

Skoðun á tengingum milli forsteypta stöpuleininga

Lokaskýrsla vegna styrkúthlutunar nr.1800-1037

Ester María Eiríksdóttir



B.Sc. í byggingartæknifræði

Skoðun á tengingum milli
forsteyptra stöpuneyninga

Nóvember, 2024

Nafn nemanda: Ester María Eiríksdóttir

Kennitala: 030101 – 2430

Umsjónarmaður: Guðbrandur Steinþórsson

Leiðbeinendur: Jóhann Albert Harðarson,

Ólafur Sveinn Haraldsson, Helgi S. Ólafsson

20 ECTS ritgerð til B.Sc. í byggingartæknifræði

Tæknifræðideild

Heiti verkefnis:
Skoðun á tengingum milli forsteyptra stöpuneyninga

Námsbraut:
Byggingartæknifræði

Tegund verkefnis:
Lokaverkefni í tæknifræði, B.Sc.

Önn:
Haust-2024

Námskeið:
BT LOK1010

Höfundur:
Ester María Eiríksdóttir

Umsjónarkennari:
Guðbrandur Steinþórsson

Leiðbeinendur:
Jóhann Albert Harðarson
Ólafur Sveinn Haraldsson
Helgi Sigursteinn Ólafsson

Fyrirtæki/stofnun:
Vegagerðin
Háskólinn í Reykjavík
BM Vallá

Dagsetning:
29. nóvember

Ágrip:
Markmið þessarar rannsóknar var að hanna og prófa nýja tengingu sem gæti nýst við byggingu forsteyptra mannvirkja, þá sérstaklega við byggingu landstöpla brúa.
Í rannsókninni voru kostir og gallar forsteyptra eininga metnir og farið var yfir mismunandi tegundir tenginga á milli slíkra eininga. Tvær yfirtegundir tenginga eru samsteyputengingar og svokallaðar þurrar tengingar. Þær voru skoðaðar ásamt mismunandi útfærslum á hvorri um sig og kostir og gallar metnir.
Tvö prófstykki voru hönnuð og smíðuð í 37,5% skala. Fyrri prófstykkið var hefðbundin U-lykkjutenging (samsteyputenging) og það síðara ný skúffutenging (þurr tenging). Nýja tengingin byggir á að einingarnar hafa tappa og nót úr stálskúffum sem síðan eru boltaðar saman.
Prófstykkinn voru bæði prófuð gagnvart skeráraun. Niðurstöður sýndu að nýja tengingin er auðveld í smíði og samsetningu og þoldi heldur meira álag en reiknað var með að hún þyldi.

Lykilorð íslensk:
Forsteypa
Forsteyptar einingar
Samsteypa
Lóðréttar tengingar

Lykilorð ensk:
Precast concrete
Precast elements
In-situ
Vertical connections

Dreifing:
opin ☒ lokuð ☐ til: (dags ef við á)

Formáli

Þessi ritgerð er lokaverkefni til B.Sc. gráðu í byggingartæknifræði frá Háskólanum í Reykjavík. Verkefnið er hluti af stærra verkefni hjá Vegagerðinni og er styrkt af Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar (styrknr. 1800-1037).

Möguleikarnir við val á lokaverkefni í byggingartæknifræði eru margir og áhugasvið mitt er breitt. Í gegnum námið hugsaði ég oft um það í hvaða átt ég vildi fara varðandi loka-verkefni og komst að því að flest tengt uppbyggingu og smíði mannvirkja heillar mig. Ég er smíður að mennt svo ég hafði í huga að það væri gaman að gera einhverskonar tilraun eða annað sem krefðist smíðavinnu. Þegar Jóhann Albert kannaði svo áhuga minn á að taka þátt í verkefni hjá Vegagerðinni sem fæli í sér að steypa prufustykki þurfti ég því ekki að hugsa mig lengi um.

Þakkir

Fyrst og fremst vil ég þakka leiðbeinendum mínum, þeim Jóhanni Albert Harðarsyni, dr. Ólafi Sveini Haraldssyni og Helga Sigursteini Ólafssyni, fyrir góða aðstoð, upplýsingagjöf og ábendingar í gegnum allt ferlið við vinnslu þessa verkefnis. Jóhanni vil ég þakka sérstaklega aðstoð við útreikninga og ákvarðanatöku í prófstykkjasmíði og dr. Ólafi fyrir hans framtakssemi og skjót og góð svör við spurningum. Einnig vil ég þakka Rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar fyrir að styrkja verkefnið.

Kambstál.is fær þakkir fyrir að leggja til bendistál í prufustykkin og Elvar Már Jóhannsson hjá Vélaverkstæði Kaupfélags Skagfirðinga fyrir að útvega og beygja skúffurnar í tenginguna. Sigríður Ósk Bjarnadóttir hjá Hornsteini/BM Vallá fær kærar þakkir fyrir aðstoð og aðstöðu við steypuvinnu og Jóhann Kristinn Rafnsson fyrir steypuathuganir og góða aðstoð við að steypa prófstykkinn. Indriði Sævar Ríkharðsson og Gísli Freyr Þorsteinsson fá þakkir fyrir aðstoð við brotpróf.

Eiríki Frímann Arnarsyni, pabba mínum, vil ég þakka sérstaklega hans aðkomu að smíði prófstykkjanna og fyrir að hugsa og pæla með mér. Kristínu Bjarnadóttur, mömmu minni, vil ég þakka yfirlestur á verkefninu, hvatningu og pepp.

Að lokum vil ég þakka fjölskyldu minni og Snorra, kærasta mínum, stuðninginn í gegnum allt námið.

Ester María Eiríksdóttir

Ágrip

Markmið þessarar rannsóknar var að hanna og prófa nýja tengingu sem gæti nýst við byggingu forsteyptra mannvirkja, þá sérstaklega við byggingu landstöpla brúa.

Í rannsókninni voru kostir og gallar forsteyptra eininga metnir og farið var yfir mismunandi tegundir tenginga á milli slíkra eininga. Tvær yfirtegundir tenginga eru samsteyputengingar og svokallaðar þurrar tengingar. Þær voru skoðaðar ásamt mismunandi útfærslum á hvorri um sig og kostir og gallar metnir.

Tvö prófstykki voru hönnuð og smíðuð í 37,5% skala. Fyrra prófstykkið var hefðbundin U-lykkjutenging (samsteyputenging) og það síðara ný skúffutenging (þurr tenging). Nýja tengingin byggir á að einingarnar hafa tappa og nót úr stálskúffum sem síðan eru boltaðar saman.

Prófstykkin voru bæði prófuð gagnvart skeráraun. Niðurstöður sýndu að nýja tengingin er auðveld í smíði og samsetningu og þoldi heldur meira álag en reiknað var með að hún þyldi.

Abstract

In this thesis, the pros and cons of precast concrete elements are evaluated and different types of connections between such elements discussed. There are two main types of connections, dry connections and wet connections. The pros and cons of each were also evaluated.

Two test specimens were designed and constructed at a 37,5% scale. The first test specimen is a traditional U-loop connection (wet connection), while the second was a new type of connection (dry connection). The new connection is a male-female connection connected by steel channels, which are then bolted together.

The test specimens were both tested against shear force. The results showed that the new connection is easy to construct and withstood more than the load it was calculated to endure.

Tákn

R_A, R_B	Svörunarkraftur
q	Álagsdreifing
l, a, b, c	Lengd
A	Flatarmál
A_s	Flatarmál stáls
f_{yk}	Stálstyrkur, kennigildi
f_{ym}	Meðalgildisstyrkur stáls
f_{cm}	Meðalgildi þrýstistyrks steypu
δ_s	Óvissustuðull
C, μ	Yfirborðsstuðlar
σ_n	Normalspenna
$\sigma_{\perp}$	Hornrétt normalspenna
M_{Rd}	Vægipól
F_{cc}	Lokakraftur spennudreifingar
z	Innri vægisarmur
x	Hæð að hlutlausum ás þversniðs
λ	Hæð spennudreifingar fyrir rétthyrnda spennudreifingu
η	Leiðréttingarstuðull fyrir hástyrkleikasteypu
d	Nothæð þversniðs
$V_{Rd,c}$	Skerþol steypis þversniðs
ρ_l	Járnahlutfall
τ	Skerspenna
α	Horn
l_{eff}	Virk lengd
l_w	Lengd suðu
M	Vægisáraun
W	Mótstöðuvægi
e	Vægisarmur
γ	Skerstreita
τ_{AV}	Meðalskerspenna
G	Skúfstuðull
U	Orka
V	Rúmmál
$\frac{U}{V}$	Streituorkuþéttleiki

Efnisyfirlit

Formáli	ii
Ágrip	iii
Abstract	iii
Tákn	iv
Myndaskrá	viii
Töfluskrá	viii
1 Inngangur	1
2 Saga forsteypunnar	3
2.1 Notkun forsteyptra eininga á Íslandi	3
2.1.1 Brúargerð	4
3 Eiginleikar forsteypu	4
3.1 Kostir forsteypu	4
3.1.1 Tímasparnaður á verkstað	4
3.1.2 Meiri gæði byggingarhluta eða eininga	5
3.1.3 Lægri framkvæmdakostnaður	5
3.1.4 Umhverfislegur ágóði	5
3.2 Áskoranir við forsteypuþækni	6
3.2.1 Skipulag í kringum framkvæmdina	6
3.2.2 Flutningur forsteyptra eininga	6
3.2.3 Tengingar	8
4 Lóðréttar tengingar á milli veggeininga	8
4.1 Álag	9
4.2 Tegundir tenginga	10
4.3 Samsteypuþengingar (e. wet connection)	10
4.3.1 U-lykkjutenging	10
4.3.2 Tengibakki með vírallykkjum	12
4.3.3 Tenging með steiptum bita	13
4.4 Þurrar tengingar (e. dry connection)	14
4.4.1 Boltuð tenging	15

4.4.2	Stálskúffutenging	16
4.4.3	Soðin tenging	16
5	Hönnun og smíði prófstykkja	18
5.1	Valdar tengingar	18
5.2	Staðlar	19
5.3	Hönnun prófstykkja	20
5.3.1	Burðarþolsútreikningar	22
5.4	Smíði prófstykkja	30
5.5	Aðferðafræði rannsóknar	40
5.5.1	Búnaður	40
5.5.2	Uppsetning tilraunar	40
5.5.3	Prófun	42
6	Niðurstöður	43
6.1	Prófstykki með U-lykkjutengingum	44
6.2	Prófstykki með skúffutengingum	45
7	Umræður og greining á mældum niðurstöðum	47
8	Samantekt og lokaorð	54
	Heimildir	55
	Viðaukar	59
A	Teikningar	59
B	Útreikningar	62
C	Kóði fyrir gröf	82
D	Tækniblöð	89
E	Veggspjald	92

Myndaskrá

1	Álag á stoðvegg [24]	9
2	Frá framkvæmdinni við Jökulsá á Dal	11
3	Teikning af U-lykkjutengingu Vegagerðarinnar	12
4	Víralykkjutenging [34]	13
5	Bitatenging	14
6	Boltuð tenging [21]	15
7	Stálskúffutenging, aðlöguð frá [32]	16
8	Soðin tenging, Eurocode 2 [5]	17
9	Stálplata frá Peikko [33]	17
10	Soðin fingratenging [36]	17
11	Þríasapróf [38]	21
12	U-lykkjutenging til prófunar	22
13	Skúffutenging til prófunar	22
14	Kerfismynd [38]	23
15	Samanburður á vægiáraun með og án vægisstífni	26
16	Skerbrot í tappa	26
17	Skerbrot við samskeyti steypu og stálskúffu	27
18	Mál suðu	27
19	Brot í stálskúffu	28
20	Mót fyrir skúffutenginguna	30
21	Mót fyrir U-lykkjutenginguna	31
22	Horft inn í enda U-lykkjumóts	31
23	Kambstál soðið á skúffur	32
24	Framkvæmd við járnabindingu	32
25	Járnabending í skúffutengingu	33
26	Járnabending í U-lykkjutengingu	34
27	Bitar í U-lykkjutengingu	36
28	Tenging tilbúin fyrir samsteypu	37
29	Tengingin steyppt	37
30	Gúmmíþéttingin	39
31	Bæði prófstykki tilbúin	39
32	Bitar klárir í prófun	40
33	Fimmpunkturpróf, U-lykkjutenging	41
34	Fimmpunkturpróf, skúffutenging	41
35	Uppsetning tilraunar	42

36	Kraftur sem fall af tíma við prófun	43
37	Heildarkraftur sem fall af færslu fyrir prófstykki með U-lykkjutengingum	44
38	Sprungumyndun í samskeytum milli forsteyptu eininganna	45
39	Heildarkraftur sem fall af færslu fyrir prófstykki með U-lykkjutengingum	45
40	Sprungur í skúffubita	46
41	Prófstykki með skúffutengingum eftir prófun	46
42	Kraftur sem fall af færslu	47
43	Uppsöfnuð orkulosun beggja prófstykkja	48
44	Hornsnúningur U-lykkjutengingar	49
45	Hornsnúningur skúffutengingar	49
46	Spennu-streitugraf	50
47	Skúfstuðull	51
48	Streituorkuþéttleiki	52

Töfluskrá

1	Hönnunarstaðlar tengdir verkefninu	19
2	Skölun veggeininga	20
3	Uppskrift og mælingar steypu	35
4	Sívalningspróf eftir tvo daga	36
5	Sívalningspróf eftir fimmtán daga	38
6	Sívalningspróf samsteypu eftir þrettán daga	38
7	Niðurstöður sívalningsprófa á prófdag	42
8	Samanburður á reiknuðum og mældum kröftum	53

1 Inngangur

Á þjóðvegakerfi Íslands eru um 1.200 brýr og á stofnvegum landsins eru um 400 einbreiðar brýr. Margar þessara brúa eru ekki hannaðar fyrir nútíma þungaumferð [1]. Innviðaráðuneytið hefur þá stefnu að allar einbreiðar brýr á Hringveginum verði gerðar tvíbreiðar fyrir árið 2038 en á Hringveginum sjálfum eru enn 29 einbreiðar brýr [2].

Það er kostnaðarsöm framkvæmd að laga eða byggja nýjar brýr. Framkvæmdin felur í sér umferðartafir og oft á tíðum rof Hringvegarins [1]. Það er allra hagur að framkvæmdir við hverja og eina brú taki sem allra skemmstan tíma.

Við smíði brúa á Íslandi er almennt notast við staðsteyptar lausnir eða staðsteyputækni. Þetta á sérstaklega við um undirstöður og stöpla undir brýr. Aðferðin er vel þekkt og virkar vel en staðsteypa tekur langan tíma með tilheyrandi umferðartöfum og raski [3].

Árið 2017 var ný brú hönnuð yfir Jökulsá á Dal við Klaustursel í tengslum við framkvæmdir á Kröflulínu 3. Vegagerðin sá um hönnun og byggingu brúarinnar. Verktaki brúarinnar óskaði eftir að stöplar brúarinnar væru forsteyptir til þess að flýta fyrir framkvæmdum á verkstað. Síðan árið 2022 hefur í kjölfarið hefur verið þróuð ný tenging milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls við Háskóla Íslands og Háskólann í Reykjavík í samstarfi við BM Vallá og Vistu verkfræðistofu [3].

Þessi rannsókn er hluti af því verkefni, það er „Þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpulveggjar og staðsteypts sökkuls“. Þessi hluti verkefnisins gengur út á að þróa nýja og einfalda tengingu milli sjálfra forsteyptu veggeininganna með það að markmiði að einfalda og flýta fyrir samsetningu landstöpla og þar með lágmarka framkvæmdatíma á verkstað. Markmiðið er að nýja tengingin geti nýst í öðrum verkefnum Vegagerðarinnar og þá sérstaklega í brúarverkefnum utan höfuðborgarsvæðisins.

Ferli

- *Upplýsingaöflun um forsteyputækni, forsteyptar einingar og tengingar á milli þeirra*
- *Hönnun prófstykkja og útreikningar*
- *Smíði prófstykkja í tilraunastofu*
- *Prófanir í tilraunastofu*
- *Mat á niðurstöðum prófana*

Rannsóknarspurningar

- *Hvaða lausnir eru til í tengingum milli forsteyptra eininga?*
- *Er hægt að útfæra og þróa tengingu sem er hentugri en sú sem notuð er í dag?*

2 Saga forsteypunnar

Þróun steyptra mannvirkja hefur gengið hægt. Það varð ekki sams konar bylting í mannvirkjagerð eins og á mörgum öðrum sviðum eftir seinni heimsstyrjöldina. Með tilkomu forsteyputækni má þó segja að nokkurs konar „iðnbylting“ hafi átt sér stað í mannvirkjagerð [4].

Í evrópska þolhönnunarstaðlinum fyrir steinsteypu (ÍST EN 1992-1-1) [5] eru forsteyptar einingar skilgreindar sem einingar framleiddar í verksmiðju eða á öðrum stað en á lokastaðsetningu þeirra, þar sem þeim er skýlt fyrir veðri og vindum. Í sama staðli eru forsteypt mannvirki skilgreind sem mannvirki úr forsteyptum einingum sem tengdar eru saman á hátt sem tryggir að kröfur um stöðugleika séu uppfylltar [5].

Þróun forsteyputækni hófst á árunum 1920 til 1940 og fjöldaframleiðsla á einingum varð möguleg um árið 1960 [4]. Frá því tímabili hefur forsteyputækni þróast mikið, þá aðallega með tilkomu hástyrkleikasteypu og stærri vinnuvéla [4]. Frá því um síðustu aldamót hefur þróun í forsteyputækni aðallega miðast við umhverfisvænni lausnir. Sjálfvirkni í byggingariðnaði er að aukast og með aukinni framleiðslu á forsteypu og innleiðingu BIM kerfa (e. Building information management) verður skilvirkni og sjálfvirkni í mannvirkjagerð enn meiri á komandi árum [4].

Forsteypt mannvirki eru sjaldan eingöngu úr forsteyptum einingum. Algengt er að forsteypa og staðsteypa séu notaðar saman í mannvirkjum. Þá koma saman styrkleiki staðsteypunnar og hraði og gæði forsteypunnar. Það getur komið sér sérstaklega vel þar sem hætta er á jarðskjálftum [4]. Forsteypa hefur þó verið notuð ein og sér með góðum árangri á jarðskjálftasvæðum [3].

2.1 Notkun forsteyptra eininga á Íslandi

Forsteyptar einingar hafa lengi þekkt og verið notaðar með góðum árangri í húsbyggingum á Íslandi. Eftirspurn eftir forsteyptum lausnum á Íslandi hefur þó aukist til muna á síðustu árum [6].

BM Vallá ehf. er eitt þeirra fyrirtækja sem framleiðir forsteyptar einingar á Íslandi. Saga fyrirtækisins hefst árið 1946 en það var árið 1984 sem framleiðsla þeirra á forsteyptum húseiningum hófst. Framleiðslan jókst til muna árið 2008 með kaupum á Smellinn hf. á Akranesi [7]. Starf Steypustöðvarinnar ehf. hófst um svipað leyti og BM Vallár, árið 1947 [8]. Það var þó ekki fyrr en árið 2016 sem fyrirtækið hóf framleiðslu á forsteyptum

einingum til húsbygginga í kjölfar kaupa þeirra á Loftorku í Borgarnesi [6]. Einingaverksmiðjan ehf. er fyrirtæki stofnað öllu seinna, árið 1994, en þar hafa verið framleiddar forsteyptar einingar allt frá stofnun, enda sérhæfing fyrirtækisins [6].

Í öðrum löndum er sums staðar í dag orðið algengara að nota forsteypu en staðsteypu við húsbyggingar, það má ætla að það geti einnig orðið raunin hér á landi þegar fram líða stundir [6].

2.1.1 Brúargerð

Notkun forsteyptra eininga í brúardekkjum hefur færst nokkuð í aukana en hefur ekki verið algeng í stöplum brúa. Aðferðum við gerð brúa á Íslandi má skipta upp í staðsteypa stöpla og staðsteyppt brúardekk annars vegar og hins vegar staðsteyppta stöpla og staðsteyppt eftirspennt brúardekk [3]. Hefðbundin aðferð við byggingu landstöpla á Íslandi er að slá upp og steypa sökklana áður en mótum er slegið upp fyrir sjálfum stöpulveggjunum sem koma þar ofan á [9]. Í fyrsta skipti voru notaðir forsteyptir landstöplar í verkefni Vegagerðarinnar við brúna yfir Jökulsá á Dal við Klaustursel. Hún var byggð árið 2019 [3].

3 Eiginleikar forsteypu

Að byggja mannvirki með forsteypuþækni hefur bæði kosti og galla og því er mikilvægt að skoða hvort hún sé hentugri kostur en staðsteypa í hverju verki fyrir sig. Í þessum kafla verður farið yfir helstu kosti og galla forsteypuþækni samanborið við staðsteypu.

3.1 Kostir forsteypu

Eins og áður hefur komið fram færast vinsældir forsteypu sífellt í aukana, bæði hér á landi og annars staðar í heiminum. Kostir hennar fram yfir staðsteypu felast meðal annars í tímasparnaði á verkstað, meiri gæðum byggingarhluta eða eininga, lægri framkvæmdarkostnaði og mögulegum umhverfislegum ágóða.

3.1.1 Tímasparnaður á verkstað

Tímasparnaður við forsteypt mannvirki borin saman við staðsteyppt mannvirki felst í tveimur meginatriðum. Fyrra atriðið er að hægt er að steypa einingarnar og undirbúa þær á sama tíma og undirbúningur verksins fer fram á verkstað (t.d. gröftur o.fl.). Þannig verður tíminn sem fer í undirbúning og uppsetningu eininganna töluvert styttri en þegar

undirbúningur á verkstað þarf að klárast áður en hægt er að steypa. Seinna atriðið er að veður hefur ekki eins mikil og tefjandi áhrif á framkvæmdina [10]. Frost hefur slæm áhrif á steypu og þá sérstaklega áður en hún nær 5 MPa þrýstipólí. Á Íslandi skiptir frosti og þýðu oft og með litlum fyrirvara svo erfitt getur reynst að tímasetja steypuvinnu þannig að steypan nái tilskyldum styrk án þess að frysti í millitíðinni. Við íslenskar aðstæður getur þar af leiðandi tekið langan tíma fyrir steypuna að ná hönnunarstyrk sínum og ef frystir of snemma getur steypan eyðilagst [11]. Eins og áður hefur komið fram eru einingarnar steypar í verksmiðju og því verða sjaldnar tafir á meðan beðið er eftir réttu veðri.

3.1.2 Meiri gæði byggingarluta eða eininga

Ef notast er við forsteyptar einingar er steypan varin fyrir frosti allan tímann á meðan hún nær styrk en það getur, eins og áður hefur komið fram, skipt sköpum fyrir gæði steypunnar [10], [11]. Framleiðsla forsteyptra eininga í verksmiðju gerir framleiðendum kleift að halda úti ströngu gæðaeftirliti því ferlið verður staðlað. Það gerir gæði afurðarinnar fyrirsjáanlegri og stöðugri á milli verkefna [12]. Í verksmiðjum er einnig hægt að notast við tækjabúnað við framleiðsluna sem gerir hana nákvæmari ásamt því að ferlið verður einsleitara sem leiðir af sér sérhæfðara starfsfólk við framleiðsluna [10].

3.1.3 Lægri framkvæmdakostnaður

Forsteypt mannvirki geta, samkvæmt rannsókn CII [10], minnkað heildarkostnað um 10% og kostnað við vinnu á verkstað um allt að 25%. Að geta steyppt fyrir fleiri en eitt verkefni í einu flýttir fyrir og gerir það að verkum að oft er hægt að panta efni með magnafslætti [10]. Hægt er að takmarka hve mörg vinnutæki eru flutt á verkstað ef ekki er steyppt á staðnum og það felur einnig í sér að færri fólk þarf á verkstað. Eins og áður hefur komið fram, þá hefur veður minni áhrif á framkvæmd við forsteypt mannvirki en við þau staðsteyptu. Í færri og styttri töfum á verkinu felst ekki eingöngu tímasparnaður heldur einnig lægri framkvæmdakostnaður [10].

3.1.4 Umhverfislegur ágóði

Mörg forsteypt mannvirki er hægt að taka í sundur við enda líftíma þeirra sem veitir möguleika á að endurnýta einingarnar [12]. Framleiðsla í einingaverksmiðju býður upp á þann möguleika að hægt sé að flokka það efni sem fellur til. Sýnt hefur verið fram á að úrgangsmýndun við byggingu forsteyptra mannvirkja getur verið rúmlega 60% minni en í staðsteyptum mannvirkjum og losun gróðurhúsalofttegunda getur minnkað um 10%

við að nýtast við forsteypuþækni [13]. Þá má einnig nefna umhverfislegan ágóða í þeim skilningi að hávaði, ryk og annað sem fylgir framkvæmdum með staðsteypuþækni er að öllu jöfnu talsvert minni þegar einingar koma tilbúnar á staðinn eins og raunin er með forsteypuþækni [10]. Almennt hafa framkvæmdir með staðsteypuþækni áhrif á starfsemi í nágrenni hennar, því styttri tíma sem framkvæmdin tekur, því minna raski veldur hún því fyrir aðra [12]. Hluta sementmagns steypu er hægt að skipta út fyrir flugösku til þess að minnka losun koltvísýrings við framleiðslu. Þeir annmarkar eru á þeim skiptum að steypa er lengur að ná fullum styrk, þá sérstaklega þegar hún harðnar í kulda [14]. Það er því hægt að skipta sementi út fyrir flugösku þegar forsteypuþækni er notuð þar sem sú steypa harðnar alltaf við bestu aðstæður sem hjálpar til við styrkmyndun.

3.2 Áskoranir við forsteypuþækni

Af framangreindu má ætla að með notkun forsteypuþækni sé hægt að sjá fram á bæði styttri framkvæmdatíma á verkstað og lægri framkvæmdakostnað. Þegar ákveðið er að ráðast í byggingu forsteyptra mannvirkis eru þó ýmsar áskoranir sem hafa þarf í huga. Þar vega nokkrir þættir þungt. Skipulagið í kringum framkvæmdina þarf að vera nákvæmt, innviðir og tækjabúnaður þurfa að vera til staðar svo hægt sé að reisa forsteyptr mannvirki og síðast en ekki síst eru það tengingarnar á milli eininganna sem bæði þurfa að vera einfaldar og geta flutt álag á milli byggingarhluta. Tengingar eru gjarnan staðsettar þar sem má búast við mestu álagi og ólínulegum formbreytingum [3].

3.2.1 Skipulag í kringum framkvæmdina

Þegar um forsteyptr mannvirki er að ræða þarf skipulag í kringum verkframkvæmdina að vera gott og nákvæmt. Undirbúningur á verkstað þarf að passa við tímasetningar á afhendingu á einingum og jafnframt þarf aðgengi inn á verkstað að vera tryggt. Það þarf því bæði góða verkáætlun og samhæfingu í verkinu [10]. Kostnaður við ákvarðanir um breytingar á mannvirki eftir að framkvæmd hefst getur verið meiri en þegar notast er við staðsteypuþækni [4]. Það er lítið svigrúm fyrir breytingar eða mistök við undirbúning fyrir einingarnar því þeim verður ekki breytt á verkstað. Þetta á sérstaklega við um undirbúning tenginga á milli forsteyptra eininganna og tengingar við undirstöður [10].

