

Vistvæn Gæðasteypa

Áfangaskýrsla 1 2026

Dr. Gísli Guðmundsson

Dr. Ólafur Sveinn Haraldsson

Einar Einarsson

Dr. Sigríður Ósk Bjarnadóttir

Eggert Guðmundsson

Jón Elí Guðmundsson



VISTA



Efnisyfirlit

Inngangur.....	1
Prófanir	1
Steypublöndur	12
Þrýstistyrkur	13
Skrið og rýrnun	14
Fjaðurstuðull.....	20
Klóríðleiðni (NT Build 492)	25
Rýrnun – þurrkrýrnun og autogeneous rýrnun (ASTM C 157)	25
Kolsýring eftir um 110 daga í andrúmslofti og 65 % RH og 25 °C	26
Frostþol eftir kolsýringu	27
Kolefnisspor	28
Dæmi um kolefnissparnað við brúargerð.	28
Niðurstöður	29

Myndaskrá

Mynd 1. Skriðrekkar.....	3
Mynd 2. Handmælt og sjálfvirkar mælingar.....	3
Mynd 3. Skjáskot af yfirliti yfir álagsellu 1 í skriðrekka 1.	4
Mynd 4. Skjáskot af yfirliti yfir álagsellu 2 í skriðrekka 2.	4
Mynd 5. Skjáskot af yfirliti yfir álagsellu 3 í skriðrekka 3.	5
Mynd 6. Álag á sýni 5.1.	6
Mynd 7. Afmyndun í sýni 5.1 fyrstu 20 mínúturnar..	6
Mynd 8. Afmyndun í sýni 5.1 fyrstu 24 tímana (1440 mínútur).	7
Mynd 9. Afmyndun í sýni 5.1 frá upphafi mælinga þann 29/8/2025 til 04/11/2025.	7
Mynd 10. Ein frost/þíðu-sveifla sem fall af tíma.....	8
Mynd 11. Hefðbundinn frágangur á sýnum..	8
Mynd 12. Uppsetning á CHT prófun.....	10
Mynd 13. Þrýstistyrkur steypublandna sem % af styrk blöndu með Anleggsementi (Vg 3-4).....	14
Mynd 14. Niðurstöður úr handmælingum á blöndu Vg 3 á skriði t.v. og rýrnun t.h.....	14
Mynd 15. Niðurstöður úr handmælingum á blöndu Vg 5 á skriði t.v. og rýrnun t.h.....	15
Mynd 16. Niðurstöður úr handmælingum á blöndu Vg 7 á skriði t.v. og rýrnun t.h.....	15
Mynd 17. Niðurstöður úr handmælingum á blöndu Vg 10 á skriði t.v. og rýrnun t.h.....	15
Mynd 18. Niðurstöður úr handmælingum á blöndu Vg 12 á skriði t.v. og rýrnun t.h.....	15
Mynd 19. Skjámynd af sjálfvirkum streitumælingum á sýni Vg-5 í skriðrekka 2.....	16
Mynd 20. Skjámynd af sjálfvirkum streitumælingum á sýni Vg-10 í skriðrekka 3..	16
Mynd 21. Skjámynd af sjálfvirkum streitumælingum á sýni Vg-12 í skriðrekka 1.	16
Mynd 22. Skjámynd af sjálfvirkum streitumælingum sem rýrnun á sýni Vg-5..	17
Mynd 23. Sjálfvirkar streitumælingar sem rýrnun á sýni Vg-12.....	17
Mynd 24. Afmyndun sýnis 12 sem microstrain yfir allt mælingatímabilið.....	18
Mynd 25. Rýrnun í sýni 12.3 og 12.4. Sjálfvirknarmælingar með streitunemum.....	18
Mynd 26. Afmyndun skriðsýna í mm, handmælingar á y-ás og mælingar með streitunemum á x-ás.....	20
Mynd 27. Handmælingar á afmyndun fyrstu fjóra sólarhringana.	21
Mynd 28. Afmyndun Vg 5 í upphafi skriðmælinga.	22
Mynd 29. Afmyndun Vg 10 í upphafi skriðmælinga. Álagið er sýnt á neðri myndinni.	22
Mynd 30. Afmyndun Vg 10 í upphafi skriðmælinga..	23
Mynd 31. Þurrkrýrnun steypublandna eftir um 280 daga í um 50 % RH og um 23 °C.	26
Mynd 32. Kolsýring brúarsteypusýnanna..	27
Mynd 33. Brúargerð við Hornafjarðarfljót..	29

Töfluskrá

Tafla 1. Blönduhlutföll í prófblöndum.	12
Tafla 2. Loftkerfi.	12
Tafla 3. Þrýstistyrkur steypublandna, MPa..	13
Tafla 4. Heildarafmyndun Vg 3 mælt frá upphafi áður en álag var keyrt á sýnin.....	19
Tafla 5. Heildarafmyndun Vg 5 mælt frá upphafi áður en álag var keyrt á sýnin.....	19
Tafla 6. Heildarafmyndun Vg 7 mælt frá upphafi áður en álag var keyrt á sýnin.....	19
Tafla 7. Heildarafmyndun Vg 10 mælt frá upphafi áður en álag var keyrt á sýnin.....	19
Tafla 8. Heildarafmyndun Vg 12 mælt frá upphafi áður en álag var keyrt á sýnin	19
Tafla 9. Útreiknaður fjaðurstuðull og gögn sem þarf til þess að reikna út fjaðurstuðul út frá handmælingunum.	21
Tafla 10. Útreiknaður fjaðurstuðull og gögn sem þarf til þess að reikna út fjaðurstuðul út frá sjálfvirkum mælingum.....	24
Tafla 11. Niðurstöður úr f/p-prófun sem flögnun, kg/m ²	24
Tafla 12. Niðurstöður úr f/p-prófun sem vatnsupptaka, kg/m ²	24
Tafla 13. Niðurstöður úr mælingum á klóríðleiðnistuðli samkvæmt NT Build 492.....	25
Tafla 14. Þurrkrýrnun og autogeneous rýrnun samkvæmt ASTM C 157, mm/m	25
Tafla 15. Þurrkrýrnun og autogeneous rýrnun samkvæmt ASTM C 157.	26
Tafla 16. Kolsýring steypublandna.....	26
Tafla 17. Niðurstöður úr f/p-prófun sem flögnun, kg/m ²	27
Tafla 18. Niðurstöður úr f/p-prófun sem vatnsupptaka, kg/m ²	27

Vistvæn Gæðasteypa

Inngangur

Rannsóknasjóður Vegagerðarinnar veitti verkefninu Vistvæn Gæðasteypa styrk árið 2025.

Aukin umhverfisvitund og aðgerðir í loftslagsmálum eru nauðsynlegar til þess að sporna gegn hækkun hitastigs á jörðinni. Sements- og steypuiðnaðurinn losar mikið af CO₂ út í andrúmsloftið en þessi iðnaður vinnur nú hörðum höndum að því að minnka kolefnisspor steypunnar. Íslensk brúarsteypa er með tiltölulega mikið af sementi í hverjum rúmmetra af steypu og þar af leiðandi með hátt kolefnisspor. Í dag eru í boði lausnir sem draga úr sementsmagni í t.d. brúarsteypu. Þær fela í sér að nota íauka í stað sements. Íaukar eru fín malað efni, bæði náttúrulegt og afurðir úr iðnaðarferlum.

Markmið með þessu verkefni er að aðlaga brúarsteypu Vegagerðarinnar að steypu með lágu kolefnisspori, án þess að hafa áhrif á steypuframleiðslu, steypugæði og endingu mannvirkja.

Í þessari skýrslu verður gerð grein fyrir þeim rannsóknum sem gerðar voru í verkefninu árið 2025.

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

Prófanir

Í þessu verkefni voru steyptar fimm mismunandi steypublöndur. Tvær viðmiðunarblöndur voru steyptar. Önnur þeirra var byggð á gamalli uppskrift á brúarsteypu með aðeins Anleggsementi, þ.e. áður en byrjað var að nota kísilryk (KR) í steypu. Kísilryk kom á markaðinn árið 1979. Hin viðmiðunarsteypa var með Anleggsementi og kísilryki. Síðan var steypst steypa með flugöskusementi, svo steypa með flugöskusmenti og kísilryki og að lokum steypa með móbergi.

Miðað var við að brúarsteypa væri með 400 kg/m³ af sementi eða bindiefni og v/b-hlutfallið væri 0,4. Í blöndum Vg-7/8, Vg-9/10 og Vg-11/13 var v/b-hlutfallið lækkað niður í 0,37 (sjá steypusamsetningu í Töflu 1). Notað var um 25 kg/m³ af kísilryki og 80 kg/m³ af móbergi.

Eftirfarandi prófanir voru gerðar:

- Þrýstistyrkur - 2, 28 og 90 daga.
- Skrið og rýrnun – 90 daga sýni – langtíma prófun sem mun standa yfir í nokkur ár.
- Fjaðurstuðull – 90 daga ákvarðaður í skriðrekka.
- Frostþol – flögnun og vatnsupptaka.
- Klóríðleiðni (NT Build 492) - 28 og 90 daga.
- Rýrnun – þurrkrýrnun og autogeneous rýrnun – prófunum ekki lokið, prófanirnar munu standa í eitt ár.
- Kolsýring eftir um 110 daga í andrúmslofti og 65 % RH og 25 °C.
- Frostþol eftir kolsýringu.

Einnig stóð til að koma sýnum fyrir í veðrunarstöðvum. Ákveðið var að bíða með það.

Þrýstistyrkur

Þrýstistyrkur var ákvarðaður eftir hörðun í 2, 28 og 90 daga. Sýnin voru geymd við > 99 % RH og um 23 °C. Þrýstistyrkur var ákvarðaður í nýrri 300 tonna Matest pressu. Pressan er kvörðuð af þriðja aðila. Sýnin voru 10x20 cm sívalningar. Þrýstistyrkur fyrir hvern hóp var ákvarðaður á þremur hlutsýnum.

Skrið og rýrnun

Skrið og rýrnun var mæld í öllum blöndunum. Sýnin voru 15x30 cm sívalningar. Tveimur sívalningum af hverju sýni var komið fyrir í skriðrekkunum og þurrkrýrnun var mæld á tveimur sívalningum. Rýrnunarsýnin stóðu upp á endann utan skriðrekkanna. Tjöruborði var límdur á endana á rýrnunarsýnunum. Þannig var verið að líkja eftir sýnunum sem staflað var upp í skriðrekkunum, sjá mynd 1.

Áætlað var að hefja prófanir þegar sýnin voru 28 daga, en vegna ófyrirséðra atvika hófust þessar mælingar ekki fyrr en á 90 daga sýnum. Sýnin voru geymd í >99 % RH og um 23 °C áður en prófanir hófust. Prófanirnar byrjuðu þann 29/8/2025. Gert er ráð fyrir að þær standi yfir í nokkur ár. Prófanirnar voru gerðar við um 50 % RH loftraka og um 23 °C lofthita.

