

Slitpolin hástyrkleikasteypa 50 mm lag á brýr – þróun og blöndun

Skýrsla júní 2021



Dr. Ólafur H. Wallevik
Helgi S. Ólafsson
Dr. Gísli Guðmundsson
Kjartan B. Kristjánsson
Gylfi Sigurðsson
Björn Hjartarson
Ragnar Sigurðsson



Nýsköpunarmiðstöð
Íslands

 Vegagerðin



Formáli

Í þessari skýrslu er gerð grein fyrir rannsóknum á sérstöku steypu slitlagi á nýjar steypar brýr. Upplýsingar birtar um efniseiginleika nokkurra steypugerða sem hafa verið notaðar í þessum tilgangi og reynst vel. Einnig eru skoðaðar samsetningar einstakra steypublandna. Í lokaorðum skýrslunnar eru dregnar saman helstu ályktanir af rannsóknunum.

Að svo miklu leyti sem reynsla er fengin af þessari aðferð, á eina eldri brú og þrjár nýjar brýr er hún í aðalatriðum mjög góð. Engin stórvægileg vandamál hafa komið upp í framkvæmdum hingað til. Steypan nær mjög fljótt nægilegum styrk til að hægt sé að hleypa umferð á. Flögnun í frostþolsprófunum er sérlega lítil, rýrnun þessarar steypugerðar er sömuleiðis mjög lítil og þess vegna er verulega minni hættu á sprungum. Niðurstöður rannsókna sýna að slitlagssteypa er afar álitlegur kostur á nýjar brýr og einnig sem viðhaldsaðferð á eldri steypar brýr.

Verkefninu er skipt upp í þrjá hluta:

- 1. Þróun á hástyrkleikasteypublöndum*
- 2. Steypublöndur frá rannsóknarstofu yfir í steypubíl*
- 3. Hástyrkleikasteypur á forsteypa platta*

Til yfirlits og upplýsinga er í viðauka rakið hvar sérstök steyp slitlög hafa verið lögð á yfirborð brúa í upphafi, sem og sérstök slitlög á nýjar brýr frá 2020, hvar slitþolin sérlega sterk steypa hefur verið notuð til viðhalds á slitnu brúaryfirborði og að lokum nokkur áhersluatriði, sjá Viðauka 1, slitlagssteypur á brýr og áhersluatriði.

*Helgi S. Ólafsson
Verkefnastjóri*



Nýsköpunarmiðstöð Íslands

Rannsóknarstofa byggingariðnaðarins

Júní 2021

Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar styrkti rannsóknarverkefnið: Slitþolin hástyrkleikasteypa, 50 mm lag á brýr – þróun og blöndun.

Höfundar greinargerðarinnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirrar stofnunar sem höfundar starfa hjá.



Efnisyfirlit

Inngangur	1
Bakgrunnur og forsaga.....	2
Tilgangur og markmið.....	3
50 mm loftlaus mjög sterk slitlagssteypa á brýr.....	4
Frostheld steypa án loftíblöndunar.....	4
Sjálfpakkandi steypa án þess að vera sjálfútleggjandi.....	4
Seigjustýrð steypuframleiðsla.....	5
1. hluti – Þróun á hástyrkleikasteypublöndum	6
2. hluti - Steypublöndur frá rannsóknarstofu yfir í steypubíl	12
Brúarsteypa við Steinavötn 16. og 17. okt 2020.....	12
Slitlagssteypa á Hattardalsárbrú 23. okt. 2020.....	18
3. hluti - Hástyrkleikaásteypur á forsteyppta platta	21
Prófanir á harðnaðri steypu.....	23
Klóríðleiðni.....	24
Prófanir á viðloðun milli ásteypu og undirlags.....	26
Rakamælingar í ásteypu.....	29
Hitamyndun í ásteypu.....	30
Lokaorð - Ályktun	31
Viðauki 1 - Slitlagssteypur á brýr	33
<i>Slitlag á nýjar brýr:</i>	33
<i>Slitlag vegna viðhalds:</i>	34
<i>Útlögn á steypu slitlagi:</i>	36
<i>Nokkur atriði sem þarf að hafa í huga við útlögn slitlaga í framtíðinni</i>	36



Inngangur

Steyptar brýr hafa verið lang algengasta tegund brúa í íslenska vegakerfinu. Hingað til hefur ekki tíðkast að leggja sérstakt slitlag á slíkar brýr sem eru utan þéttbýlis, heldur hefur verið ekið á brúargólfinu sem jafnframt var hluti af burðarvirki brúarinnar. Þegar negldir hjólbarðar urðu algengir á Íslandi fyrir um hálfri öld jókst hjólfaramyndun verulega í brúargólfum fjölfarinna brúa undan nagladekkjum, einnig vegna verulegrar umferðaraukningar sem og aukning á þungaflutningum, þannig að viðgerðir voru framundan.

Yfirborð Borgarfjarðarbrúar var mjög slitið og nauðsynlegt að ráðast í viðgerð í áföngum. Þá var um 90 mm þykkt af brúargólfinu fjarlægt með þjarka (robot) sem keyrir yfir brúna með háþrýsti vatnsbroti og nýtt slitlag af sömu þykkt með sérhannaðri loftlausri hástyrkleikasteypu lagt í staðinn. Sem endist að jafnaði mun lengur en hefðbundin steypa. Ef þörf krefur er hægt að endurtaka leikinn meðan ástand brúarinnar að öðru leyti leyfir. Sama aðferð var notuð á fleiri gamlar brýr.

Fyrir lá að gera þyrfti við fleiri eldri brýr og hugsanlega með þynnra slitlagi eða 40 – 50 mm þykku, sem eftir aðstæðum kæmi einnig til álita að nota á nýjar brýr. Þegar það er gert er það ekki hluti af burðarvirkinu. 2017 var hafist handa við að þróa slíkt lag, sem fyrst var notað með sérstakri útfærslu (mjög hraðri styrkmyndun) á Ölfusárbrú á Selfossi. Slík ofursterk steypa um 50 mm að þykkt hefur síðan verið notuð á þrjár nýjar brýr.

Þessi aðferð hefur marga kosti. Í fyrsta lagi er hægt að gera slitlagið, þ.e. brúargólfið úr steypu sem er sérstaklega hönnuð til að lengja endingu þess (frostheld, loftlaus, ofursterk steypa). Í öðru lagi er sérstakt slitlag ekki hluti burðarvirkisins og má því fjarlægja og endurgera. Í þriðja lagi er sérhannað slitlag af ýmsum ástæðum líklegt til að þola slit frá negldum hjólbörðum mun lengur en hefðbundin burðarvirkissteypa.

Gallarnir eru fáir og þeir helstir að steypa til þessara nota getur orðið dýr ef flytja þarf fylliefni í hana um langan veg. Ennfremur er mjög strangt gæðaeftirlit nauðsynlegt til að framkvæmdin heppnist fullkomlega. Þegar á heildina er litið eru gallarnir þó hverfandi í samanburði við kostina.



Bakgrunnur og forsaga

Yfirborð burðarsteypu brúa úti á landi hefur gjarnan verið notað sem slitlag, þ.e. sérstakt slitlag hástyrkleikasteypa eða malbik, hefur ekki verið lagt ofan á burðarvirkið. Brúargólfið er steyppt á hefðbundinn hátt en síðan er farið yfir það með titursleða sem bæði titrar og jafnar steypuna, það er svo sléttað enn frekar með glattbretti og að lokum kústað. Árangurinn er misjafn, sem merkja má þegar ekið er yfir brýr með þessum yfirborðsfrágangi. Ökumaður sem ekur veg með skiltuðum hraða 90 km/klst reiknar eðlilega með því að hann geti haldið óbreyttum hraða yfir brýrnar, en þá má sléttleiki brúargólfsins ekki vera lakari en sléttleiki vegarins að brúnni. Einnig er mikilvægt að hafa í huga að varmarýmd brúarþversniðsins er að jafnaði mun minni en varmarýmd vegarins, en afleiðing þess er að ísing myndast mun fyrr á brúargólfinu en á veginum beggja vegna við brúna. Af öryggisástæðum þarf sléttleiki brúargólfsins þess vegna að vera a.m.k. jafngóður og sléttleiki vegarins.

Ein hugsanlegra lausna á þessu er að steypa sjálft burðarvirkið fyrst og steypa síðan slitlagið sem tiltölulega þunnt lag, 50 mm þykkt, ofan á það. Með þessu móti verður öll vinnuaðstaða mun betri og aðstæður skapast til þess að hafa stjórn á sléttleikanum og sömuleiðis er hægt að hanna þetta lag með sérstöku tilliti til slitþols (úr slitsterkum fylliefnum), sem er ekki mögulegt sé slitlagið steyppt sem hluti af burðarvirkinu. Þegar kemur að viðhaldi er lagið fjarlæggt án nokkurra áhrifa á undirliggjandi burðarvirki og endurgert.

Ef slitlagið er hluti af burðarvirki brúarinnar verður það ekki gert (endurnýjað) án einhverra áhrifa á burðarvirkið.

Þetta rannsóknarverkefni gengur út á áframhaldandi þróun steypugerða í efsta lagið, þ.e. sjálfstætt slitlag, sem jafnframt er ein tegund af slitsterkum steypum, en hönnun þeirra er þróunarverkefni, sem Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar hefur áður styrkt; [Yfirborð brúa 2017](#), [Steyppt 40–50 mm slitlag á brýr 2017](#) og [Steyppt slitlög á brýr 2017](#).

Þessi rannsókn sem hér er gerð grein fyrir var unnin í tengslum við gerð steyptra slitlaga á annars vegar Steinavatnabrá á Suðausturlandi og hins vegar Hattardalsárbrú á Vestfjörðum. Báðar þessar brýr voru í byggingu þegar slitlagið var lagt út, þ.e. slitlagssteypa var lögð á hrjúft yfirborð burðarsteypu eftir uppþennu. Þar sem um nýjar brýr var að ræða, kallaði það á annað verklag en hefur tíðkast hingað til þar sem ekki var hægt að keyra steypubíla út á brýrnar við niðurlögn (þetta hefur í för með sér að niðurlögn tekur lengri tíma og þá reynir mjög á þjálfnistöðugleika steypunnar (þjálfnistap verði sem minnst). Steypa var flutt frá steypubílum á nýju brýrnar með síló.



Tilgangur og markmið

Tilgangur sérstaks slitlagsá brýr, hvort sem það er hástyrkleikasteyppt eða malbikað (með rakavörn) er meðal annars:

- Vörn fyrir undirliggjandi burðarsteypu, kapla og járnþvingu með tilliti til vatns og salts.
- Lokar sprungum sem hugsanlega myndast í burðarsteypu t.d. vegna hitamyndunar.
- Lokar öðrum mögulegum veikleikum undirliggjandi burðarsteypu t.d. vegna ófullnægjandi titrunar eða smávægilegra mistaka við blöndun steypunnar.
- Vinnuaðstaða við frágang sérstaks slitlags er mjög góð og á að geta tryggt slétt yfirborð í samræmi við kröfur.
- Þegar að viðhaldi kemur er sérstaka slitlagið fjarlæggt (fræst) án áhrifa á undirliggjandi burðarvirki.
- Sérstakt slitpólið steinefni og hástyrkleikasteypa leiðir til mun lengri endingar án þess að slitrásir verði of djúpar (stefnt er að rannsókn) og lægri kostnaðar.

Óslétt yfirborð skapar hættu við ákveðnar aðstæður, sérstaklega fyrir þá sem ekki þekkja til og verri aksturseginnleika. Í massamiklum steypum er oft vegna ófullnægjandi vinnuaðstöðu erfitt að ná sléttu yfirborði og í samræmi við kröfur, en einnig er hættu á sprungumyndun í massamiklum steypum vegna hitamyndunar við hvörfun steypunnar. Auk þess er möguleiki á smávægilegum mistökum við blöndun steypunnar eða titrun hennar, sem leiða til minni þéttleika hennar en annars væri.

Steypt slitlag á Íslandi hefur verið í þróun í nokkur ár og gefið góða raun, endist einnig mun lengur en malbiksslitlag (sem dæmi má nefna steyppt slitlag í Kollafirði sem er að verða 50 ára).

Á Íslandi er víða erfitt að nálgast malbik úti á landi og þegar eiginleiki eins og löng ending er höfð í huga er steyppt slitlag álitlegur kostur.

Kostnaður við steyppt slitlag á brú á Steinavötnum 100 m á lengd og breidd 10 m (breidd akbrauta 9 m), sem steyppt var á síðasta ári, var rúmlega 12 milljónir, sem er mjög lítið miðað við heildarkostnað verksins sem var rúmlega 550 milljónir.