3.2.2 Flutningur forsteyptra eininga

Forsteyptrar einingar þarf að flytja tilbúnar frá verksmiðju á verkstað. Flutningur eininga getur reynst hindrun. Vegakerfið sjálft getur verið takmarkandi þegar kemur að þunga-

flutningum. Einnig þarf sérhæfð tæki sem geta flutt stórar og massamiklar einingar [10].

Pungatakmarkanir

Á hverju vori þarf að setja pungatakmarkanir á fjölda vega á Íslandi til að draga úr hættu á vegskemmdum á meðan frost fer úr jörðu [15]. Hætt er við að skemmdir verði meiri ef slitlagið, t.d. klæðning eða malbik, er gamalt og sprungið. Oft stafa þessar sprungur af miklum þungaflutningum. Í gegnum sprungurnar rennur vatn niður í burðarlag vegarins og sest í efra lag hans. Vatnið frýs yfir veturinn og þegar frost fer úr veginum að vori verður það þess valdandi að skemmdir í burðarlagi vegarins verða enn meiri [16]. Það kemur fyrir að setja þurfi strangar pungatakmarkanir vegna veðurfars. Það eru dæmi um að sjö tonna pungatakmarkanir hafi verið settar á samtals 200 kílómetra kafla á þjóðveginum hér á landi á sama tíma [17]. Á meðan pungatakmarkanir eru í gildi á vegum geta verk tafist sem krefjast þess að einingar séu fluttar um vegina. Líkurnar á því að pungatakmarkanir verði strangari aukast eftir því sem meiri umferð þungaflutninga fer um veginn. Hægt er að bregðast við því með því að hafa einingarnar fleiri og minni sem þýðir léttari einingar.

Hífingakranar

Forsteyptar einingar geta verið þungar. Til þess að koma einingunum fyrir þarf því að nota hífingakrana og/eða önnur sérhæfð tæki. Einingarnar eru hífðar með krana á verkstað og þær þarf að staðsetja af nákvæmni [18]. Á heimasíðu DS Lausna ehf. [19] eru þrenns konar gerðir af hífingakrönum. Það eru svokallaðir hraðkranar sem hafa allan búnað sem þarf til flutninga áfastan. Þá eru hefðbundnir sjálfreisandi krana sem oft hífa mót á verkstað. Þriðja gerðin eru turnkranar sem eru sterkari og stöðugri en hinar tvær gerðirnar og hafa allt að 90 tonna lyftigetu [19]. Þeir henta þar af leiðandi oftast í stærri verk eins og þar sem notast er við forsteyptar einingar. Stærð og þar með massi eininganna getur samt sem áður takmarkast við getu krananna til þess að hífa þær. Þar skiptir staðsetning kranans miklu máli. Krani ber minni þyngd eftir því sem hann er lengra frá svæðinu sem einingin á að enda á. Í tækniblaði turnkrana sem DS Lausnir nota og má sjá í viðauka D má lesa út að burðargetan minnkar að jafnaði um 4% á hvern metra sem það sem hífð er fer fjær krananum [20]. Hafa ber í huga að það getur verið erfitt að koma krana fyrir þannig að hann sé nógu nálægt lokastaðsetningu allra eininganna. Stærð eininganna skiptir því töluverðu máli, hún þarf að taka mið af aðstæðum hverju sinni [18].

3.2.3 Tengingar

Ein leið til að mæta þeim áskorunum sem hér hafa verið nefndar og tengjast stærð og massa forsteyptra eininga er að hafa einingarnar minni. Það verður þess valdandi að einingunum fjölgar svo fleiri tengingar verða í mannvirkinu.

Styrkur og gæði forsteyptra mannvirkja fer ekki eingöngu eftir styrk eininganna sjálfra heldur einnig tenginganna á milli þeirra. Tengingarnar geta jafnvel talist einn mikilvægasti þátturinn og jafnframt ein helsta áskorunin við hönnun forsteyptra mannvirkja [13]. Um tengingar milli forsteyptra eininga segir í evrópska þolhönnunarstaðlinum fyrir steinsteypu, að tengingar skuli geta staðist álag í samræmi við hönnunarforsendur, tekið við aflögunum og tryggt áreiðanlega hegðun mannvirkisins [5]. Tengingarnar verða að geta flutt bæði vægi- og skerkrafta á milli eininga án þess að hreyfing verði á veggjunum. Tengingar eiga einnig að geta spornað við hreyfingu þegar breytingar verða á rúmmáli eininganna til dæmis af völdum hita- og kuldabreytinga eða vegna rýrnunar, eftir því sem steypan harðnar [13].

Margir þættir skipta máli við hönnun tenginga. Fyrst ber að nefna stöðugleika (e. stability) alls mannvirkisins. Sömuleiðis þarf að huga að kröfum tengdum notálagi, það er kröfum er varða formbreytingar, sprunguvíddir og titring. Meta þarf hvaða tegund tengingar skal nota í sambandi við umhverfisaðstæður, lausnin þarf að vera bæði þægileg í samsetningu og ekki of kostnaðarsöm. Síðast en ekki síst þarf að gera ráð fyrir tíma-bundnum stöðum og öðru til þess að hægt sé að flytja einingarnar og setja þær saman á verkstað [21].

4 Lóðréttar tengingar á milli veggeininga

Tengingarnar sem almennt þarf að hanna við gerð forsteyptra mannvirkja eru annars vegar láréttar tengingar, til dæmis á milli veggjar og undirstöðu og á milli eininga, og hins vegar lóðréttar tengingar á milli veggeininga [13]. Hér verður sjónum beint að lóðréttum tengingum milli forsteyptra stöpulveggja landstöpla brúa, sem tilheyra undirbyggingu mannvirkisins. Undirbygging brúa er sá hluti brúar sem styður við yfirbygginguna. Hlutverk hennar er að flytja krafta frá yfirbyggingu niður í grundun brúarinnar. Stöpulveggir (e. abutment walls) eru hluti af undirbyggingu brúa, þeir eru staðsettir við enda brúarinnar. Hlutverk stöpulveggja er annars vegar að styðja undir brúardekkið og hins vegar að halda við jarðveg vegarins sem liggur að brúnni. Út frá stöpulveggjum koma væng-

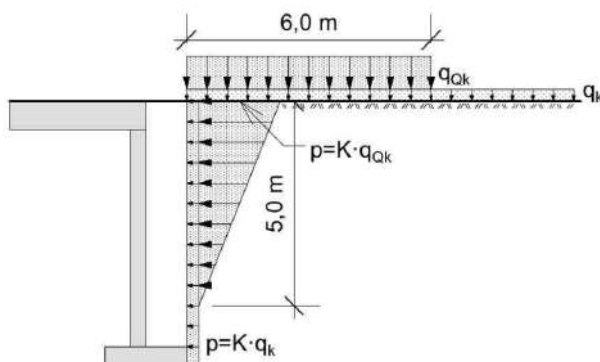
veggir (e. wingwalls). Þeir gegna einungis því hlutverki að halda við jarðvegslag vegarins við brúna. Ef vængveggir brúarinnar eru ekki tengdir beint við stöpulveggina eru þeir ekki taldir hluti af undirbyggingunni heldur sjálfstæðir stoðveggir [22]. Hlutverk stöpul- og vængveggja er því að hluta til það sama og hlutverk hefðbundinna stoðveggja.

4.1 Álag

Á lóðrétta tengingar í forsteyptum mannvirkjum verka bæði þrýsti- og togkraftar, ásamt vægi- og skerkröftum [23]. Í reglum um hönnun brúa kemur fram að ákvarðandi álag og álagsáhrif á mannvirki skuli felast í áhrifum lárétts álags og álags sem hengir sig á mannvirkið [24].

Stoðveggur þarf bæði að hafa ytri og innri stöðugleika. Ytri stöðugleiki þýðir að það sé öryggi gegn jarðvegsbroti, veltu, skriði og að burðarþol og stæðni jarðvegs sé nægilegt. Innri stöðugleiki þýðir að öryggi sé gegn broti í byggingarhlutanum. Þegar hefðbundnir stoðveggir eru hannaðir er það því gert í tvennu lagi. Annars vegar þarf, eftir að hliðarálag frá jarðveginum er vitað, að athuga stöðugleika stoðveggja gegn veltu og skriði. Hins vegar þarf að athuga vegginn sjálfan, hvort hann hafi nægan styrk, hversu mikla járnabendingu þarf og svo framvegis, það er innri stöðugleikinn [25]. Við hönnun lóðréttra tenginga í stoðvegg er það því aðeins innri stöðugleikinn sem skiptir máli. Hér verður því ekki farið frekar yfir ytri stöðugleika eða gerðir útreikningar á honum.

Þegar horft er til lóðréttra tenginga á milli forsteyptra stoðveggja eru skerkraftar gjarnan ráðandi við hönnun. Tengingarnar flytja lárétta álagið frá jarðveginum sem einingarnar styðja við, sjá mynd 1.



Mynd 1: Álag á stoðvegg [24]

Ef skerkraftarnir verða of miklir fyrir tenginguna geta þær mislagst, sem veikir veggina sem heild. Þó svo að skerkraftarnir séu það álag sem vegur mest getur vægiáraun einnig skipt máli ef ójafn þrýstingur verður frá jarðveginum. Umferð bíla á veginum sem fyllingin ber uppi getur einnig valdið ójöfnu álagi sem skilar sér í vægiáraun [26],[27], [28].

4.2 Tegundir tenginga

Tegundir tenginga á milli forsteyptra hluta eru af tveimur gerðum. Það eru samsteypu-tengingar (e. wet connection) og þurrar tengingar (e. dry connection) [21]. Samsteypu-tengingar byggjast á því að steipt er á milli eininganna eftir að þær eru settar upp á verkstað. Þurrar tengingar eru oftast annað hvort boltaðar eða soðnar saman á verkstað [29]. Hér verður farið yfir kosti og galla hvorrar gerðar fyrir sig. Þar á eftir verða nokkur dæmi tekin um tengingar af báðum gerðum.

4.3 Samsteyputengingar (e. wet connection)

Samsteyputengingar eru, eins og áður segir, tengingar sem krefjast þess að steipt sé á milli þeirra þegar komið er á verkstað [29].

Á Íslandi er þessi tenging aðallega notuð í húsbyggingum en var notuð við gerð nýlegrar brúar yfir Jökulsá á Dal við Klaustursel [3]. Þegar einingar eru tengdar saman á þennan hátt flytjast kraftar órofið á milli þeirra. Einingarnar hegða sér þannig nokkurn veginn sem ein heildstæð eining. Samsteyputengingar eru almennt taldar betri en þurrar tengingar á jarðskjálftasvæðum [21].

Samsteyputengingar flýta framkvæmdartíma mannvirkja á verkstað takmarkað þar sem samsetning á þeim krefst þess að steipt sé á milli þeirra á staðnum eftir að þær hafa verið settar upp [21]. Almennt er erfitt að tryggja gæði tenginganna. Eins og áður hefur komið fram er einn helsti kostur forsteyptra eininga sá að þegar þær eru notaðar þarf ekki að stóla á gott veður til þess að steypa og að eftirlit með steypuvinnunni getur verið meira og nákvæmara. Þegar þarf að steypa í tengingarnar á verkstað minnkar vægi þessara kosta mikið. Tengingarnar eru dýrar en þó ekki svo dýrar að forsteyputækni borgi sig ekki, borið saman við staðsteyputækni [21].

4.3.1 U-lykkjutenging

U-lykkjutenging (e. loop connection) er dæmi um samsteyputengingu. U-lykkjutengingar eru gjarnan notaðar hér á landi, meðal annars af Vegagerðinni, Steypustöðinni og Ein-

ingaverksmiðjunni [30], [31], [3].

Eins og fram hefur komið sá Vegagerðin um hönnun forsteyptrar brúar yfir Jökulsá á Dal og er í kjölfar þess verkefnis í leit að nýrri tengingu. Tengingin sem Vegagerðin notaði á milli forsteyptu veggeininganna við gerð brúarinnar yfir Jökulsá á Dal er U-lykkjutenging. Mynd 2 sýnir samsetningu veggeininga í vesturstöpli brúarinnar.



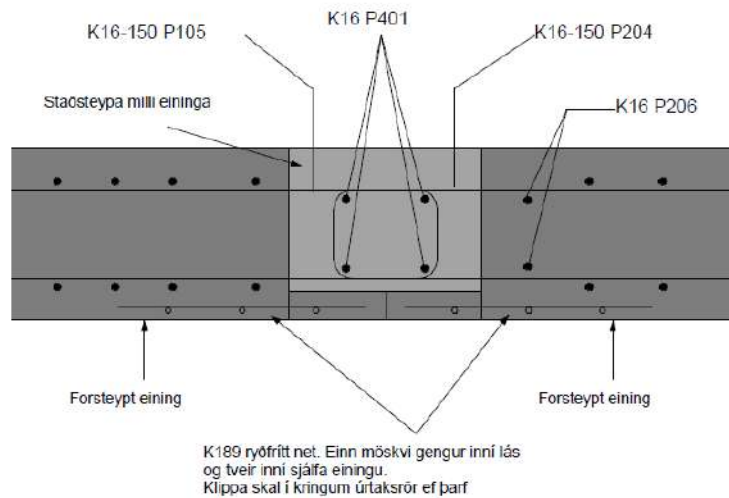
Mynd 2: Frá framkvæmdinni við Jökulsá á Dal

Tengingin byggist á því að það standa U-lykkjur út úr báðum einingunum og þær skarast þegar einingunum er stillt upp, síðan er kambstáli rennt lóðrétt í gegnum þær og steypert á milli.

Aðferðin við uppsetningu er eftirfarandi [31]:

- Staðsetning ákvörðuð og viðmiðunarlínur gerðar
- Einingar hífðar og þeim stillt upp með bili á milli, lykkjurnar skarast
- Lóðréttum teinum stungið niður í gegnum lykkjur beggja eininga
- Slegið mótum við einingarnar
- Steypert í holrúmið á milli
- Slegið frá samsteypunni

Á mynd 3 má sjá dæmi um U-lykkjutengingu á milli forsteyptra eininga sem Vegagerðin hefur notað.



Mynd 3: Teikning af U-lykkjutengingu Vegagerðarinnar

Tengingin er oftast hönnuð fyrir krafta í plani (e. in plane), og þá aðallega í þrýstingi [13]. Hún er sjaldan skoðuð með krafta úr plani (e. out of plane), það er lárétta krafta, í huga. Tengingin krefst nákvæmni og færni þeirra sem vinna að henni [32]. Tengingin getur verið seinleg í samsetningu á verkstað ef gæðaeftirliti með staðsetningu U-lykkjanna er ábótavant, ef lás milli eininga er aflagaður eða U-járnin eru í sama plani. Einingar sem tengdar eru saman með þessari tegund tenginga eru fremur óhentugar í flutningi þar sem lykkjurnar standa út úr þeim alls staðar þar sem þær eiga að tengjast [3].

4.3.2 Tengibakki með vírallykkjum

Nýja útfærslu á U-lykkjutengingum má finna á vörulistum hjá helstu framleiðendum steypuhluta. Útfærslan er tengibakkar með vírallykkjum sem gegna sama hlutverki og járnallykkjurnar í hinni hefðbundnu tengingu [33], [34], [35]. Á mynd 4 má sjá dæmi um slíka tengingu.



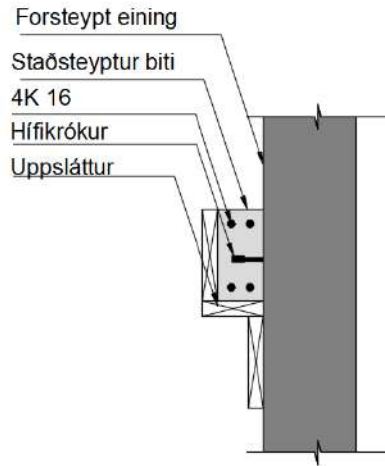
Mynd 4: Víralykkjutenging [34]

Í útfærslu framleiðandans Peikko [33] eru lykkjurnar varðar af plastþili á meðan bakkarnir eru steyptir í mót forsteypu eininganna upp og niður með lengd eininganna. Endinn á lykkjunum nær inn í mótið og bindur þannig bakkann við steypuna. Þannig verður til rás fyrir samsteypuna án frekari fyrirhafnar. Það þarf lítið að mæla eða stilla af þar sem lykkjurnar haldast á sama stað og þurfa ekki að hitta hvor á aðra. Eftir að einingarnar eru steyptar er bakkinn opnaður og lykkjurnar beygðar út. Lykkjurnar haldast opnar svo að eftir að einingunum er stillt upp er hægt að stinga lóðréttu járninu niður í gegnum þær allar. Þá þarf að slá upp plötum eða sambærilegu við samskeytin á meðan steypert er í raufina á milli eininganna þar sem lykkjurnar mætast [33].

Í útfærslu Halfen þarf ekki að beygja lykkjurnar út sem sparar enn meiri tíma [35]. Framleiðandinn Moment solutions fullyrðir að þeirra útfærsla á tengingunni stytta framkvæmdartíma um 50% borið saman við hinar hefðbundnu U-lykkjur. Þessar tengingar eru þar að auki sagðar uppfylla kröfur viðeigandi Evrópustaðals (EN1992-1-1) [34].

4.3.3 Tenging með steypum bita

Nokkrar hugmyndir að nýjum tengingum kviknuðu hjá höfundum og leiðbeinendum verkefnisins á stigi upplýsingaöflunar. Hugmynd sem fæddist að einfaldri tenginu milli eininga má sjá rissaða gróft upp á mynd 5.



Mynd 5: Bitatenging

Tengingin gengur út á að biti er steypur aftan á einingarnar sem kemur í veg fyrir hreyfingar úr plani. Járn myndu standa út úr bakhlið eininganna, sem gætu einnig verið notuð til þess að hífa einingarnar. Aðferð við uppsetningu eininga yrði eftirfarandi:

- Staðsetning eininga ákvörðuð, viðmiðunarlínur gerðar
- Einingar hífðar á sína staði, þétt við hvor aðra
- Fyrirfram smíðað steypumót, samanber mynd, skrúfað aftan á einingarnar
- Járn lögð í mótið og bundin við hífingajárnin
- Steypt í bitamótið

Með þessari aðferð væri auðvelt að framleiða einingarnar án þess að það þurfi að hugsa fyrir því nákvæmlega hvernig einingarnar koma til með að passa saman á verkstað. Einingarnar væru þægilegar í flutningi borið saman við U-lykkjueiningarnar. Á verkstað væri síðan einfalt að raða einingunum upp.

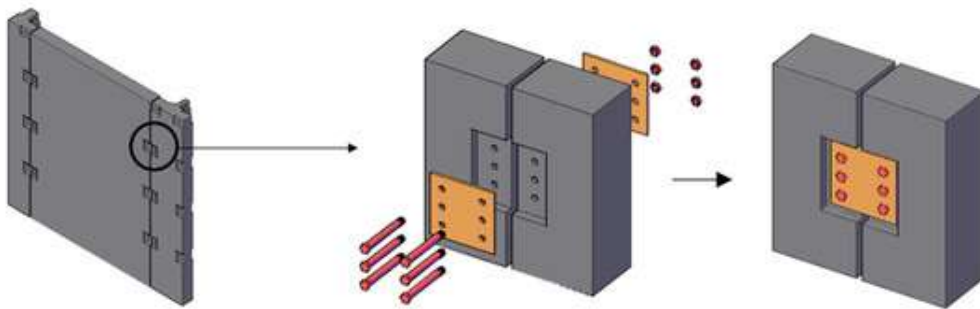
4.4 Þurrar tengingar (e. dry connection)

Þurrar tengingar, tengingar sem ekki krefjast samsteypu á verkstað, eru hinn möguleikinn við að tengja saman forsteyptar einingar [29]. Þurrar tengingar geta ýmist verið boltaðar saman eða soðnar saman [29]. Þurrar tengingar úr stáli gera það að verkum að liður myndast á milli eininganna svo kraftar flytjast ekki jafn óhindrað milli þeirra eins og þegar um samsteyputengingar er að ræða. Tengingarnar eru oft taldar óheppilegar á miklum jarðskjálftasvæðum [29].

Þessar tengingar eru fljótlegri og einfaldari í uppsetningu en þær samsteyptu. Aðalástæða þess að framkvæmdartíminn við uppsetningu þurra tenginga er styttri en við þær samsteyptu er sú að ekki þarf að slá upp og steypa á milli eininga. Þar af leiðandi er ólíklegt að tafir verði á verkinu þess vegna, það er eftir að einingarnar eru fluttar á staðinn. Það þarf ekki jafn margt fólk til þess að setja þær saman og auðveldara er að fylgjast með og tryggja gæði teninganna [21]. Einingarnar hafa gjarnan, þá sérstaklega boltaðar tengingar, þann kost að hægt er að taka þær í sundur aftur [21]. Slík hönnun (e. design for deconstruction (DfD)) [21], er eftirsótt þar sem áhersla er á möguleika á endurnýtingu efna við lok líftíma mannvirkja.

4.4.1 Boltuð tenging

Dæmi um þurra tengingu er útfærsla á boltaðri tengingu sem tengir saman forsteypta vegg. Tengingin hefur verið þróuð í háskólum í Kína, Japan og Frakklandi [21]. Tengingin er sérstaklega hönnuð til þess að standast jarðskjálftaálag [21]. Tengingin er sýnd á mynd 6.

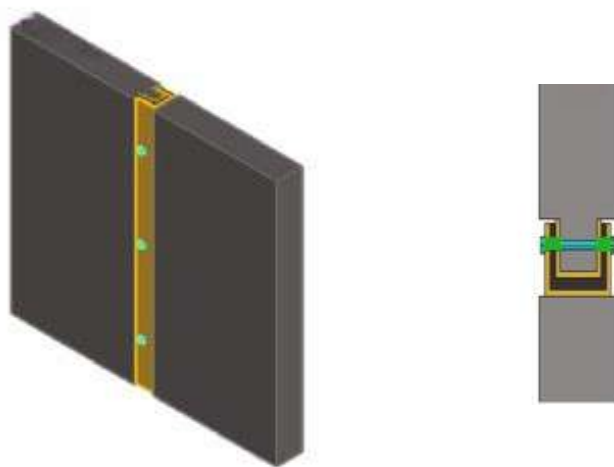


Mynd 6: Boltuð tenging [21]

Til þess að tengja saman einingarnar eru gerð sérstök úrtök fyrir stálplötu sem lögð er á milli tveggja aðliggjandi eininga bæði framan á þær og aftan á. Þegar einingarnar eru steypar eru lítil rör höfð í steypunni sem gera göt fyrir bolta. Í gegnum plöturnar og einingarnar eru svo þræddir stálboltar sem eru hertir að. Einingarnar snertast ekki þegar þær eru tengdar saman heldur er lítið bil haft á milli þeirra sem stálplöturnar mynda. Tengingin er sérstaklega hentug ef líkur eru á að mannvirki sem reist er gæti verið nýtt á annan hátt með því að taka einingarnar í sundur og nýta aftur. Tengingin hefur verið prófuð á litlum skala [21]. Frekari athuganir þarf að gera á tengingunni til þess að hægt sé að vega og meta eiginleika hennar til fulls. Í prófunum gaf tengingin sig við boltagötin þegar álag var sett á hana. Þegar skerkraftar úr plani verka á tenginguna getur stálið aflagast og boltarnir togast út. Til þess að koma í veg fyrir það og til þess að tryggja að tengingin hafi fullan styrk sinn er nauðsynlegt að herða reglulega á boltunum [21].

4.4.2 Stálskúffutenging

Önnur gerð af þurri tengingu var þróuð í háskólanum Putra í Malasíu og byggir á því að einingarnar passi saman með nót öðrum megin og tappa á móti (e. male-female connection). Stálskúffur eru á endum tappans og nótarinnar og þær koma saman er gúmmíþétting höfð á milli þeirra. Á skúffurnar eru soðin steypustyrktarjárn sem ganga inn í steypuna og tengja þær þannig við eininguna. Einingarnar eru sérstaklega hannaðar með jarðskjálftaálág í huga. Gúmmíð sem er á milli stálskúffana hefur það hlutverk að taka við höggi og eyða titringi sem kemur á tenginguna í jarðskjálfta [32].



Mynd 7: Stálskúffutenging, aðlöguð frá [32]

Í rannsókn Putra háskólans var módel gert af tengingunni með einingaaðferðinni (e. finite element method). Þannig var einingin prófuð í öllum helstu álagstílfellum og kom vel út [32].

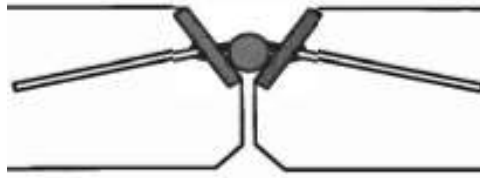
Aðferð við uppsetningu er eftirfarandi

- Ákvarða staðsetningu með viðmiðunarlínunum
- Hífa og staðsetja einingu með nót
- Hífa og staðsetja einingu með tappa við fyrri einingu
- Læsa einingunum saman

4.4.3 Soðin tenging

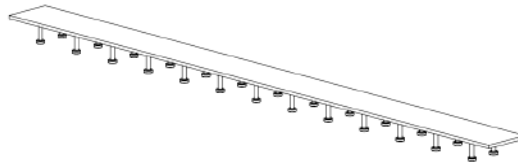
Soðnar tengingar eru algengar þegar forsteyptar einingar eru tengdar saman [13]. Þær eru þó oftast ekki ætlaðar til þess að taka við kröftum úr plani [36]. Nokkrar mismunandi

leiðir eru til þess að tengja einingar saman með málmsuðu. Í evrópska þolhönnunarstaðlinum fyrir steinsteypu er soðin tenging gefin upp sem dæmi um tengingu milli forsteyptra eininga [5]. Á mynd 8 sést tengingin sem sýnd er í Evrópustaðlinum.



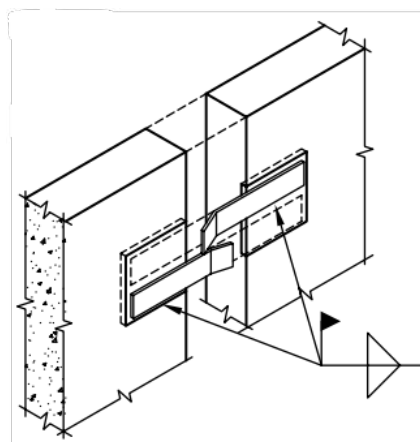
Mynd 8: Soðin tenging, Eurocode 2 [5]

Tengingin virkar þannig að stálplötur á endum eininganna eru soðnar saman. Framleiðandinn Peikko selur stálplötur ætlaðar til slíkra tenginga á milli forsteyptra eininga [33]. Aftan á plötunum eru járnþráir sem steypast inn í vegginn svo platan er slétt við yfirborð steypunnar, sjá mynd 9.



Mynd 9: Stálplata frá Peikko [33]

Nokkrar mismunandi tegundir soðinna tenginga eru gefnar upp í riti sem gefið er út af Precast Concrete Institute. Ein þeirra er tenging þar sem stálplötur eru steypar í bakhlið veggjarins og stálrenningar soðnir á stálplöturnar á sitthvorri einingunni svo þær tengist saman [36], sjá mynd 10.



