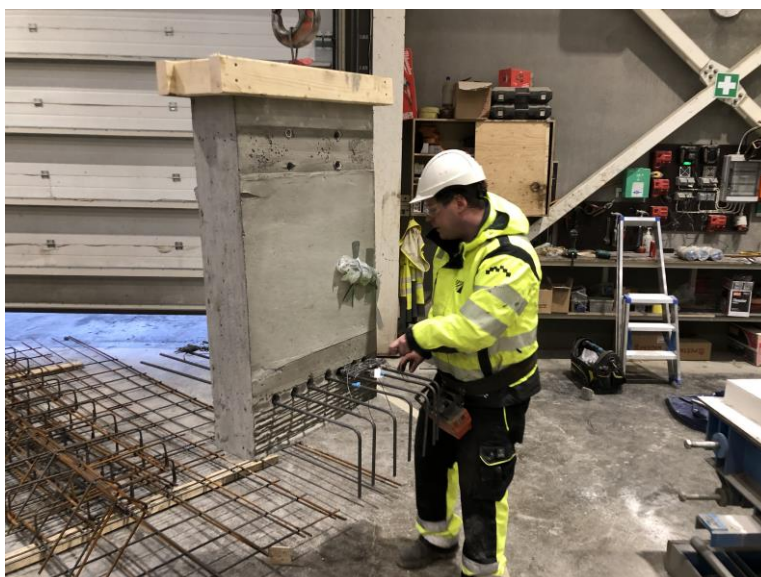
Mynd 2-13: Veggeining fyrir FSL-LS klár til steypu. Rörin sjö eru fyrir K10 járnin sem þrædd verða í gegn eininguna.

Steypuvinna fór fram í tveimur hlutum dagana 9. – 10. nóvember 2023 hjá BM-Vallá á Akranesi. Fyrri daginn voru báðir veggir steypdir. Daginn eftir voru mót slegin af veggjum, tilheyrandi K10 og K16 járn þrædd í gegnum göt þeirra og þeim komið fyrir í sökkli. Veggir voru réttir af í sökkulmótunum og festir svo þeir myndu ekki hnikast til í steypuvinnu. Mynd 2-14 sýnir veggeiningu FSL-SS morguninn 10. nóvember stuttu eftir fráslátt steypumóta.



Mynd 2-14: FSL-SS daginn eftir steypu. Hrjúfi flöturinn sem stingst ofan í sökkulinn sést vel.

Þræða þurfti togjárn í gegnum veggeiningu áður en vegg var komið fyrir í járnagrind sökkuls. Mynd 2-15 sýnir vinnuna fara fram á prófstykki FSL-LS með aðstoð frá dr. Ólafi Sveini Haraldssyni. Á Mynd 2-16 má sjá að búið er að koma fyrir báðum veggeiningum í sökkulmót. Veggeiningar voru réttar af í mótunum og afstífaðar með timburbitum áður en steypuvinna fór fram til að koma í veg fyrir að þær hreyfist.

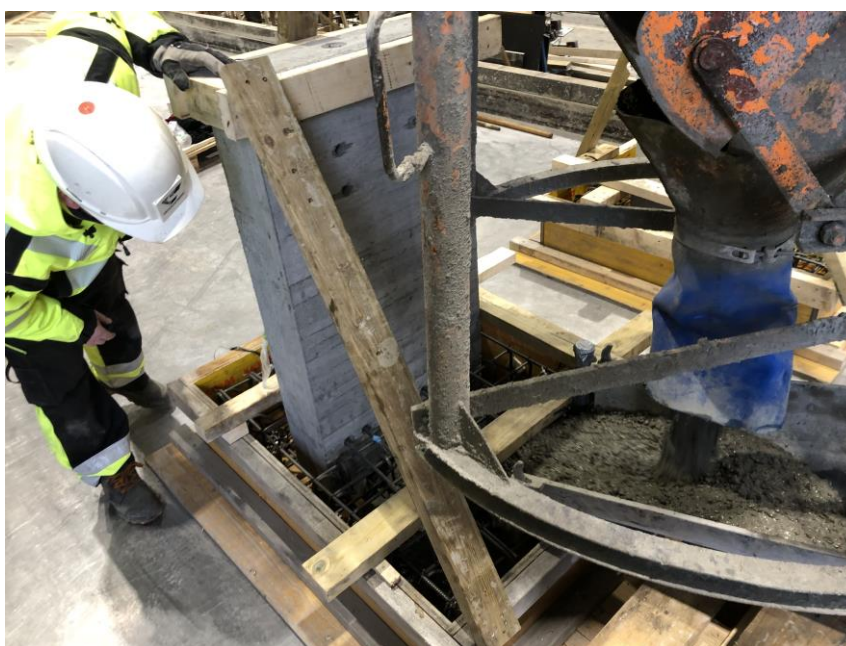


Mynd 2-15: Langjárnnum komið fyrir í FSL-LS áður en veggur er hífður í sökkulgrind.



Mynd 2-16: Búið er að koma veggjum fyrir í sökkulgrind og bæði stykki klár til steypu.

Steypt var frá langhlið sökkuls (þ.e. bakhlið) svo hægt væri að fylgjast með steypu flæða í gegnum ídráttargötin í veggnum, þetta var gert til að ganga úr skugga um það að steypa umliggi íþræddu járnin. Til þess að framkvæma þetta þurfti að víbra járnin sem gegnu í gegnum vegginn. Sérstök aðgát var höfð með víbrator vegna streitunema sem voru límdir við járn. Mynd 2-18 sýnir steypu flæða í gegnum göt meðfram íþræddum járnnum. Töluvert léttara var fyrir steypu að flæða í gegnum stærri göt FSL-SS veggeiningar.



Mynd 2-17: Byrjað var að steypa FSL-LS.



Mynd 2-18: Steypuvinna í gangi. Steypa að flæða í gegnum göt á FSL-SS einingunni.

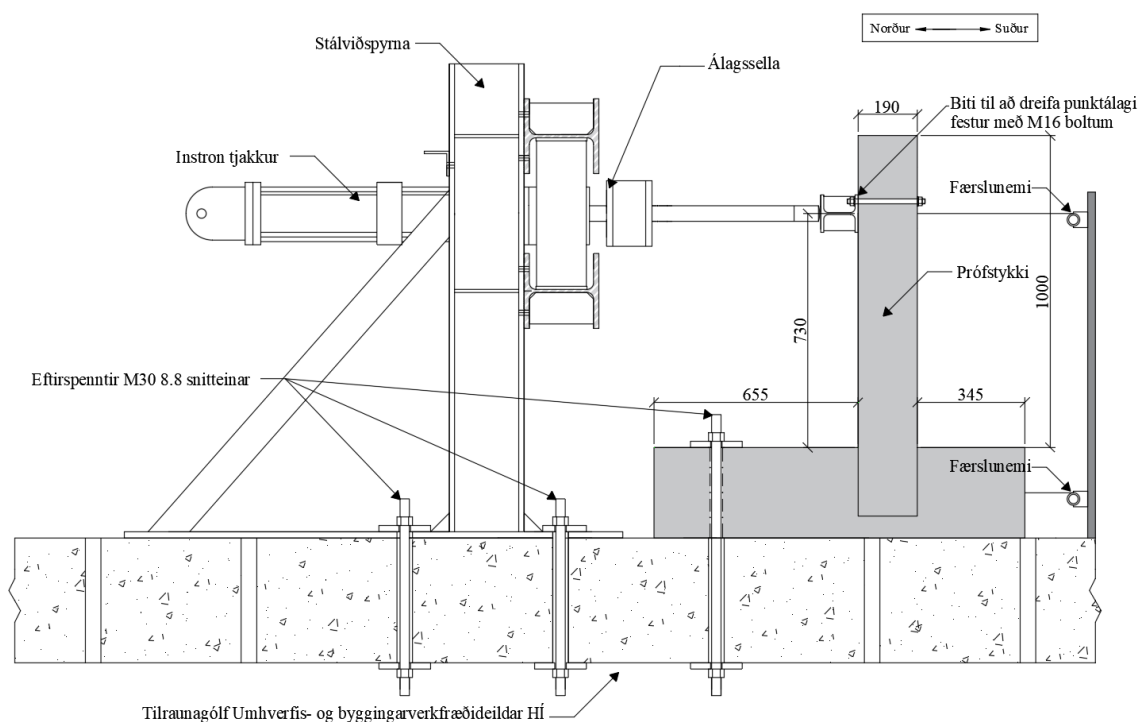
Báða dagana var steypan rannsökuð, en gerð voru próf á loftblendni, sigmáli og rakainnihaldi. Átta sívalningar voru steiptir hvorn daginn til þess að rannsaka. Frekari niðurstöður efnisprófana má finna í Viðauka C.

3 Aðferðafræði rannsókna

Í þessum kafla verður lýst uppsetningu tilrauna sem fóru fram á tilraunastofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar í VR-III við Háskóla Íslands. Prófuð voru tvö prófstykki með tengingu milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls sem var þróuð við deildina 2022-2023 (Rúnar Steinn Smáráson, 2022; Franz Sigurjónsson, 2023). Prófanir í þessu verkefni er framhald af því rannsóknarverkefni. Hér stendur til að bera saman sömu tengingu annars vegar með litlum íþræddum steypustyrktarjárnnum (**Prófstykki FSL-LS**) og hins vegar stórum íþræddum steypustyrktarjárnnum (**Prófstykki FSL-SS**) neðst í forsteyptum vegg sem tengja saman veggina og sökkulinn. Hönnun var samkvæmt Evrópustöðlum og reglum um hönnun brúa sem Vegagerðin gefur út, sjá nánar í Kafla 2. Próf fóru fram í janúar 2024.

3.1 Uppsetning tilrauna

Prófstykkin tvö voru flutt frá BM-Vallá þar sem þau voru steyp, á rannsóknarstofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar í VR-III byggingunni við Suðurgötu í Reykjavík í nóvember 2023. Mynd 3-1 sýnir hliðarásýnd á uppsetningu tilraunar. Á myndinni má sjá 100 kN Instron vökvatjakk í láréttri stöðu, stilltur að prófstykki í 730 mm hæð frá yfirborði sökkuls. Tjakkurinn er borinn af stálviðspyrnu, en stálvirki viðspyrnunnar er smíðað úr tveimur HEB þverbitum sem boltaðir eru á HEB 240 súlur. Súlurnar eru stífaðar af með SHS 150x5 sem eykur stífni viðspyrnunnar. Bæði prófstykki og viðspyrna eru eftirspennt við gólf tilraunarstofu með M30 8.8 snittteinum. Á prófstykkið er boltaður stálþverbiti sem tekur við punktálagi frá Instron tjakk og dreifir því jafnt yfir breidd stöpulveggjar.



Mynd 3-1: Uppsetning prófstykkja og viðspyrnu.

Undirbúningur hófst á prófstykki FSL-SS, en til þess að auðvelda rakningu sprungumyndana í prófun voru prófstykkinn máluð hvít og strikuð með 100 mm x 100 mm möskva. Vegna ójöfnu í gólfi var ákveðið að flota um 10 mm undir prófstykkinn, bæði til þess að fá jafna spennudreifingu undir sökkulfót og til þess að geta stillt prófstykki rétt af. Þunnt plastlag var sett milli gólfs og flots til þess að auðvelda vinnu við að ná prófstykki frá gólfi eftir prófanir. Á Mynd 3-2 má sjá FSL-SS rétt eftir að flotað var undir það og stálvirki viðspyrnu eftir að það hefur verið staðsett við prófstykki.



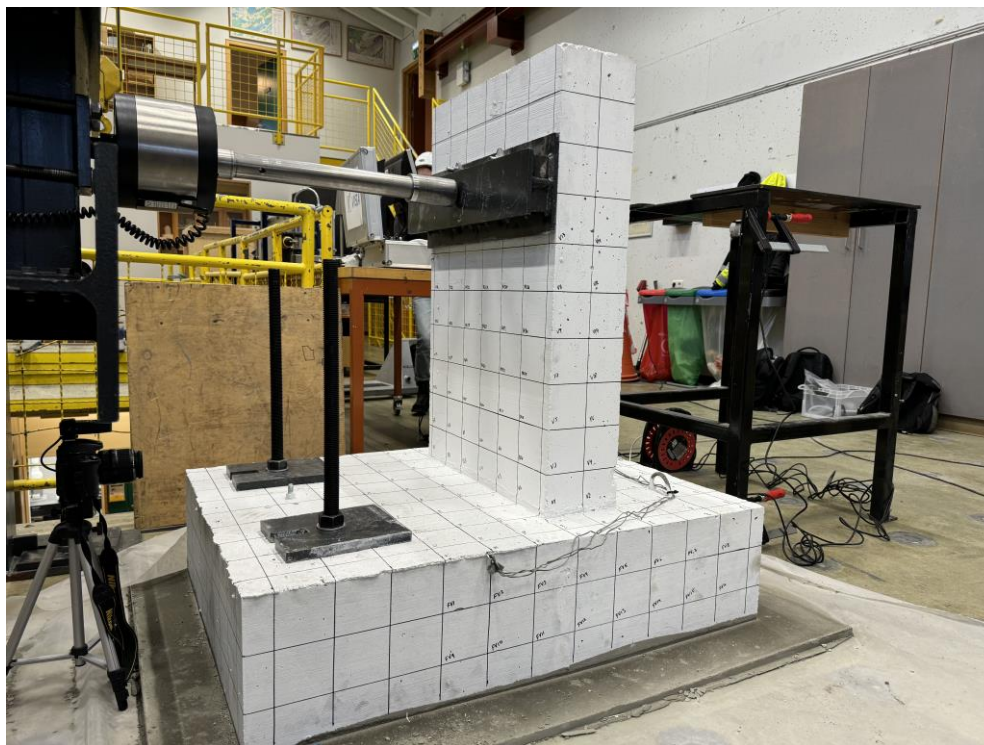
Mynd 3-2: FSL-SS í undirbúning & viðspyrnu komið fyrir við prófstykki.

Næst var Instron vökvatjakkur festur á viðspyrnuna, álagssella skrúfuð framan á tjakkinn og hann tengur við tölvubúnað. Snittteinar voru síðan þræddir í gegnum göt prófstykkis og gólf rannsóknarstofu og þeir spenntir með um 160 kN kraft. Það sama var gert til þess að festa viðspyrnuna. Snittteinararnir voru eftirspenntir með vökvatjakk sem fékkst í láni frá Háskóla Reykjavíkur. Mynd 3-3 sýnir uppsetningu tjakks við eftirspennu.



Mynd 3-3: Uppsetning vökvatjakks til að eftirspenna snittteina..

Stálbitinn sem tekur við punktálagi frá Instron tjakki var festur á prófstykki í gegnum göt í veggnum með M16 boltum. Möskvar sem höfðu verið strikaðir á prófstykkið voru síðan merktir, hver með sínu nafni eftir áttum (norður, suður, austur og vestur) svo hægt sé að geta til staðsetningar á sprungum. Á bæði sökkulfót og vegg voru festir færslumælur til þess að fylgjast með færslu við botn prófstykkis og hæð Instron tjakksins (sjá Mynd 3-1). Verkfræðistofan Vista sá um að tengja streitunema við tölvu og lesa af þeim við prófun stykkja. Mynd 3-4 sýnir FSL-SS fulluppsett og klárt til prófunar en það var fyrra prófstykki sem var prófað.

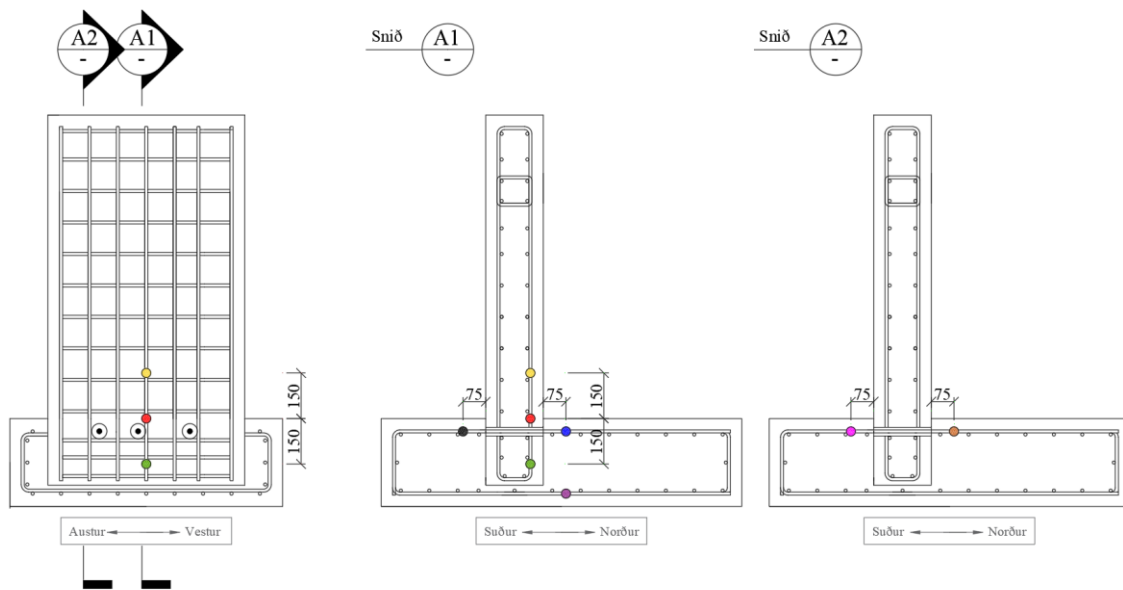


Mynd 3-4: Prófstykki, FSL-SS klárt til prófunar.

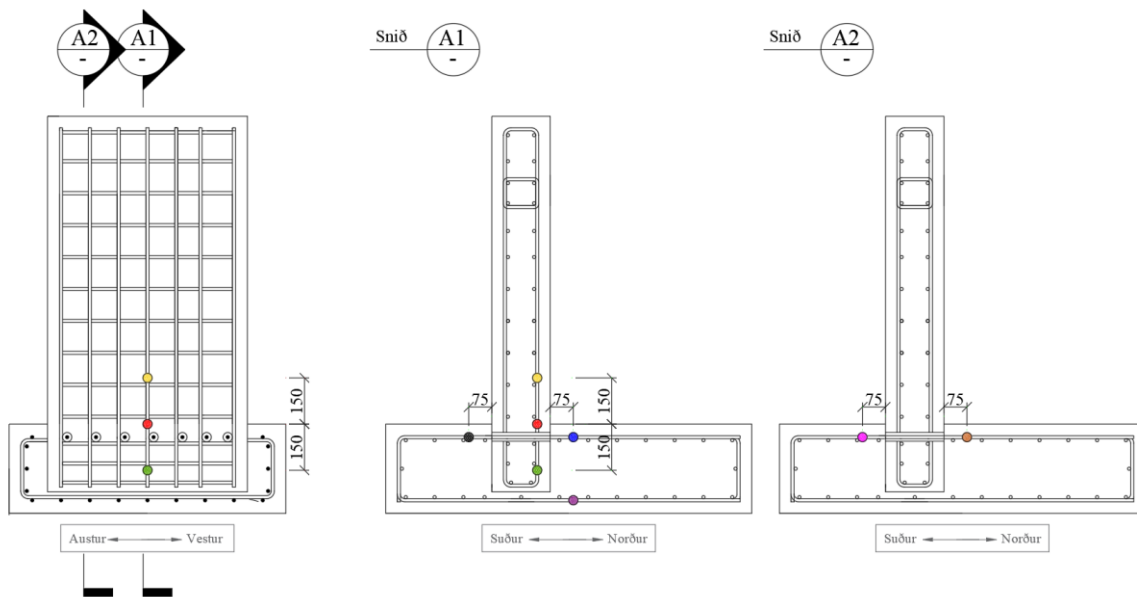
3.2 Tækjabúnaður og önnur mælitæki

Til að framkvæma tilraunina var notaður 100 kN Instron vökvatjakkur ásamt álagssellu (e. Load cell) frá sama framleiðanda sem mælir bæði kraft og færslu. Tjakkurinn er búinn með sérstökum stýribúnaði frá framleiðanda sem vistar gögnin jafn óðum. Til þess að fylgjast með færslum á prófstykkjunum var komið fyrir tveimur Fiama spólumælum. Mælum var komið fyrir á vegg í 730 mm hæð frá sökkli og á neðanverðan sökkulfót til að fylgjast með ef um mismunarfærslu væri að ræða, sjá einnig Mynd 3-1. Stálvír spólunema var festur á prófstykki með skrúfuðum vinklum og réttir af með hallamáli til þess að lágmarka mæliskekkjur.

Streitur í kambstáli voru mældar með streitunemum af gerðinni YFLA-5-5LJC-F frá Tokyo Measuring Instruments Laboratory. Mælilengd þeirra (e. gauge length) var 5 mm. Alls var 8 nemum komið fyrir í hvoru stykki, 3 stk í veggjum og 5 stk í sökkul. Einn streitunemi í vegg prófstykkis FSL-LS skemmdist við smíði á járnagrind. Staðsetning streitunema má sjá á Myndum 3-5 og 3-6.



Mynd 3-5: Staðsetning streitunema á prófstykki FSL-SS.



Mynd 3-6: Staðsetning streitunema á prófstykki FSL-LS.

Efsti streitunemi í vegg prófstykkis FSL-LS, merktur með gulum lit á Mynd 3-6, skemmdist við smíði á járnagrind.

Streitumælur eru merktir á eftirfarandi hátt, ab-cde.

- V/F tilgreinir hvort mælir sé í vegg (V) eða fæti (F).
- Númer prófstykkis, 1 fyrir FSL-SS og 2 fyrir FSL-LS.
- Númer járn, talið frá austri til vesturs.
- Alltaf 0.
- Í vegg er talið niður, í fæti eru skal miða við litakerfi.

Til dæmis lesist V1-401 á eftirfarandi hátt: Streitumælir í vegg prófstykkis FSL-SS sem er staðsett í járni 4 frá austurhlið og er efstur „1“.

Sjá nöfn ásamt tilheyrandi litum í Töflu 3-1 og 3-2.

Tafla 3-1: Nöfn streitunema í FSL-SS.

Litur	Streitunemi
	V1-401
	V1-402
	V1-403
	F1-201
	F1-202
	F1-403
	F1-101
	F1-102

Tafla 3-2: Nöfn streitunema í FSL-LS.

Litur	Streitunemi
	V2-401
	V2-402
	V2-403
	F2-401
	F2-402
	F2-403
	F2-201
	F2-202

Gögn frá bæði streitunemum og spólumælum voru skráð í Campbell-safnstöð (e. data logger), gerð CR1000X (Campbell Scientific, 1974b) og Granite Volt 108 (Campbell Scientific, 1974c). Til þess að mynda viðnámsbrýr á móti streitunemum var notast við WFBS120 (Campbell Scientific, 1974a). Gögn frá Instron voru lesin inn í Campbell með söfnunartíðninni 5 Hz sem þýðir að 5 gildi eru skráð á sekúndu eða 1 gildi á hverjum 0,2 sekúndum.

3.3 Álagspróf

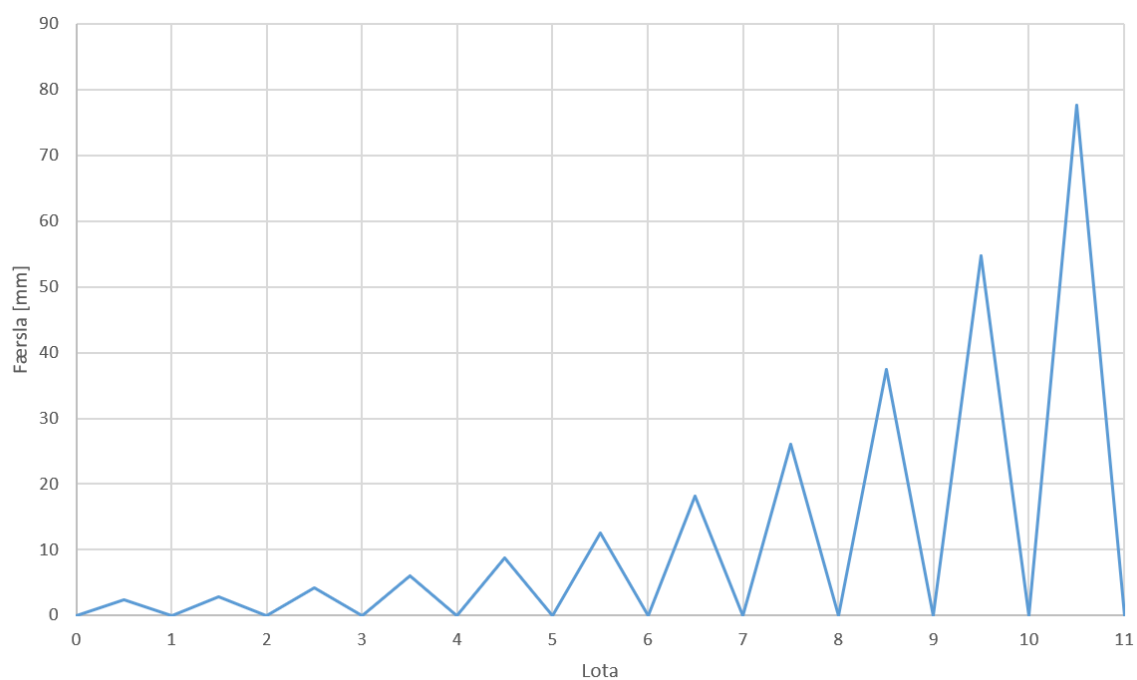
Við prófun beggja prófstykkja voru keyrðar ellefu stigvaxandi færslustýrðar lotur með Instron vökvatjakknum. Loturnar byggjast á álagsáætlun sem notuð var við University of Washington í Seattle (Pang o.fl., 2008) fyrir forsteypta veggj sem svo byggist á álagsáætlun NHERP fyrir forsteypta veggj (Building Seismic Safety Council, 2003). Við tilraun á prófstykkjum FSL-LS og FSL-SS var miðað við sömu hlutfallsfærslur og má finna meistararitgerð Frans Sigurjónssonar (2023). Hlutfallsfærslurnar má sjá í Töflu 3-3 ásamt

tilheyrandi færslum 730 mm yfir efri brún sökkulfóts. Í öllum lotum færðist tjakkurinn í hámarksfærslu á 20 sekúndum.

Tafla 3-3: Hlutfallsfærslur ásamt færslum fyrir álagsprófun.

Lota	Hlutfallsfærsla [%]	Færsla [mm]
1	0,33	2,4
2	0,40	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	54,8
11	10,65	77,7

Mynd 3-7 sýnir myndrænt graf af markmiðsfærslu vökvatjakks fyrir hverja lotu fyrir sig.



Mynd 3-7: Markmiðsfærsla Instron tjakks við álagsprófun.

4 Sjónrænt mat og þróun skemmda í álagsprófum

Hvort prófstykki fór í gegnum álagsáætlun sem samanstóð af ellefu stigvaxandi færslustýrðum lotum. Í hverri lotu var gerð ítarleg ástandsskoðun á prófstykkinu þar sem sprungumyndanir voru kortlagðar og þróun skemmda metnar á meðan tjakkur hélt stöpulvegg í hæstu færslustöðu áður en honum var stýrt aftur í upphafsstöðu. Myndir og myndbönd voru tekin kerfisbundin í gegnum alla prófunina (sjá Viðauka D). Í þessum kafla eru mismunandi skemmdarstig skilgreind og fjallað um þróun og mat skemmda fyrir bæði prófstykkin.

4.1 Skilgreining á skemmdarstigum

Þróun skemmda í prófstykkjum voru skoðuð vel í hverri lotu fyrir sig. Skemmdir sem komu fram voru bornar saman við lykilskemmdarstig sem eru skilgreindar í Töflu 4-1. Þessi tafla var aðlöguð af Franz Sigurjónssyni (2023) út frá samskonar töflu sem má finna í UW/PEER Structural Performance Database fyrir brúarsúlur (Berry o.fl, 2003).

Tafla 4-1: Lýsing á mismunandi stigum skemmda.

Hluti	Atburður	Lýsing
Veggur	Fyrsta áberandi lárétt sprunga	Sprungubreidd ≥ 0.5 mm
Veggur	Fyrsta áberandi $\sim 45^\circ$ sprunga	Sprungubreidd ≥ 0.5 mm
Sökkull	Fyrsta áberandi $\sim 45^\circ$ sprunga	Sprungubreidd ≥ 0.5 mm
Veggur	Fyrsta sprunga sem lokast ekki eftir að álag er tekið af	Sprungubreidd ≥ 0.5 mm
Veggur	Fyrsta flot í lóðréttu járn	Streitunemi mælir flotstreitu stáls
Sökkull	Flögnun steypu	Sýnileg flögnun
Veggur	Flögnun steypu	Sýnileg flögnun
Veggur	Mikil flögnun steypu	Hæð flögnunar er jöfn eða lengri en 1/4 af þykkt veggjar
Veggur	Full flögnun steypu	Steypa flagnar ekki meira eftir álagskeyrslu
Veggur	Lóðrétt járn sýnileg	Lóðrétt járn sýnilegt í fyrsta sinn
Veggur	Kiknun lóðréttra járna	Sjónræn athugun
Veggur	Slit á lóðréttum járnnum	Sjón- eða hljóðræn athugun

4.2 Prufukeyrsla

Áður en álagslotur hófust voru keyrðar forprufur á bæði prófstykki. Tjakkur var stilltur á færslu $\Delta = 0,4$ mm til að gæta þess að álag væri á fjaðursviði prófstykkis. Færslan gefur hlutfallsfærslu $R = 0,05\%$ (e. drift) á stöpulvegg:

$$R = \frac{\Delta}{H} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Þar sem $H = 730$ mm, hæð álagspunkts frá efri brún sökkulfóts. Mælitæki eru nákvæm og dugir því smá færsla sem þessi til að sannreyna öll mæligögn. Engar skemmdir urðu á prófstykkjum við prufukeyrslu.

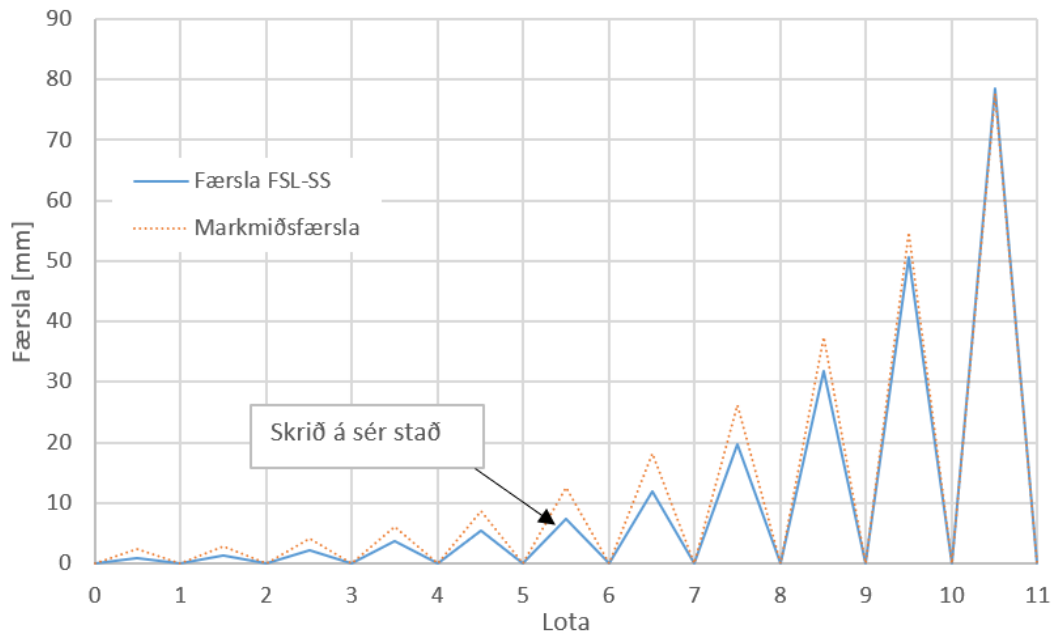
4.3 Álagspróf

Við álagspróf voru keyrðar ellefu kerfisbundnar lotur líkt og lýst er í kafla 3.3. Prófstykkin voru bæði vandlega skoðuð og leitað að sprungum áður en fyrsta lota var keyrð. Í hverri lotu þrýstir vökvatjakkur á stöpulvegg þar til hann hefur náð tilheyrandi lotufærslu, tjakkur stöðvast þá og heldur læstri stöðu. Prófstykki voru þá mynduð og leitað að skemmdum, þær skemmdir sem finnast eru skráðar niður og merktar með penna eftir tilheyrandi lotu. Að lokinni skoðun er vökvatjakki slakað og skilað aftur í upphafsstöðu og þá er aftur ljósmyndað. Þetta ferli var svo endurtekið eins fyrir hverja lotu.

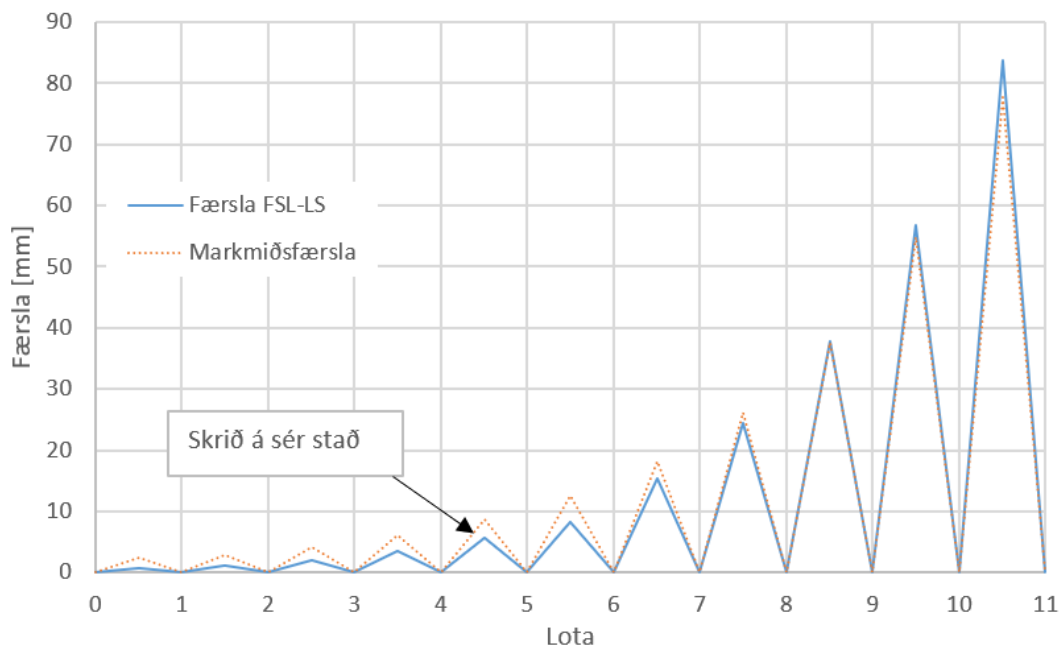
Í miðri álagslotu 5 missti prófstykki FSL-SS viðnám við tilraunagólfið og skreið fram um nokkra millimetra. Til að bregðast við þessu var upphafsstaða vökvatjakkisins færð fram um sömu færslu, miðað var við mælda færslu á sökklinum sjálfum. Álagslota 5 var svo endurtekin í þeirri von að snittteinararnir myndu halda prófstykkinu í skeri (þ.e. snittteinararnir væru komnir út að gatröndum á bæði prófstykkinu á sjálfu tilraunagólfinu). Þetta endurtók sig nokkrum sinnum í viðbót við sama álag frá tjakkinum og viðbrögðin voru þau sömu og var lýst hér fyrir ofan. Í fimmtu tilraun var álagslota 5 kláruð og talið að snittteinar væru þá fyrst komnir út að gatröndum. Þetta var staðfest með því að skoða færslumælingu á sökklinum en hún var undir 1 mm. Sambærileg leiðrétting var gerð í álagslotum þar á eftir ef skrið mældist á prófstykki. Við skoðun á mældum gögnum FSL-SS er ljóst að prófstykkið skreið meira, eins og sést í lotum 7 til 9 á Mynd 4-1. Talið er að aukið skrið í seinni lotum sé vegna þess að snittteinar voru einnig farnir að taka upp vægi (svigna).

Í uppsetningu seinna prófstykkis FSL-LS var reynt að lágmarka skriðið með því að staðsetja snittteina alveg upp að gatarönd sökkuls, en þá var snittteinum komið fyrir í götum og síðan ýtt lárétt á sökkulfót þar til hann stoppaði á snittteininum tveim. Í kjölfarið var síðan flotað undir sökkul og snittteinar eftirspennntir. Sambærilegt atvik átti sér þó samt stað í lotu 4 á prófstykki FSL-LS en með talsvert minna skriði og átti sér stað á prófstykki FSL-SS. Sömu mótaðgerðum var fylgt í því tilviki.

Ákveðið var að setja fram raunverulegar færslur prófstykkja út frá spólumælum, en þeir mældu bæði færslu á veggnum (í hæð vökvatjakks) og sökkulfót. Þar með var hægt að draga færslu sökkulfóts frá færslu veggjar og fá þannig út raunfærslu og raunhlutfallsfærslu stöpulveggjar. Myndir 4-1 og 4-2 sýna samanburð á raunfærslum prófstykkja og markmiðsfærslu. Tafla 4-2 tekur saman raunfærslur og raunhlutfallsfærslur frá álagsprófi fyrir bæði prófstykki.



Mynd 4-1: Samanburður á raunfærslum FSL-SS og markmiðsfærslum.



Mynd 4-2: Samanburður á raunfærslum FSL-LS og markmiðsfærslum.

Tafla 4-2: Raunverulegar færslur álagsprófa ásamt hlutfallsfærslum fyrir prófstykki FSL-SS og FSL-LS.

Lota	FSL-SS		FSL-LS	
	Færsla [mm]	Hlutfallsfærsla [%]	Færsla [mm]	Hlutfallsfærsla [%]
1	0,7	0,11	0,7	0,10
2	1,2	0,16	1,1	0,14
3	2,2	0,30	2,0	0,27
4	3,7	0,51	3,5	0,48
5	5,3	0,73	6,0	0,83
6	7,4	1,01	9,8	1,35
7	11,8	1,62	17,4	2,38
8	19,7	2,70	26,7	3,66
9	31,7	4,34	40,1	5,49
10	50,7	6,95	58,9	8,07
11	78,7	10,77	85,9	11,77

Myndir 4-1 og 4-2 sýna að bæði prófstykki ná hæstu markmiðsfærslu sem var 77,8 mm í lotu 11. Hins vegar má sjá að bæði prófstykki eru almennt aðeins undir markmiðsfærslu. Í fyrstu lotunum er líkleg skýring að stálbiti sem tekur við álag frá tjakk sé að þéttast betur upp að veggnum og þar að leiðandi minni formbreyting í veggnum sjálfum. Ekki var tekið eftir þessu í álagsprófun og staðsetning tjakks því ekki leiðrétt. Að auki á sér stað svignun á viðspyrnu þegar tjakkur er að þrýsta á prófstykki sem bætist ofan á mismuninn. Það er mikilvægt að áréttast að það var verið að prófa tenginguna en ekki vegginn sjálfan. Þrátt fyrir að í nokkrum lotum var ekki náð markmiðsfærslu þá varð tengingin fyrir reiknuðum og væntum hámarkskrafti sem átti að prófa fyrir.

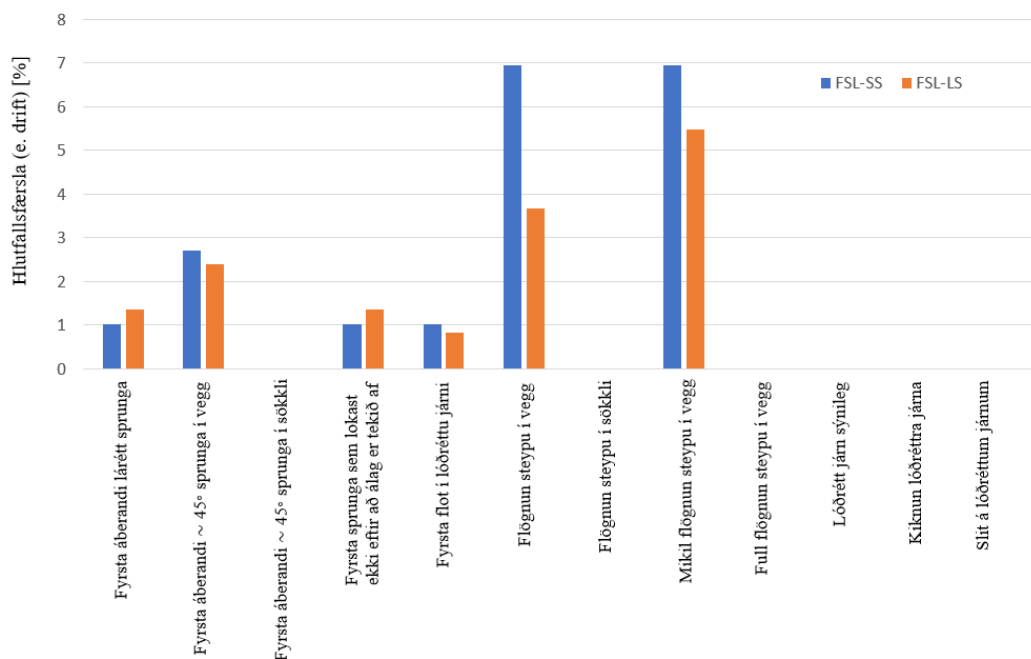
Líkt og áður kom fram missa prófstykki viðnám við gólf og skriða, FSL-SS í lotu 5 og FSL-LS í lotu 4. Myndir 4-1 og 4-2 sýna að leiðrétting á staðsetningu vökvatjakk hefur verið rúmleg þar sem mismunur á raunfærslu og markmiðsfærslu fer minnkandi eftir skriðið og tekur jafnvel fram úr markmiðsfærslu í lotu 11 hjá FSL-SS og lotu 10 hjá FSL-LS.

Tafla 4-3 tekur saman niðurstöður prófana þegar helstu áföngum skemmda var náð, sjá Töflu 4-1 sem lýsir lykilskemmdarstigum. Sömu niðurstöður má sjá myndrænt á stöplariti á Mynd 4-3 þar sem prófstykkin eru borin saman.

Tafla 4-3: Stærstu áfangar skemmda ásamt hlutfallslegri færslu (e.drift) veggja fyrir bæði prófstykki (FSL-SS: prófstykki með stórum steypustyrktarjárnnum & FSL-LS: prófstykki með smáum steypustyrktarjárnnum).

Atburður	Prófstykki FSL-SS		Prófstykki FSL-LS	
	Lota	Hl.færsla (%)	Lota	Hl.færsla (%)
Fyrsta áberandi lárétt sprunga	6	1,01	6	1,35
Fyrsta áberandi ~ 45° sprunga í vegg	8	2,70	7	2,38
Fyrsta áberandi ~ 45° sprunga í sökkli	Á ekki við		Á ekki við	
Fyrsta sprunga sem lokast ekki eftir að álag er tekið af	6	1,01	6	1,35
Fyrsta flot í lóðréttu járn	6	1,01	5	0,83
Flögnun steypu í vegg	10	7,4	8	3,66
Flögnun steypu í sökkli	Á ekki við		Á ekki við	
Mikil flögnun steypu í vegg	10	6,95	9	5,49
Full flögnun steypu í vegg	Á ekki við		Á ekki við	
Lóðrétt járn sýnileg	Á ekki við		Á ekki við	
Kiknun lóðréttra járna	Á ekki við		Á ekki við	
Slit á lóðréttum járnnum	Á ekki við		Á ekki við	

Af Mynd 4-3 má lesa að þróun skemmda í báðum prófstykkjum eru nokkuð svipaðar þó þær fylgi ekki alltaf sömu hlutfallsfærslu. Í upphafi álagsprófana mynduðust aðeins láréttar hárfínar sprungur (sprunga minni en 0,1 mm) við veggenda sem lokuðust um leið og álag var tekið af veggnum. Með vaxandi fjölda lota lengdust sprungur frá veggenda inn að miðjum vegg og nýjar sambærilegar sprungur tóku að myndast á öðrum stöðum veggjar.