Í rannsóknarverkefninu; [Yfirborð brúa 2017](#) var kostnaður annars vegar vegna malbiksslitlags og hins vegar steyppts 40 – 50 mm lags úr slitsterkri steypu á 100 m brú skoðaður. Í stuttu máli var stofnskostnaðurinn metinn ≈ 10 % lægri fyrir slitsterka steyppta lagið og núvirtí kostnaðurinn yfir 100 ára líftíma metinn verulega lægri. Sjá nánar í kafla 4 í [Yfirborði brúa 2017](#).



50 mm loftlaus mjög sterk slitlagssteypa á brýr

Tæknilausnin (the concept) „50 mm loftlaust mjög sterk slitlagssteypa á brýr“ var fyrst reynd á viðgerð á brúargólfi Ölfúsárbrúar 2018, og það sem er nýjung núna er að hún var þróuð frekar til notkunar á nýjar brýr. Tvær slíkar voru gerðar í október 2020, auk einnar vorið 2021. Hún er byggð á annari tæknilausn (concept) sem er „90 mm viðgerðarslitlag á gamlar býr“ en þar er notuð járnagrind í miðju (þá reynir ekki eins á rýrnun steypunnar), þar má nota meiri hámarks kornastærð og þá þarf ekki að nota síló sem getur verið mjög seinlegt (sem reynir ekki nærri eins á þjálhnistap eða „thixotropy“ eiginleika steypunnar).

Steinsteypan á að hafa þrjá eiginleika sem eru raun einstakir, jafnvel á heimsvísu:

- Frostheld án loftíblöndunar
- Sjálfpakkandi án þess að vera sjálfútleggjandi
- Seigjustýrð steypuframléiðsla

Aðalástæðan fyrir afar lágri v/s-tölu (hér kísilyrkblandað sement) er að steypan þarf að vera frostpólin án loftíblöndunar. Þrýstipól steypunnar skiptir minna máli í þessu samhengi.

Frostheld steypa án loftíblöndunar

Til að gera venjulega steinsteypu frosthelda þarf hún að innihalda loftblendi frá 3 til ca. 6%, en við hvert 1% sem loftið er aukið í steypunni lækkar t.d. þrýstipól hennar um 5%. Það sem er lang erfiðast í steinsteypuframléiðslu er að stýra loftíblönduninni, þ.e. að fá steypuna stöðuga í t.d. 6% og enn erfiðara að fá viðunandi loftkerfi, þar sem fjarlægðarstuðullinn er minni en 0,2mm.

Til að gera steinsteypu frosthelda án þess að hún hafi viðunandi loftmagn og loftkerfi þarf v/s talan að vera um eða undir 0,28, þannig að ekki geti myndast „krítisk“ vatnsmettun í þorum steypunnar þegar hún frýs.

Til einföldunar má segja að þá sé alltaf nóg af óhvörfuðu/óvötnuðu (unhydrated) sementi til að taka til sín auka vatn í þorum vegna þéttingar (condensation of water vapour).

Sjálfpakkandi steypa án þess að vera sjálfútleggjandi

Venjulega steinsteypu þarf að pakka með vibrator, þ.e.a.s. þegar hún er lögð í mót er verulegt holrými í henni. Við titrun með vibrator hreyfast (titra) kornin til í steypunni þannig að þökkun „hámarkast“ (optimal packing) og rúmþyngdin (þéttleiki) eykst. Ef þökkuð (titruð) venjuleg steypa er hreyfð (verður fyrir skerhraða) þá eykst aftur rúmmál hennar og hámrökuð þökkun hverfur.

Í sjálfpakkandi steinsteypu hefur steypan alltaf „hámarkaða“ þökkun og jafnvel þó hún yrði titruð (vibruð) þá mundi það ekki breyta rúmmáli hennar eða auka eiginleika eins og styrk.

Hún hefur enga „Reynolds dilatancy“ þ.e.a.s. það verður engin rúmmálsaukning þegar hún er við hámarks-þökkun og er hreyfð eða fær marktækan skerhraða.

Það má ekki rugla sjálfpakkandi steinsteypu saman við sjálfútleggjandi steinsteypu sem flýtur út eins og þykkur vökví og hefur mun minni flotskerspennu og hærra sigmál. Það er yfirleitt ekki hægt að nota sjálfútleggjandi steinsteypu á brúardekk þar sem hún myndi fljóta út af dekkinu í venjulegum hliðarhalla brúa (3,5%). Sjálfpakkandi steinsteypa er mun stífari og er með sigmál um 230mm ±20 á meðan sjálfútleggjandi steinsteypa er með sigmál um eða yfir 270 mm.



Þegar steypusýni úr venjulegri steypu eru tekin til að mæla meðalstyrk (t.d. 28 daga þrýstipól) er steypa sett í sívalning í þremur lögum og hvert lag er pikkað (pakkað) með stálstöng 25 sinnum þannig að „hámarks“ þökkun næst eða með öðrum orðum, það er lögð veruleg vinna í að pakka sýnunum.

Þegar tekið er sýni af sjálfpakkandi steypu er steypan einfaldlega sett í sívaninginn, kannski bankað nokkrum sinnum utan á mótið og annað ekki.

Seigjustýrð steypuframleiðsla

Það tekur steypustöð oft mánuði að ná stöðugleika í framleiðslu á venjulegri steypu hvað þá hástyrkleikasteypu vegna breytileika í hlutfnum og er það reynsla steypustöðva.

Yfirleitt helst í hendur að þeim mun meiri gæði (t.d. styrkur og ending) þeim mun erfiðara er að halda stöðugri framleiðslu. Það tekur líka oft þó nokkurn tíma fyrir steypustöð að ná „afslappaðri“ og stöðugri framleiðslu þegar alveg nýtt fylliefni er tekið í notkun sem hefur ekki verið prófað áður.

Í þessu verkefni með sérlega sterka (hátt þrýstipól) steinsteypu, sem er þrisvar til fjórum sinnum sterkari en venjuleg steinsteypa þá er það ekki möguleiki á langri aðlögun eða mánaða aðlögun. Steypan verður að vera í lagi frá fyrsta bít.

Til þess að stýra framleiðslu umræddrar slitsterkrar steinsteypu, þá er notaður seigjumælir til að stýra vatns- og eða þjálniefnis magni í blöndunni. Í því felst að þegar steypubíll er komin með helming að steypumagninu sem hann á að flytja er tekið sýni og seigjustuðull ásamt flotskerspennu fersku steypunnar mældur. Síðan er samsetningin á seinni hlutanum af steypunni sem fer í bílinn leiðréttur þannig að réttur styrkur og flæðieiginleiki náist, þar með verður framleiðslan stöðug frá fyrsta bít. Til þess að þetta sé mögulegt þarf þekkingu á notkun seigjumælis.



1. hluti – Þróun á hástyrkleikasteypublöndum

Þróaðar hafa verið á rannsóknarstofu slitþolnar hástyrkleikasteypublöndur, annars vegar með steinefnum frá Stokksnesi við Hornafjörð og hins vegar úr steinefnum frá Harðakambi á Snæfellsnesi.

Bæði steinefnin eru ómöluð, rúnnuð, með sléttri áferð. Úrdráttur yfir efniseiginleika þeirra úr [töflu 5.15](#) úr [Steypt slitlög á brýr 2017](#) er sýndur í eftirfarandi yfirliti.

Fylliefni	Mettivatn [%]	Kornarúþpyngd [kg/m ³]	Los Angeles (höggþol) [%]	Kúlnakvörn (slitþol) [%]	Berggreining		
					1. fl. [%]	2. fl. [%]	3. fl. [%]
Harðikambur							
0 - 8 mm	1,4	2.827					
8 - 16 mm	2,0	2.861	19	3	91	6	3
16 - 22 mm	1,6	2.765			95	5	0
Stokksnes							
0 - 8 mm	1,7	2.791			66	33	1
8 - 16 mm	0,9	2.846	11	1	61	38	2

Til þess að draga úr rýrnun var v/s tala (vatns/sementstala) höfð sem lægst. Í [töflu 1](#) má sjá uppskriftir að prófsteypum sem gerðar voru með steinefni frá Stokksnesi og í [töflu 6](#) má sjá uppskriftir að prófsteypum sem gerðar voru með steinefni frá Harðakambi.



Mynd 1 og 2: Blöndun á prófsteypu.



Steinefni - Stokksnes

Tafla 1: Samsetning prófblandna úr fylliefnum frá Stokksnesi (vinnuheiti Sog20). Í öllum Sog20-blöndum var notað fylliefni frá Stokksnesi. Þrjár gerðir sements voru notaðar, Anlegg (ANL), danskt hraðsement (DK) og norskt flugöskusement (FA). Magn af öllum efum utan fylliefna er í kg/m³.

Blanda ID	Dags.	Sement	Fylliefni - Stokksnes		Bindiefni		Vatn	V/b	Þjálniefni	
			0/8 mm [%]	8/16 mm [%]	Cem	SF			Premia 196	ADVA-flow 445
Sog20-1	24.9.2020	ANL	68	32	547	48	168	0,28	4,55	1,19
Sog20-2	25.9.2020	DK	68	32	547	48	160	0,27	4,55	1,19
Sog20-3	25.9.2020	ANL	68	32	547	48	148	0,25	7,49	1,19
Sog20-4	28.9.2020	ANL	68	32	547	48	140	0,24	5,05	1,79
Sog20-5	28.9.2020	ANL	68	32	547	48	140	0,24	5,36	2,68
Sog20-6	29.9.2020	ANL	68	32	547	48	140	0,24	5,36	2,68
Sog20-7	30.9.2020	DK	68	32	547	48	140	0,24	5,36	2,68
Sog20-8	30.9.2020	DK	68	32	547	48	140	0,24	4,69	2,36
Sog20-9	3.10.2020	DK	68	32	547	48	150	0,25	5,36	2,68
Sog20-10	3.10.2020	DK	68	32	547	48	150	0,25	4,23	4,23
Sog20-11	7.10.2020	DK	68	32	547	48	150	0,25	4,23	4,23
Sog20-12	8.10.2020	DK	68	32	547	48	140	0,24	4,23	5,06
Sog20-13	12.10.2020	DK	66	34	547	48	145	0,24	4,23	5,06
Sog20-13b	12.10.2020	DK	66	34	547	48	145	0,24	5,73	5,06
Sog20-14	13.10.2020	DK	66	34	547	48	150	0,25	5,06	5,06
Sog20-15	13.10.2020	DK	66	34	547	48	150	0,25	4,76	4,76
Sog20-FA1	23.11.2020	FA	66	34	547	48	160	0,27	3,57	3,57
Sog20-FA2	23.11.2020	FA	66	34	547	48	150	0,25	4,76	4,76



Mynd 3 og 4: Prófsteypa með Stokksnesefni útbúin (tv) og sigmál mælt (th).



Niðurstöður mælinga sem gerðar voru á ferskri steypu má sjá í töflum 2 og 3. Sérstök áhersla var lögð á þjálnistap steypunnar og því var bæði sigmál og seigja mæld tvisvar með um 30 mín. millibili.

Tafla 2: Niðurstöður mælinga á ferskri steypu, þ.e. sigmál (mm) eftir 10 mín (s-10), sigmálsflæði (mm) eftir 10 mín (Sfl-10), samskonar mælingar eftir 40 mín (S-40; Sfl-40).

Blanda ID	S-10 [mm]	Sfl-10 [mm]	S-40 [mm]	Sfl-40 [mm]	Rúmþyngd [kg/m ³]	Loft [%]
Sog20-1	230	415				
Sog20-2	235	400				
Sog20-3	215	345				
Sog20-4	210	340				
Sog20-5	250	495				
Sog20-6	220					
Sog20-7	255	430				
Sog20-8	245	430				
Sog20-9	235	422,5	200			
Sog20-10	230	390	220	362,5		
Sog20-11	255	485	240	417,5		
Sog20-12	230	390	205	330	2525	3,4
Sog20-13	190	305	200			
Sog20-13b	250	470	235	390		
Sog20-14	265	578	260	545	2544	2,3
Sog20-15	265	570				
Sog20-FA1	230	375			2405	2,7
Sog20-FA2	240	415			2405	



Mynd 5: Seigjumæling á prófsteypu.

Tafla 3: Niðurstöður mælinga á flotskerspennu (G , τ ; [Pa]) og plastískum seigjustuðli (H , μ ; [Pa*s]).