Álag sem sett var á sýnin var ákvarðað út frá þrýstistyrk sýnanna. Miðað var við að álagið væri um um 40 % af 90 daga styrk. Þar sem tvö og tvö sýni deildu sama skriðrekka og eitt sýni var stakt í skriðrekka, gekk þetta plan ekki alveg eftir en álagið varð á bilinu frá 34 til 49 % af 90 daga styrk.

Skrið og rýrnun var handmæld reglulega í öllum sýnunum með handmæli sem sýndur er á mynd 2. Skrið og rýrnun var síðan mæld með streitunemum sem voru tengdir við sjálfvirkan skráningarbúnað. Skrið var mælt með streitunemunum í steypublöndum Vg 5, Vg 10 og Vg 12 og rýrnun var mæld með nemum í steypublöndum Vg 5 og Vg 12. Þegar þetta er ritað hafa 19 handmælingar verið gerðar. Upphafsmælingin var gerð áður en sýnunum var komið fyrir í rekkunum. Næsta mæling var gerð eftir að álagið hafði verið á sýnunum í 60 mínútur. Síðan voru tvær mælingar gerðar næsta sólarhring og svo ein á sólarhring, alls sex sinnum. Svo kom ein mæling eftir þrjá daga, síðan á um viku fresti, alls fimm sinnum. Svo tóku við tvær mælingar á mánaðarfresti og að lokum er síðasta mælingin tekin eftir þrjá mánuði.

Sjálfvirkar mælingar á streitunemunum eru teknar á einnar mínútu fresti.

100 tonna álagssellur eru í hverjum rekka sem skrá álagið sjálfvirk á mínútu fresti. Með álagssellunum er fylgst með álaginu á sýnunum í skriðrekkunum. Álag í skriðrekkum hefur tilhneigingu til þess að lækka með tíma vegna ýmissa ástæðna, en aðallega vegna formbreytinga í sýnunum. Af þessum sökum þarf að auka álagið á sýnin, oftast í upphafi prófana og svo sjaldnar þegar líður á prófunina.

Umhverfishiti og raki eru skráðir sjálfvirk á mínútu fresti. Rakanum er stýrt með rakatækjum og hitanum er stýrt með rafmagnsofni. Framan af gekk illa að stýra hitastiginu og hafði það áhrif á rakastigið í rýminu. Af þessum sökum kom í ljós að sjálfvirku skriðmælingarnar eru mjög næmar fyrir breytingum á hita- og rakastigi. Á myndum 3 til 5 má sjá hvernig álagið, hitastigið og rakinn hafa breyst yfir tímabilið, reyndar vantar fyrstu vikuna. Eins og sjá má þá hefur álagið breyst nokkuð, sérstaklega í skriðrekka 1. Vonir standa til að betra jafnvægi hafi náðst með betri hitastýringu í rýminu.



Mynd 1. Skriðrekkar. Á myndinni t.v. má sjá skriðrekkana þar sem sjá má streitunema. Streitunemana má einnig sjá á myndinni t.h. Sívalningarnir sem standa í hillunum hægra megin á myndinni t.v. er sívalningarnir sem voru notaðir í rýrnunarmælingar. Sjá má að endar rýrnunarsívalningana eru með tjöruborða.



Figure 3-5: A strain gauge and equipments to measure creep.

The strain gauge used to measure creep is old but accurate equipment. To convert the readings to millimetres it necessary to multiply by 0.156 (see Appendix E).

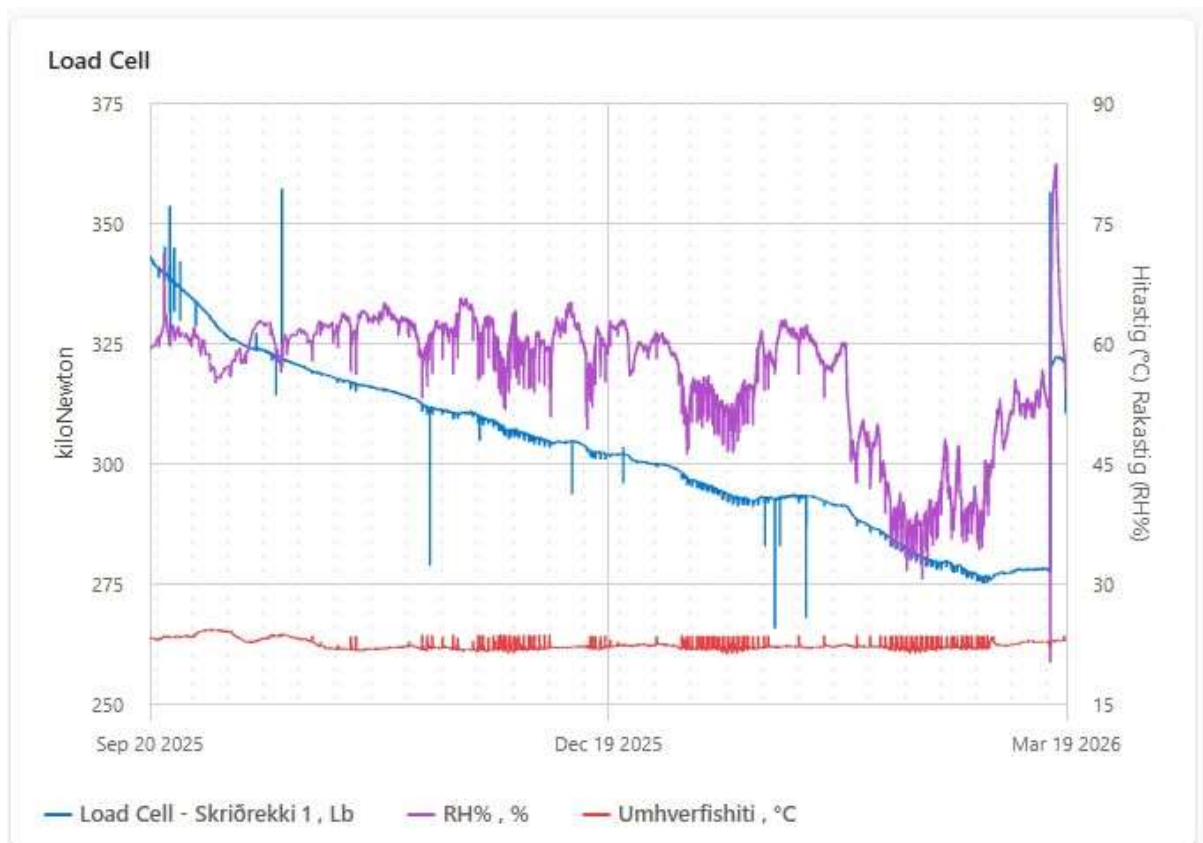


**Model 4000 Series
(4050 included)
Vibrating Wire Strain Gauges**
Instruction Manual

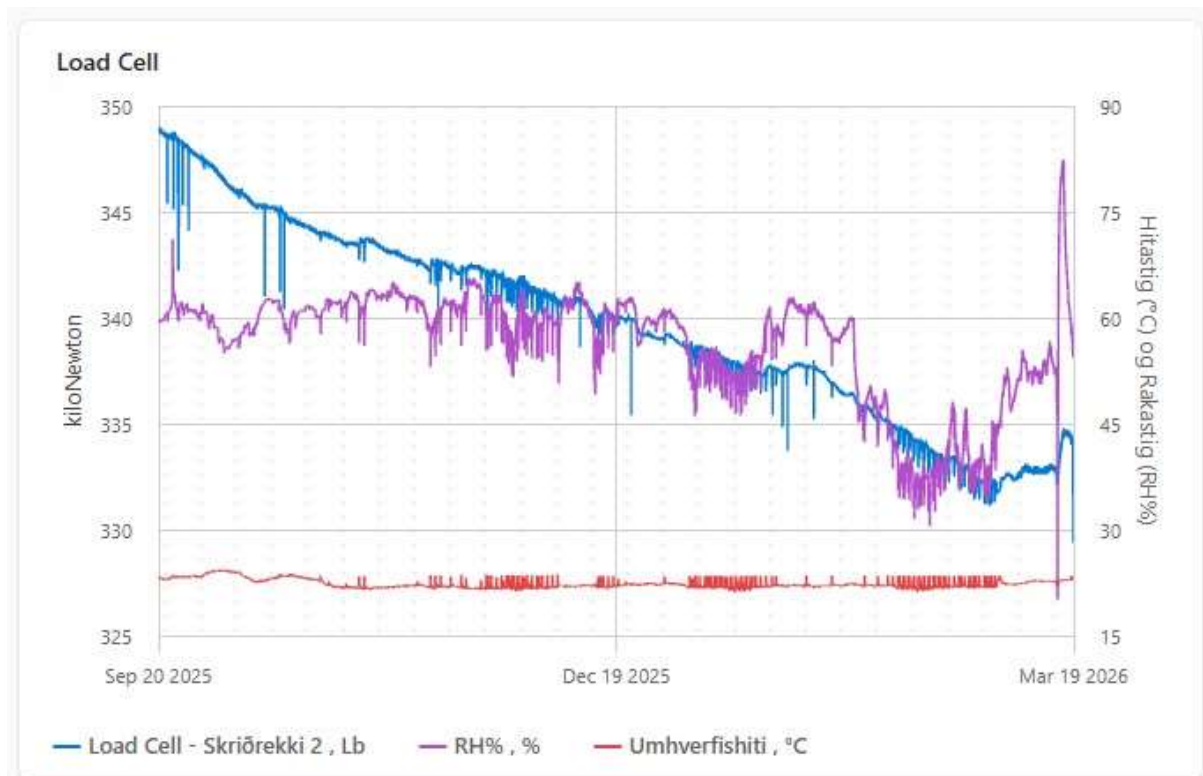


Mynd 2. Handmælt og sjálfvirkar mælingar. Mynd til hægri frá: Jóhanni Albert Harðarsyni, 2015¹.