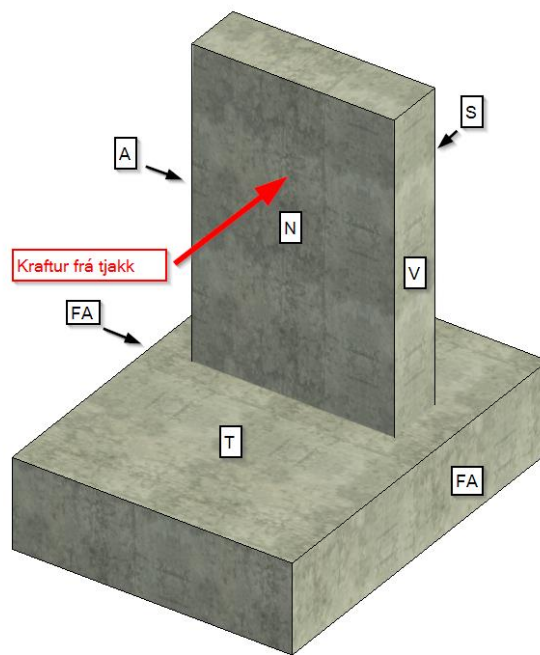
Mynd 4-3: Stöplarit sem sýnir samanburð á hlutfallsfærslu veggja á lykilstigum skemmda.

Fyrsta áberandi sprunga á prófstykki FSL-SS myndaðist í lotu 6 (hlutfallsfærsla 1,01%) og lotu 6 (hlutfallsfærsla 1,35%) á FSL-LS. Fyrsta sprunga sem lokast ekki eftir að álag var tekið af átti sér einnig stað í lotu 6 á bæði FSL-SS og FSL-LS en í lotu 6 eru bæði prófstykki að yfirstíga 1% hlutfallsfærslu. Flögnun á steypu á suðurhlið veggjar, rétt fyrir ofan sökkul hófst í lotu 8 (hlutfallsfærsla 3,66%) á FSL-LS og tók svo að aukast með líðandi lotum. Flögnun á sama stað hófst ekki fyrr en í lotu 10 (hlutfallsfærsla 6,95%) á FSL-SS. Á bæði prófstykki myndaðist lítil 45° sprunga á hlið stöpulveggja þegar þau yfirstígu 2% hlutfallsfærslu, FSL-SS í lotu 8 (2,70% hlutfallsfærsla) og FSL-LS í lotu 7 (2,38% hlutfallsfærsla). Sprungan lá ekki þvert í gegnum vegg líkt og hafði gerst í fyrri rannsóknum Franz og Rúnars á sambærilegu prófstykki. Í seinustu álagslotu voru sprungur rýndar og athugað eftir lóðréttum steypustyrktarjárnnum en þau voru ekki að sjá. Ekkert kambstál slitnaði í álagsprófunum.

Hér fyrir neðan verða bæði prófstykki borin saman með texta og mynd fyrir þrjár mismunandi álagslotur en þær eru lotur 4 (hlutfallsfærsla 0,51% hjá FSL-SS og 0,48% hjá FSL-LS), 8 (hlutfallsfærsla 2,70% hjá FSL-SS og 3,66% hjá FSL-LS) og 11 (hlutfallsfærsla 10,77% hjá FSL-SS og 11,77% hjá FSL-LS). Á myndunum heldur tjakkur við vegg í hámarksstöðu hverrar lotu. Sprungur voru merktar með lituðum tússpenna og afstaða hennar merkt tilheyrandi lotu. Notast verður við eftirfarandi merkingar á prófstykki til þess að rekja skemmdir.

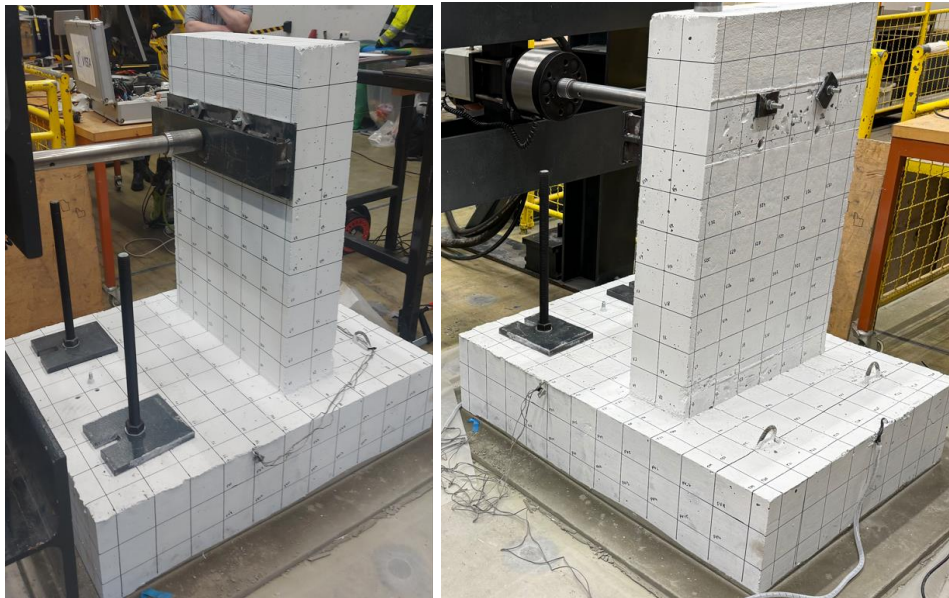
- N** → Norðurhlið (toghlið) veggjar
- S** → Suðurhlið (þrýstihlið) veggjar
- A** → Austurhlið veggjar
- V** → Vesturhlið veggjar
- T** → Efri brún sökkuls
- FV** → Vesturhlið sökkuls
- FA** → Austurhlið sökkuls

Sjá nánar á Mynd 4-4



Mynd 4-4: Merkingar á prófstykkjum fyrir skemmdarrakningu.

Myndir 4-5 og 4-6 sýna bæði prófstykkinn fyrir álagspróf. Lítil munur var á prófstykkjum á prófdag fyrir álagspróf en helst má greina á milli þeirra með hvíta barkanum sem er utan um streitunema á FSL-LS.

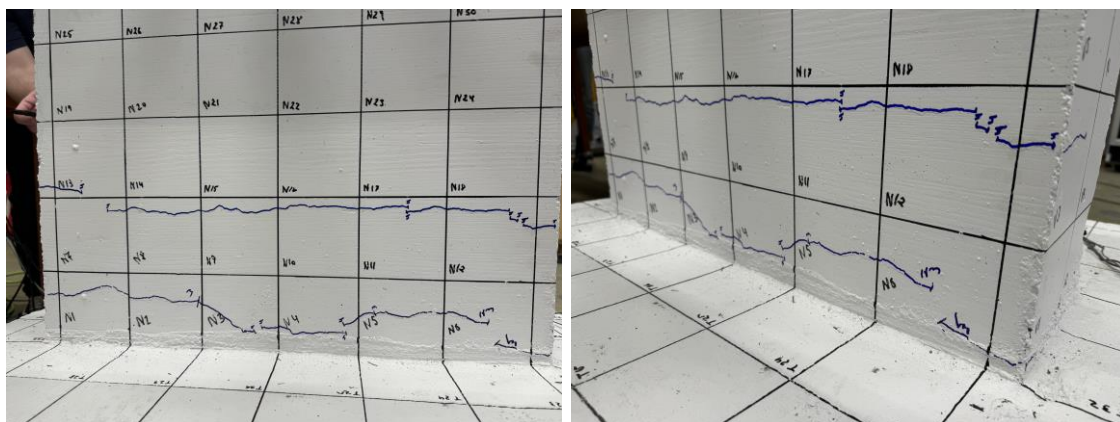


Mynd 4-5: Bakhlið og framhlið prófstykkis FSL-SS fyrir álagsprófun.

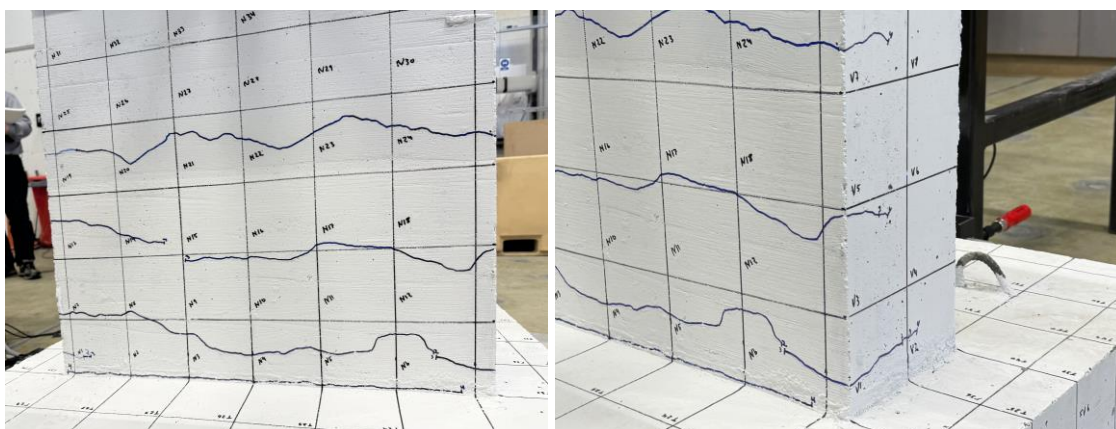


Mynd 4-6: Bakhlið og framhlið prófstykkis FSL-LS fyrir álagsprófun.

Á Myndum 4-7 og 4-8 má sjá bæði prófstykki eftir lotu 4. Aðeins smávægilegar skemmdir voru þá á veggjum. Hárfinar sprungur teygðu úr sér þvert yfir vegginn og inn á veggliðar í lotu 3 á prófstykki FSL-LS en sambærilega sprungur komu í lotu 4 á FSL-SS. Sprungurnar lokuðu sér allar þegar álagið var tekið af. Líkt og myndir gefa til kynna höfðu engar sprungur myndast í sökklum prófstykkja á þessu stigi.

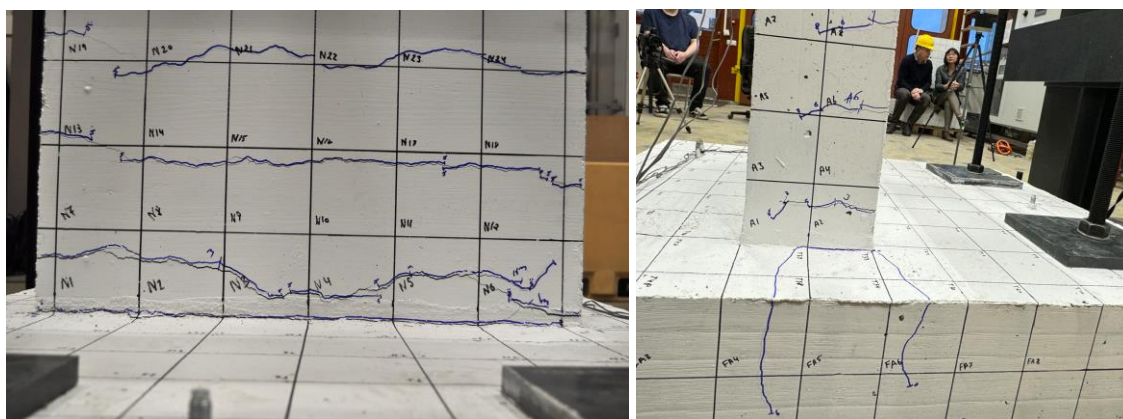


Mynd 4-7: Skemmdir á norður-og vesturhliðhlið prófstykkis FSL-SS eftir 4 álagslotur (hlutfallsfærsla 0,51%).

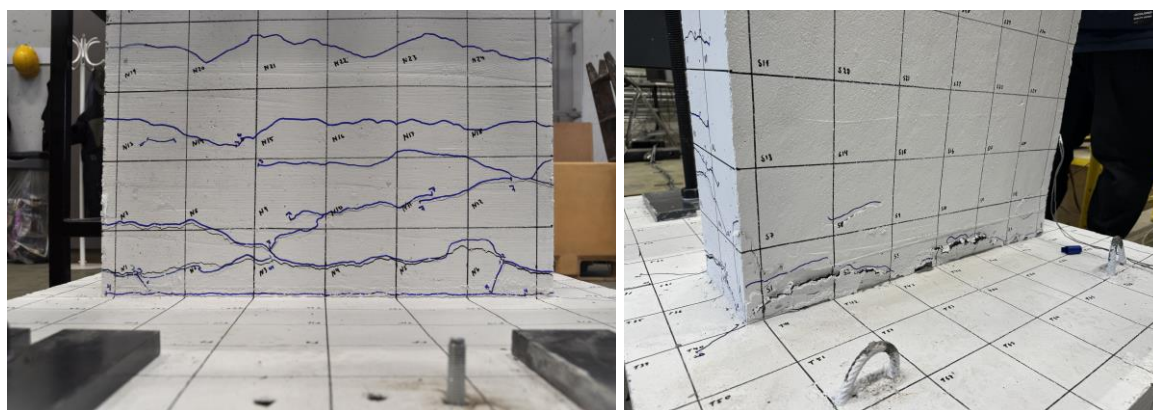


Mynd 4-8 Skemmdir á norður-og vesturhlið prófstykkis FSL-LS eftir 4 álagslotur (hlutfallsfærsla 0,48%).

Eftir 8 álagslotur voru nokkrar hárfínar sprungur búnar að myndast í sökkulfæti. Skemmdir í vegg voru margar orðnar auðsjáanlegar og varanlegar, þá sérstaklega næst sökkulfót á norðurhlið (sjá Myndir 4-9 og 4-10). Flögnun steypu hófst í lotu 8 á prófstykki FSL-LS en ekki voru nein ummerki um flögnun á prófstykki FSL-SS á þeim tímapunkti.

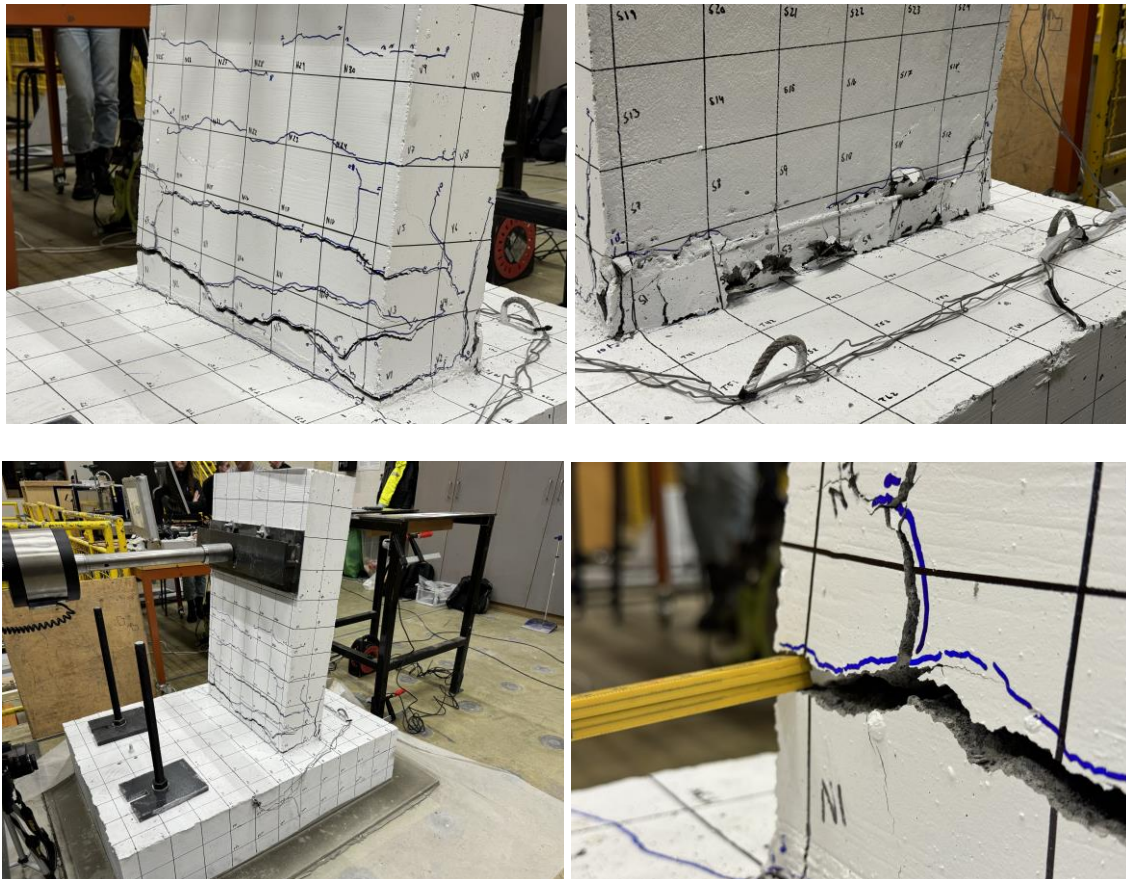


Mynd 4-9 Skemmdir á norður-og austurhlið FSL-SS eftir 8 álagslotur (hlutfallsfærsla 2,70%).

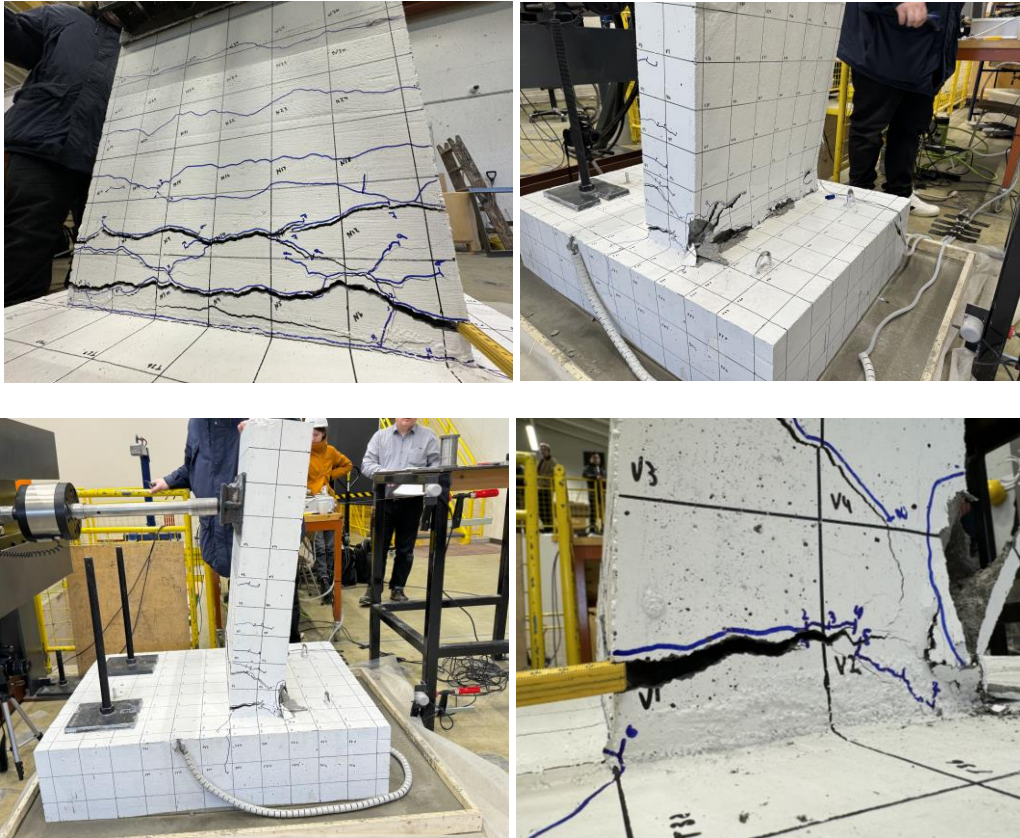


Mynd 4-10: Skemmdir á norður-og suðurhlið FSL-LS eftir 8 álagslotur (hlutfallsfærsla 3,66%).

Á Myndum 4-11 og 4-12 eru bæði prófstykki sýnd að lokum 11 álagslotum. Talsverð flögnun á steypu hefur þá átt sér stað á suðurhlíð beggja veggja og var stærsta sprunguvídd um 1,2cm á báðum prófstykkjum. Ekkert steypustyrktarjárn hafði slitnað eftir lotu 11, né voru þau sjáanleg í sprungum. Varanleg mæld færsla eftir lotuna var um 7cm á báðum prófstykkjum.

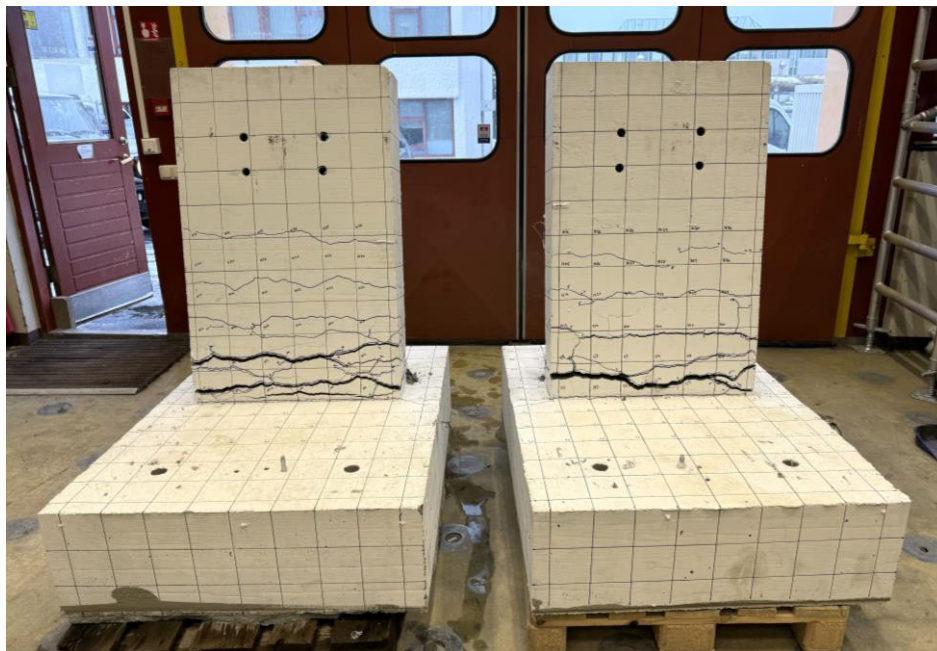


Mynd 4-11: Skemmdir á prófstykki FSL-SS eftir 11 lotur (hlutfallsfærsla 10,77%).

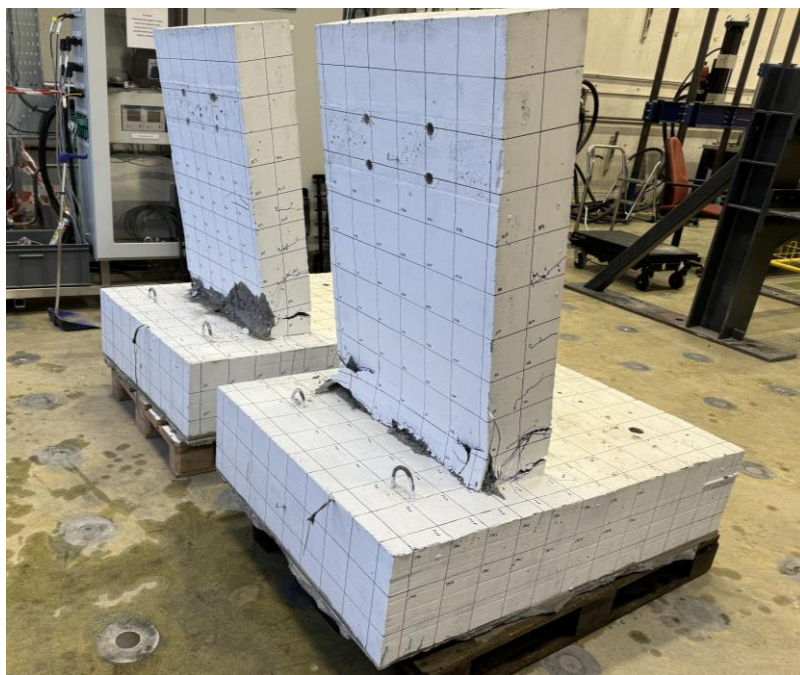


Mynd 4-12: Skemmdir á prófstykki FSL-LS eftir 11 lotur (hlutfallsfærsla 11,77%).

Að lokinni lotu 11 var ákveðið að bæta við 12. lotu til þess að framkalla slit á bendistáli. Instron tjakkur var þá forritaður til að framkalla 120 mm færslu en það var hámarksfærsla tjakksins. Við það slitnuðu þrjú lóðrétt járn í vegg FSL-SS og eitt í FSL-LS. Myndir 4-13 og 4-14 sýna prófstykkinn hlið við hlið eftir prófanir.



Mynd 4-13 Norðurhlið prófstykkja FSL-LS (vinstra megin) og FSL-SS (hægra megin) eftir álagspróf.



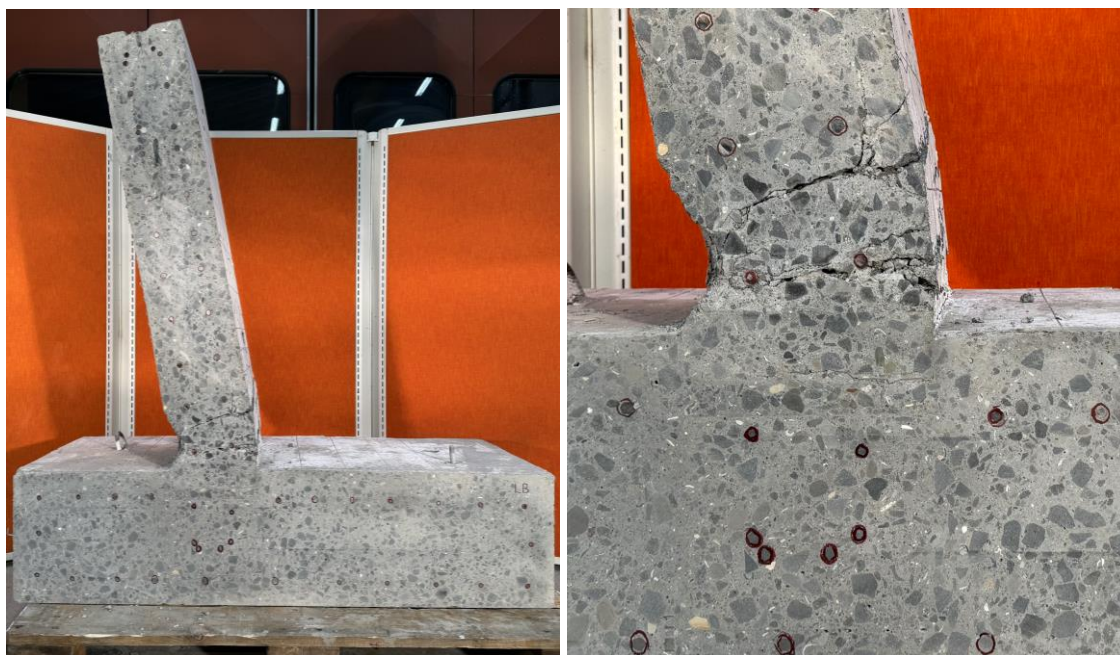
Mynd 4-14: Suð-austurhlið prófstykkja FSL-SS (vinstra megin) og FSL-LS (hægra megin) eftir álagspróf.

4.4 Sögun prófstykkja

Til þess að skoða ástand tengingar enn frekar eftir álagspröfun var ákveðið að saga prófstykkinn í tvennt. Lóðréttur þverskurður var tekinn frá miðjum vegg og niður í gegnum sökkul. Á Myndum 4-15 og 4-16 má sjá þverskurð prófstykkja. Á myndinni sést að bendistál voru merkt með rauðum penna. Nokkur langjárn í sökkli sáust einnig í þverskurði FSL-SS.



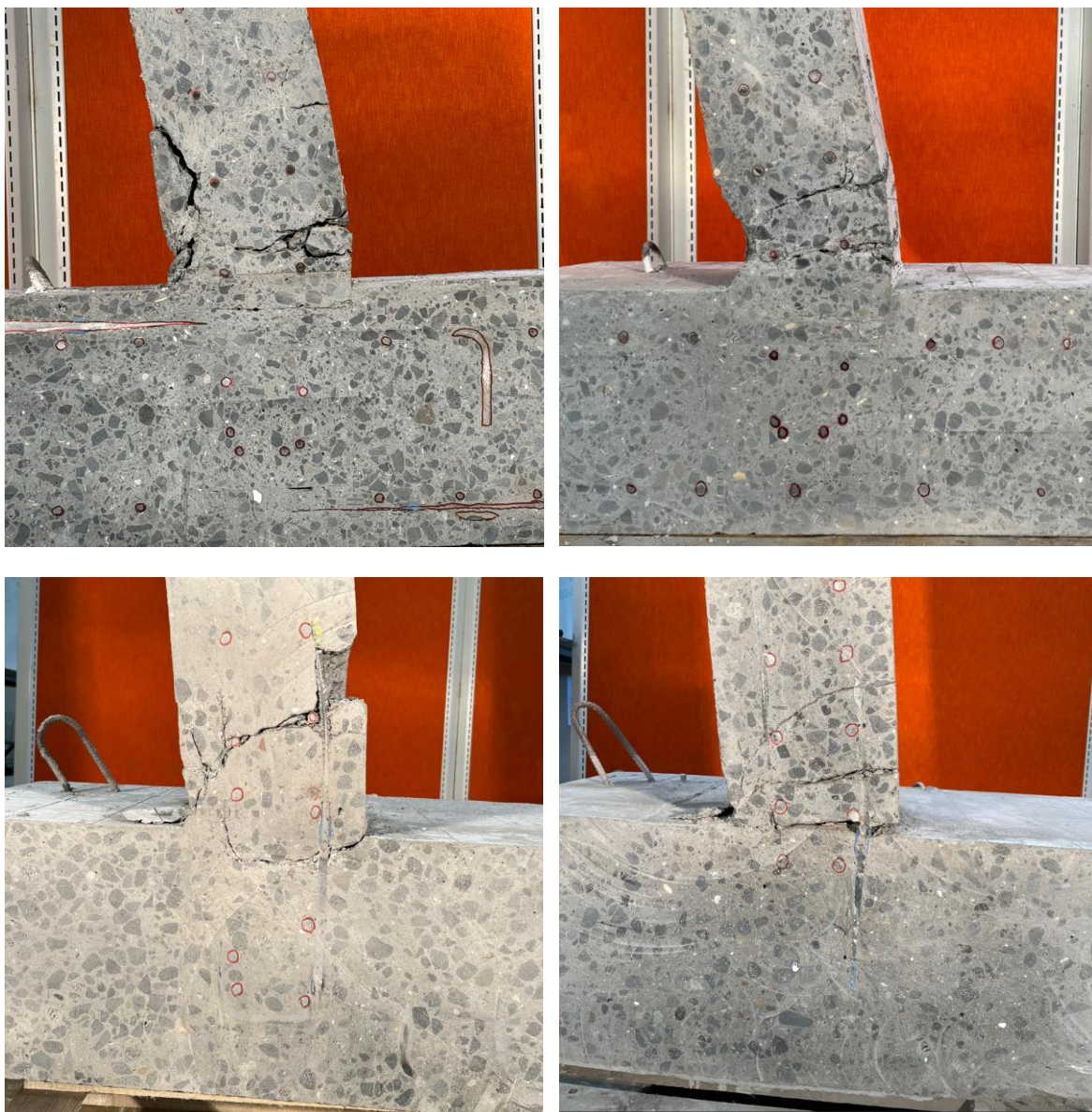
Mynd 4-15: Þverskurður FSL-SS.



Mynd 4-16: Þverskurður FSL-LS. Neðst í vegg má sjá hversu mikið steypan hefur flagnað vinstra megin.

Eftir samanburð má ráða að brotmynd beggja prófstykkja er nokkuð sambærileg. Um er að ræða hreint vægisbrot á báðum veggjum. Ein sprunga virðist ráðandi í prófstykki FSL-SS um 7 cm fyrir ofan sökkul en tvær sprungur í FSL-LS, 4 cm og 12 cm fyrir ofan sökkul. Flögnun steypu var sambærileg á þrýstihlið beggja stöpulveggja. Við skoðun voru engar sjáanlegar skemmdir eða slit í steypuskilum tengingarinnar í sökkli. Jafnframt má sjá á þessum myndum að sökkulsteypan pakkaðist vel umhverfis forsteyptu einingarnar. Mynd 4-15 sýnir einnig að steypan hefur pakkaðist vel umhverfis K16 járníð, í efri grind sökkuls, sem gengur í gegnum 50 mm gat í veggnum.

Til samanburðar eru prófstykki FSL-SS og FSL-LS borin saman við prófstykki Franz Sigurjónssonar (2023) og Rúnars Steins Smárasonar (2022) á Mynd 4-17. Þegar myndir eru bornar saman má sjá betur muninn á hreinu vægisbroti sem prófstykki SSL, FSL-SS og FSL-LS urðu fyrir miðað við FSL sem varð fyrir blönduðu sker- og vægisbroti. Einnig sýnir myndin að minni sprungur mynduðust fyrir neðan sökkul með uppfærðri lausn á FSL-SS og FSL-LS. Meiri formbreytingu og flögnun má sjá á prófstykkjum FSL-SS og FSL-LS vegna lotu 12, aukalota með 120 mm markmiðsfærslu. Prófstykki SSL og FSL voru ekki prófuð fyrir þessari aukalotu.



Mynd 4-17: Nærmynd af þverskurði prófstykkja. FSL-SS (uppi til vinstri), FSL-LS (uppi til hægri), FSL (niðri til vinstri) og SSL (niðri til hægri). Áberandi mikil flögnun prófstykkja FSL-SS og FSL-LS átti sér stað í 12. lotu (aukalotu).

5 Mældar niðurstöður

Í þessum kafla er gerð grein fyrir efniseiginleikum byggingarefna sem voru notuð til að smíða bæði prófstykki. Einnig verður farið yfir melda svörun frá vökvatjakk og streitunemum sem festir voru á járnþendingu prófstykkja.

5.1 Efniseiginleikar

Efnisprófanir voru gerðar bæði á steypu og steypustyrktarjárnnum beggja prófstykkja. Í þessari rannsókn var hönnunarstyrkur steypu C35/45 skv. ÍST EN 206, í bæði stöpulvegg og sökkli, og allt kambstál var B500NC skv. ÍST NS 3576-3. Þrýsti- og kleyfnipróf á steypu voru framkvæmd á tilraunastofu Eflu verkfræðistofu en togþolspróf kampstáls fóru fram á tveimur mismunandi stöðum. Annars vegar voru K6 og K10 steypustyrktarjárn prófuð á rannsóknastofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands og hins vegar voru K16 prófuð hjá Cowi verkfræðistofu. Ástæða þess að K16 járníð var prófað hjá Cowi var að togprófið krafðist öflugri gripa í vökvatjakk en er til staðar við Háskóla Íslands.

5.1.1 Þrýstistyrkur steypu

Þrýstipróf steypusívalninga fóru fram annars vegar á rannsóknarstofu Eflu og hins vegar hjá BM-Vallá. Prófin voru framkvæmd skv. ÍST EN 12390-3 og ÍST EN 12390-4. Í staðli er gerð krafa um að hlutfall milli hæðar (H) og þvermál (d) sívalnings sé $H/d = 2$. Stöðluð stærð sívalnings hefur hæð 300mm og þvermál 150mm. Lágmarkshæð sívalnings er 200 mm með 100 mm þvermál en þá skal margfalda þrýstistyrk sýna með minnkunarstuðli 0,97 (Ljungkrantz o.fl, 1994) Í verkefninu var notast við þessa lágmarkssýnastærð. Prófa skal þrjá sívalninga, 7-28 daga gamla og taka meðaltal af þeim.

Samhliða steypuvinnu voru steypdir 16 sívalningar (8 fyrir hvorn steypudag). Tólf sívalningar voru geymdir hjá BM Vallá í vatnsbaði og voru þeir prófaðir fyrir 28 daga- og 90 daga styrk. Hinir voru geymdir með prófstykkjum við stofuhita.

Þrýstistyrkur steypusívalninga úr þessari rannsókn má sjá í Töflu 5-1. Gildi í töflu eru leiðrétt gildi með minnkunarstuðlinum 0,97. Í töflunni má sjá dálkinn „Dagar“ sem tilgreinir fjölda daga frá því að sívalningur var steypdur og þar til hann var prófaður. Sívalningar voru prófaðir daginn eftir steypu og á prófdag hvers prófstykkis. Nánari upplýsingar um þrýstiprófanir má finna í Viðauka C.

Tafla 5-1: Steypustyrkur sívalninga.

Hluti	Styrkur [MPa]	Dagur	Skýring
Sökkull	64,8	28	28 daga styrkur ¹
	71,7	61	Prófdagur FSL-SS ^{2,3}
	72,3	68	Prófdagur FSL-LS ^{2,3}
	82,5	90	90 daga styrkur ^{1,4}
Veggur	52,4	28	28 daga styrkur ¹
	61,2	62	Prófdagur FSL-SS ^{2,3}
	57,1	69	Prófdagur FSL-LS ^{2,3}
	67,0	90	90 daga styrkur ¹

1. Þrýstipróf framkvæmd í BM-Vallá. Sívalningar geymdir í vatnsbaði.
2. Þrýstipróf framkvæmd á Eflu verkfræðistofu. Sívalningar geymdir í plastpoka og fylgdu prófstykkjum.
3. Aðeins var prófaður einn sívalningur.
4. Tveir sívalningar voru prófaðir.

Hönnunarstyrkur steypu í báðum prófstykkjum var C35/45 og má sjá í töflu 5-1 að styrkur steypu er komin vel yfir þann fyrirskrifaðan styrk eftir 28 daga í bæði stöpulvegg og sökkli. Prófstykki og sívalningar voru geymd við bestu aðstæður og kemur því hár styrkur steypu ekki á óvart. Að auki var einn sívalningur frá seinni steypudegi (steypudagur sökkuls) brotinn daginn eftir steypu og reyndist þrýstistyrkur vera 33,9 MPa.

5.1.2 Togstyrkur steypu

Ákveðið var að gera kleyfnipróf á einum sívalning frá seinni steypudegi. Kleyfnipróf var framkvæmt skv. ÍST EN 12390-6. Togþol steypu má áætla út frá kleyfnistyrk hennar en hlutfall milli kleyfnipols og togþols er um það bil 1 (Ljungkrantz o.fl, 1994). Kleyfnistyrkur steypu, f_{ct} er gefinn með jöfnu 5.1.

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (5.1)$$

Þar sem

P : Þrýstikraftur [N]

D : Þvermál sívalnings [mm]

L : Hæð sívalnings [mm]

Tafla 5-2 sýnir gildi fyrir togþol steypu byggt á kleyfniprófi, sem og aldur sívalnings í dögum við prófun.

Tafla 5-2: Steypustyrkur sívalninga.

Hluti	Togstyrkur [MPa]	Dagur
Sökkull	4,2	156

Sjá má að gildi togstyrks er um 5% af þrýstistyrk steypunnar eftir 90 daga.

5.1.3 Steypustyrktarjárn (kambstál)

Í smíði prófstykkja voru notaðar þrjár stærðir af kambstáli, K6, K10 og K16. Allt stál var B500NC skv. ÍST NS 3576-3. Þar sem gripin utan um kambstálið við Rannsóknarstofu Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands er aðeins gerð fyrir 100kN þurfti að framkvæma togþolspróf á K16 járninu á rannsóknarstofu Cowi. Eitt próf var framkvæmt fyrir hverja járnastærð. Prófað var skv. staðli ISO-15630-1. Framkvæmdin var þannig að járn voru strikuð með penna á 10 mm millibili og eftir prófun var toglinging mæld yfir 10 bil. Vökvatjakkur sem notaður var við togþolspróf skráði jafn óðum kraft, færslu og streitu sýna og var spennan reiknuð út frá kraft og þverskurðarflatarmáli hvers járn. Lengingarnemi var komið fyrir á hvert sýni og var hann virkur upp að flotmörkum. Eftir það var hann tekinn af og treyst á mælda lengdarbreytingu og kraft, frá vökvatjakki, til þess að ákvarða vinnuferil járnanna. Tafla 5-3 sýnir mælda flotspennu, f_y , og brotspennu, f_u og reiknaðan fjaðurstuðul, E_s steypustyrktarjarna. Í töflunni má einnig finna reiknaða lengdarbreytingu járnanna eftir próf.

Tafla 5-3: Niðurstöður úr togþolsprófi. Efniseiginleikar kambstáls.

Steypustyrktarjárn	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E_s [GPa]	Lengdarbreyting [%]
K6	614	653	170	2
K10	524	635	200	10
K16	517	616	198	8

Af Töflu 5-3 má ráða að allt stál uppfyllir kröfur um hönnunarflotstyrk 500 MPa. Hins vegar má sjá að mældur flotstyrkur fyrir K6 kambstál er töluvert hærri en fyrir K10 og K16. Allt fyrirskrifað stál í verkefninu er í stálflokki C samkvæmt Eurocode 2 og krafa um lengdarbreytingu er 7,5% fyrir þvermál 6-14mm og 8% fyrir þvermál 16mm og yfir. Kambstál K10 og K16 uppfylla þessar kröfur en K6 gerir það ekki þar sem lengdarbreytingin reiknast 2%. Rétt er að benda á að K6 kambstál er heitunnið stál eins og K10 og K16. Möguleg ástæða þess að K6 járninu er frábrugðið er að í framleiðslu þess hafi það kólnað mjög hratt í framleiðslu sem var þess valdandi að það er bæði með hærri flotstyrki og minni seiglu (e. ductility).

5.2 Vægi sem fall af hlutfallsfærslu

Vægi í vegg fyrir ofan tengingu (við yfirborð sökkuls) var reiknað fyrir bæði prófstykki með jöfnu (5.2). Mynd 5-1 sýnir myndræna útskýringu á stærðum sem notaðar eru við vægisútreikninga. Hlutfallsfærsla er reiknuð sem lárétt færsla Δ (í hæð H) deilt með hæðinni H .

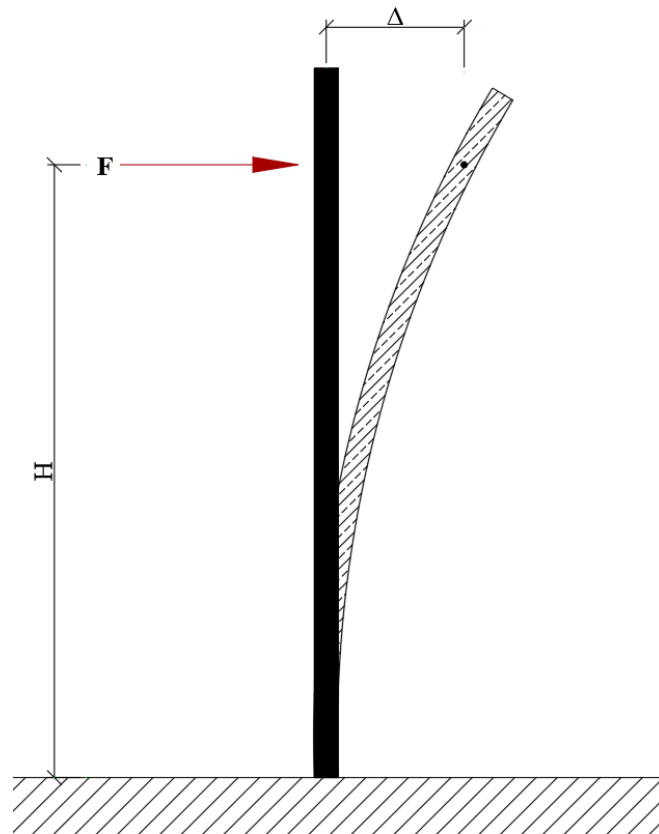
$$M = F \cdot H \quad (5.2)$$

Þar sem

M : Beygjuvægi [kNm]

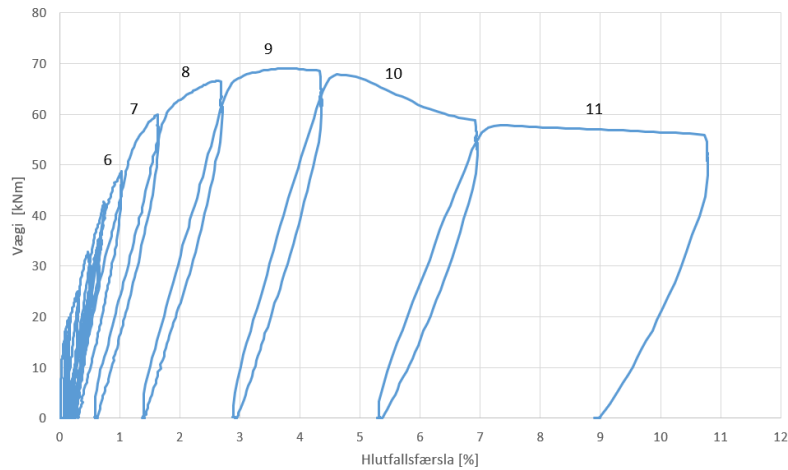
F : Kraftur frá vökvatjakk [kN]

H : Hæð vökvatjaks frá yfirborði sökkuls [m]

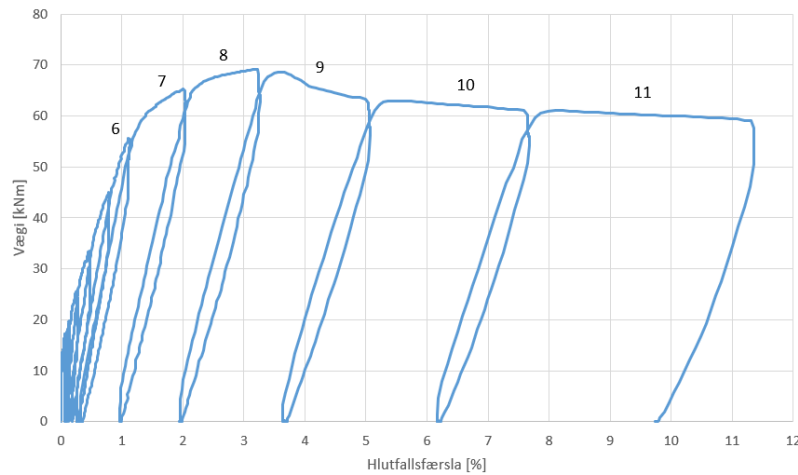


Mynd 5-1: Stærðir notaðar við vægisútreikninga.