	Meðaltal fyrstu mælinga					Meðaltal síðustu mælinga				
	Tími [mín]	Rheometer 400		Con Tec Viscometer		Tími [mín]	Rheometer 400		Con Tec Viscometer	
		G_{avg}	H_{avg}	τ_{avg}	μ_{avg}		G_{avg}	H_{avg}	τ_{avg}	μ_{avg}
Sog20-1	56	0,99	1,48	275,5	31,8					
Sog20-2	58	0,96	1,92	246,0	44,9					
Sog20-3	43	2,78	7,83	808,5	85,9					
Sog20-4	35	2,18	5,28	602,3	75,6	65	4,27	2,70	705,0	41,4
Sog20-5	19	0,69	6,95	198,5	125,4	67	2,29	4,55	584,7	75,5
Sog20-6	20	2,00	9,90	534,0	115,1	69	3,82	4,82	1128,3	74,2
Sog20-7	19	0,25	4,96	104,0	107,2	65	0,74	4,16	231,0	81,7
Sog20-8	22	0,79	3,95	182,0	72,5	68	1,64	3,66	490,0	62,6
Sog20-9	21	0,76	7,03	337,5	109,1	56	1,52	5,09	492,3	96,0
Sog20-10	22	1,08	6,28	314,5	107,0	54	1,30	5,01	376,3	92,7
Sog20-11	26	0,95	4,72	215	84	50	0,92	4,07	278,0	75,7
Sog20-12	23	1,30	8,35	473,7	115,9	52	1,70	7,08	531,3	109,8
Sog20-13	18	2,68	8,09	791,0	105,2					
Sog20-13b	31	0,88	7,15	303,3	111,8	55	1,37	8,22	390,0	124,7
Sog20-14	20	0,32	5,03	107,0	106,9	54	0,53	5,08	158,0	101,1
Sog20-15	21	0,29	4,74	125,3	87,5					
Sog20-FA1	26	1,07	4,35	395,0	87,4					
Sog20-FA2	25	0,86	4,71	338,0	97,7					



Prófanir á harðnaðri steypu

Tekin voru sýni í brotstyrksmælingar sjá [töflu 4](#), en einnig voru tekin sýni í frostþolspróf fyrir þær blöndur sem innihéldu FA sement sjá [töflu 5](#).

Tafla 4: Brotstyrkur* prófsteypu með Stokksnesefni og mismunandi sementstegundum (sjá [töflu 1](#)), MPa.

Blanda ID	2 daga [MPa]	28 daga [MPa]
Sog20-1	44,8	
Sog20-2	50,3	
Sog20-3	69,8	
Sog20-4	57,4	
Sog20-5	54,7	
Sog20-6	57,0	
Sog20-7	43,5	74,5
Sog20-8	43,2	73,3
Sog20-9	45,6	74,9
Sog20-10	44,4	80,8
Sog20-11	60,4	74,6
Sog20-12	55,1	91,3
Sog20-13b	48,4	98,0
Sog20-14	60,3	91,9
Sog20-15	55,7	80,0
Sog20-FA1	52,8	73,2
Sog20-FA2	40,0	85,8

*hafa ber í huga að hér er verulegt staðalfrávik í mælingum á nokkrum steypum líklega tengt þökkun sýnanna og því ber að taka þrýstipólið með fyrirvara, en nánari greining verður birt í komandi framhaldsverkefni.

Tafla 5: Frostþol prófsteypa með flugöskusementi, flögnun í kg/m².

Blanda ID	7 umf	14 umf	28 umf	42 umf	56 umf
Sog20-FA1 meðaltal	0,00	0,01	0,03	0,10	0,22
Sog20-FA2 meðaltal	0,00	0,01	0,02	0,03	0,07

**Steinefni – Harðikambur**

Tafla 6: Í allar blöndur var notað steinefni frá Harðakambi ásamt Anlegg sementi (ANL). Magn af öllum efnum utan steinefna er í einingunni (kg/m³).

Blanda ID	Dags.	Sement	Steinefni – Harðikambur		Bindiefni		Vatn	V/b	Þjálnefni		
			0/8 mm [%]	8/16 mm [%]	Cem	SF			Premia 196	ADVA-flow 445	Dynamon Xtend-200
H-Brú0	20.10.2020	ANL	67	33	559	36	150	0,25	5,0	5,08	
H-Brú1	20.10.2020	ANL	69	31	559	36	150	0,25	5,0	4,04	
H-Brú2	22.10.2020	ANL	69	31	559	36	150	0,25	5,0	0	4,52

Tafla 7: Niðurstöður mælinga á ferskri steypu, þ.e. sigmál eftir 10 mín (S-10), sigmálsflæði eftir 10 mín (Sfl-10), sömu mælingar eftir 40 mín.

Blanda ID	Dags.	S-10 mm	Sfl-10 mm	S-40 mm	Sfl-40 mm	Rúmpyngd [kg/m ³]
H-Brú0	20.10.2020	235				
H-Brú1	20.10.2020	250	465	190	315	2560
H-Brú2	22.10.2020	275	640	260	530	2530

Tafla 8: Niðurstöður mælinga á flotskerspennu (G, τ ; [Pa]) og plastískum seigjustuðli (H, μ ; [Pa*s]).

Blanda ID	Tími [mín]	Meðaltal fyrstu mælinga				Tími [mín]	Meðaltal síðustu mælinga			
		Rheometer 400		Con Tec Viscometer			Rheometer 400		Con Tec Viscometer	
		G _{avg}	H _{avg}	τ_{0-avg}	μ_{avg}		G _{avg}	H _{avg}	τ_{avg}	μ_{avg}
H-Brú0						46	1,07	6,0	328,0	86,3
H-Brú1	23	1,35	11,3	422,3	131,2	49	1,90	9,2	607,0	102,3
H-Brú2	19	0,14	9,9	147,8	109,5	51	0,65	8,7	120,1	204,0

Tafla 9: Brotstyrkur fyrir prófsteypur með Anlegg sementi og Harðakambssteinefni. Gildin eru í MPa.

Blanda ID	2 daga styrkur	28 daga styrkur
H-Brú0	-	-
H-Brú1	68,9	99,6
H-Brú2	64,3	85,7



2. hluti - Steypublöndur frá rannsóknarstofu yfir í steypubíl

Í þessum hluta er markmiðið að rannsaka hvort enn megi bæta eiginleika þessara blandna og hvort yfirfærsla frá rannsóknarstofu yfir í steypustöð og síðan steypubíl gangi án þess að eiginleikar raskist og hvort eiginleikar þeirra með steinefnum úr sitthvorri námunni séu jafngildir.

Hentugustu uppskriftir úr fyrsta hluta voru notaðar til hliðsjónar til að þróa sömu blöndur í stærra rúmmáli í steypustöð sem síðar voru settar í steypubíla a.m.k. 3,0 m³ í hvern bíl.

Gerðar voru viðeigandi breytingar og fínstillingar á blöndunum til þess að eiginleikar héldust, sjá dæmi um blöndu á mynd 6.

CONCRETE INFORMATION		BATCHING INFORMATION	
Recipe:	C80/95 XC4 XD3 XF1 D16 S5		
Strength class:	C80/95		
Exposure class:			
Consistence class:	S5		
Chloride c-class:			
Dmax:	16 mm		
W/C ratio:	0,233		
Fiber:			
Cement producer:			
		This load: 0,8 m ³	
		Not delivered: 0,0 m ³	
		Target	Actual
		CEM I 52,5 N Rapid:	437,60 440,90
		0-8mm Litla-Horn (7,0%):	920,00 917,76
		8-16mm Litla-Horn (4,0%):	480,00 475,00
		Siljca:	38,40 37,80
		Water:	72,20 71,77
		Adva Flow:	3,84 3,81
		Premia 196:	3,36 3,32
		Flush water:	13,00 2,00
		Moisture content:	34,80 34,66
		W/C:	0,23 0,21
		Temperature:	0 13
		Total weight:	2.039 2.034

Mynd 6: Dæmi um blönduhönnun.

Brúarsteypa við Steinavötn 16. og 17. okt 2020

Þann 16. október 2020 var steyp 50 mm þykkt lag á nýja brú á Steinavötn. Steypan var blönduð í steypustöð á vegum Steypustöðvarinnar og eftirlit með gæðum steypunnar var fólgið í mælingum á flotfræðilegum eiginleikum hennar sem og með sýnatöku. Mælingar á ferskri steypu má sjá í töflum 10 og 11.



Mynd 7 og 8: Steypublanda skoðuð (tv) og sigmál athugað (th).



Tafla 10: Mælingar á ferskri steypu 16. okt. 2020

Bíll nr.	Mælingar	Tími	G	H	Sigmálsflæði, mm	Sigmál, mm	Hitastig, °C	Loft, %
1	1	14:39	1,02	6,25	440	250		2,8
	2	14:50	0,50	5,67	520	260		
2	1	15:06	0,72	6,64	460	250		
	2	15:13	0,65	5,34	485	250		
3	1	15:33	0,46	4,07	560	260		
	2	15:50	0,71	5,60	490	255		
4	1	16:07	1,06	5,32	410	240	16,6	
	2	16:17	1,59	6,87	350	215		
5	1	16:35	1,60	5,10	380	230	16,5	
	2	16:45	1,30	6,85	400	235		
6	1	17:07	0,35	4,94	590	260	20	
	2	17:18	0,23	3,11	645			
	3	17:25	0,29	4,24	550	255		
	4	17:39	1,25	5,87				
7	1	18:01	3,79	6,51	280	170		
	2	18:25	2,60	7,13	290	190		
8	1	20:10	1,93	8,60	320	210		
	2	20:31	1,60	5,18	400	215		
	3	20:40			460	250		
9	4	22:08	1,00	3,84	500	250		

Tafla 11: Mælingar á ferskri steypu 17 okt. 2020

Bíll nr.	Mælingar	Tími	G	H	Sigmálsflæði, mm	Sigmál, mm	Hitastig, °C	Loft, %
10	1	11:21	2,29	8,75	320	200		
	2	11:33	1,09	4,90	420	240		
	3	11:44	0,79	4,80	460	250		
11	1	12:03	1,34	5,95	380	230		
	2	12:14	1,34	9,44	390	235		
	3	12:40	1,60	7,70	470	260		
12	1	13:09	1,90	8,39	430	240		
	2	13:25	1,83	7,03	420	240	13	
	3	13:40	1,55	8,25	500	250	16	
13	1	14:27	2,04	9,23	370	220	16	
	2	14:35	1,55	8,40	420	250		
14	1	14:47	1,64	9,51	410	240	14	
	2	14:57	1,59	7,90	440	250		
15	1	15:17	1,85	6,65	380	230		3,3
	2	15:29	1,35	6,90	420	250		
16	1	16:21	0,89	6,14	420	250	14	



Niðurstöður prófana á harðnaðri steypu

Tekin voru sýni til að mæla 2 og 28 daga brotstyrk, ásamt frostþoli, rýrnun og pralli. Niðurstöður má sjá í töflum 12, 13 og 14 og á myndum 9, 10, 11 og 12.

Tafla 12: Niðurstöður á mælingu brotstyrks*. Meðaltal þriggja sýna.

Bíll nr.	2 daga [MPa]	28 daga [MPa]
1		60.6
3		72.7
5		64.1
7		83.6
11	39.2	75.0
13		78.1
15		74,3

*hafa ber í huga að hér er verulegt staðalfrávik í mælingum á nokkrum steypum líklega tengd þökkun sýnanna og því ber að taka þrýstipolið með fyrirvara, en nánari greining verður birt í komandi framhaldsverkefni.

Tafla 13: Niðurstöður frostþolsprófs, sem flögnun, kg/m².