Mynd 10: Soðin fingratenging [36]

5 Hönnun og smíði prófstykkja

Að lokinni upplýsingaöflun um lóðréttar tengingar milli forsteyptra eininga hófst ferlið við hönnun, smíði og prófun prófstykkja. Fyrsta skrefið í því ferli var að ákveða hvaða tengingar ætti að prófa og í hvaða skala. Hér verður farið yfir helstu þætti í þessu ferli, þar á meðal val á tengingum til prófunar, aðferðir við smíði og framkvæmd prófana.

5.1 Valdar tengingar

Við val á tengingum var markmiðið að finna lausn sem hentar sérstaklega fyrir forsteypta stöpulveggi í brúm. Það sem haft var til hliðsjónar var bæði að tengingin væri auðveld í smíði og einföld í samsetningu á verkstað, umfram það sem hlýst við notkun U-lykkjutengingar. Samkvæmt niðurstöðum heimildavinnunar eru það kraftar hornrétt á einingar stöpulveggja sem valda skerkröftum á milli eininganna, það er kraftar úr plani, sem eru þeir kraftar sem helst þarf að huga að. Í ljósi þess að á Íslandi koma reglulega jarðskjálftar [37], þarf að tryggja að tengingarnar þoli einnig álagið frá þeim jarðskjálftum sem kunna að verða.

Samsteyputengingar eru, eins og fram hefur komið, almennt tímafrekari í uppsetningu heldur en þurrar tengingar. Til þess að lágmarka tímann sem framkvæmdin tekur vegna samsetningar eininga gæti þurr tenging því verið fýsilegri kostur.

Þær þurru tengingar sem hér hefur verið fjallað um voru bornar saman til þess að sjá hvort einhver þeirra væri góður kostur til prófana, hvort best væri að blanda einhverjum hugmyndum saman eða koma með alveg nýja tegund.

Boltaða tengingin sem fjallað er um hér að framan er sérstaklega hönnuð til þess að standast álag frá jarðskjálftum [21]. Hún felur í sér meira viðhald en U-lykkjutengingin, sem felst meðal annars í því að herða þarf reglulega upp á boltum tengingarinnar. Þá gæti reynst örðugt að setja einingarnar saman með þeirri nákvæmni sem boltagötin, sem gerð eru í verksmiðjunni, krefjast.

Stálskúffutengingin er einnig hönnuð sérstaklega með jarðskjálftaálag í huga og ætti að taka vel við kröftum úr plani. Hún á það sameiginlegt með boltuðu tengingunni að vera auðveldari í flutningi en U-lykkjutengingin þar sem ekkert stendur út úr henni. Það er hægt að sjá fyrir sér að auðvelt væri að stilla einingarnar af þar sem skúffurnar smella saman og ráða þannig för að einhverju leyti.

Soðnar tengingar taka illa á móti kröftum lárétt á tenginguna nema þær séu sérstaklega styrktar í það [36]. Vegna þess hve stökkar þær eru, eru þær almennt ekki góður kostur á jarðskjálftasvæðum [13].

Í þessari rannsókn var ákveðið að fýsilegast væri að skoða skúffutenginguna frekar. Tengingin þótti líkleg til þess að standast álagsskröfur fyrir þá krafta sem stoðveggir verða fyrir. Enn fremur ætti sú útfærsla að geta flýtt fyrir samsetningu eininga á verkstað og minnkað almennt umstang við smíði og uppsetningu eininganna. Því var ákveðið að prófa hana. Til þess að meta árangur skúffutengingar var samhliða smíðuð stöðluð U-lykkjutenging til samanburðar. Sem fyrr segir hefur U-lykkjutenging verið notuð af Vegagerðinni. U-lykkjutengingunni var ákveðið að breyta sem allra minnst að öðru leyti en að skala hana niður. Skúffutengingunni var hins vegar breytt þar sem ástæða þótti til.

5.2 Staðlar

Við hönnun í tengslum við mannvirkjagerð eru evrópsku þolhönnunarstaðlarnir ásamt viðeigandi þjóðarviðaukum alltaf hafðir til hliðsjónar, ásamt íslensku byggingarreglugerðinni. Í töflu 1 má sjá þá staðla sem notaðir voru við þetta verkefni.

Tafla 1: Hönnunarstaðlar tengdir verkefninu

Eurocode 0 ÍST-EN 1990	<i>Basis of Structural Design</i>
Eurocode 1 ÍST-EN 1991	<i>Actions on Structures</i>
ÍST-EN 1991-2	<i>Traffic Loads on Bridges</i>
Eurocode 2 ÍST-EN 1992	<i>Design of Concrete Structures</i>
ÍST-EN 1992-2	<i>Concrete Bridges - Design and Detailing Rules</i>
Eurocode 3 ÍST-EN 1993	<i>Design of Steel Structures</i>
ÍST-EN 1993-1-8	<i>Design of Joints in Steel Structures</i>
Eurocode 4 ÍST-EN 1994	<i>Design of Composite Steel and Concrete Structures</i>
Eurocode 7 ÍST-EN 1997	<i>Geotechnical Design</i>
Eurocode 8 ÍST-EN 1998-5	<i>Foundations, Retaining Structures, and Geotechnical Aspects</i>
Reglur um hönnun brúa	Vegagerðin

Stuðst var við bækurnar Teknisk Stábi [38], Reinforced concrete design to Eurocode 2 [39] og Fundamentals of Geotechnical Engineering [25].

5.3 Hönnun prófstykkja

Rannsóknin fólst í því að smíða tvö prófstykki þar sem notuð var U-lykkjutenging (samsteyputenging) í því fyrra og skúffutenging (þurr tenging) í því síðara. U-lykkjutengingin sem var prófuð var sköluð útgáfa af tengingunni sem Vegagerðin notaði í stöðpuleiningum brúarinnar yfir Jökulsá á Dal. Sú brú var hönnuð samkvæmt viðeigandi Evrópustöðlum og reglum Vegagerðarinnar um hönnun brúa [3]. Mynd 3 sýnir teikningu af tengingunni sem notuð var þar. Á teikningunni má sjá að veggeiningin er 350 mm þykk og að bendistálið er 16 mm kambstál, bæði í veggeiningunum sjálfum og U-lykkjunum. Bilið á milli stálsins í einingunum er 150 mm og steypuhulan er 60 mm.

Skölun eininganna var ákvörðuð út frá stærð tjakks á rannsóknarstofu sem var notaður við framkvæmd prófana ásamt plássi inni í ramma umhverfis tjakkinn. Einnig þurfti að huga að því að flutningar og geymsla á prófstykkjum væri viðráðanleg, sem og smíði stykkjanna. Tjakkurinn sem notaður var við prófanir á stykkjunum er staðsettur í rannsóknarrými Háskólans í Reykjavík. Helsta takmörkun í stærð var sú að dýpt bitans, það sem endurspeglar hæð veggeininganna, gat að hámarki verið 250 mm svo að hægt væri að setja bitann í rammann utan um tjakkinn. Til þess að hlutföll bitanna yrðu rétt var því að endingu ákveðið að prófstykkinn yrðu í 37,5% skala. Það passar vel við framleiðslustærðir bendistáls. Skölunina má sjá í töflu 2.

Tafla 2: Skölun veggeininga

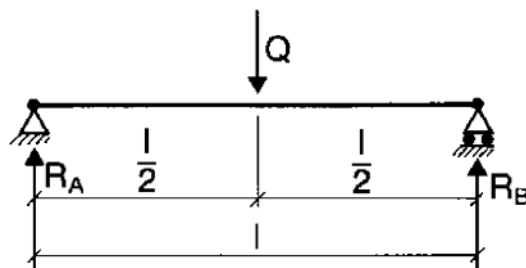
	37,5%	100%
Þykkt [mm]	131	350
Hæð [mm]	230	x
Járnastærð [mm]	6	16
Bil milli járna [mm]	56	150
Steypuhula [mm]	20	60

Þannig verður þykkt beggja prófstykkjanna 131 mm og hæðin 230 mm. Öll járn verða K6 bendistál, það er þvermál þeirra er 6 mm, bilið milli þeirra um 56 mm og steypuhulan 20 mm. Til þess að járnin nái að taka upp kraftana sem þeim er ætlað þurfa þau að ná ákveðinni festilengd. Í Eurocode 2 segir að í bitum sem eru lægri en 250 mm verði góð binding við bendistál (e. good bond) [5]. Binding bendistálsins í bitunum myndi því teljast góð tenging vegna þess hve lágir þeir eru. Það þýðir að festilengd járnanna ætti að vera að lágmarki 220 mm [40].

Í U-lykkjubitanum er steypdur þunnur veggur fyrir aftan U-lykkjurnar sem skarast. Þessir þunnu veggir mætast þegar einingunum er raðað upp og ráða því þannig hversu mikið lykkjurnar skarast og hversu stórt samsteypubilið verður. Á teikningu af tengingu Vega-gerðarinnar má sjá að sprungubending er höfð í þessari viðbót. Þegar stykkinn voru sköluð niður urðu þessir veggir of þunnir til þess að skynsamlegt þætti að sprungubenda þá svo ákveðið var að sleppa því í prófstykkjunum.

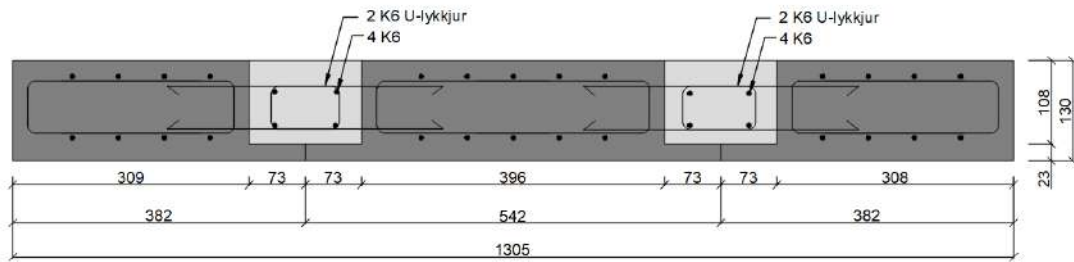
Leitast var við að hafa uppbyggingu og eiginleika skúffutengingarinnar eins líka U-lykkjutengingunni og unnt var. Þannig er sama járnastærð í tengingunum, með sama millibili. Bitarnir eru jafn háir og breiðir. Stærðum stálskúffanna var hins vegar breytt frá fyrirmyndinni [32] sem er í svipuðum skala og í þessari rannsókn. Helstu breytingar fela í sér minni þykkt stálskúffanna í tengingunni. Þar voru skúffurnar og gúmmíð á milli þeirra 8 mm þykkar, hér var hins vegar ákveðið að hafa þær 4 mm þykkar. Kambstálið sem soðið er, annars vegar innan í og hinsvegar utan á skúffurnar, er hér haft 6 mm að þvermáli. Kambstálið steypist svo inn í forsteyptu einingarnar.

Til þess að geta framkvæmt prófunina með hreinum skerkræfti varð að takmarka þá vægisáraun sem tengingarnar gátu orðið fyrir. Hefðbundið þríása próf, eins og sjá má á mynd 11, þar sem kraftur er settur á miðjan bitann var fyrsta hugmynd að útfærslu prófsins.

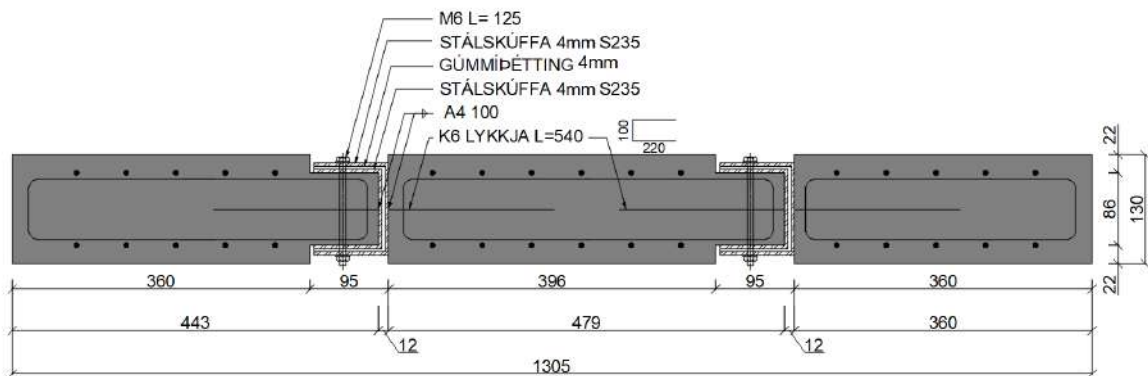


Mynd 11: Þríásapróf [38]

Í þess háttar prófi myndast vægi í bitanum óhindrað. Til þess að komast hjá þeirri vægiáraun var að endingu ákveðið að tengingarnar í hvorum bita yrðu tvær. Kraftinum yrði svo dreift yfir miðju bitans, að tengingunum, undirstöður hafðar nálægt þeim og komið í veg fyrir færslu í endum bitans. Þannig væri hægt að prófa báðar hliðar skúffutengingarinnar og koma í veg fyrir vægiáraun. Einfaldar teikningar af bitunum má sjá á myndum 12 og 13 en fullbúnar teikningar eru í viðauka A.



Mynd 12: U-lykkjutenging til prófunar



Mynd 13: Skúffutenging til prófunar

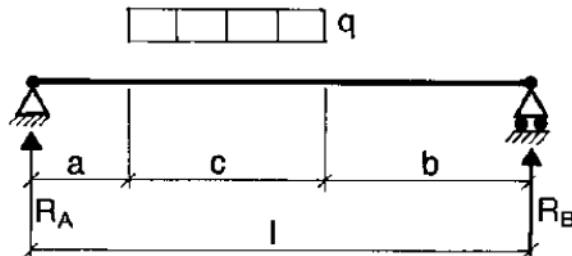
5.3.1 Burðarþolsútreikningar

Hluti af hönnun bitanna fólst í að reikna styrk þeirra gegn skerkröftum og vægisáraun. Markmiðið var að brjóta bitana í skeri áður en hætta yrði á að þeir brotnuðu vegna vægis. Því var skerþolið reiknað fyrst og borið saman við kraftinn úr tjakknum til þess að ganga úr skugga um að tjakkurinn gæti brotið tenginguna. Þá var vægiþolið reiknað og borið saman við vægiáraunina sem kemur á bitann við kraftinn sem veldur skerbroti. Útreikningar voru gerðir í Microsoft Excel en færðir yfir í reikniforritið MathCad til þess að auka skýrleika. Alla útreikninga má sjá í viðauka B.

Útreikningar á kröftum

Hámarkskraftur tjakksins sem bitarnir eru brotnir í er 60 tonn. Uppsetningin á prófunum er eins fyrir báða bitana. Fjórar undirstöður eru undir prófstykkinu og það er fest niður við endana til þess að koma í veg fyrir vægiáraun. Kraftinum er dreift yfir flöt ofan á prófstykkinu af sömu ástæðu, uppsetninguna má sjá í kafla 5.5.2 á myndum 33 og 34. Kerfismynd af uppsetningunni verður því sambærileg þeirri sem sjá má á mynd 14, sem

fengin er úr Teknisk Ståbi [38], þar sem ekki þarf að reikna með þeim hluta bitans sem er utar en innri undirstöður hans. Á kerfismyndinni er lengdin sem samsvarar bilinu á milli fyrri undirstaðanna í uppsetningu prófunarinnar táknuð með l . Lengd álagsdreifingarinnar með c og lengdirnar að henni sitt hvoru megin frá innri undirstöðunum táknaðar með a og b .



Mynd 14: Kerfismynd [38]

Svörunarkraftarnir valda skeri í þversniðinu. Þeir eru reiknaðir með jöfnu 1:

$$R_A = R_B = q \cdot c \frac{b + \frac{c}{2}}{l} \quad (1)$$

þar sem l er, eins og áður segir, lengdin á milli undirstaða, c lengdin á álagsdreifingunni og a og b lengdirnar frá undirstöðum að álagsdreifingu. Þá táknar q álagsdreifinguna sjálfa, reiknuð með formúlu 2:

$$q = \frac{F \cdot g}{c} \quad (2)$$

þar sem F er álagið frá tjakknum í tonnum, g er þyngdarhröðun jarðar og c lengd álagsdreifingarinnar. Vægiáraunin sem kraftadreifingin veldur er reiknuð með jöfnu 3 sem fengin er úr Teknisk Ståbi [38]:

$$M_{Max} = \frac{q \cdot c}{l^2} \cdot \left(b + \frac{c}{2}\right) \cdot \left(a + \frac{c}{2}\right) \cdot \left(l - \frac{c}{2}\right) \quad (3)$$

Þegar tilraunin er sett upp eru þó töluverðar líkur á að vægisstífni að einhverju marki verði við undirstöðurnar. Það breytir niðurstöðum útreikninga sem gerðir eru á vægiáraun. Bitinn var settur upp í forritinu SAP2000 og álagsmyndunin annars vegar skoðuð út frá því að engin vægisstífni verði, líkt og útreikningarnir gefa til kynna og hins vegar að fullkomin vægisstífni verði, sem myndar þá innspennu við undirstöðurnar. Raunveruleg áraun liggur því að öllum líkindum á milli þessara tveggja tilvika.

Útreikningar á styrk

Við útreikninga á styrk voru ekki notaðir öryggisstuðlar eða kennigildi eins og gert er við hönnun mannvirkja því hér er um prófstykki að ræða. Markmiðið var að reiknuð gildi yrðu sem allra næst raunverulegum, mældum gildum. Til þess eru meðalgildi á styrk efna notuð í útreikningunum. Í Eurocode 2 eru helstu meðalgildi steypu gefin upp. Reiknað var með að steypan væri af styrkleikaflokki C35 þó svo að steypan sem notuð var hafi flokkast sem C30. Það var gert til þess að fá niðurstöður sem næst því sem raunverulega myndi verða, þar sem steypan náði 35 MPa styrk áður en prófunin var framkvæmd. Meðalgildisstyrkur stáls er ekki gefinn upp í Evrópustöðlum. Það er hins vegar vitað að styrkur stáls fylgir normaldreifingu [41]. Tölfræðilega eru 95% líkur á að hönnunarstyrkur sé lægri en alvöru styrkur efnisins [42]. Í útreikningum í viðauka B má sjá útleiðslu á jöfnu 4 sem gefur meðalstyrk stálsins:

$$f_{ym} = \frac{f_{yk}}{1 - 1.64 \cdot \delta_s} \quad (4)$$

þar sem f_{yk} er kennigildi styrks stálsins og δ_s stuðull sem metur óvissu í staðaldreifingu (e. sample coefficient of variation). Jafnan virkar bæði fyrir bendistál og smíðastál. Þegar jafna 4 er notuð fyrir bendistálið fæst styrkur sem er um 13% hærri en kennigildi styrks stálsins.

U-lykkjutenging

Til þess að meta skerþol U-lykkjutengingarinnar var sniðið, þar sem forsteypa og samsteypa mætast, skoðað. Skerþolið var metið með jöfnu 5 úr Eurocode 2 [5]:

$$C * f_{ctm} + \sigma_n + \rho * f_{ym} * (\mu * \sin(\alpha) + \cos(\alpha)) \quad (5)$$

þar sem C og μ eru stuðlar sem ákvarðast af grófeika yfirborðs flatarins. Hér er flöturinn steypa sem slegið er upp fyrir með óhefluðum 1" x 6" furuborðum. Því telst yfirborðið gróft (e. Rough). f_{ctm} er meðalgildi þrýstistyrks steypunnar og f_{ym} meðalgildisstyrkur bendistálsins, σ_n er sú normalspenna sem verkar á sama tíma og skerkrafturinn. Í prófuninni verður enginn normalkraftur svo spennan verður þar af leiðandi engin, α táknar stefnu bendingar í sniðinu, ρ er járnahlutfallið í sniðinu, reiknað með jöfnu 6:

$$\frac{A_s}{A_i} \quad (6)$$

þar sem A_s er flatarmál járna í sniðinu og A_i flatarmál samskeytanna þar sem samsteypa og forsteypa mætast. Niðurstaðan úr útreikningunum er sú að snið einnar tengingar þolir tæp 26 kN í skeri.

Markmiðið er að brjóta bitann með hreinu skerbroti. Til þess að athuga hvort það verði raunin er vægipól bitans reiknað og það borið saman við kraftinn sem þarf til þess að skerbrot eigi sér stað. Í fyrstu er þversniðið reiknað eins og engin járn séu í efri brún. Út frá því er hægt að teikna upp streitumynd og sjá hver streitan er þar sem efri járnin eru. Þegar sú streita er fundin er þversniðið reiknað aftur en nú með öllum járnnum sniðsins. Jafnan sem er notuð við útreikning á vægipóli er jafna 7 [43]:

$$M_{Rd} = F_{cc} \cdot z \quad (7)$$

þar sem F_{cc} er lokakraftur spennudreifingar steinsteypunnar. Hann er reiknaður með jöfnu 8:

$$F_{cc} = b \cdot \lambda \cdot x \cdot \eta \cdot f_{cm} \quad (8)$$

þar sem b er breidd bitans, λ er virk hæð spennudreifingar, gefin upp í Eurocode 2, η er virkur styrkur steypunnar, einnig gefinn upp í Eurocode 2, f_{cm} er, eins og áður, meðalgildi þrýstistyrks steypu og x er staðsetning hlutlausa ássins frá efri brún. Jafna 9 sýnir hvernig hann er reiknaður.

$$x = \frac{A_s \cdot f_{ym}}{b \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cm}} \quad (9)$$

Þar er A_s er járnaflatarmál í neðribrún, f_{ym} er meðalgildisstyrkur bendistálsins. Aðrar stærðir eru útskýrðar fyrir neðan jöfnu 8. Hæð hlutlausa ássins reiknaðist fyrir ofan efri járnin. Því verður spennan í þeim járnnum nógu lítil til þess að ekki þurfi að reikna með þeim. Útreikningana þurfti því ekki að gera aftur með öllum járnnum sniðsins.

Í jöfnu 7 er z innri vægisarmur þversniðsins, fenginn með jöfnu 10:

$$z = d - 0.5 \cdot \lambda \cdot x \quad (10)$$

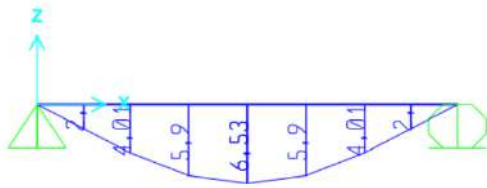
þar sem d er nothæð járnanna í neðri brún, fundin með jöfnu 11:

$$d = h - c - \frac{\phi}{2} \quad (11)$$

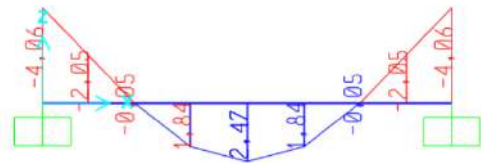
þar sem h er hæð bitans, c er steypuhulan og ϕ er þvermál járnanna.

Vægipól bitans reiknaðist ekki nægilegt miðað við kraftinn sem þarf til að brjóta hann í skeri, eins og sjá má í viðauka B. Vægipólið er þó einnig hægt að skoða á móti vægi-árauninni sem verður ef vægisstífni er í bitanum, eins og fjallað var um hér að framan. Á

mynd 15 er munurinn á álagi sýndur eftir því hvort reiknað er með að bitinn sé einfalt studdur (engin vægisstífni) eða að innspenna sé báðum megin (fullkomin vægisstífni).



(a) Vægiáraun ef engin vægisstífni



(b) Vægiáraun ef fullkomin vægisstífni

Mynd 15: Samanburður á vægiáraun með og án vægisstífni

Þegar reiknað er með fullkominni vægisstífni þolir bitinn vel þá vægiáraun sem á hann er sett. Það þýðir að hann er líklega alveg á mörkunum í raunveruleikanum.

Skúffutenging

Til þess að vita hversu mikinn skerkraft tengingin þolir þarf að reikna skerþolið á þeim stöðum sem möguleiki er á að tengingin gefi sig. Fyrsta tilfellið er að steyputappinn sem fer inn í innri skúffuna gefi sig, sjá rauða merkingu á mynd 16.



Mynd 16: Skerbrot í tappa

Jafna 12 er notuð fyrir skerkraftinn í tappanum, hún er úr Eurocode 2 [5]:

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d \quad (12)$$

þar sem $C_{Rd,c}$ er fasti sem er gefinn upp í þjóðarviðaukanum við Eurocode 2, k er stuðull, gefinn með formúlu 13:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (13)$$

þar sem d er nothæð neðri járnanna í tappanum. Í jöfnu 12 er ρ_l járnahlutfall í sniðinu sem verður að vera minna eða jafnt og 2. Þá er f_{cm} áfram þrýstipól steypunnar, b_w er minnsta breidd sniðsins, sem er breiddin öll. Með jöfnu 12 fæst að skerþol eins tappa sé rúm 17 kN.

Næsta tilfelli er að suðan þar sem járnin eru soðin aftan á skúffuna brotni. Staðsetning suðunnar er sýnd með rauðu á mynd 17.



Mynd 17: Skerbrot við samskeyti steypu og stálskúffu

Fyrst er heildarspennan í einni suðu reiknuð með jöfnu 14 sem fengin er úr Eurocode 3 (1993-1-8) [44]:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau^2)} \quad (14)$$

þar sem $\sigma_{\perp}$ er normalspenna hornrétt á suðuna, fengin með jöfnu 15 og τ er skerspenna hornrétt á suðuna, fengin með jöfnu 16.

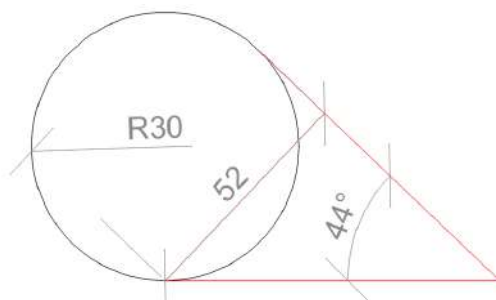
$$\sigma_{\perp} = \frac{F_v \cdot \cos(\alpha)}{a \cdot l_{eff}} \quad (15)$$

$$\tau = \frac{F_v \cdot \sin(\alpha)}{a \cdot l_{eff}} \quad (16)$$

Í jöfnum 15 og 16 er F_v skerkraftur sem verkar á eina suðu, α er horn suðunnar, eins og sýnt er á mynd 18, a er virk suðuþykkt, mæld eins og sýnt er á sömu mynd og l_{eff} er virk suðulengd, reiknuð með jöfnu 17 sem einnig er úr Eurocode 1993-1-8:

$$l_{eff} = l_w - 2 \cdot a \quad (17)$$

þar sem l_w er raunveruleg lengd suðunnar.



Mynd 18: Mál suðu

Pol suðunnar er ákvarðað með tveimur jöfnum. Hér eru það jafna 18 og jafna 19, báðar úr Eurocode 1993-1-8 [44]:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau^2)} \leq \frac{f_{um}}{\beta_w} \quad (18)$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0.9 \cdot f_{um} \quad (19)$$

þar sem f_{um} er brotstyrkur þess hluta sem er veikari, smíðastálið eða suðuvírinn. Hér er smíðastálið veikara svo meðalgildisbrotstyrkur þess er fundinn með jöfnu 4 eins og áður hefur komið fram. β_w er stuðull gefinn upp í töflu 4.1 í Eurocode 1993-1-8 [44]. Útkoman úr fyrri jöfnunni þarf að vera stærri en heildarspennan sem reiknuð var með formúlu 14, hér að framan, til þess að suðan brotni ekki. Útkoman úr seinni jöfnunni þarf aðeins að vera stærri en normalspennan, reiknuð með jöfnu 15 hér að ofan. Þegar niðurstöður úr jöfnum 18 og 19 eru bornar saman við skerspennuna úr jöfnu 14 er niðurstaðan sú að suðan er nógu sterk. Það þýðir að heildarkraftur tjakksins er ekki nógu mikill til þess að brjóta suðuna.