Myndir 5-2 og 5-3 sýna vægi sem myndast fyrir ofan tengingu sem fall af hlutfallsfærslu í öllum 11 álagslotunum (sjá einnig Myndir 3-7, 4-1 og 4-2). Hér sést greinilega að hágildi vægis í báðum prófstykkjum er nánast það sama þó svo að það eigi sér stað við lægri hlutfallsfærslu í FSL-SS. Lotur 6 til 11 eru merktar inn á gröf til glöggvunar.



Mynd 5-2: Vægi sem fall af hlutfallsfærslu í prófstykki FSL-SS við álagsprófun.



Mynd 5-3: Vægi sem fall af hlutfallsfærslu í prófstykki FSL-LS við álagsprófun.

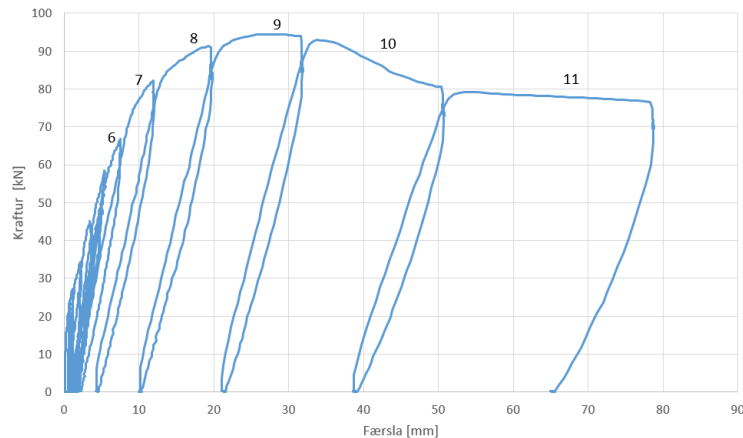
Við það að skoða saman Mynd 5-2 og Mynd 5-3 má sjá að prófstykki FSL-SL er örlítið stífara sem veldur því að kraftur í tjakk rís hraðar upp í byrjun. Munurinn er þó lítill og getur stafað af breytileika í smíðavinnu og uppsetningu við prófstykkja fyrir álagspróf. Hæsta vægi fæst því við minni hlutfallsfærslu, 3,21% en FSL-SS við 3,70%. Tafla 5-4 sýnir hámarksvægi í álagsprófun ásamt tilheyrandi hlutfallsfærslu. Einnig sýnir taflan 80% hámarksvægi en ef prófstykki nær ekki þessu marki, í lotu eftir að hámarksvægi er náð, er talið að um brot sé að ræða og viðkomandi hlutfallsfærsla skráð (Cheok o.fl. 1993). Þess má geta að bæði prófstykki héldu yfir 80% hámarksstyrk út lotu 11. Taflan sýnir að lítill sem engin munur er á hágildum fyrir veggina en FSL-LS þoldi um 0,1% hærri kraft en FSL-SS.

Tafla 5-4: Hámarksvægi ásamt tilheyrandi hlutfallsfærslum.

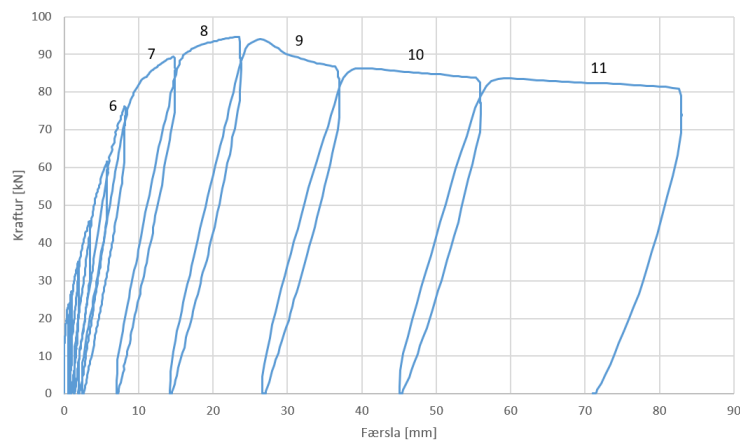
Prófstykki	Hámarksvægi [kNm]	Hlutfallsfærsla [%]	80% af hámarksvægi [kNm]	Hlutfallsfærsla við 80% vægi [%]
FSL-SS	69,1	3,70	55,3	Á ekki við
FSL-LS	69,2	3,21	55,4	Á ekki við

5.3 Kraftur sem fall af færslu

Myndir 5-4 og 5-5 sýna kraft sem fall af færslu. Bæði gröfin sýna nokkuð sambærilega ferla, bæði prófstykki ná svipuðu hágildi (sjá Töflu 5-4) og enda í svipuðu kraftagildi í lotu 11. Hæsti kraftur FSL-SS mældist í lotu 9 en það gerist í lok lotu 8 hjá FSL-LS. Eftir að hágildið næst má sjá að styrkur prófstykkja fer lækkandi þegar steypukápa byrjar að flagna en nær svo ákveðnum stöðugleika eftir um 10-15% lækkun sem helst út lotu 11. Mynd 5-4 sýnir mikla þéttingu í grafi við lotu 5 þar sem að sú lota var tekin fimm sinnum vegna skriðs prófstykkis.



Mynd 5-4: Kraftur sem fall af færslu fyrir FSL-SS í álagsprófun. Lotur 6 til 11 eru merktar inn til glöggvunar.



Mynd 5-5: Kraftur sem fall af færslu fyrir FSL-LS í álagsprófun. Lotur 6 til 11 eru merktar inn til glöggvunar.

Tafla 5-5 tekur saman hámarkskrafta frá álagsprófi ásamt tilheyrandi færslum. Í töflu má einnig sjá 80% af hámarkskraft og við hvaða færslu hann náðist.

Tafla 5-5: Hámarkskraftar í álagsprófi ásamt tilheyrandi færslum.

Prófstykki	Mesti kraftur [kN]	Færsla [mm]	80% af hámarkskraft [kN]	Færsla við 80% kraft [mm]
FSL-SS	94,7	27,0	75,8	Á ekki við
FSL-LS	94,8	23,4	75,8	Á ekki við

5.4 Streitumælingar í kambstáli

Í þessum kafla er fjallað um niðurstöður úr streitumælingum prófstykkja en streitumælum var komið fyrir á járnþvingu sökkuls og stöpulveggjar, sjá nánar í kafla 3.2.

5.4.1 Streitumælar í stöpulvegg

Á Myndum 5-6 og 5-7 má sjá mæld gildi frá streitunemum stöpulveggja. Streitunemum var komið fyrir á lóðréttum K10 járnnum með 150 mm millibili. Einn nemi var festur á járn 150 mm niður í sökkulinn ($y = -150$ mm), annar við sökkulyfirborð ($y = 0$ mm), og sá þriðji 150 mm fyrir ofan sökkulyfirborðið ($y = 150$ mm), sjá staðsetningar á Mynd 3-5 og Mynd 3-6. Hver ferill sýnir mælt hágildi streitu allra veggstreitunema fyrir hverja álagslotu. Miðjugildin á grafinu sýnir streitu við samskeyti sökkuls og veggjar, þar að leiðandi sýna hin gildin streitu 150 mm fyrir ofan og neðan sökkul. Líkt og fram kom í undirkafla 3.2 skemmdist efsti veggnermi (staðsettur 150mm fyrir ofan sökkul) í prófstykki FSL-LS við smíði og kemur það því ekki fram á grafi. Á grafinu má einnig sjá lóðréttu línu sem afmarkar flotstreitu steypustyrktarjárns. Flotstreita er fengin með jöfnu úr EC2:

$$\varepsilon_y = \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot E_s} \quad (5.3)$$

Þar sem

ε_y : Flotstreita stáls.

f_{yk} : Flotstyrkur stáls úr togprófi, 524 MPa.

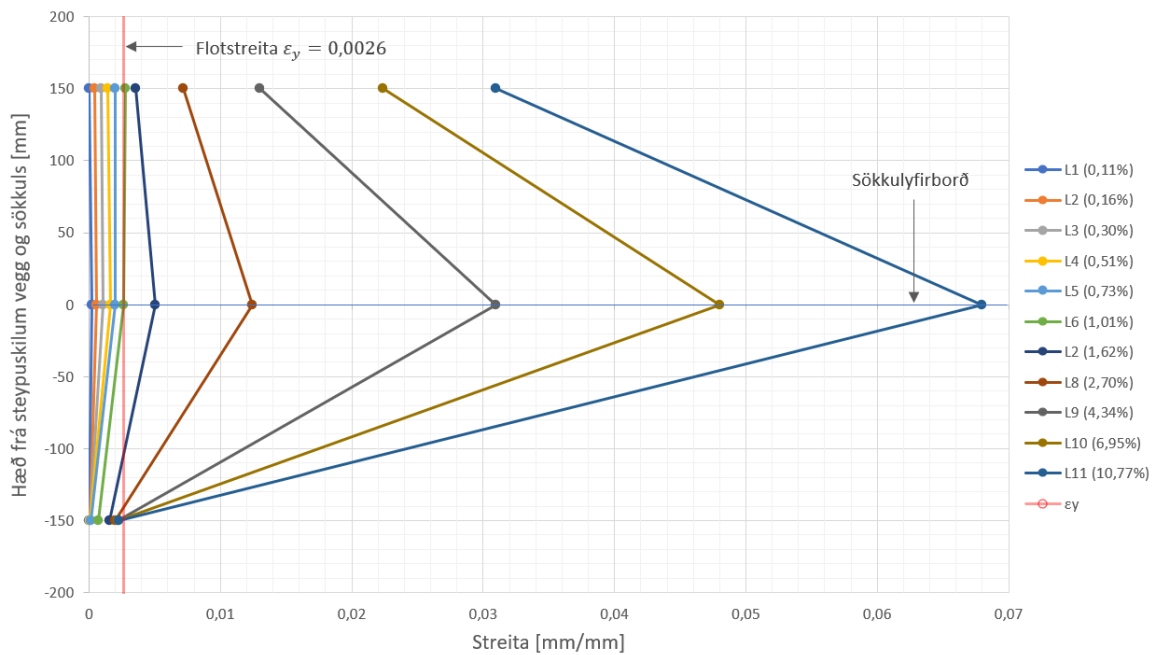
γ_s : Öryggisstuðull stáls, almennt 1.15, verður 1.0 hér.

E_s : Fjaðurstuðull stáls, tekið sem 200 GPa.

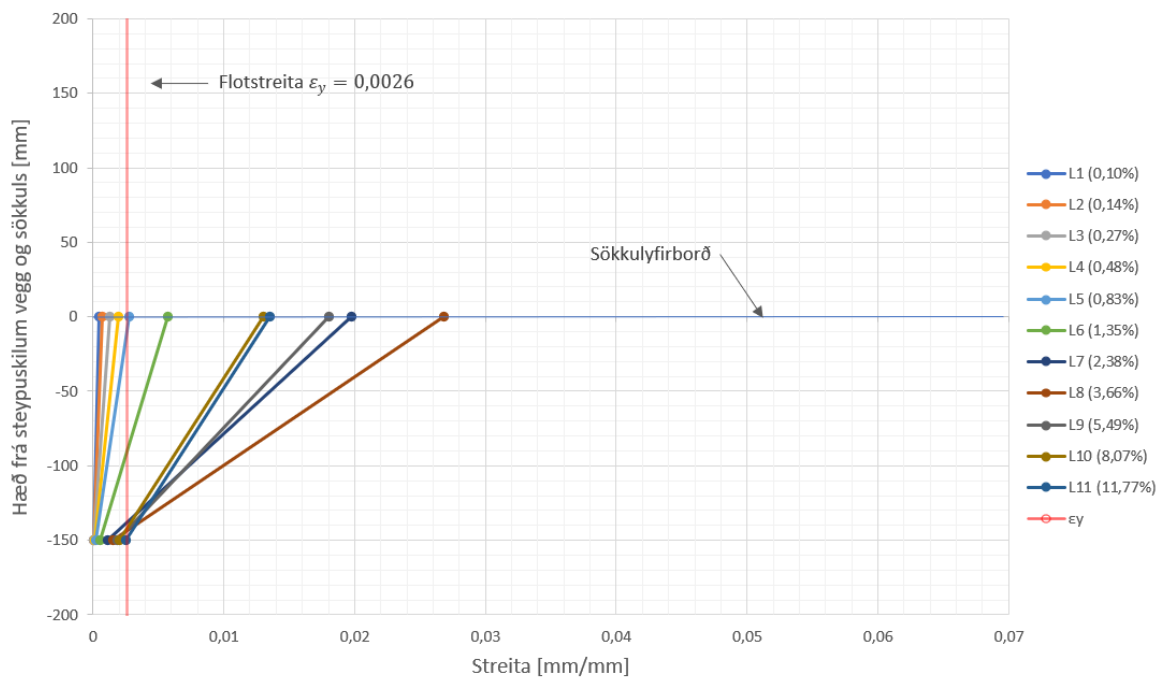
Úr jöfnu (5.3) fæst flotstreitan sem:

$$\varepsilon_y = \frac{524 \text{ MPa}}{1,0 \cdot 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}} = 0,0026 \quad \text{Fyrir K10}$$

$$\varepsilon_y = \frac{517 \text{ MPa}}{1,0 \cdot 198 \cdot 10^3 \text{ MPa}} = 0,0026 \quad \text{Fyrir K16}$$



Mynd 5-6: Streitugildi í vegg FSL-SS.



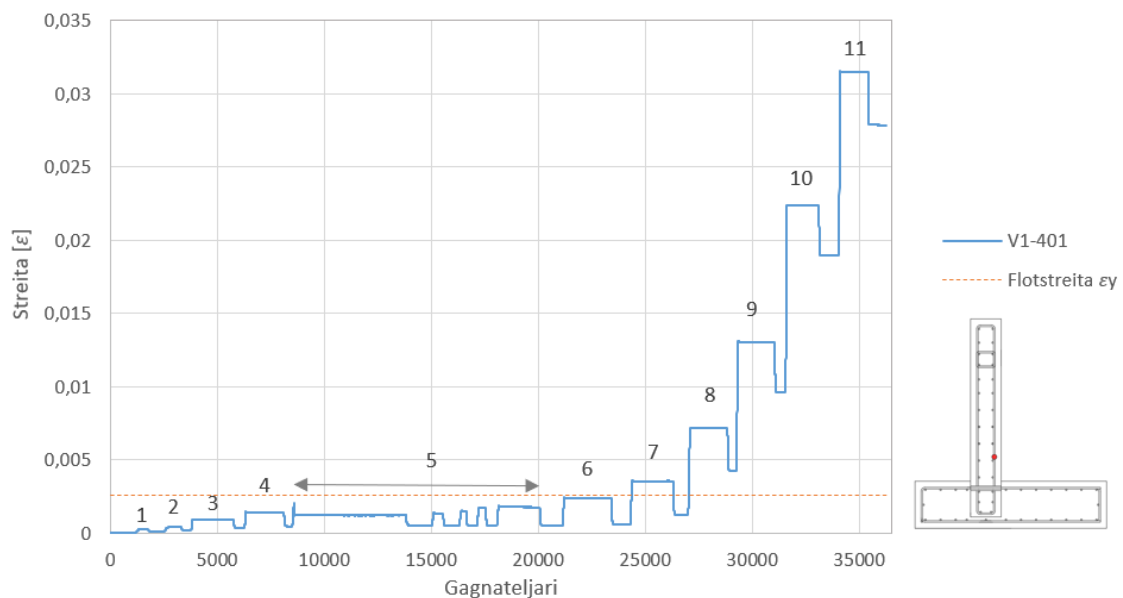
Mynd 5-7: Streitugildi í vegg FSL-LS.

Almennt fást stærstu mældu streitur við sökkulyfirborð en það er staðsetning mesta vægis og ólínulegra formbreytinga í álagsprófunum. Á Mynd 5-6 má sjá að mældar streitur við sökkulyfirborð í FSL-SS jókst með reglulegu millibili þangað til í lotu 6, en streita mælist þá við flotstreitu K10 járnins. Mikið streitustökk er milli lota 6 og 7, sama tíma og streitan skreið yfir flotmörk.

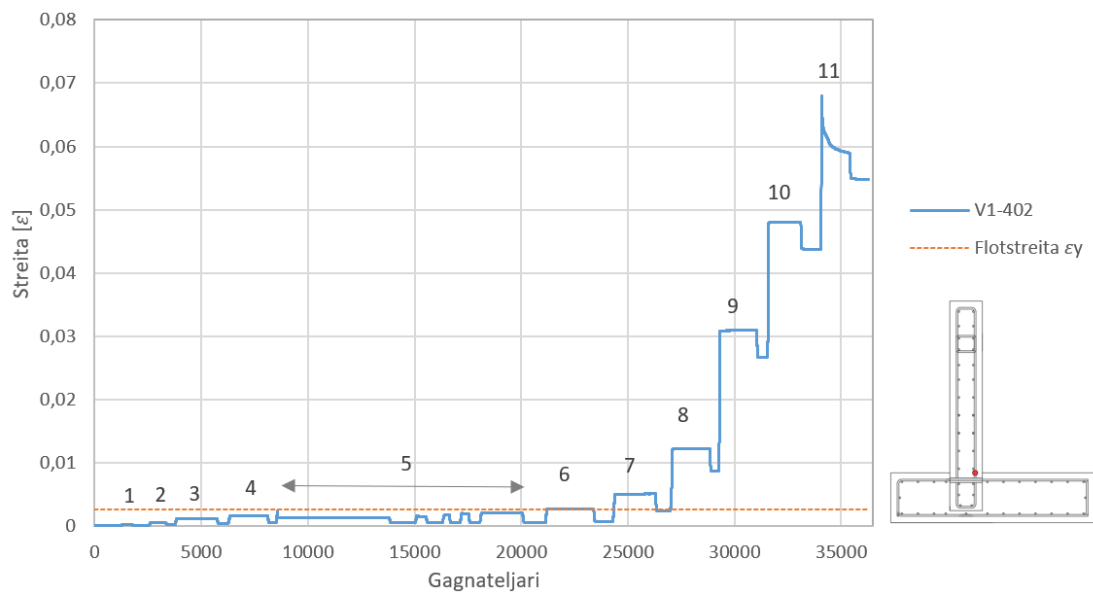
Í FSL-SS mynduðust láréttar sprungur í vegg 3 cm og 18 cm fyrir ofan sökkulyfirborð. Við það fer vegginn sem staðsettur er 150 mm fyrir ofan sökkulyfirborð að mæla streitur yfir flotstreitu. Mældar streitur þar eru þó minni en sem mælast við sökkulyfirborð. Í báðum prófstykkjum mælast streitur 150 mm fyrir neðan sökkulyfirborð undir flotstreitu. Það gefur til kynna að langjárníð hefur ekki náð fullri festu sem undirstrikar mikilvægi þess að vera með U-járn í veggnum. Þessi niðurstaða stangast á við rannsóknir Franz Sigurjónssonar (2023). Niðurstöður hans gáfu til kynna að K10 járnin væri búin að ná fullri festu 150 mm niður í sökkulinn. Það skal bent á það að hámarksvægi í þessari rannsókn var hærra en hjá Franz þar sem lóðréttu lykkjujárnin inn í járnagrind stöpulveggsins gengu alla leið niður í sökkulinn og þar með má ganga út frá að vægismótstaða FSL-SS og FSL-LS sé hærri. Þetta gæti skýrt mun á mældum streitum í þessari rannsókn og í rannsókn Franz.

Á Mynd 5-7 má sjá streitu í FSL-LS vaxa með reglulegu millibili þangað til í lotu 5. Svipað streitustökk má sjá milli lotu 5 og 6 en þá fer járníð yfir flotmörk. Streitustökk í báðum prófstykkjum eiga sér stað þegar veggur yfirstígur 1% hlutfallsfærslu. Hjá FSL-LS gengur ferill í lotu 9 (hlutfallsfærsla 5,49%) aftur, en ástæðan er talin tvíþætt, annars vegar vegna flögnunar sem átti sér stað í lotu 8 sem veldur minni mótstöðukraft og þar að leiðandi minni streitu og hins vegar vegna láréttar sprungumyndunar þvert yfir vegginn sem átti sér stað 5 cm og 13 cm fyrir ofan sökkul, en þar opnuðust sprungurnar og streita járna losnaði einnig út þar.

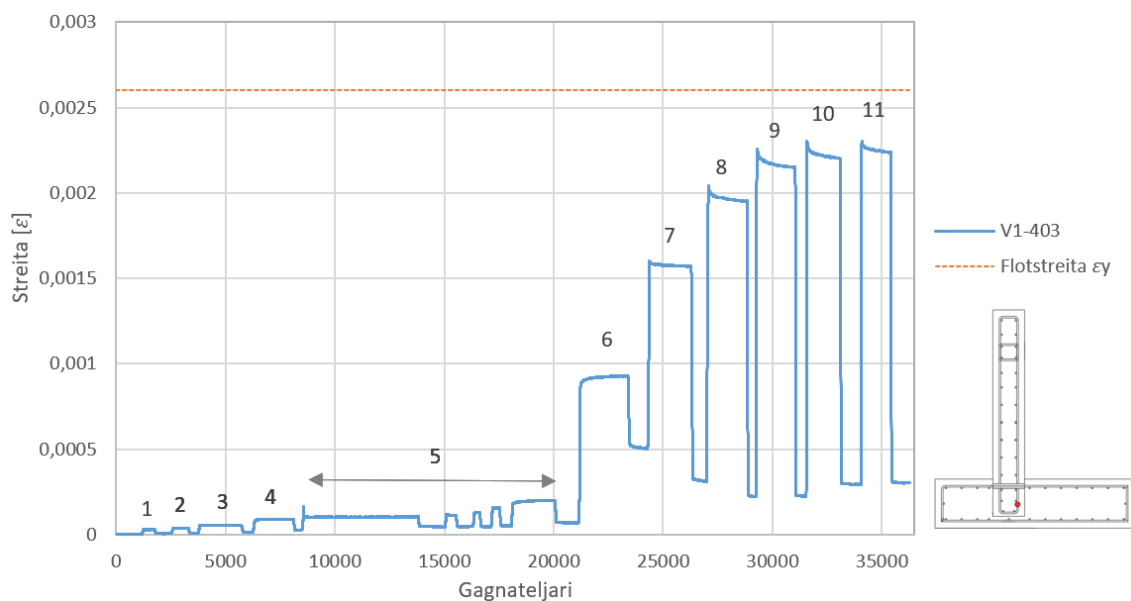
Til nánari glöggvunar eru mældar streitur í vegg sýndar fyrir prófstykki FSL-SS á Mynd 5-8 til 5-10 sem „tímaraðir“ (fall af skráðum gildum). Sprungurnar samsvara því háum streitugildum í nemum V1-403 og V1-402. Í lotu 11 verður fall í streitugildum en líklegt er að frekari flögnun á suðurhlíð veggjar hafi ýtt undir það.



Mynd 5-8: Streitugildi í vegg FSL-SS, nemi V1-401. Streitunemi staðsettur 150 mm ofan við sökkulyfirborð.

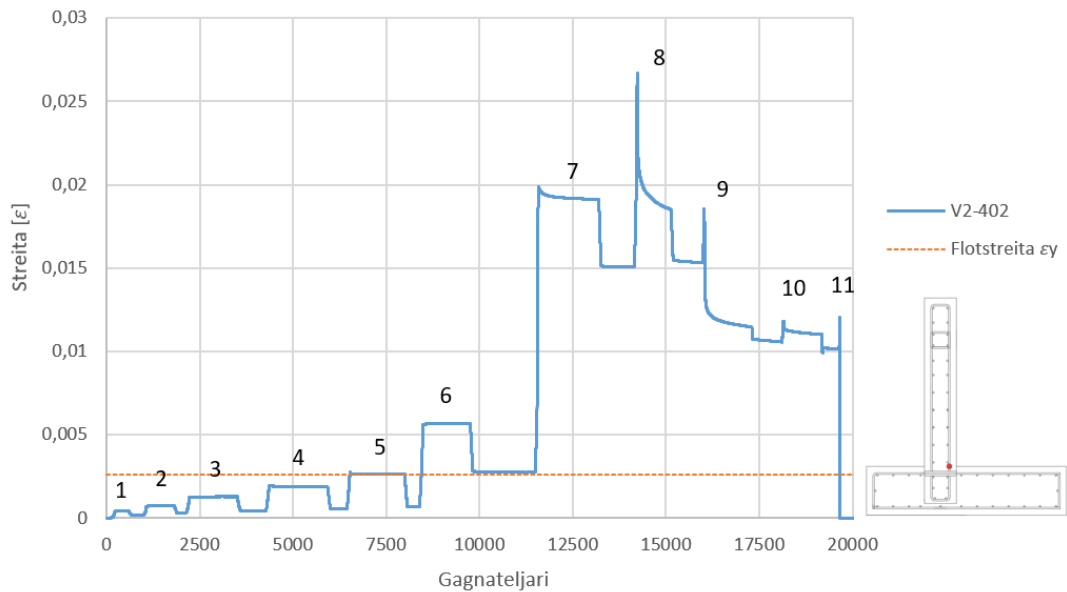


Mynd 5-9: Streitugildi í vegg FSL-SS, nemi V1-402. Streitunemi staðsettur við sökkulyfirborð.

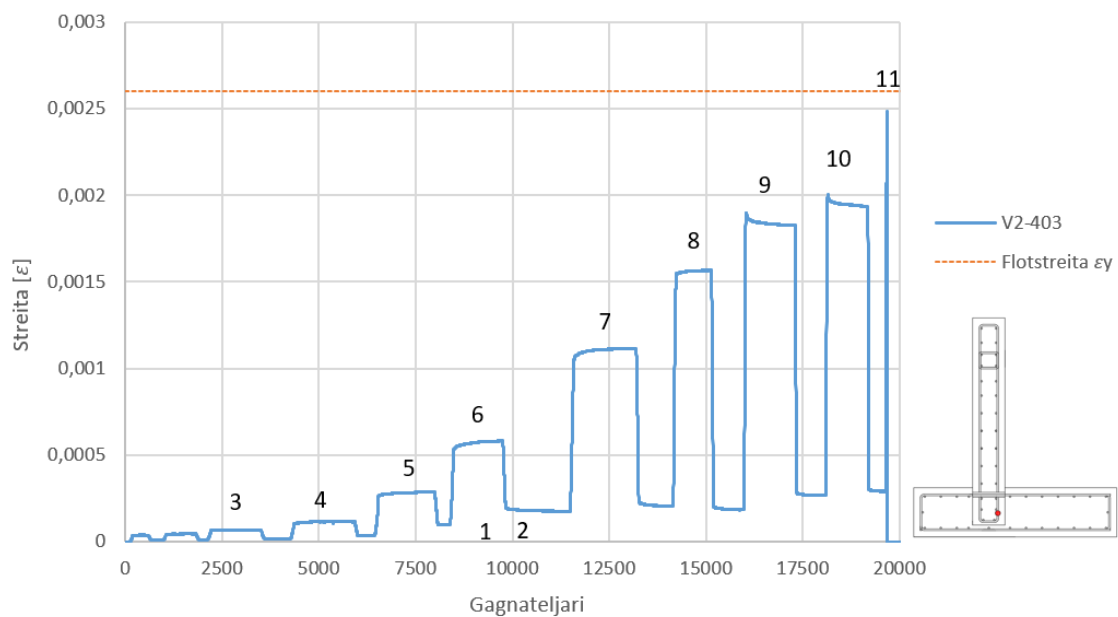


Mynd 5-10: Streitugildi í vegg FSL-SS, nemi V1-403. Streitunemi staðsettur 150 mm neðan við sökkulyfirborð.

Myndir 5-11 og 5-12 sýna streitugildi í veggnum FSL-LS. Streitugildi í nema V1-403 og V2-403 halda nokkuð reglulegri hækkun en streitan fer þó aldrei yfir flotmörk. Lítið var um sprungur í sökkli prófstykkja svo ekki var búist við háum gildum frá nemum neðan steypuskila. Graf fyrir streitunema V2-402 sýnir greinilega að streita við steypuskil nær hágildi í lotu 8 og fer síðan minnkandi eftir því sem sprungur ofar í vegg opnast meira. Báðir streitunemar í vegg FSL-LS missa samband við hugbúnað í lotu 11.



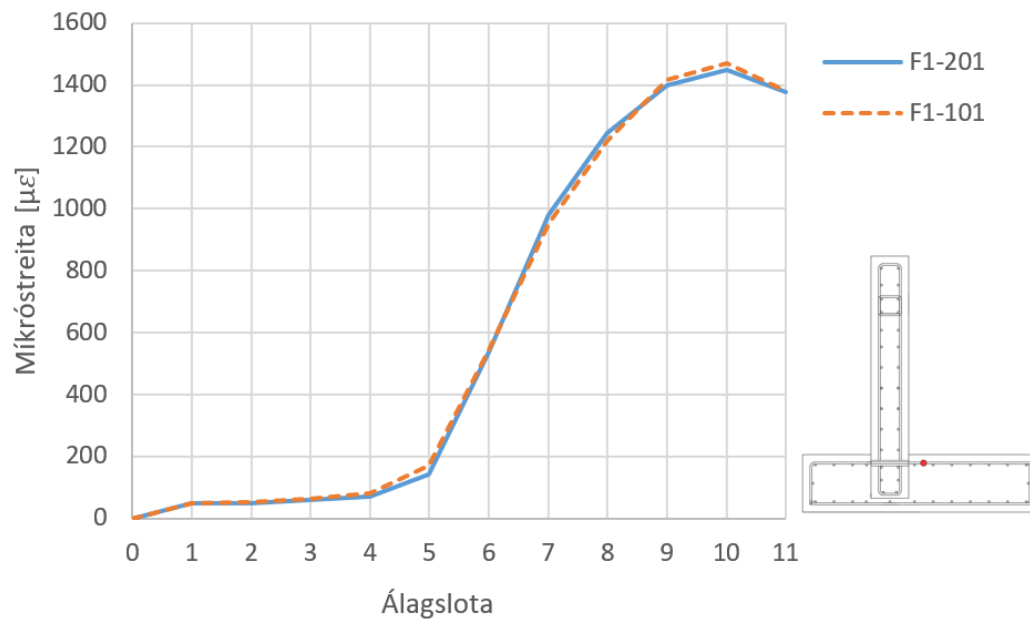
Mynd 5-11: Streitugildi í vegg FSL-LS, nemi V2-402. Streitunemi staðsettur við sökkulyfirborð.



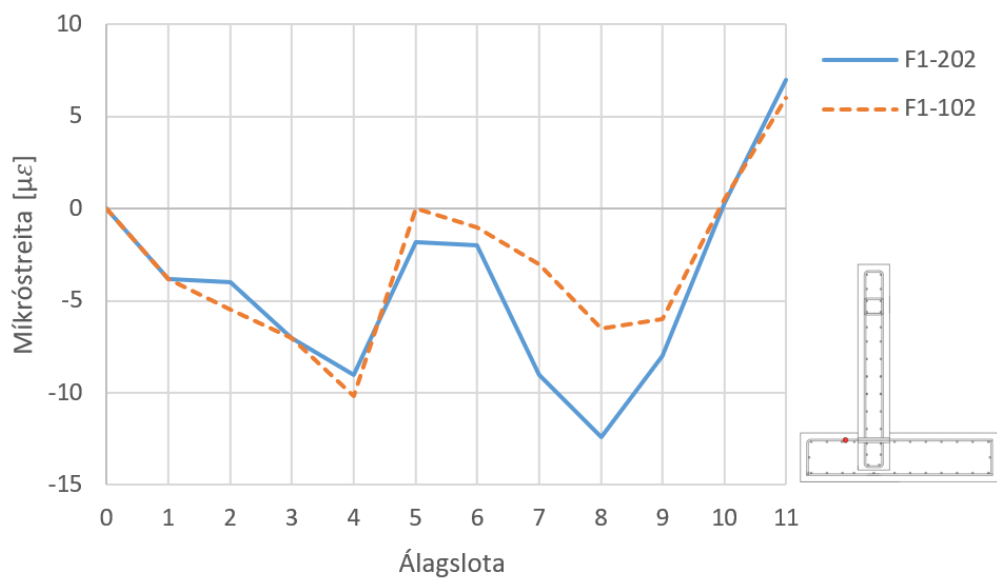
Mynd 5-12: Streitugildi í vegg FSL-LS, nemi V2-403. Streitunemi staðsettur 150 mm neðan við sökkulyfirborð.

5.4.2 Streitunemar í sökkulfót

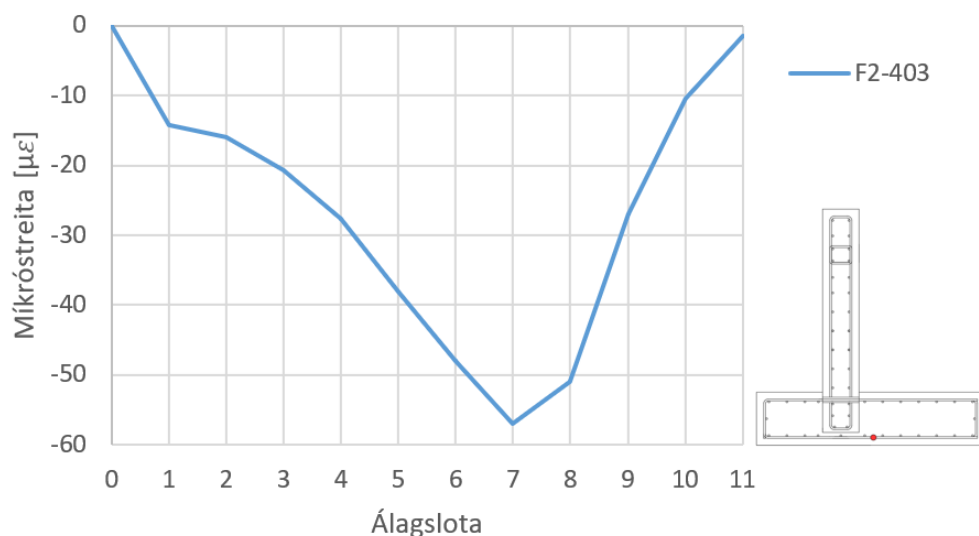
Myndir 5-13 til 5-18 sýna streitugildi frá þeim fimm streitunemum sem komið var fyrir í sökkli hvers prófstykkis. Myndirnar sýna hágildi streitu fyrir hverja álagslotu en öll streitugildi hvers nema má finna í Viðauka E. Á gröfum eru þöruð saman gildi frá nemum sem voru hlið við hlið. Til dæmis eru paraðir nemar F1-101 og F1-201 á prófstykki FSL-SS sem eru nemar á norðurhlið í efri brún sökkuls á K16 járnnum nr. 1 og 2 frá austurhlið. Þar sem mældar streitur í sökklum voru talsvert minni en í stöpulveggjum er streitan gefin upp sem míkróstreita ($\mu\epsilon$) á gröfunum.



Mynd 5-13: Streitugildi í nemum F1-201 og F1-101 í prófstykki FSL-SS fyrir hverja álagslotu. Flotstreitumörk eru 2600 $\mu\epsilon$.



Mynd 5-14: Streitugildi í nemum F1-202 og F1-102 í prófstykki FSL-SS fyrir hverja álagslotu. Flotstreitumörk eru 2600 $\mu\epsilon$.

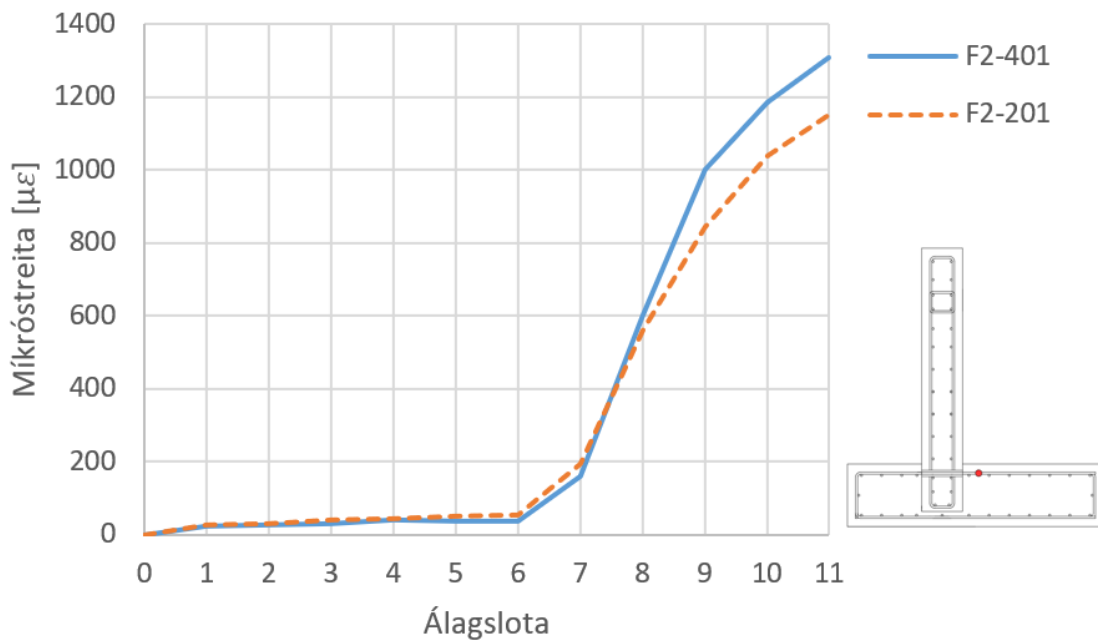


Mynd 5-15: Streitugildi í nema F1-403 í prófstykki FSL-SS fyrir hverja álagslotu. Flotstreitumörk eru $2600\mu\epsilon$.

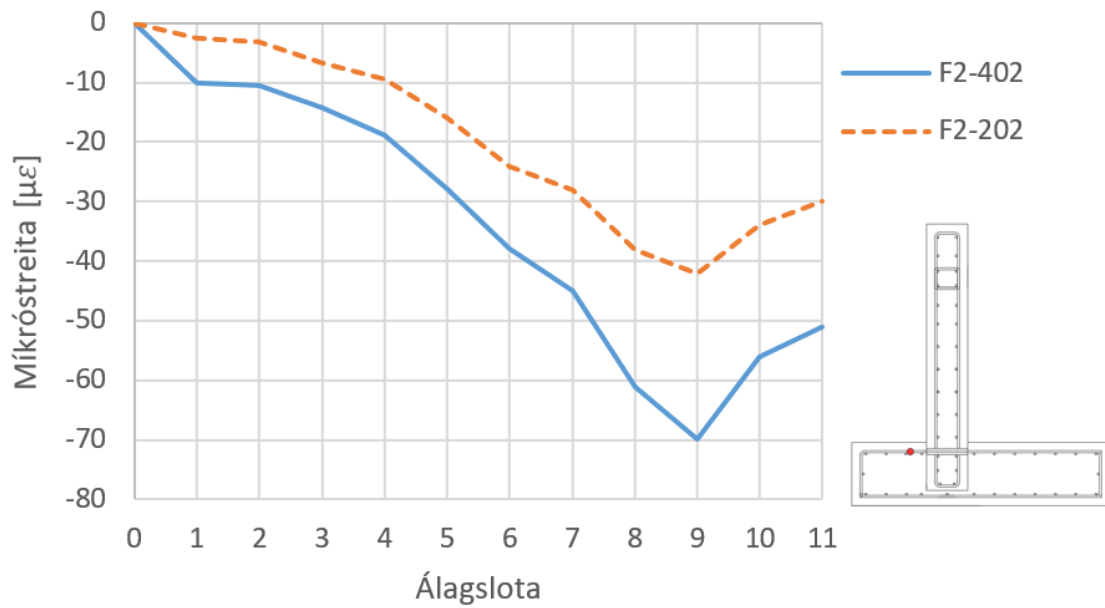
Í sökkul prófstykkis FSL-SS mælist hæsta streita í K16 járnum í eftir grind sökkulsins enda verða þau fyrir mestu togárauninni þegar ýtt er á stöpulvegginn. Þetta er sýnt á Mynd 5-13 og eru nemarnir staðsettir 75 mm bakvið vegg. Streita járna fer með jöfnu móti af stað en byrjar að taka stökk í lotu 5 en á þessum tímapunkti er mæld streita í lóðréttu jární veggisins við sökkulyfirborð að byrja að fljóta. Mesta streita í efri grindinni mælist í lotu 10 og er þá um $1470\mu\epsilon$, sem samsvarar því að spennan í járnunum hafi verið rétt rúmlega $0,5f_y$. Mæld streita í járninu er hærri en sprungumyndunarstreita (ϵ_{crack}) í steypu sem er um $150\mu\epsilon$. Í álagsprófi FSL-SS var tekið eftir hárfinni sprungu eftir lotu 6 (hlutfallsfærsla 1,01%) sem gekk frá vegg og niður með sökkli. Streita mælist svo minni í lotu 11 sem var síðasta lotan. Ef skoðuð er Mynd 5-4 þar sem kraftur frá tjakk er sýndur sem fall af færslu má sjá að mótstöðukraftur prófstykkis lækkar hlutfallslega mest í lotu 10 sem skýrir lækkun streitu í lotu 11.

Myndir 5-14 og 5-15 sýna streitugildi járna í efri og neðri grind sökkulsins sem urðu fyrir þrýstingsáraun og má þar að leiðandi sjá neikvæð gildi streitu frá þeim járnum. Streiturnar eru litlar eða um $0,02\epsilon_y$ af flotstreitu stálsins. Þá er streita járna á sambærilegum stöðum mjög lík í vexti út allar álagsloturnar. Hærri streitutoppar náðust þó stundum á þeim járnum sem voru nær miðju til dæmis eins og á Mynd 4-14 en þar virðist járn í miðjum vegg (nemi F1-202) taka við meiri þrýsting en járníð við endann (nemi F1-102). Það getur gefið til kynna að álagsbitinn sé ekki að dreifa punktalaginu frá vökvatjakknum jafnt yfir vegginn. Ástæðan fyrir því er að tjakkur ýtir á mitt prófstykkið og þar að leiðandi kraftaleið auðveldust inn að miðju.

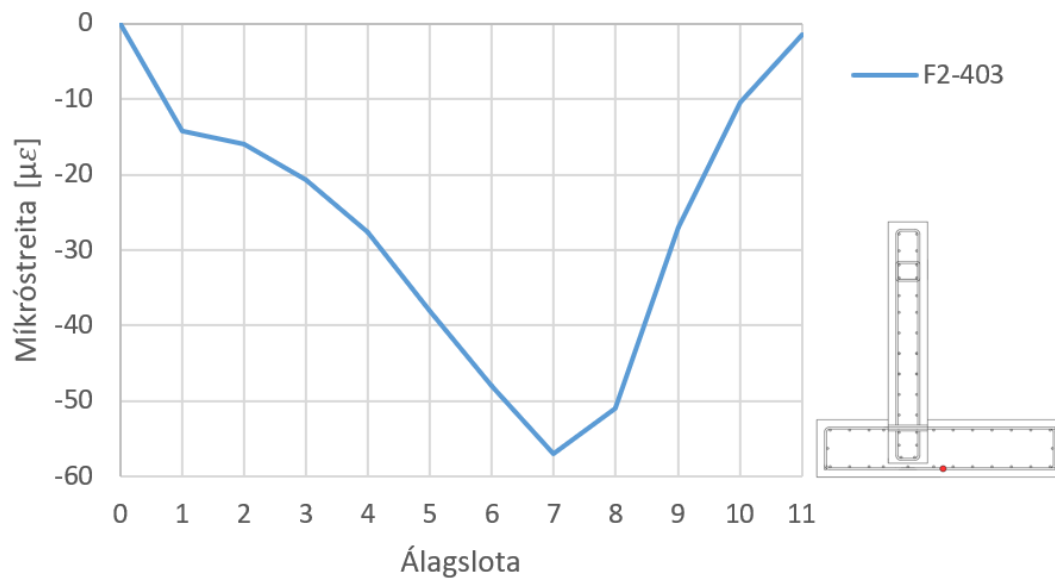
Mældar streitur í Prófstykki FSL-LS eru sýndar á Myndum 5-16 til 5-18. Sama tilhneiging er í streitumælingum í þessu prófstykki eins og í FSL-SS. Sökkulnemar staðsettir bakvið við vegg í sökkli mældu hæstu streiturnar og voru þær um $1300\mu\epsilon$. Spennurnar voru því aðeins undir $0,5f_y$. Í þessu prófstykki voru 7 K10 járn í efri grind sökkulsins. Að sama skapi mældust litlar streitur í streitumælum sem voru staðsettir annars vegar í efri grind sökkuls framan við vegg og í nemum staðsettum aftan vegg í niðri grind sökkuls hins vegar.