Bíll nr.	7 umf	14 umf	28 umf	42 umf	56 umf	Athugasemdir
11a	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	
11b	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04	Fylliefni losnar úr efju í 42 umf.
11c	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	
11 meðaltal	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	
13a	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	
13b	0,01	0,01	0,03	0,03	0,05	Fylliefni losnar úr efju í 28 og 56 umf.
13c	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	
13 meðaltal	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	

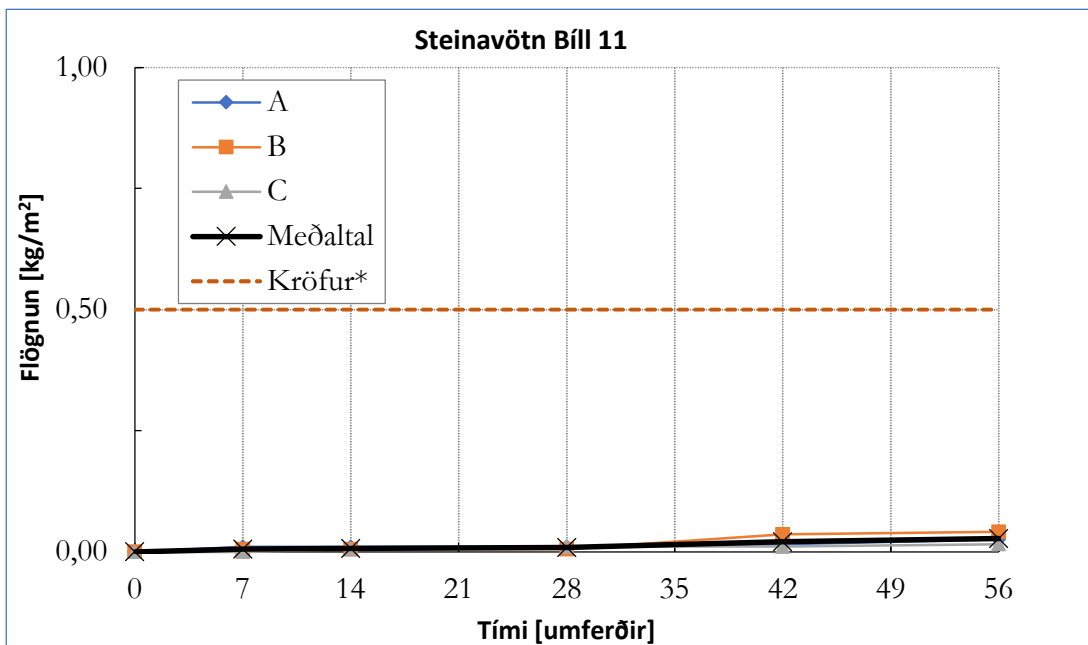
Slitþol var metið með pralli¹, sjá töflu 14. Prallmælingar eru hannaðar til að mæla slitþol malbiks en ekki steinsteypu og niðurstöður eru ekki samanburðarhæfar við malbik, en gefa hugmynd um innbyrðis samanburð steypusýna.

¹ Prall; aðferð til að mæla slitþol malbiks gagnvart negldum hjólbörðum, er lýst í IST EN 12697-16.

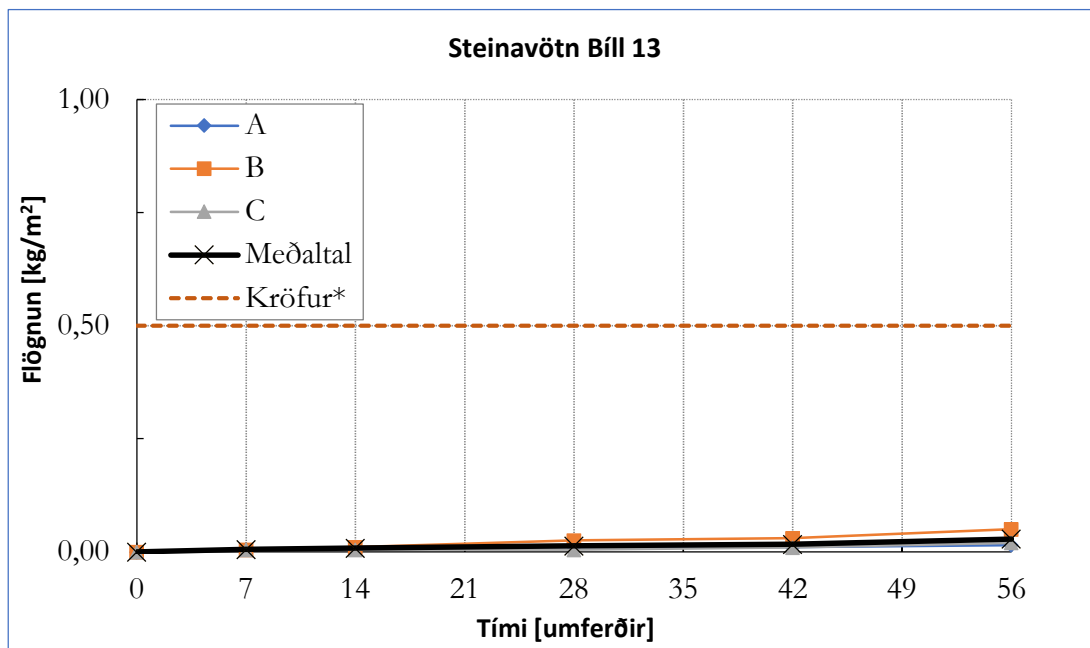


Tafla 14: Niðurstöður slitþols steypusýna mælt með pralli. Sýnin voru tekin úr úr bílum 11 og 13 frá Steinavötnum.

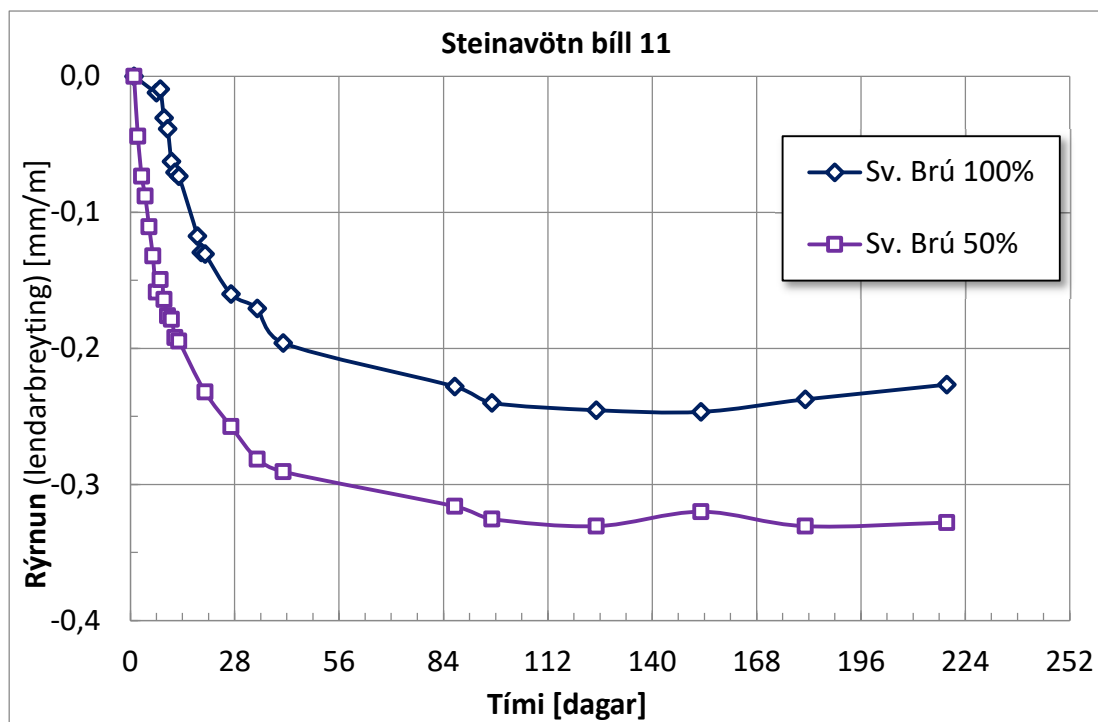
Sýni	Yfirborðspurt fyrir, g	Yfirborðspurt eftir, g	Efnistap, g	Rúmþyngd, g/cm ³	Prallgildi, ml
SV13A	519,5	464,0	55,5	2,513	22
SV13B	516,9	471,0	45,9	2,513	18
SV13C	561,5	510,2	51,3	2,513	20
Meðaltal	532,6	481,7	50,9	2,5	20,3
SV11B	554,3	508,2	46,1	2,513	18
SV11C	556,1	511,8	44,3	2,513	18
Meðaltal	555,2	510,0	45,2	2,5	18,0



Mynd 9: Niðurstöður frostþolsprófa steypu af bíl 11 frá Steinavötnum, þrjár mælingar og meðaltal.



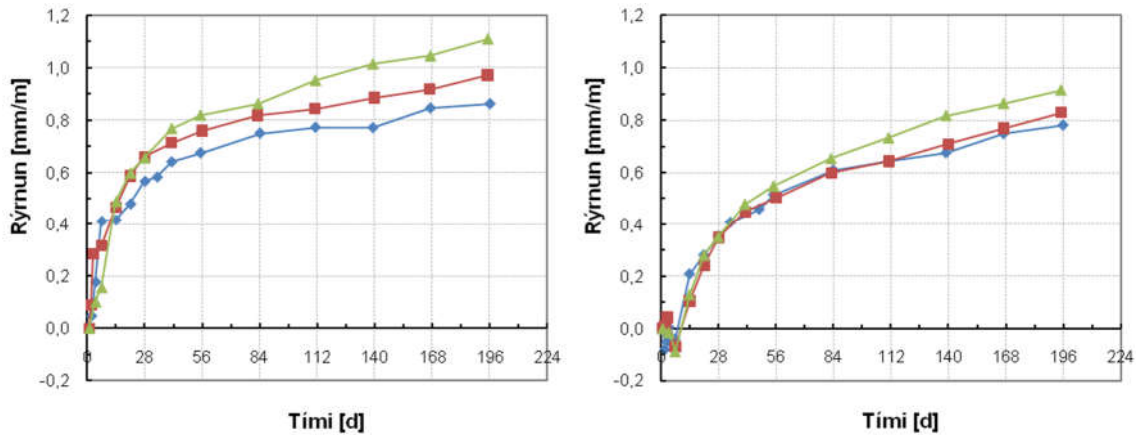
Mynd 10: Niðurstöður frostpolsprófa af bíl 13 frá Steinavötnum



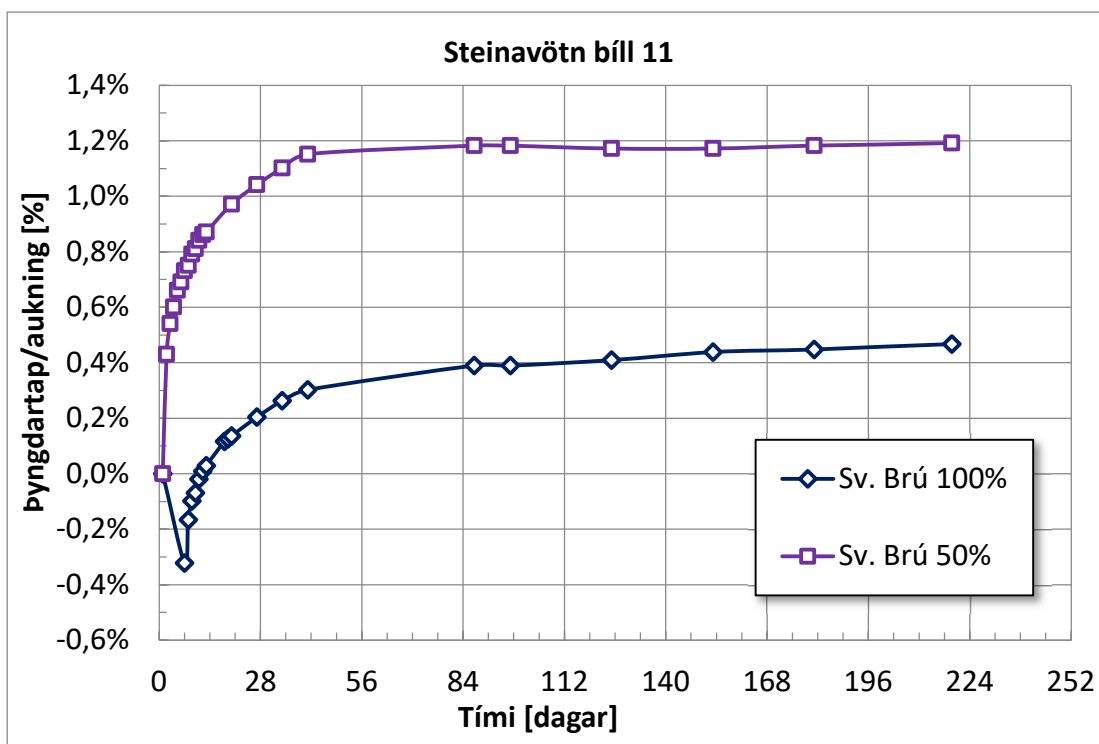
Mynd 11-a: Niðurstöður rýrnunarmælinga á steypusýnum úr bíl 11, samkvæmt ASTM 157. Eftir að tekið var utan af sýnum og núllmæling framkvæmd voru þau annarsvegar geymd í 100% raka í 6 daga og svo sett í 50% raka það sem eftirlifði prófunar (sýni Sv.Brú 100%) og hinsvegar geymd í 50% raka allan tímann (sýni Sv.Brú 50%).



Þurrkrýrnun eftir um hálf ár á sýnum sem eru geymd eru fyrstu 6 dagana í 100% raka og svo í 50% raka er aðeins 0,25 mm sem er hverfandi rýrnun. Til samanburðar rýrnar venjuleg steypa þrefalt meira, sjá mynd 11-b.