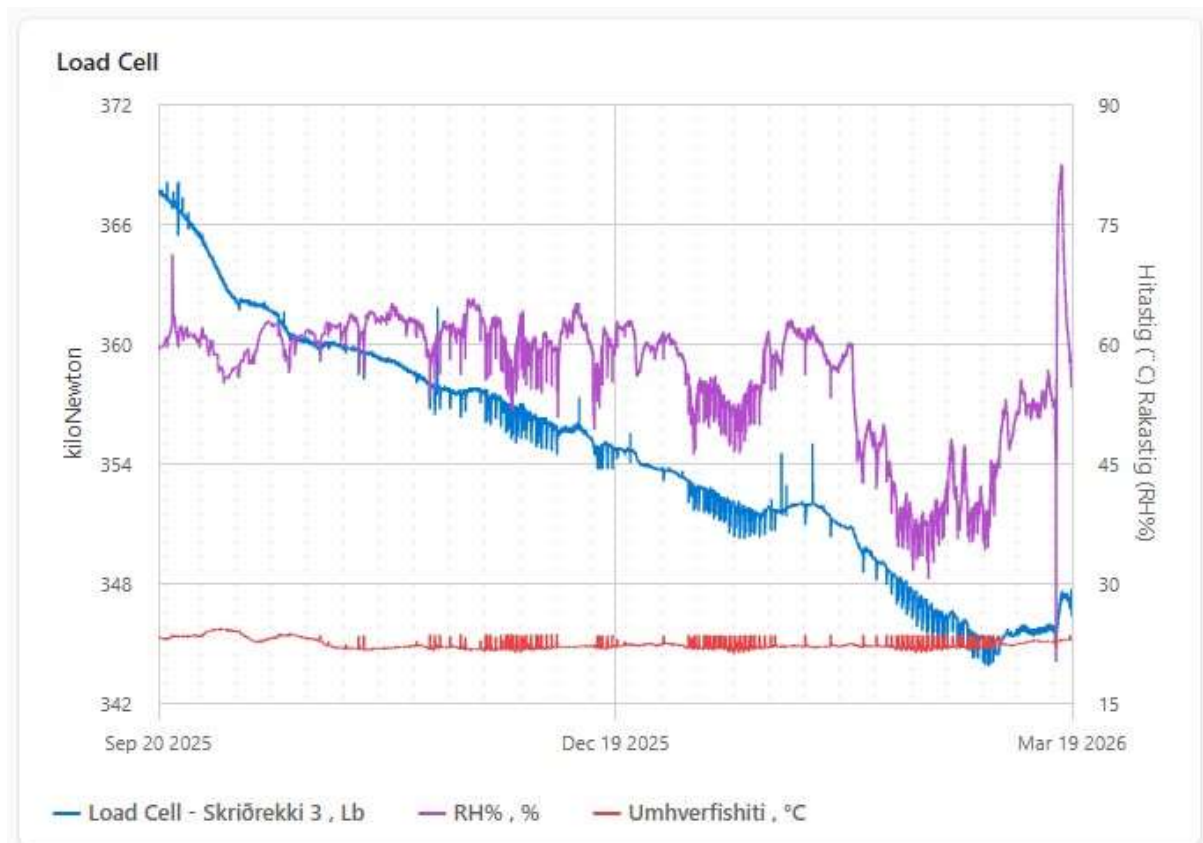
¹ Jóhann Albert Harðarson, 2015. Stree-dependent Deformations of Concrete using Porous Aggregates. Master thesis, Reykjavik Univeristy, 97 pages.



Mynd 3. Skjáskot af yfirliti yfir álagsellu 1 í skriðrekka 1 yfir tímabilið frá september 2025 til mars 2026, ásamt hita og raka í skriðherberginu. Sýni Vg-3 og Vg-12 eru í þessum skriðrekka.



Mynd 4. Skjáskot af yfirliti yfir álagsellu 2 í skriðrekka 2 yfir tímabilið frá september 2025 til mars 2026, ásamt hita og raka í skriðherberginu. Sýni Vg-5 og Vg-7 eru í þessum skriðrekka.



Mynd 5. Skjástot af yfirliti yfir álagsellu 3 í skriðrekka 3 yfir tímabilið frá september 2025 til mars 2026, ásamt hita og raka í skriðherberginu. Sýni Vg-10 er í þessum skriðrekka.

Fjaðurstuðull

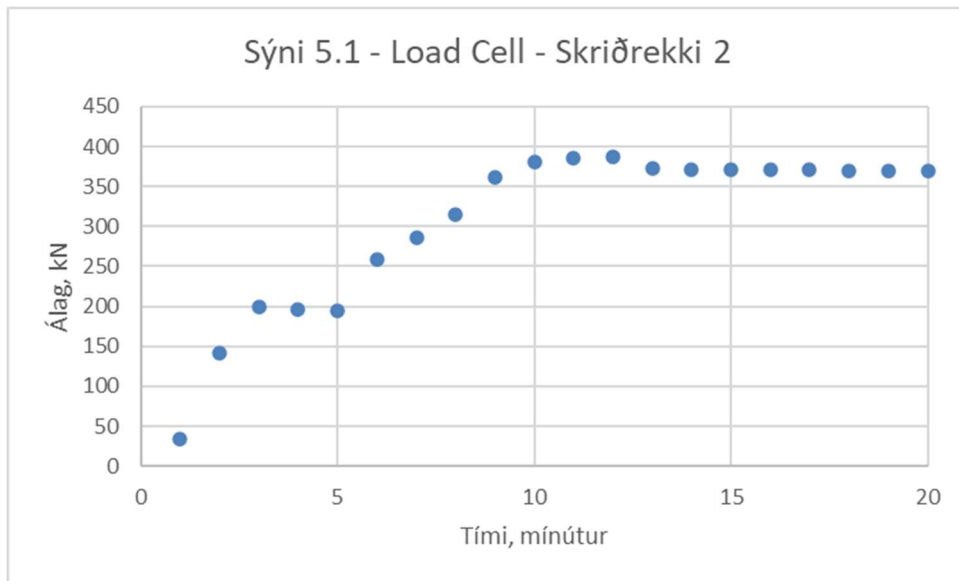
Ákvörðun á fjaðurstuðli (E_c) var hluti af skriðmælingunum. Þegar álag er keyrt upp á skriðsýnum, afmyndast sýnin í takt við álagið, mest á fyrstu klukkutímunum en með tímanum hægir á afmyndunni. Upphafsafmyndunin er notuð við ákvörðun á fjaðurstuðli. Var það gert, bæði fyrir handmælingarnar og einnig fyrir sjálfvirku streitumælingarnar. Á myndum 6 til 9 má sjá hvernig sýni 5.1 bregst við álagi, mest afmyndun á sér stað í upphafi álagsferils. Eftir um 20 mínútur er afmyndunin orðin 75 % af afmynduninni sem hefur átt sér stað í sýni 15.1 eftir 67 daga, sjá mynd 9. Þessi afmyndun í upphafi álagsprófana eins og skriðprófana hefur verið skilgreind sem fjaðurstuðull. Afmyndun í sýni 5.1 fyrstu 20 mínúturnar er ósamfelld eftir 5-6 mínútur vegna þess að álagið var ekki keyrt samfelld á sýnið, sjá mynd 6.

Fjaðurstuðull fyrir allar blöndurnar voru ákvarðaðar bæði með handmælingum og með streitunumum.

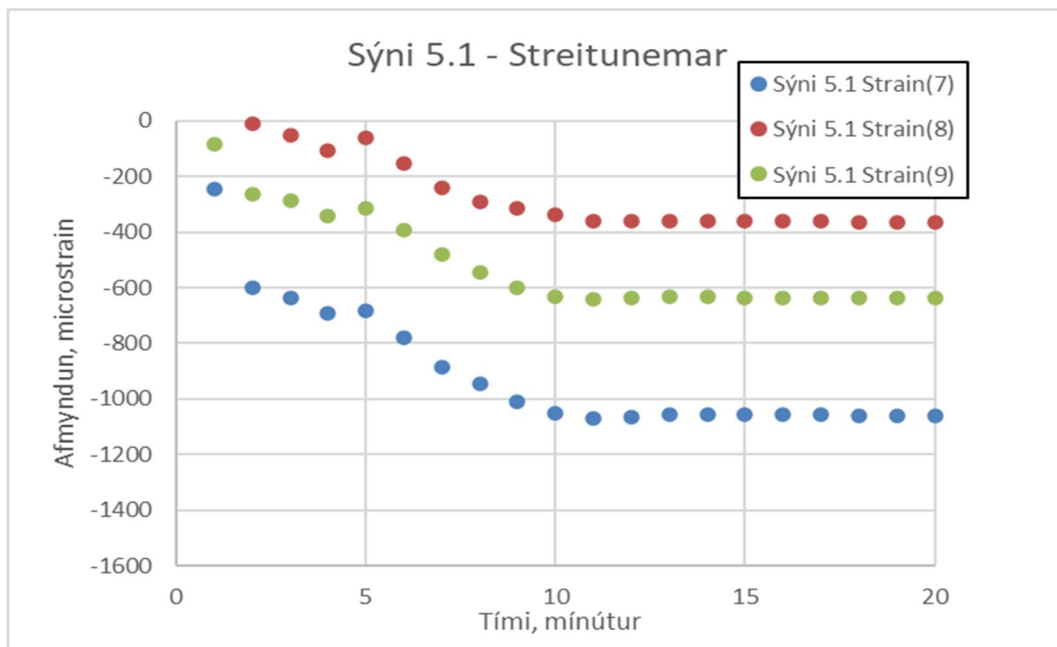
Fyrir handmælingar var eftirfarandi jafna notuð:

Fjaðurstuðulinn var reiknaður samkvæmt:

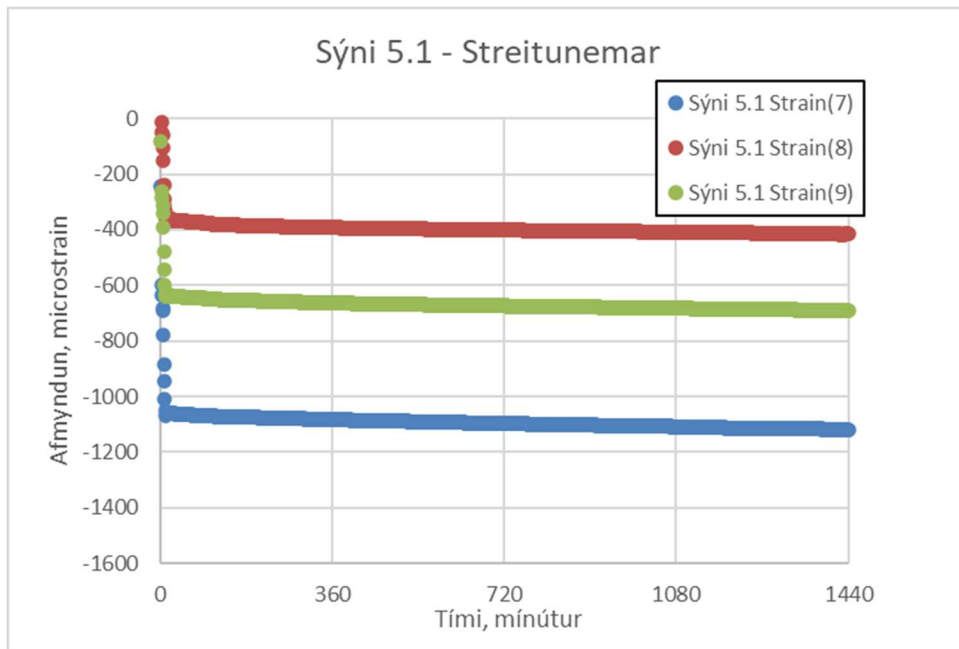
$$E_c = ((\text{Álag við fyrstu handmælingu (MPa)} - \text{Upphafsálag (MPa)}) / \text{Afmyndun (mm)}) / 1000 \quad (1)$$