Þriðja brottílfellið er að sniðið þar sem steypa og stálskúffan mætast, sjá mynd 17, brotni án þess að suðan brotni. Skerþolið er reiknað með jöfnu 5 hér að framan. Nú eru stuðlarnir C og μ hins vegar aðrir en áður þar sem yfirborð stálskúffunnar myndi teljast mjög slétt (e. very smooth) [5]. Þeir útreikningar sýna að skerþol einna samskeyta ætti að vera um 18 kN.

Fjórða og síðasta tilfellið er að brot verði í stálskúffunni sjálfri, sjá rauða merkingu á mynd 19.



Mynd 19: Brot í stálskúffu

Fyrst er spennan í sniðinu fundin með jöfnu 20 sem fengin er úr Teknisk Ståbi [38]:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (20)$$

þar sem M er vægið í skúffunni, fundið með jöfnu 21:

$$M = R_A \cdot \frac{e}{2} \quad (21)$$

þar sem R_A er svörunarkrafturinn, fenginn með jöfnu 1, hér að framan og e er vægisarmur stálskúffunnar. Deilt er í vægið með tveimur vegna þess að skúffan er boltuð saman svo að helmingur vægisins fer í efri part skúffunnar. W er mótstöðuvægi, fengið með jöfnu 22:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (22)$$

þar sem b er breidd skúffunnar og h er hæð stálsins í skúffunni sjálfri. Þol einnar skúffu er þá reiknað með því að einangra kraftinn úr jöfnunum, sjá jöfnu 23:

$$\frac{f_{um} \cdot W \cdot 2}{e} \quad (23)$$

Þannig fæst að hún þolir um $11kN$ kraft.

Miðað við þessa útreikninga ætti suðan aldrei að brotna, steypiti tappinn og sniðið þar sem stálskúffan og steypan mætast ættu að brotna við svipaðan kraft en stálskúffan ætti að vera það fyrsta sem brotnar þegar krafturinn er settur á bitann.

Þá er vægið í bitanum reiknað miðað við kraftinn sem þarf til þess að brjóta skúffuna. Það er gert með jöfnu 7 líkt og áður. Niðurstaða þeirra útreikninga sýnir að vægiþolið ætti að vera nægilegt til þess að tengingin brotni í skeri áður en bitinn brotnar vegna vægiáraunar.

5.4 Smíði prófstykkja

Eftir að allri hönnun var lokið var hægt að hefjast handa við smíði prófstykkjanna. Prófstykkjin voru smíðuð í byggingarannsóknarstofu og málm-smíðastofu Háskólans í Reykjavík af höfundum verkefnisins. Hvort prófstykki samanstendur af þremur minni einingum svo sex mót voru smíðuð í heildina. Prófeiningarnar voru steypar liggjandi, hæð mótanna endurspeglar því þykkt veggjanna og breiddin endurspeglar hæðina. Mótin voru smíðuð úr 1"x6" furuborðum og höfð á mótaþlötum. Undir þeim voru höfð vörubretti svo auðvelt væri að færa þau um. Borðin voru rist niður í rétta hæð og fest niður í mótaþlötunum með listum úthringinn. Mótin fyrir skúffutenginguna voru einföld, rétthyrnd mót. Undir og ofan á skúffurnar var settur krossviður sem varnaði því að steypan færi á milli, mótin má sjá á mynd 20.



Mynd 20: Mót fyrir skúffutenginguna

Mótin fyrir U-lykkjubitann voru flóknari. Í endanum á þeim var smíðað hólfið úr furuborðum, hér væri skynsamlegra að nota frauðplast eða álíka en það gafst ekki rúm til þess að útvega það í skynsamlegu magni. Hólfið á endunum skilur eftir stall sem myndar forsteypta hluta tengingarinnar sem mætir öðrum slíkum úr hinni einingunni og tryggir þannig rétt bil milli eininganna. Þá voru boruð göt í gegnum borðið við enda mótanna sem U-lykkjunum var stungið í gegnum. Mótin má sjá á myndum 21 og 22.



Mynd 21: Mót fyrir U-lykkjutenginguna



Mynd 22: Horft inn í enda U-lykkjumóts

Áður en járn voru lögð í mótin voru þau öll meðhöndluð að innan með mótaolíu til þess að auðvelt yrði að slá frá steypunni.

Stálskúffurnar í skúffutenginguna voru fengnar beygðar og í réttum stærðum í mótin. Stálið í skúffunum er S235 smíðastál, það var ekki meðhöndlað sérstaklega en fituhreinsað áður en steyppt var að því. Í raunveruleikanum yrðu skúffurnar galvanhúðaðar. Aftan á ytri skúffurnar og innan í innri skúffurnar var soðið bendistál. Stálið var skorið úr K6 steypustyrktarmottu og beygt í lykkjur þannig að lengd suðunnar eftir stálskúffunum væri 100 mm. Beygjuradíusinn var hafður 24 mm, samkvæmt staðli [40]. Við suðu stálsins var notuð MIG suða og suðuvinna fór fram á málmsmíðastofu Háskólans í Reykjavík. Almennt er leitast eftir að hafa kverksuður sem þessar íhvolfar en ekki kúptar [45]. Sökum reysluleysis höfundar við suður urðu þær þó heldur kúptar, eins og sjá má á mynd 23. Með kúptri suðu aukast líkurnar á að suðan bresti á skilunum við efnið sem hún er soðin að [45].



(a) Suða utan á skúffu



(b) Suða innan í skúffu

Mynd 23: Kambstál soðið á skúffur

Það reyndist ekki hægt að fá K6 bendistál öðruvísi en í mottu eða af rúllu. Sú stærð er ekki rétt af eða beygð hjá helstu söluaðilum svo K6 stangir af rúllu varð niðurstaðan í bendingu bitanna. Járnin voru því beygð í lykkjur á byggingastofu Háskólans í Reykjavík. Innri lykkjurnar voru allar jafn stórar en þær ytri fóru eftir mismunandi lengdum mótanna. Því næst var lykkjunum raðað upp og þær bundnar fyrir hvert mót.



(a) Lykkjurnar beygðar



(b) Lykkjurnar bundnar

Mynd 24: Framkvæmd við járnabindingu

Í skúffumótunum náðu innri lykkjurnar inn í skúffurnar en þær ytri voru aðeins í bitanum

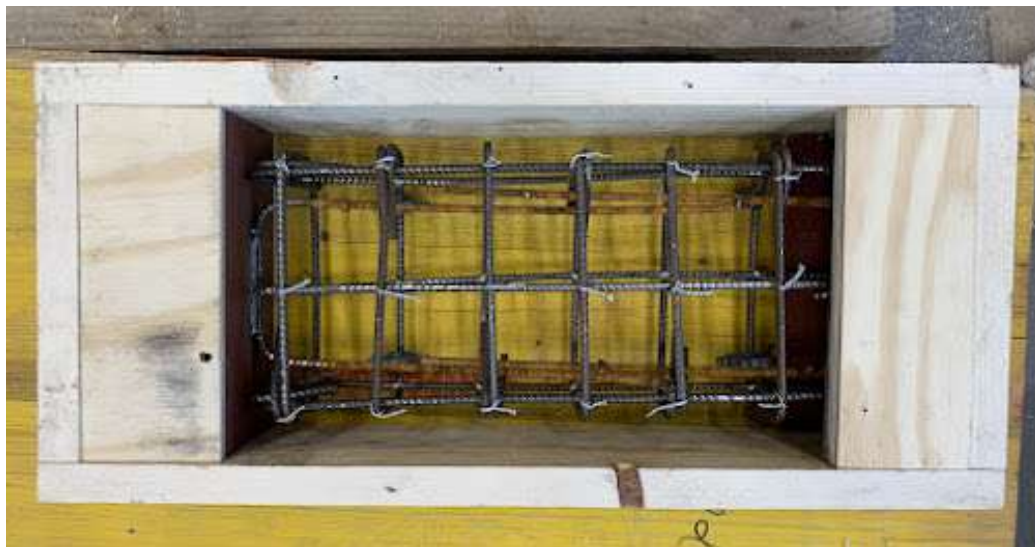
sjálfum. Járnin voru sett í mótin með 20 mm fjarlægðarstjörnum til þess að tryggja að steypuhulan yrði nægileg. Á mynd 25 má sjá járnabendinguna í skúffumótunum



(a) Bending við innri skúffu



(b) Bending við ytri skúffu



(c) Bending í miðjubita tengingar

Mynd 25: Járnabending í skúffutengingu

Í U-lykkjubitanum voru bitarnir bentir eins og skúffubitarnir en við bendinguna bættust U-lykkjurnar sem var stungið inn í enda mótanna. U-lykkjurnar voru krókbeygðar í endann þar sem skeytilengd þeirra var ekki nægileg. Tilbúna járnabendingu í U-lykkjubitunum má sjá á mynd 26.



(a) Annar endabitanna



(b) Hinn endabitinn



(c) Bending í miðjubita tengingar

Mynd 26: Járnaþending í U-lykkjutengingu

Þann 21. október voru mótin flutt á tilraunastofu BM Vallár til þess að steypa í þau. Steypan sem var notuð flokkast sem C30 steypa og hafði hámarkskornastærðina 25 mm. Áður en hafist var handa við að steypa í mótin var loftmagn í steypunni athugað ásamt sigmáli hennar. Úr steypunni voru steyptir sjö sívalningar til prófunar. Í töflu 3 má sjá upplýsingar um steypuna.

Tafla 3: Uppskrift og mælingar steypu

Mæling	Eining	Mæld gildi
Uppskrift	[-]	C30/37 úti
Styrkflokkur	[MPa]	30
Sigmál	[mm]	22
Loftmagn	[%]	7,4
Hitastig steypunnar	[°C]	15,8
Eiginþyngd	[kg/m ³]	2400
Vatnssementstala	[Hlutfall]	0,4
Stærsta kornastærð	[mm]	25

Það kom á daginn að steypumagnið dugði ekki í öll mótin svo annar endabiti U-lykkju-tengingarinnar var steypur úr annarri steypu. Sú steypa kallast C35 Svansvottuð en er í styrkleikaflokknum C30, líkt og fyrri steypan. Sömu athuganir voru gerðar fyrir þá steypu og tveir sívalningar teknir. Steypan var mjög sambærileg þeirri sem notuð var í hin mótin. Eiginþyngd hennar var minni eða 2390 kg/m³, hitastig hennar var örlítið lægra og vatnssementstalan 0,35.

Ekki fékkst vibrator í steypuvinnuna. Steypan var því þjökkuð í mótin með stálstöng á meðan slegið var létt utan á þau með hamri til þess að reyna að tryggja að steypan leggjðist vel um allt mótið. Steypan var glöttuð og að lokum slípuð létt eftir að hún hafði tekið sig nóg til þess. Byggingaplast var breitt yfir steypuna á meðan hún harðnaði. Plastið hafði þann tilgang að halda rakanum sem mest að steypunni.

Þann 23. október, þegar steypan hafði, ásamt sívalningunum, fengið að þorna í tvo daga undir plasti, var einn sívalningur úr fyrri steypunni brotinn. Í töflu 4 sjást niðurstöður brotprófsins. Þar má sjá að steypan hafði þá þegar náð tæplega 23 MPa styrk. Styrkleikaflokkur steypunnar var C30 en framreiknaður styrkur hennar, reiknaður út frá tveggja daga styrk sívalningsins, voru rúm 35 MPa.

Tafla 4: Sívalningspróf eftir tvo daga

Mæling	Eining	Mæld gildi
Sýni	[nr]	951
Þvermál	[mm]	100
Hæð	[mm]	200
Rúmpyngd	[kg/m ³]	2354
Álag	[kN]	189
Aldur	[dagar]	2
Styrkur	[MPa]	22,91
Framreiknaður styrkur	[MPa]	35,25

Steypan var metin nógu sterk til þess að slá mætti frá henni og steypa í samskeyti U-lykkjutengingarinnar. Bútana má sjá á mynd 27.



(a) Endabútur tengingar



(b) Miðjubútur tengingar

Mynd 27: Bitar í U-lykkjutengingu

Þegar slegið var frá mótunum brotnuðu þrír af fjórum þunnu veggjum U-lykkjutengingarinnar af prófstykkjunum. Það var fyrir séð að það gæti hent þar sem sprungubendingunni var sleppt, eins og áður hefur komið fram. Starfsmenn tilraunastofunnar lögðu til að veggbútarnir yrðu límdir aftur á með límkítti og það varð niðurstaðan. Þá var einingunum raðað saman og steypustyrktarstáli stungið í gegn um U-lykkjurnar og það bundið við þær. Tenginguna má sjá á mynd 28.



Mynd 28: Tenging tilbúin fyrir samsteypu



Mynd 29: Tengingin steyp

Furuborðum var slegið upp báðum megin við tenginguna og steyp á milli. Steypan hafði sömu uppskrift og steypan sem lýst er í töflu 3. Úr steypunni voru teknir fimm sívalningar til þess að geta brotið og séð styrkþróunina. Plastið var aftur sett yfir steypuna og hún látin þorna í tvo daga þar til hún var færð á byggingastofu Háskólans í Reykjavík þar sem hún hélt áfram að þorna undir plasti.

Fimmtán dögum eftir að steyp var, var annar sívalningur brotinn. Í töflu 5 má sjá niðurstöður styrkathugunarinnar.

Tafla 5: Síválningspróf eftir fimmtán daga

Mæling	Eining	Mæld gildi
Sýni	[nr]	951
Þvermál	[mm]	100
Hæð	[mm]	200
Rúmþyngd	[kg/m ³]	2403
Álag	[kN]	311
Aldur	[dagar]	15
Styrkur	[MPa]	37,61

Styrkprófunin sýndi að sýnið hafði náð meiri styrk en flokkun hennar gefur til kynna að hún hefði nokkurn tíma átt að ná. Á sama degi var eitt sýni brotið úr samsteypunni. Niðurstöður úr því brotprófi eru í töflu 6.

Tafla 6: Síválningspróf samsteypu eftir þrettán daga

Mæling	Eining	Mæld gildi
Sýni	[nr]	957
Þvermál	[mm]	100
Hæð	[mm]	200
Rúmþyngd	[kg/m ³]	2411
Álag	[kN]	322
Aldur	[dagar]	13
Styrkur	[MPa]	39,11

Samsteypan hafði því einnig náð töluvert meiri styrk en flokkun hennar segir til um og var því einnig tilbúin til þess að hægt væri að framkvæma prófun á bitunum.

Þegar niðurstaðan var orðin sú að steypan hafði náð fullum styrk var stálskúffutengingin sett saman. Gúmmíþéttingin var sett á milli stálskúffanna. Gúmmíð er úr efni chloroprene og er frá framleiðandanum Trelleborg [46]. Efnið fékkst í 2 mm þykkt svo ákveðið var að nota tvöfalt lag af því á milli skúffanna til þess að ná 4 mm þéttingu. Þar sem að skúffurnar höfðu hins vegar steypst inn í steypuna var ekki lengur til staðar svigrúm fyrir skúffuna að færast þannig að gúmmíð gerði sitt gagn. Því varð niðurstaðan sú að fjögur lög af gúmmí, 8 mm, voru settir innst í skúffuna. Á mynd 30 má sjá gúmmíþéttinguna þegar bitarnir voru settir saman.



Mynd 30: Gúmmíþéttingin

Chloroprene er efni sem þolir vel hitabreytingar og bæði mikinn kulda og mikinn hita. Það má nota við vatn eða sjó og upp við hvers kyns stál [46]. Tæknilað með gúmmíinu er að finna í viðauka D.

Í gegnum hvora tengingu voru boruð tvö göt. Fyrst var 6 mm stálbor notaður til þess að bora í gegnum skúffuna, þá var 6 mm steinbor notaður við að bora í gegnum steypa tappann og svo aftur stálbor til þess að bora í gegnum skúffuna undir. Í gegnum götin voru settir 6 mm snittteinar. Á þá voru settar brettaskinnur og rær hertar að. Á mynd 31 má sjá tenginguna eftir að hún var boltuð saman.



Mynd 31: Bæði prófstykki tilbúin

5.5 Aðferðafræði rannsókna

Þegar hönnun, útreikningum og smíði á prófstykkjum í 37,5% skala var lokið og bæði for- og samsteypa hafði náð fullnægjandi styrk var næsta skref að framkvæma álagsprófanir á prófstykkjunum.

5.5.1 Búnaður

Til þess að framkvæma prófunina var notaður tjakkur sem er á tilraunastofu Háskólans í Reykjavík. Tjakkurinn er 60 tonna vökvatjakkur, kallaður Grettir sterki. Utan um tjakkinn er öflug grind, smíðuð úr stálbitum. Utan á tjakkinn er festur 200 mm langur færslumælir. Við tjakkinn er tengdur tölvubúnaður sem mælir kraftinn og færsluna í honum jafnóðum og teiknar upp graf. Forritið skilar svo gögnunum, það er krafti, færslu og tíma, í textaskrá (TXT).

5.5.2 Uppsetning tilraunar

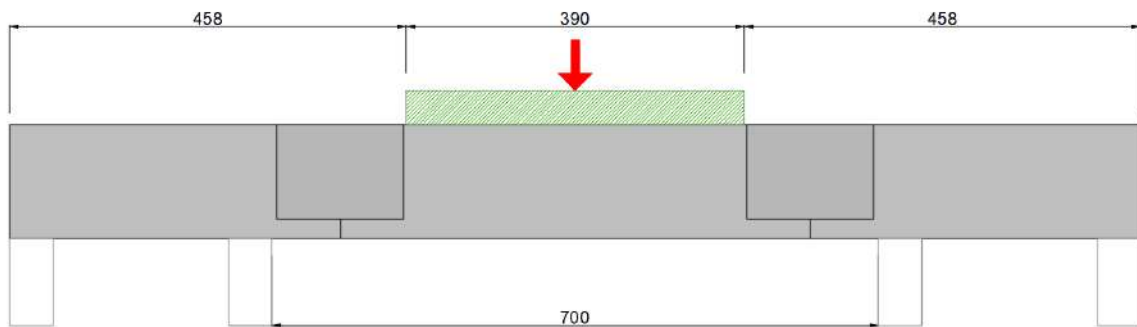
Áður en tilraunin var sett upp voru bitarnir hvítmálaðir og strikaðar 10x10 cm rúður á þá með blýanti. Þetta var gert til þess að sjá betur hvar sprungur myndast í bitunum í prófununum. Útþynnt veggjamálning var notuð til þess að mála bitana. Tilbúna bita má sjá á mynd 32



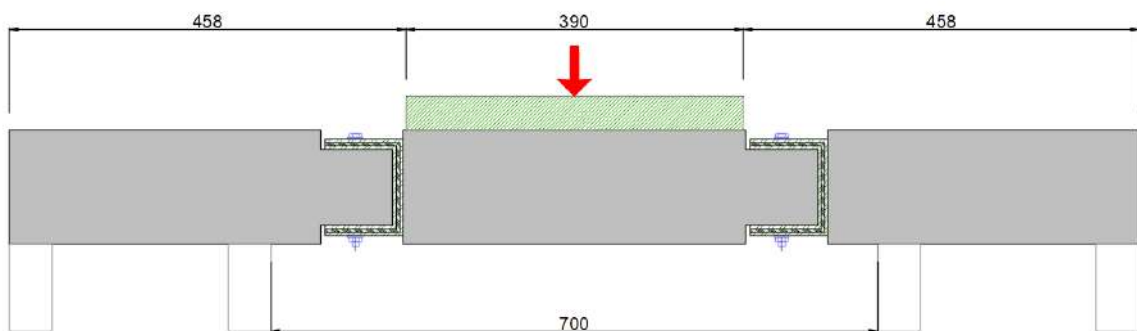
Mynd 32: Bitar klárir í prófun

Eins og fram hefur komið þurfa veggir sem þessir aðallega að taka við skeráraun. Jarðvegurinn veldur sjaldan mikilli vægiáraun. Þess vegna var markmiðið að prófa bitana í sem hreinustu skeri og forðast vægiáraun. Þegar álag er sett á miðjuna á löngum bita í hefðbundnu þriggjaþreppaprófi vilja endarnir lyftast upp og þannig verður vægið mikið. Því var ákveðið að hafa undirstöðurnar fjórar, tvær utan við hvora tengingu, svo hér er

um að ræða eiginlegt fimmpunkturpróf. Uppsetninguna má sjá skematískt á myndum 33 og 34.



Mynd 33: Fimmpunkturpróf, U-lykkjutenging



Mynd 34: Fimmpunkturpróf, skúffutenging

Á miðju prófstykki er álag sett á bitann sem færist jafnt yfir á áseturnar næst miðjunni. Þegar álagið verður nógu stórt lyftast endarnir af ytri undirstöðunum og myndar þannig vægiáraun. Fyrsta hugmynd að leið til þess að koma í veg fyrir að endar bitanna lyftust var að spenna prófil upp undir grindina í kringum tjakkinn og niður á plötu sem myndi liggja á enda bitans. Fleiri hugmyndir voru prófaðar áður en sú hugmynd að útbúa nokkurs konar þvingur á enda bitanna varð fyrir valinu. Þvingurnar voru útbúnaðar með því að þræða stálprófil undir grind tjakksins á hvorum enda og hafa annan á móti fyrir ofan bitann. Þá voru boruð göt í prófilana og 20 mm snittteinum stungið í gegnum þá, rær settar á og hert að. Uppsetninguna má sjá á mynd 35. Til þess að dreifa álaginu á stærri flöt var þykk stálplata sett ofan á bitann sem tjakkurinn þrýsti á. Platan átti að sporna við því að mikið vægi myndaðist í bitanum án þess að hafa áhrif á skeráraunina í tengingunum sjálfum þar sem hún náði ekki að þeim.



(a) U-lykkjutenging



(b) Skúffutenging

Mynd 35: Uppsetning tilraunar

5.5.3 Prófun

Prófunin var framkvæmd þann 14. nóvember. Þann dag var það sem eftir var af sívalningum brotið, fimm sívalningar úr upprunalegu forsteypunni og fjórir sívalningar úr samsteypunni. Tafla 7 sýnir niðurstöðurnar úr öllum prófunum.

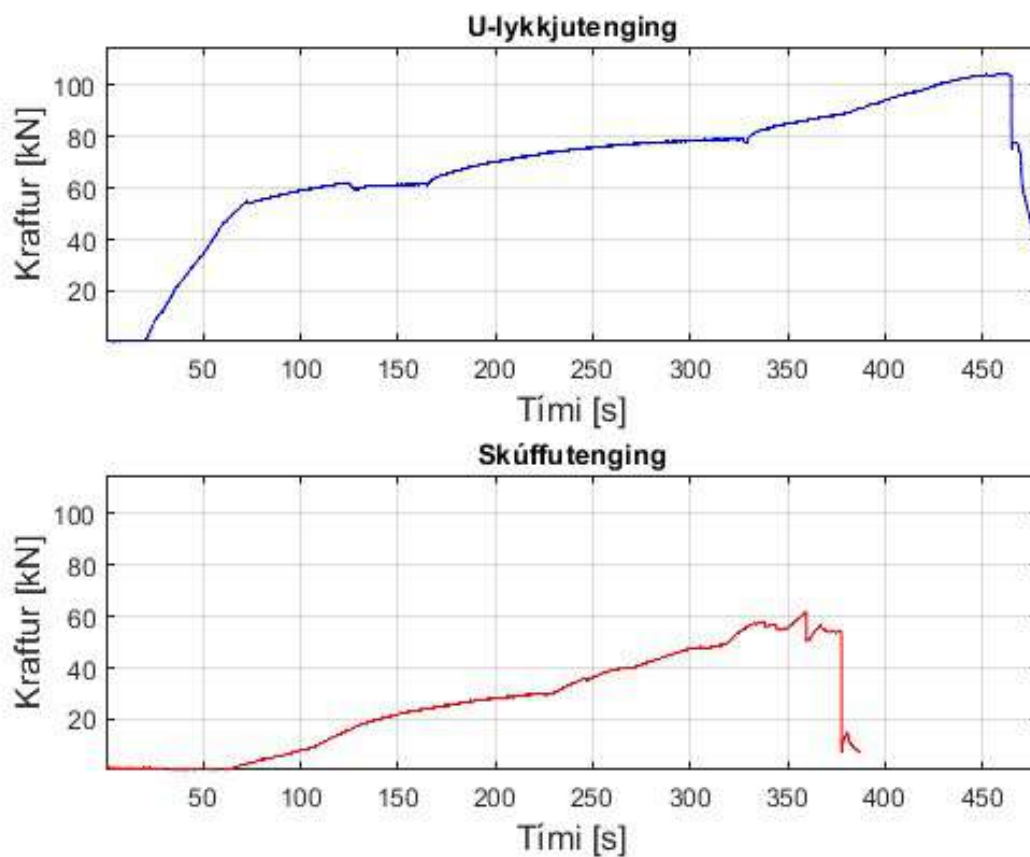
Tafla 7: Niðurstöður sívalningsprófa á prófdag

Sýni	Rúmpyngd [kg/m^3]	Álag [kN]	Aldur [dagar]	Styrkur [MPa]
forsteypa	2316	313	24	37,97
forsteypa	2331	266	24	32,48
forsteypa	2372	283	24	34,87
forsteypa	2389	297	24	36,31
forsteypa	2342	282	24	34,30
samsteypa	2415	343	22	41,38
samsteypa	2380	332	22	40,38
samsteypa	2396	342	22	41,26
samsteypa	2399	346	22	42,03

Þrýstipól styepu er skilgreint sem meðaltal þrýstípóls þriggja steyptra prófhuta [47]. Meðaltal þrýstípóls steypusívalninganna reiknast $35,2 MPa$ þrátt fyrir að steypan sé

flokkuð í styrkleikaflokk C30. Styrkurinn var því fullnægjandi til þess að hægt væri að prófa bitana.

Tjakknum sem setur álagið á bitann er stýrt handvirkt. Ætlunin var að auka kraftinn hægt og rólega og merkja í þær sprungur sem mynduðust með penna. Fyrst var U-lykkjutengingin prófuð og skúffutengingin var prófuð strax þar á eftir. Tjakkurinn fór heldur geyst af stað þegar U-lykkjutengingin var brotin, eins og sjá má á mynd 36. Á myndinni eru gröf sem sýna kraft á tíma á meðan á tilrauninni stóð fyrir bæði U-lykkjutenginguna og skúffutenginguna. Kraftaaukningin var eðlilegri fyrir seinni prófunina, skúffutenginguna, en þar hefur ferillinn línulegri aukningu en ferill fyrra prófsins.