Mynd 5-16: Streitugildi í nemum F1-401 og F1-201 í prófstykki FSL-LS fyrir hverja álagslota. Flotstreitumörk eru 2600 $\mu\epsilon$.



Mynd 5-17: Streitugildi í nemum F1-402 og F1-202 í prófstykki FSL-LS fyrir hverja álagslota. Flotstreitumörk eru 2600 $\mu\epsilon$.



Mynd 5-18: Streitugildi í nema F1-403 í prófstykki FSL-LS fyrir hverja álagslotu. Flotstreitumörk eru $2600\mu\epsilon$.

Þegar streituferlar fyrir sökkla eru skoðaðir má draga þá ályktun að ekkert járn í sökkli hafi yfirstigið fjaðursvið sitt, en það gerist við um $2600\mu\epsilon$ fyrir bæði K10 og K 16 járnin.

6 Greining á mældum niðurstöðum

Í þessum kafla er gerð greining á mældum niðurstöðum úr prófunum og þau borin saman við niðurstöður úr reiknuðum gildum. Mesta vægisáraun sem fékkst í álagsprófunum er táknuð sem M_{Max} og mesta skeráraun er táknuð V_{Max} . Hönnunarlíkingar eru sóttar m.a. í Eurocode 2 til að meta vægi og sker í bæði stöpulvegg og í sökkli. Í þessum kafla eru niðurstöður hönnunarlíkinga kynntar sem M_R og V_R vegna þess að mældir efniseiginleikar steypu og stáls eru notaðir (sjá niðurstöður efnistilrauna í undirkafla 5.1) og efnisstuðlar settir sem 1,0 (í hönnun eru þeir $\gamma_s=1,15$ fyrir stál og $\gamma_c=1,5$ fyrir steypu). Áraun á sökkulinn er metin út frá því að skoða veltu prófstykkja. Til samanburðar er einnig kynntur reiknaður hönnunarstyrkur fyrir vægi og sker reiknaður og er táknað með V_{Rd} og M_{Rd} , þar sem notast er við efnisstuðla og fyrirskrifaðann efnisstyrk. Í lok kaflans verða prófstykkinn borin saman með tilliti til normaliseraðs vægis sem fall af hlutfallsfærslu og orkulosunar.

6.1 Vægisburðargeta veggjar

Almennt er hægt að reikna vægisþol veggjar samkvæmt EC2, kafla 3.1.7. (3) og 3.2.7. með jöfnunni:

$$M_R = A_s \cdot f_{yd} \left(d - \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot x_{ULS} \right) \quad (6.1)$$

Þar sem

M_R : Vægisburðargeta [kNm].

A_s : Þversniðsflatarmál togjárna [mm^2].

f_{yd} : Flotspenna steypustyrktarjárna [MPa]

λ : Fasti tengdur virku þrýstisvæði steypu.

x_{ULS} : Núllína þversniðs í brotmarkástandi [mm].

Þar sem veggurinn var með tvöfalda járnagrind var vægisþolið reiknað eins og þrýstibentur biti. Útreikningar fyrir vægisþol má finna í Viðauka F.

Tafla 6-1 sýnir reiknaða vægisáraun og vægisburðargetu stöpulveggja fyrir bæði prófstykki. Vægisáraunin var reiknuð með því að taka hæsta melda kraft frá vökvatjakki og margfalda hann með hæðinni milli sökkulyfirborðs og þar sem tjakkurinn ýtti á prófstykkið. Bæði prófstykki urðu fyrir hreinu vægisbroti.

Í Töflu 6-1 má sjá að raunvægisgeta er um 38% hærri en reiknað vægisþol samkvæmt Eurocode 2 (án efnisstuðla og með mældum efnisstyrk) í báðum prófstykkjum sem gerir ekki ráð fyrir styrk umfram flotstyrk stálsins. Til þess skoða þennan mun frekar var gerð vægi-krappa greining á þversniðinu í OpenSees til að ákvarða plastískan styrk þversniðsins, merkt M_{po} í Töflu 6-1. Mælt vægisþol er í því tilviki 16% hærri en greiningin segir til um. Það er rétt að benda á að við smíði prófstykkja var komið fyrir lóðréttum K10 járnnum í kverk láréttra

lykkja í vegg sem gengu niður í sökkulfótinn. Miðað við þá togstreitu sem mældist í lóðréttum veggjárnnum eru vísbendingar um að þessi K10 kverkjárn hafi tekið þátt í vægisþoli veggjar. Ekki er þó víst að þessi K10 kverkjárn hafi náð fullri virkni þar sem þau náðu ekki fullri festilengd í sökklum og voru ekki beygð í U-lykkju líkt og lóðrétt veggjárn. Þetta skýrir muninn þar með að einhverju leyti. Kverkjárn voru hunsuð í styrkútreikningum veggja í Töflu 6-1.

Tafla 6-1: Vægisáraun og vægisburðargeta veggja.

	FSL-SS	FSL-LS
Vægisáraun, M_{Max} [kNm]	69,1	69,2
Reiknuð vægisburðargeta, M_R [kNm]	50,0	50,0
Reiknuð vægisburðargeta, M_{po} [kNm]	59,7	59,7
Hönnunarstyrkur, M_{Rd} [kNm]	33,4	33,4
M_{Max}/M_R	1,38	1,38
M_{Max}/M_{po}	1,16	1,16

6.2 Skerburðargeta veggjar

Við útreikningar á skerburðargetu stöpulveggs þarf að taka tillit til skerstyrkingar í hluta veggjar, en ákveðið var að bæta við þremur röðum af skerleggjum fyrir ofan sökkul, sjá nánar í kafla 2.1.1. Skerburðargeta steypis þversniðs án skerbendingar er reiknuð samkvæmt EC2, kafla 6.2.2 (1). Útreikninga má finna í Viðauka F. Mæld gildi skeráraunar fást frá Töflu 5-5. Skerstyrkur veggjar finnst með hærra gildinu úr jöfnu (6.2).

$$V_R = \max \left\{ \left(\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right) b_w \cdot d \right. \\ \left. \left(0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right) b_w \cdot d \right. \quad (6.2)$$

Þar sem

V_R : Skerburðargeta [kN].

γ_c : Öryggisstuðull steypu, almennt 1,5. Verður hér 1,0.

k : Gildi fengið út frá virkri þykkt d . Verður hér 2.

ρ_l : Hlutfall togjárna á móti breidd b_w og virkri þykkt þversniðs d .

f_{ck} : Mældur þrýstistyrkur steypu, Tafla 5-1 [MPa].

σ_{cp} : Áslæg spenna út frá áslægum krafti, hér er hann 0.

b_w : Minnsta breidd þversniðs sem verður fyrir togi [mm].

d : Virk þykkt þversnið [mm].

Styrkur með tilliti til skerbendingar reiknast samkvæmt EC2, kafla 6.2.3 (3) með jöfnu (6.3).

$$V_{R,r} = \min \left\{ \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta}, \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta \right\} \quad (6.3)$$

Þar sem

$V_{R,r}$: Skerburðargeta skerstyrkingar [kN].

α_{cw} : 1,0 fyrir óforspennt burðarvirki.

z : Innri armur þversniðs, oftast tekið sem $0,9d$ [mm].

v_1 : Minnkunarstuðull fyrir steypu undir skeráhrifum.

f_{cd} : Brotstyrkur steypu, verður hér f_{ck} [MPa].

A_{sw} : Þversniðsflatarmál skerbendingar [mm²].

s : Millibil skerlykkja [mm].

f_{ywd} : Flotstyrkur skerjarna [MPa].

θ : Horn brotmyndar í steypu undan skeri, valið þannig að $\cot\theta$ sé á bilinu 1 – 2,5. Verður hér 45°.

Tafla 6-2 ber saman mælda skeráraun og reiknaðann skerstyrk stöpulveggja. Niðurstöður sýna að hæsta skeráraun $V_{\max}$ er 86% af styrk óskerbents veggjar fyrir Prófstykki FSL-SS en 84% fyrir Prófstykki FSL-LS ($V_{\max}/V_R$). Lægri steypustyrkur mældist í þrýstiprófi steypu seinni prófdag sem skýrir lægri skerstyrk prófstykkis FSL-LS. Hins vegar ef mæld skeráraun er borin saman við styrk skerbents veggjar þá er hlutfallið milli áraunar og styrks í báðum prófstykkjum 55% ($V_{\max}/V_{R,r}$).

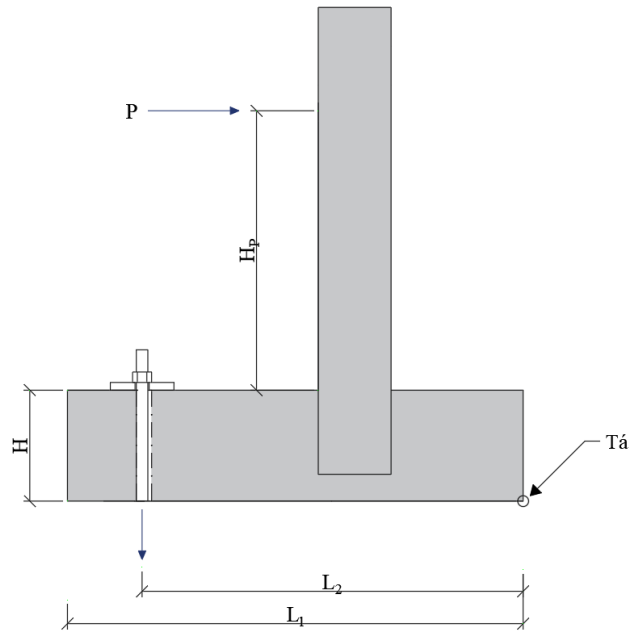
Tafla 6-2: Skeráraun og skerburðargeta veggja.

	FSL-SS	FSL-LS
Skeráraun, V_{Max} [kN]	94,7	94,8
Reiknuð skerburðargeta án skerlykkja, V_R [kN]	110,4	113,0
Reiknuð skerburðargeta með skerlykkjum, $V_{R,r}$ [kN]	171,6	171,6
Hönnunarstyrkur án skerlykkja, V_{Rd} [kN]	62,5	62,5
Hönnunarstyrkur með skerlykkjum, $V_{Rd,r}$ [kN]	139,8	139,8
V_{Max}/V_R	0,86	0,84
$V_{Max}/V_{R,r}$	0,55	0,55

6.3 Öryggi gegn veltu og skriði

Í hönnun stoðveggja skal skoða hættu á skriði og veltu. Velta er skoðuð með því að taka veltuvægi um tá sökkuls og borið saman við það vægi sem vinnur á móti. Veltuvægi myndast í stoðvegg vegna álagi frá jarðveggsfyllingu sem veggurinn heldur við og öðru álagi sem myndast ofan á fyllingunni. Vægi sem vinnur á móti veltuvægi er eiginþyngd veggjar, sökkuls og fyllingar sem hvílir ofan á sökkli. Lárétt álag frá jarðveggsfyllingu skapar einnig skriðkrafta í stoðvegg sem þarf að vinna á móti með núning eða öðrum hætti. Í þessu verkefni var unnið gegn skriði með tveimur M30 8.8 snitteinum sem spenntu sökkul niður á tilraunagólfíð. Hver snittteinn var eftirspenntur með 160 kN krafti. Einungis snittteinarnir unnu gegn veltu á prófstykkjunum við álagsprófun.

Veltuvægi á prófstykki er táknað með M_O (e. overturning moment) og stöðugleikavægið með M_R (e. resisting moment). Mynd 6-1 sýnir grafíska mynd af kröftum sem verka á prófstykki við álagsprófun. Málsetningar á myndinni eru fastar, þær eru H_P sem er hæð krafts frá efri brún sökkuls, 730 mm, L_1 og H eru lengd og hæð sökkuls, 1190 mm og 290 mm og L_2 er fjarlægð frá tá að miðju snittteina, mældist 990 mm. Veltuútreikninga á báðum prófstykkjum er að finna í Viðauka F en niðurstöður útreikninga má sjá í Töflu 6-3.



Mynd 6-1: Spennudreifing undir sökkli undan kröftum í álagsprófi.

Tafla 6-3: Veltuvægi veggja og nýtni..

	Vægi [kNm]
Veltuvægi, M_0	97,6
Stöðugleikavægi, M_R	322,8
Nýtni: $\frac{M_0}{M_R}$	0,3

Þegar Tafla 6-3 er skoðuð má sjá að veltuvægi prófstykkja, M_0 í álasprófun er hæst 97,6 kNm sem er ekki nema um 30% af stöðugleikavægi prófstykkja, M_R . Þar að leiðandi var lítil hætta á veltu í þessari tilraun.

Í álagsprófun þurftu snittteinar að þola bæði sker- og togáraun á sama tíma vegna skriðs á prófstykkjum. Skeráraun er tekin sem hæsti kraftur frá tjakk deilt niður á báða snittteina. Togáraun í teina myndast vegna niðurkrafts sem vinnur gegn vægi vegna álagshæðar tjakks. Styrkur og nýtni snittteina var reiknuð samkvæmt EC3 1-8:2005, töflu 3.4. Jafna (6.4) og (6.5) voru notaðar til þess að finna sker- og togstyrk snittteinana.

$$F_{V.Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (6.4)$$

$$F_{T.Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (6.5)$$

Þar sem

$F_{V.Rd}$: Skerstyrkur snittteins [kN].

$F_{T.Rd}$: Togstyrkur snittteins [kN].

k_2 : Fasti, verður hér 0,9.

α_v : Fasti, verður hér 0,6 (fyrir 8.8 bolta).

f_{ub} : Brotstyrkur stáls (800 MPa fyrir 8.8 bolta).

A_s : Spennuflatarmál bolta [mm²].

γ_{M2} : Öryggisstuðull stáls: 1,25.

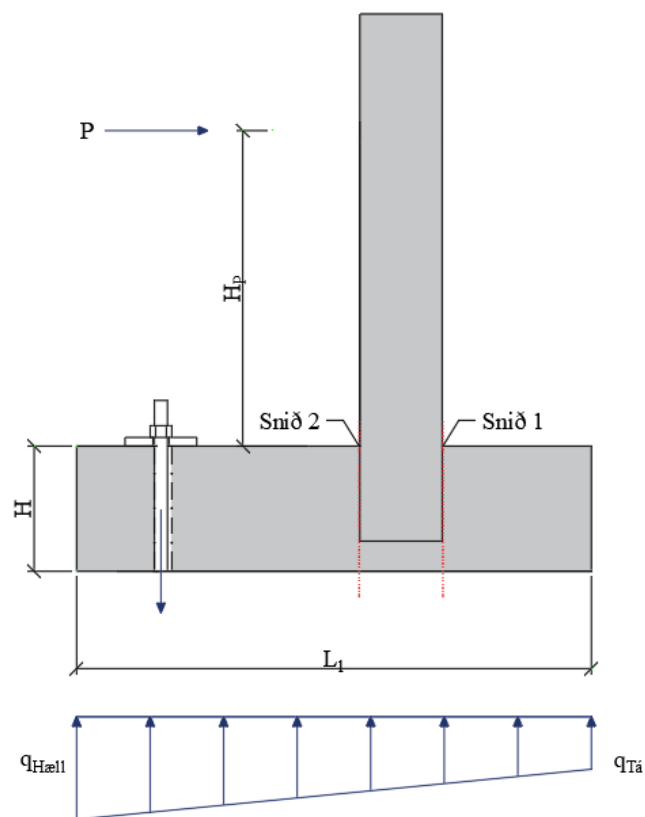
Styrkur, áraun og nýtni snitteina má sjá í Töflu 6-4 en útreikninga er að finna í Viðauka F. Taflan sýnir að styrkur snittteina er nægjanleg til að þola þá áraun sem þeir verða fyrir. Snittteinar voru í báðum álagsprófunum nýttir um 68%.

Tafla 6-4: Styrkur, áraun og nýtni snittteina.

	FSL-SS	FSL-LS
Skeráraun á bolta, $F_{V.Ed}$ [kN]	47,4	47,4
Skerstyrkur bolta, $F_{V.Rd}$ [kN]	215,4	215,4
Togáraun bolta, $F_{T.Ed}$ [kN]	209,3	209,3
Togstyrkur bolta, $F_{T.Rd}$ [kN]	323,1	323,1
Nýtni: $\left(\frac{F_{V.Ed}}{F_{V.Rd}}\right) + \left(\frac{F_{T.Ed}}{1,4 \cdot F_{T.Rd}}\right) < 1,0$	0,68	0,68

6.4 Vægisburðargeta sökkuls

Við útreikninga á vægi sökkuls verða skoðuð tvö þversnið, annars vegar þversnið við suðurhlið veggjar (Snið 1) og þversnið á norðurhlið veggjar, í álagshliðinni (Snið 2), sjá frekari skýringu ásamt spennudreifingu undir sökkli á Mynd 6-2. Álag í hverju sniði er fundið með að reikna heildarkraft og spennu undir sökklinum, frá vegg í átt að tá. Hæsta spennan við hæl er táknuð sem $q_{hæll}$ og spennan við tá $q_tá$. Spennur undir sökkli má sjá í Töflu 6-5 en við útreikninga var notast við hæsta kraft úr álagsprófi. Útreikningar eru í Viðauka F.



Mynd 6-2: Snið í sökkli fyrir kraftaútreikninga.

Tafla 6-5: Spenna undir sökkli við hámarkskraft í álagsprófun.

	FSL-SS	FSL-LS
Spenna við hæl $q_{hæll}$ [MPa]	0,45	0,17
Spenna við tá, $q_{tá}$ [MPa]	0,45	0,17

Vægisburðargeta sökkuls reiknast með sambærilegum hætti og veggir, með jöfnu (6.3). Í sökkli FSL-SS er örlítið herra járnaflatarmál í efri brún vegna K16 járna og er því tekið tillit til þess í útreikningum á vægisburðargetu. Sprungumyndunarvægi M_{cr} er einnig reiknað fyrir sökkul með jöfnu (6.6), en með því má áætla vægi sem þarf til þess að fá sprungur í yfirborð sökkuls. Tafla 6-6 sýnir niðurstöður útreikna á vægisáraun í sniðum og vægisburðargetu sökkuls.

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot \left(\frac{b_w \cdot h^2}{6} \right) \quad (6.6)$$

Þar sem

M_{cr} : Sprungumyndunarvægi [kNm].

f_{ctm} : Togstyrkur steypu [MPa].

h : Hæð þversniðs sökkuls [mm].

b_w : Breidd þversniðs sökkuls [mm].

Tafla 6-6: Vægisáraun og vægisburðargeta sökkla.

	FSL-SS	FSL-LS
Vægisáraun í sniði 1, $M_{Max,S1}$ [kNm]	10,2	10,2
Vægisáraun í sniði 2, $M_{Max,S2}$ [kNm]	-56,8	-56,8
Reiknuð vægisburðargeta (neðri brún), $M_{R,N}$ [kNm]	90,5	90,5
Reiknuð vægisburðargeta (efri brún), $M_{R,E}$ [kNm]	97,2	90,5
Hönnunarstyrkur (neðri brún), $M_{Rd,N}$ [kNm]	73,8	73,8
Hönnunarstyrkur (efri brún), M_{Rd} [kNm]	79,2	73,8
Sprungumyndunarvægi, M_{cr} [kNm]	53,0	53,0
$M_{Max,S1}/ M_{R,N}$	0,11	0,11
$M_{Max,S2}/ M_{R,E}$	0,58	0,63

Niðurstöður í Töflu 6-6 sýna að hæsta vægi í sniði 2 hefur neikvætt gildi sem þýðir að tog er í efri brún sökkuls. Nýtni sökkla er aðeins 58% (FSL-SS) og 63% (FSL-LS) af reiknuðum styrk sökkuls. Prófstykki FSL-SS hefur lægri nýtingu í vægisáraun vegna aukið járnaflatarmáls í efri brún, þrátt fyrir lægri steypustyrk. En reiknuð vægisburðargeta er rúmlega 7% hærri. Sprungumyndunarvægið fyrir sökkjana er 53 kNm sem er lægra en hæsta vægi mælt í sniði 2 en hárfínar sprungur voru að finna í sökkli út frá vegghornum á norðurhlið prófstykkis.

6.5 Skerburðargeta sökkuls

Sker í sökkli er fundið með sama hætti og vægið. Skerburðargeta sökkuls reiknast með sambærilegum hætti og veggir, með jöfnu (6.2). Líkt og komið hefur fram er herra járnaflatarmál í efri brún prófstykkis FSL-SS en skerútreikningar miðast við lægra gildið af efri og neðri brún. Útreikninga má finna í Viðauka F.

Tafla 6-5 sýnir skeráraun í sniðum 1 og 2 (sjá Mynd 6-2) ásamt niðurstöðum skerþolsútreikninga. Niðurstöður sýna að sökkla voru lítið nýttir í álagsprófum, en hæsta nýtni mátti finna í sniði 2, sem var um 49% af reiknaðri skerburðargetu sökkuls. Litlu munar á reiknuðum styrk sökkla en munurinn felst aðalega í sterkari steypustyrk prófstykkis FSL-SS.

Tafla 6-5: Skeráraun og skerburðargeta sökkla.

	FSL-SS	FSL-LS
Skeráraun í sniði 1, $V_{Max.S1}$ [kN]	63,3	63,3
Skeráraun í sniði 2, $V_{Max.S2}$ [kN]	105,7	105,7
Reiknuð skerburðargeta, V_R [kN]	216,3	215,7
Hönnunarstyrkur, V_{Rd} [kN]	120,7	120,7
$V_{Max.S1} / V_R$	0,29	0,29
$V_{Max.S2} / V_R$	0,49	0,49

6.6 Normaliserað vægi sem fall af hlutfallsfærslu og stífni

Normaliserað vægi má reikna með eftirfarandi jöfnu.

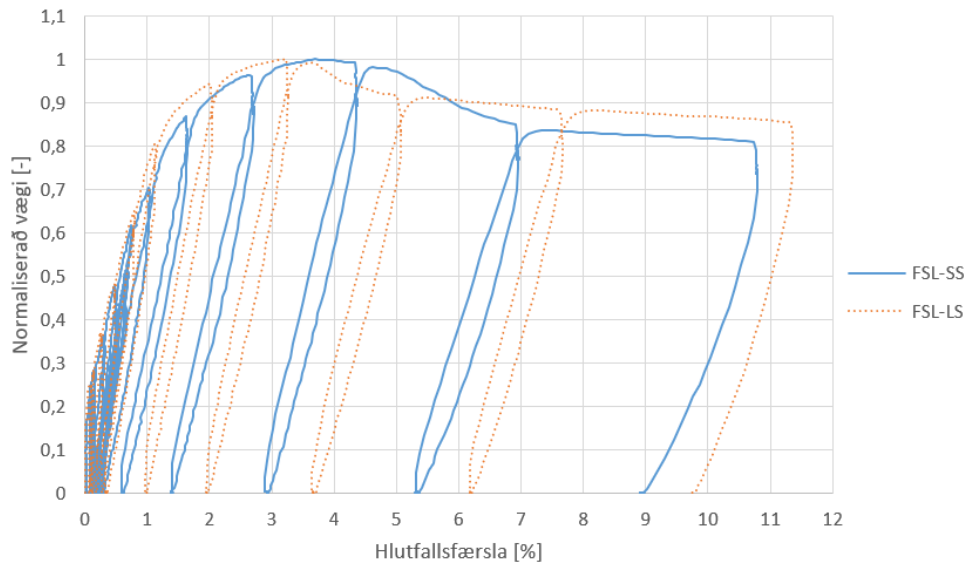
$$M_{Norm} = \frac{F_i \cdot h}{F_{max} \cdot h} \quad (6.7)$$

Þar sem

F_i : Mældur kraftur í Instron tjakk [kN].

h : Hæðin frá yfirborði sökkuls að tjakk [m].

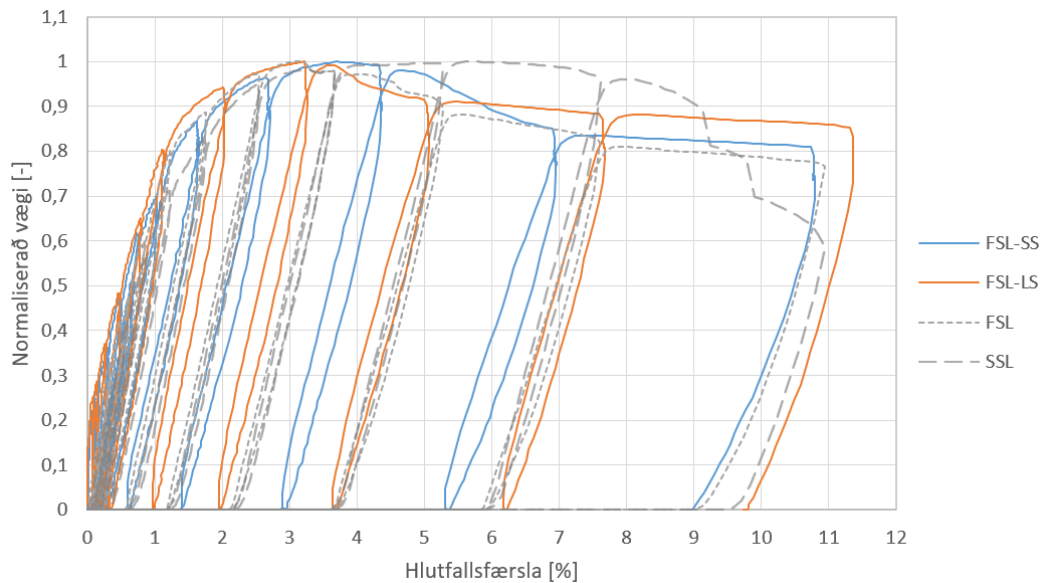
Mynd 6-3 ber saman prófstykkinn FSL-LS og FSL-SS með tilliti til normaliseraðs vægis sem fall af hlutfallsfærslu. Á þennan hátt má bera saman prófstykkinn hlutlaust bæði m.t.t. vægishegðun prófstykkjanna og þróun styrks út álagsprófið.



Mynd 6-3: Samanburður á normaliseraðu vægi beggja prófstykkja sem fall af hlutfallsfærslu.

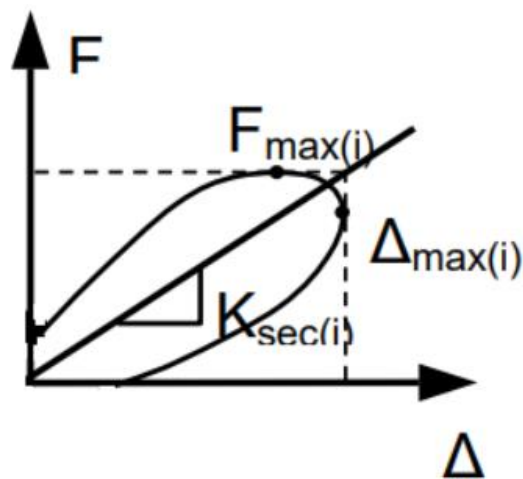
Á myndinni má sjá að vægishegðun beggja prófstykkja er sambærileg upp að hlutfallsfærslu 3,5% en á þeim tímapunkti tekur vægisgeta veggjar FSL-LS að lækka vegna flögnunar steypukápu á framhlið/þrýstihlið veggjar. Á sambærilegan hátt fer vægisgeta FSL-SS minnkandi við 4,5% hlutfallsfærslu. Eftir lækkunina halda bæði prófstykki vægisgetu yfir 80% af hámarksmótvægi út allt álagsprófið. Formleg skilgreining á broti er gjarnan tekin þegar mótsaða prófstykkis fer undir þessi 80% mörk (Cheok o.fl., 1993).

Á Mynd 6-4 eru borin saman prófstykki þessa verkefnis við fyrri tilraunir (Franz Sigurjónsson, 2023; Rúnar Steinn Smáráson, 2022). Þegar þau eru teiknuð saman má sjá að þau hegða sér sambærilega upp að 3% hlutfallsfærslu en eftir það fer að bera á milli forsteyptu prófstykkjanna (FSL-LS, FSL-SS og FSL) og staðsteypta prófstykkisins (SSL). Í forsteyptu stykkjunum minnkar styrkurinn vegna flögnunar steypukápu á þrýstihlið veggjarins. Flögnum kápu SSL kom síðar fram eða um 6% og var minni. Þess bera að geta að mældur steypustyrkur í SSL var um 70 MPa meðan hann mældist um 60 MPa í forsteyptu prófstykkjunum. Jafnframt var þykkt veggjar SSL meiri við yfirborð sökkuls, eða um 200 mm í miðjum vegg (Franz Sigurjónsson, 2023). Þetta getur hafa aðstoðað við að seinka minnkun á styrk SSL. Prófstykki SSL var eina prófstykkið þar sem kambstál í vegg slitnaði í álagsprófi en hægt er að sjá á mynd 6-3 í síðustu lotu prófstykkisins snögga minnkun á styrk vegna þess. Öll prófstykki halda styrk yfir 80% af hámarksmótsstöðu fram í síðustu lotu álagsprófsins.



Mynd 6-4: Samanburður á normaliseruðu vægi prófstykkja FSL-SS, FSL-LS, FSL og SSL.

Í upphafi álagsprófs er staðsteypa prófstykkið ekki eins stíft og forsteypu prófstykkinn. Það var vegna steypuskila milli staðsteypis veggjar og staðsteypis sökkuls. Til samanburðar ganga forsteyptir veggir samfelld niður í staðsteypu sökkul. Þeir hafa því ekki þessi steypuskil líkt og staðsteypa prófstykkið SSL. Til að bera saman prófstykkinn m.t.t. til stífni var valið að reikna sniðilstífni (e. secant stiffness) prófstykkis við fyrsta melda flöt í kambstáli í veggnum (sjá Kafla 4). Á þessum tímapunkti má gera ráð fyrir að forsteypu prófstykkinn séu með rifin þversnið líkt og staðsteypa prófstykkð. Stífnin var reiknuð með því að deila mældum hámarkskrafti með mældri hámarksfærslu í þeirri lotu sem flöt var vart við. Þetta er sýnt myndrænt á Mynd 6-5. Tafla 6-7 tekur saman reiknaða sniðilstífni fyrir öll prófstykkinn.



Mynd 6-5: Uppsöfnuð orkulosun fyrir tilheyrandi lotu i [J].

Tafla 6-7: Reiknuð sniðilstífni (e. secant stiffness) fyrir prófstykki FSL-SS, FSL-LS, FSL og SSL.

Prófstykki	Stífni við fyrsta flot járns í vegg, K_{sec} [kN/m]
FSL-SS	7,645
FSL-LS	8,197
FSL	8,424
SSL	8,554

Stífni var reiknuð út frá lotu 5 í öllum prófstykkjum. Flot í kambstáli var fyrst vart við í þessari lotu í prófstykkjum FSL-LS, FSL og SSL við sökkulyfirborð. Ákveðið var að nota lotu 5 einnig fyrir FSL-SS þar sem streitumælir sýndi að kambstál var við að fara í flot þegar prófstykkið fór að skríða undan álagi (sjá Kafla 4).

Í Töflu 6-7 má sjá að stífni prófstykkja SSL og FSL eru ívið stífari en prófstykki FSL-LS og FSL-SS en þó á svipaðri stærðargráðu. Til dæmis er mestur munur á milli FSL-LS og SSL og reiknast munurinn 11% en munurinn er 4% ef FSL-SS og SSL eru borin saman. Það geta verið ýmar ástæður fyrir þessum mun. Til dæmis var flotstyrkur kambstáls í SSL og FSL 573 MPa meðan styrkur stáls í FSL-LS og FSL-SS var 524 MPa. Áðurnefndur styrkur steypu í stöpulvegg SSL var 70 MPa á meðan hann var um 60 MPa í forsteypu prófstykkjunum. Loks er ekki hægt að gera ráð fyrir að kambstálið hafi verið staðsett á sama stað í þversniðinu (þ.e. kápuþykkt í langjárn sé meiri eða minni en hönnunarþykkt).

6.7 Orkulosun

Orka er gefin sem fall af hverri lotu og fæst með heildun á ferlum krafts á móti færslu (Myndir 5-4 og 5-5). Orkulosun reiknast samkvæmt jöfnu (6.8).

$$E_{lota} = \sum_i \frac{F_{i+1} + F_i}{2} \cdot (\Delta_{i+1} + \Delta_i) \quad (6.8)$$

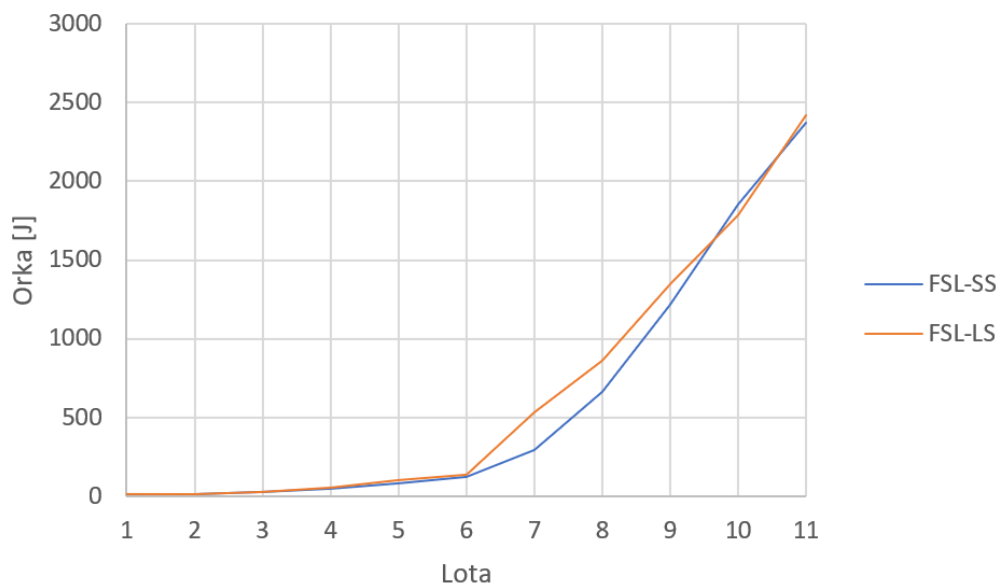
Þar sem

E_{lota} : Uppsöfnun orkulosun fyrir tilheyrandi lotu [J].

F : Kraftur frá tjakk [kN].

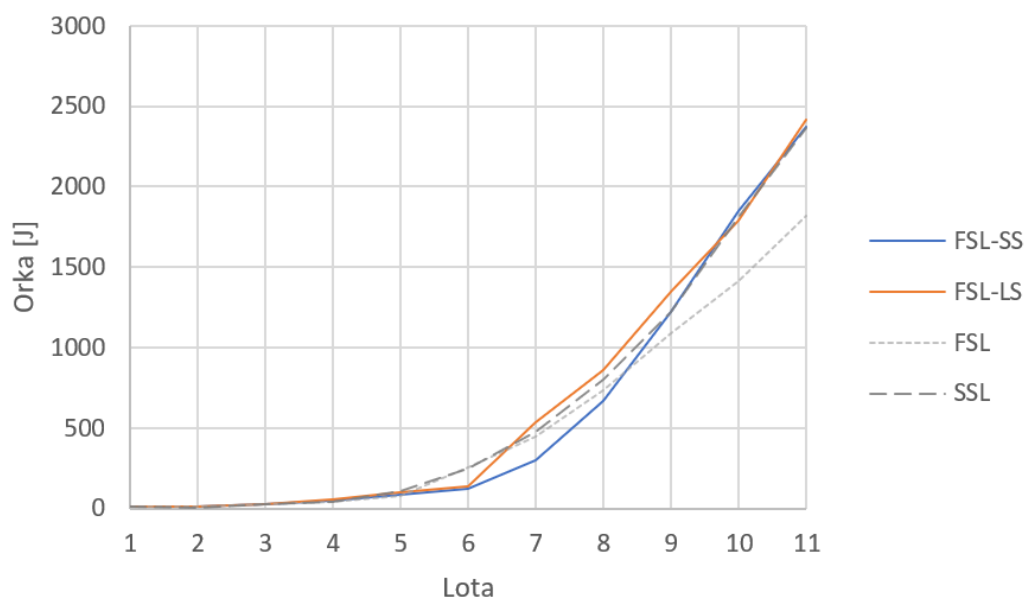
Δ : Færsla frá tjakk [mm].

Mynd 6-6 sýnir að ferill beggja prófstykkja er mjög sambærilegur en helstu frávik eru að finna í lotu 7, 8 og 9 þar sem orka í FSL-SS mælist lægri en í FSL-SS. Líkleg skýring á því er að leiðrétting á staðsetningu tjakks var ekki nægilega mikil í álagsprófun FSL-SS og rúmleg fyrir FSL-LS sem býr til mismun á færslu.



Mynd 6-6: Samanburður á orkulosun prófstykkja.

Til glöggvunar er orkulosun FSL-SS og FSL-LS borin saman við prófstykki Franz Sigurjónssonar (2023) og Rúnar Steins Smárasonar (2022) á Mynd 6-7. Á myndinni má sjá að meiri orka losnar í prófstykkjum FSL-SS, FSL-LS og SSL en þau urðu öll fyrir hreinu vægisbroti, og orkulosunin er sambærileg. Prófstykki FSL varð fyrir blönduðu sker- og vægisbroti sem er stökkara brot og losar þar með minni orku.



Mynd 6-7: Samanburður orkulosunar á prófstykkjum FSL-SS, FSL-LS, FSL og SSL.

7 Samantekt og niðurstöður

7.1 Samantekt

Í þessari rannsókn var haldið áfram þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls sem fyrst var útfærð af Franz Sigurjónssyni (2023) og Rúnari Steini Smárasyni (2022) með því markmiði að stytta framkvæmdatíma á verkstað. Þeir framleiddu forsteyptan landstöpulvegg þannig að neðri hluti veggjar, sem stingst niður í staðsteyptan sökkul, var hafður með hrjúfu yfirborði til að tryggja betri bindingu. Ennfremur voru í veggnum höfð göt svo að efri járnagrind sökkuls gæti verið þrædd í gegnum vegginn. Hugmyndin er að forsteypti veggurinn sé fluttur tilbúinn á verkstað, reistur í sökkulmót, tengdur við járnagrind og steypur fastur samhliða steypu sökkuls. Þeir smíðuðu því tvö prófstykki í 63% skala, annað prófstykkið, kallað SSL (StaðSteyptur Landstöpull), var hefðbundin staðsteypt lausn. Seinna prófstykkið, kallað FSL (ForSteyptur Landstöpull), var með nýju forsteyptu lausninni en að öðru leyti sambærilegt staðsteyptri lausn. Niðurstöður þeirra sýndu fram á að ný tenging virkar vel. Hins vegar var hámarksálag aðeins um 90% af því sem staðsteypt tenging varð fyrir. Það var að stórum hluta vegna brotmyndar forsteypta veggins sem var blanda af sker- og vægisbroti á meðan staðsteypti veggurinn varð fyrir hreinu vægisbroti. Önnur atriði eins og mismunandi lokapykkt veggja og steypustyrkur höfðu þó líka áhrif á samanburðinn.

Í þessu verkefni var tenging þeirra Franz og Rúnars þróuð frekar, en ákveðið var að halda áfram með forsteyptu útfærslu þeirra en styrkja vegginn með skerleggjum á því svæði sem veikast er fyrir skerbroti og stýra þannig brotmynd veggjar í hreint vægisbrot. Skerleggir voru staðsettir í veggnum rétt fyrir ofan yfirborð sökkulsins. Svæðið var ákvarðað sem lengdin á milli vænts plastískts vægis í veggnum, sem fæst við yfirborð sökkulsins, og flotvægis sem fæst ofar í veggnum. Einnig var smíðað annað sambærilegt prófstykki sem notar færri og stærri steypustyrktarjárn (þ.e. nota 3-K16 járn í stað 7-K10 járna í efri grind sökkuls) sem þrædd eru í gegnum veggeiningu. Einnig var hjúfa svæðið sem stingst ofan í sökkulinn haft minna til að koma í veg fyrir 45° hallandi steypuskil þar sem veggeining og sökkull mætast sem getur ýtt undir sprungumyndun þar. Þannig má einfalda enn frekar bæði uppsetningu eininga á verkstað og mótasmíði þeirra.

Tvö prófstykki voru útfærð í 63% skala við Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands og í samstarfi við Vegagerðina, BM-Vallá og Vistu verkfræðistofu. Prófstykkin voru smíðuð samkvæmt núgildandi Evrópustöðlum og reglum Vegagerðarinnar um hönnun brúa. Fyrri prófstykkið, kallað FSL-SS (ForSteyptur Landstöpull með Stórum Steypustyrktarjárnnum), notaði færri og stærri steypustyrktarjárn í efri grind sökkulsins. Ákveðið var að nota þrjú K16 járn sem þræðast í gegnum 50 mm göt í forsteyptum vegg, sem jafnast á við K25 járn í gegnum 80 mm göt í 63% skala. Seinna prófstykkið, kallað FSL-LS (ForSteyptur Landstöpull með Litlum Steypustyrktarjárnnum), var sambærilegt fyrri verkefni Franz og Rúnars, en það hafði sjö K10 járn í efri grind sökkuls sem voru þrædd í gegnum 32 mm göt. Það skalast upp í K16 járn og 50 mm göt. Þessar tvær útfærslur eru sýndar á Mynd 7-1. Steypumót og járnagrind voru smíðuð á verkstaði Vegagerðarinnar en þar var einnig komið fyrir streitumælum á kambstál til þess að fylgjast með virkni þeirra í álagsprófi. Mótin voru þar næst flutt í BM-Vallá þar sem þau voru steyp.

Eftir að steypa náði styrk voru þau flutt upp í Háskóla Íslands þar sem þau voru álagsprófuð á spennigólfi Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar í VR-III, með aðstoð Vistu verkfræðistofu.



Mynd 7-1: Prófstykki FSL-SS (vinstri) og Prófstykki FSL-LS (hægri).

Til að leggja mat á stífni, styrk og orkulosun tengingarinnar var framkvæmt statískt (e. quasi-static) álagspróf. Prófið samanstóð af ellefu stigvaxandi færslustýrðum lotum. Loturnar byggjast á sambærilegu álagsprófi sem hefur verið notað í prófunum á súlutengingum í University of Washington í Seattle.

Að prófi loknu voru bæði prófstykki söguð í tvennt til að skoða nánar tenginguna. Við skoðun á þverskurðum prófstykkja kom í ljós að um hreint vægisbrot í vegg var um að ræða í báðum tilfellum. Engin ummerki voru á röskun tengingar milli sökkuls og veggjar en skemmdir voru nánast allar í stöpulvegg fyrir ofan sökkulyfirborð.