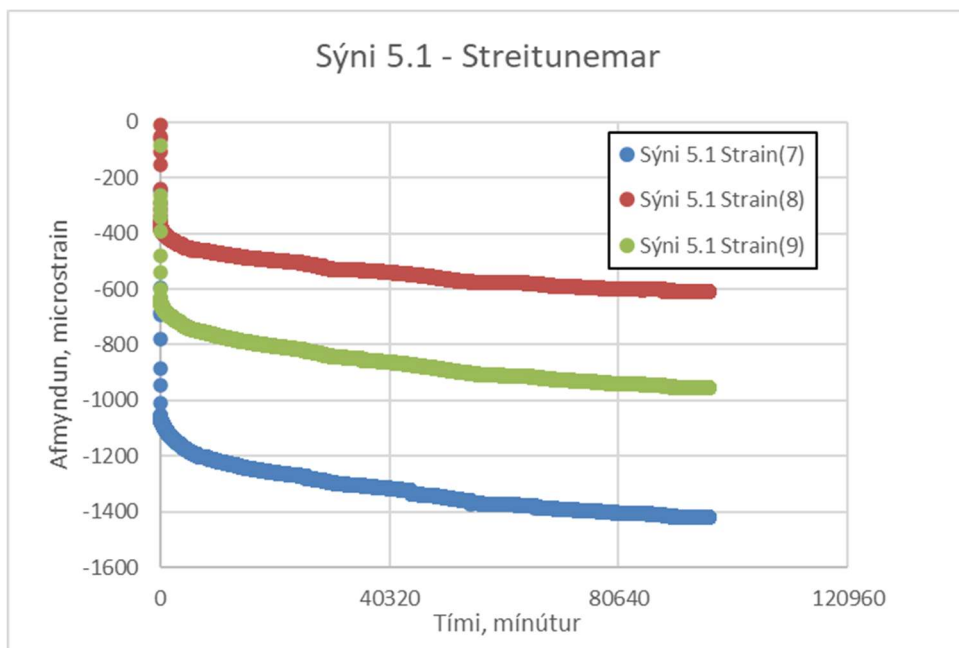
Mynd 6. Álag á sýni 5.1.



Mynd 7. Afmýndun í sýni 5.1 fyrstu 20 mínúturnar. Ósamfellur í ferlum eftir 5-6 mínútur eru vegna þess að álagið var ekki keyrt samfellt á sýnið.



Mynd 8. Afmyndun í sýni 5.1 fyrstu 24 tímana (1440 mínútur).

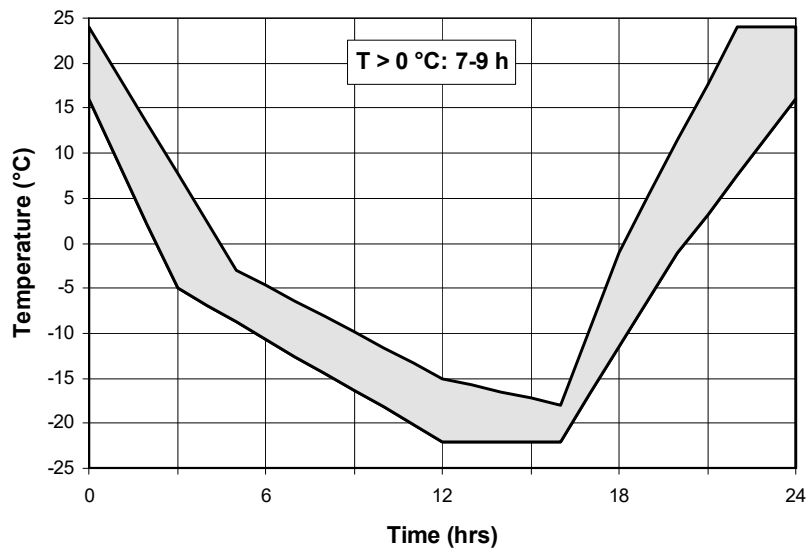


Mynd 9. Afmyndun í sýni 5.1 frá upphafi mælinga þann 29/8/2025 til 04/11/2025.

Frost/þíðu-prófanir

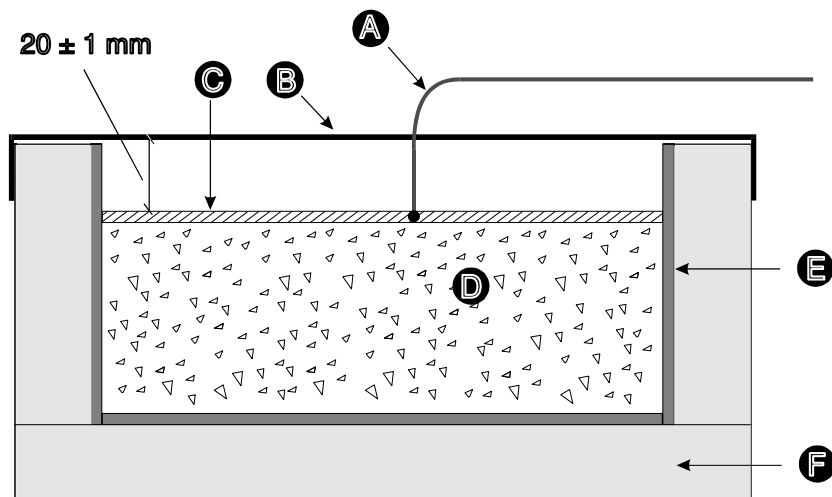
Frostþol sem flögnun og vatnsupptaka, var aðeins prófað með 3 % NaCl lausn samkvæmt prófunaraðferðinni SS 137244, sambærilegt við prófunaraðferðina ÍST CEN/TS 12390-9 með salti. Kröfur í byggingarreglugerð ganga út á yfirborðsflögnun sem á sér stað í prófsýnum ef þau eru prófuð með 3 % saltlausn. Miðað er við að yfirborðsflögnun sé minni en 2 kg/m^2 í steypu í styrkleikaflokki C25/30. Þegar sýni eru prófuð taka þau einnig upp vatn, en vatnsupptakan er að öllu jöfnu ekki hluti af prófuninni. Samt sem áður er vatnsupptaka mjög mikilvægur liður þegar kemur að frostþoli steinsteypu bæði í stöðluðum prófunum sem og í frostþoli steinsteypu í mannvirkjum. Í þessari rannsókn var bæði flögnun og vatnsupptaka mæld.

Í prófuninni er hitastigssveiflan frá +20 °C til –20 °C, sjá mynd 3. Sérhver frost/þíðu-sveifla stendur í 24 tíma.



Mynd 10. Ein frost/þíðu-sveifla sem fall af tíma. Hitastigið í frostleginum á ætíð að vera innan skyggða svæðisins.

Hefðbundinn frágangur á sýnum í prófun er sýndur á mynd 4. Vanalega eru sýnin kubbslaga 15x15x5 cm, en þau geta einnig verið 15 cm sívalningar sem eru 5 cm þykkir. Miðað við að prófa þrjár 15x15x5 cm sneiðar.



Mynd 11. Hefðbundinn frágangur á sýnum. A = hitamælir, B = þunnt plast, sem kemur í veg fyrir uppgufun, C = frostlögur, D = sýni, E = kítta, F = hitaeinangrun.

Sýnin sem 15x15x5 cm kubbar voru geymd í mótunum í 24 tíma, síðan voru þau geymd í 6 daga í 100 % RH, þ.e. þau sýni sem voru prófuð þegar þau höfðu náð 28 daga hörðun. Sýnin sem voru prófuð þegar þau höfðu náð 90 daga hörðun voru geymd til viðbótar í 77 daga í 100 % RH. Eftir það voru 90 daga sýnin geymd í 14 daga í 65 % RH. Þá voru sýnin söguð niður í 5 cm þykkar sneiðar og geymd til viðbótar í 7 daga í 65 % RH. Á þessu tímabili voru sneiðarnar, hver fyrir sig kítuð í plastmót. Í öllu þessu ferli voru sýnin við 20 °C. Að loknu þessu tímabili var sett 3 mm

djúpt vatnslag ofan á sneiðarnar og látið standa í þrjá sólarhringa. Þetta tímabil er kallað endurvötnun (e. resaturation). Að þessu loknu eru sýnin tilbúin í f/p-prófun.

Frostlögurinn sem liggur ofan á sýninu skal vera í um 3 mm þykku lagi. Vanalega er lögurinn 3 % NaCl-lausn, en hann getur einnig verið hreint vatn. Hreint vatn var ekki notað í þessari rannsókn.

Flögnun, F_i (kg/m²) er mæld þannig að yfirborðsflögnuninni er safnað saman og hún þurrkuð í 24 tíma við 105 °C. Alls eru sýnin keyrð í 56 daga eða 56 frost/þíðu-umferðir. Prófunin gengur út á að mæla yfirborðsflögnun eftir 7, 14, 28, 42 og 56 daga. Flögnunin (F_i , sem kg/m²) er reiknuð út á eftirfarandi hátt:

$$F_i = f_i/A \quad (2)$$

þar sem:

f_i = flögnun eftir í f/p-umferðir
 A = flatarmál sýnis, (m²).