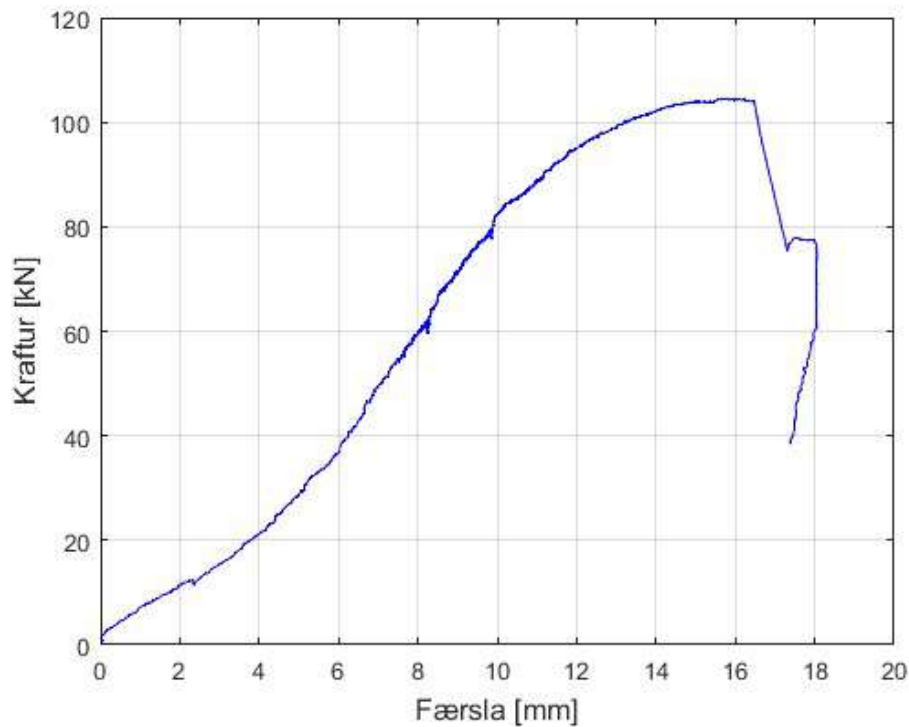
Mynd 36: Kraftur sem fall af tíma við prófun

6 Niðurstöður

Hér verður ástandi prófstykkjanna lýst á meðan á tilraunum stóð og kynntar verða mældar niðurstöður úr álagsprófunum sem gerðar voru á tilraunastofu Háskólans í Reykjavík þann 14. nóvember 2024.

6.1 Prófstykki með U-lykkjutengingum

Álag var sett á U-lykkjubitann með þeim aðferðum sem lýst var í kafla 5.5 hér að framan. Mynd 37 sýnir heildarálag sem sett var á prófstykkið sem fall af niðurbeygju. Þetta heildarálag dreifist svo jafnt á tvær tengingar. Krafturinn sem hvor tenging um sig varð fyrir var því helmingi minni en grafið segir til um.



Mynd 37: Heildarkraftur sem fall af færslu fyrir prófstykki með U-lykkjutengingum

Fyrst varð vart við sprungur í prófstykkinu þegar rúmlega 45 kN heildarálag verkaði á prófstykkið. Þessar sprungur lágu eftir skilunum þar sem forsteypan og samsteypan mætast framan á bitanum. Þessi sprungumyndun var jöfn í báðum tengingum prófstykkisins. Sprungurnar gliðnuðu jafnt og þétt á meðan álagið var aukið og náðu allan hringinn utan um bitann eins og mynd 38 sýnir.

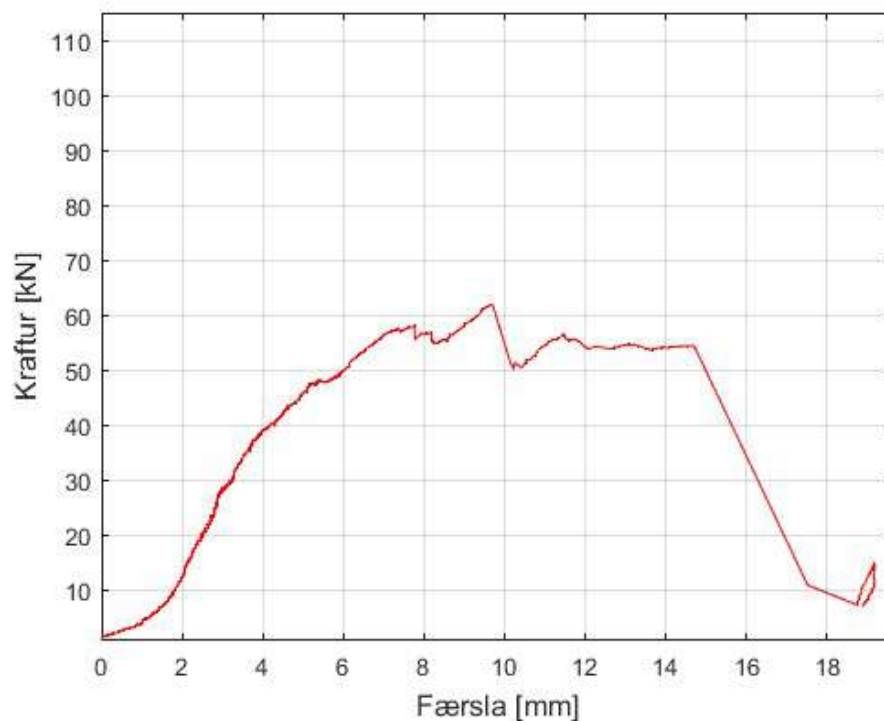


Mynd 38: Sprungumyndun í samskeytum milli forsteyptu eininganna

Við um 80 kN brotnaði meira úr sprungunni öðru megin eins og hakið á grafinu gefur til kynna. Krafturinn var aukinn meira eftir það þar til hátt hljóð heyrðist við 104 kN heildarkraft sem gaf til kynna að kambstál hafi slitnað.

6.2 Prófstykki með skúffutengingum

Á mynd 39 má sjá graf sem sýnir kraft sem fall af færslu þegar skúffutengingin var prófuð.



Mynd 39: Heildarkraftur sem fall af færslu fyrir prófstykki með U-lykkjutengingum

Lítill færsla var í tengingunni til þess að byrja með en þegar um 36 kN heildarkraftur verkaði á prófstykkið byrjuðu fyrstu sprungur að myndast. Sprungurnar mynduðust út frá bakhlið skúffunnar sem er til vinstri þegar horft er framan á tjakkinn, sjá mynd 40. Þessar sprungur voru alveg efst í bitanum en fljótlega fór einnig að myndast sprunga út frá miðju skúffunnar, inn að miðju bitans. Þegar krafturinn hafði náð um það bil 45 kN mynduðust sprungur neðarlega í bitanum út frá bakhlið skúffunnar hinum megin, sprungumyndunina má sjá á mynd 40.



Mynd 40: Sprungur í skúffubita

Það varð mikil færsla við samskeyti steypunnar og skúffunnar þeim megin í um 48 kN en það hak sést greinilega á mynd 39. Eftir það voru það þau samskeyti sem héldu áfram að gefa sig. Mesti kraftur sem settur var á tenginguna var 62 kN . Járnin sem soðin voru aftan á skúffuna enduðu á því að slitna alveg þegar krafturinn hafði lækkað aftur niður í um 55 kN . Mynd 41 sýnir prófstykkið eftir að tilraunum lauk.

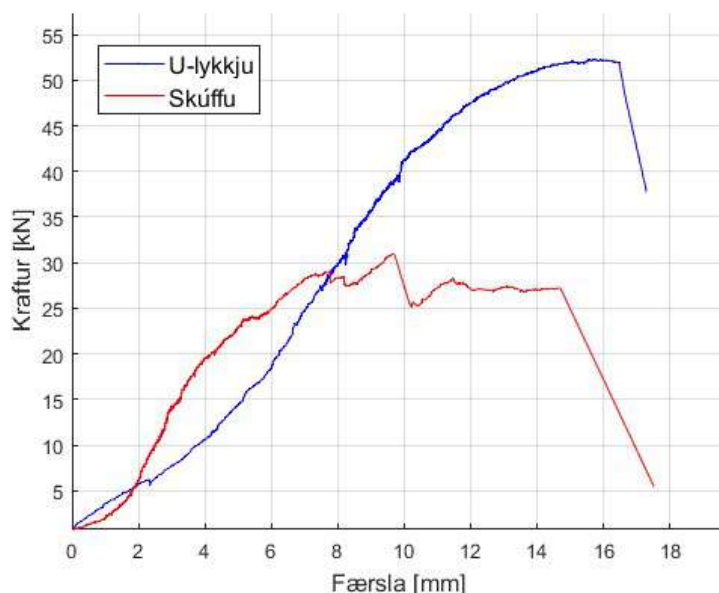


Mynd 41: Prófstykki með skúffutengingum eftir prófun

7 Umræður og greining á mældum niðurstöðum

Úr prófuninni fást upplýsingar um kraftinn sem settur er á tenginguna og færsluna sem hann veldur. Hér verða upplýsingarnar túlkaðar og prófstykkin borin saman.

Á mynd 42 er graf sem sýnir niðurstöður beggja prófana. Grafið sýnir helming kraftsins sem settur var á prófstykkin þar sem þol einnar tengingar í hvoru prófstykki er til skoðunar og krafturinn dreifist jafnt á báðar tengingar. Þar er hægt að sjá út að U-lykkjutengingin brotnar við hærri kraft og þolir örlítið meiri færslu en skúffutengingin þoldi. Skúffutengingin þoldi mun minni kraft en brotnaði við svipaða færslu og U-lykkjutengingin gerði.

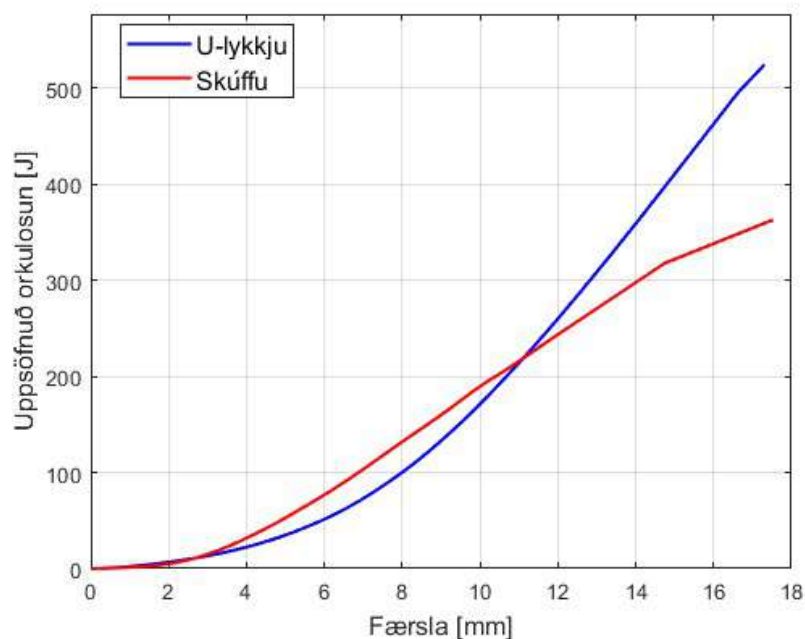


Mynd 42: Kraftur sem fall af færslu

Í byrjun prófa eða upp að um það bil 1,7 mm bendir grafið til þess að prófstykkið með U-lykkjutengingu sé stífara en prófstykkið með skúffutengingum. Það er að öllum líkindum gúmmíþéttingin sem pressast saman í byrjun. Þegar þéttingin hefur pressast alveg saman hefur prófstykkið með skúffutengingunum bæði meiri stífni og styrk upp að um 5 mm færslu. Eftir það fer stífni þess aftur minnkandi en það heldur þó meiri styrk en prófstykkið með U-lykkjutengingum upp að um 7,5 mm færslu. Eftir það hefur U-lykkjuprófstykkið meiri styrk og stífni allt fram að 16,5 mm færslu þegar heildarkraftur mældist 104 kN. Þar slitnuðu kambstál U-lykkjutengingarinnar. Skúffuprófstykkið hélt hins vegar jöfnum styrk fram að um 14,5 mm færslu með mældan heildarkraft um 60 kN. Brot skúffutengingarinnar varð yfir lengri færslu, hún brotnaði „hægar“ sem gefur til

kynna að hún sé ekki jafn stíf og U-lykkjutengingin.

Orka er skilgreind sem kraftur sinnum færsla og hægt er að meta orkulosun prófstykkjanna með því að reikna flatarmálið undir ferli í grafi sem sýnir kraft sem fall af færslu. Orkan er reiknuð með því að heilda föllin, það gefur flatarmálið undir ferlunum. Útreikningar á orkulosun voru gerðir í forritinu Matlab, kóðann má sjá í viðauka C. Mynd 43 sýnir uppsafnaða orkulosun fyrir bæði prófstykkinn.

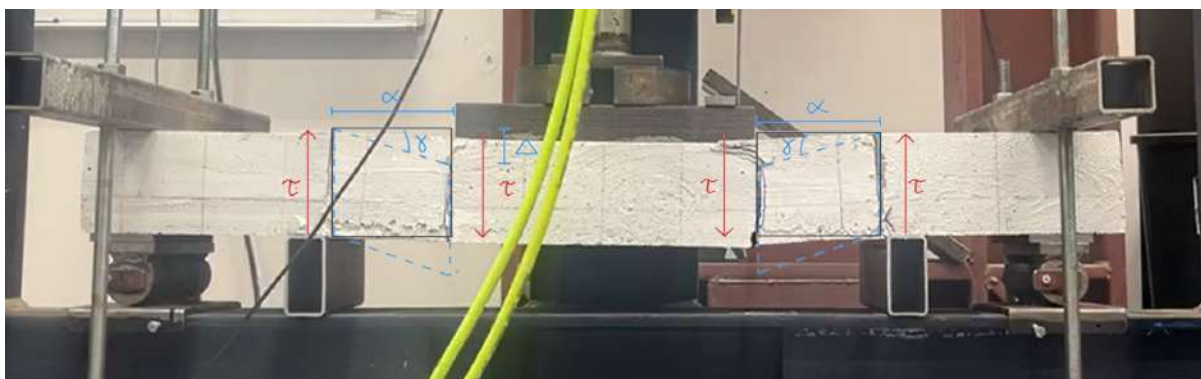


Mynd 43: Uppsöfnuð orkulosun beggja prófstykkja

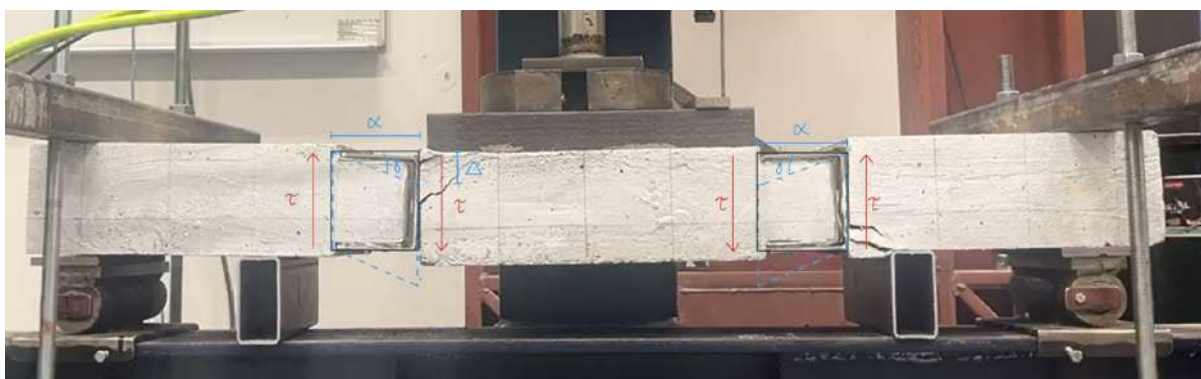
Á grafinu má sjá að orkulosun einnar tengingar í hvoru prófstykki er mjög svipuð framan af en uppsöfnuð orkulosun prófstykkisins með U-lykkjutengingunum var meiri en skúffutengingarinnar. Geta efnis til orkuupptöku segir til um stífni þess. Efni sem tekur upp litla orku má ætla að hafi minni stífni.

Þegar færslur í prófstykkjunum eru skoðaðar er hægt að meta það svo að ekki sé lýsandi að skoða kraftinn og færsluna þar sem prófunin var gerð í nær hreinu skeri. Það gerir það að verkum að færslan verður ólík því sem myndi verða ef vægiáraun spilaði meira inn í. Það hefur þó að öllum líkindum komið vægiáraun á tengingarnar, þá sérstaklega í prófstykkinu með skúffutengingum.

Ef aflögun tenginganna er skoðuð má þó sjá að tengingarnar fylgja almennt formi skerbrots [48]. Á myndum 44 og 45 er dregið fram hvernig aflögunin fylgir skerstreituaflögun.



Mynd 44: Hornsnúningur U-lykkjutengingar



Mynd 45: Hornsnúningur skúffutengingar

Hægt er að færa rök fyrir því að færsluna sé meira lýsandi að setja fram sem hornsnúning, táknður með γ . Hornsnúningur lýsir í raun skerstreitu tengingarinnar. Ef horft er á færsluna sem hornsnúning er því eðlilegt að setja kraftinn fram sem skerspennu, eins og gert er á grafi á mynd 46. Á x-ás grafsins er skerstreita (hornsnúningur) tengingarinnar táknud með γ og reiknuð með jöfnu 24 [48]:

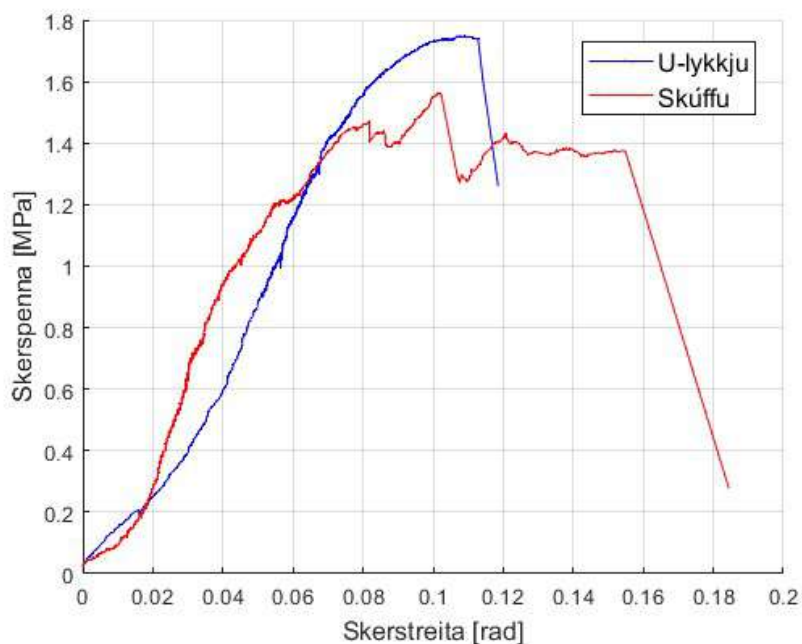
$$\gamma = \frac{\Delta}{\alpha} \quad (24)$$

þar sem Δ táknar færslu og α táknar lengd flatarins sem aflagaðist vegna skers. Gert er ráð fyrir að sá hluti bitans sem var utar en tengingin í bitanum hafi óendanlega stífni og aflagist því ekki. Á y-ás grafsins er meðalskerspenna sem varð í þversniðinu táknud með τ og reiknuð með jöfnu 25 [48]:

$$\tau_{AV} = \frac{V}{A} \quad (25)$$

þar sem V táknar kraftinn á sniðið og A þverskurðarflatarmál sniðsins. Útreikninga á þessu má sjá í Matlab kóða í viðauka C.

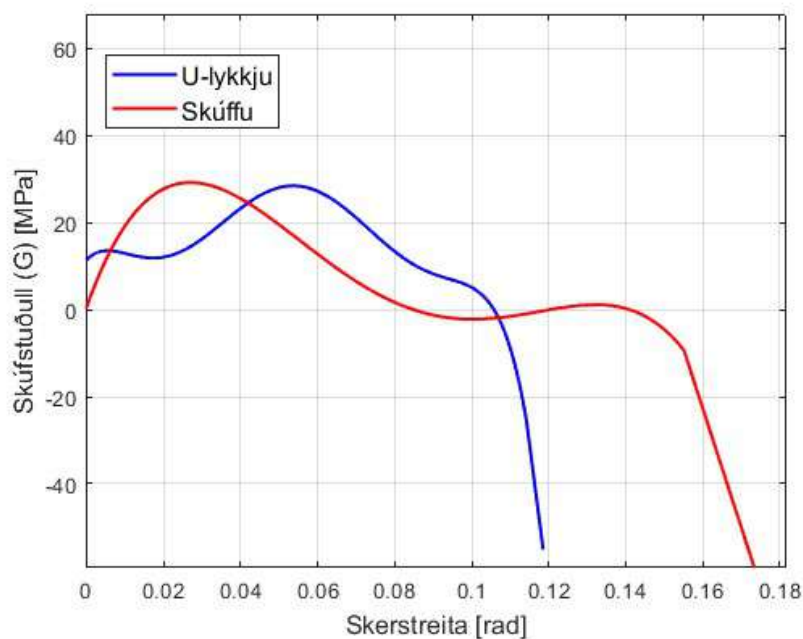
Mynd 46 sýnir niðurstöður prófa beggja bita í einu grafi settar upp sem skerspenna og skerstreita.



Mynd 46: Spennu-streitugraf

Grafið bendir til þess að prófstykkin séu mun sambærilegri í styrk en graf 42 sýndi. Ferlarnir sýna þó mjög svipaða stífniþróun og það graf gerði.

Stífleikann er hægt að sjá enn betur með því að skoða skúfstuðul niðurstöðunnar. Skúfstuðull er táknaður með G og er hallatala ferilsins sem sýnir spennu og streitu. Til þess að finna hallatöluna er ferillinn deildaður og niðurstaðan teiknuð upp. Áður en hægt er að deilda ferilinn þarf að „slétta“ úr gögnunum þar sem lítil hök eru í mælingunum alla leið. Hér var það gert með margliðunálgun, sjá viðauka C. Þá er hallatalan teiknuð upp eins og sjá má á mynd 47.



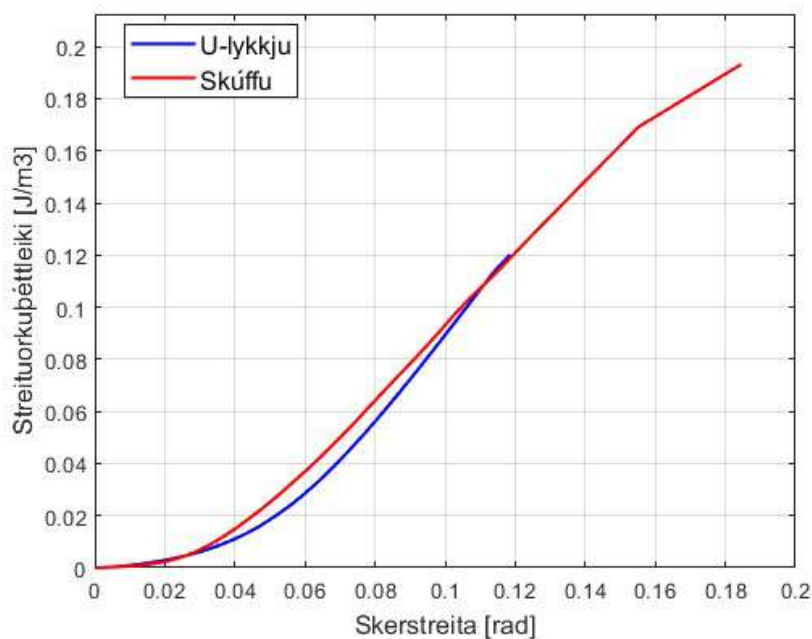
Mynd 47: Skúfstuðull

Skúfstuðullinn dregur fram hvernig stífleiki U-lykkjutengingarinnar er hærri en skúffutengingarinnar til að byrja með. Þá sést hvernig skúffutengingin verður stífari en U-lykkjutengingin með tímanum áður en hún missir stífleikann aftur. Að lokum missir U-lykkjutengingin stífleika sinn skyndilegar.

Að lokum er hægt að setja fram orkuþéttleika tenginganna með því að reikna flatarmálið undir ferli grafsins sem sýnir spennu og streitu úr prófuninni. Flatarmálið undir ferli grafs sem sýnir kraft og færslu gefur til kynna orkulosun, eins og graf 43 sýndi. Hins vegar gefur flatarmálið undir ferli spennu-streitugrafsins streituorkuþéttleika (e. Strain energy density). Til þess að finna flatarmálið er ferillinn heildaður:

$$\frac{U}{V} = \int_0^\gamma \tau d\gamma \quad (26)$$

Úr heildinu fæst einingin $Pa = N/m^2 = Nm/m^3 = J/m^3$ sem er orka (U) á rúmmál (V). Því verður streituorkuþéttleikinn hér táknaður $[U/V]$. Ferillinn má sjá á mynd 48.



Mynd 48: Streituorkupéttleiki

Grafið gefur til kynna að uppsafnaða orkupéttinn sé mjög svipuð hjá báðum tengingum en skúffutengingin tekur svo fram úr og hefur töluvert meiri orkupéttni.

Samkvæmt þeim útreikningum sem gerðir voru á tengingunum fyrirfram hefði U-lykkju-tengingin átt að vera um það bil jafn sterk og hún reyndist og brotna á sama stað. Útreikningar sögðu til um 25 kN styrk í hvorri tengingu en fyrstu stóru sprungurnar urðu við tæplega 50 kN heildarkraft, sem þá á eftir að deila í með tveimur.

Útreikningar á stálskúffutengingunni gáfu til kynna að stálskúffan sjálf ætti að gefa sig á undan öðru. Vanmat á styrk stálskúffunnar sjálfrar má að líklega rekja til þess að ekki var reiknað með eins mikilli samvirkni milli steypunnar og stálsins og raun bar vitni þegar gúmmíð hafði pressast saman. Samkvæmt þessum sömu útreikningum hefði steypiti tappinn inni í skúffunni átt að brotna á mjög svipuðum tíma og samskeytin milli stálskúffunnar og steypunnar. Tappinn virðist þó hafa þolað meira álag en reiknað var með sem má ef til vill einnig rekja til þess að samvirkni stálsins og steypunnar var vanmetin. Útreikningar á því hvenær samskeytin milli stálsins og steypunnar ættu að gefa sig voru þó lýsandi fyrir það sem gerðist í raun. Samkvæmt þeim ætti ein tenging að þola um 18 kN kraft en það þurfti um 36 kN heildarkraft til þess að tengingin byrjaði að gefa sig en brotstyrkurinn var á bilinu 54 kN til 62 kN.

Í töflu 8 má sjá reiknaðan styrk í annarri tengingu hvors bita borinn saman við mældan styrk eftir að deilt er í hann með tveimur þar sem heildarkrafturinn deilist á tvær tengingar.

Tafla 8: Samanburður á reiknuðum og mældum kröftum

Eiginleikar	U-lykkjutenging [kN]	Skúffutenging [kN]
Reiknaður styrkur	25	18
Fyrsta brot	22,5	18
Algjört brot	52	30

Eftir á að hyggja er ekki sambærilegt að hafa tvær U-lykkjur/fjögur kambstál í sniðinu á milli forsteypu og staðsteypu í U-lykkjutengingunni en aðeins tvö kambstál í sniðinu þar sem stálskúffan og steypan mætast í skúffutengingunni. Betra hefði verið að fjölga K6 lykkjunum sem soðnar eru á stálskúffurnar eða jafnvel að útfæra tengingu skúffanna við steypuna öðruvísi. Hugmynd að útfærslu væri að járnplata með götum í gegn væri soðin hornrétt á skúffurnar og járnunum krækt í plötuna.