Mynd 11-b: Rýrnun á dæmigerðri íslenskrí steinsteypu. Til vinstri sýni geymd í 50% raka allan tímann, til hægri eftir geymslu í 100% raka í 6 daga og síðan í 50% raka það sem eftir lifði prófunar. Heimild: Eva Lind Ágústsdóttir, RÝRNUN STEINSTEYPU, Ritgerð í byggingarverkfræði til meistaraþrófs (MSc), HR, júní 2012.



Mynd 12: Niðurstöður þyngdarbreytinga í rýrnunarprófi á steypusýnum úr bíll 11, samkvæmt ASTM 157. Eftir að tekið var utan af sýnum og núllmæling framkvæmd voru þau annarsvegar geymd í 100% raka í 6 daga og svo sett í 50% raka það sem eftir lifði prófunar (sýni Sv. Brú 100%) og hinsvegar geymd í 50% raka allan tímann (sýni Sv. Brú 50%).



Slitlagssteypa á Hattardalsárbrú 23. okt. 2020

Niðurstöður mælinga á ferskri steypu sem blönduð var í Steypustöðinni á Ísafirði 23. okt. 2020 má sjá í töflu 15.

Tafla 15: Mælingar á ferskri steypu á blöndunarstað.

Bíll nr.	Númer mælingar úr bíl	Tími	G	H	Sigmál [mm]	Sigmáls-flæði [mm]	Fjöldi hræra komnar í bíl	Mælt loft [%]
1	1	10:50	0,87	9,58	420	230	5	
	2	11:09	0,68	8,03			9	
2	1	12:26	0,39	6	580	260	4	1,9
	2	12:42	0,62	7,09	520	250	8	
3	1	14:03	0,50	6,4	600	260	5	
	2	14:06	0,32	5,94	630	265	7	



Mynd 13 og 14: Seigjumælingar á steypu á Ísafirði.



Niðurstöður prófana á harðnaðri steypu

Tekin voru sýni til að mæla 2 og 28 daga brotstyrk, ásamt frostþoli og pralli. Niðurstöður má sjá í töflum 16, 17, 18.

Tafla 16: Niðurstöður á mælingu brotstyrks. Meðaltal þriggja sýna.

Bíll nr.	2 daga styrkur	28 daga styrkur
1		84,9
2	58,5	86,8
3		97,9

Tafla 17: Niðurstöður frostþolsprófs sem flögnun, kg/m².

Bíll nr.	7 umf.	14 umf.	28 umf.	42 umf.	56 umf.
1a	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
1b	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
1c	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
1 meðaltal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
2a	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
2b	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03
2c	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
2 meðaltal	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02

Slitþol var metið með pralli, sjá [töflu 18](#). Prallmælingar eru hannaðar til að mæla slitþol malbiks en ekki steinsteypu og niðurstöður eru ekki samanburðarhæfar við malbik, en gefa hugmynd um innbyrðis samanburð steypusýna.



Tafla 18: Niðurstöður úr slitpolsprófum mælt með pralli fyrir sýni tekin úr bílum 1 og 2 við Hattardalsá

Prófsneið	Yfirborðsþurrt, fyrir, g	Yfirborðsþurrt, fyrir, g	Efnistap, g	Rúmþyngd, g/cm ³	Prallgildi, ml
H1A	510,0	461,0	49,0	2,513	19
H1B	518,6	476,3	42,3	2,513	17
H1C	522,9	474,1	48,8	2,513	19
Meðaltal	517,2	470,5	46,7	2,5	18,6
H2A	518,5	465,7	52,8	2,513	21
H2B	517,4	471,4	46,0	2,513	18
H2C	527,3	480,9	46,4	2,513	18
Meðaltal	521,1	472,7	48,4	2,5	19,3

Niðurstöður úr prallprófum samkvæmt töflum 14 og 18 eru mjög sambærilegar og benda til þess að slitstyrkur slitlaganna verði sambærilegur.

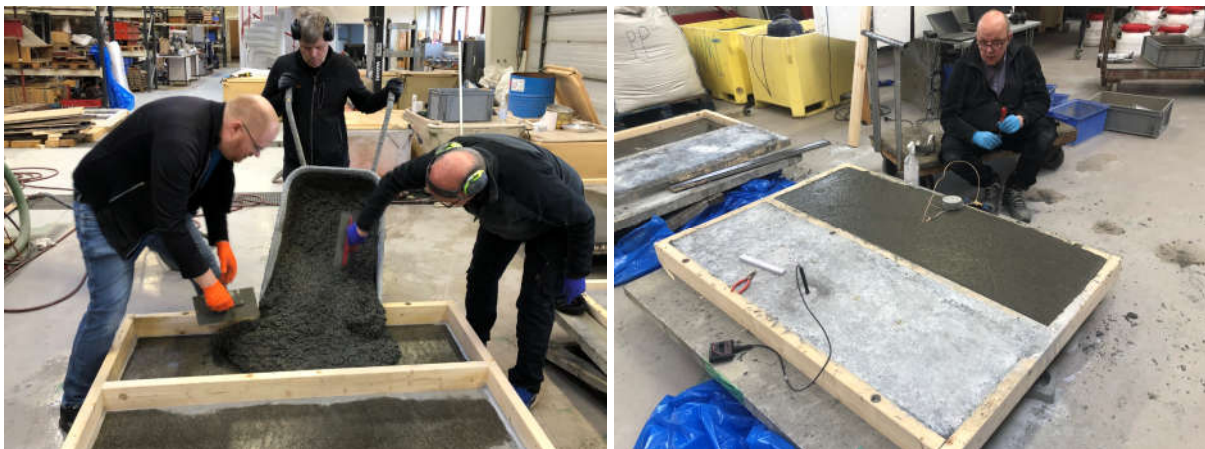


3. hluti - Hástyrkleikaásteypur á forsteypa platta

Ásteypulög voru steyppt á sex forsteyptar einingar (platta). Markmið með steypunum var að líkja eftir raunverulegri slitlagsteypu á brúaryfirborð, en við kjöraðstæður. Steyppt var með steinefnum bæði frá Harðakambi (HK) og Stokksnesi (Horn) með dönsku hraðsementi (LCC₅₀₀) og með norsku flugöskusementi (LCC₃₅₀, LCC₃₅₀ stendur fyrir Low Carbon Class, þar sem kolefnisspor steypunnar er minna eða jafnt og 350 kg CO₂e per rúmmetra af steinsteypu, en venjuleg frostheld steypa á Íslandi tilheyrir yfirleitt LCC₃₅₀).

Fjögur ásteypulög voru steyppt í 50 mm þykkt og tvö í 100 mm þykkt. Steyppt var ofan á fullrýrnaðar steyptar einingar um 1,1 m * 1,6 m að stærð með slétt yfirborð (sem er ekki skv. kröfum í gr. 6.2.5 Shear at the interface between concrete cast at different times í ÍST EN 1992-2). Stærð hvers sýnis var 0,5 m x 1,5 m. Sýnastærðin er metin nægileg til þess að ganga úr skugga um hvort steypulagið hafi tilhneigingu til þess að springa á stærri flötum og líkir því eftir raunaðstæðum á brúm.

Einingarnar voru geymdar innanhúss, þar sem hlutfallslegt rakastig var frekar lágt eða 30 – 35%. Eftir ásteypu var plast breitt yfir sýnin og yfirborðið úðað reglulega með vatni í eina viku. Eftir það var ábreiðan tekin af og yfirborðið ekki vætt frekar. Fylgst var með einingunum í um 4 mánuði meðan langstærsti hluti rýrnunar steypu er að koma fram. Á tímabilinu frá byrjun febrúar til lok maí var rakastig í 100 mm þykku steypunum mælt reglulega. Fylgst var með lengdarbreytingum í steypunum. Í lok maí var viðloðun steypusýnanna við undirlagið (einingarnar) mælt. Enga sprungumyndun var að finna sem er mjög gott.



Mynd 15 og 16: Slitlagssteypur ofan á steypa platta (tv) og hitamæling (th).

Tafla 19: Steypublöndur og steypudagar voru eftirfarandi:

Nr	Sement	Steinefni	Þykkt mm	Steypudagur
1 - HK-DK	Danskt hraðsement (DK)	Harðikambur	50	26.1.2021
2 - HG-DK	Danskt hraðsement (DK)	Stokksnes	50	3.2.2021
3 - HK-DK	Danskt hraðsement (DK)	Harðikambur	50	26.1.2021
4 - HG-DK	Danskt hraðsement (DK)	Stokksnes	50	3.2.2021
5 - HK-FA	Norskt flugöskusement (FA)	Harðikambur	100	26.1.2021
6 - HG-FA	Norskt flugöskusement (FA)	Stokksnes	100	3.2.2021



Steypt var ofan á forsteyptu einingarnar í tveimur áföngum, þar sem fyrst var steinsteypa með steinefnum frá Harðakambi og síðar steinsteypa með steinefnum frá Stokksnesi. Meginatriði uppskrifta og mælinga á ferskri steypu er að finna í [tölflum 20 og 21](#).

Tafla 20: Uppskriftir að plattasteypum með annarsvegar steinefnum frá Harðakambi (HK) og hinsvegar frá Stokksnesi (Horn). Tvær sementsgerðir voru notaðar, danskt rapid sement (DK) og norskt flugökusement (FA). Magn af öllum efnum utan steinefna eru í einingunni (kg/m³).

Blanda ID.	Dags.	Sement	Steinefni		Bindiefni		Vatn [kg/m ³]	V/b	Þjálnefni	
			0/8 mm [%]	8/16 mm [%]	Sement [kg/m ³]	SF [kg/m ³]			Premia 196	Dynamon Xtend-200
HK-DK	26.1.2021	DK	68	32	544	47	156	0,26	7,45	4,49
HK-FA	26.1.2021	FA	68	32	544	47	156	0,26	6,78	4,04
Horn-DK	3.2.2021	DK	70	30	544	47	156	0,26	4,74	4,49
Horn-FA	3.2.2021	FA	70	30	544	47	156	0,24	5,93	4,49

Tafla 21: Plattasteypur með annarsvegar Harðakambssteinefni (HK) og hinsvegar Stokksnessteinefni (Horn).

Blanda ID.	Sigmál [mm]	Sigmálsflæði [mm]	Loft [%]	Rúmpyngd	G-flotskerspenna	H-seigja	Platti ID
HK-DK1	280	670		2487	0,21	5,29	HK DK 50
HK-DK2	260	630		2481	0,27	6,49	HK DK 100
HK-DK3	250	610	3,0	2500	0,43	9,64	HK DK 100
HK-FA1				2487	0,90	6,29	HK FA 50
HK-FA2	250	510		2493	0,56	7,28	
Horn-DK1	230	440			0,39	4,10	Horn DK 50
Horn-DK2	240	460			0,47	4,5	Horn DK 100
Horn-DK3	220	340			1,19	6,29	Horn DK 100
Horn-FA1	245	470			0,76	4,92	Horn FA 50
Horn-FA2	230	400		2487	0,80	5,14	