Þegar prófsýni eru prófuð í 3 % NaCl lausn gengur vatn inn í prófsýnin. Vatn gengur inn í sýnin en ekki saltlausn vegna þess að leiðni vatns inn í steypu er mun meiri en leiðni salts (sem Cl og Na jónir). Vatnið sem gengur inn í steypu er mælikvarði á hvort s.k. innri skemmdir eigi sér stað í steypunni. Vatnsupptaka í prófsýnunum var mæld samhliða flögnunarmælingunum. Vatnsupptakan, V_i (kg/m²) er mæld þannig að þegar búið er að taka flögnun ofan af sýninu, er sýnið þurrkað þannig að það sé yfirborðsþurrt og síðan er það vegið. Vatnsupptakan (V_i) er reiknuð út á eftirfarandi hátt⁵:

$$V_i = \frac{(v_i - v_o)}{A} + F_i * 1,06 \quad (3)$$

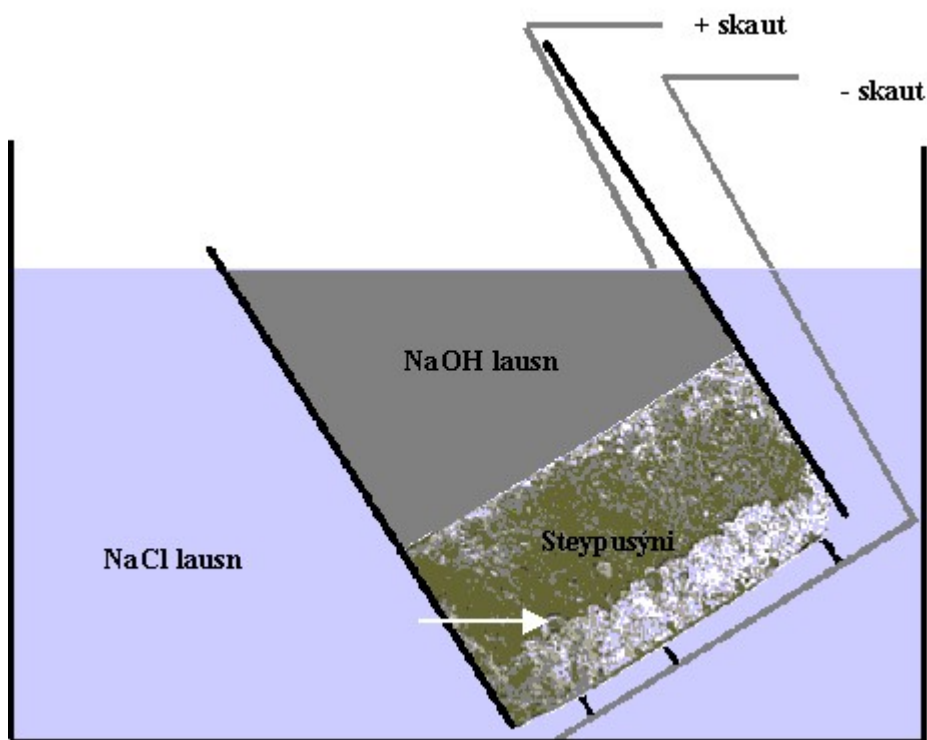
þar sem:

v_i = er þyngd sýnis eftir í f/p-umferðir (kg)
 v_o = er þyngd sýnis í byrjun prófs (kg)
 A = flatarmál sýnis (m²)
 F_i = flögnun eftir í f/p-umferðir (kg/m²), reiknað er með að flagnaða efnið innihaldi 6 % raka.

Klóríðleiðni

Leiðni klóríðs inn í steinsteypusýni var mæld með s.k. CHT-leiðnitæki. Uppsetning tækisins er sýnd á mynd 12. Í vatnslausn myndar klór mjög jóníska lausn (e. strong ionic solution). Þess vegna er styrkur klórs háður spennu umhverfisins. Sem dæmi má nefna að í steinsteypu sogast klórjónir á pósítíft hlaðna fleti eins og t.d. loftbólueggi og bindast þar fastar. Með rafstraumi er hægt að flytja klór með leiðni inn í steinsteypu. Áðurnefnd CHT prófunaraðferð, sem er sama aðferðin og er lýst í NT Build 492 staðlinum, og aðrar sambærilegar, ganga út á að með tiltölulega sterkum rafstraum er hægt að draga klór inn í steypu. Út frá niðurstöðunum er hægt að reikna út leiðnistuðul fyrir klóríð í viðkomandi steypusýni.

Markmið með klóríðleiðniþrófunum í þessu verkefni er að fá hugmynd um þéttleika mismunandi steinsteypublandna, svo og hvaða áhrif íaukar og aldur steypunnar hafa á þéttleikann.



Mynd 12. Uppsetning á CHT prófun. Á myndinni er einnig sýnt dæmi um niðurstöður úr prófuninni. Spennan á milli skautanna er 30 volt og straumurinn er á milli 1 – 10 amp. Örin bendir á klórfrontinn í steypusýninu sem er til prófunar. Í þessu tilviki náði hann um 15,8 mm inn í sýnið eftir um 112,5 tíma prófun. Þetta samsvarar því að leiðnistuðullinn sé $1,52 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sek}$.

Leiðnistuðullinn er fundinn á eftirfarandi hátt:

$$DCTH = (RT/zFE) * ((Xd - \alpha \sqrt{Xd})/t) \quad (4)$$

þar sem

$$E = (U-2)/L(2)$$

og

$$\alpha = 2 \sqrt{(RT/zFE)} * \text{erf}^{-1}(1 - (2Cd/C_0)) \quad (5)$$

Í þessum jöfnum er:

DCHT = leiðnistuðull (m^2/s)
 z = hleðsla jóna
 F = Faradayfastinn, $F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ (J/Vmol)}$
 U = heildarspenna (volt), í CHT prófuninni er heildarspennan 30 volt
 R = gasfastinn, $R = 8,314 \text{ (J/Kmol)}$
 T = meðalhitastig (K)
 L = þykkt sýnis (m), í CHT prófuninni er sýnaþykktin um 50 mm
 X_d = meðaldýpt klórs inn í sýnið (m)
 t = lengd mælingar (sekúndur)
 erf^{-1} = einn á móti error falli, í CHT prófuninni er $\text{erf}^{-1} = 1,28$
 C_d = styrkur klórs við litabreytinguna ($C_d = 0,07$ fyrir venjulega steypu)
 C_0 = styrkur klórs í vökva

Jöfnu 4 er hægt að daga saman á eftirfarandi form:

$$D_{CTH} = \{ [0,0239 * L * (273+T) / (U-2) * t] * [X_d - 0,0238 * \sqrt{L * X_d * (273+T) / (U-2)}] \} \quad (6)$$

þar sem

D_{CHT} = leiðnistuðull * 10^{-12} (m²/s)
U = heildarspenna (V)
T = meðalhitastig (°C)
L = þykkt sýnis (mm)
 X_d = meðaldýpt klórs inn í sýnið (mm)
t = lengd mælingar (klst)

Fyrir meðhöndlunina voru sýnin sem eru 10x20 cm sívalningar geymd í 100 % RH. Viku fyrir prófanir voru sívalningarnir sagaðir niður í 5 cm sneiðar. Að öllu jöfnu eru prófaðar þrjár sneiðar per prófblöndu. Eftir sögunina var sýnunum aftur komið fyrir í 100 % RH. Fyrir hverja prófun er sýnið þurrkað undir lofttæmi í um 3 tíma og síðan er Ca(OH)₂-mettaðri lausn dælt yfir sýnið. Það er látið liggja um 18 tíma í lausninni, einnig undir lofttæmi. Þetta er gert til að tryggja að rakastig sýna sé svipað þegar þau eru prófuð og því hægt að bera niðurstöðurnar saman fyrir mismunandi steypublöndur. Í formeðhöndlunarferlinu var vatnsupptakan mæld (mg/cm² 24 hrs).

Við prófunina er 30 - 60 volta spenna sett á sýnið. Spennan er hæfilega mikil til þess að vega upp á móti staðbundinni spennu í steypunni. Spennan er ekki svo mikil að hún hafi mikla hættu í för með sér eða valdi hitabreytingum í sýninu. Lengd hverrar prófunar fer eftir hve mikinn straum sýnið dregur. Ef sýnið er þétt þá þarf að keyra sýnið nokkuð lengi eða þá að auka spennuna. Ef sýnið er opið þá getur prófunin tekið mjög stuttan tíma, aðeins nokkurra stunda keyrsla getur verið nóg.

Sýnunum er komið fyrir í gúmmíhulsu með 0,3M NaOH lausn fyrir ofan sýnin og í 10% NaCl lausn utan við gúmmíhulsuna, sjá mynd 12. Við ákvörðun á klóríðleiðnistuðli er klóríð dregið inn í sýnið með rafstraumi. Þannig tekur prófunin tiltölulega stuttan tíma, vanalega innan við 48 tíma. Tímalengd hverrar prófunar ræðst af þéttleika viðkomandi sýnis, spennu og hve langt klóríð er látið ganga inn í sýnið. Klóríðið sem gengur inn í sýnið myndar klóríðríkt lag, þetta lag er síðan hægt að framkalla með því brjóta sýnið í tvennt og væta yfirborðið með AgNO₃ lausn. Þar sem klóríð er til staðar í prófsýni myndast grár AgCl-fasi, annars verður sýnið brúnleitt. Þykkt klóríðlagsins ásamt þykkt sýnisins er síðan mæld. Út frá upplýsingum í staðlinum er síðan hægt að ákvarða klóríðleiðnistuðul fyrir hvert sýni. Jafnframt því að mæla þykkt klóríðlagsins var þyngd hvers sýnis mæld fyrir og eftir prófun. Fyrir hvert sýni var síðan reikna út hve mikið sýnin þyngdust per klukkustund (g/klst) og hve hratt klóríð gekk inn í sýnin (mm/klst).

Rýrnun

Þurrkrýrnun og autogeneous rýrnun voru mældar samkvæmt staðlinum ASTM C 157. Sýnin voru strendingar 7,5 x 7,5 x 25 cm að stærð. Eftir að búið var að steypa í mótin, þrjá strendinga úr hverri blöndu, voru sýnin höfð í mótunum í einn sólarhring. Sýnin voru lengdar- og þyngdarmæld og síðan komið fyrir í vatnsbaði í 27 daga. Sýnin sem fóru í þurrkrýrnun voru lengdar- og þyngdarmæld eftir vatnsbaðið og síðan var fylgst með lengd og þyngd reglulega í eitt ár við 50 % RH og 23 °C. Sýnin sem fóru í autogeneaous rýrnunarmælingar voru geymd í vatnsbaði við 23 °C í eitt ár og fylgst með lengd og þyngd reglulega.

Kolsýring

Kolsýring var mæld eftir um 110 daga í andrúmslofti og 65 % RH og 25 °C. Phenoltalein lausn var úðað á ferskt brotsár. Kolsýrðsteypa verður ólituð en ókolsýrðsteypa litast bleik með phenoltaleinlausn.

Steypublöndur

Í töflu 1 eru blönduhlutföllin í steypublöndunum gefin.

Tafla 1. Blönduhlutföll í prófblöndum.

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
Steypudagur	04/06/2025	05/06/2025	11/06/2025	12/06/2025	19/06/25
	400Anlegg	375Anlegg25KR	400FA	375FA25KR	Ind320/VPA80
Sement - Anlegg, kg/m ³	410	386			
Flugöskusement, kg/m ³			401	379	
Industry sement, kg/m ³					312
Kísilryk, kg/m ³		25,4		25,2	
Móberg, kg/m ³					78,0
Vatn, kg/m ³	164	163	148	148	143
V/b-hlutfall	0,4	0,4	0,37	0,37	0,37
Sandur (0-4), kg/m ³	812	755	758	759	736
Möl (4-16), kg/m ³	1024	1055	1059	1061	1029
Flot- og loftblendi, kg/m ³	8,4	8,2	8,8	8,7	8.8

Sementið í öllum blöndunum var norskt. Blöndur Vg 3-4 og 5-6 voru með Anlegg sement (CEM I 52,5 N), blöndur Vg 7-8 og 9-10 voru með flugöskusement (CEM II/A-V 42,5N) og blöndur Vg 11-13 voru með Industrisement (CEM II/A-L 42,5). Blöndur Vg 5-6 og Vg 9-10 voru með kísilryki frá Járblendiverksmiðjunni á Grundartanga (Elkem Island). Flugöskusementið er 18 % af íblandaðri flugösku og 6 % af íblönduðum kalksteini. Móbergið var fengið hjá Björgun, það var skilgreint með 5 mikron kornastærð.