Eins og fram hefur komið bentu útreikningar þó til þess að tappinn væri jafn sterkur og sniðið milli skúffunnar og steypunnar, ásamt því að stálskúffurnar sjálfar voru reiknaðar ákvarðandi svo óþarfi þótti að bæta við járnnum þar sem samskeytin reiknuðust þegar sterkari en tengingin var annars staðar.

Í fyrirmyndinni er aðferðinni við uppsetningu eininganna ekki lýst í smáatriðum. Ef til kæmi að tengingin yrði notuð í raunveruleikanum er hér, að lokum, sett fram örlítið nákvæmari tillaga að framkvæmd við uppsetningu þeirra.

- Ákvarða staðsetningu með viðmiðunarlínum
- Hífa og staðsetja fyrstu eininguna
- Koma fyrir tímabundnum stoðum við eininguna
- Hífa og staðsetja einingu með tappann við nót fyrri einingarinnar
- Strekkja einingarnar saman
- Bora fyrir snittteinum í gegnum tenginguna
- Læsa einingunum saman með snittteinum og róm

8 Samantekt og lokaorð

Ný tenging milli forsteypra eininga í stöpulveggjum brúa var þróuð með það að markmiði að stytta framkvæmdatíma á verkstað. Þurr tenging sem byggir á því að á einingunum sé nót og tappi úr stálskúffum sem boltaðar eru saman var valin til prófunar á móti hefðbundinni samsteyputengingu sem byggir á því að U-lykkjur skarist og myndi þannig lás sem bendistáli er rennt lóðrétt í áður en steyp er á milli.

Höfundur útfærði og smíðaði eitt prófstykki fyrir hvora gerð í 37,5% skala. U-lykkjutenginguna að fyrirmynd Vegagerðarinnar og skúffutenginguna að hluta að erlendri fyrirmynd. Framkvæmd við smíði prófstykkjanna gekk vel fyrir sig og má draga af því þá ályktun að nýja tengingin yrði einnig fljótleg og auðveld í samsetningu á verkstað.

Einingarnar voru að lokum prófaðar í Háskólanum í Reykjavík. Prófunin var nokkurs konar fimmþingapróf sem þó er hægt að reikna sem þriggjaþingapróf. Við prófun stykkjanna var leitast eftir að ná fram sem hreinustu skerbroti.

Helstu niðurstöður sem fengust úr tilrauninni eru að U-lykkjutengingin er sterkari þegar tengingarnar eru prófaðar í hreinu skeri. Skúffutengingin er þó seigari þrátt fyrir að vera veikari en U-lykkjutengingin sem gerir það að verkum að brotið í henni verður ekki jafn skyndilegt. Gúmmíþéttingin á milli stálskúffanna gerir það að verkum að stífni skúffutengingarinnar verður mjög lítil til að byrja með en stífni hennar tekur fram úr U-lykkjutengingunni eftir að gúmmíð þjappast alveg saman. Það er hægt að áætla að skúffutengingin gæti leyst U-lykkjutengingar af hólmi að einhverju eða öllu leyti. Til þess væri þó fyrst vert að skoða hvort hægt væri að gera breytingar á tengingu stálskúffanna við steypuna sem myndi auka styrk tengingarinnar og gera hana sambærilegri hefðbundnu U-lykkjutengingunni á þann hátt.

Nýja tengingin lofar góðu og vonandi verður í framtíðinni hægt að flýta fyrir brúargerð og fækkun einbreiðra brúa með notkun á henni.

Næstu skref fyrir verkefnið:

- Fínþússa hönnun á skúffutengingu
- Gera tíma- og kostnaðarsamanburð á tengingunum
- Prófa einingarnar á stærri skala og gagnvart mismunandi álagi

Heimildir

- [1] Guðmundur Valur Guðmundsson, „Fækkun einbreiðra brúa”, Vegagerðin, árg. 18, tbl. 4, 2018.
- [2] Innviðaráðuneytið, „Einbreiðum brúm fækkar enn - nýjar brýr yfir Núpsvötn og Hverfisfljót vígðar”, Stjórnarráð Íslands. Sótt: 29. okt., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: <https://www.stjornarradid.is/efst-a-baugi/frettir/stok-frett/2023/06/29/Einbreidum-brum-faekkar-enn-nyjar-bryr-yfir-Nupsvotn-og-Hverfisfljot-vigdar/>
- [3] Franz Sigurjónsson, „Samanburður á tengingu staðsteypis og forsteypis stoðveggjar við staðsteypa undirstöðu”, Meistararitgerð, Byggingarverkfræði, Háskóli Íslands, Reykjavík, Ísland, 2023.
- [4] K. S. Elliott og Z. Abd. Hamid, *Modernisation, Mechanisation and Industrialisation of Concrete Structures*. Newark, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2017.
- [5] *Eurocode 2: Design of concrete structures*, 1992-1-1, 2004.
- [6] Ísat, *Ísland-atvinnuhættir og menning 2020*, bindi. 5 af 6, Reykjavík, Ísland: Sagaz ehf., 2022.
- [7] „Saga”, BM Vallá. Sótt: 5. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: <https://secure.livechatinc.com/>
- [8] „Sagan Okkar”, Steypustöðin. Sótt: 5. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: <https://steypustodin.is/saganokkar/>
- [9] Stefán Grímur Sigurðsson, „Ólínuleg greining á steiptum stoðveggjum með einingaraðferðinni”, Meistararitgerð, Byggingarverkfræði, Háskóli Íslands, Reykjavík, Ísland, 2023.
- [10] M. Kamali og K. Hewage, „Life cycle performance of modular buildings: A critical review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, tbl. 62, bls. 1171–1183, sep. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.031.
- [11] Kristján Andrésson, Björn Marteinsson, Bjarni Bessason, og Haukur J. Andrésson, „Frostþol ungrar steypu”, *Icel. J. Eng.*, árg. 22, tbl. 1, 2016, doi: 10.33112/ije.22.1.
- [12] P. Gallo, R. Romano, og E. Belardi, „Smart Green Prefabrication: Sustainability Performances of Industrialized Building Technologies”, *Sustainability*, árg. 13, tbl. 9, bls. 4701, jan. 2021, doi: 10.3390/su13094701.
- [13] R. Martins, R. D. Carmo, H. Costa, og E. Júlio, „A review on precast structural concrete walls and connections”, *Adv. Struct. Eng.*, árg. 26, tbl. 14, bls. 2600–2620, okt. 2023, doi: 10.1177/13694332231191073.

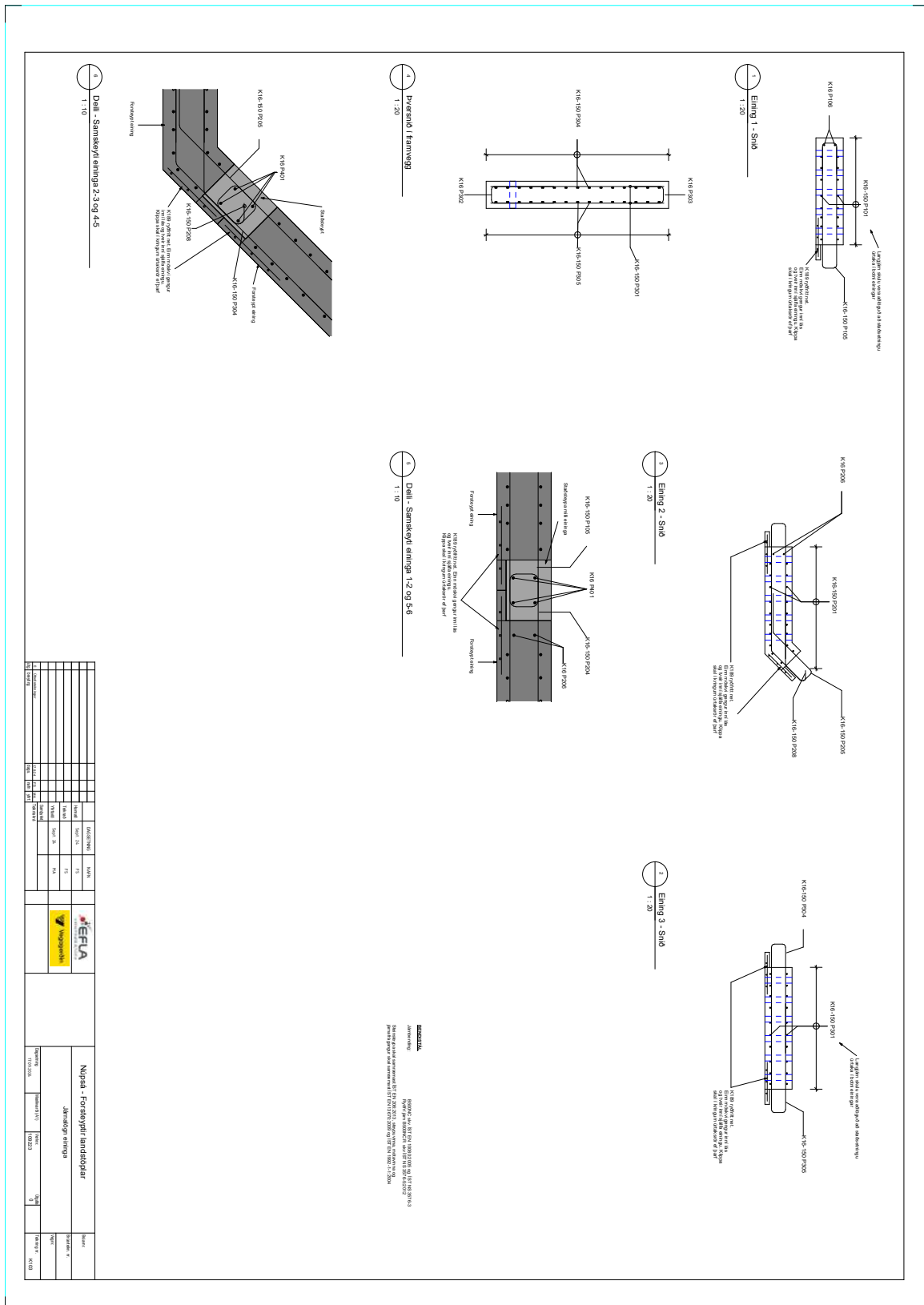
- [14] Birgir Pétursson, „Standard FA sement á Íslandi”, Meistararitgerð, Verkfræði- og náttúruvísindasvið, Háskóli Íslands, Reykjavík, Ísland, 2017.
- [15] Sigurður Erlingsson, „Mælitækni til stýringar á þungatakmörkunum. Áfangaskýrsla 1”, Vegagerðin. Sótt: 15. okt., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: <https://www.vegagerdin.is/vegagerdin/gagnasafn/skyrslur/rannsoknaskyrslur/umferd/adrar-skylur/maelitaekni-til-styringar-a-thungatakmorkunum-afangaskyrla-1>
- [16] „Þungatakmarkanir víða um land”, Vegagerðin. Sótt: 15. okt., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: <https://www.vegagerdin.is/vegagerdin/starfsemi/frettir/thungatakmarkanir-vida-um-land>
- [17] „Þungatakmarkanir á hringveginum tefja landflutninga”, RÚV. Sótt: 15. okt., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: <https://www.ruv.is/frettir/innlent/2022-01-14-thungatakmarkanir-a-hringveginum-tefja-landflutninga/>
- [18] „The advantages and disadvantages of using precast concrete”, McNeil Engineering. Sótt: 7. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: <https://www.mcneilengineering.com/the-advantages-and-disadvantages-of-using-precast-concrete-in-structural-engineering/>
- [19] „DS Lausnir ehf – Þjónusta í byggingariðnaði”, DS Lausnir ehf. Sótt: 20. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: <https://dslaunsir.is/>
- [20] „Comansa”, DS Lausnir ehf. Sótt: 7. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: <https://dslaunsir.is/vorumerki/cattaneo/>
- [21] G. Cai, F. Xiong, Y. Xu, A. Si Larbi, Y. Lu, og M. Yoshizawa, „A Demountable Connection for Low-Rise Precast Concrete Structures with DfD for Construction Sustainability-A Preliminary Test under Cyclic Loads”, *Sustainability*, árg. 11, tbl. 13, bls. 3696, júl. 2019, doi: 10.3390/su11133696.
- [22] M. Rossow, *Bridge Inspection (Part 1): Abutments and Wingwalls (BIRM)*. NY, Bandaríkin: Continuing Education and Development, Inc.
- [23] S. Singhal, A. Chourasia, S. Chellappa, og J. Parashar, „Precast reinforced concrete shear walls: State of the art review”, *Struct. Concr.*, árg. 20, tbl. 3, bls. 886–898, 2019, doi: 10.1002/suco.201800129.
- [24] Einar Hafliðason, Guðmundur Valur Guðmundsson, Helgi S. Ólafsson og Gylfi Sigurðsson, „Reglur um hönnun brúa”. Vegagerðin, 2018. Sótt: 20. okt., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: <https://www.vegagerdin.is/vegagerdin/gagnasafn/leidbeiningar-og-reglur/reglur-um-honnun-brua>

- [25] B. M. Das, *Fundamentals of Geotechnical Engineering*, 4. útg. Stamford, CT, Bandaríkin: Cengage Learning, 2013.
- [26] Precast/Prestressed Concrete Institute, *Bridge design manual*, 3. útg. Chicago, IL, Bandaríkin: PCI, 2014.
- [27] Federal Highway Administration, „Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Highway Bridge Substructures”, *Natl. Highw. Inst.*, 2001. Sótt: 29. okt., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [https : //www.academia.edu/35564156/FHWA_Manual_BRIDGE](https://www.academia.edu/35564156/FHWA_Manual_BRIDGE)
- [28] R. M. Barker og J. A. Puckett, *Design of highway bridges: an LRFD approach*, 2. útg. Hoboken, NJ, Bandaríkin: John Wiley & Sons, 2007.
- [29] H. R. Sanghvi og M. A. Dhankot, „Analysis of precast shear wall connection - State of the art review”, *Int. J. Res. Eng. Technol.*, árg. 4, tbl. 2, bls. 767–770, feb. 2015, doi: 10.15623/ijret.2015.0402106.
- [30] „Útveggir óeinangraðir”, Steypustodin. Sótt: 5. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [https : //steypustodin.is/vorur/utveggir – oeinangradir/](https://steypustodin.is/vorur/utveggir-oeinangradir/)
- [31] „Veggir”, Einingaverksmiðjan. Sótt: 7. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [https : //ev.is/veggir/](https://ev.is/veggir/)
- [32] R. Vaghei, F. Hejazi, H. Taheri, M. S. Jaafar, og F. N. A. A. Aziz, „Development of a new connection for precast concrete walls subjected to cyclic loading”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, árg. 16, tbl. 1, bls. 97–117, jan. 2017, doi: 10.1007/s11803-017-0371-3.
- [33] „WILORA® Connecting Rail”, Peikko. Sótt: 7. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [https : //www.peikko.com/products/product/wilora/photos – and – videos/](https://www.peikko.com/products/product/wilora/photos-and-videos/)
- [34] „The secret of precast wall to wall connection”, Moment. Sótt: 7. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [https : //www.moment – solutions.com/the – secret – of – precast – wall – connection/](https://www.moment-solutions.com/the-secret-of-precast-wall-connection/)
- [35] „Precast connections”, Halfen. Sótt: 7. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [https : //www.halfen.com/en_DE/product – ranges/concrete/reinforcement – systems/precast – connections](https://www.halfen.com/en_DE/product-ranges/concrete/reinforcement-systems/precast-connections)
- [36] Precast/Prestressed Concrete Institute, „Connections (DN-32)” *Designer’s Notebook*. PCI, bls. 54–61.
- [37] Steinunn S. Jakobsdóttir, „Hvað veldur jarðskjálftum?”, *Vísindavefurinn*. Sótt: 2. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [http : // www. visindavefur. is/svar. php?id = 47958](http://www.visindavefur.is/svar.php?id=47958)
- [38] B. C. Jensen, *Teknisk Ståbi*, 25. útg. Danmörk: Praxis- Nyt Teknisk Forlag, 2019.

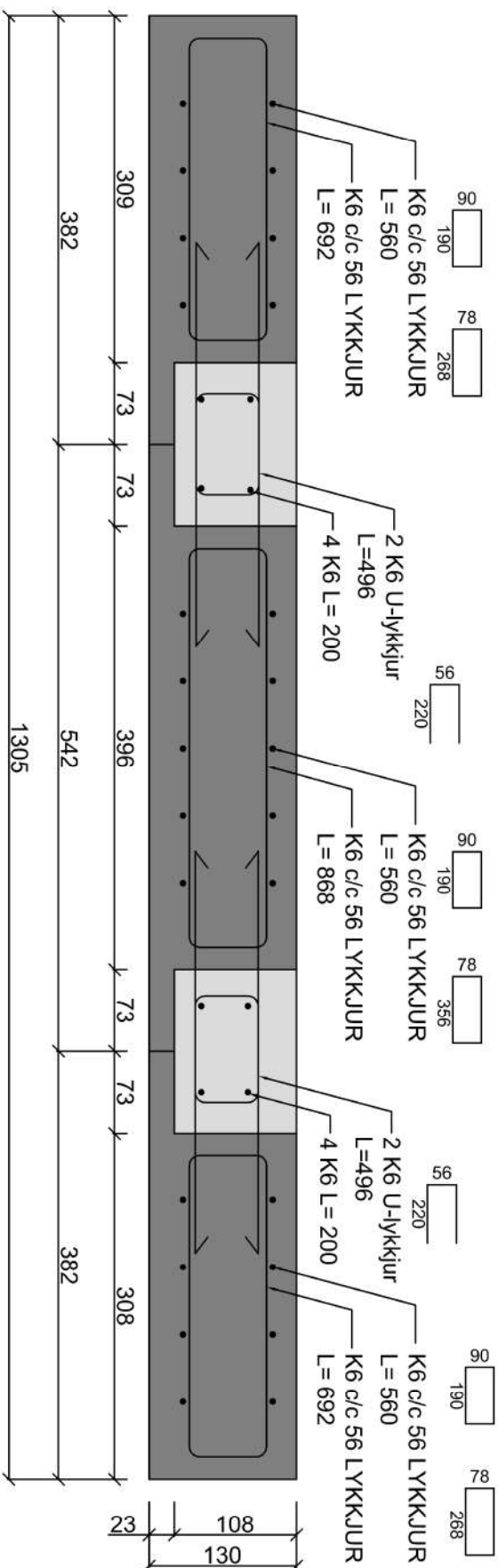
- [39] B. Mosley, J. Bungey, og R. Hulse, *Reinforced concrete design to Eurocode 2*, 7. útg. Basingstoke, England: Palgrave Macmillan, 2012.
- [40] Jóhann Albert Harðarson. *Hönnun steinsteypu*. (2023, vor). *BT SST1013 Steinsteypuvirki I*. Reykjavík: Háskólinn í Reykjavík.
- [41] „Section B: Statistical Variations in Material Properties”, University of Cambridge, Engineering Department. Sótt: 8. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [https : //cmm-packpr.wordpress.com/wp – content/uploads/2010/12/d02_stat_02_statistical_variations_in_material_properties.pdf](https://cmm-packpr.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/12/d02_stat_02_statistical_variations_in_material_properties.pdf)
- [42] D. Lam, P. Ang, og S.-P. Chiew, *Structural steelwork: design to limit state theory*, 3. útg. London, England: CRC Press, 2006.
- [43] Torfi G. Sigurðsson. *Útreikningar á brotstigi- hrein beygja*. (2023, vor) *BT SST1013 Steinsteypuvirki I*. Reykjavík: Háskólinn í Reykjavík.
- [44] *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*. 1993-1-8, 2005.
- [45] Gylfi Einarsson, *Mig/mag*. Reykjavík, Ísland: Íðan fræðslusetur, 2007.
- [46] „CS40”, Trelleborg. Sótt: 5. nóv., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [https : //www.trelleborg.com/en/fluidhandling/products – and – solutions/rubber – sheeting – and – matting/sheeting/cr – polychloroprene/cs40](https://www.trelleborg.com/en/fluidhandling/products-and-solutions/rubber-sheeting-and-matting/sheeting/cr-polychloroprene/cs40)
- [47] „Steinsteypa- Gerð og helstu eiginleikar”, Rannsóknarstofnun byggingariðnarðarins. Sótt: 15. okt., 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [https : //hms – web.cdn.prismic.io/hms – web/cba2a115 – bd42 – 4e27 – 875b – 8c0084535cbb_Eq4.021+Steinsteypa+-+ger%C3%B0+og+helstu+eiginleikar.pdf](https://hms-web.cdn.prismic.io/hms-web/cba2a115-bd42-4e27-875b-8c0084535cbb_Eq4.021+Steinsteypa+-+ger%C3%B0+og+helstu+eiginleikar.pdf)
- [48] Pratik, „Shear Strain: Definition, Formula, Diagram, Units, Examples”. Mech Content. Sótt: 25. nóvember 2024. [Rafrænt]. Aðgengilegt á: [https : //mechcontent.com/shear – strain/](https://mechcontent.com/shear-strain/)

A Teikningar

Teikning af U-lykkjutengingunni sem Vegagerðin notar.

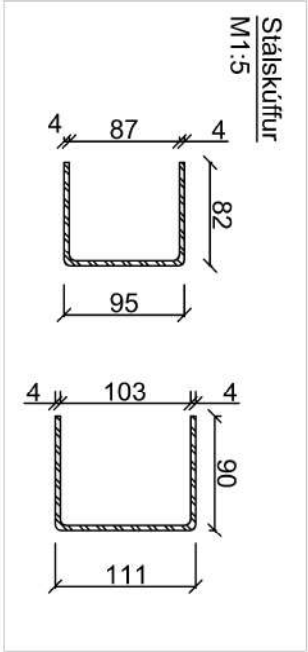
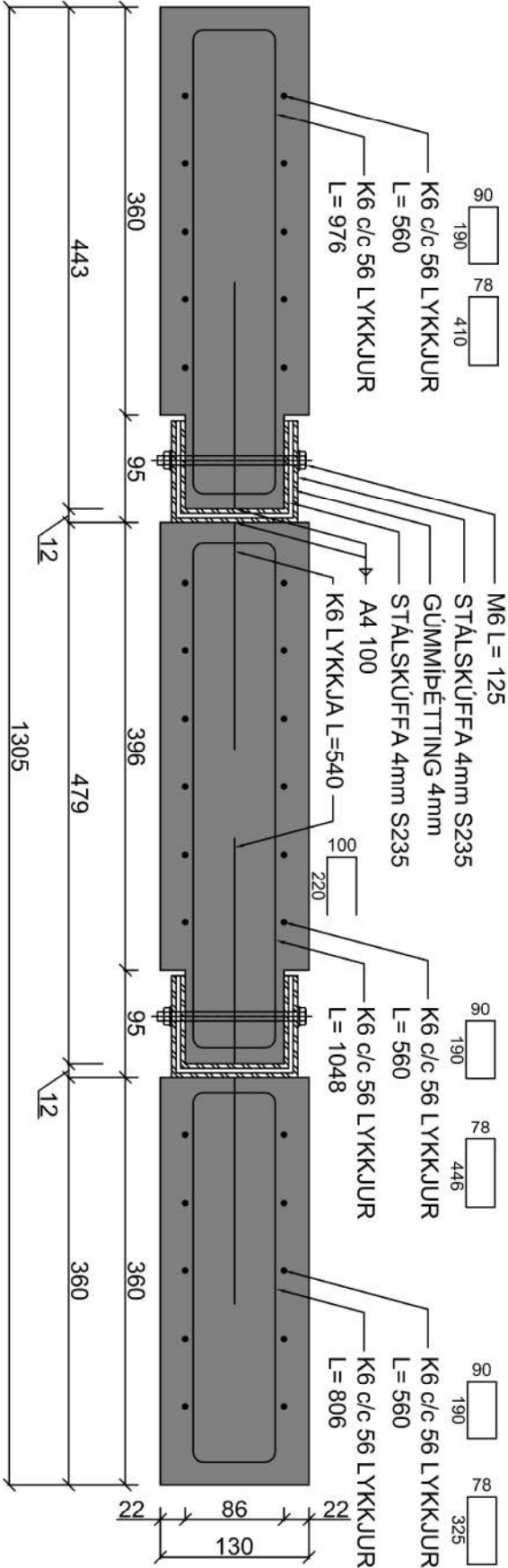


Prófstykki með U-lykkjutengingu
M1:5



VEGGUR MED U-LYKKJUTENGINGUM Í 37.5% SKALA	MMV. (A4)
1:5	11.2024
HOVAÐUR	DAGS.
Ester María Eiríksdóttir	

Prófstykki með skúffutengingu
M1:5



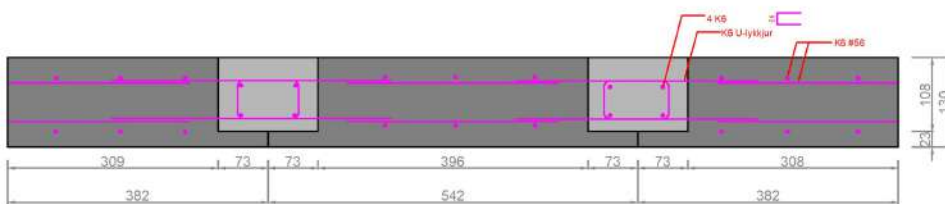
VEGGUR MED SKÚFFUTENGINGUM		MAKV. (A4)
í 37.5% SKALA		1:5
HOFNADUR	DAGS.	
Ester María Eiríksdóttir		11.2024

B Útreikningar

Skerpol á milli forsteypu og samsteypu í U-lykkjutengingu

Stærðir bitans

$\approx c <$	Breidd bita
$\approx \leftarrow$	Breidd flatarins þar þar sem forsteypa og samsteypa mætast
$> c <$	Hæð bita
$\times$	Steypuhula



Valin járnabending

o	Valin járnastærð K6
$>$	Fjöldi U-lykkja sem fara í gegnum sniðið þar sem forsteypa og samsteypa mætast
n	Flatarmál járna sem fer í gegnum sniðið
$>$	Stefna bendingar

Eiginleikar bendistálsins

$n < z \alpha$	Kennigildi flotstyrks bendistáls B500
----------------	---------------------------------------

Þar sem útreikningarnir eru gerðir fyrir prófun en ekki almenna hönnun verður notaður meðalgildisstyrkur stálsins, fým -það verður gert samkvæmt: https://cmmpackpr.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/12/d02_stat_02_statistical_variations_in_material_properties.pdf

$s.$	sample coefficient of variation, stuðull sem metur óvissu í staðaldreifingu, gefinn upp fyrir stál í statistical variations in material properties
------	--

$$= \Rightarrow = *f_{ym} \quad \text{stilli upp jöfnu fyrir staðaldreifingu}$$

$$\begin{aligned} f_{yk} &= f_{ym} - 1.64 * \\ \Rightarrow f_{yk} &= f_{ym} - 1.164 * *f_{ym} \\ \Rightarrow f_{yk} &= f_{ym}(1 - 1.164 *) \end{aligned} \quad \text{Styrkur stáls fylgir normaldreifingu}$$

$$\Rightarrow \quad \geq \text{noi } 8 \text{ i i } z \alpha \quad \text{meðalgildissyrkur bendistáls}$$