7.2 Niðurstöður

Helstu niðurstöður rannsóknarinnar eru eftirfarandi:

- **Tengingin** milli forsteypits stöpulveggjar með stórum steypustyrktarjárnnum og staðsteypits sökkuls er hægt að hanna þannig að hún hegðar sér jafnvel og staðsteypit tenging.
- **Brotmynd** beggja prófstykkja átti sér stað í stöpulvegg rétt fyrir ofan sökkul og sökkullinn sjálfur var óskemmdur. Samkvæmt Wight (2015) er hættu á að brotmynd óskerbents bita sé blanda af sker- og vægisbroti ef skersspanið er á bilinu 2,5 – 6, hér er það hlutfallið milli hæðar tjakks yfir sökkli og skerdýpis veggjar. Bæði prófstykkin höfðu hlutfallið 5 og því var komið fyrir skerleggjum í veggnum fyrir ofan sökkulyfirborð til að framkalla hreint vægisbrot. Svæðið með skerleggjum var á svæði plastískts vægis í veggnum, sem fæst frá yfirborði sökkuls að flotvægi sem fæst ofar í veggnum. Í báðum prófstykkjum fékkst hreint vægisbrot í veggnum við yfirborð sökkuls. Þetta er eins brotmynd og fékkst í prófun á staðsteypnum landstöpli í fyrri rannsókn (Franz Sigurjónsson, 2023; Rúnar Steinn Smárason, 2022).
- **Styrkur og stífni** prófstykkja var sambærilegur. Mældur hámarkskraftur var 94,7 kN fyrir FSL-SS og 94,8 kN fyrir FSL-LS sem gerir um 0,1% mun. Ástæða þess er að veggir voru steyptir samtímis sem gerir steypustyrk þeirra mjög sambærilegan og þeir eru járn bentir eins. Styrkur prófstykkja þessa verkefnis var um 93% af styrk

staðsteypa prófstykki SSL Franz og Rúnars, en mældur hámarkskraftur mældist þar 102,3 kN. Þennan mun má skýra með mismunandi veggþykkt stöpulveggja. Þykkt staðsteypa veggjarins mældist um 200 mm í stað 190 mm því mótin bólgnuðu út við steypuvinnu. Einnig mældist hærri steypustyrkur í vegg SSL en í veggjum FSL-SS og FSL-LS. Stífni prófstykkja voru borin saman m.t.t. sniðilstífni (e. secant stiffness) við fyrsta flöt í kambstáli. Þegar prófstykkin voru borin saman við SSL var mesti munur 11% og minnstur 4%. Talið eru að efnisgæði steypu og styrks og staðsetning járna í þversniði útskýri þennan mun. Rétt er að taka fram að eini munur prófstykkja í þessari rannsókn var útfærsla á járnagrind í efri brún sökkuls en í FSL-SS voru notuð 3 K16 járn en í FSL-LS voru notuð 7 K10 járn sem gefur sökkul FSL-SS um 8% hærra langjárnaflatarmál. Nýtni sökkuls var mjög lítil í prófunum svo ekki er talið að það hafi haft áhrif á brotstyrk stöpulveggjar.

- **Notkun stærri og þar með færri steypustyrktarjarna** í efri brún sökkuls hafði ekki áhrif styrk tengingar en það var einnig staðfest þegar prófstykki voru söguð í tvennt og engar skemmdir sáust á tengingunni sjálfri fyrir neðan sökkulyfirborð. Í sökkli var einnig ákveðið að sleppa kverkjárnnum í þverlykkjum og einni skerlykkju við bakhlið veggjar sem hafði lítil sem engin áhrif á brotstyrk prófstykkis.
- **Komið var í veg fyrir myndun ráðandi sprungu í vegg fyrir neðan sökkulyfirborð**, líkt og gerðist fyrir stöpulvegg FSL Franz og Rúnars, með því að hrýfishluti veggja (útbúinn með þríkantslistum) var lækkaður í smíði steypumóta. Ákveðið var að láta hann ná upp að miðjum járnagötum. Eftir sögun prófstykkja FSL-SS og FSL-LS mátti sjá að engar ráðandi sprungur voru í vegg fyrir neðan efri brún sökkuls.
- **Prófstykkin voru borin saman m.t.t. normaliseraðs vægi sem fall af hlutfallsfærslu**, sjá Mynd 6-3. Þar sést að hegðun prófstykkja er mjög sambærileg upp að 1% hlutfallsfærslu. Þar virðist prófstykki FSL-LS vera stífara og ná þar að leiðandi hámarksvægi fyrr en FSL-SS. Líkleg ástæða þess er að í álagsprófun misstu prófstykki viðnám við gólfið, FSL-SS í lotu 5 og FSL-LS í lotu 4. Eftir það var staðsetning tjakks leiðrétt eftir skriði hvernar lotu sem leiddi til skekkju í færslumælingum. Bæði prófstykki ná þó hágildi sínu milli 3% og 4% hlutfallsfærslu. Eftir hámarksvægi fer styrkur minnkandi en halda þó bæði 80% af hámarkstyrk út álagsprófið.
- **Streitunemar í lóðréttum járnnum í báðum stöpulveggjum** voru staðsettir 150 mm fyrir ofan og neðan sökkulyfirborð og við samskeyti sökkulyfirborðs og veggjar. Í FSL-SS fór streita að stigmagnast með hverri lotu eftir að járneið náði flötstreitu sem átti sér stað við um 1% hlutfallsfærslu. Mestu streiturnar mældust í nemum við sökkulyfirborð en þar var mesta beygjuvægið og mestu ólínulegu formbreytingar. Hæsta melda streita var 0,068ε í loka álagslotunni. Mæld streita í prófstykki FSL-LS fór með sambærilegum hætti af stað þ.e. flötstreita mældist í járnei við sökkulyfirborð þegar veggur yfirsteig 1% hlutfallsfærslu. Eftir það stigmagnast mæld streita í járnei þangað til í lotu 9 en þá fór streita lækkað við sökkulyfirborð. Ástæða þess var vegna flögnunar sem átti sér stað á þrýstihlið veggjar í lotu 8. Flögnun olli minni mótstöðukraft og þar að leiðandi minni streitu. Einnig voru ráðandi sprungur í vegg um 5 cm og 13 cm hæð frá sökkli og líklegt að streita hafi losnað út þar.

Mældar streitur 150 mm fyrir neðan sökkulyfirborð mældust rétt undir flotmörkum í álagsprófum. Þessar niðurstöður gefa til kynna mikilvægi þess að vera með U-lykkju í stöpulveggnum.

- **Streitunemar í járnagrind sökkla** mældu lágar streitur og fór ekkert járn yfir flotstreitumörk ε_y . Hæstu streitur mældust á bakvið vegg í efri brún sökkuls eða um $(0,45-0,5)\varepsilon_y$. Það er í samræmi við ástandskoðun prófstykkja í álagsprófi en á þessum stað þar mynduðust hárfínar sprungur.
- **Samsetning prófstykkis** með færri en stærri steypustyrkarjárnnum (FSL-SS) var auðveldari en að nota mörg og minni járn (FSL-LS). Með því að nota færri járn er hægt að útbúa stærri göt í veggnum sem gefur meira rými fyrir steypu til að flæða í gegnum.
- **Efnispróf steypu og stáls** voru gerðar samhliða tilraunum. Þrýstistyrkur steypunar eftir 28 daga var um 52 MPa fyrir stöpulveggi og 65 MPa fyrir sökkul sem er mun hærri en fyrirskrifaður hönnunarstyrkur, C35/45. Talið er að þessi háí styrkur stafi af því að steypa var geymd við bestu aðstæður. Einnig voru gerð togþolspróf á þeim þremur gerðum af kambstáli sem voru notuð í prófstykki, K6, K10 og K16 en mældur flotstyrkur var í öllum tilfellum yfir hönnunargildum, 500 MPa. Einstaklega hár flotstyrkur mældist hjá K6 járninu en það var 614 MPa. Járníð náði 2% toglangingu en gerð er krafa um 7,5%. Möguleg skýring er að járníð hafi kólnað of hratt í framleiðslu og er þar að leiðandi með hærri flotstyrk og minni seiglu.

7.3 Ábendingar um hönnun tengingar

Við þróun tengingar á milli forsteypt stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls var stuðst við gildandi Evrópustaðla og Reglur um hönnun brúa sem gefin er út af Vegagerðinni (Vegagerðin, 2018). Hönnunarforsendur og greining á forsteyptum stöpulvegg og staðsteyptum sökkli m.t.t. vægis- og skerþols fór fram á sama hátt og í staðsteyptri útfærslu. Tengingin var útfærð eftirfarandi hátt í 63% skala:

- **Hlutfall milli hæðar sökkuls og þykktar stöpulveggjar** var:

$$\frac{h_{\text{sökkull}}}{t_{\text{veggur}}} = \frac{290 \text{ mm}}{190 \text{ mm}} = 1,53$$

Lagt er til að ekki sé farið undir þetta hlutfall nema það sé prófað sérstaklega.

- **Hlutfall milli fjarlægðar framhliðar veggjar frá tá sökkuls og hæðar sökkuls** var:

$$\frac{d_{\text{tá}}}{h_{\text{sökkull}}} = \frac{345 \text{ mm}}{290 \text{ mm}} = 1,19$$

Lagt er til að ekki sé farið undir þetta hlutfall nema það sé prófað sérstaklega.

- **Stungudýpt forsteyps stöpulveggjar** var:

$$l_{veggur} = 1,16 \cdot t_{veggur} = 1,16 \cdot 190 \text{ mm} = 220 \text{ mm}$$

en stungudýpt sjálfra U-járna í veggnum var:

$$l_{járn} = 1,08 \cdot t_{veggur} = 1,08 \cdot 190 \text{ mm} = 205 \text{ mm}$$

Lagt er til að stungudýptir forsteypst veggjar og U-járna séu ekki minni en jöfnurnar segja til um.

- **Þvermál gata í stöpulvegg** fyrir efri grind sökkuls voru:

$$d_{göt} = 3,0 \cdot \varnothing_{járn}$$

Lagt er til að götin séu ekki minni en jafnan segir til um en hér er $\varnothing_{járn}$ þvermál kambstáls sem á að nota í efri grind sökkuls. Við ákvörðun á þvermáli þarf að huga að mestu stærð fylliefnis í steypunni. Vegna skölunar voru götin útbúin með plaströrum og 3 mm stálvír vafinn utan um til að mynda hrýfi inn í götum. Í raunstærð er hægt að nota t.d. riffluð blikkrör.

- **Hrýfi yfirborðs stöpulveggjar** sem stingst niður í staðsteyptan sökkul var gert með þríkantlistum. Hver listi var með hæðina 10 mm og breidd 20 mm. Í raunstærð er þríkantlistinn með hæðina 16 mm og breidd 32 mm. Til að forðast sprungumyndun frá samskeytum milli veggjar og sökkuls niður í sökkulinn sjálfan er mikilvægt að hrýfi fari ekki upp fyrir miðju járnagata.
- **Skerleggir til varnar upprifi veggjar úr sökkli** voru staðsettir bakvið vegg innan fjarlægðar l_{veggur} . Miðað var við að þrýstistafur neðst í stöpulvegg dreifist 45° upp að yfirborði sökkuls. Ef skerspennur í steypu reiknast minni en togþol steypu er samt mælt með því að setja skerleggir, þ.e. lágmarksjárnun sem nemur togþoli steypunnar, til að grindalíkan (e. strut-and-tie model) gangi upp, sjá Mynd 2-6 sem sýnir flæði krafta í tengingunni í Kafla 2.1.2.
- **Skerleggir í stöpulvegg** voru staðsettir nálægt yfirborði sökkuls þar sem bæði verkar mesta vægi og sker samtímis. Svæðið þar sem skerleggir voru settir var ákvarðað sem lengdin á milli vænts plastískts vægis í veggnum, sem fæst við yfirborð sökkulsins, og flotvægis sem fæst ofar í veggnum. Upplýsingar um plastískt vægi og flotvægi þversniðs var fengin með einfaldri vægi-krappa greiningu (e. moment-curvature analyses).

Eins og sést hér er e.t.v best í hönnun tengingarinnar að byrja á að gefa sér þykkt stöpulveggjar til að ákvarða hæð sökkuls, fjarlægð framhliðar veggjar frá tá sökkuls og báðar stungudýptir. Járnun landstöpsulsins er ákvörðuð á hefðbundinn hátt. Þvermál gata í stöpulvegg ákvarðast út frá þvermáli kambstáls sem á að nota í efri grind sökkuls. Í þessari rannsókn voru K16 og K25 járn skoðuð sérstaklega (sköluð eru þau K10 og K16).

Útfæra þarf svo hrýfi yfirborðs stöpulveggja á sambærilegan hátt og var lýst hér fyrir framan. Því næst fer fram hefðbundin greining á stöpulveggnum og sökklinum m.t.t. veltu, vægis, skers o.s.frv. Mikilvægt er að skoða hvort skerleggja sé þörf í stöpulveggnum með því að skoða skerspanið og leggja mat á þörf á skerleggjum m.t.t. styrks í sökkli á bakvið vegg. Ef ekki er þörf á skerleggjum í sökklinum er samt mælt með að setja lágmarksjárnnum til að uppfylla grindarlíkan.

7.4 Ábendingar um samsetningu tengingar

Við smíði prófstykkja kom eftirfarandi fram:

- **Notkun færri og stærri steypustyrktarjárna** var mikil einföldun á smíði veggeininga. Mótasníði tók einnig styttri tíma þar sem færri göt þurfti að útfæra og steypuvinna var einnig léttari þar sem steypa flæddi betur í gegnum stærri göt en smærri.
- **Þegar sökkull er steypur** er lagt til að steyp sé aðeins öðru megin frá veggnum til þess að ganga úr skugga um það að steypa flæði vel bæði undir vegginn og í gegnum götin. Jafnframt þarf að gæta þess að steypa sé bæði þjál og vinnanleg þegar þegar hún er lögð í sökkulmótin. Gott er að leggja víbrator á járnin sem fara í gegnum veggeininguna til þess að hún flæði betur í gegn.
- **Ef gengið er frá efri grind sökkuls** eftir að veggeiningu er komið fyrir er mikilvægt að loka ekki sökkulmótum við tá sökkuls. L-járn í efri grind sökkuls er stungið í gegnum stöpulvegginn úr þeirri átt.

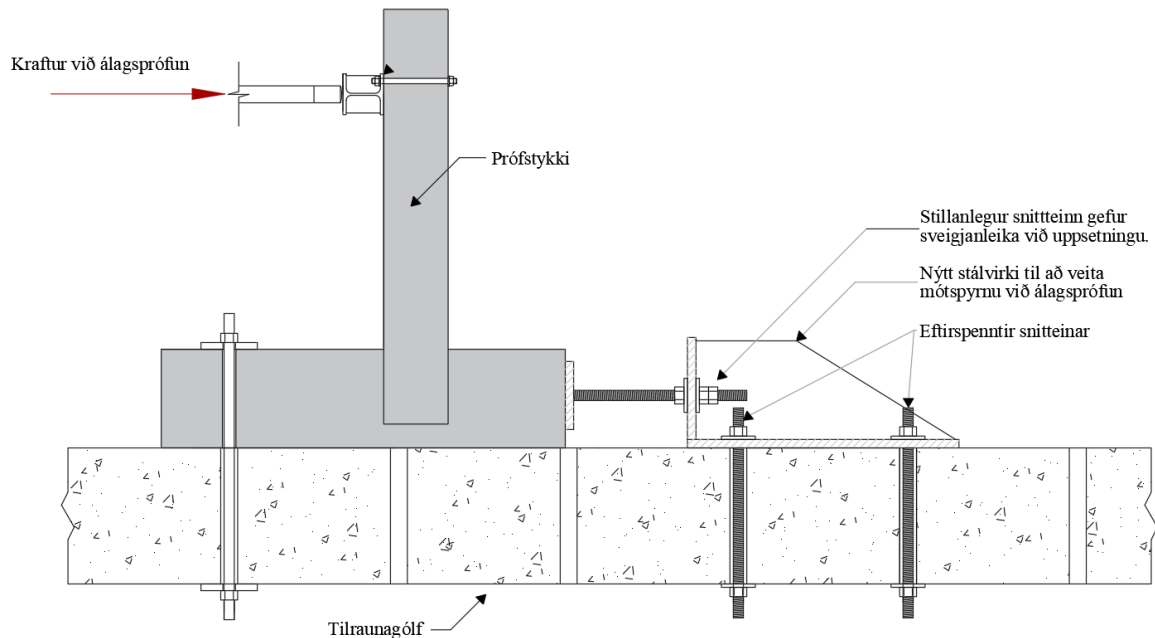
7.5 Tillögur að frekari rannsóknum

Í þessu verkefni hefur verið sýnt fram á að forsteyptur landstöpull er kostur í brúargerð. Áhugavert væri að rannsaka notkun tengingarinnar í:

- **Vegstokka** – Hugmyndin að vegstokkum hefur lengi verið í bígerð hérlandis en nú er hafin hönnun á slíkum stokk við Sæbraut. Við slíkar framkvæmdir fylgir mikil fyrirhöfn og kostnaður og er því stór kostur að geta flýtt framkvæmdinni. Ein leið til að gera það er að nýta forsteyptar lausnir sem og þessa sem tekin var fyrir í þessu verkefni. Jafnframt væri áhugavert að útfæra einfaldari lausn á samskeytum milli forsteyptra stöpuleininga en U-járn sem skarast og kambstáli sem er stungið í gegn.
- **Millistöpla brúa** – Áhugavert væri að skoða sömu tengingu og tekin var fyrir í þessu verkefni fyrir millistöplu brúa. Rannsaka þyrfti þá styrk tengingar fyrir hliðarálagi (hér samsíða veggnum) sem hún yrði fyrir í jarðskjálfta og jökulhlaupi.

Fyrir frekari tilraunir í framtíðinni þyrfti að útbúa lausn sem útilokar skrið prófstykkja við álagspröfun. Í tilraunum Franz og Rúnars var flotað undir prófstykki án þess að leggja plast fyrst á gólfíð.

Það reyndist vera nægilegt viðnám til að koma í veg fyrir skrið en erfitt var að losa prófstykki frá gólfi eftir tilraunir. Ein lausn væri því að sleppa plastlagi í kringum snittteina en þar er mesta viðnámið því þrýstingur er þar mestu milli prófstykkis og gólfs. Önnur leið væri að smíða aðra viðspyrnu á móti prófstykki. Viðspyrnan gæti verið fyrirferðaminni þar sem hún ber ekki vökvatjakk. Upplagt væri að hanna viðspyrnu með stillanlegu landi svo hún nýtist fyrir aðrar tilraunir í framtíðinni. Mynd 7-2 sýnir tillögu að nýrri viðspyrnu.



Mynd 7-2: Tillaga að nýrri viðspyrnu sem hindrar skrið prófstykkis.

Heimildir

Acharya, M., Duran, J., Ebrahimpour, A., Cantrell, J., & Mashal, M. (2023). A Fully Precast Pier System for Accelerated Bridge Construction in Seismic Regions. *Journal of Bridge Engineering*, 28(10), 04023068.

Berry, Michael, Myles Parrish og Marc Eberhard (2004). „PEER structural performance database user’s manual (version 1.0)“. Í: University of California, Berkeley.

Breki Þórðarson. (2023). *Forsteyptar brúareiningar- Brú yfir Laxá í Kjós*. Háskóli Reykjavíkur.

Brú yfir Jökulsá á Brú við Klausturhóla (2018). Þversnið af stoðvegg (teikning nr. K107) Hönnun: EFLA, Verkaupi: Vegagerðin

Building Seismic Safety Council (2003). „NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450)“.

Campbell Scientific

- (1974a). *4WFBS120*. Sótt: 2024-04-10. URL: <https://www.campbellsci.com/4wfbs120>.
- (1974b). *Data loggers*. Sótt: 2023-02-10. URL: <https://www.campbellsci.com/data-loggers>.
- (1974c). *GRANITE VOLT 108*. Sótt: 2024-04-10. URL: <https://www.campbellsci.com/volt108>.

Cheok, G. S., Stone, W. C., (1993). Overview of NIST Research on Seismic Performance of Moment Resisting Precast Concrete Beam-Column Joints Containing Post-Tensioning. U.S. Department of commerce.

Culmo, M. P., Lord, B., Huie, M., & Beerman, B. (2011). Accelerated bridge construction: Experience in design, fabrication and erection of prefabricated bridge elements and systems: Final manual (No. FHWA-HIF-12-013). United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology.

Franz Sigurjónsson. (2023). *Samanburður á tengingu staðsteypts og forsteypts stoðveggjar við staðsteypta undirstöðu*. Háskóli Íslands.

Haraldsson, O., Janes, T. M., Eberhard, M. O., & Stanton, J. F. (2013). *Precast bent system for high seismic regions: Laboratory tests of column-to-footing socket connections* (No. FHWA-HIF-13-039). United States. Federal Highway Administration.

Hieber, D. G., Wacker, J. M., Eberhard, M. O., & Stanton, J. F. (2005). *Precast concrete pier systems for rapid construction of bridges in seismic regions* (No. WA-RD 611.1). Seattle, Washington, USA: University of Washington.

ISO 15630-1:2010: Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire. Switzerland, International Organization for Standardization

ÍST EN 12390-3:2019: Testing of hardened concrete – Hluti 4: Compression strength – Specification for testing machines. Brussel, European Committee for Standardization.

ÍST EN 12390-4:2019: Testing of hardened concrete – Hluti 3: Compression strength of test specimens. Brussel, European Committee for Standardization.

ÍST EN 12390-6:2009: Testing of hardened concrete – Hluti 6: Tensile splitting strength of test specimens. Brussel, European Committee for Standardization.

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

ÍST EN 1991-1-1:2002: Eurocode 1: Álagsforsendur – Hluti 1-1: Actions on structures. 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 1993-1-8:2005: Eurocode 3: Hönnun stálvirkis – Hluti 1-8: Hönnun tenginga. Brussel, European Committee for Standardization.

ÍST EN 1993-2:2005: Eurocode 2: Hönnun steinsteypuvirkja - Hönnun og úfærslureglur. Brussel, European Committee for Standardization.

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

ÍST EN 206:2013: Steinsteypa – Tæknilýsing, eiginleikar, framleiðsla og samræmi. Brussel, European Committee for Standardization.

ÍST NS 3576-3:2012: Steel for the reinforcement of concrete. Brussel, European Committee for Standardization.

Khaleghi, B., Schultz, E., Seguirant, S., Marsh, L., Haraldsson, O., Eberhard, M., & Stanton, J. (2012). *Accelerated bridge construction in Washington State: From research to practice*. PCI J, 57(4), 34-49.

Ljungkrantz, C., Möller, G. & Petersons, N. (1994). *Betonghandbok*. (2. Útgáfa). AB Svensk Byggtjänst.

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.

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.

Pang, J. B., Steuck, K. P., Cohagen, L., Eberhard, M. O., & Stanton, J. F. (2008). *Rapidly constructible large-bar precast bridge-bent connection* (No. WA-RD 684.2).

Rúnar Steinn Smáráson. (2022). *Þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls*. Háskóli Reykjavíkur.

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

Vegagerðin. (2018). *Reglur um hönnun brúa*. (2. Útgáfa).

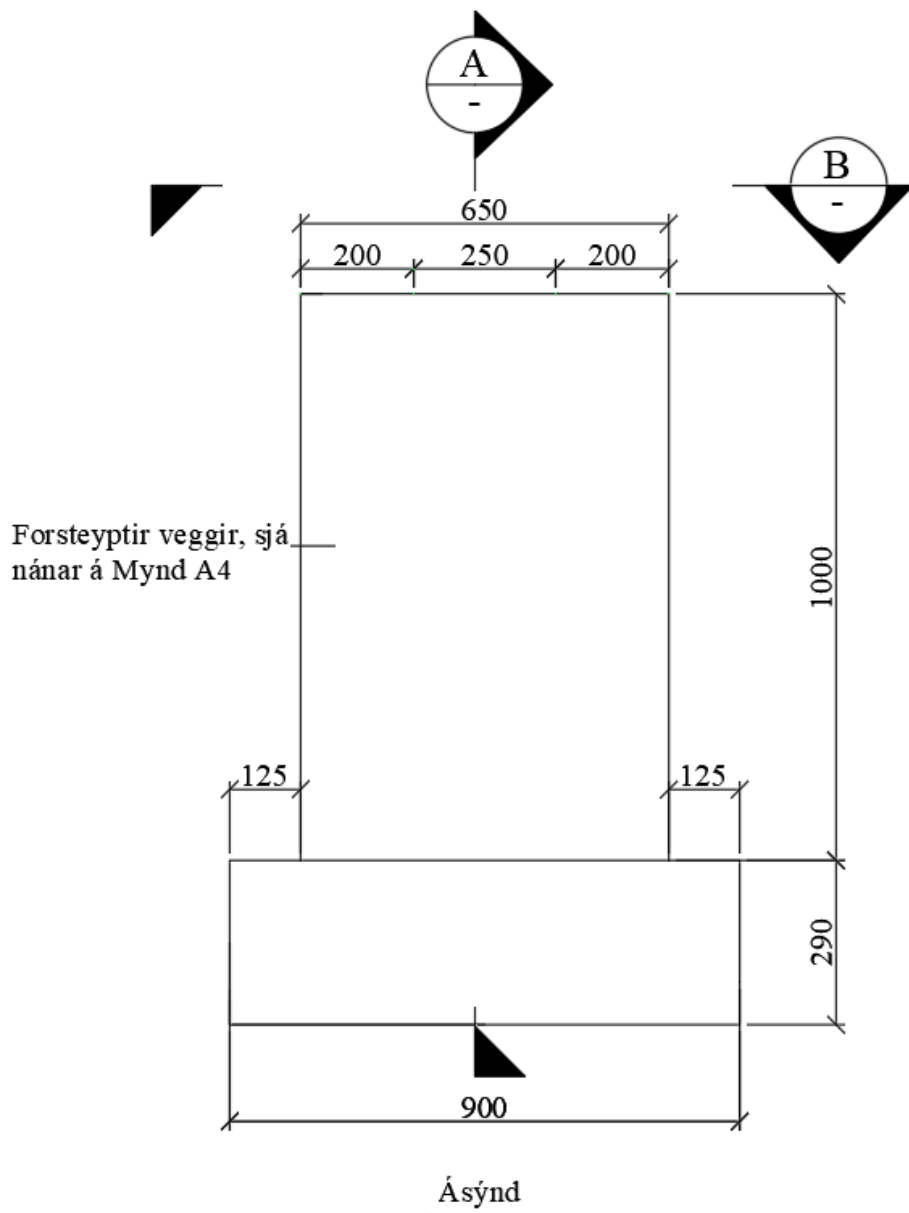
Wacker, J. M., D. G. Hieber, M. O. Eberhard, and J. F. Stanton. "Design of Precast Concrete Piers for Rapid Construction in Seismic Regions." (2005).

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

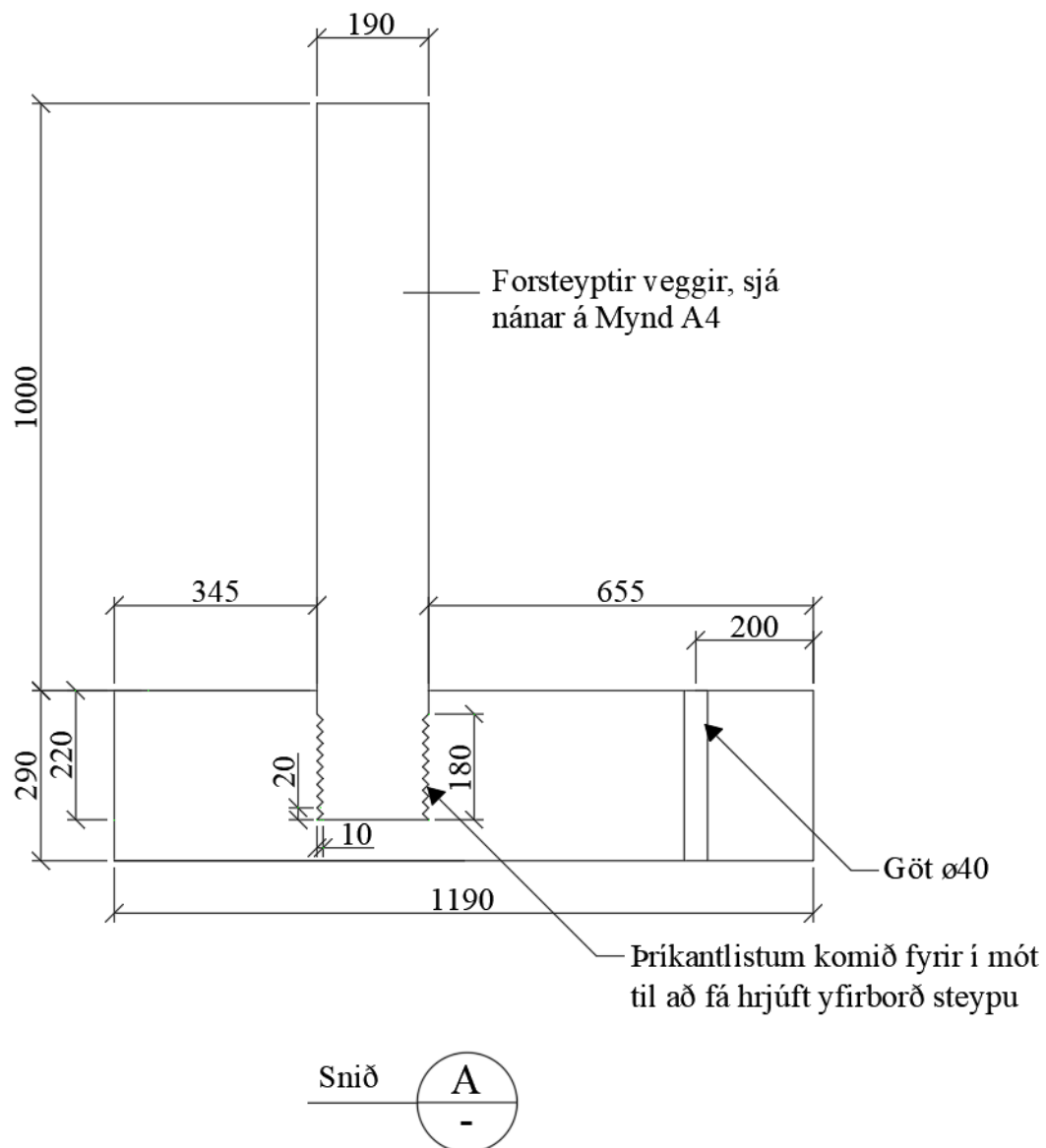
Wight, James K og MacGregor, James G. (2012). *Reinforced concrete: mechanics and design*. (6. útgáfa). Pearson.

Viðauki A: Teikningar

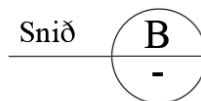
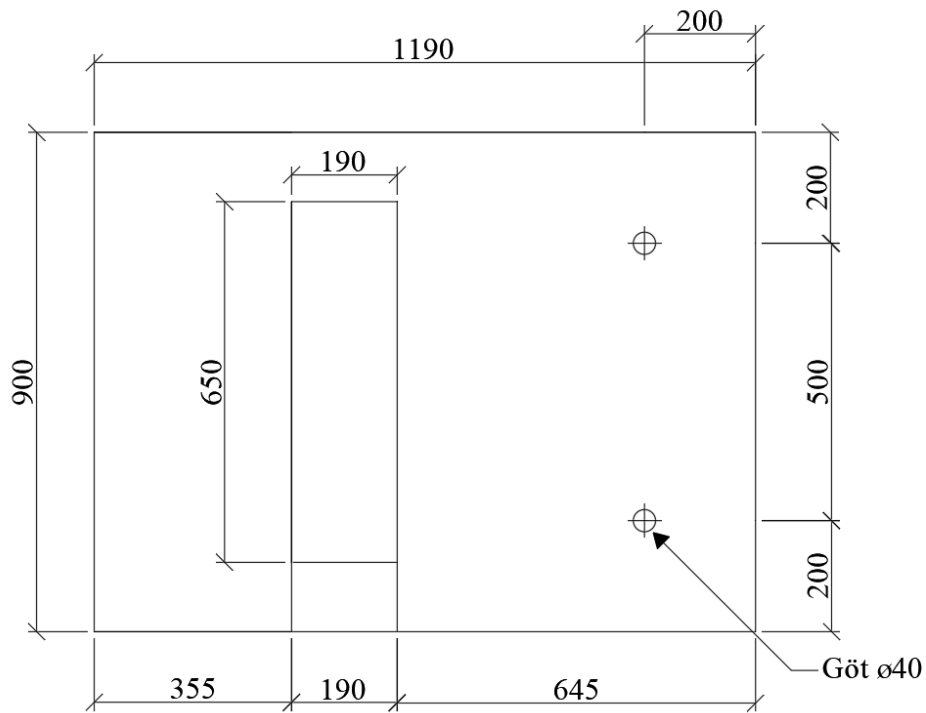
Steypumál prófstykkja



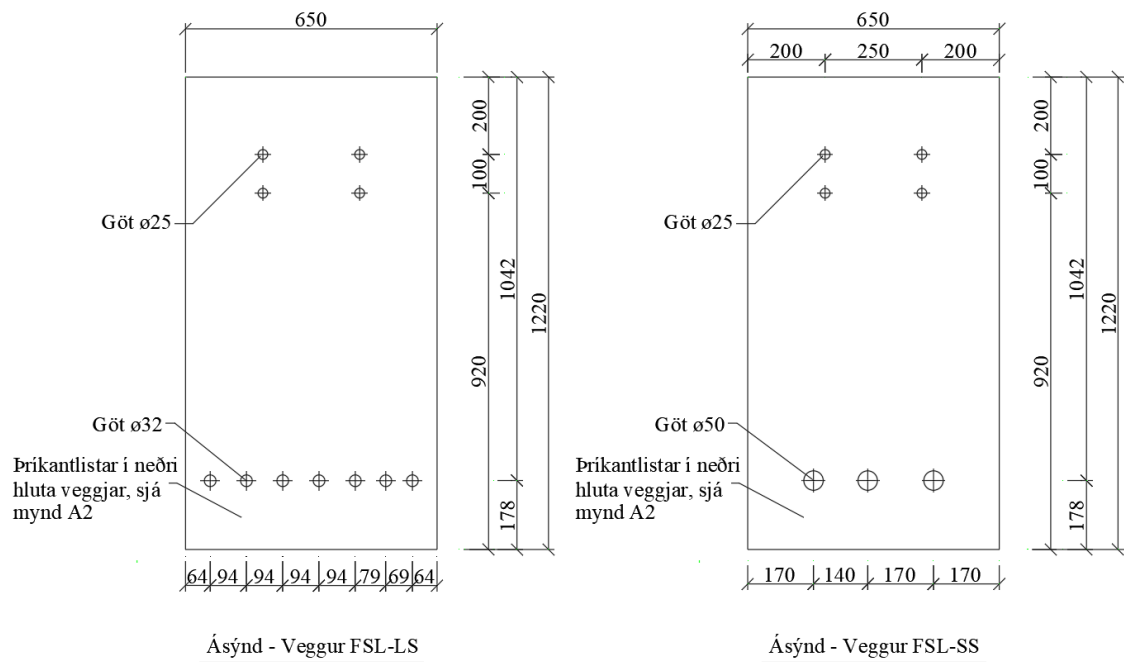
Mynd A 1: Steypumál fyrir prófstykki FSL-SS og FSL-LS. Ásýnd framan á prófstykki. Öll mál eru í mm.



Mynd A 2: Steypumál fyrir prófstykki FSL-SS og FSL-LS. Snið A, hliðarásýnd. Öll mál eru í mm.

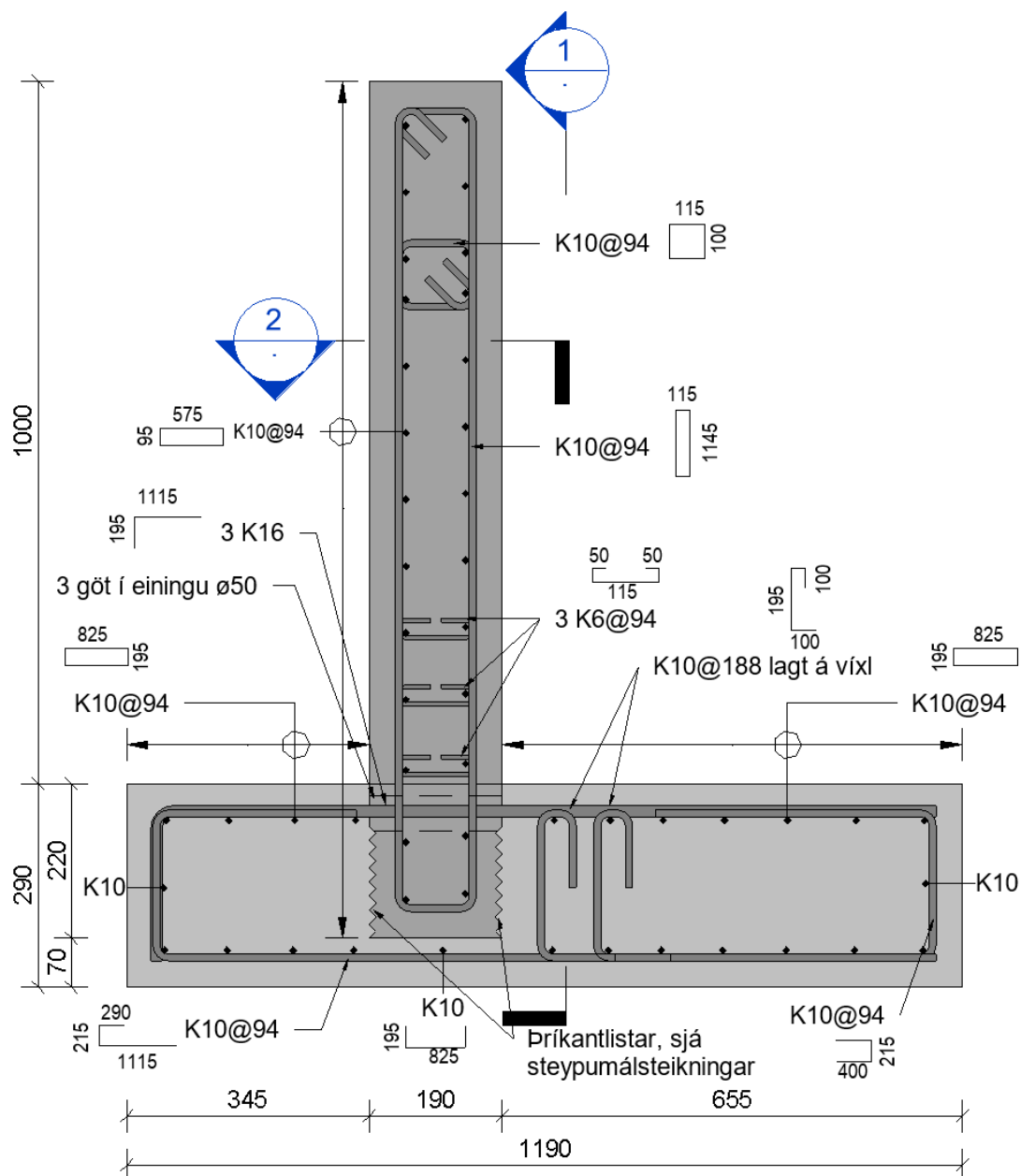


Mynd A 3: Steypumál fyrir prófstykki FSL-SS og FSL-LS. Snið B, ásýnd ofan á. Öll mál eru í mm.

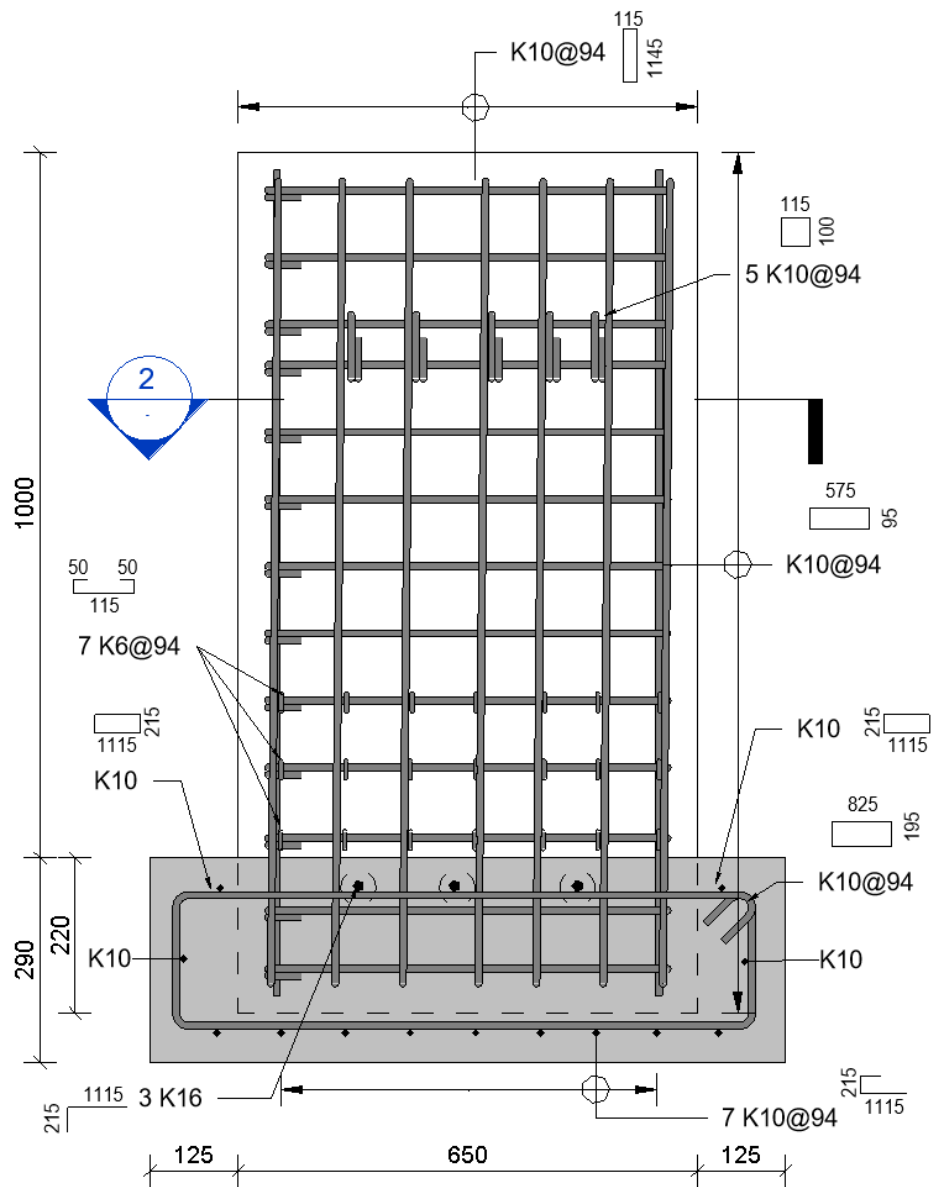


Mynd A 4: Steypumál forsteyptra veggja FSL-SS og FSL-LS. Ásýnd framan á. Öll mál eru í mm.

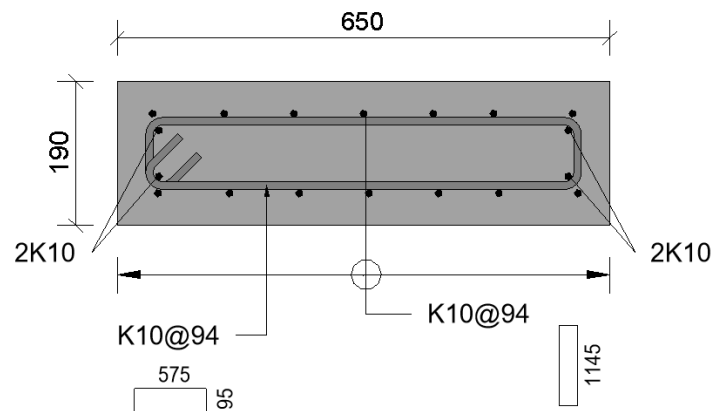
Járnateikningar: FSL-SS



Mynd A 5: Járnþending FSL-SS, hliðarásýnd. Öll mál í mm.