Fylliefnið var það sama í öllum blöndunum, sandur og möl frá Björgun. Hámarkskornastærðin var 16 mm.

Flot- og loftblendiefni var fengið hjá Kemís.

Allar blöndurnar voru hafðar vel flæðanlegar, eiginlega sem sjálfútleggjandi. Sigmálið var á bilinu frá 230 til 270 mm og sigmálsflæðið var 410 til 630 mm. Enginn aðskilnaður átti sér stað.

Miðað var við að loftmagnið væri 7-8 %. Loftmagnið var bæði mælt í blautri steypu og talið í harðnaðri steypu og gæði loftkerfisins metið. Niðurstöður úr greiningum á loftmagninu eru gefnar í töflu 2.

Tafla 2. Loftkerfi.

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
Loft (fersk steypa), %	6,6	5,5	8,2	7,5	9,5
Talið loft, % (5 %)	7,7	9,2	7,3	10,4	9,4
Fjarlægðarstuðull, mm (< 20 mm)	0,14	0,08	0,12	0,09	0,09
Yfirborð loftból, mm ⁻¹ (> 25 mm ⁻¹)	17	21	24	21	20

Miðað við að loftmagnið ætti að vera 7-8 %, miðað við talið loftmagn þá varð það aðeins í hærri kantinum fyrir blöndur Vg 5-6, Vg 9-10 og Vg 11-13. Fjarlægðarstuðulinn er mjög góður, en yfirborð loftbóla í hærri kantinum. Miðað við þessar niðurstöður ættu steypublöndurnar að vera frostþolnar.

Þrýstistyrkur

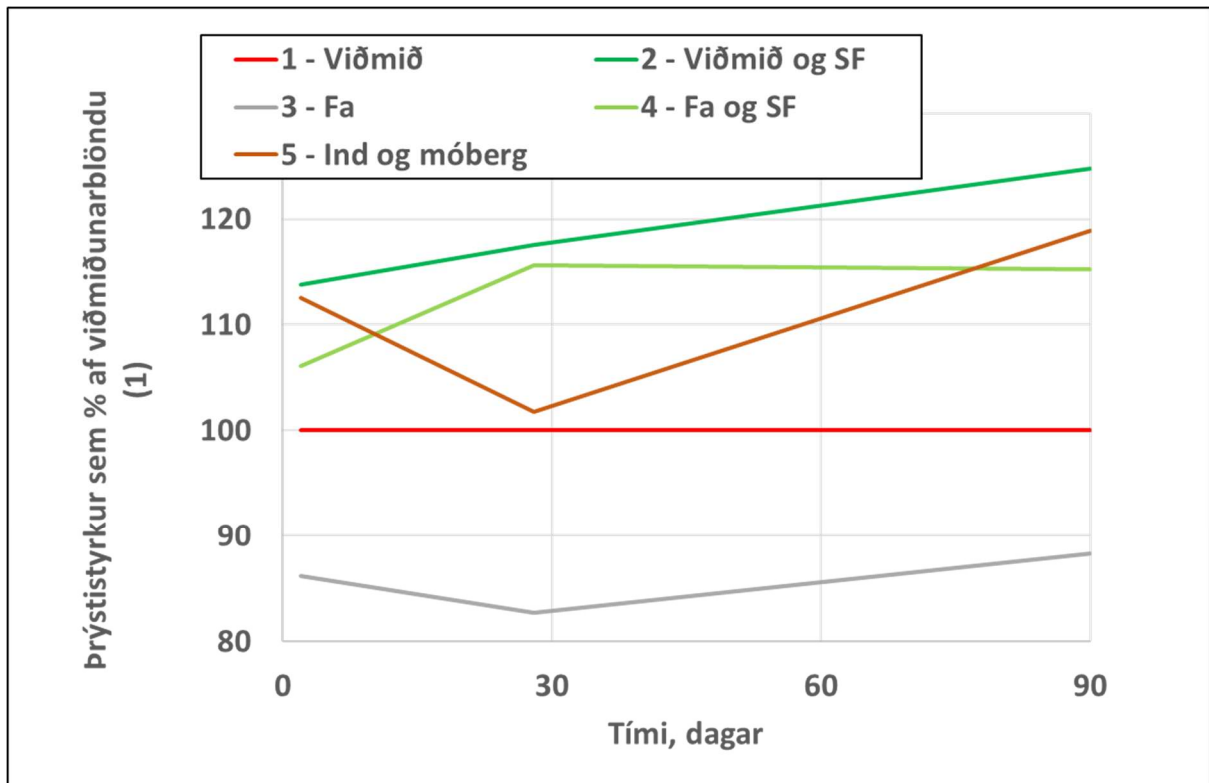
Þrýstistyrkur steypublandnanna var ákvarðaður þegar blöndurnar voru 2, 28 og 90 daga gamlar, sjá töflu 3. Sýnin voru geymd í mótunum í sólarhring og síðan látin harðna við > 99 % RH, uns þrýstistyrkur var ákvarðaður. Sýnin voru 10x20 cm sívalningar.

Tafla 3. Þrýstistyrkur steypublandna, MPa. Hvert gildi er meðaltal þriggja mælinga.

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
Þrýstistyrkur MPa, 2 daga	27,4	31,2	23,6	29,1	30,9
Þrýstistyrkur MPa, 28 daga	43,5	51,4	36,0	50,3	44,3
Þrýstistyrkur MPa, 90 daga	47,6	59,4	42,0	54,8	56,4

2 daga styrkur var um og yfir 30 MPa fyrir allar blöndurnar nema steypublönduna með flugösku sem var með um 24 MPa 2 daga styrk. Blöndurnar með kísilryki voru með 28 daga styrk um 50 MPa. Blandan með hreinu Anleggsementi og með Industrisementi og móbergi voru með 28 daga styrk um 44 MPa og blandan með flugösku var með lægstan 28 daga styrk, 36 MPa. Blandan með Anleggsementi og kísilryki var með hæstan 90 daga styrk, um 60 MPa. Blöndur með flugösku og kísilryki og með industrisementi og móbergi voru með 90 daga styrk um 55 MPa, blandan með hreinu Anleggsementi var með um 48 MPa styrk og blandan með flugöskusementi var með lægstan 90 daga styrk, um 42 MPa. Þegar þessar tölur eru bornar saman þarf að hafa í huga að v/b-hlutfallið var aðeins lægra í blöndum Vg 7-8, Vg 9-10 og Vg 11-13. Einnig var loftmagnið mismikið í þessum blöndum.

Á mynd 13 má sjá hvernig þrýstistyrkur hvorrar blöndu er miðað við viðmiðunarblönduna með Anleggsementi (Vg 3-4).

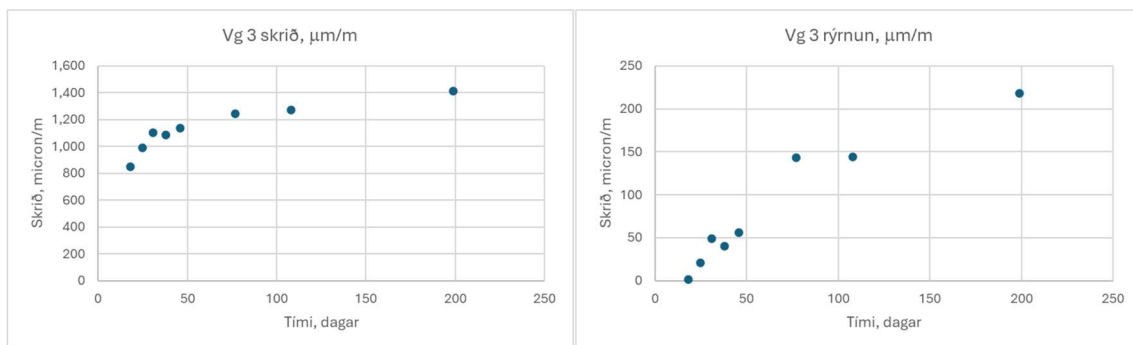


Mynd 13. Þrýstistyrkur steypublandna sem % af styrk blöndu með Anleggsementi (Vg 3-4).

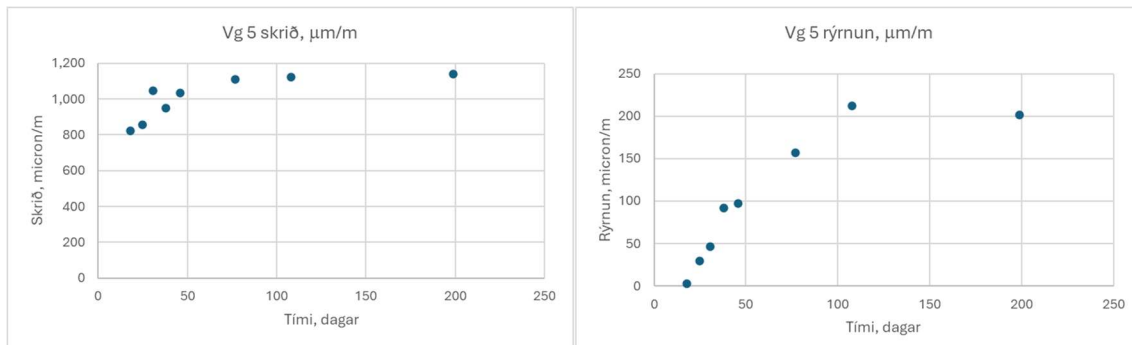
Skrið og rýrnun

Hér verður aðeins gerð grein fyrir helstu niðurstöðum af skrið- og rýrnunarmælingunum. Nánari greining á skrið- og rýrnunarmælingunum verður gerð af Kristófer Bjarka H Kjerulf, BS nemandi í byggingarfræði við Háskólann í Reykjavík.

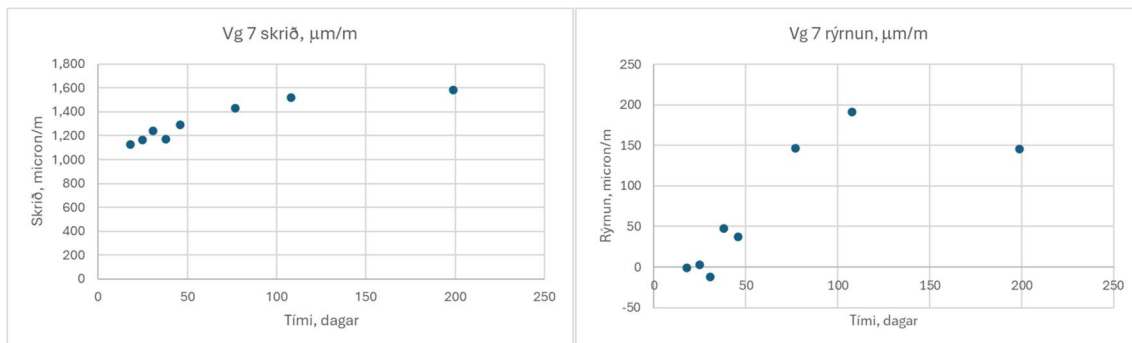
Á myndum 14 til 18 má sjá niðurstöður úr handmælingum á skriði og rýrnun sem $\mu\text{m}/\text{m}$.