Eiginleikar steinsteypunnar -Valin steypa C35

$c_n z \alpha$ Kennigildi þrýstistyrks steypunnar tafla 3.1 EC2

$i c z \alpha$ Meðalgildi þrýstistyrks tafla 3.1 EC2

$c_{87} z \alpha$ Meðalgildi togþols tafla 3.1 EC2

$r \quad c_i t \alpha$ Meðalgildi þrýstistyrks tafla 3.1 EC2

=
=

hlutfall normalkrafta í for- og samsteypunni, er 1 hér því það er enginn normalkraftur

=

stuðull sem tekur til greina langtímaáhrif togstyrks og óhagkvæms álags, gefið í þjóðarviðauka sem 1

$$\leq 7 \quad \geq i - 0.8 \quad \leq 7^c \quad \text{Minnkunarstuðull styrks, EC2 6.2.2(6)}$$

C og eru stuðlar sem ákvarðast eftir grófleika yfirborðs steypunnar, í EC2 6.9(2) eru eftirfarandi stuðlar gefnir upp fyrir mismunandi yfirborð

Yfirborð	c	μ
Very smooth	0.025	0.5
Smooth	0.2	0.6
Rough	0.4	0.7
Indented	0.5	0.9

Slegið verður upp mótum með 1"x6" óhefluðum furuborðum svo yfirborðið telst "Rough", þá verður

$$p \leq \quad \leq$$

Útreikningar á skerþoli

$$\sigma < 0.6 \cdot f_{cm}$$

Sepnna sem verkar á sama tíma og sker, það er enginn normalkraftur í prófinu svo hún verður 0

$$n_s \geq n_{s,req}$$

Flatarmál samskeytanna

$$\frac{n_s}{n} \geq \frac{A_{s,req}}{A_s}$$

Járnahlutfall í sniðinu

$$\delta \leq \delta_{lim} = \frac{p}{5} \leq \frac{5}{2} \leq \frac{2}{35} \leq \frac{2}{33} \leq \frac{c}{d} \leq \alpha \quad \text{Skerþol í sniði EC2(6.25)}$$

vRdi verður að vera minna eða jafnt og:

$$\sigma_{ed} \leq \sigma_{Rd} = \frac{F_{Ed}}{A_{s,Rd}}$$

EC2 (6.25)

$$\delta \leq \delta_{lim}$$

1: OK
0: ekki OK

Útreikningar á skerkrafti sem verkar á snið

$$\tau_{ed} \leq \tau_{Rd}$$

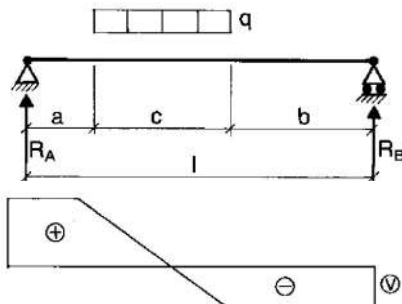
Nothæð bita

$$z \geq z_{min}$$

Innri vægisarmur EC2 16.2.3

$$s \leq s_{max}$$

Kraftur í tjakki (Grettir Sterki)



Einfalt studdur biti,
jafndreifður kraftur
yfir miðjan bitann,
Ståbi bls.60

$$s \ll$$

Lengd milli undirstaða

$$V \ll$$

Lengd álagsdrefingar

$$\frac{2}{3} V \geq \frac{1}{3} V$$

Lengd að álagsdrefingu frá undirstöðu

$$0 \geq \frac{1}{3} V$$

$$s \geq \frac{1}{3} V$$

Jafndreiftða álagið

$$\mu_n \geq \frac{1}{3} V$$

Svörunarkraftur Ståbi bls.60

$$\mu_n \geq \frac{1}{3} V$$

Svörunarkraftur

$$r \geq \frac{1}{3} V$$

Skerspenna í sniði EC2 (6.24)

Niðurstaða

$$r \cdot \delta \geq \begin{cases} 1: \text{Brotnar} \\ 0: \text{Brotnar ekki} \end{cases}$$

Hve mikið af heildar krafti tjaksins þarf til þess að verði skerbrot:

$$\frac{\delta}{r} \geq \frac{1}{3}$$

Heildarkraftur (heildar spenna* flatarmál) sem þarf til þess að brjóta (báðar tengingar) :

$$\mu \delta \geq \frac{1}{3} V$$

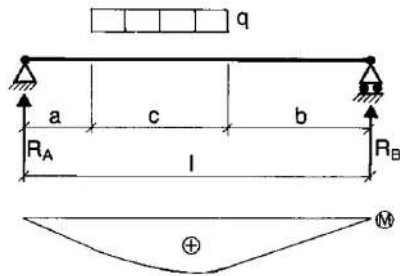
$$s \geq \frac{1}{3} V$$

Tengingin brotnar í skeri þegar tjakkurinn hefur notað tæplega 9% af getu sinni eða 5.3 tonn

Vægipól bita með U-lykkjutengingu

Bitinn þarf að hafa nóg vægipól svo að það sé öruggt að skerbrót verði í tengingunni áður en vægibrot verður þegar tilraunin er gerð

Reikna því vægið sem verður í tengingunni þegar krafturinn sem veldur skeri er sett á bitann



$$l \gg s$$

Lengd milli undirstaða

$$V \ll c$$

Lengd álagsdreifingar

$$V \geq \frac{7}{8} V_{\max}$$

Lengd að álagi, sama frá báðum hliðum

$$V \geq \frac{1}{2} V_{\max}$$

$$V \geq \frac{\mu \delta}{V} c \gg \frac{\delta}{2}$$

$$z \gg \frac{V}{\delta} \gg \frac{V}{\delta} \gg \frac{V}{\delta} \gg \frac{V}{\delta} \geq \frac{\delta}{2} \gg \frac{\delta}{2}$$

Vægi þegar skerbrót verður (Ståbi bls. 60) Einfalt studdur biti með kraftadreifingu á hluta

$$\frac{V}{\delta} \ll c$$

Járnabending

$$o$$

sama þvermál á bendingunni og í U-lykkjunum

$$c$$

Fjöldi járna í þversniði bitans

$$n \geq \frac{V}{\delta} \geq \frac{V}{\delta} \geq \frac{V}{\delta}$$

Járnaflatarmál neðri brún

$$n B n \geq \frac{V}{\delta} \geq \frac{V}{\delta}$$

Járnaflatarmál efribrún er það sama og í neðri

$$\frac{V}{\delta} \geq \frac{V}{\delta}$$

Nothæð járna í neðri brún

$$B \geq \frac{V}{\delta}$$

Nothæð járna í efri brún

Efniseiginleikar

$$r \leq t \alpha$$

Fjaðurstuðull bendistáls, EC2

$$r \geq 8 i \leq \tau^c$$

Meðalgildi streitu stálsins EC3(3.2.2)

Reikna fyrst vægipolið og lít framhjá járnunum í efri brún

-ÚTREIKNINGAR Á BROTTSTIGI - HREIN BEYGJA eftir Torfa G. Sigurðsson

$$\leq$$

Virk hæð spennudreifingar: 0.8 fyrir $f_{ck} < 50 \text{ MPa}$ (EC2 3.1.7(3.19))

$$=$$

Virkur styrkur steypunnar: 1 fyrir $f_{ck} < 50 \text{ MPa}$ skv. EC2 3.1.7(3.21)

$$n$$

$$\geq 0.8 n_0$$

Staðstening hlutlausa ássins frá efri brún (T.G.S)

Þar sem hlutlaus ássinn er ofan við efri járnin verður ekki þrýstingur.

Reikna því ekki streituna í efri járnunum því hún verður svo lítil.

Klára útreikningana alveg án þeirra.

$$s$$

$$\geq i s \Rightarrow \leq \delta$$

Lokakraftur spennudreifingar steinsteypu (T.G.S)

$$7 \leq n \geq i s \leq \tau^c$$

Innri vægisarmur þversniðsins (T.G.S)

$$z \delta \leq s \geq n \leq \leq \delta$$

Vægipól þversniðsins (T.G.S)

Niðurstaða

Athuga vægipól móti mestu vægiáraun

$$z \delta \cdot z \geq$$

1: Vægipól er nægilegt

0: Vægibrot verður á undan skerbroti

$$\frac{z \delta}{z} \geq 0.23$$

23,2% af mikill kraftur

SKERÐOLS ÚTREIKNINGAR Á SKÚFFUTENGINGU

Helstu stærðir

Stærðir bitans

$\varpi <$ Breidd bita

$\succ <$ Hæð bita

$\times$ Steypuhula

Járnabending bita

$\circ$ Þvermál bendistáls

c Fjöldi járna á breiddina

$n \begin{matrix} > \\ > \end{matrix} \geq^{\circ} i 8 \succ >$ Járnaflatarmál neðri brún

$n \ B \ n \geq^{\circ} i 8 \succ >$ Járnaflatarmál efribrún er það sama og í neðri

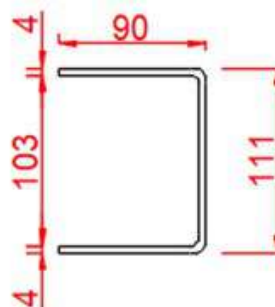
$7 \ 7 \geq \varpi s$ Nothæð járna í neðri brún

$B \ 7 \geq \succ$ Nothæð járna í efri brún

Stærðir stálskúffa

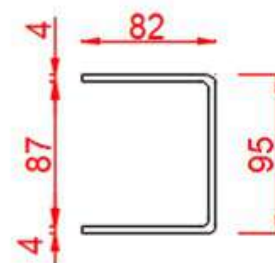
Skúffa 1

V_i	þykkt
$V \llcorner$	lengd
$V \equiv$	breidd
$V \geq <$	hæð



Skúffa 2

$W_{V \geq i}$	þykkt
$W \circ >$	lengd
$W \dashv$	breidd
$W \geq <$	hæð



Stærðir tappa

$W > W \geq s$	
$\geq <$	
$y \circ s$	
$n \geq < < < >$	
$n > > \geq n \text{ o} \text{ n} \text{ i} \text{ —} >$	
$> \geq \text{—} n$	

Breidd tappa

Hæð tappa

Lengd tappa

Þverskurðar flatarmál

Flatarmál járna sem soðin eru inn í skúffu til viðbótar við bendingu bitans

Nothæð járna sem soðin eru inn í skúffu

Efnisstuðlar

Eiginleikar bendistálsins

$$n \ll z \alpha$$

Kennigildi flotstyrks
bendistáls B500

Þar sem útreikningarnir eru gerðir fyrir prófun en ekki almenna hönnun verður notaður meðalgildisstyrkur stálsins, f_{ym} -það verður gert samkvæmt: https://cmm-pack-pr.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/12/d02_stat_02_statistical_variations_in_material_properties.pdf

s.

sample coefficient of variation, stuðull sem metur óvissu í staðaldreifingu, gefinn upp fyrir stál í statistical variations in material properties

$$= \Rightarrow = *f_{ym}$$

stilli upp jöfnu fyrir staðaldreifingu

$$\begin{aligned} f_{yk} &= f_{ym} - 1.64 * \\ \Rightarrow f_{yk} &= f_{ym} - 1.164 * *f_{ym} \\ \Rightarrow f_{yk} &= f_{ym}(1 - 1.164 *) \end{aligned}$$

Styrkur stáls fylgir normaldreifingu

$$\Rightarrow \quad \quad \quad \geq n o i \ 8 \ i \ i \ z \ \alpha$$

meðalgildissyrkur bendistáls

Eiginleikar smíðastálsins

$$c o < z \ \alpha$$

Brotsþenna smíðastáls, þarf ekki að vita hvenær það flýtur, bara hvenær brotnar, tafla 3.1 EC3

$$\Rightarrow \quad \quad \quad \geq i < 0.8^\circ \ z \ \alpha$$

Sama lögmál og bendistálið hér fyrir ofan

Eiginleikar steinsteypunnar -Valin steypa C35

$$c n \ z \ \alpha$$

Kennigildi þrýstistyrks steypunnar tafla 3.1 EC2

$$i \ c \ z \ \alpha$$

Meðalgildi þrýstistyrks tafla 3.1 EC2

$$c \ 8 > z \ \alpha$$

Meðalgildi togþols tafla 3.1 EC2

$$r \quad c i \ t \ \alpha$$

Meðalgildi þrýstistyrks tafla 3.1 EC2

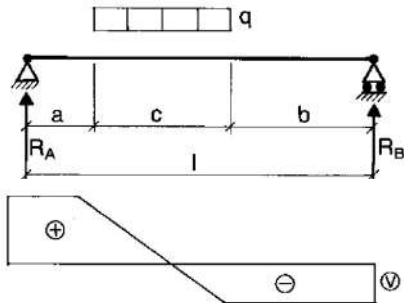
$$=$$

stuðull sem tekur til greina langtímaáhrif togstyrks og óhagkvæms álags, gefið í þjóðarviðauka sem 1

Reikna Skerkraftinn sem verður í þversniðinu

$s \ll c$

Kraftur tjakksins (Grettir Sterki)



Einfalt studdur biti,
jafndreifður kraftur
yfir miðjan bitann,
Ståbi bls.60

$s \ll c$

$V \ll c$

$$\frac{2}{3} V_0 \geq \frac{1}{2} q c$$

$$0 \geq \frac{1}{2} q c$$

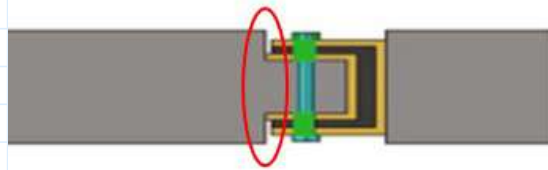
$$s \geq \frac{1}{2} q c \quad \delta$$

$$\mu_n \quad V \geq \frac{1}{2} q c \quad \delta$$

Skerkraftur sem hann veldur

$$\mu_0 \quad \mu_n \geq \frac{1}{2} q c \quad \delta$$

Byrja á að athuga hvenær skerfbrot verður í steyputappanum



$$p \delta N < 8^\circ$$

Fasti, gefinn upp í þjóðarviðauka við EC2

$$= 5 \sqrt{\frac{N}{A_s}} \geq \frac{N}{A_s}$$

stuðull formúla úr EC2 6.2.2

$$\geq \frac{N}{A_s}$$

0: Ekki OK
1: OK

k verður að vera minna eða jafnt og 2

$$0 >$$

þar sem k reiknaðist stærra en 2, verður það haft 2

$$V < 8n$$

Fasti gefinn upp í EC2 6.2.2

$$n \geq \frac{N}{A_s}$$

Öll togbendingin er tekin með í járnaflatarmálið (járn í neðri brún)

$$\geq \frac{N}{A_s}$$

Minnsta breidd sniðsins EC2 6.2.2

$$n \geq \frac{N}{A_s}$$

Járnahlutfall EC2 6.2.2

$$\geq \frac{N}{A_s}$$

0: Ekki OK
1: OK

Tjékk því verður að vera minna eða jafnt og 2

$$<$$

$N_{Ed} / A < 2 f_{cd}$ EC2 6.2.2 en hér er enginn normalkraftur svo $N_{Ed}=0$ og spennan þar af leiðandi 0

$$\sigma_{\text{cn}} \leq \frac{f_{\text{ctd}}}{\gamma_c} \quad \text{EC (6.3N) [MPa]}$$

$$\delta N \leq \frac{f_{\text{ctd}}}{\gamma_c} \quad \text{EC (6.3N) [MPa]}$$

$$\mu \delta N \leq \delta N \quad \text{Skerþol [N] EC2 6.2.2 cp og k1 styttast út}$$

$$\mu \delta N \leq \frac{f_{\text{ctd}}}{\gamma_c} \quad \text{Minnsta leyfilega skerþol EC2 6.2.2}$$

$$\mu \delta N \leq \mu \delta N \quad \text{0: Ekki OK 1: OK Skerþolið þarf að vera meira en minnsta leyfilega}$$

Athuga hvort sniðið brotnar við skerkraftinn sem tjakkurinn veldur

$$\mu \delta N \leq \mu n \quad \text{0: brotnar ekki 1: brotnar}$$

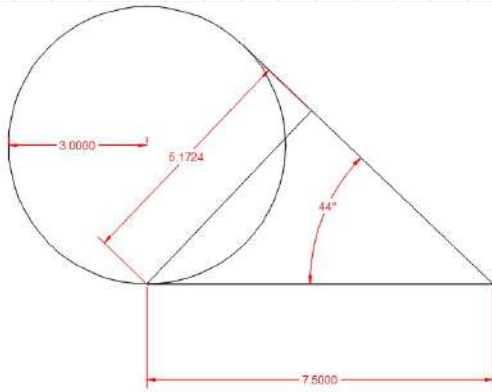
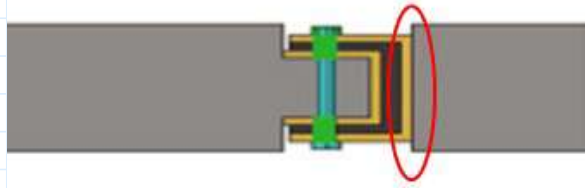
$$\frac{\mu \delta N}{\mu n} \geq \frac{s}{s_{\text{ct}}} \quad \text{Hlutfall kraftsins sem þarf af heildar krafti tjakksins}$$

$$\mu \delta V \leq \delta N n \quad \text{Heildar kraftur sem þarf til þess að brjóta}$$

$$s \geq s_{\text{ct}}$$

Tappinn brotnar í skeri þegar tjakkurinn hefur notað 7.4% af getu sinni eða 4.4 tonn

Útreikningar á suðunni á milli bendistálsins og skúffunnar



ii

Virk suðuþykkt EN1993-1-8 mynd 4.4

ii

iii

Lengd suðunnar

iv

Virk lengd suðunnar
EN1993-1-8 4.5.1 (1)

v

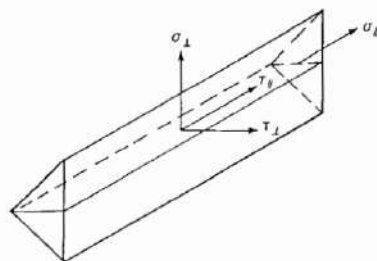
Skerkraftur sem verkar á
suðuna öðru megin

vi

Normalspenna hornrétt á
suðuna

vii

Skerspenna hornrétt á suðu



Það eru engar spennur samsíða suðunni

$$\sqrt{f_c} \geq \frac{1}{\gamma_c} \left(\frac{1}{\gamma_{RE}} \right) \alpha$$

spenna í einni suðu
EN1993-1-8 (4.1)

Þol suðunnar er nægilegt ef eftirfarandi tvö
tjékk eru uppfyllt, skv. EN 1993-1-8 (4.1)

$$\frac{W_{pl,y}}{M_{Ed}} \geq \frac{W_{pl,y}}{M_{Rk}}$$

Tafla 4.1 EN 1993-1-8

$$V_{Ed} \leq \frac{1}{\gamma_c} \left(\frac{1}{\gamma_{RE}} \right) \alpha$$

Skerþol suðunnar

$$W_{pl,y} \leq \frac{M_{Rk}}{\gamma_c}$$

Nota brotstyrk smíðastálsins því
hann er minni en suðuvírsins
(EN3-1-8 4.5.3.2 (7))

$$V_{Ed} \leq$$

0: ekki nægt þol

$$W_{pl,y} \leq$$

1: nægt þol

$$\frac{M_{Ed}}{W_{pl,y}} \leq \frac{f_y}{\gamma_c}$$

Skerkraftur í eina suðu

$$\mu_{\delta} W_{pl,y} \leq V_{Ed}$$

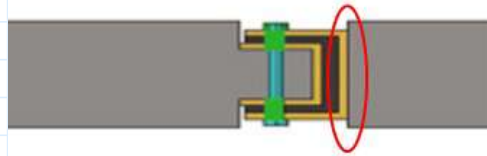
Skerþol suðunnar

$$\mu_{\delta} W_{pl,y} \geq$$

0: Brotnar
1: Brotnar ekki

Tengingin brotnar ekki þegar krafturinn er settur á hana

Skerþol þar sem steypun mætir stálskúffunni



n $>$ $> \geq n_{\text{no}} n_i$ $>$ Flatarmál stálsins sem kemur að skúffunni

$\square$ $\leftarrow$ Stefna bendingar

< 80 $= 7$ $> n < z \alpha$ $\geq i - 0.8$ $= 7^c$ Minnkunarstuðull styrks, EC2 6.2.2(6)

C og eru stuðlar sem ákvarðast eftir grófleika yfirborðs steypunnar, í EC2 6.9(2) eru eftirfarandi stuðlar gefnir upp fyrir mismunandi yfirborð

Yfirborð	c	μ
Very smooth	0.025	0.5
Smooth	0.2	0.6
Rough	0.4	0.7
Indented	0.5	0.9

Járnið er ekki meðhöndlað sérstaklega, það er alveg slétt svo yfirborðið telst "very smooth", þá verður

p < 80 n < 80

$<$ $< 0.6 \cdot f_{cm}$

Sepnna sem verkar á sama tíma og sker, það er enginn normalkraftur í prófinu svo hún verður 0

n V $V \geq$ $> n_{\text{no}} n_c$ $= 7^c$ $>$

Flatarmál samskeytanna

n $\geq$ > 80 n $= 7^c$

Járnahlutfall í sniðinu

Skerþol í sniði EC2(6.25)

$$\delta \quad p \quad 5 \quad 5 \quad 2 \quad 2 \quad 35 \quad 2 \quad 33 \geq s \langle n \delta n o \rangle = \gamma^c \quad z \quad \alpha$$

Skerþol verður að vera minna eða jafnt og:

$$\langle n \quad \geq \langle n \rangle = z \quad \alpha \quad \text{EC2 (6.25)}$$

$$\delta \quad \geq = \quad \begin{array}{l} 1: \text{OK} \\ 0: \text{ekki OK} \end{array}$$

$$\mu \delta \quad - \quad \delta \quad n \geq = \gamma^c \quad \delta \quad \text{Heildar kraftur sem þarf til þess að brjóta}$$

$$\mu n \cdot \mu \delta \quad - \geq = \quad \begin{array}{l} 1: \text{Brotnar} \\ 0: \text{Brotnar ekki} \end{array}$$

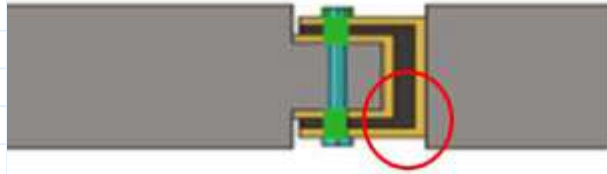
Hve mikið af heildar krafti tjaksins þarf til þess að verði skerbrot:

$$\boxed{\quad} \quad \frac{\mu \delta}{\mu n} \geq \gamma^c.$$

Heildarkraftur sem þarf til þess að brjóta: $\boxed{s} \quad s \geq \gamma^c$

Brotnar í skeri þegar tjakkurinn hefur notað rúmlega 6% af getu sinni eða 3.7 tonn

Skerútreikningar á neðra járninu í ytri skúffunni



$$V_{\geq i n}$$

Vægisarmur stálskúffunnar

$$V_{\geq i}$$

Hæð prófilsins sem athugaður er

$$\geq c <$$

breiddin er það sem hér
hefur verið kallað hæðin

$$z_{\mu n} \geq 0.8 \cdot z_{\alpha} \quad \delta$$

Vægið (Ståbi) deilist með tveimur því
að skúffan er boltuð saman svo járníð
uppi hjálpar því sem er niðri

$$\nu_o \geq 0.8 \cdot c \quad c$$

Mótstöðuvægi (Ståbi)

$$z_{\nu} \geq 0.8 \cdot z_{\alpha} \quad z_{\alpha}$$

Skerspenna í sniðinu (Ståbi)

$$\cdot \geq =$$

Spennan er meiri en brotstyrkurinn
sem stálið hefur svo skúffan brotnar

$$\mu \delta \cdot a \cdot \nu \geq 0.8 \cdot a \cdot \delta \quad \delta$$

Kraftur sem þarf til þess að
brjóta

Hve mikið af heildar krafti tjakksins þarf til þess að verði brot:

$$\boxed{\mu \delta \cdot a} \geq 0.8 \cdot a \cdot \delta$$

Heildarkraftur sem þarf til þess að brjóta: $\boxed{s}$ $s \geq 0.8 \cdot a \cdot \delta$

**Brotnar þegar tjakkurinn hefur notað tæplega 4% af
getu sinni eða 2.3 tonn**

Samantekt á skerþolsútreikningum

$$\mu \delta \quad V \geq \frac{800}{n} \leq \delta \quad \delta$$

Þol steyputappa

$$\mu \delta \quad W \geq \frac{100}{n} \leq \delta \quad \delta$$

Þol suðu milli skúffu og
bendingar

$$\mu \delta \quad _ \geq \frac{100}{n} \leq \delta \quad \delta$$

Þol sniðs á milli skúffu og
steypu

$$\mu \delta \quad a \geq \frac{100}{n} \leq \delta \quad \delta$$

Þol stálskúffu

Útreiknuð gildi sýna að þegar kraftur er settur á bitann ætti fyrst að verða brot í ytri stálskúffunni.

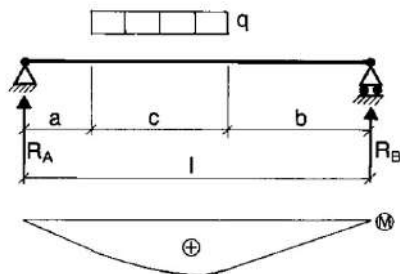
Ef stálskúffan brotnar ekki væri steyputappinn og samskeytin
milli skúffu og steypu næst til að brotna, en þau reiknast mjög
svipuð í skerþoli

Ákvarðandi skerþol bitans (báðar tengingar) er því

$$\mu \delta \quad \mu \delta \quad _ \geq \frac{100}{n} \leq \delta \quad \delta$$

Bitinn þarf að hafa nóg vægipól svo að það sé öruggt að skerbrot verði í tengingunni áður en vægibrot verður þegar tilraunin er gerð

Reikna því vægið sem verður í tengingunni þegar krafturinn sem veldur skeri er sett á bitann



☐ $s \ll$

Lengd milli undirstaða

☒ $c \ll$

Lengd álagsdreifingar

☐ $\frac{7}{8} V \geq \frac{1}{2} M$

Lengd að álagi, sama frá báðum hliðum

☐ $\geq \frac{1}{2} M$

☐ $\mu \delta \geq \frac{1}{2} M$ δ

$z \quad z \quad \frac{V}{2} \quad \frac{V}{2} \quad \frac{V}{2} \quad \frac{V}{2} \geq \frac{1}{2} M \quad \delta$

Vægi þegar skerbrot verður (Ståbi bls. 60) Einfalt studdur biti með kraftadreifingu á hluta

☐ $\leq c$
☐ $> c$

Járnabending

☐ o

sama þvermál á bendingunni og í U-lykkjunum

☐ c

Fjöldi járna í einni röð í þversniði bitans

☒ $n \geq \frac{1}{8} \frac{M}{f_y A_s}$

Járnaflatarmál neðri brún

☒ $B n \geq \frac{1}{8} \frac{M}{f_y A_s}$

Járnaflatarmál efribrún er það sama og í neðri

☐ $\frac{7}{8} \frac{M}{f_y A_s} \geq \frac{1}{8} \frac{M}{f_y A_s}$

Nothæð járna í neðri brún

☒ $B \frac{7}{8} \geq \frac{1}{8} \frac{M}{f_y A_s}$

Nothæð járna í efri brún

Efniseiginleikar

$$r \ll t \alpha$$

Fjaðurstuðull bendistáls, EC2

$$r \geq 8 \cdot i = 7^c$$

Meðalgildi streitu stálsins EC3(3.2.2)

Reikna fyrst vægipolið og lít framhjá járnunum í efri brún

-ÚTREIKNINGAR Á BROTTSTIGI - HREIN BEYGJA eftir Torfa G. Sigurðsson

$$\leq$$

Virk hæð spennudreifingar: 0.8 fyrir $f_{ck} < 50 \text{ MPa}$ (EC2 3.1.7(3.19))

$$=$$

Virkur styrkur steypunnar: 1 fyrir $f_{ck} < 50 \text{ MPa}$ skv. EC2 3.1.7(3.21)

$$n \geq 0.8 n_0$$

Staðstening hlutlaus ássins frá efri brún (T.G.S)

Þar sem hlutlaus ássinn er ofan við efri járnin verður ekki þrýstingur.