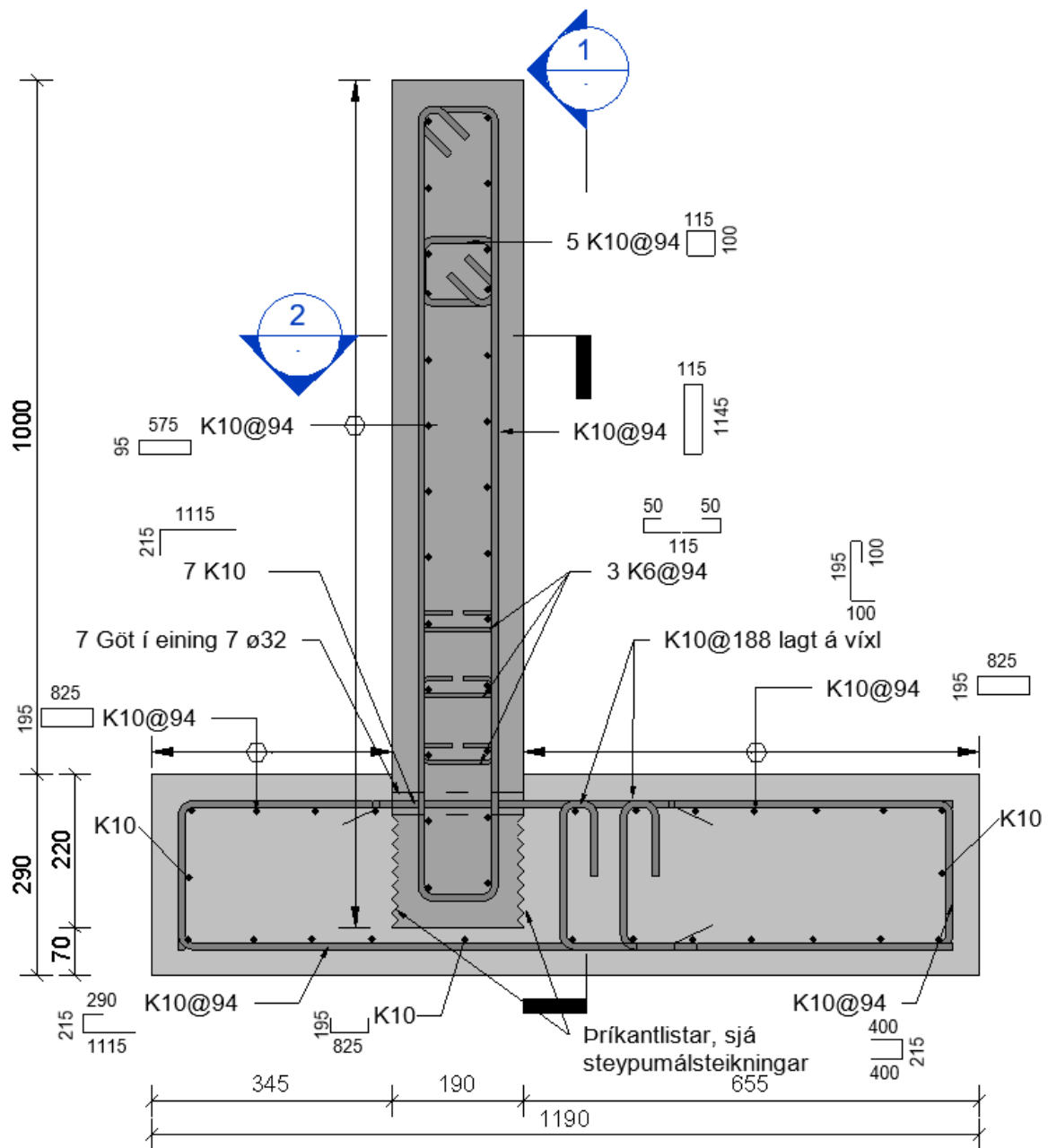


Mynd A 6: Járnending FSL-SS, snið 1. Öll mál í mm.

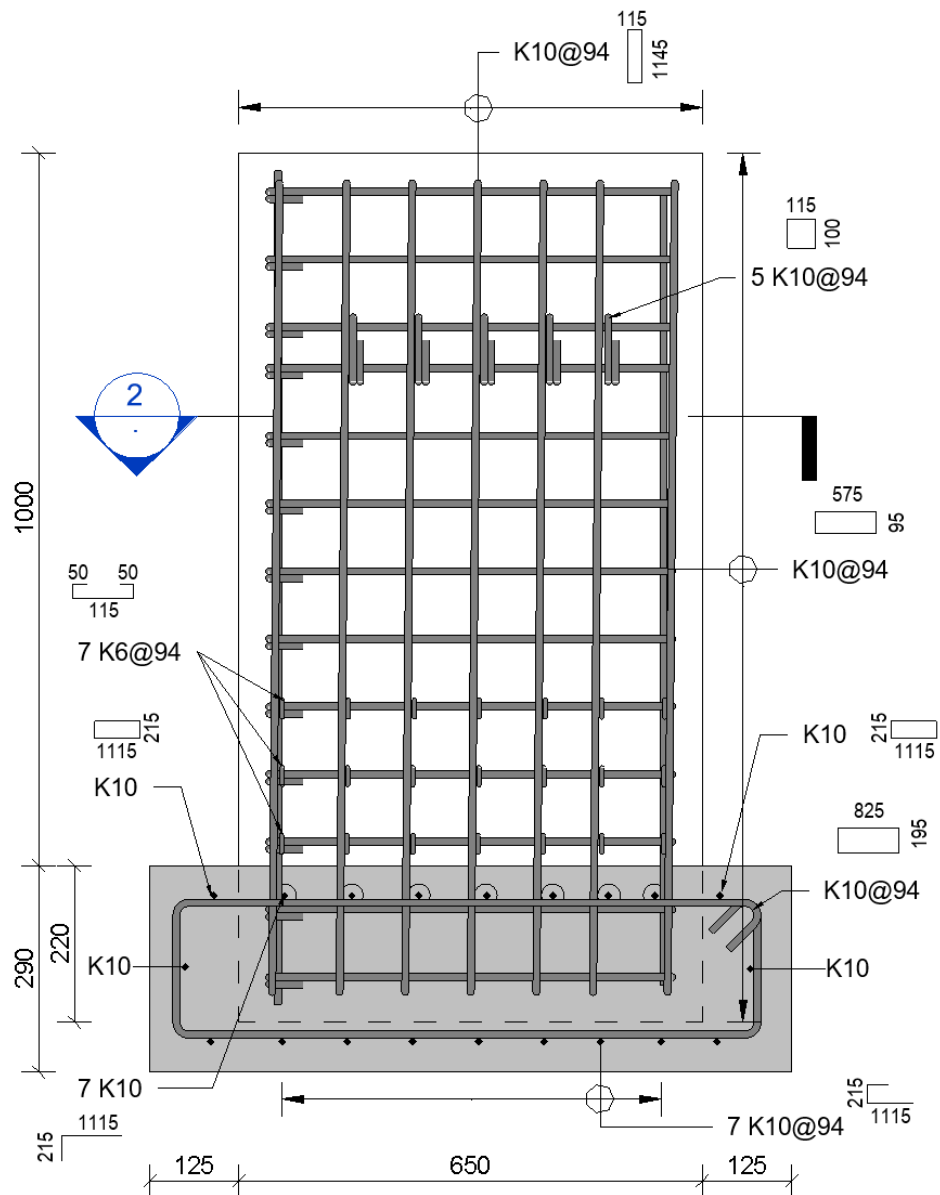


Mynd A 7: Járnending FSL-SS, snið 2. Öll mál í mm.

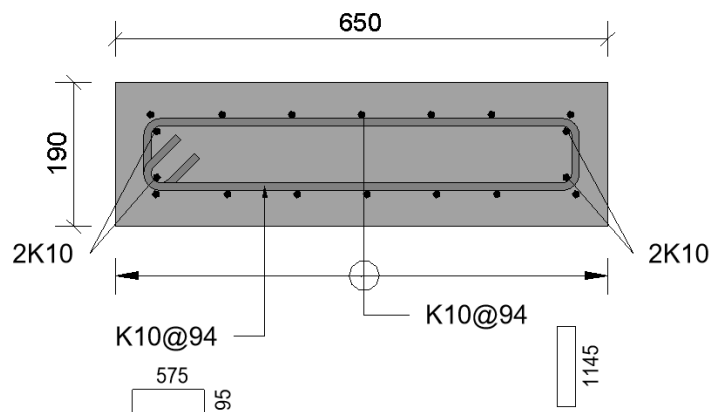
Járnateikningar: FSL-LS



Mynd A 8: Járbending FSL-LS, hliðarásýnd. Öll mál í mm.



Mynd A 9: Járnbending FSL-LS, snið 1. Öll mál í mm.



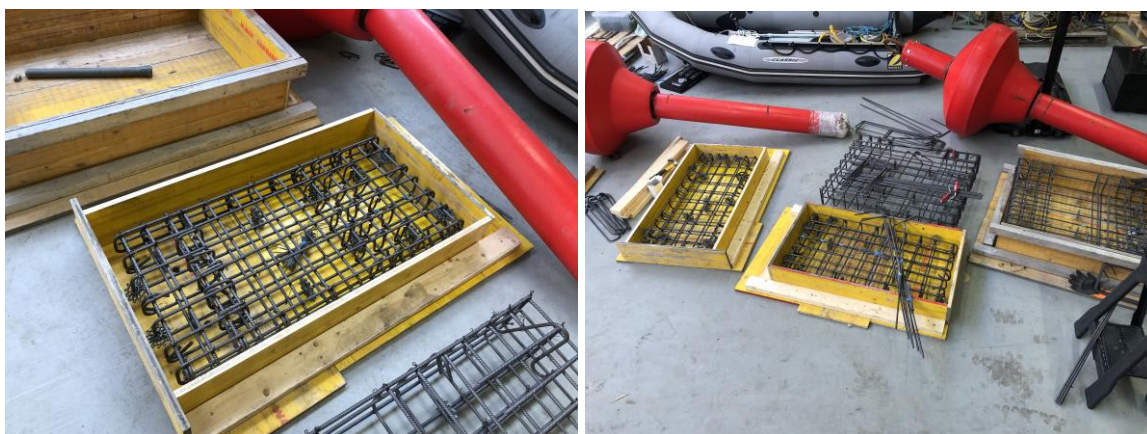
Mynd A 10: Járnbending FSL-LS, snið 2. Öll mál í mm.

Viðauki B: Smíði prófstykkja

Hér koma myndir frá smíði og steypun prófstykkja. Steypumót og járnagrind landstöpla voru sett saman á verkstæði Vegagerðarinnar. Steypuvinna fór fram hjá BM Vallá á Akranesi.



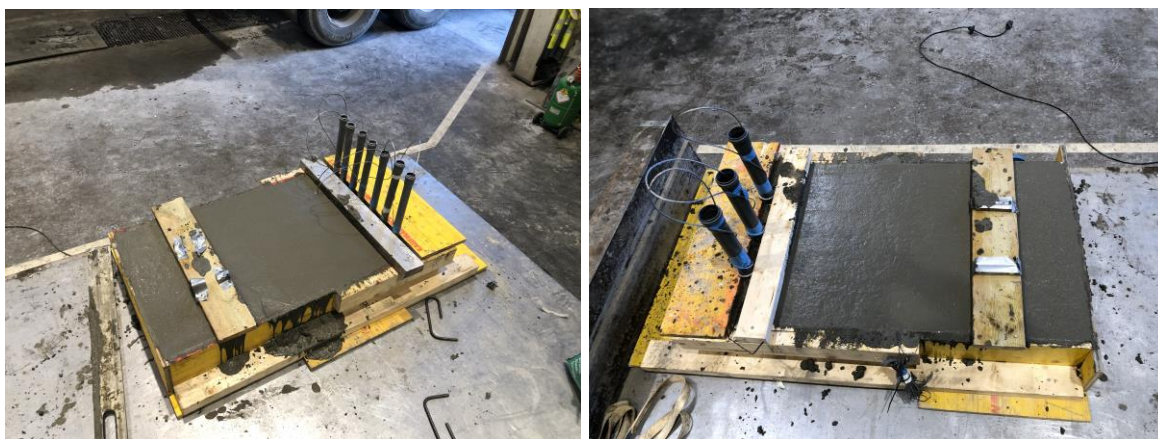
Mynd B 1: Smíði steypumóta fyrir FSL-LS í vinnslu.



Mynd B 2: Járnagrindur fyrir bæði prófstykki í vinnslu á verkstæðisgólfi Vegagerðarinnar.



Mynd B 3: Steypumót veggja klár fyrir steypuvinnu. Hér sitja þau á gólfi BM Vallarétt fyrir steypuvinnu.



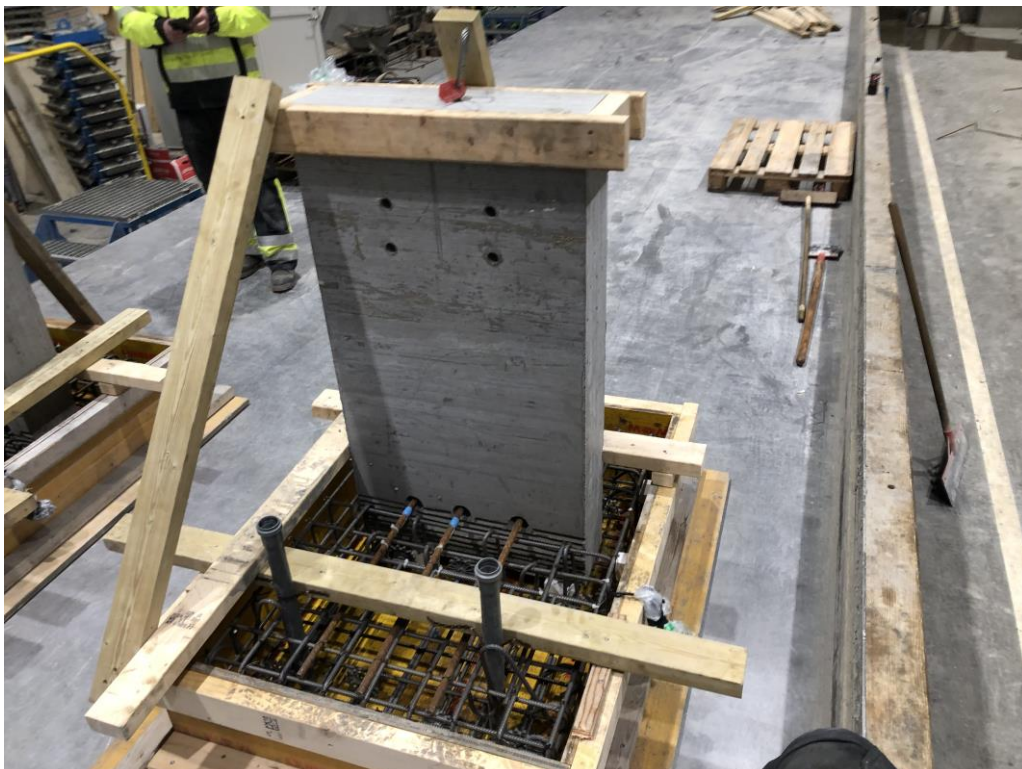
Mynd B 4: Stöpulveggir eftir steypuvinnu.



Mynd B 5: Stöpulveggur FSL-LS eftir fráslátt steypumóta. Verið er að reisa vegg og gera hann kláran fyrir næstu steypuvinnu.



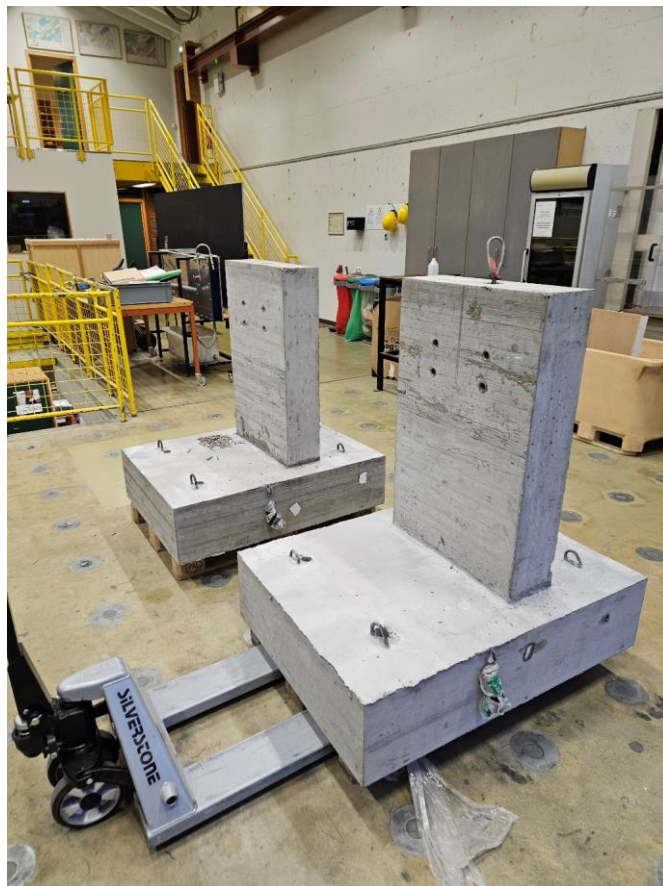
Mynd B 6: Stöpulveggur FSL-LS eftir að búið var að koma fyrir K10 járnum í gegnum göt. Verið er að hífa vegg ofan í steypumót sökkuls.



Mynd B 7: Stöpulveggur FSL-SS eftir að búið er að koma honum fyrir í steypumótum sökkuls.



Mynd B 8: Prófstykki FSL-SS eftir steypuvinnu. Einnig má sjá hluta prófstykkis FSL-LS eftir steypuvinnu vinstra megin á mynd.



Mynd B 9: Landstöplar FSL-SS og FSL-LS komnir á gólf VRIII, klárir til undirbúningsvinnu álagsprófa.

Viðauki C: Efnisprófanir

Mælingar á ferskri steypu

Gerðar voru mælingar á nýblandaðir steypu í BM-Vallá fyrir báða steypudaga. Tafla

Tafla C 1: Niðurstöður mælinga á ferskri steypu.

Hluti	Sigmál [cm]	Loft [%]	Hiti [°C]	V/S tala
Sökkull	10	6,8	16	0,31
Veggur	12	7,2	17	0,31

Steypustyrkur - Þrýstipól

Þrýstipól steypusívalningar var ákvarðað í þrýstiprófi samkvæmt ÍST EN 12390-3, framkvæmt í BM-Vallá og og Eflu Verkfræðistofu. Tafla C 2 sýnir niðurstöður þrýstiprófana sem framkvæmd voru hjá BM Vallá eftir 28 og 90 daga. Þeir sívalningar voru geymdir í vatnsbaði. Þrýstiprof framkvæmd á prófdögum voru gerð á rannsóknarstofu Eflu og niðurstöður þess má sjá í Töflum C3 og C4.

Tafla C 2: Þrýstistyrkur steypusívalninga eftir 28 og 90 daga.

Hluti	Styrkur [MPa]	Dagur	Rúmþyngd sívalnings [kg/m ³]
Sökkull	50,6	28	2430
	57,2	28	2437
	54,1	28	2465
	74,2	90	2443
	64,2	90	2443
	68,9	90	2446
Veggur	68,2	28	2535
	64,6	28	2522
	67,6	28	2545
	88,2	90	2519
	81,7	90	2519

Tafla C 3: Þrýstistyrkur steypusívalninga á prófdegi FSL-SS (fyrri prófdagur).

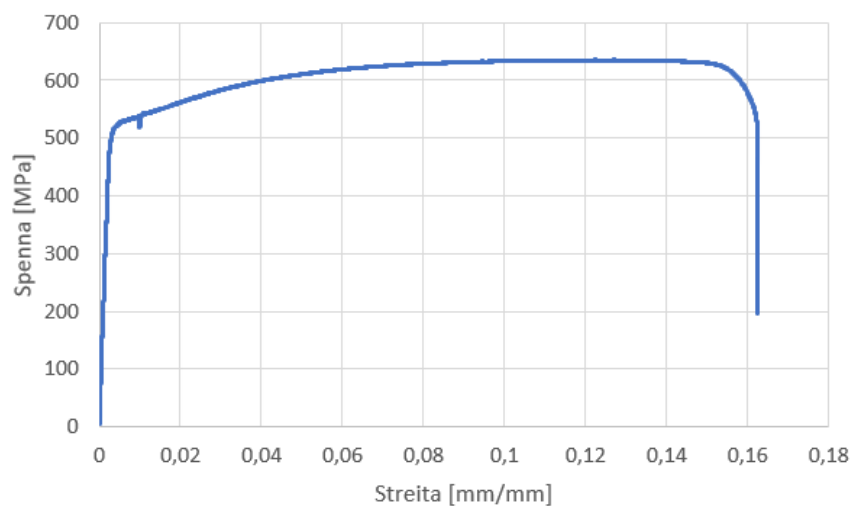
Hluti	Styrkur [MPa]	Dagur	Rúmþyngd sívalnings [kg/m ³]
Sökkull	73,9	62	2503
Veggur	63,1	61	2408

Tafla C 4: Þrýstistyrkur steypusívalninga á prófdegi FSL-LS (seinni prófdagur).

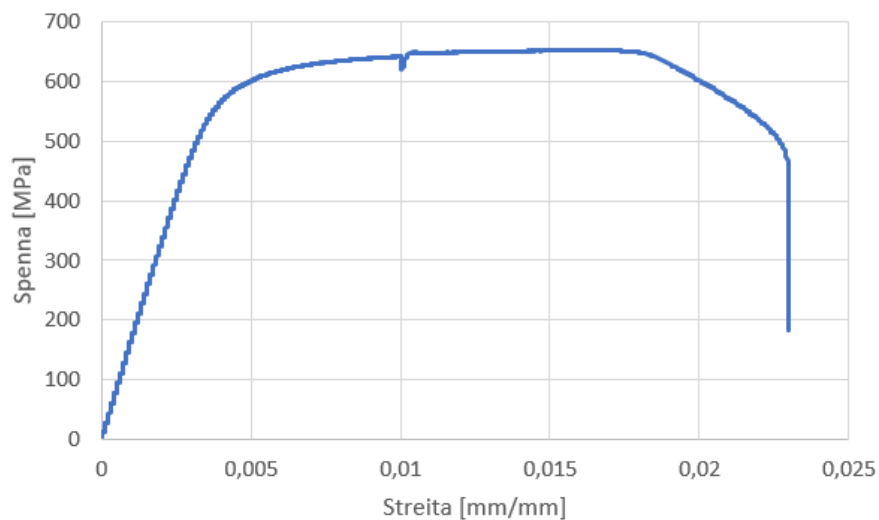
Hluti	Styrkur [MPa]	Dagur	Rúmþyngd sívalnings [kg/m ³]
Sökkull	74,5	69	2494
Veggur	58,9	68	2400

Togþolspróf kambstáls

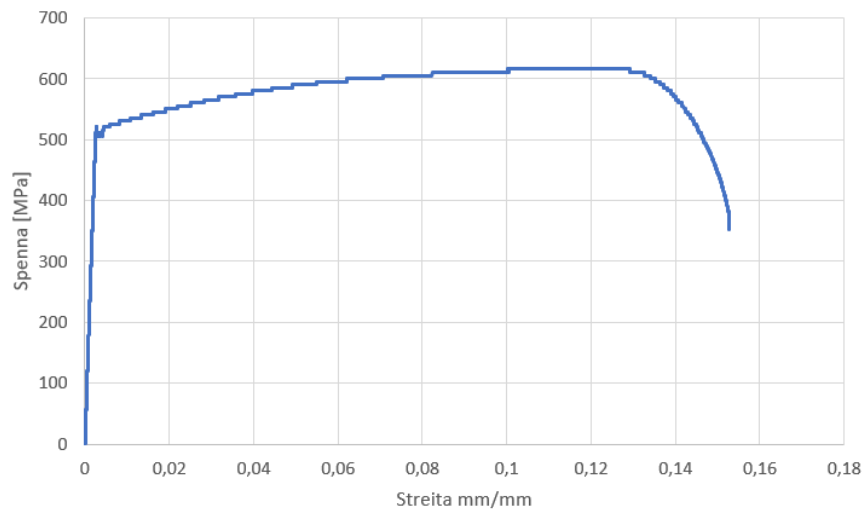
Myndir C1-C3 sýna niðurstöður togþolsprófa sem spennu sem fall af streitu. Togþolspróf voru framkvæmd skv. ISO-15630-1.



Mynd C 1: Togþolspróf K6 kambstáls, spennu á móti streitu ferill.



Mynd C 2: Togþolspróf K10 kambstáls, spennu á móti streitu ferill.



Mynd C 3: Togþolspróf K16 kambstáls, spenna á móti streitu ferill.

Viðauki D: Álagspróf

Álagspróf FSL-SS

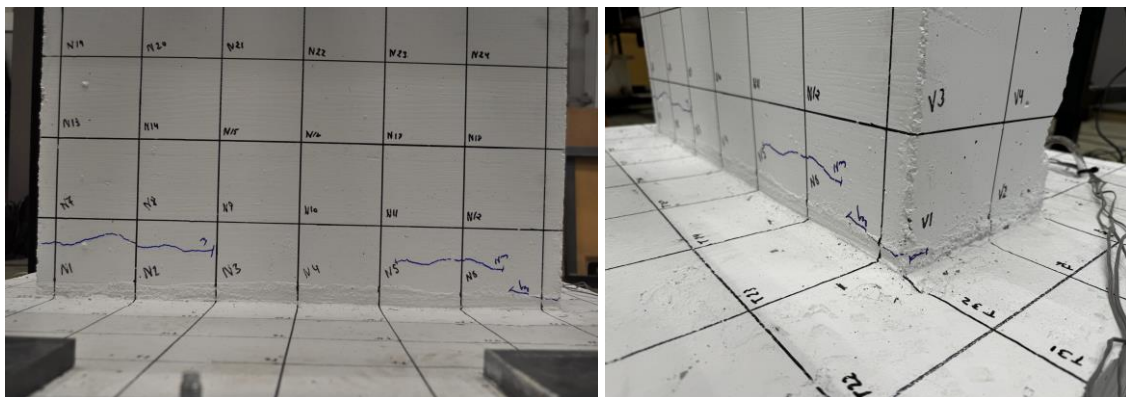
Hér má sjá myndir af prófstykki FSL-SS frá öllum álagslotu í prófun. Einnig má sjá myndir frá 12. lotu, viðbótarlotu. Markmiðsfærsla var þá 120mm.



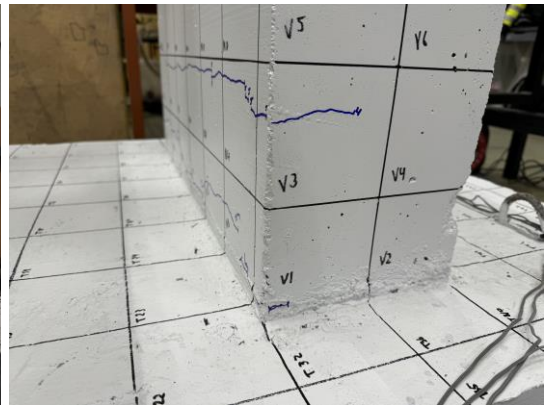
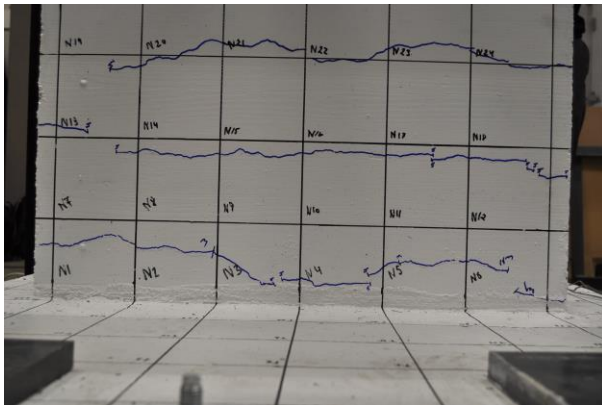
Mynd D 1: FSL-SS eftir lotu 1 (hlutfallsfærsla 0,11%). Engar sjáanlegar skemmdir.



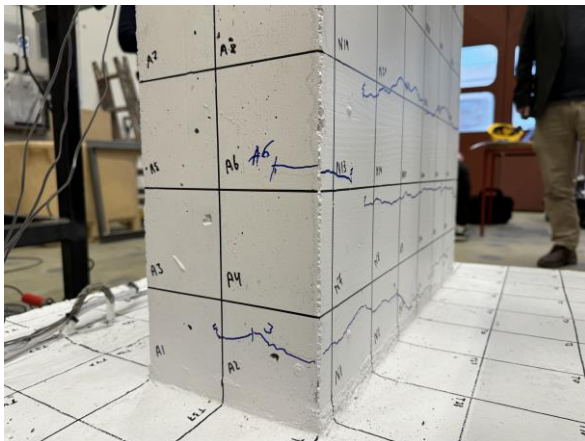
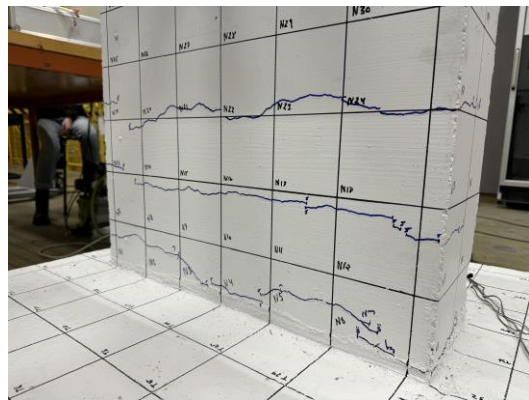
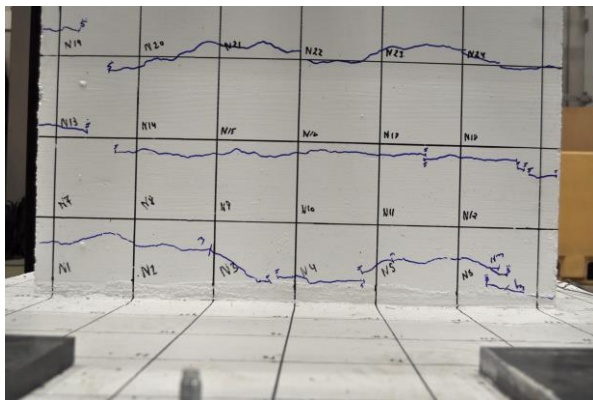
Mynd D 2: FSL-SS eftir lotu 2 (hlutfallsfærsla 0,16%). Engar sjáanlegar skemmdir.



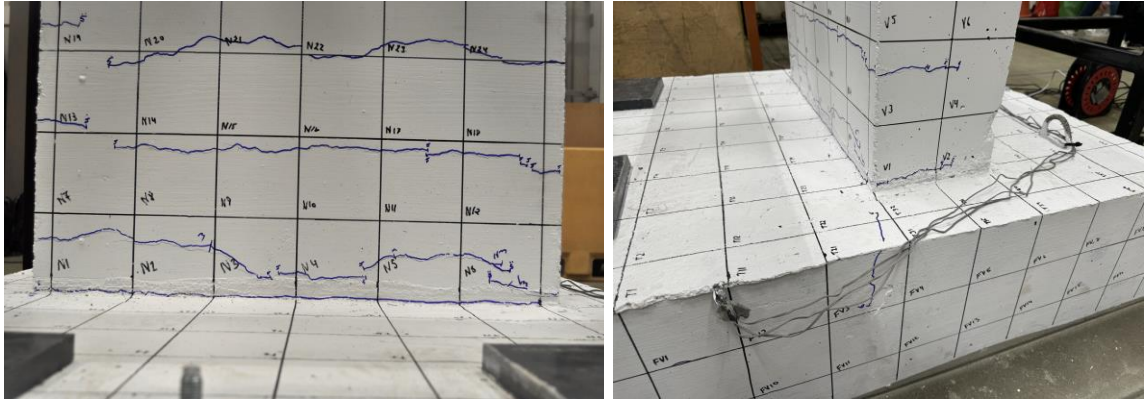
Mynd D 3: FSL-SS eftir lotu 3 (hlutfallsfærsla 0,30%). Hárfínar sprungur taka að myndast í 1-8cm hæð frá efri brún sökkuls.



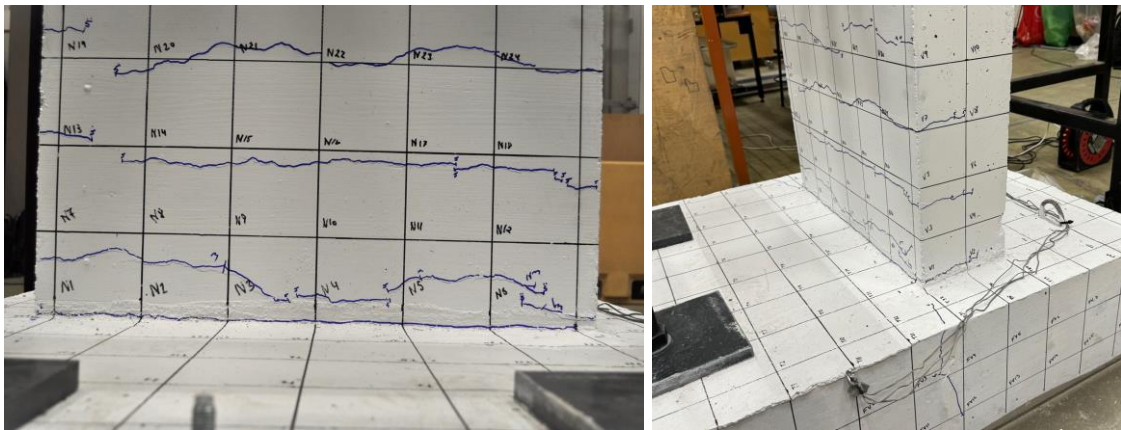
Mynd D 4: : FSL-SS eftir lotu 4 (hlutfallsfærsla 0,51%). Hárfinar sprungur halda áfram að myndast ofar á vegg. Fyrsta sprungan neðarlega á vegg teygir sig þvert yfir vegginn. Ný sprunga nær u.þ.b. 8cm inn á vesturhlið veggjar.



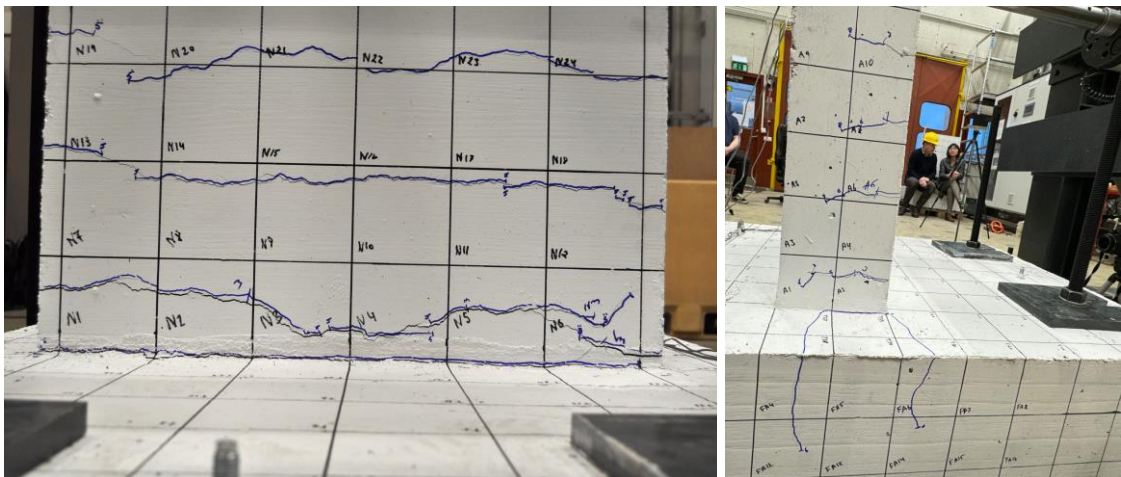
Mynd D 5: : FSL-SS eftir lotu 5 (hlutfallsfærsla 0,73%). Sprungur halda áfram að teygja sig á austur- og vesturhlið veggjar. Engar sjáanlegar skemmdir á sökkli.



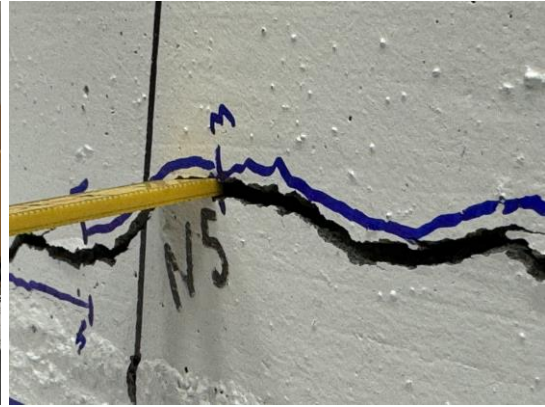
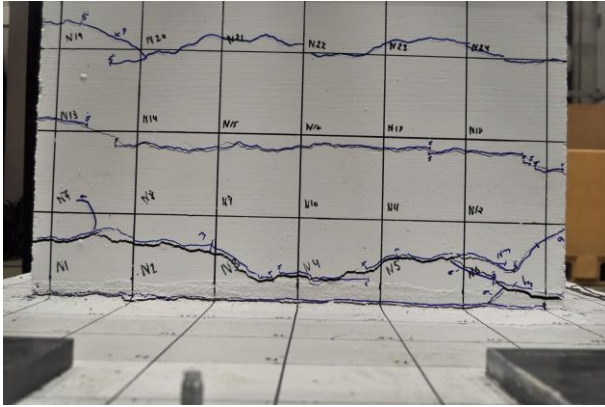
Mynd D 6: : FSL-SS eftir lotu 6 (hlutfallsfærsla 1,01%). Ný sprunga myndast við samskeyti sökkuls og veggjar. Nýjar sprungur myndast frá vegg í sökkul á austur- og vesturhlíð.



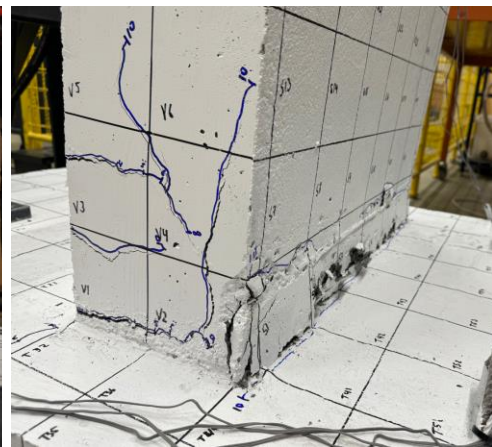
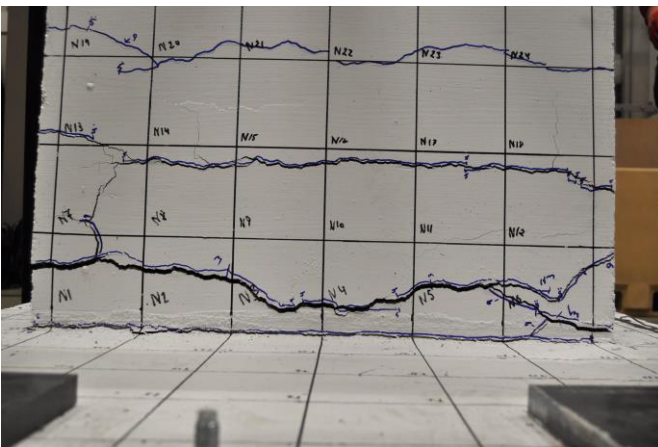
Mynd D 7: FSL-SS eftir lotu 7(hlutfallsfærsla 1,62%). Sprunga í sökkli tekur að lengjast. Ný sprunga ofarlega í vegg, u.þ.b. 45cm fyrir ofan sökkul.



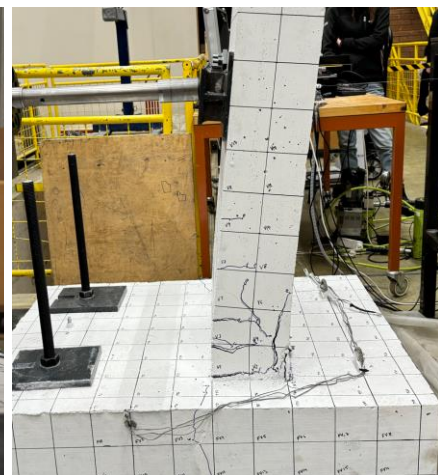
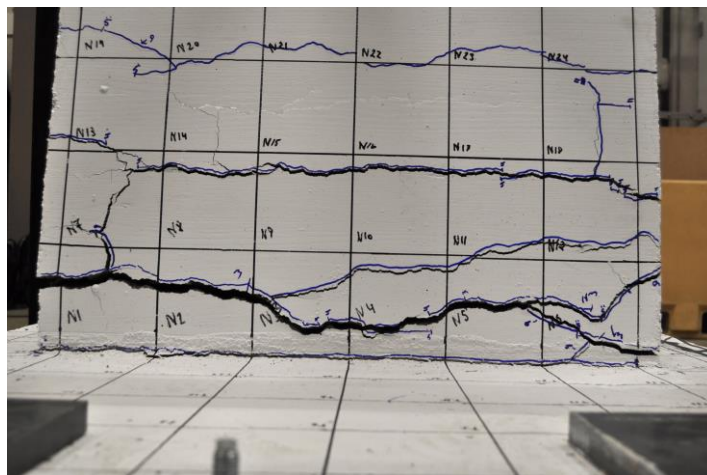
Mynd D 8: : FSL-SS eftir lotu 8 (hlutfallsfærsla 2,70%). Sprungur lengjast á veggliðum. Stærsta sprungustærð er um 1,1mm á sprungu 5 cm fyrir ofan sökkul.



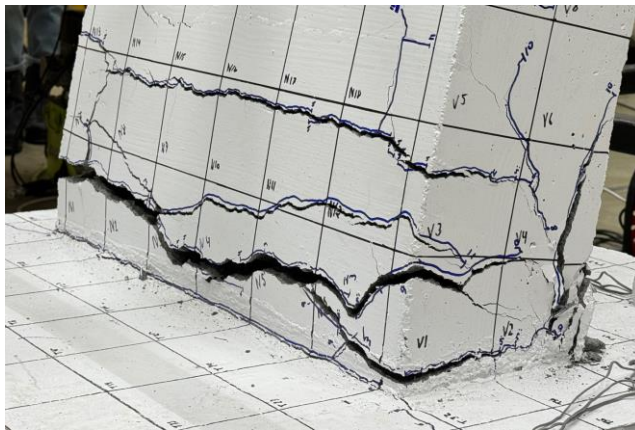
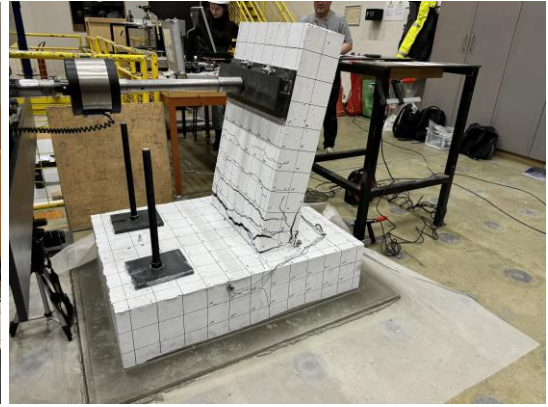
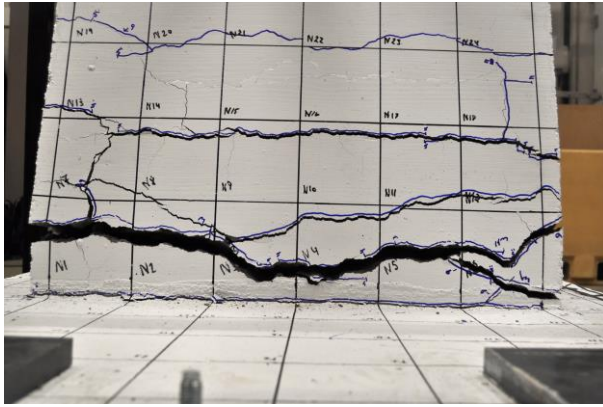
Mynd D 9: FSL-SS eftir lotu 9 (hlutfallsfærsla 4,34%). Stærsta sprungustærð er um 3mm á sprungu 5 cm fyrir ofan sökkul.



Mynd D 10: FSL-SS eftir lotu 10 (hlutfallsfærsla 6,95%). Flögnun hefst neðanverðu á suðurhlíð veggjar. Flögnun nær um 10cm upp vegginn.



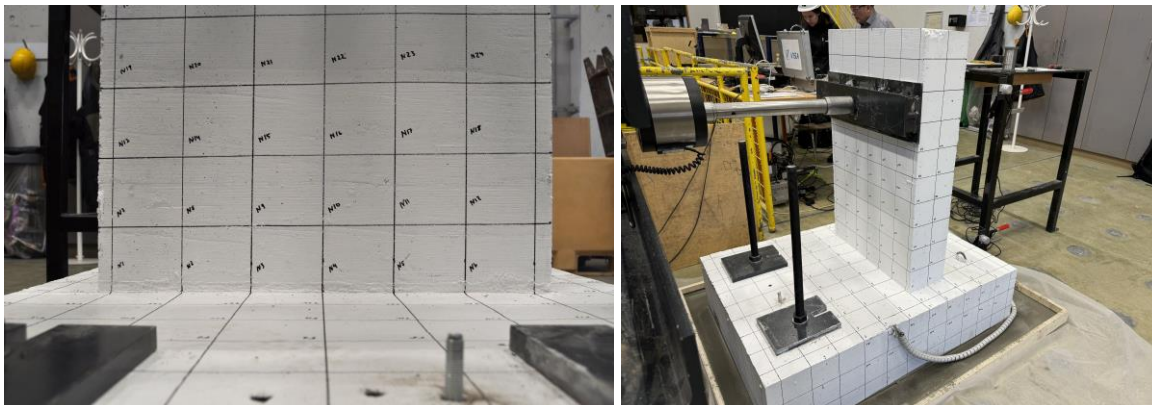
Mynd D 11: FSL-SS eftir lotu 11 (hlutfallsfærsla 10,77%). Áberandi formbreyting stöpulveggjar. Stærsta sprunga um 13-15mm.



Mynd D 12: FSL-SS eftir lotu 12 (aukalota: 120mm færsla, 16,4% markmiðshlutfallsfærsla). Þrjú lóðrétt kambstál í vegg slitnuðu við lotuna.