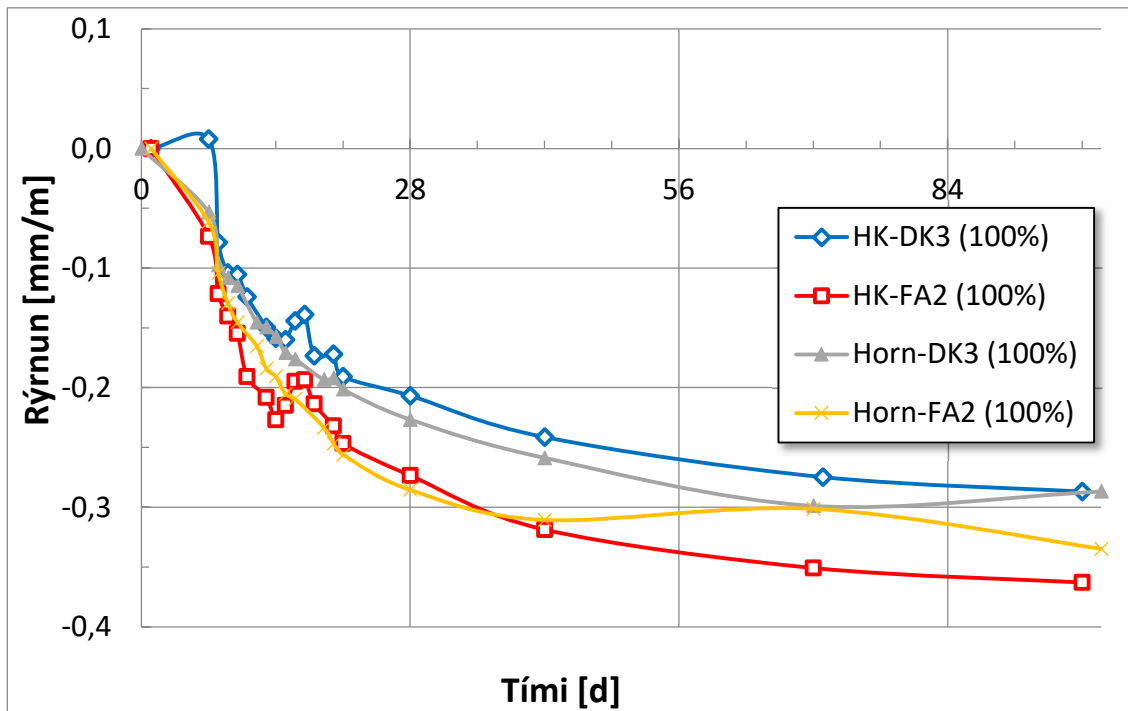


Prófanir á harðnaðri steypu

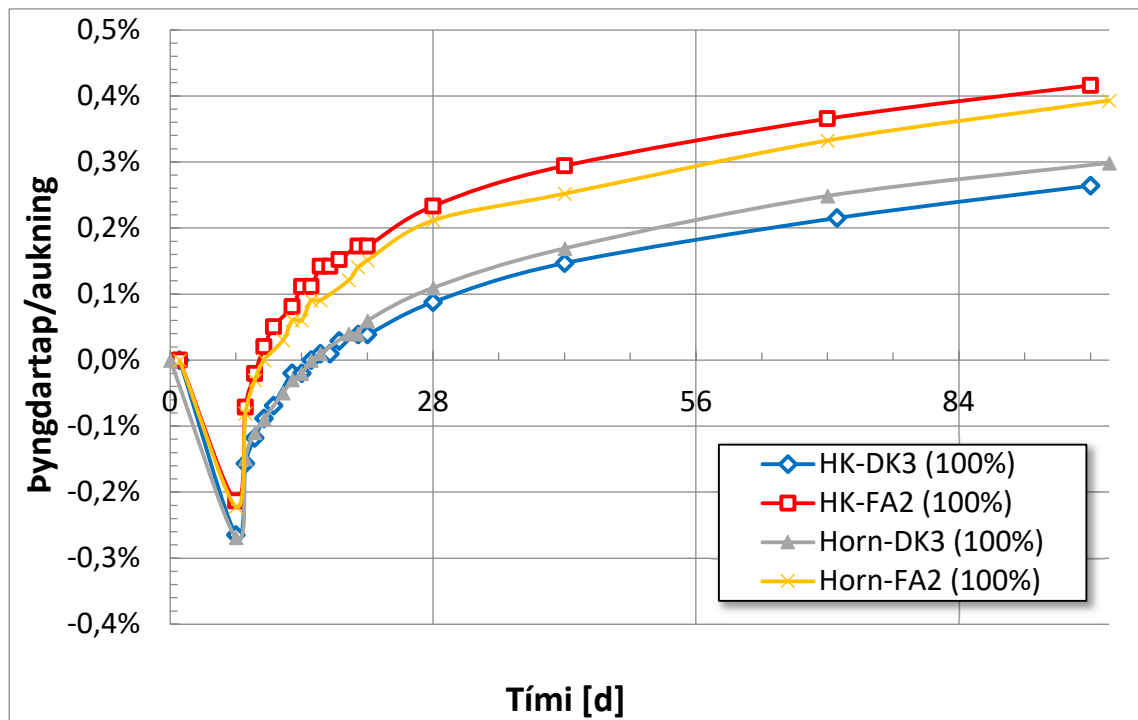
Tekin voru sýni til að mæla 2 og 28 daga brotstyrk, frostþol, rýrnun og klóríðleiðni. Niðurstöður má sjá í [töflu 22](#) og á [myndum 17 og 18](#).

Tafla 22: Niðurstöður prófana á harðnaðri steypu. Þrýstistyrkur (MPa) og frostþol sem flögnun (kg/m²). Allar mælingar byggja á meðaltali þriggja hlutsýna.

Blanda ID.	Þrýstistyrkur, MPa		Flögnun, kg/m ²				
	2 daga styrkur	28 daga styrkur	7 umf.	14 umf.	28 umf.	42 umf.	56 umf.
HK-DK3	72,5	95,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HK-FA2	64,2	96,6	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Horn-DK3	62,1	85,0					
Horn-FA2	54,4	71,2	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04



Mynd 17: Niðurstöður rýrnunarmælinga á steypusýnum, samkvæmt ASTM 157. Eftir að tekið var utan af sýnum og núllmæling framkvæmd voru þau geymd í 100 % raka í 6 daga og svo sett í 50 % raka það sem eftir lifði prófunarinnar.



Mynd 18: Þyngdartap/aukning samfara rýrnun, ASTM C157. Eftir að tekið var utan af sýnum og núllmæling framkvæmd voru þau geymd í 100 % raka í 6 daga og svo sett í 50 % raka það sem eftir lifði prófunarinnar.

Klóríðleiðni

Klóríðleiðni var mæld í prófsýnum sem voru útbúin í tengslum við plattasteypunar. Prófunaraðferðin sem stuðst var við er NT Build 492. Aðferðin byggir á því að draga klóríð inn í prófsýni með rafstraumi. Niðurstöður prófunarinnar eru gefnar sem klóríðleiðnistuðull fyrir viðkomandi sýni, sjá [töflu 23](#). Almennur tilgangur prófunarinnar er að meta tæringarhættu í viðkomandi steypublöndu fyrir gefnar aðstæður. Í staðlaðri prófun er klóríðleiðnistuðullinn eingöngu háður þéttleika viðkomandi steypublöndu. Því hefur þessi prófun oft verið notuð til þess að meta þéttleika steypublandna. Niðurstöður úr prófuninni er gefin í [töflu 23](#) fyrir steypur með dönsku hraðsementi og norsku flugöskusementi og með Harðakambsteinefni (HK) og Stokksnessteinefni (HG). Prófanirnar voru gerðar á um 10 daga og um 35 daga gömlum sýnum.

Tafla 23: Klóríðleiðni í prófsýnum samkvæmt NT Build 492.

Sýni	Aldur, dagar	Leiðnistuðull D, m ² /sek
HK-DK3	8.69	3.95 * 10 ⁻¹²
HK-FA2	10.74	4.05 * 10 ⁻¹²
HG-DK3	9.16	4.19 * 10 ⁻¹²
HG-FA2	9.18	3.63 * 10 ⁻¹²
HK-DK3	32.70	6.54 * 10 ⁻¹³
HK-FA2	32.70	7.33 * 10 ⁻¹³
HG-DK3	36.80	5.78 * 10 ⁻¹³
HG-FA2	37.26	4.93 * 10 ⁻¹³



Fyrir 10 daga sýnin er leiðnistuðullinn um $4 * 10^{-12}$ m²/sek, óháð sementstegund og fylliefnategund. Almennt eykst þéttleiki steinsteypu með aldri og eftir um 35 daga hörðnun er leiðnistuðullinn töluvert lægri en eftir 10 daga aldur.

Nokkur munur er á þéttleika bæði með mismunandi sementstegundum og fylliefnategundum. Þéttleikinn er meiri með Stokksnessteinefni og í við lægri með flugöskusementi (HG-FA2), en hraðsementi (HG-DK3).

Með Harðakambsteinsefni er hins vegar þéttleikinn aðeins meiri með hraðsementi (HK-DK3) en flugöskusementi (HK-FA2).

Segja má að þessar steypur séu mjög þéttar þar sem klóríðleiðnistuðullinn er mjög lágur.

Fyrir venjulega 28 daga C30 steypu er klóríðleiðnistuðullinn um $6 * 10^{-12}$ m²/sek eða um einni stærðargráðu hærrí en fyrir þessar steypur, þ.e. þéttleiki þessara sérlega sterku steypa er framúrskarandi.



Mynd 19 og 20: Hitamælingar í slitlagssteypum.



Mynd 21: Slitlagssteypur á steypum plöttum.



Prófanir á viðloðun milli ásteypu og undirlags

Viðloðun á milli ásteypulags og steyppts undirlags (bond test, direct tension pull-off test) var mæld þann 25. maí 2021, sjá [myndir 22 og 23](#).

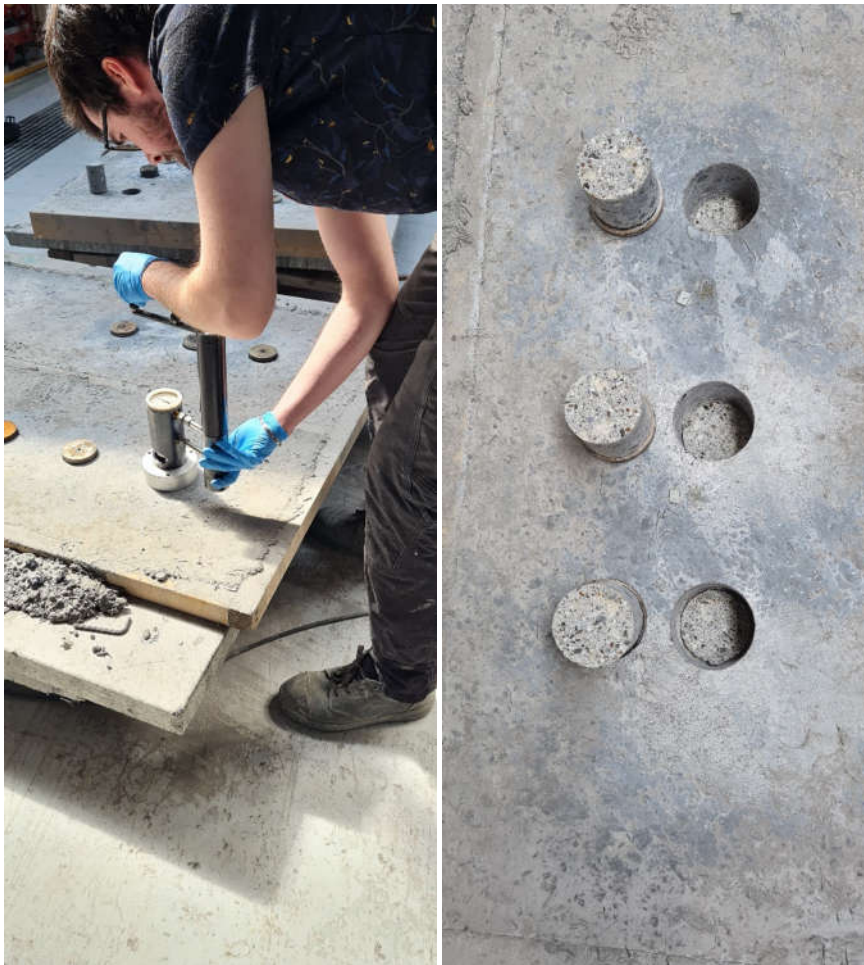
Sem undirlag voru notaðar forsteyptar einingar/plötur, 60 mm þykkar, með fremur sléttri áferð.

Prófunin var gerð samkvæmt staðli ASTM C1583 og fór þannig fram að borað var með um 71 mm kjarnabor í gegnum slitlagssteypuna og um einn cm ofan í undirliggjandi einingar. Þvermál kjarnans verður um 69 mm. Stálplattar með sama þvermál og innanmál kjarnaborsins voru síðan límdir ofan á kjarnahlutana, sem búið var að fría til hliðanna frá aðliggjandi steypu. Þegar límið var orðið hart var stálplattinn og kjarninn slitinn frá undirlaginu, sjá [myndir 22 og 23](#), og togkrafturinn mældur.

Niðurstöður mælinganna eru sýndar í [töflu 24](#) ásamt athugasemdum um brotsárið. Þær sýna að í nokkrum tilfellum var límingu milli ásteypu og undirlags verulega áfátt, en annars var brotflöturinn í flestum tilfellum í undirlaginu, þ.e. í forsteyptu plötunum en ekki í ásteypulagimu. Niðurstöðurnar sýna jafnframt að togþol ásteypunnar er um eða yfir 10 kN.

Tafla 24: Þvermál kjarna er um 69 mm. Stokksnessteinefni (HG) og Harðakambsteinefni (HK).