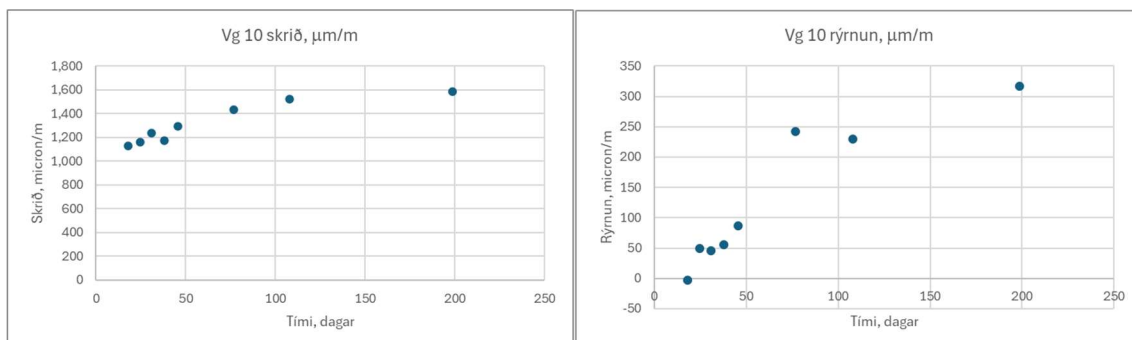
Mynd 14. Niðurstöður úr handmælingum á blöndu Vg 3 á skriði t.v. og rýrnun t.h.



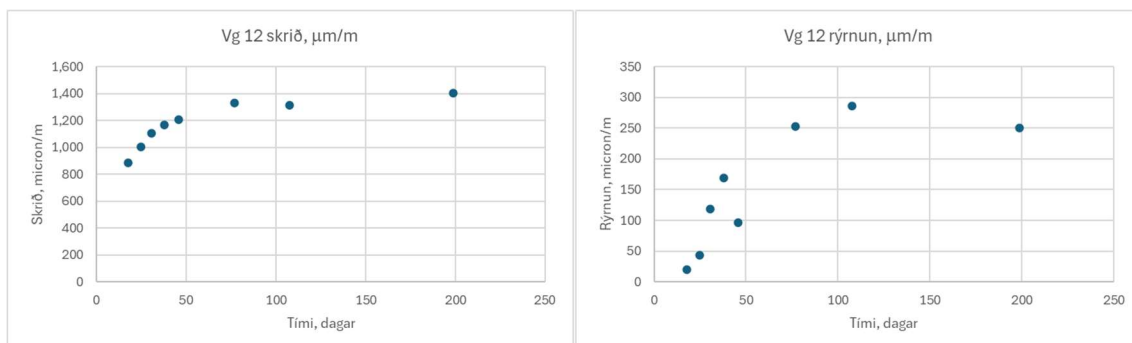
Mynd 15. Niðurstöður úr handmælingum á blöndu Vg 5 á skríði t.v. og rýrnun t.h.



Mynd 16. Niðurstöður úr handmælingum á blöndu Vg 7 á skríði t.v. og rýrnun t.h.



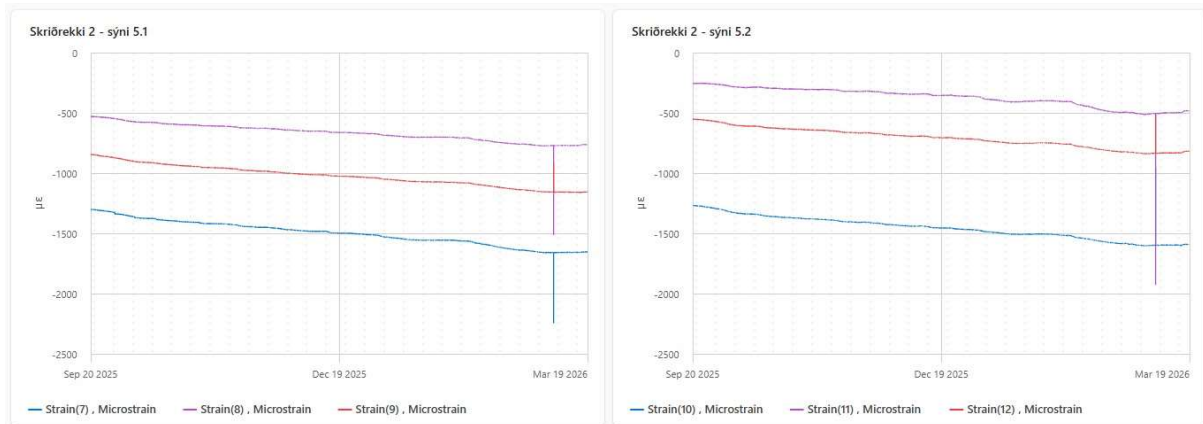
Mynd 17. Niðurstöður úr handmælingum á blöndu Vg 10 á skríði t.v. og rýrnun t.h.



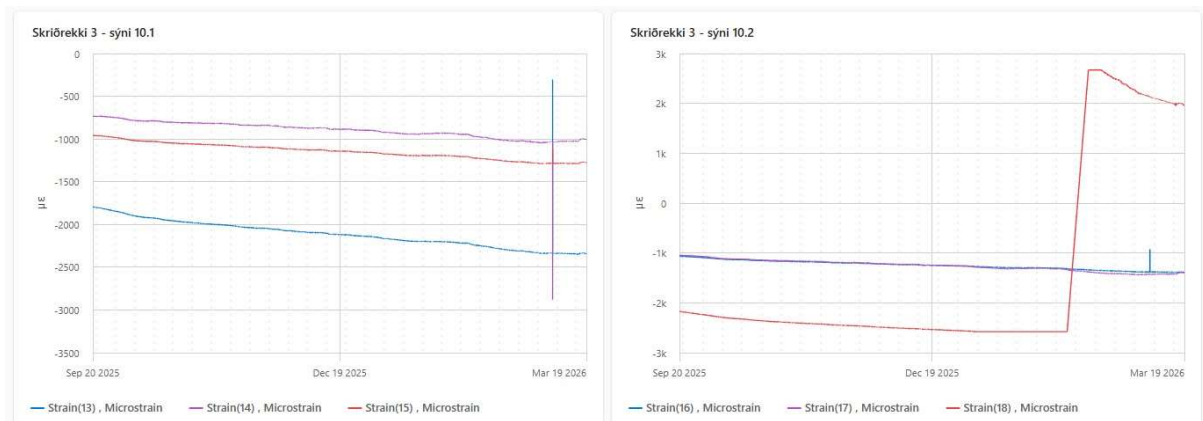
Mynd 18. Niðurstöður úr handmælingum á blöndu Vg 12 á skríði t.v. og rýrnun t.h.

Á myndum 19 til 21 má sjá niðurstöður úr sjálfvirkum skríðmælingum sem skjámynd, frá september 2025 fram í miðjan mars 2026. Mæligildin sem sýnd eru á y-ás eru microstrain. Upphafsmælingar á afmyndun byrjuðu u.þ.b. á núlli. Þar sem að upphafsdagsetning var 29/8/2025 þá vantar fyrstu mæligildin á myndirnar. Mælingarnar hafa gengi vel og nemarnir

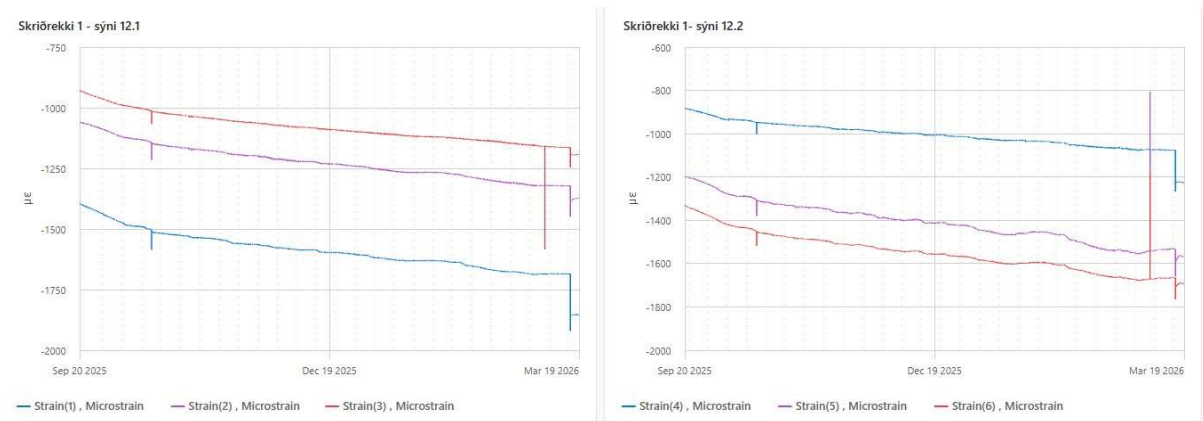
virðast vera mjög næmir á breytingar í sýnunum. Af 30 streitunum, þar af 18 sem nema skrið og 12 sem nema rýrnun, hefur aðeins einn skriðnemi farið úr sambandi, sjá mynd 21. Einnig má sjá að einn rýrnunarnemi hefur farið úr sambandi, sjá mynd 22. Vonir standa til að hægt verði að koma nemunum í lag.



Mynd 19. Skjámynd af sjálfvirkum streitumælingum á sýni Vg-5 í skriðrekka 2.