Álagspróf FSL-LS

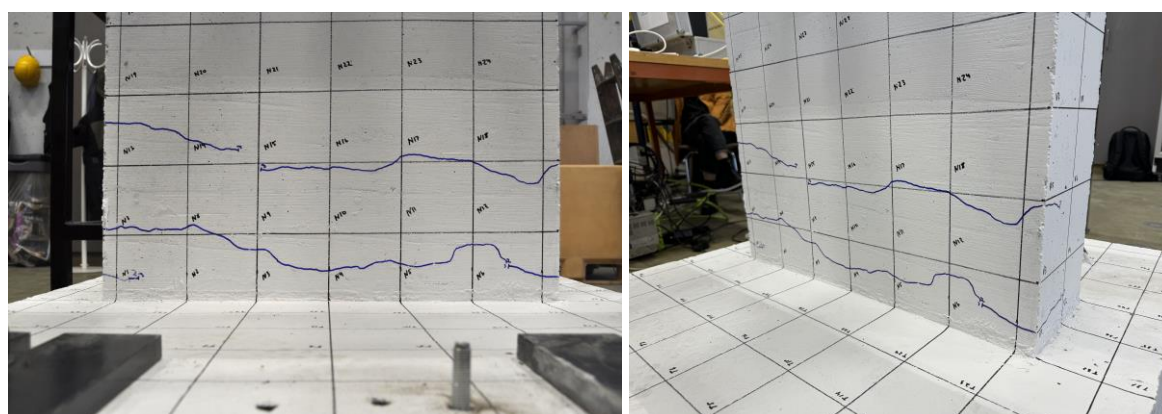
Hér má sjá myndir af prófstykki FSL-LS frá öllum álagslotum við prófun.



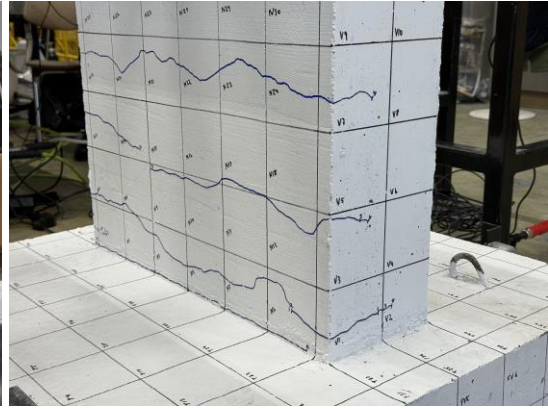
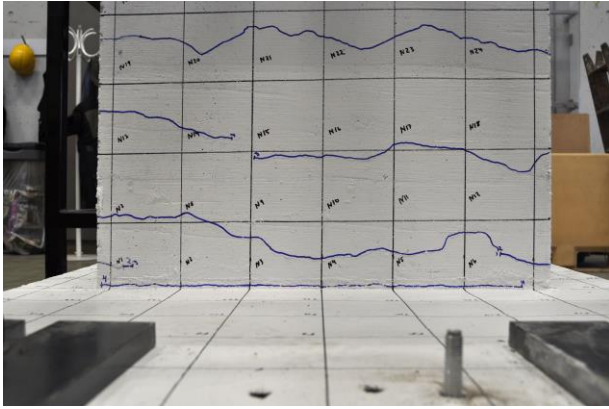
Mynd D 13: FSL-LS eftir lotu 1 (hlutfallsfærsla 0,10%). Engar sjáanlegar skemmdir.



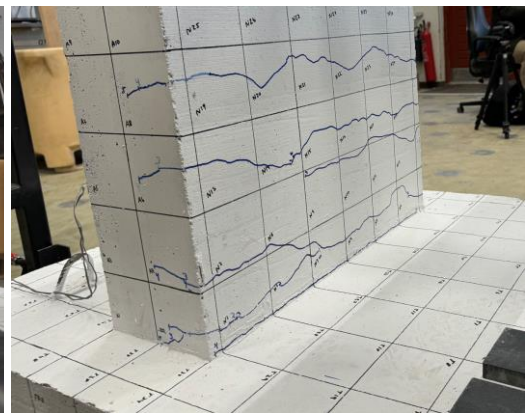
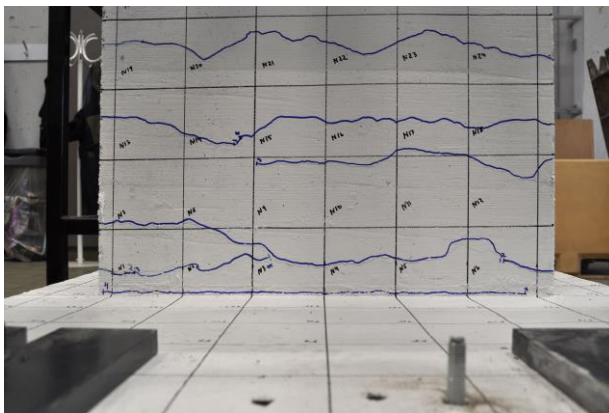
Mynd D 14: FSL-LS eftir lotu 2 (hlutfallsfærsla 0,14%). Hárfinar sprungur myndast á vegghornum norðurhliðar.



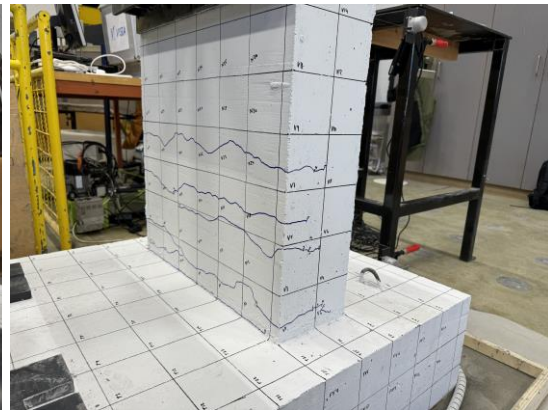
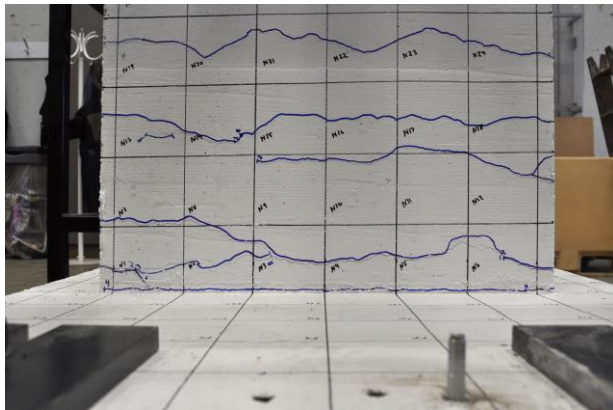
Mynd D 15: FSL-LS eftir lotu 3 (hlutfallsfærsla 0,27%). Hárfinar sprungur teygja sig þvert yfir vegg í um 5 og 20cm hæð.



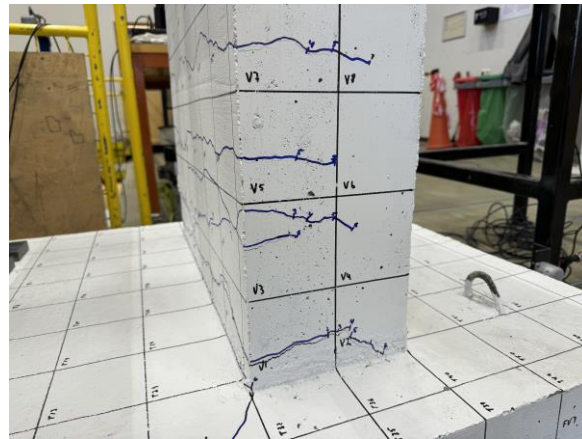
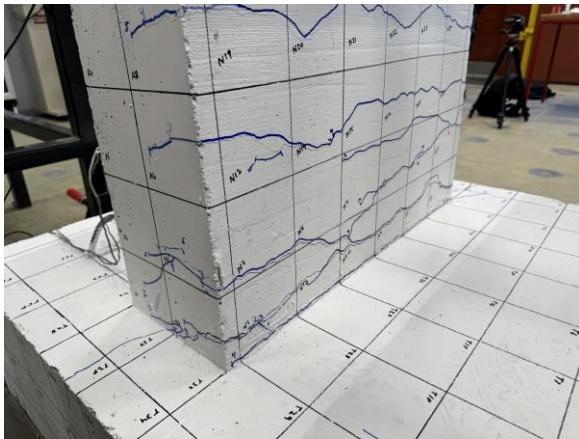
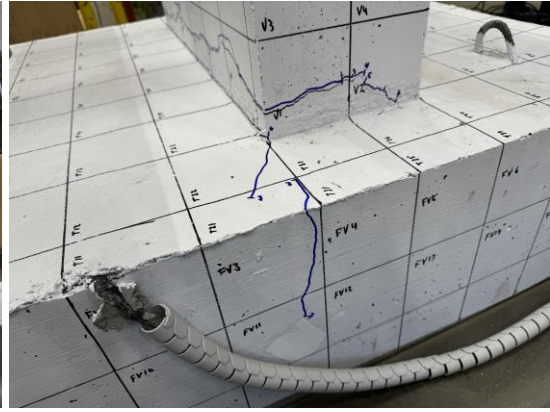
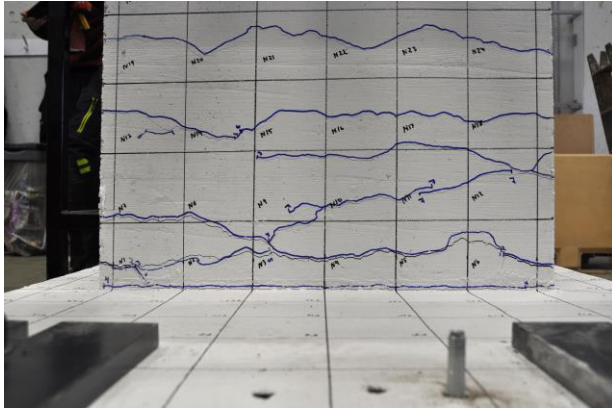
Mynd D 16: FSL-LS eftir lotu 4 (hlutfallsfærsla 0,48%). Ný sprunga myndast ofarlega á vegg og við samskeyti sökkuls og veggjar á norðurhlið.



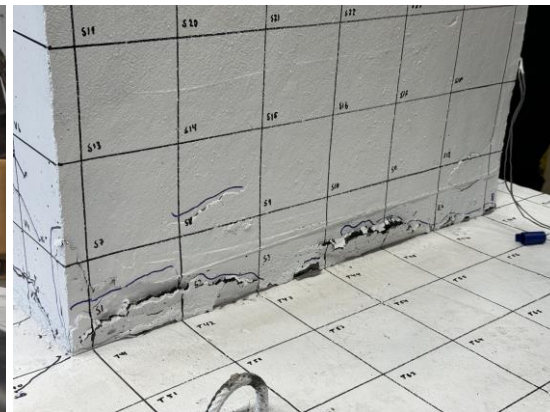
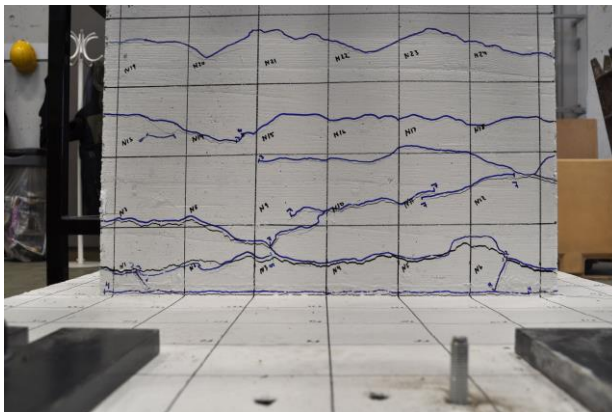
Mynd D 17: FSL-LS eftir lotu 5 (hlutfallsfærsla 0,83%). Núverandi sprungur lengjast og nýjar hárfínar myndast. Mesta sprunguvídd er 0,35mm í sprungu 20cm frá yfirborði sökkuls.



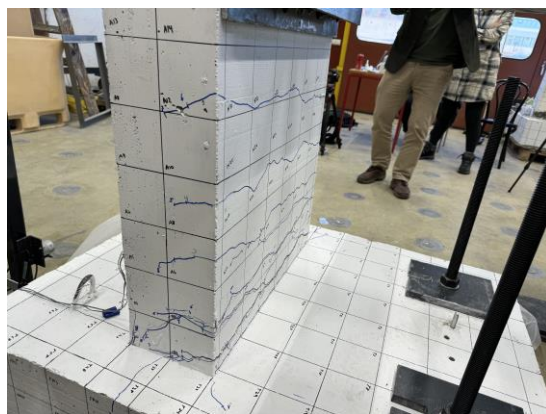
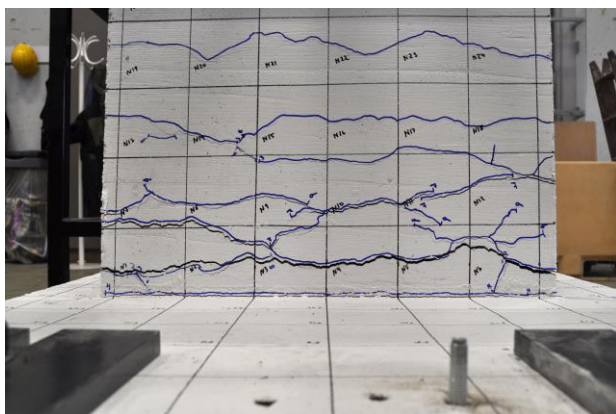
Mynd D 18: FSL-LS eftir lotu 6 (hlutfallsfærsla 1,35%). Mesta sprunguvídd er 0,5mm í sprungu 20cm frá yfirborði sökkuls.



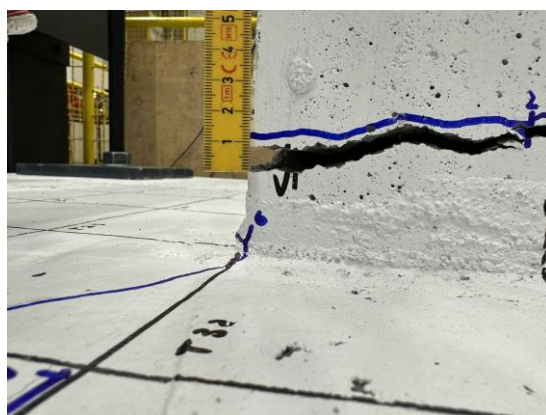
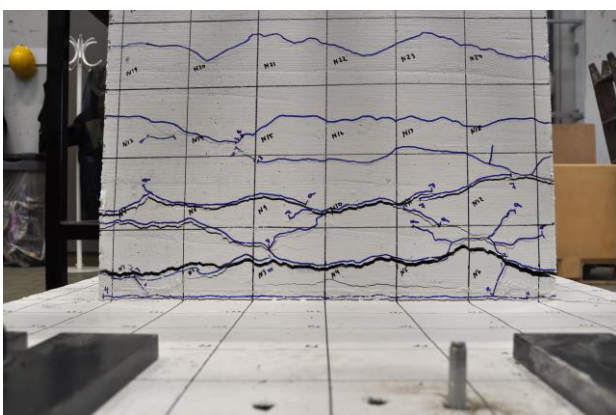
Mynd D 19: FSL-LS eftir lotu 7 (hlutfallsfærsla 2,38%). Nýjar myndast frá vegg í sökkul. Sprungur lengjast víða.



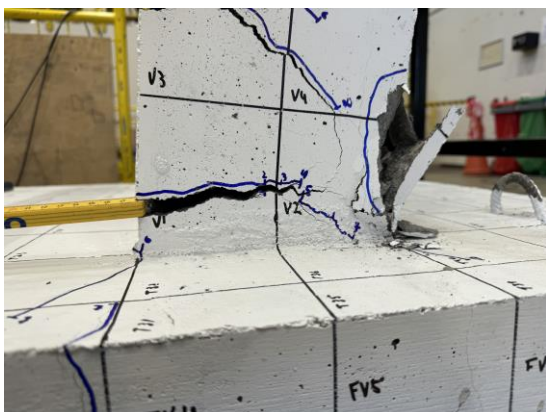
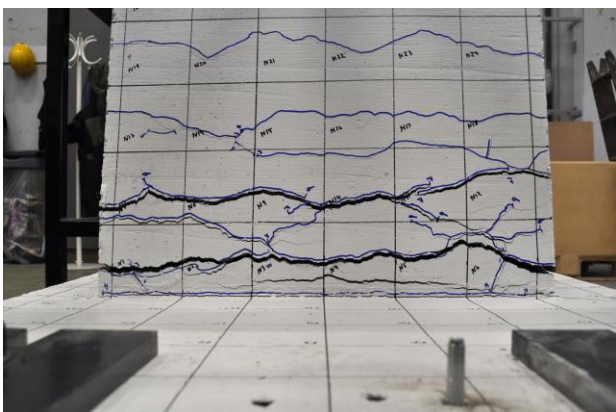
Mynd D 20: FSL-LS eftir lotu 8 (hlutfallsfærsla 3,66%). Flögnun fyrst sjáanleg á suðurhlið veggjar. Stærsta sjáanleg sprunga er 4mm í vidd.



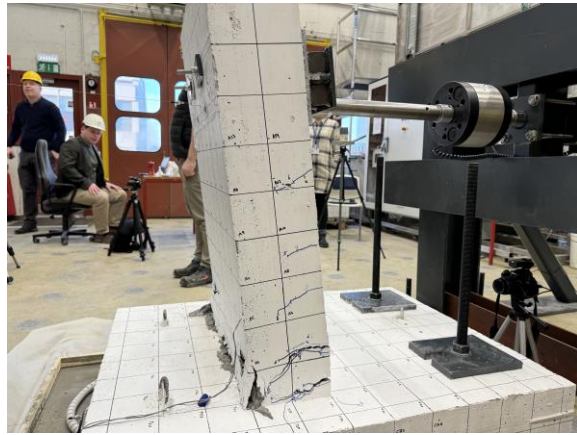
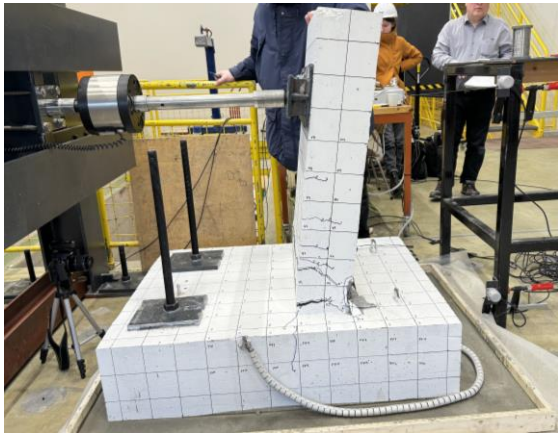
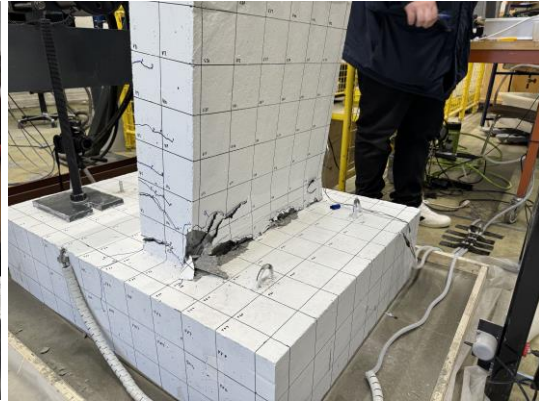
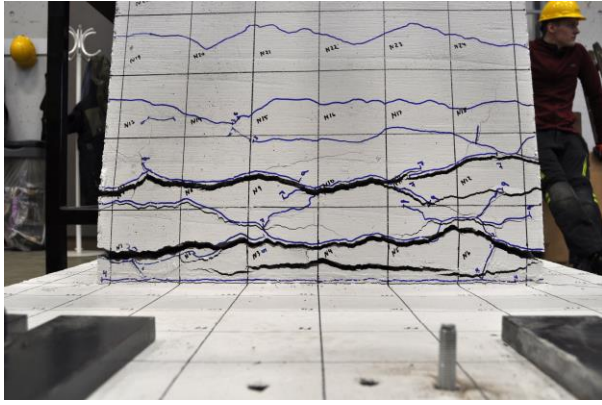
Mynd D 21: FSL-LS eftir lotu 9 (hlutfallsfærsla 5,49%). Ný sprunga í sökkulfót við T40. Stærsta sprunga við veggenda mæld 6mm.



Mynd D 22: FSL-LS eftir lotu 10 (hlutfallsfærsla 8,07%). Mikið farið að sjást á vegg. Stærsta sprunga um 8mm.



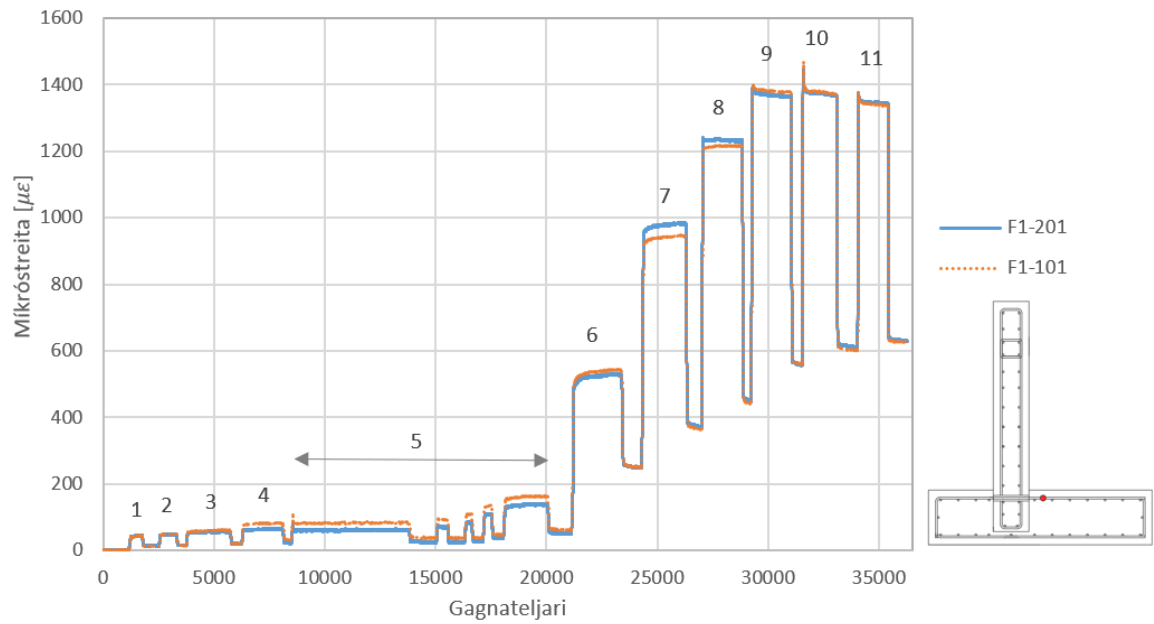
Mynd D 23: FSL-LS eftir lotu 11 (hlutfallsfærsla 11,77%). Meiri flögnun á sér stað á suðurhlíð veggjar. Samband við streitunema rofið.



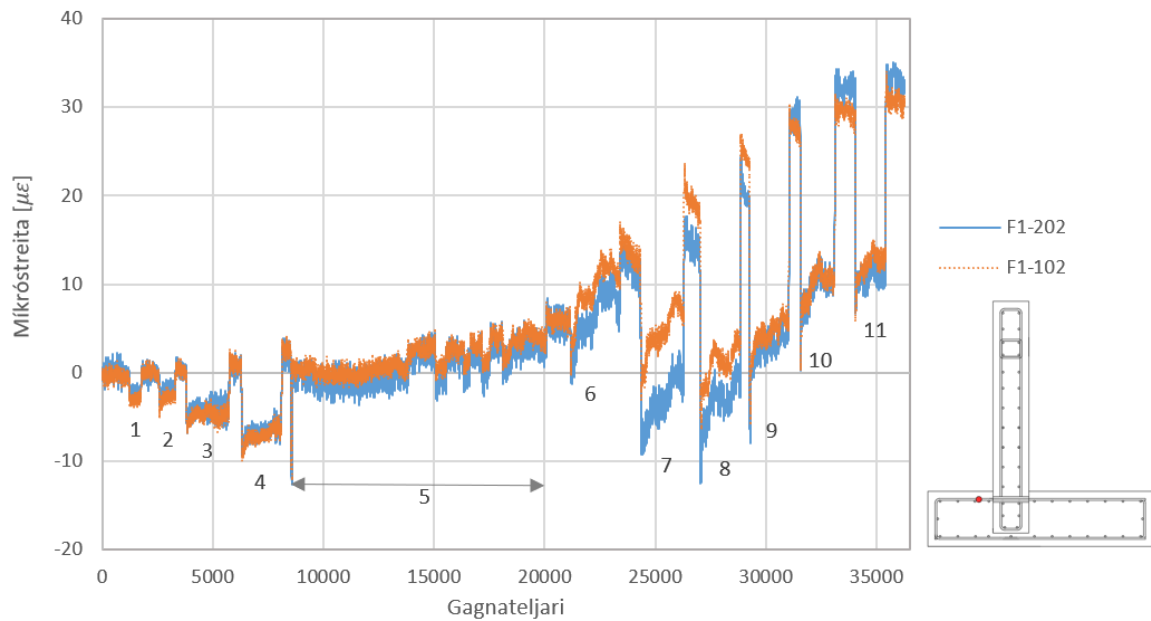
Mynd D 24: FSL-LS eftir lotu 12 (aukalota: 120mm færsla, 16,4% markmiðshlutfallsfærsla). Eitt lóðrétt kambstál í vegg slitnaði við lotuna.

Viðauki E: Streitungmælingar í sökkli

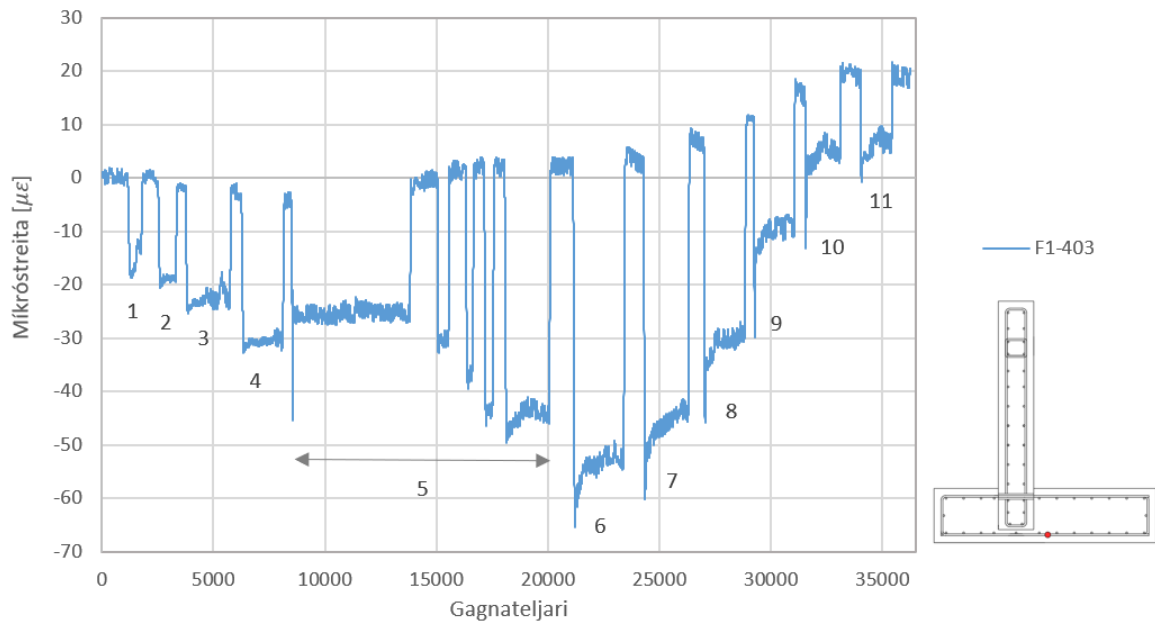
FSL-SS



Mynd E 1: Streitungildi í sökkul FSL-SS, nemi F1-201. Streitungnemi staðsettur í efri brún, 75mm fyrir aftan vegg.

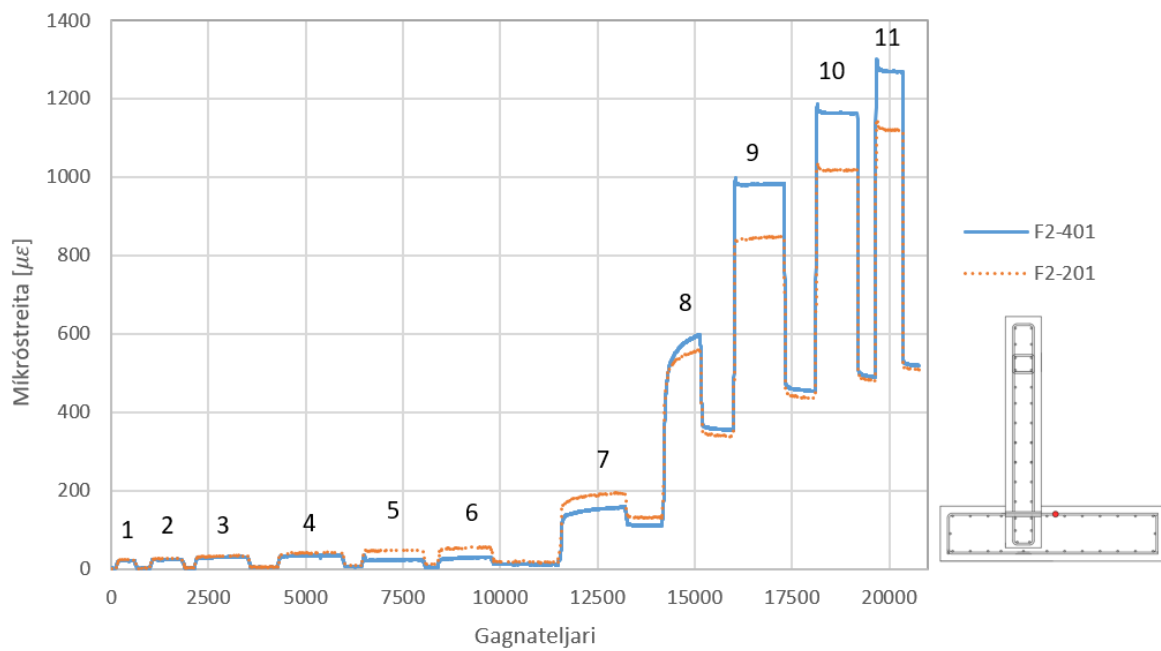


Mynd E 2: Streitungildi í sökkul FSL-SS, nemi F1-202. Streitungnemi staðsettur í efri brún, 75mm fyrir framan vegg.

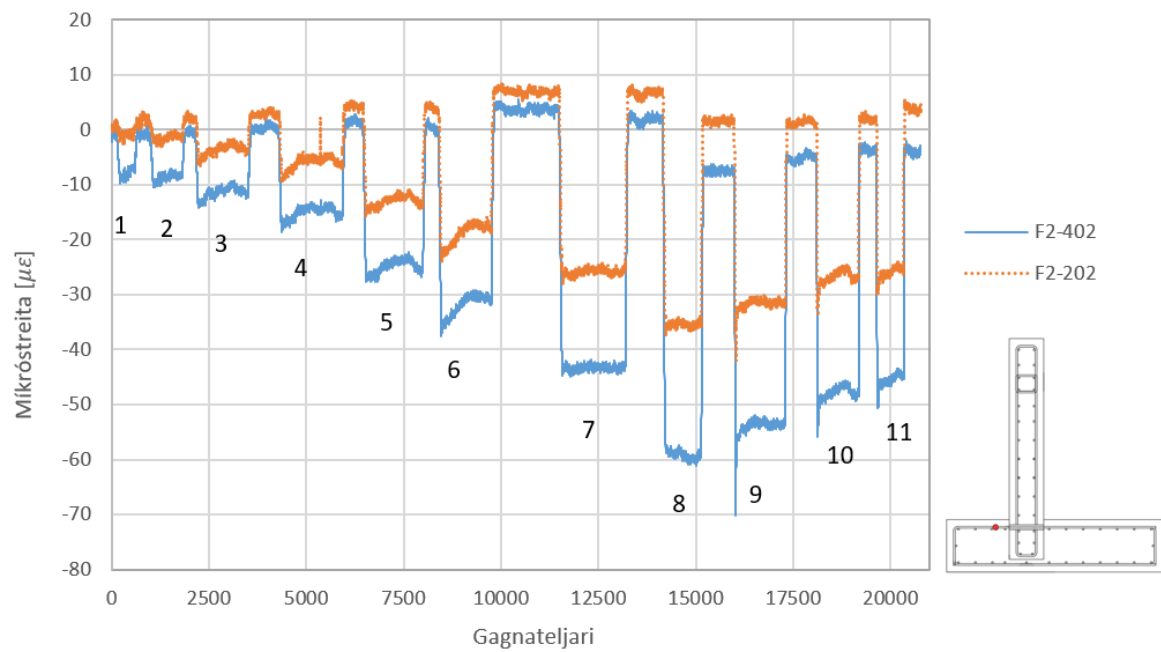


Mynd E 3: Streitugildi í sökkul FSL-SS, nemi F1-403. Streitunemi staðsettur í neðri brún, 75mm fyrir aftan vegg.

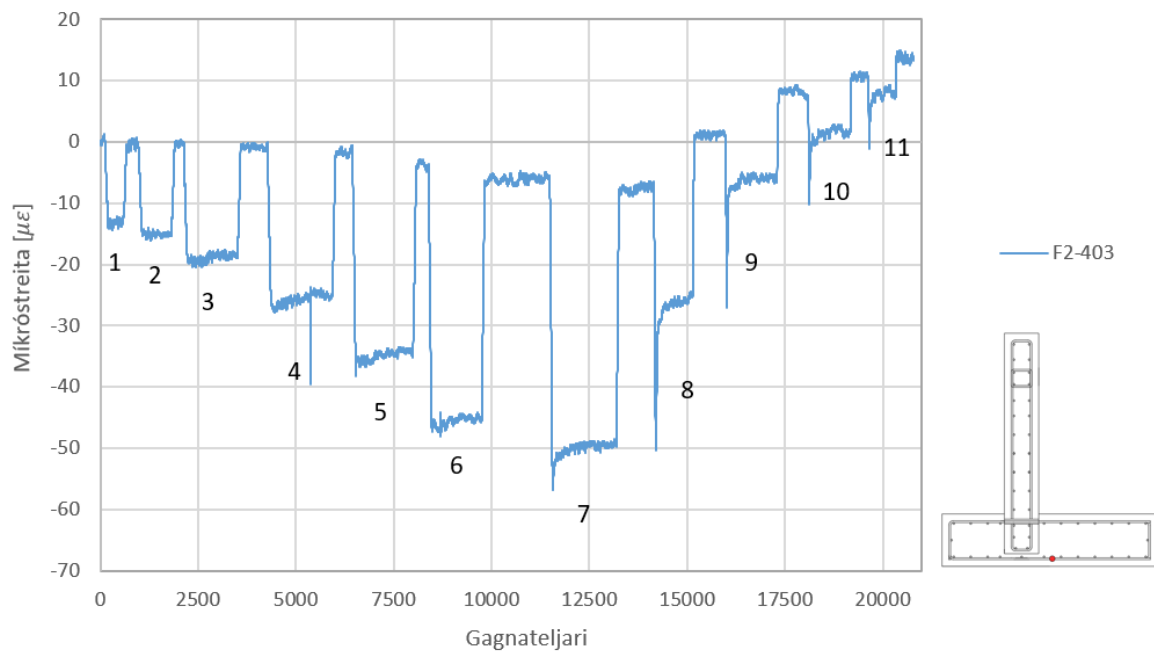
FSL-LS



Mynd E 4: Streitugildi í sökkul FSL-LS, nemi F2-401. Streitunemi staðsettur í efri brún, 75mm fyrir aftan vegg.



Mynd E 5: Streitugildi í sökkul FSL-LS, nemi F1-402. Streitunemi staðsettur í efri brún, 75mm fyrir framan vegg.



Mynd E 6: Streitugildi í sökkul FSL-LS, nemi F1-403. Streitunemi staðsettur í neðri brún, 75mm fyrir aftan vegg.

Viðauki F: Útreikningar

Flotvægi í stöpulvegg

Efniseiginleikar

Við útreikninga eru eftirfarandi efniseiginleikar notaðir.

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa} \quad \text{Flotstyrkur steypustyrktar stáls}$$

$$f_{uk} := 650 \text{ MPa} \quad \text{Brotstyrkur steypustyrktar stáls}$$

Geometría fyrir steypðann stöpulvegg

$$t_{veggur} := 190 \text{ mm} \quad \text{Þykkt veggjar}$$

$$c_{hula} := 37.5 \text{ mm} \quad \text{Steypuhula langjarna}$$

$$d_{K10} := 10 \text{ mm} \quad \text{Þvermál langjarna í vegg}$$

$$A_{K10} := \left(\frac{d_{K10}}{2} \right)^2 \cdot \pi = 78.54 \text{ mm}^2 \quad \text{Þversniðsflatarmál K10 járn}$$

$$n_{K10} := 7 \quad \text{Fjöldi langjarna}$$

Plastískt vægi viðsökkulyfirborð

$$z := t_{veggur} - c_{hula} - \frac{d_{K10}}{2} = 147.5 \text{ mm} \quad \text{Armur frá útbrún veggjar að miðju járn}$$

$$T_{pl} := n_{K10} \cdot f_{uk} \cdot A_{K10} = 357.356 \text{ kN} \quad \text{Togkraftur sem þarf til að setja slíta 7 járn (samtímis)}$$

$$M_{pl} := T_{pl} \cdot z = 52.71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Flotvægi í Y hæð frá sökkl

$$T_{pl} := n_{K10} \cdot f_{yk} \cdot A_{K10} = 274.889 \text{ kN} \quad \text{Togkraftur sem þarf til að setja slíta 7 járn (samtímis)}$$

$$M_y := T_{pl} \cdot z = 40.546 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Y := 730 \text{ mm} \cdot \left(1 - \frac{M_y}{M_{pl}} \right) = 168.462 \text{ mm} \quad \text{U.þ.b. 170mm}$$

Velta prófstykkja

Öryggi gegn veltu

Veltuvægi

$$H_1 := 730 \text{ mm} + 290 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 1.03 \text{ m}$$

$$P := 94.8 \text{ kN}$$

$$M_O := P \cdot H_1 = 97.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Stöðugleikavægi

Eiginþyngd

$$W_{\text{sökkull}} := 290 \text{ mm} \cdot 900 \text{ mm} \cdot 1190 \text{ mm} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 7.765 \text{ kN}$$

$$W_{\text{veggur}} := 1000 \text{ mm} \cdot 190 \text{ mm} \cdot 650 \text{ mm} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 3.088 \text{ kN}$$

Spennukraftar í snitttein

$$P_s := 2 \cdot 160 \text{ kN} = 320 \text{ kN}$$

Vægi

$$M_{\text{snittteinn}} := P_s \cdot 990 \text{ mm} = 316.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{sökkull}} := W_{\text{sökkull}} \cdot \frac{1190 \text{ mm}}{2} = 4.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{veggur}} := W_{\text{veggur}} \cdot 440 \text{ mm} = 1.359 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Stöðugleikavægi

$$M_R := M_{\text{snittteinn}} + M_{\text{sökkull}} + M_{\text{veggur}} = 322.779 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Nýtni

$$\frac{M_O}{M_R} = 0.303$$

Vægi- og skerstyrkur sökkuls FSL-SS

Efniseiginleikar sökkuls FSL-SS

Við útreikninga eru eftirfarandi efniseiginleikar notaðir.

$$\rho_c := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \text{Efnisþyngd járnbenrtar steypu}$$

$$E_s := 200 \text{ GPa} \quad \text{Young's modulus steypustyrktar stáls}$$

$$f_{yk} := 524 \text{ MPa} \quad \text{Flotstyrkur steypustyrktar stáls}$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{1.0} = 524 \text{ MPa} \quad \text{Hönnunarflotstyrkur steypustyrktar stáls}$$

$$f_{ck} := 71.7 \text{ MPa} \quad \text{Sívalningsstyrkur steypu á prófdegi 2}$$

$$\alpha_{cc} := 1 \quad \text{Gildir fyrir Ísland. Sjá þjóðarviðauka fyrir önnur lönd.}$$

$$\gamma_c := 1.0 \quad \text{Öryggisstuðull steypu}$$

$$f_{cd} := \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 71.7 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} := 4.2 \text{ MPa} \quad \text{Togstyrkur steypu}$$

Útreikningar (neðri brún) Styrkur (ULS)

Vægisburðargeta

Járnun

$$d_b := 10 \text{ mm} \quad \text{Þvermál bendijárns}$$

$$s := 9 \quad \text{Fjöldi járna}$$

$$A_s := s \cdot \left(\left(\frac{d_b}{2} \right)^2 \cdot \pi \right) = 706.858 \text{ mm}^2$$

$$d := 290 \text{ mm} - 37.5 \text{ mm} - \frac{d_b}{2} = 247.5 \text{ mm}$$

$$b := 900 \text{ mm}$$

$$\eta := 1.0 \quad \lambda := 0.8 - \frac{(f_{ck} - 50 \text{ MPa})}{400 \text{ MPa}} = 0.746 \quad \eta := 1.0 - \frac{(f_{ck} - 50 \text{ MPa})}{200 \text{ MPa}} = 0.892$$

$$X_{ULS} := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b} = 8.634 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} := A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0.5 \cdot \lambda \cdot X_{ULS}) = 90.48 \text{ m} \cdot \text{kN} \quad \text{Vægisburðargeta sökkuls}$$

Skurðargeta

$$k := \min \left(\left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} \right), 2 \right) = 1.899$$

$$\rho_l := \min \left(\frac{A_s}{b \cdot d}, 0.02 \right) = 0.003$$

$$V_{Rd.c.1} := \left(\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \cdot b \cdot d \cdot \text{MPa} = 215.747 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c.2} := \left(0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot b \cdot d \cdot \text{MPa} = 172.747 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} := \max(V_{Rd.c.1}, V_{Rd.c.2}) = 215.747 \text{ kN}$$

$$V_{max} := \frac{1}{2} \cdot 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d = 3417.2 \text{ kN}$$

Skurðargeta

$$V_{Rd} := \min(V_{Rd.c}, V_{max}) = 215.747 \text{ kN}$$

Útreikningar (efri brún)

Styrkur (ULS)

Vægisburðargeta

Járnun

$$d_1 := 10 \text{ mm} \quad d_2 := 16 \text{ mm}$$

$$s_{K10} := 2 \quad s_{K16} := 3$$

$$A_s := s_{K10} \cdot \left(\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 \cdot \pi \right) + s_{K16} \cdot \left(\left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \cdot \pi \right) = 760.265 \text{ mm}^2$$

$$d := 290 \text{ mm} - 37.5 \text{ mm} - \frac{d_b}{2} = 247.5 \text{ mm}$$

$$b := 900 \text{ mm}$$

$$\eta := 1.0 \quad \lambda := 0.8 - \frac{(f_{ck} - 50 \text{ MPa})}{400 \text{ MPa}} = 0.746 \quad \eta := 1.0 - \frac{(f_{ck} - 50 \text{ MPa})}{200 \text{ MPa}} = 0.892$$

$$X_{ULS} := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b} = 9.286 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} := A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0.5 \cdot \lambda \cdot X_{ULS}) = 97.22 \text{ m} \cdot \text{kN} \quad \text{Vægisburðargeta plötunnar}$$

Skerburðargeta

$$k := \min \left(\left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} \right), 2 \right) = 1.899$$

$$\rho_l := \min \left(\frac{A_s}{b \cdot d}, 0.02 \right) = 0.003$$

$$V_{Rd.c.1} := \left(\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \cdot b \cdot d \cdot \text{MPa} = 221.049 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c.2} := \left(0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot b \cdot d \cdot \text{MPa} = 172.747 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} := \max(V_{Rd.c.1}, V_{Rd.c.2}) = 221.049 \text{ kN}$$

$$V_{max} := \frac{1}{2} \cdot 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d = 3417.2 \text{ kN}$$

Skerburðargeta

$$V_{Rd} := \min(V_{Rd.c}, V_{max}) = 221.049 \text{ kN}$$

Vægi- og skerstyrkur sökkuls FSL-LS

Efniseiginleikar sökkuls FSL-LS

Við útreikninga eru eftirfarandi efniseiginleikar notaðir.