Steypa	Kjarni nr	Álag (kN)	Ath.
HG-DK 50 mm frá 03.02.2021	1	-	Kjarnarnir losnuðu frá undirlaginu við borun. Við skoðun kom í ljós að yfirborð undirlags var mjög slétt og að allur plattinn var laus frá undirlaginu. Yfirborð ekki skv. kröfum í staðli ÍST EN 1992-2.
	2	-	
	3	-	
	4	-	
HK-DK 50 mm frá 26.02.2021	1	10,9	Slit í undirlagi
	2	12,0	Slit í undirlagi
	3	12,5	Slit í undirlagi
	4	11,0	Slit í undirlagi
HG-FA 50 mm frá 03.02.2021	1	12,5	Slit í undirlagi
	2	12,7	Slit í undirlagi 90 % og bindingi 10 %
	3	9,8	Límið milli platta og yfirsteypu gaf sig
HK-FA 50 mm frá 26.01.2021	1	12,4	Slit í undirlagi
	2	10,5	Slit í undirlagi
	3	11,0	Slit í undirlagi
HG-DK 100 mm frá 03.02.2021	1	-	Kjarninn losnaði frá undirlaginu við borun
	2	4,4	Slit í bindingi
	3	7,4	Slit í bindingi
	4	7,0	Slit í bindingi
HK-DK 100 mm frá 26.01.2021	1	13,5	Slit í undirlagi
	2	11,2	Slit í undirlagi 85 % og bindingi 15 %
	3	11,5	Slit í undirlagi 10 % og bindingi 90 %



Mynd 22 og 23: Framkvæmd á viðloðunarprófun.

Til samanburðar má taka samskonar viðloðunarpróf sem var hluti rannsóknarverkefnisins [Steypt 40-50 mm slitlag á brýr 2017](#). Þar voru mæld gildi til muna hærra (þ.e. togþol undirlags var hærra) sbr. töflu 3.2 í rannsóknarskýrslunni og er sýnd hér á eftir að hluta:

	Steinefni frá Harðakambi	Steinefni frá Stokksnesi
Sýni 1	15,5 kN	16,5 kN
Sýni 2	17,0 kN	16,0 kN
Sýni 3	17,0 kN	15,5 kN

Þá var steyp ofan á grófari hlið sömu eininga. Hliðarnar sem nú var steyp ofan á voru eins og segir í hér að framan með slétt yfirborð og ekki skv. kröfum í gr. 6.2.5 í ÍST EN 1992-2.

Afleiðingin er sú að prófunin gefur í fæstum tilfellum upplýsingar um viðloðun ásteyppunnar við undirlagið heldur einungis um togþol undirsteyppunnar (ef slit verður í undirlagi). En í því er bindingur milli ásteypulags og undirlags sterkari en togþol undirlags, sem er mjög gott.

Í rannsókninni 2017 mælast hærra gildi vegna þess að togþol undirsteyppunnar var hærra á þeirri hlið forsteyptu einingarinnar og þar var einnig yfirborðið hrjúfara. Þetta er út af fyrir sig mjög lærdómsrík niðurstaða og ljóst að nauðsynlegt hefði verið að hrýfa yfirborð eininganna í upphafi til að ná fullum bindingu milli slitlags og undirlags, t.d. sandblása það eða fræsa raufar í það með slípirokk.



Á myndum 24, 25 og 26 má nánar sjá hvernig kjarnar slitnuðu frá undirsteypu.



Mynd 24: Slitið varð í bindingi milli slitlagsteypu og undirsteypu.



Mynd 25: Slitið varð að hluta til í undirsteypu og að hluta til í bindingi.



Mynd 26: Slitið átti sér alfarið stað í undirsteypunni.

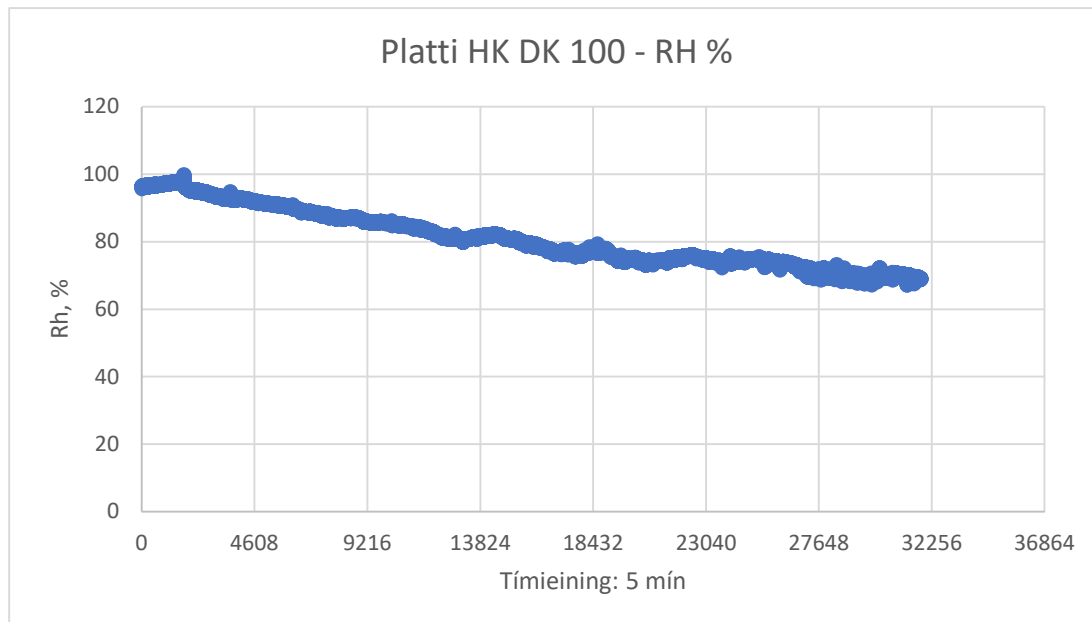


Rakamælingar í ásteypu

Mælingar á rakastigi á steypu HK DK 100 var framkvæmd einum degi eftir að steypan var lögð út. Steypan var steypð þann 26.01.2021 og mælingar hófust þann 27.02.2021. Plattinn var 10 cm þykkur og var rakanemanum komið fyrir á 3,5 cm dýpi og holudýptin fyrir neðan rakanemann frá 3,5 til 5,0 cm.

Rakastig var mælt á 5 mínúta fresti. Mælingum var hætt þann 18.05.2021. Rakaneminn var prófaður bæði fyrir og eftir mælingatímabilið með 75 % RH staðal lausn og reyndist neminn í lagi. Plastdúkur var breiddur yfir plattann fyrstu vikuna.

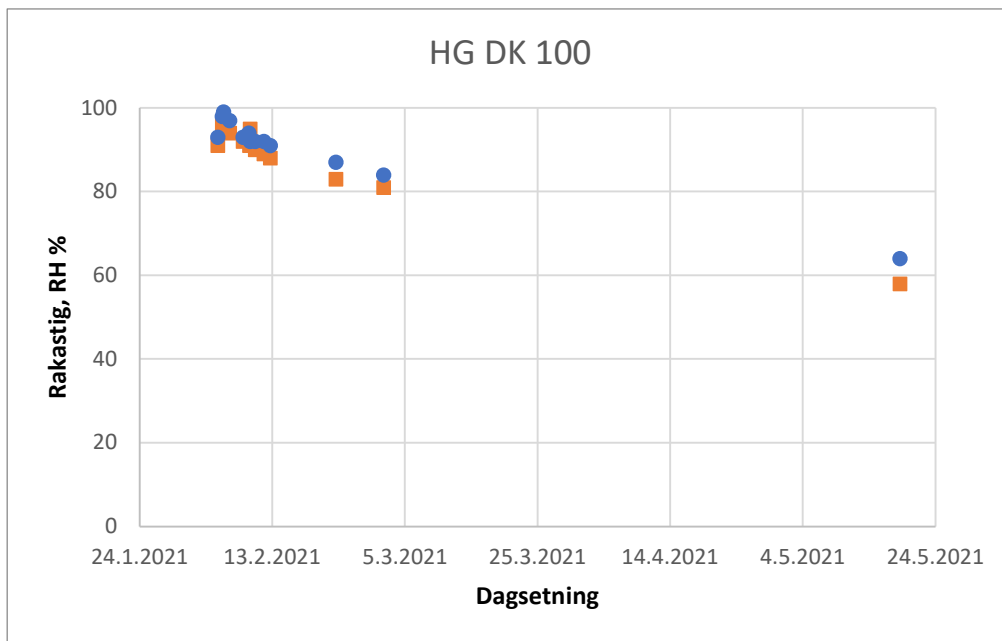
Niðurstöður úr rakamælingunum eru sýndar á mynd 27. Eins og sjá má þórnar steypan nokkuð jafnt út yfir allt tímabilið og í lokin er rakastigið í steypunni um 70 %.



Mynd 27: Síritun á rakastigi í plattasteypu HK DK 100. Rakaneminn staðsettur á 3,5 til 5 cm dýpi frá yfirborði. Myndin (X-ásinn) sýnir niðurstöður mælinga á 5 mínútna fresti í alls 111 daga.

Rakastig í steypu HG DK 100 var einnig mælt, en aðeins var um handvirka mælingu að ræða, sjá mynd 28. Um er að ræða tvo rakanema sem eru á 3,5 cm dýpi og mæla rakastigið á 3,5 til 5 cm dýpi. Steypan var steypð þann 03.02.2021 og mælingar hófust þann 04.02.2021 og stóðu til 18.05.2021.

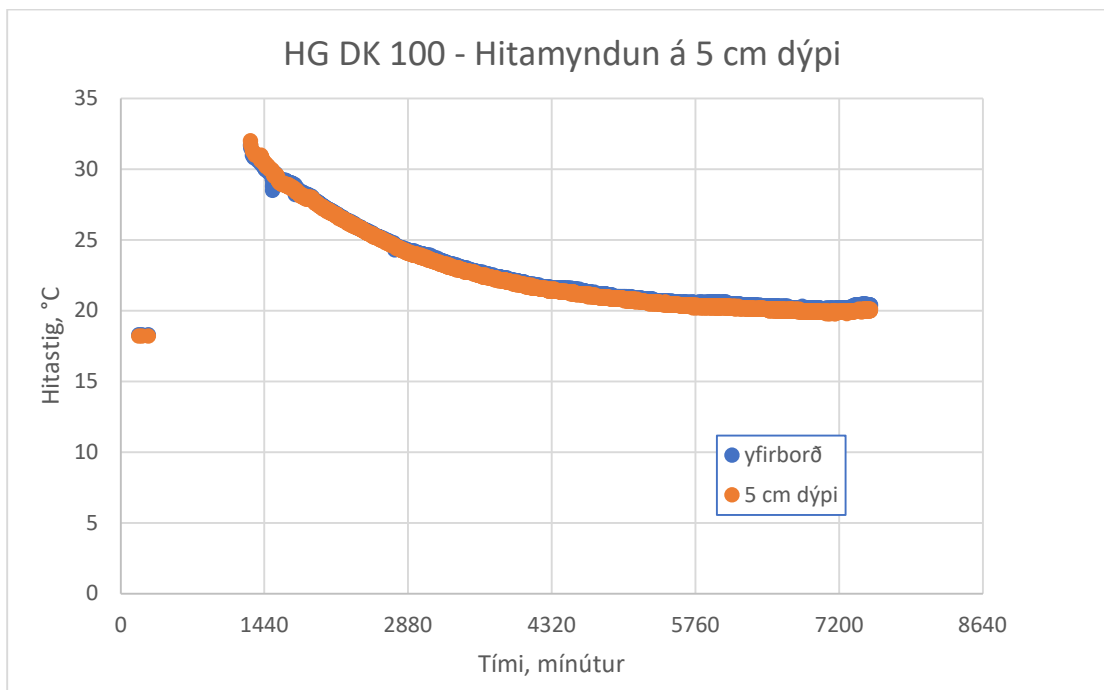
Rakaneminn var prófaður bæði fyrir og eftir mælingatímabilið með 75 % RH staðallausn og reyndist neminn í lagi. Eins og sjá má þórnar steypan nokkuð jafnt út yfir allt tímabilið og í lokin er rakastigið í steypunni um 60%.



Mynd 28: Handvirk mæling á raka í platta HGDK 100. Rakaneminn var staðsettur á 3,5 til 5 cm dýpi frá yfirborði.

Hitamyndun í ásteypu

Hitamyndun var mæld í sýni HG-DK 100. Eftir að búið var að leggja steypuna niður var einum hitanema komið fyrir á um 5 cm dýpi og einum í yfirborð steypunnar, en steypa var lögð út í 10 cm þykkt lag. Niðurstöður mælinganna eru sýndar á mynd 29. Eins og sjá má þá er enginn munur á hitasigi steypunnar í við yfirborð og á 5 cm dýpi. Hins vegar tókst ekki að mæla upphitunarferil steypunnar. Hæsta hitastig mældist 32 °C eftir 21,5 klukkustundir.