Reikna því ekki streituna í efri járnunum því hún verður svo lítil.

Klára útreikningana alveg án þeirra.

$$s \geq i s \Rightarrow =^c \delta$$

Lokakraftur spennudreifingar steinsteypu (T.G.S)

$$7 \cdot 81 \geq = 1 \cdot 81 s^o = 7^c$$

Innri vægisarmur þversniðsins (T.G.S)

$$z \delta \cdot s \geq n s \Rightarrow =^o \delta$$

Vægipól þversniðsins (T.G.S)

Niðurstaða

Athuga vægipól móti mestu vægiáraun

$$z \delta \cdot z z \geq =$$

1: Vægipól er nægilegt

0: Vægibrot verður á undan skerbroti

$$\frac{z \delta}{z z} \geq = 8 \diamond$$

C Kóði fyrir gröf

```
1 % Ester María Eiríksdóttir
2 %-----
3 clear, close all, clc % Hreinsa og loka
4
5 %-----
6
7 u_skra='ulykkju.txt'; % Tek inn skrána fyrir ulykkju
8 u_gogn=readmatrix(u_skra); % Les gögnin úr skránni
9 u_gogn2=u_gogn(1:4740, : ); % Gögnin sem skipta máli
10
11 u_faersla1=u_gogn(:,1); % Fyrsti dálkurinn sýnir færsluna
12 u_faersla=u_faersla1-min(u_faersla1); % Færslan byrjar í 0
13 u_faersla2x=u_gogn2(:,1); % Færslan þangað til eftir að bitinn brotnar
14 u_faersla2=u_gogn2(:,1)-min(u_faersla2x); % Færslan byrjar í 0
15
16 u_kraftur=u_gogn(:,2); % Annar dálkur kraftinn
17 u_kraftur2=u_gogn2(:,2); % Krafturinn þangað til eftir að bitinn brotnar
18
19 u_timi=u_gogn(:,3); % Þriðji tímann
20
21 s_skra='skuffu.txt'; % Tek inn skrána fyrir skúffu
22 s_gogn1=readmatrix(s_skra); % Les gögnin úr skránni
23 s_gogn = s_gogn1(640:end, :); % Tek bara gögnin eftir að kraftur var settur á
24 s_gogn2 = s_gogn1(640:3726, :); % Tek út gögnin eftir að bitinn brotnaði
25
26
27 s_faersla1=s_gogn(:,1); % Fyrsti dálkurinn sýnir færsluna
28 s_faersla=s_faersla1-min(s_faersla1); % Færslan byrjar í 0
```

```

29 s_faersla2x=s_gogn2(:,1);           % Færslan þangað til eftir að
    bitinn brotnar
30 s_faersla2=s_gogn2(:,1)-min(s_faersla2x); % Færslan byrjar í 0
31
32 s_kraftur=s_gogn(:,2);               % Annar dálkur kraftinn
33 s_kraftur2=s_gogn2(:,2);            % Krafturinn þangað til eftir
    að bitinn brotnar
34
35 s_timi=s_gogn(:,3);                  % þriðji tímann
36
37 u_kraftur_N=u_kraftur2*1000;         % Krafturinn í Newton
38 s_kraftur_N=s_kraftur2*1000;         % Krafturinn í Newton
39
40 skersp_u=(u_kraftur_N/2)/(230*130); %Meðalskerspenna f/(h*b)
    u-lykkju
41 hornsnum_u=u_faersla2/146;          %Skerstreita færsla/lengd
    u-lykkju
42 skersp_s=(s_kraftur_N/2)/(230*86);  %Meðalskerspenna f/(h*b)
    skúffu
43 hornsnum_s=s_faersla2/95;           %Skerstreita færsla/lengd
    skúffu
44
45 %-----
46 % Kraftur - tími
47 %-----
48
49 figure;                             % Myndaumhverfi
50
51 subplot(2,1,1)                       % Gerir tvær myndir, þessi er nr
    .1
52 plot(u_timi, u_kraftur,'b-');        % Teikna tíma og kraft
53                                     % með blárri óbrotinni línu
54 title('U-lykkjutenging');           % Titill á grafið
55 xlabel('Tími [s]', 'FontSize',12);   % Merki x ás
56 ylabel('Kraftur [kN]', 'FontSize',12); % Merki y ás
57 grid on;                             % Rúðustrikað

```

```

58 axis([min(u_timi)*0.9 max(u_timi)+1 min(u_kraftur)*0.9 max(
    u_kraftur)*1.1]);
59 % Stilli ásana svoleiðis að allt sjáist vel
60
61 subplot(2,1,2); % Vel seinni myndina, nr.2
62 plot(s_timi, s_kraftur,'r-'); % Teikna tíma og kraft
63 % með blárri óbrotinni línu
64 title('Skúffutenging'); % Titill á grafið
65 xlabel('Tími [s]', 'FontSize',12); % Merki x ás
66 ylabel('Kraftur [kN]', 'FontSize',12); % Merki y ás
67 grid on; % Rúðustrikað
68 axis([min(u_timi)*0.9 max(u_timi)+1 min(u_kraftur)*0.9 max(
    u_kraftur)*1.1]);
69 % Stilli ásana þannig að þeir séu í sama skala og á efri
    myndinni
70
71
72
73 %-----
74 % Kraftur - færsla
75 %-----
76
77 figure; % Myndaumhverfi
78
79 plot(u_faersla, u_kraftur,'b-', 'LineWidth',1);
80 % Teiknar upp færslu á móti krafti
81
82 xlabel('Færsla [mm]', 'FontSize',12); % Merki x ás
83 ylabel('Kraftur [kN]', 'FontSize',12); % Merki y ás
84 grid on; % Rúðustrikað
85 %axis([min(u_faersla) max(u_faersla)+0.5 min(u_kraftur)*0.9
    max(u_kraftur)*1.1]);
86 % Stilli ásana svoleiðis að allt sjáist vel
87
88 figure;
89 plot(s_faersla, s_kraftur,'r-', 'LineWidth',1);
90 % Teiknar upp færslu á móti krafti

```

```

91
92 xlabel('Færsla [mm]', 'FontSize',12);           % Merki x ás
93 ylabel('Kraftur [kN]', 'FontSize',12);           % Merki y ás
94 grid on;                                         % rúðustrikað
95
96 axis([min(s_faersla) max(s_faersla)+0.5 min(s_kraftur)*0.9 max
      (u_kraftur)*1.1]);
97 % Stilli ásana svoleiðis að allt sjáist vel
98
99 figure;                                         % Myndaumhverfi
100 hold on
101 plot(u_faersla2, u_kraftur2/2,'b-', 'LineWidth',1);
102 % Teiknar upp færslu á móti krafti
103
104 plot(s_faersla2, s_kraftur2/2,'r-', 'LineWidth',1);
105 % Teiknar upp færslu á móti krafti
106
107 xlabel('Færsla [mm]', 'FontSize',12);           % Merki x ás
108 ylabel('Kraftur [kN]', 'FontSize',12);           % Merki y ás
109 grid on;                                         % rúðustrikað
110 axis([min(s_faersla) max(s_faersla)+0.5 min(s_kraftur)*0.9 max
      (u_kraftur/2)*1.1]);
111 % Stilli ásana svoleiðis að allt sjáist vel
112 legend({'U-lykkju', 'Skúffu'}, 'FontSize', 12, 'Location', '
      best');
113 hold off
114
115
116 %-----
117 % Orkulosun
118 %-----
119 u_faersla_m=u_faersla2/1000; % Hef færsluna í metrum til þess
      að
120 s_faersla_m=s_faersla2/1000; % ... orkan verði í Joule
121
122 % Flatarmálið undir ferli kraftur-færsla gefur heildarorkuna
      fyrir hvort próf

```

```

123 orka_u=trapz(u_faersla_m,u_kraftur_N/2);    %trapz notar trapí
      suaðferð við heildun
124 orka_s=trapz(s_faersla_m,s_kraftur_N/2);
125
126 orkulosun_u=cumtrapz(u_faersla_m,u_kraftur_N/2); %uppsöfnuð(
      cumulative) orkulosun
127 orkulosun_s=cumtrapz(s_faersla_m,s_kraftur_N/2);
128
129
130 figure;
131 plot(u_faersla2, orkulosun_u, 'b-', 'LineWidth', 1.5); hold on
      ;
132 plot(s_faersla2, orkulosun_s, 'r-', 'LineWidth', 1.5);
133 xlabel('Færsla [mm]', 'FontSize', 12);
134 ylabel('Uppsöfnuð orkulosun [J]', 'FontSize', 12);
135 legend({'U-lykkju', 'Skúffu'}, 'FontSize', 12, 'Location', '
      best');
136 grid on;
137 ylim([0, max([max(orkulosun_u), max(orkulosun_s)]) * 1.1]);
138
139 %-----
140 % Skerstreita - skerspenna
141 %-----
142
143
144 figure;                                % Myndaumhverfi
145 hold on
146 plot(hornsnun_u, skersp_u,'b-', 'LineWidth',1);
147 % Teiknar upp skerstreitu á móti skerspennu
148
149 plot(hornsnun_s, skersp_s,'r-', 'LineWidth',1);
150 % Teiknar upp færslu á móti krafti
151
152 xlabel('Skerstreita [rad]', 'FontSize',12);                                % Merki x
      ás
153 ylabel('Skerspenna [MPa]', 'FontSize',12);                                % Merki y á
      s

```

```

154 grid on; % rúðustrikað
155 %axis([min(s_faersla) max(s_faersla)+0.5 min(s_kraftur)*0.9
    max(s_kraftur)*1.1]);
156 % Stilli ásana svo leiðis að allt sjáist vel
157 legend({'U-lykkju', 'Skúffu'}, 'FontSize', 12, 'Location', '
    best');
158 hold off
159
160 %-----
161 % Streituorkupéttleiki
162 %-----
163
164 %Heildi fyrir flatarmál undir skerspenna-skerstreita grafinu
165 % Flatarmálið undir ferlinum gefur heildarorkuna fyrir hvort
    próf
166 orka_u=trapz(hornsnun_u, skersp_u); %trapz notar trapísuaðfer
    ð við heildun
167 orka_s=trapz(hornsnun_s, skersp_s);
168
169
170 orkulosun_u=cumtrapz(hornsnun_u, skersp_u); %uppsafnaður(
    cumulative)orkupéttleiki
171 orkulosun_s=cumtrapz(hornsnun_s, skersp_s);
172
173 figure;
174 plot(hornsnun_u, orkulosun_u, 'b-', 'LineWidth', 1.5); hold on
    ;
175 plot(hornsnun_s, orkulosun_s, 'r-', 'LineWidth', 1.5);
176 xlabel('Skerstreita [rad]', 'FontSize', 12);
177 ylabel('Streituorkupéttleiki [J/m3]', 'FontSize', 12);
178 legend({'U-lykkju', 'Skúffu'}, 'FontSize', 12, 'Location', '
    best');
179 grid on;
180 ylim([0, max([max(orkulosun_u), max(orkulosun_s)]) * 1.1]);
181
182 %-----
183 % Diffra skerspenna-skerstreita grafið til þess að fá

```

```

184 % skúfstuðul, G
185 %-----
186
187
188 % Margliðunálgun fyrir spennu- streitu graf til þess að
189 % "slétta úr" gögnunum
190
191 marglnalgun_u = polyfit(hornsnun_u, skersp_u, 7); % 7. stigs
    margliðu nálgun
192 diff_u = polyder(marglnalgun_u); % diffra ná
    lgaða ferilinn
193
194 marglnalgun_s = polyfit(hornsnun_s, skersp_s, 5); % 5. stigs
    margliðu nálgun
195 diff_s = polyder(marglnalgun_s); % Diffra ná
    lgaða ferilinn
196
197 G_u = polyval(diff_u, hornsnun_u); % Dreifir niðurstöðum
    diffrunar á y-ás á móti x-ás
198 G_s = polyval(diff_s, hornsnun_s);
199
200 % Teikna skúfstuðul og Skerstreitu
201 figure;
202 plot(hornsnun_u, G_u, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
203 hold on;
204 plot(hornsnun_s, G_s, 'r-', 'LineWidth', 1.5);
205 xlabel('Skerstreita [rad]', 'FontSize', 12);
206 ylabel('Skúfstuðull (G) [MPa]', 'FontSize', 12);
207 legend({'U-lykkju', 'Skúffu'}, 'FontSize', 12, 'Location', '
    best');
208 grid on;
209 hold off;

```

D Tækniblöð

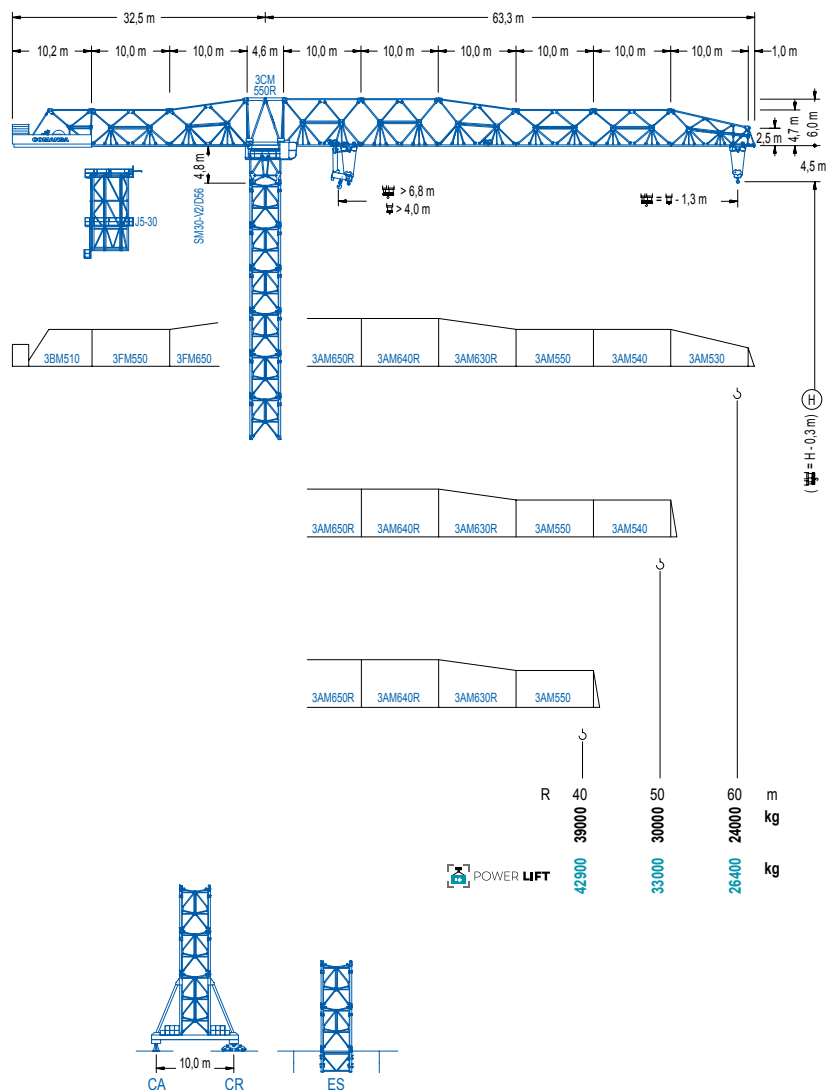
Tækniblað turnkrana af gerðinni Comansa 3000 Series, 30 LC 1450 af heimasíðu DS lausna [1]



3000 Series

30 LC 1450

90 t



CE EN 14439 (C/25)

3220-10248

11/16

30 LC 1450/90 t

DIAGRAMA DE CARGAS

Load chart / Diagramme de charges / Lastdiagramm / Diagramma di carico / Диаграмма распределения нагрузки

R (m)																				
60	18,0 90000	20 79140	22 70330	25 59970	28 52000	30 47630	31,6 45000	35,3 45000	38 41350	40 38950	42 36780	45 33910	48 31410	50 29920	52 28550	55 26680	58 25020	60 24000	m kg	
50	18,0 90000	20 78910	22 70120	25 59790	28 51840	30 47480	31,3 45000	35,4 45000	38 41460	40 39050	42 36880	45 34000	48 31500	50,0 m 30000 kg						
40	17,8 90000	20 78090	22 69380	25 59150	28 51270	30 46960	31,0 45000	35,4 45000	38 41410	40,0 m 39000 kg										

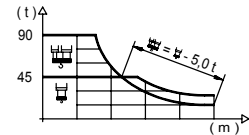
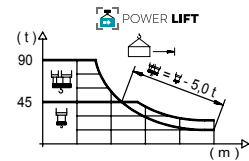


DIAGRAMA DE CARGAS POWERLIFT

Load chart PowerLift / Diagramme de charges PowerLift / Lastdiagramm PowerLift / Diagramma di carico PowerLift / Диаграмма распределения нагрузки PowerLift

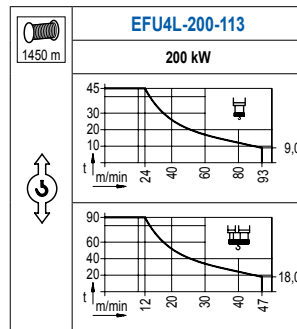
R (m)																				
60	19,4 90000	22 77080	25 65850	28 57200	30 52460	32 48350	33,9 45000	38,2 45000	40 42610	42 40260	45 37140	48 34440	50 32820	52 31330	55 29310	58 27500	60,0 26400	m kg		
50	19,4 90000	22 77060	25 65830	28 57190	30 52450	32 48340	33,9 45000	38,3 45000	40 42840	42 40480	45 37350	48 34630	50,0 33000					m kg		
40	19,3 90000	22 76470	25 65320	28 56730	30 52020	32 47950	33,6 45000	38,4 45000	40,0 42900		m kg									



3000 Series

MECANISMOS

Mechanisms / Mécanismes / Antriebe / Meccanismi / Механизмы



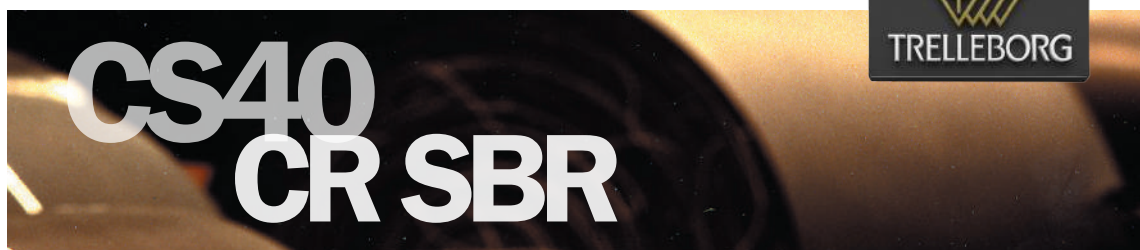
3220-10248

11/16

30 LC 1450/90 t

Tækniblað gúmmíþéttingar af gerðinni CS40(1079) frá framleiðandandum Trelleborg, selt af Poulsen.

TRELLEBORG FLUID HANDLING SOLUTIONS



16/07/2014



CHLOROPRENE 70 SHEETING: FOR TECHNICAL APPLICATIONS

FEATURES

70 Shore A chloroprene.

ADVANTAGES

- Flexible
- Good low temperature resistance
- Good dry high temperature resistance
- Matte finish to guarantee a good surface finished quality, to secure an easy unrolling, and to facilitate adhesive bonding processes

BENEFITS

- Safety
- Economy

APPLICATIONS

Gaskets or washers cutting and manufacturing of pieces for general purpose applications in contact with:

- water, sea water
- oils and grease
- mineral oils (maximum temperature + 100 °C)

Non suitable for oxygenated and halogen solvents, aromatic hydrocarbon, mineral and organic acids, washed water.

www.trelleborg.com/elastomerlaminates

MECHANICAL, PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Measured characteristics		Standard	Value
MECHANICAL			
Rubber compound - black			CR SBR
Density			1.45 ± 0.05 g/cm ³
Hardness		ASTM D2240	70 ± 5 Shore A
Tensile strength		ISO 37	≥ 6 MPa
Elongation at break		ISO 37	≥ 300 %
Compression set after 24 h at 70 °C		ISO 815-1	≤ 35 %
TEMPERATURE			
Working temperature			- 20/+ 100 °C
AGEING			
Δ Hardness after 70 h at 70 °C		ASTM D573	≤ 5 Shore A
Δ Tensile strenght after 70 h at 70 °C		ASTM D573	≤ - 5 %
Δ Elongation at break after 70 h at 70 °C		ASTM D573	≤ - 15 %
OIL RESISTANCE			
Oil IRM 901, Δ volume after 72 h at 70 °C		ASTM D471	≤ 20 %
CHEMICAL RESISTANCE			
Diluted acids and bases	Concentrated acids and bases	Ozone	Oils and hydrocarbons
Medium	Non suitable	Medium	Medium

DIMENSIONS

Thickness (mm)	Width (mm)	Length (m)	Weight (kg/m ²)	Sides finish	Option (ply)
1 ± 0.3	1400 ± 2 %	20 ± 2 %	1.45	2 sides matt	
1.5 ± 0.3	1400 ± 2 %	15 ± 2 %	2.18	2 sides matt	
2 ± 0.3	1400 ± 2 %	15 ± 2 %	2.90	2 sides matt	1P
3 ± 0.3	1400 ± 2 %	10 ± 2 %	4.35	2 sides matt	1P 2P
4 ± 0.4	1400 ± 2 %	10 ± 2 %	5.80	2 sides matt	2P
5 ± 0.4	1400 ± 2 %	10 ± 2 %	7.25	1 side smooth/1 side matt	2P
6 ± 0.5	1400 ± 2 %	10 ± 2 %	8.70	1 side smooth/1 side matt	
8 ± 0.7	1400 ± 2 %	5 ± 2 %	11.60	1 side smooth/1 side matt	
10 ± 1.0	1400 ± 2 %	5 ± 2 %	14.50	1 side smooth/1 side matt	
12 ± 1.0	1400 ± 2 %	5 ± 2 %	17.40	1 side smooth/1 side matt	
15 ± 1.0	1400 ± 2 %	5 ± 2 %	21.75	1 side smooth/1 side matt	
20 ± 1.4	1400 ± 2 %	5 ± 2 %	29.00	1 side smooth/1 side matt	

IDENTIFICATION

Branding	Without.
Packaging	Thickness ≤ 6 mm rolled on cardboard tube Ø 80 mm. Thickness > 6 mm in roll.
Wrapping	Black polyethylene film.
Labelling	Self-adhesive label indicating product name, dimensions, area in m ² , nominal weight, and product code to allow product traceability.

E Veggspjald

Rannsóknaráðstefna Vegagerðarinnar var haldin þann 1. nóvember 2024 á Hilton Nordica á Suðurlandsbraut. Þar var veggspjaldakynning á nokkrum verkefnum og var þetta verkefni eitt þeirra, á næstu síðu er veggspjaldið frá ráðstefnunni.

Skoðun á lóðréttum tengingum milli forsteypta stöpunleininga



Ester María Eiríksdóttir, Tæknifræðideild, Háskólinn í Reykjavík

Leiðbeinendur: Jóhann Albert Harðarson, Helgi S. Ólafsson og dr. Ólafur Sveinn Haraldsson

Innblástur og markmið

Rannsóknin er hluti af verkefninu „Þróun nýrrar tengingar milli forsteypts stöpunveggjar og staðsteypts sökkuls“ sem fór af stað í kjölfar hönnunar á forsteyptum stöplum undir brú yfir Jökulsá á Dal við Hákonarstaði.

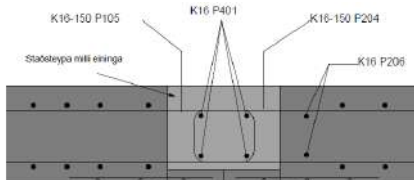


Mynd 1. Frá framkvæmdinni yfir Jökulsá á Dal

Markmið verkefnisins: Þróa einfalda tengingu milli forsteypta veggeininga til að lágmarka framkvæmdartíma á verkstaðnum. Vegagerðin notar núna U-lykkju tengingu en markmiðið er að nýja tengingin geti nýst í öðrum verkefnum Vegagerðarinnar og þá sérstaklega í brúarverkefnum utan höfuðborgarsvæðisins. Smíðuð voru tvö prófstykki í 37,5% skala.

U-lykkju tenging

- Samsteyputenging
- U-lykkjur standa út úr einingunum og skarast
- Lóðréttum steypustyrktarjárnnum stungið á milli og steipt í.



Mynd 2. U-lykkju tenging



Mynd 3. Smíði á U-lykkju tengingu í 37,5% skala

- Vandasamt að láta allt passa saman
- Óhentugar í flutningi
- Steypa á verkstað
- Tímafrek

Lóðréttar tengingar

Samsteyputengingar:

Steypt á milli eininga á verkstað.

- Viðurkennd aðferð en getur verið seinleg í uppsetningu
- Kraftar flytjast vel á milli
- Endingagóðar
- Erfitt að tryggja gæði
- Kostnaðarsöm framkvæmd

Þurrar tengingar:

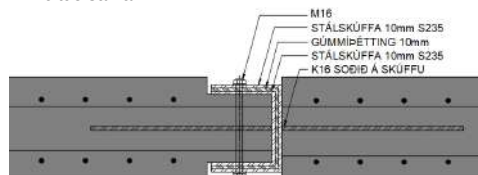
Engin steypuvinna á verkstað.

Ýmist boltaðar eða soðnar saman.

- Aðgengilegra gæðaeftirlit
- Fljótleg uppsetning
- Ódýrari framkvæmd

Ný tenging

- Þurr tenging
- Tappi og nót með stálskúffum á endum eininganna
- Gúmmipétting á milli stálskúffa
- Boltuð saman



Mynd 4. Ný tenging



Mynd 5. Smíði á nýju tengingunni í 37,5% skala

- Þægilegt að stilla af
- Hentugri í flutningi
- Engin steypa utan verksmiðju
- Tímasparandi

Næstu skref

- Fá niðurstöður úr prófunum á U-lykkjutengingu á móti nýju tengingunni
- Stefnt er á að meta
 - Skerþol nýju tengingarinnar
 - Tímasparnað
 - Mun á kostnaði



Mynd 6. Prófstykkin steipt