$\rho_c := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Efnisþyngd járnbentar steypu
$E_s := 200 \text{ GPa}$	Young's modulus steypustyrktar stáls
$f_{yk} := 524 \text{ MPa}$	Flotstyrkur steypustyrktar stáls
$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{1.0} = 524 \text{ MPa}$	Hönnunarflotstyrkur steypustyrktar stáls
$f_{ck} := 72.3 \text{ MPa}$	Sívalningsstyrkur steypu á prófdegi 2
$\alpha_{cc} := 1$	Gildir fyrir Ísland. Sjá þjóðarviðauka fyrir önnur lönd.
$\gamma_c := 1.0$	Öryggisstuðull steypu
$f_{cd} := \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 72.3 \text{ MPa}$	
$f_{ctm} := 4.2 \text{ MPa}$	Togstyrkur steypu

Útreikningar Styrkur (ULS)

Vægisburðargeta

Járnun

$$d_b := 10 \text{ mm}$$

Þvermál bendijárns

$$s := 9$$

Fjöldi járna

$$A_s := s \cdot \left(\left(\frac{d_b}{2} \right)^2 \cdot \pi \right) = 706.858 \text{ mm}^2$$

$$d := 290 \text{ mm} - 37.5 \text{ mm} - \frac{d_b}{2} = 247.5 \text{ mm}$$

$$b := 900 \text{ mm}$$

$$\eta := 1.0 \quad \lambda := 0.8 - \frac{(f_{ck} - 50 \text{ MPa})}{400 \text{ MPa}} = 0.744$$

$$\eta := 1.0 - \frac{(f_{ck} - 50 \text{ MPa})}{200 \text{ MPa}} = 0.889$$

$$X_{ULS} := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b} = 8.608 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} := A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0.5 \cdot \lambda \cdot X_{ULS}) = 90.49 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

Vægisburðargeta sökkuls

Skerburðargeta

$$k := \min \left(\left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} \right), 2 \right) = 1.899$$

$$\rho_l := \min \left(\frac{A_s}{b \cdot d}, 0.02 \right) = 0.003$$

$$V_{Rd.c.1} := \left(\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \cdot b \cdot d \cdot \text{MPa} = 216.347 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c.2} := \left(0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot b \cdot d \cdot \text{MPa} = 173.468 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} := \max(V_{Rd.c.1}, V_{Rd.c.2}) = 216.347 \text{ kN}$$

$$V_{max} := \frac{1}{2} \cdot 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d = 3434.2 \text{ kN}$$

Skerburðargeta

$$V_{Rd} := \min(V_{Rd.c}, V_{max}) = 216.347 \text{ kN}$$

Útreikningar - Sprungumyndunarvægi

$$f_{ctm} = 4.2 \text{ MPa}$$

$$h := 290 \text{ mm}$$

$$M_{cr} := f_{ctm} \cdot \left(\frac{b \cdot h^2}{6} \right) = 52.983 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Vægi- og skerstyrkur sökkuls - Hönnunarstyrkur

Efniseiginleikar sökkuls - Hönnunargildi

Við útreikninga eru eftirfarandi efniseiginleikar notaðir.

$$\rho_c := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \text{Efnisþyngd járnbentar steypu}$$

$$E_s := 200 \text{ GPa} \quad \text{Young's modulus steypustyrktar stáls}$$

$$f_s := 235 \text{ MPa} \quad \text{Flotstyrkur stáls}$$

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa} \quad \text{Flotstyrkur steypustyrktar stáls}$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{1.15} = 434.783 \text{ MPa} \quad \text{Hönnunarflotstyrkur steypustyrktar stáls}$$

$$f_{ck} := 35 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{cc} := 1 \quad \text{Gildir fyrir Ísland. Sjá þjóðarviðauka fyrir önnur lönd.}$$

$$\gamma_c := 1.5$$

$$f_{cd} := \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 23.333 \text{ MPa}$$

Útreikningar (neðri brún)

Vægisburðargeta

Járnun

$$d_b := 10 \text{ mm} \quad \text{Þvermál bendijárns}$$

$$s := 9 \quad \text{Fjöldi járna}$$

$$A_s := s \cdot \left(\left(\frac{d_b}{2} \right)^2 \cdot \pi \right) = 706.858 \text{ mm}^2$$

$$d := 290 \text{ mm} - 37.5 \text{ mm} - \frac{d_b}{2} = 247.5 \text{ mm}$$

$$b := 900 \text{ mm}$$

$$\eta := 1.0 \quad \lambda := 0.8$$

$$X_{ULS} := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b} = 18.293 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} := A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0.5 \cdot \lambda \cdot X_{ULS}) = 73.8 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

Vægisburðargeta sökkuls

Skerburðargeta

$$k := \min \left(\left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} \right), 2 \right) = 1.899$$

$$V_{Rd.c.1} := \left(\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \min \left(\frac{A_s}{b \cdot d}, 0.02 \right) \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \cdot b \cdot d \cdot \text{MPa} = 113.249 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c.2} := \left(0.035 \cdot k^2 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot b \cdot d \cdot \text{MPa} = 120.694 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} := \max(V_{Rd.c.1}, V_{Rd.c.2}) = 120.694 \text{ kN}$$

$$V_{max} := \frac{1}{2} \cdot 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d = 1341 \text{ kN}$$

Skerburðargeta

$$V_{Rd} := \min(V_{Rd.c}, V_{max}) = 120.694 \text{ kN}$$

Útreikningar (efri brún)

Vægisburðargeta

Járnun

$$d_1 := 10 \text{ mm}$$

$$d_2 := 16 \text{ mm}$$

Þvermál bendijárns

$$s_{K10} := 2$$

$$s_{K16} := 3$$

Fjöldi járna

$$A_s := s_{K10} \cdot \left(\left(\frac{d_1}{2} \right)^2 \cdot \pi \right) + s_{K16} \cdot \left(\left(\frac{d_2}{2} \right)^2 \cdot \pi \right) = 760.265 \text{ mm}^2$$

$$d := 290 \text{ mm} - 37.5 \text{ mm} - \frac{d_1}{2} = 247.5 \text{ mm}$$

$$b := 900 \text{ mm}$$

$$\eta := 1.0 \quad \lambda := 0.8$$

$$X_{ULS} := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b} = 19.676 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} := A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0.5 \cdot \lambda \cdot X_{ULS}) = 79.2 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

Vægisburðargeta sökkuls

Skerburðargeta

$$k := \min \left(\left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} \right), 2 \right) = 1.899$$

$$V_{Rd.c.1} := \left(\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \min \left(\frac{A_s}{b \cdot d}, 0.02 \right) \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \cdot b \cdot d \cdot \text{MPa} = 116.033 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c.2} := \left(0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot b \cdot d \cdot \text{MPa} = 120.694 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} := \max(V_{Rd.c.1}, V_{Rd.c.2}) = 120.694 \text{ kN}$$

$$V_{max} := \frac{1}{2} \cdot 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d = 1341 \text{ kN}$$

Skerburðargeta

$$V_{Rd} := \min(V_{Rd.c}, V_{max}) = 120.694 \text{ kN}$$

Vægi- og skerstyrkur stöpulveggjar FSL-SS

Efniseiginleikar veggjar FSL-SS

Við útreikninga eru eftirfarandi efniseiginleikar notaðir.

$\rho_c := 25 \frac{kN}{m^3}$	Efnisþyngd járnbenntar steypu
$E_s := 200 \text{ GPa}$	Young's modulus steypustyrktarstáls
$f_{yk} := 524 \text{ MPa}$	Flotstyrkur steypustyrktar stáls
$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{1.0} = 524 \text{ MPa}$	Hönnunarflotstyrkur steypustyrktarstáls
$f_{tk} := 635 \text{ MPa}$	Bortstyrkur steypustyrktarstáls
$f_{ck} := 61.2 \text{ MPa}$	Sívalningsstyrkur steypu á prófdegi1
$f_{ywd} := 614 \text{ MPa}$	Flotstyrkur K6 skerjárns
$\alpha_{cc} := 1$	Gildir fyrir Ísland. Sjá þjóðarviðauka fyrir önnur lönd.
$\gamma_c := 1.0$	Öryggisstuðull steypu
$f_{cd} := \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 61.2 \text{ MPa}$	
$f_{ctm} := 4.2 \text{ MPa}$	Togstyrkur steypu

Styrkútreikningar

Styrkur Bita (ULS)

Mómentstyrkur

Járnun

$m := 1$

Fjöldi járnaraða

$d_b := 10 \text{ mm}$

Þvermál bendijárns

$s := 7$

Fjöldi járna

$$A_s := s \cdot \left(\left(\frac{d_b}{2} \right)^2 \cdot \pi \right) = 549.779 \text{ mm}^2$$

$$b_{eff} := 650 \text{ mm}$$

$$h_{beam} := 190 \text{ mm}$$

$$d := h_{beam} - 37.5 \text{ mm} - \frac{d_b}{2} = 147.5 \text{ mm}$$

Fjarlægð frá yfirborði í þrýstingi að stáli i togi

$$\varepsilon_{cu} := 0.0035$$

$$\eta := 1.0 - \frac{(f_{ck} - 50 \text{ MPa})}{200 \text{ MPa}} = 0.944$$

$$\lambda := 0.8 - \frac{(f_{ck} - 50 \text{ MPa})}{400 \text{ MPa}} = 0.772$$

$$X_{ULS} := \frac{A_s \cdot f_{uk}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b_{eff}} = 12.042 \text{ mm}$$

$$z := \left(d - \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot X_{ULS} \right) = 142.852 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} := A_s \cdot f_{uk} \cdot z = 50 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Skerstyrkur:

$$k := \min \left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}}, 2 \right) = 2$$

$$k_1 := 0.15 \quad \alpha_{cw} := 1$$

$$C_{Rd,c} := \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.18$$

$$v_{min} := 0.035 \cdot k^{1.5} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} = 0.774$$

$$v_1 := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) = 0.453 \quad (6.6\text{N})$$

$$\rho_l := \min \left(\frac{A_s}{d \cdot b_{eff}}, 0.02 \right) = 0.006 \quad \text{Járnahlutfall langjárna}$$

Styrkur án skerbendingar

$$V_{Rd,c.1} := \left(\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \min \left(\frac{A_s}{b_{eff} \cdot d}, 0.02 \right) \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \cdot b_{eff} \cdot d \cdot \text{MPa} = 113.002 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c.2} := \left(0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{MPa} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot b_{eff} \cdot d \cdot MPa = 74.25 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} := \max(V_{Rd.c.1}, V_{Rd.c.2}) = 113.002 \text{ kN}$$

Skerstyrkur með skerbendingu:

$$A_{sw} := 7 \cdot ((3 \text{ mm})^2 \cdot \pi) = 197.92 \text{ mm}^2 \quad K6$$

$$s := 94 \text{ mm} \quad \text{Bil á milli lykkja}$$

$$z := 0.9 \quad d = 132.75 \text{ mm}$$

$$\alpha := 90^\circ \quad \text{Lykkjur hornréttar á langjárn}$$

$$\theta := 45^\circ \quad \text{Horn valið þannig að } \cot(\theta) = 1 \quad \text{sé á bilinu 1 - 2.5, skv. 6.2.3}$$

Lágmarks járnahlutfall skerbendingar

$$\rho_{w.min} := \frac{0.08 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{MPa}}}{\frac{f_{yk}}{MPa}} = 0.001$$

Járnahlutfall skerbendingar

$$\rho_w := \frac{A_{sw}}{b_{eff} \cdot s \cdot \sin(\alpha)} = 0.003 > \rho_{w.min} = 0.001$$

Hámarksskerstyrkur með tilliti til steypu (6.9)

$$V_{Rd.max} := \frac{\alpha_{cw} \cdot b_{eff} \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} = (1.196 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Styrkur skerbendingar (6.8)

$$V_{Rd} := \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot(\theta) = 171.619 \text{ kN}$$

Hönnunarstyrkur

$$V_{Rd} := \min(V_{Rd}, V_{Rd.max}) = 171.619 \text{ kN}$$

Vægi- og skerstyrkur stöpulveggjar FSL-LS

Efniseiginleikar veggjar FSL-LS

Við útreikninga eru eftirfarandi efniseiginleikar notaðir.

$\rho_c := 25 \frac{kN}{m^3}$	Efnisþyngd járnbenrtar steypu
$E_s := 200 \text{ GPa}$	Young's modulus steypustyrktar stáls
$f_{yk} := 524 \text{ MPa}$	Flotstyrkur steypustyrktar stáls
$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{1.0} = 524 \text{ MPa}$	Hönnunarflotstyrkur steypustyrktar stáls
$f_{uk} := 635 \text{ MPa}$	Bortstyrkur steypustyrktarstáls
$f_{ck} := 57.1 \text{ MPa}$	Sívalningsstyrkur steypu á prófdegi1
$f_{ywd} := 614 \text{ MPa}$	Flotstyrkur K6 skerjárns
$\alpha_{cc} := 1$	Gildir fyrir Ísland. Sjá þjóðarviðauka fyrir önnur lönd.
$\gamma_c := 1.0$	Öryggisstuðull steypu
$f_{cd} := \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 57.1 \text{ MPa}$	
$f_{ctm} := 4.2 \text{ MPa}$	Togstyrkur steypu

Styrkútreikningar

Styrkur Biti (ULS)

Mómentstyrkur

Járnun

$m := 1$	Fjöldi járnaraða
$d_b := 10 \text{ mm}$	Þvermál bendijárns

$s := 7$	Fjöldi járna
----------	--------------

$$A_s := s \cdot \left(\left(\frac{d_b}{2} \right)^2 \cdot \pi \right) = 549.779 \text{ mm}^2$$

$$b_{eff} := 650 \text{ mm}$$

$$h_{beam} := 190 \text{ mm}$$

$$d := h_{beam} - 37.5 \text{ mm} - \frac{d_b}{2} = 147.5 \text{ mm}$$

Fjarlægð frá yfirborði í þrýstingi að stáli i togi

$$\eta := 1.0 \quad \epsilon_{cu} := 0.0035$$

$$\eta := 1.0 - \frac{(f_{ck} - 50 \text{ MPa})}{200 \text{ MPa}} = 0.965$$

$$\lambda := 0.8 - \frac{(f_{ck} - 50 \text{ MPa})}{400 \text{ MPa}} = 0.782$$

$$X_{ULS} := \frac{A_s \cdot f_{uk}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b_{eff}} = 12.467 \text{ mm}$$

$$z := \left(d - \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot X_{ULS} \right) = 142.624 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} := A_s \cdot f_{uk} \cdot z = 50 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Skerstyrkur:

$$k_1 := 0.15 \quad \alpha_{cw} := 1$$

$$C_{Rd,c} := \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.18$$

$$v_{min} := 0.035 \cdot k^{1.5} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} = (1.357 \cdot 10^{-35}) \frac{\text{kg}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^3 \cdot \text{K}^{\frac{3}{2}}}$$

$$v_1 := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) = 0.463 \quad (6.6 \text{ N})$$

$$\rho_l := \min \left(\frac{A_s}{d \cdot b_{eff}}, 0.02 \right) = 0.006 \quad \text{Járnahlutfall langjárna}$$

Styrkur án skerbendingar

$$k := \min \left(\left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} \right), 2 \right) = 2$$

$$V_{Rd.c.1} := \left(\frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \min \left(\frac{A_s}{b_{eff} \cdot d}, 0.02 \right) \cdot \frac{f_{ck}}{MPa} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \cdot b_{eff} \cdot d \cdot MPa = 110.42 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c.2} := \left(0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{MPa} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cdot b_{eff} \cdot d \cdot MPa = 71.719 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.c} := \max(V_{Rd.c.1}, V_{Rd.c.2}) = 110.42 \text{ kN}$$

Skerstyrkur með skerbendingu:

$$A_{sw} := 7 \cdot ((3 \text{ mm})^2 \pi) = 197.92 \text{ mm}^2 \quad K6$$

$$s := 94 \text{ mm} \quad \text{Bil á milli lykkja}$$

$$z := 0.9 \quad d = 132.75 \text{ mm}$$

$$\alpha := 90^\circ \quad \text{Lykkjur hornréttar á langjárn}$$

$$\theta := 45^\circ \quad \text{Horn valið þannig að } \cot(\theta) = 1 \quad \text{sé á bilinu 1 - 2.5, skv. 6.2.3}$$

Lágmarks járnahlutfall skerbendingar

$$\rho_{w.min} := \frac{0.08 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{MPa}}}{\frac{f_{yk}}{MPa}} = 0.001$$

Járnahlutfall skerbendingar

$$\rho_w := \frac{A_{sw}}{b_{eff} \cdot s \cdot \sin(\alpha)} = 0.003 > \rho_{w.min} = 0.001$$

Hámarksskerstyrkur með tilliti til steypu (6.9)

$$V_{Rd.max} := \frac{\alpha_{cw} \cdot b_{eff} \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} = (1.141 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Styrkur skerbendingar (6.8)

$$V_{Rd} := \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot(\theta) = 171.619 \text{ kN}$$

Hönnunarstyrkur

$$V_{Rd} := \min(V_{Rd}, V_{Rd.max}) = 171.619 \text{ kN}$$

Vægi- og skerstyrkur stöpulveggjar - Hönnunarstyrkur

Efniseiginleikar - Hönnunarstyrkur

Við útreikninga eru eftirfarandi efniseiginleikar notaðir.

$\rho_c := 25 \frac{kN}{m^3}$	Efnisþyngd járnbentrar steypu
$E_s := 200 \text{ GPa}$	Young's modulus steypustyrktar stáls
$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$	Flotstyrkur steypustyrktar stáls
$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{1.15} = 434.783 \text{ MPa}$	Hönnunarflotstyrkur steypustyrktar stáls
$f_{ck} := 35 \text{ MPa}$	Sívalningsstyrkur steypu á prófdegi1
$f_{ywd} := 500 \text{ MPa}$	Flotstyrkur K6 skerjárns
$\alpha_{cc} := 1$	Gildir fyrir Ísland. Sjá þjóðarviðauka fyrir önnur lönd.
$\gamma_c := 1.5$	Öryggisstuðull steypu
$f_{cd} := \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 23.333 \text{ MPa}$	

Styrkútreikningar

Styrkur Bitar (ULS)

Mómentstyrkur

Járnun

$m := 1$ Fjöldi járnaraða
 $d_b := 10 \text{ mm}$ Þvermál bendijárns

$s := 7$ Fjöldi járna

$$A_s := s \cdot \left(\left(\frac{d_b}{2} \right)^2 \cdot \pi \right) = 549.779 \text{ mm}^2$$

$$d := 190 \text{ mm} - 37.5 \text{ mm} - \frac{d_b}{2} = 147.5 \text{ mm} \quad h_{beam} := 190 \text{ mm}$$

$$b_{eff} := 650 \text{ mm}$$

$$\eta := 1.0 \quad \lambda := 0.8$$

$$d := h_{beam} - 37.5 \text{ mm} - \frac{d_b}{2} = 147.5 \text{ mm} \quad \text{Fjarlægð frá yfirborði í þrýstingi að stáli i togi}$$

$$X_{ULS} := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b_{eff}} = 19.701 \text{ mm}$$

$$z := \left(d - \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot X_{ULS} \right) = 139.62 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} := A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 33.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Skerstyrkur:

$$k := \min \left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}}, 2 \right) = 2$$

$$k_1 := 0.15 \quad \alpha_{cw} := 1$$

$$C_{Rd,c} := \frac{0.18}{\gamma_c} = 0.12$$

$$v_{min} := 0.035 \cdot k^{1.5} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} = 0.586$$

$$v_1 := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) = 0.516 \quad (6.6 \text{ N})$$

$$\rho_l := \min \left(\frac{A_s}{d \cdot b_{eff}}, 0.02 \right) = 0.006 \quad \text{Járnahlutfall langjárna}$$

Styrkur án skerbendingar

$$V_{Rd,c} := C_{Rd,c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa} \cdot b_{eff} \cdot d = 62.53 \text{ kN}$$

Skerstyrkur með skerbendingu:

$$A_{sw} := 7 \cdot ((3 \text{ mm})^2 \pi) = 197.92 \text{ mm}^2 \quad \text{K6}$$

$$s := 94 \text{ mm} \quad \text{Bil á milli lykkja}$$

$$z := 0.9 \cdot d = 132.75 \text{ mm}$$

$$\alpha := 90^\circ \quad \text{Lykkjur hornréttar á langjárn}$$

$$\theta := 45^\circ \quad \text{Horn valið þannig að } \cot(\theta) = 1 \quad \text{sé á bilinu 1 - 2.5}$$

Lágmarks járnahlutfall skerbendingar

$$\rho_{w,min} := \frac{0.08 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}}{\frac{f_{yk}}{\text{MPa}}} = 9.466 \cdot 10^{-4}$$

Járnahlutfall skerbendingar

$$\rho_w := \frac{A_{sw}}{b_{eff} \cdot s \cdot \sin(\alpha)} = 0.003 \quad > \quad \rho_{w,min} = 9.466 \cdot 10^{-4}$$

Hámarksskerstyrkur með tilliti til steypu (6.9)

$$V_{Rd,max} := \frac{\alpha_{cw} \cdot b_{eff} \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)} = 519.451 \text{ kN}$$

Styrkur skerbendingar (6.8)

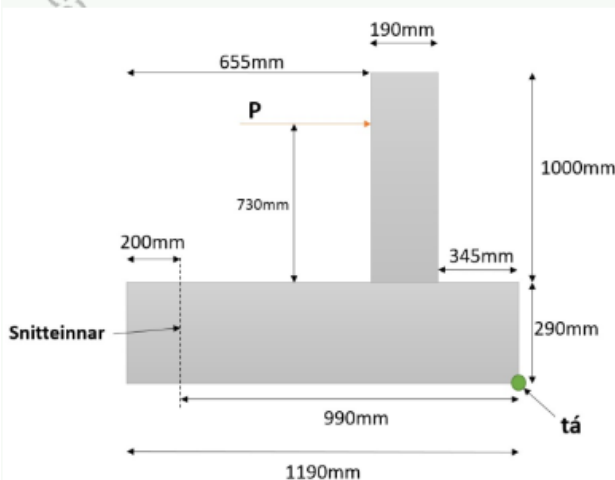
$$V_{Rd} := \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot(\theta) = 139.755 \text{ kN}$$

Hönnunarstyrkur

$$V_{Rd} := \min(V_{Rd}, V_{Rd,max}) = 139.755 \text{ kN}$$

Vægis og hjámiðjuútreikningar

Vægi og hjámiðjuútreikningar



$$\gamma_c := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \text{Rúmþyngd járnþ. steypu}$$

$$L_{\text{sökkull}} := 1190 \text{ mm}$$

$$H_{\text{veggur}} := 1000 \text{ mm}$$

$$P_{M30} := 2 \cdot 160 \text{ kN}$$

$$B_{\text{sökkull}} := 900 \text{ mm}$$

$$L_{\text{veggur}} := 190 \text{ mm}$$

$$P_{LB} := 94.7 \text{ kN}$$

$$H_{\text{sökkull}} := 290 \text{ mm}$$

$$B_{\text{veggur}} := 650 \text{ mm}$$

$$P_{SB} := 94.8 \text{ kN}$$

Eiginþyngd

$$g_{\text{veggur}} := H_{\text{veggur}} \cdot L_{\text{veggur}} \cdot B_{\text{veggur}} \cdot \gamma_c = 3.088 \text{ kN}$$

$$g_{\text{sökkull}} := H_{\text{sökkull}} \cdot L_{\text{sökkull}} \cdot B_{\text{sökkull}} \cdot \gamma_c = 7.765 \text{ kN}$$

Löðréttir kraftar

$$P_Y := g_{\text{veggur}} + g_{\text{sökkull}} + P_{M30} = 330.852 \text{ kN}$$

Láréttir kraftar

$$P_{LB} := 94.7 \text{ kN}$$

$$P_{SB} := 94.8 \text{ kN}$$

+

Vægi tekið um tá

Resistance

$$M_{R.veggur} := g_{veggur} \cdot \left(345 \text{ mm} + \frac{190 \text{ mm}}{2} \right) = 1.359 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{R.sökkull} := g_{sökkull} \cdot \frac{L_{sökkull}}{2} = 4.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{R.M30} := P_{M30} \cdot 990 \text{ mm} = 316.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_R := M_{R.veggur} + M_{R.sökkull} + M_{R.M30} = 322.779 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Overturning

$$M_{O.LB} := P_{LB} \cdot (730 \text{ mm} + 290 \text{ mm}) = 96.594 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{O.SB} := P_{SB} \cdot (730 \text{ mm} + 290 \text{ mm}) = 96.696 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

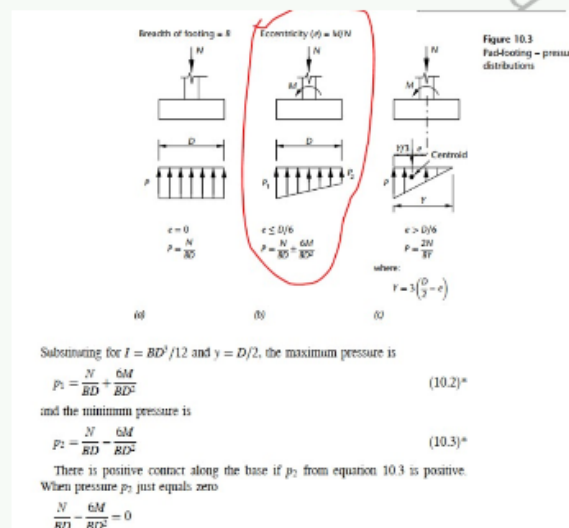
Hjámiðja

$$e_{LB} := \frac{L_{sökkull}}{2} - \frac{(M_R - M_{O.LB})}{P_Y} = -88.642 \text{ mm}$$

$$e_{SB} := \frac{L_{sökkull}}{2} - \frac{(M_R - M_{O.SB})}{P_Y} = -88.334 \text{ mm}$$

$$\frac{L_{sökkull}}{6} = 198 \text{ mm} > |e_{LB}| \text{ og } |e_{SB}|$$

Spennudreifing því reiknuð á eftirfarandi hátt:



Hér er M vægið sem tekið er um miðunkt sökkuls í L/2. Þar sem veltuvægi er skilgreint jákvætt og stöðugleikavægi er neikvætt

Prófstykki - Large bar (skv bók)

$$M_{O.LB} = 96.594 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad + \text{ velta}$$

$$M_{M30} := P_{M30} \cdot \left(\frac{L_{sökkull}}{2} - 200 \text{ mm} \right) = 126.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad - \text{ velta}$$

$$M_{veggur} := g_{veggur} \cdot \left(\frac{L_{sökkull}}{2} - 345 \text{ mm} - 95 \text{ mm} \right) = 0.479 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad + \text{ velta}$$

$$M_{LB} := M_{O.LB} - M_{M30} + M_{veggur} = -29.327 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$q_{td.LB} := \frac{P_Y}{B_{sökkull} \cdot L_{sökkull}} + \frac{6 \cdot M_{LB}}{B_{sökkull} \cdot L_{sökkull}^2} = 0.171 \text{ MPa}$$

$$q_{hæll.LB} := \frac{P_Y}{B_{sökkull} \cdot L_{sökkull}} - \frac{6 \cdot M_{LB}}{B_{sökkull} \cdot L_{sökkull}^2} = 0.447 \text{ MPa}$$

Prófstykki - Small bar (skv bók)

$$M_{O.SB} = 96.696 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad + \text{ velta}$$

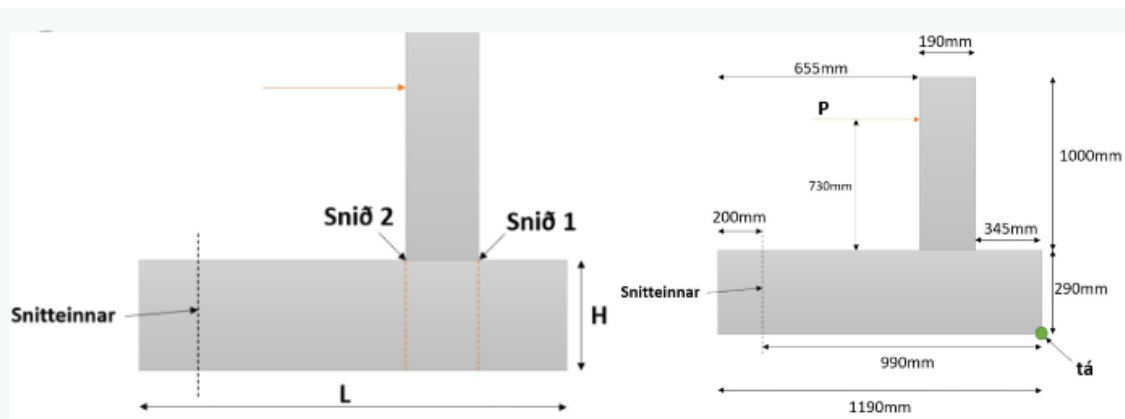
$$M_{M30} := P_{M30} \cdot \left(\frac{L_{sökkull}}{2} - 200 \text{ mm} \right) = 126.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad - \text{ velta}$$

$$M_{veggur} := g_{veggur} \cdot \left(\frac{L_{sökkull}}{2} - 345 \text{ mm} - 95 \text{ mm} \right) = 0.479 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad + \text{ velta}$$

$$M_{LB} := M_{O.SB} - M_{M30} + M_{veggur} = -29.225 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$q_{td.LB} := \frac{P_Y}{B_{sökkull} \cdot L_{sökkull}} + \frac{6 \cdot M_{LB}}{B_{sökkull} \cdot L_{sökkull}^2} = 0.171 \text{ MPa}$$

$$q_{hæll.LB} := \frac{P_Y}{B_{sökkull} \cdot L_{sökkull}} - \frac{6 \cdot M_{LB}}{B_{sökkull} \cdot L_{sökkull}^2} = 0.447 \text{ MPa}$$



Spennan q í staðsetningu sniðanna fæst með línulegri nálgun, þau gildi svo notuð til þess að reikna sker og vægi í hverju sniði

$$q_{1.LB} := 0.251 \text{ MPa} \quad (\text{snið 1}) \quad q_{2.LB} := 0.295 \text{ MPa} \quad (\text{snið 2})$$

$$q_{1.SB} := 0.251 \text{ MPa} \quad (\text{snið 1}) \quad q_{2.SB} := 0.295 \text{ MPa} \quad (\text{snið 2})$$

Þar sem spenna er um það sama fyrir bæði pröfstykki verður notast við eitt gildi fyrir hvert snið

$$q_{snið.1} := 0.251 \text{ MPa} \quad q_{snið.2} := 0.295 \text{ MPa}$$

Skar í sniði 1

$$q_{tá} := q_{tá.LB} = 0.171 \text{ MPa} \quad q_{hæll} := q_{hæll.LB} = 0.447 \text{ MPa}$$

$$q_{tá.snið.1} := q_{tá} \cdot 345 \text{ mm} \cdot B_{sökkull} = 53.199 \text{ kN}$$

$$q_{1.snið.1} := \frac{(q_{snið.1} - q_{tá}) \cdot 345 \text{ mm} \cdot B_{sökkull}}{2} = 12.368 \text{ kN}$$

$$q_{sökkull.snið.1} := \gamma_c \cdot 345 \text{ mm} \cdot H_{sökkull} \cdot B_{sökkull} = 2.251 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.snið.1} := q_{tá.snið.1} + q_{1.snið.1} - q_{sökkull.snið.1} = 63.316 \text{ kN}$$

Skar í sniði 2

$$q_{tá.snið.2} := q_{tá} \cdot (345 \text{ mm} + L_{veggur}) \cdot B_{sökkull} = 82.497 \text{ kN}$$

$$q_{2.snið.2} := \frac{(q_{snið.2} - q_{tá}) \cdot (345 \text{ mm} + L_{veggur}) \cdot B_{sökkull}}{2} = 29.773 \text{ kN}$$

$$q_{sökkull.snið.2} := \gamma_c \cdot (L_{veggur} + 345 \text{ mm}) \cdot H_{sökkull} \cdot B_{sökkull} = 3.491 \text{ kN}$$

$$q_{veggur.snið.2} := \gamma_c \cdot L_{veggur} \cdot H_{veggur} \cdot B_{veggur} = 3.088 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.snið.2} := q_{tá.snið.2} + q_{2.snið.2} - q_{sökkull.snið.2} - q_{veggur.snið.2} = 105.7 \text{ kN}$$

Staðfesting á skeri í sniði 2

$$q_{snið.2} \cdot 655 \text{ mm} \cdot 900 \text{ mm} = 173.903 \text{ kN}$$

$$\frac{(q_{hæll} - q_{snið.2}) \cdot 655 \text{ mm} \cdot 900 \text{ mm}}{2} = 44.656 \text{ kN}$$

$$\gamma_c \cdot 655 \text{ mm} \cdot H_{sökkull} \cdot B_{sökkull} = 4.274 \text{ kN}$$

$$V_{check} := P_{M30} + 4.274 \text{ kN} - 173.903 \text{ kN} - 44.656 \text{ kN} = 105.7 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

Vægi í sniði 1

$$q_{tá.snið.1} = 53.199 \text{ kN}$$

$$q_{1.snið.1} = 12.368 \text{ kN}$$

$$q_{sökkull.snið.1} = 2.251 \text{ kN}$$

$$M_{tá.snið.1} := q_{tá.snið.1} \cdot \frac{345 \text{ mm}}{2} = 9.177 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{1.snið.1} := q_{1.snið.1} \cdot \frac{345 \text{ mm}}{3} = 1.422 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{sökkull.snið.1} := q_{sökkull.snið.1} \cdot \frac{345 \text{ mm}}{2} = 0.388 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed.snið.1} := M_{tá.snið.1} + M_{1.snið.1} - M_{sökkull.snið.1} = 10.211 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Vægi í sniði 2

$$q_{td.snið.2} = 82.497 \text{ kN}$$

$$q_{2.snið.2} = 29.773 \text{ kN}$$

$$q_{sökkull.snið.2} = 3.491 \text{ kN}$$

$$q_{veggur.snið.2} = 3.088 \text{ kN}$$

$$M_{td.snið.2} := q_{td.snið.2} \cdot \frac{345 \text{ mm} + L_{veggur}}{2} = 22.068 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{2.snið.2} := q_{2.snið.2} \cdot \frac{345 \text{ mm} + L_{veggur}}{3} = 5.31 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{sökkull.snið.2} := q_{sökkull.snið.2} \cdot \frac{345 \text{ mm} + L_{veggur}}{2} = 0.934 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{veggur.snið.2} := q_{veggur.snið.2} \cdot \frac{L_{veggur}}{2} = 0.293 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{SB} := P_{SB} \cdot \left(730 \text{ mm} + \frac{H_{sökkull}}{2} \right) = 82.95 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed.snið.2} := M_{td.snið.2} + M_{2.snið.2} - M_{sökkull.snið.2} - M_{veggur.snið.2} - M_{SB} = -56.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed.snið.2} := |M_{Ed.snið.2}| = 56.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Tog og sker í snittteinum

M30 - 8.8 boltar

$$f_{yb} := 640 \text{ MPa} \quad A_s := 561 \text{ mm}^2$$

$$f_{ub} := 800 \text{ MPa} \quad A := 707 \text{ mm}^2$$

Togstyrkur bolta

$$k_2 := 0.9 \quad 0.63 \text{ fyrir "countersunk bolta"}$$

$$\gamma_{M2} := 1.25$$

$$F_{T.Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 323.136 \text{ kN}$$

Skerstyrkur bolta

$$\alpha_v := 0.6 \quad \text{Fyrir 8.8 bolta}$$

$$F_{V.Rd} := \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 215.424 \text{ kN}$$

Styrkur í vægi og skeri

Kraftar á bolta

$$F_{V.Ed} := \frac{(94.7 \text{ kN})}{2} = 47.35 \text{ kN}$$

$$F_{T.Ed} := 160 \text{ kN} + \frac{\frac{(94.8 \text{ kN})}{2} \cdot (730 \text{ mm} + 300 \text{ mm})}{990 \text{ mm}} = 209.315 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{V.Ed}}{F_{V.Rd}} + \frac{\left(\frac{F_{T.Ed}}{F_{T.Rd}} \right)}{1.4} = 0.682 < 1.0 \text{ OK}$$

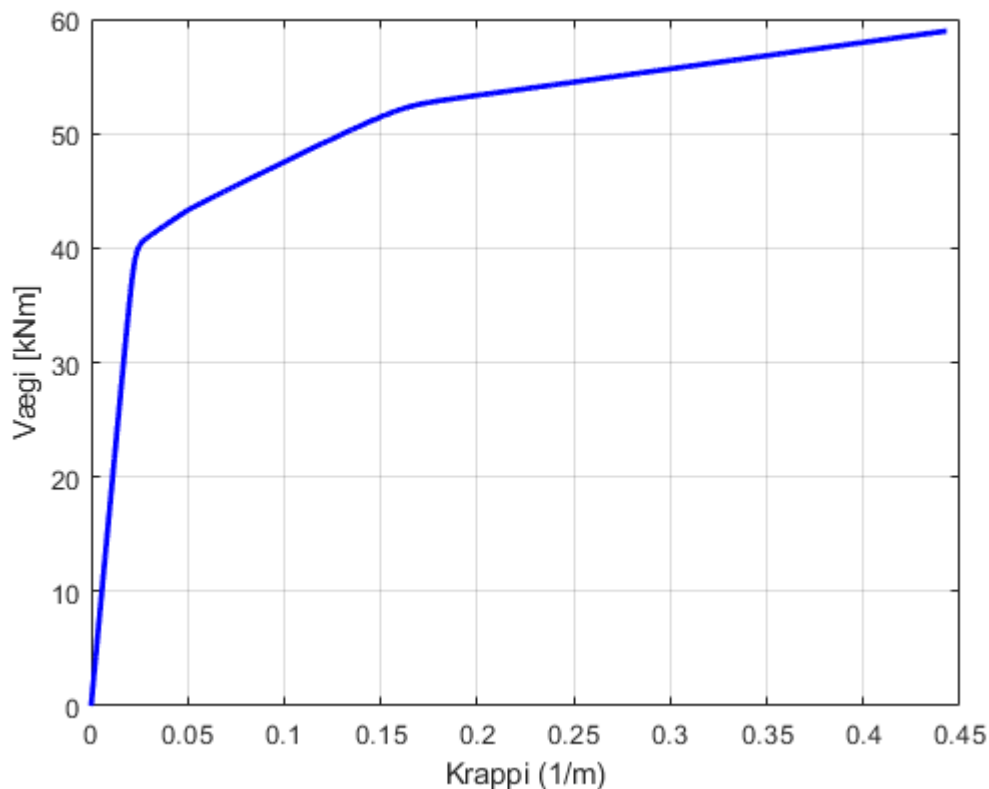
+

Vægi-krappa greining á þversniði stöpulveggja

Vægi-krappa þversniðsgreining (e. moment-curvature analysis) var gerð á þversniði stöpulveggjanna til að ákvarða á bæði flotvægi, M_y , og plastískt vægi, M_p , þess. Með þessar upplýsingar var hægt að ákvarða hvar skerleggir væru staðsettir í stöpulveggnum (sjá Kafla 2).

Notaður var hugbúnaðurinn OpenSees (e. Open System for Earthquake Engineering Simulation) sem er þróaður við Berkeley háskóla í Kaliforníu. Á heimasíðu OpenSees (<https://opensees.berkeley.edu/>) er fjöldi sýnidæma hvernig á að framkvæma ýmsar greiningar og þar á meðal vægi-krappa greining. Sýnidæmi var uppfært fyrir þetta verkefni og er sýnt hér fyrir neðan. Fyrsta forritið kallast Tversnid.tcl og í því er þversnið sett upp og helstu breytur skilgreindar fyrir þversniðið. Það kallar svo á annað forrit sem kallast MomentCurvature.tcl sem framkvæmir sjálfa vægi-krappa greininguna.

Niðurstöður úr OpenSees skrifast í texta skjal sem er svo lesinn upp af öðru forriti til að teikna upp niðurstöður, t.d. í Excel eða Matlab. Niðurstaða úr greiningu má sjá hér á mynd fyrir neðan.



Mynd F 1: Niðurstaða úr vægi-krappa greiningu í Open Sees.

Hér á eftir koma forritin Tversnid.tcl og MomentCurvature.tcl

- **Source Tversnid.tcl**

```
#Uppfært fyrir þetta rannsóknaverkefni frá sýnidæmi á heimasíðu
OpenSees (https://opensees.berkeley.edu/)

# Define model builder
# -----
model basic -ndm 2 -ndf 3

# Define materials for nonlinear columns
# -----
# CONCRETE          tag    f'c          ec0    f'cu          ecu
# Core concrete (confined)
uniaxialMaterial Concrete04 1    -67.0    -0.0033 -0.033 37000
# Cover concrete (unconfined)
uniaxialMaterial Concrete01 2    -59.0    -0.0035  -5    -0.006

# STEEL
# Reinforcing steel
set fy 524.0;      # Yield stress - frá togprófi kambstáls
set fu 623.0;      # Ultimate stress - frá togprófi kambstáls
set E 200000.0;    # Young's modulus - EC2
#
uniaxialMaterial Steel02 3    $fy $E 0.01 18.5 0.925 0.15

# Define cross-section for nonlinear columns
# -----

# set some paramaters
set colWidth 650
set colDepth 190

set cover 38
set cover2 53
set As 79;        # area of K10

# some variables derived from the parameters
set y1 [expr $colDepth/2.0]
set z1 [expr $colWidth/2.0]

section Fiber 1 {

    # Create the concrete core fibers
    patch rect 1 10 1 [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]

    # Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
    patch rect 2 10 1 [expr -$y1] [expr $z1-$cover] $y1 $z1
    patch rect 2 10 1 [expr -$y1] [expr -$z1] $y1 [expr $cover-$z1]
    patch rect 2 2 1 [expr -$y1] [expr $cover-$z1] [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover]
    patch rect 2 2 1 [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1] $y1 [expr $z1-$cover]

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
```

```

        layer straight 3 7 $As [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover] [expr
$y1-$cover] [expr $cover-$z1]
        #fiber [expr $y1-$cover2] [expr $z1-$cover2] $As 3 # Notað til að
skoða áhrif kverkjárna
        #fiber [expr $y1-$cover2] [expr $cover2-$z1] $As 3 # Notað til að
skoða áhrif kverkjárna
        #fiber [expr $cover2-$y1] [expr $z1-$cover2] $As 3 # Notað til að
skoða áhrif kverkjárna
        #fiber [expr $cover2-$y1] [expr $cover2-$z1] $As 3 # Notað til að
skoða áhrif kverkjárna
        layer straight 3 7 $As [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover] [expr
$cover-$y1] [expr $cover-$z1]

    }

# Estimate yield curvature
# (Assuming no axial load and only top and bottom steel)
set d [expr $colDepth-$cover] ;# d -- from cover to rebar
set epsy [expr $fy/$E] ;# steel yield strain
set Ky [expr $epsey/(0.7*$d)]

# Print estimate to standard output
puts "Estimated yield curvature: $Ky"

# Set axial load
set P -3

set mu 10;          # Target ductility for analysis
set numIncr 100000; # Number of analysis increments

# Call the section analysis procedure #Kallað á ferli sem framkvæmdir
vægi-krappa graf
source MomentCurvature.tcl
MomentCurvature 1 $P [expr $Ky*$mu] $numIncr

wipe all

```

• Source MomentCurvature.tcl

```

# A procedure for performing section analysis (only does
# moment-curvature, but can be easily modified to do any mode
# of section reponse.
#
# MHS
# October 2000
#
# Arguments
#   secTag -- tag identifying section to be analyzed
#   axialLoad -- axial load applied to section (negative is
compression)
#   maxK -- maximum curvature reached during analysis
#   numIncr -- number of increments used to reach maxK (default 100)
#
# Sets up a recorder which writes moment-curvature results to file

```

```

# section$secTag.out ... the moment is in column 1, and curvature in
column 2

proc MomentCurvature {secTag axialLoad maxK {numIncr 100} } {
  # Define two nodes at (0,0)
  node 1 0.0 0.0
  node 2 0.0 0.0

  # Fix all degrees of freedom except axial and bending
  fix 1 1 1 1
  fix 2 0 1 0

  # Define element
  #
  element zeroLengthSection 1 1 2 $secTag

  # Create recorder
  recorder Node -file section$secTag.out -time -node 2 -dof 3 disp

  # Define constant axial load
  pattern Plain 1 "Constant" {
    load 2 $axialLoad 0.0 0.0
  }

  # Define analysis parameters
  integrator LoadControl 0.0
  system SparseGeneral -piv; # Overkill, but may need the
pivoting!
  test NormUnbalance 1.0e-5 8000
  numberer RCM
  constraints Plain
  algorithm Newton
  analysis Static

  # Do one analysis for constant axial load
  analyze 1

  # Define reference moment
  pattern Plain 2 "Linear" {
    load 2 0.0 0.0 1.0
  }

  # Compute curvature increment
  set dK [expr $maxK/$numIncr]

  # Use displacement control at node 2 for section analysis
  integrator DisplacementControl 2 3 $dK 1 $dK $dK

  # Do the section analysis
  analyze $numIncr
}

```