Mynd 29: Hitamyndun í HG-DK 100. Hitanemar voru staðsettir í yfirborði steypunnar og á 5 cm dýpi. Mælingar á fyrstu stigum misfórast eins og lesa má úr ferlunum.



Lokaorð - Ályktun

Rýrnun mældist á bilinu 0,24 – 0,37 mm/1.000 mm eftir sýnum, einnig háð geymslu skilyrðum, sem er **verulega** minna en í venjulegri steypu.

Niðurstöður úr prallprófum samkvæmt [töflu 14](#) (Stokksnessteinefni) og [18](#) (Harðakambsteinefni) eru mjög sambærilegar og benda til þess að slitstyrkur slitlagsgerðanna verði svipaður.

Engar sprungur komu fram í yfirborði platta úr prófuðum steypugerðum, en stærð plattanna er metin nægileg til að líkja eftir því sem gerist í slitlagi á yfirborði brúa.

Flögnun í frostþolsprófum er **vart mælanleg**, frekast þó í steypu með FA sementi og steinefnum frá Stokksnesi, enda þótt steypa sé loftlaus.

Klóríðleiðnistuðull fyrir þessar slitlagssteypur er um **stærðargráðu** (10 sinnum) lægri en klórleiðnistuðull fyrir steypu í styrkleikaflokki C30. Yfirborð brúa með slitlagasteypu er samkvæmt þessu mjög þétt.

Í þessari rannsókn reyndist brotþol sívalninga með steinefnum frá Harðakambi, bæði þeim sem steiptir voru á rannsóknarstofu og á verkstað, heldur lægra en í eldri rannsóknum á svipuðum sjálfpakkandi steinsteypum, sem getur verið vegna ónógar þökkunnar sýna, en staðalfrávik var oft hátt.

Brotþol sívalninga með steinefnum frá Stokksnesi, sem steiptir voru á rannsóknarstofu reyndist einnig heldur lægra en í eldri rannsóknum. Brotþol sívalninga, sem steiptir voru á verkstað var nokkru lægra en reiknað var með en í samræmi við niðurstöður úr prófsteypum.

Brotþol sívalninga með steinefnum frá Stokksnesi reynist í þessari rannsókn lægra en brotþol sívalninga með Harðakambsteinefnum. Engu að síður mælist slitþol steypunnar úr þessum tveimur steinefnum svipað í prallprófi

Í viðloðunarprófum kom m.a. fram áminning um að uppfylla verður kröfur um hrýfi yfirborðs undir slitlag skv. gr. 6.2.5 í ÍST EN 1992-2.

Í slitlagasteypu eru lang mikilvægustu þættir lítil rýrnun, þéttleiki, frostþol og mikið slitþol. Mælingar liggja fyrir á þessum eiginleikum. Eins og að framan greinir er rýrnun þeirra slitlagasteypa, sem hér voru rannsakaðar afar lítil, þéttleiki mjög mikill og flögnun í frost/þíðu prófi nánast engin. Slit á brúargólfum með ofursterkri stlitsteypu, sem þegar hafa verið lögð út, hefur ekki verið mælt fram að þessu. Brýnt ert að rannsaka þetta sem fyrst t.d. hjólför á viðgerðarslitlagi á Borgarfjarðarbrú, en fyrsta steypa með sjálfpakkandi ofursterkri steypu var lögð þar á brúargólfið fyrir tæpum áratug. Til áherslu má vísa í langa endingu steipta veghluta Vesturlandsvegur í Kollafirði sem nálgast óðfluga að verða 50 ára gamall.

Að öllu samanlögðu má álykta að forskriftir fyrir blöndur með steinefnum úr báðum námunum, Harðakambi og Stokksnesi, séu hæfar til notkunar og henti mjög vel í steipt slitlög á nýjar brýr eða til viðhalds á yfirborði eldri brúa. Mikilvægt er að sjá til þess að yfirborð, sem steipt er á uppfylli áður nefndar hrýfiskröfur á undirlagi.

Svör við spurningunum um hvort hægt sé að nota 50 mm þykkt steypulag úr steinefnum frá Stokksnesi, hannað á rannsóknarstofu, blandað í steypustöð og flutt á staðinn í steypubíl sem slitlög á brýr og hvort Stokksnesblöndur standist samanburð við Harðakambblöndur, liggja fyrir.



Svörin við þessum spurningum eru bæði jákvæð. Steinefni í slitlagasteypur frá Stokksnesi henta því í slitlög á brýr, sem eru nær Stokksnesi en Harðakambi þegar litið er til eiginleika, flutningskostnaðar og kolefnisspors.

Með tilliti til öryggis vegfarenda er mikilvægt að yfirborð brúa sé slétt og í samræmi við kröfur. Vinnuaðstæður við sérstakt steipt slitlag ofan á undirliggjandi steipt burðarvirki eru mjög hagstæðar, sem auðveldar mjög að uppfylla kröfur. Sérstakt steipt slitlag er auk þess mun þéttara en venjuleg steypa sbr. [töflu 22](#) hér að framan og samkvæmt textanum sem töflunni fylgir og ver því undirliggjandi burðarvirki mjög vel, og lokar hugsanlegum sprungum og steypugöllum í því.

Malbiksslitlag ásamt rakavarnarlagi ver undirliggjandi burðarvirki einnig mjög vel, en ending þess er mun skemmri og líftímakostnaður malbiksslitlags miðað við 100 ára hönnunarlíftíma brúa er mun hærri en steipts ofursterks slitlags eins og fram kemur í skýrslunni; [Yfirborð brúa](#).



Viðauki 1 - Slitlagssteypur á brýr

Þessi hluti er ekki eiginlegur hluti af rannsóknarverkefningu, en höfundar telja nauðsynlegt að hann fylgi þessari rannsóknarskýrslu til yfirlits og nánari skýringa.

Slitlag á nýjar brýr:

Steypt slitlag hefur verið sett á eftirfarandi nýjar brýr: Arnarnesbrú, brú á Bæjarhálsi, á Steinavötn, á Hattardalsá og á Bjarnardalsá.

Arnarnesbrú var byggð 1990 með sérstöku 80 mm þykku steypu slitlagi C50 með stáltrefjum. Hjólfarásir voru komnar á syðstu akreinina þar sem mest er ekið. Árið 2013 var ákveðið að fræsa 60 mm þykkt lag af þeirri akrein og endursteypa með slitsterkri trefjasteypu C100. Lagið er nánast sprungulaust og los milli laga hefur ekki komið fram (ÁDU um 15.500).

Brú í Bæjarhálsi var byggð 1994 með sérstöku 80 mm þykku steypu slitlagi, þar er enn ekki þörf á að gera við slitlagið.

Á Steinavatnabrú og á Hattardalsárbrú var lagt sérstakt 50 mm þykkt slitlag á, í október 2020. Samkvæmt skoðun tæpu hálfu ári seinna eru engar sprungur sjáanlegar og ekki fannst neitt los milli laga, þ.e. milli burðarvirkissteypu og slitlagssteypu.



Mynd 30: Steypt slitlag á nýrri brú yfir Steinavötn í Suðursveit.

Nýjasta slitlagssteypan var lögð á þessu ári (2021) á Bjarnardalsá á Vestfjörðum. Sú vinna heppnaðist mjög vel.



Slitlag vegna viðhalds:

Þær brýr sem hafa fengið steipt slitlag á vegna viðhalds eru meðal annarra: Borgarfjarðarbrú, Blöndubrú, Miðfjarðarárbrú, Sogsbrú og Ölfusárbrú.

Á Borgarfjarðarbrú (byggð 1979, ÁDU 5.500), hófst viðgerð 2013 með slitsterkri trefjasteypu C100, vatnsbrotið var niður fyrir járnþvingu í efri brún (brotdýpt 80 mm). Áður en viðgerð hófst var komið mikið slit í yfirborðið, svo mikið að járn voru farin að sjást, sem þýðir slit ≈ 40 mm. Viðgerð var gerð í þrepum á árunum 2013-2017 og annarri akreininni lokað með tilheyrandi töfum, óþægindum og hættum. Aðgerðin heppnaðist vel og lítið er um sprungur í steipta slitlaginu.

Blöndubrú (byggð 1963, slitlag endurgert 2016 og 2019, ÁDU 3.000), Miðfjarðará (byggð 1965, slitlag endurgert 2017, ÁDU 1.850) og Sogsbrú (byggð 1983, slitlag endurgert 2015, ÁDU 3.950) eiga það sameiginlegt með Borgarfjarðarbrú að þar hefur slit ca. 30-40 mm verið komið að járnþvingu í efri brún og stundum dýpra. Vatnsbrotið var niður fyrir járn í efri brún og gömlum járnnum skipt út fyrir ný að hluta til og sumstaðar var bætt við járnnum, (því gömlu járnin voru orðin slitin og sum járn höfðu verið klippt burt, talin hættuleg umferð). Svo var steipt með slitsterkri trefjasteypu C100.

Reynslan leiðir í ljós að viðhald á brúm er yfirleitt framkvæmt of seint, jafnvel ekki fyrir en farið er að sjást í járn.

Yfirborð brúarinnar á Miðfjarðará var fræst með sérstakri fræsivél og talið var að það mundi nægja. Steypan reyndist þegar á reyndi það illa farin að það þurfti einnig að vatnsbrjóta og á sumum stöðum á brúnni var vatnsbrotið niður í gegnum brúargólfið.

Þegar nauðsynlegt reynist að vatnsbrjóta og uppfæra eldri járnalögn þá tekur það tíma eins og álykta má út frá myndum 31 og 32:



Mynd 31 og 32: Viðgerðir á brú yfir Miðfjarðará.



Mynd 33: Steypt slitlag lagt út á brú yfir Miðfjarðará.

Viðgerð á Ölfusárbrú var framkvæmd 2018 með því að fræsa 40-50mm lag og leggja svo C100 steypt slitlag 40-50mm þykkt yfir báðar akreinar í einu. Brúnni var lokað í 3 daga. (ÁDU 14.000).



Mynd 34: Steypt slitlag lagt út á brú yfir Ölfusá.



Útlögn á steypu slitlagi:

Það er ljóst að allar aðstæður við að leggja út þunnt slitlag ofan á yfirborð brúa eru eða eiga a.m.k. að vera miklu betri, heldur en þegar yfirborðið er hluti burðarvirkisins og endapunktur langrar steypuvinnu. Árangurinn m.t.t. sléttleika á því að vera mun betri.

Nokkur atriði sem þarf að hafa í huga við útlögn slitlaga í framtíðinni

- Yfirborð brúa sem slitlag er steyppt ofan á verður að uppfylla hrýfiskröfur skv. gr. 6.2.5 í ÍST EN 1992-2.
- Aðflutningur á steypu í slitlag verður að vera jafn og stöðugur til þess að tryggja samfellda útlögn og draga þar með úr líkum á skilum og misfellum.
- Hanna þarf steypuna þannig að hún verði sem stöðugust t.d. hvað varðar sigmál, sigmálsflæði, seigju, flotskerspennu og fleiri þætti, þ.e. verði sem minnst viðkvæm fyrir smávægilegum breytingum á vatnsmagni o.fl. Að óbreyttu þarf að nota seigjustýrða framleiðslu við steypugerð.
- Sleðagrind þarf að vera nægjanlega stíf m.t.t. útlagnarbreiddar og seigju loftlausu steypunnar, annars flyst of mikil handavinna á múrara, sem ná ef til vill ekki að slétta yfirborðið nægjanlega.
- Til álita kemur að hafa leiðara (stálrör) bæði fyrir miðri brú og við eða ofan á kantbitum (bríkum) til að auka nákvæmni, ef lagt er yfir alla brúarbreiddina í einu.
- Mikilvægt er að byrja að fínúða yfirborð steyptra slitlagsins nánast strax og lokafrágangi (kústun) er lokið á hverjum stað til þess að koma í veg fyrir sprungur, en því þarf að halda stöðugt áfram þar til breitt hefur verið yfir yfirborðið.
- Yfirborð steyptra slitlaga steyppt með flugöskusementi t.d. FA - sementi verður að halda röku lengur en yfirborði steypptu með sementi sem hér að framan eru kölluð DK eða ANL sement eða í 10 daga í stað 6 daga.
- Æskilegt er að múrarar og aðrir sem koma að útlögn sjálfpakkaðrar steypu fái innsýn í mun á henni og venjulegri steypu sem og mæliaðferðum t.d. í undirbúningssteypum á verkstað áður en útlögn hefst.



Mynd 35: Dæmi um hentuga útlagningarvél fyrir steyppt slitlag, sem notuð er víða erlendis. Steypunni er dælt þannig að aðflutningur á steypu helst stöðugur.