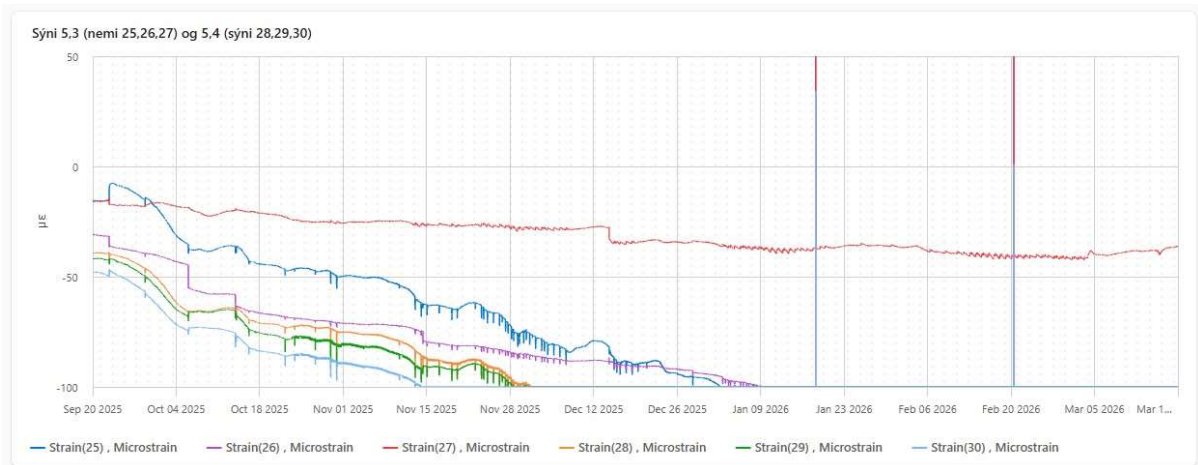


Mynd 20. Skjámynd af sjálfvirkum streitumælingum á sýni Vg-10 í skriðrekka 3. Sjá má á myndinni t.h. að einn streituneminn fer úr sambandi á seinni hluta tímabilsins (sýni 10.2 – nemi nr. 18).

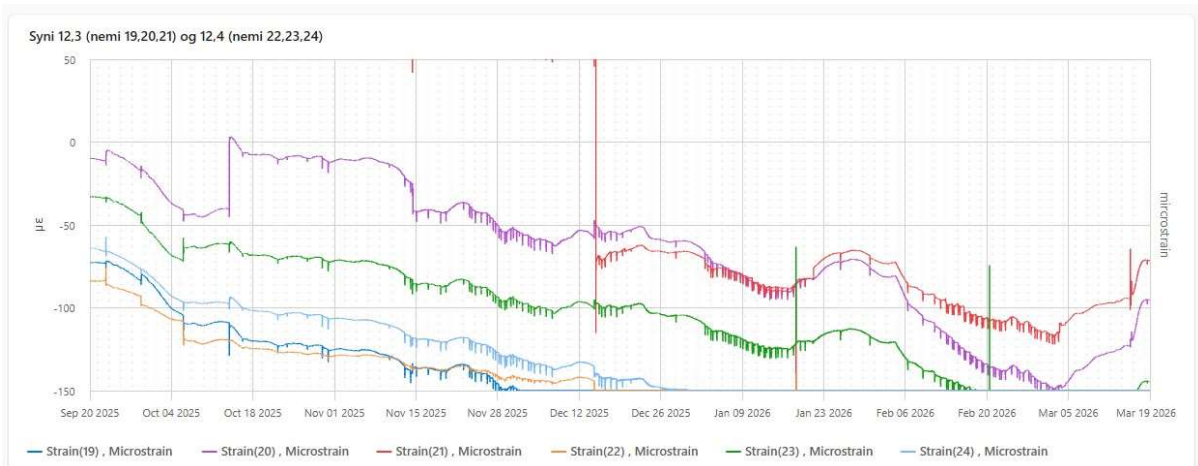


Mynd 21. Skjámynd af sjálfvirkum streitumælingum á sýni Vg-12 í skriðrekka 1.

Á myndum 22 og 23 er sýnt yfirlit yfir sjálfvirkar rýrnunarmælingar. Mælingarnar sjást ekki allar á myndunum, þar sem y-skalin nær ekki yfir allar mæliniðurstöðurnar.

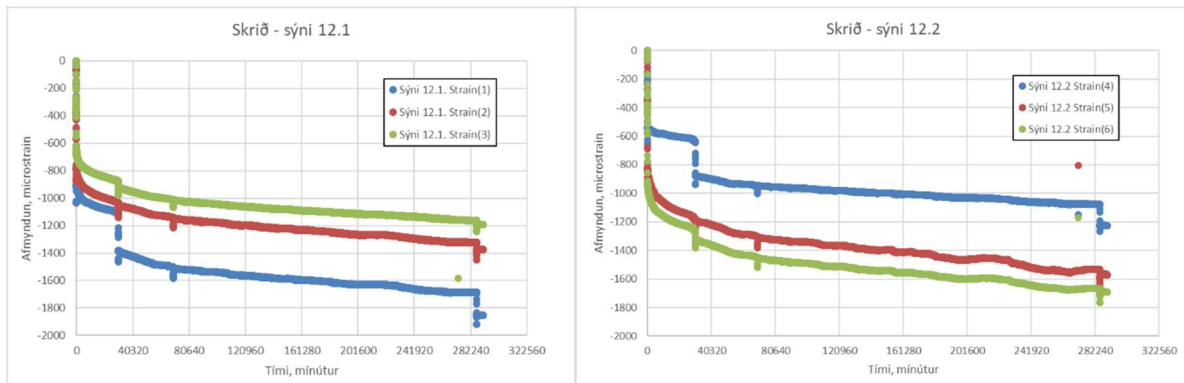


Mynd 22. Skjámynd af sjálfvirkum streitumælingum sem rýrnun á sýni Vg-5. Hluti af mælingunum er “off scale”. Sjá má að einn streituneminn virðist vera óvirkur yfir allt tímabilið (sýni 5.3 – nemi nr. 27).



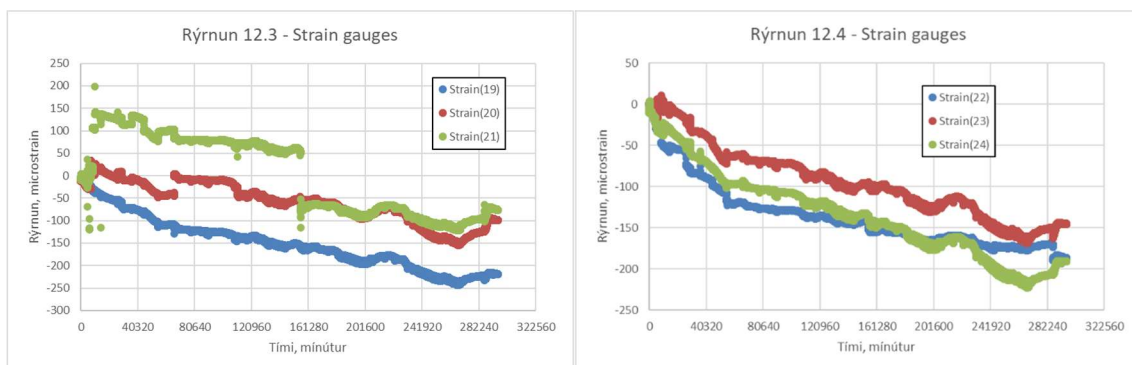
Mynd 23. Sjálfvirkar streitumælingar sem rýrnun á sýni Vg-12. Hluti af mælingunum er “off scale”.

Mæliaflestrar af skriðmælingum á sýni 12.1 og 12.2 eru sýndir á mynd 24. Myndin sýnir microstrain sem fall af tíma sem mínútur. Myndin sýnir tímabilið frá því að álag var sett á sýnin í lok ágúst 2025 til 20. mars 2026, eða yfir um 200 daga tímabil. Sitt hvort sýnið er einn sívalningur með þrjá streitunema og reyndar einnig þrjú pör af álímdum mæliplötum fyrir handmælingarnar. Eins og sjá má þá á sér stað tiltölulega snemma hliðrun í mæligildum vegna þess að álagið á sýnin var aukið.



Mynd 24. Afmyndun sýnis 12 sem microstrain yfir allt mælingatímabilið, frá því að álag var sett á sýnið, þann 29/08/2025 til 20/03/2026. X-ásinn er í mínútum, en ásnúm er deilt niður í fjögurra vikna tímabil. Skrið í sýni 12.1 er sýnt á myndinni t.v. og skriðið í sýni 12.2 er sýnt á myndinni t.h.

Á mynd 25 má sjá rýrnunarmælingar á sýni Vg 12. Mælingar á sýni 12.3 eru ósamfelldar, en samfelldar á sýni 12.4. Væntanlega er tiltölulega auðvelt að leiðrétta mælingar á sýni 12.3, en það var ekki gert. Rýrnunarmælingar á sýni 12.4 voru aðeins notaðar og mælingar á sýni 12.3 voru ekki notaðar. Sama má segja um mælingar á Vg 5, sjá mynd 22, þ.e. rýrnunarmælingar á sýni 5.4 voru aðeins notaðar og mælingar á sýni 5.3 voru ekki notaðar.



Mynd 25. Rýrnun í sýni 12.3 og 12.4. Sjálfvirknarmælingar með streitunumum frá 29/08/2025 til 23/03/2026. X-ásinn er í mínútum, en ásnúm er deilt niður í fjögurra vikna tímabil (40320 mínútur).

Niðurstöður handmælinga og sjálfvirkra mælinga á skriði og rýrnun eru gefnar í töflum 4 til 8. Reiknuð gildi miða við upphaf mælinga, þ.e. áður en álagið er sett á sýnin. Þannig nær afmyndunin yfir afmyndun sem tilheyrir fjaðurstuðli í upphafi prófana og afmyndun vegna skriðs sem eiga sér stað þar á eftir. Mælingarnar eru gefnar upp sem mm/150 mm. Skriðmælingarnar sýna afmyndun sýnanna óháð álaginu sem er á sýnunum. Hluti af mældu gildunum er vegna rýrnunar. Ekki er búið að leiðrétta þessar mælingar fyrir rýrnun. Þar sem að rýrnunin er mæld sérstaklega þá verður hægt að leiðrétta niðurstöðurnar fyrir rýrnuninni. Skriðmælingarnar eru nokkuð samfelldar en meiri óvissa er í rýrnunarmælingunum. Miðað við 199 daga tímabil þá er rýrnunin um 10 til 18 % af skriðinu.

Tafla 4. Heildarafmyndun Vg 3 mælt frá upphafi áður en álag var keyrt á sýnin og rýrnun, mm/150 mm. Meðalálág á skriðsýnin yfir tímabilið var u.þ.b. 304 kN.

Dagar	Vg 3, handmæling	Vg 3, streitunemar	Vg 3 rýrnun handmæling	Vg 3 rýrnun streitunemar
18	0.1277	Ekki mælt	0.0002	Ekki mælt
77	0.1868		0.0215	
108	0.1907		0.0216	
199	0.2122		0.0328	

Tafla 5. Heildarafmyndun Vg 5 mælt frá upphafi áður en álag var keyrt á sýnin og rýrnun, mm/150 mm. Meðalálág á skriðsýnin yfir tímabilið var u.þ.b. 341 kN.

Dagar	Vg 5, handmæling	Vg 5, streitunemar	Vg 5, rýrnun handmæling	Vg 5, rýrnun streitunemar (5.4)
18	0.1234	0.1247	0.0004	0.0042
77	0.1663	0.1448	0.0236	0.0132
108	0.1687	0.1507	0.0318	0.0163
199	0.1712	0.1722	0.0302	0.0261

Tafla 6. Heildarafmyndun Vg 7 mælt frá upphafi áður en álag var keyrt á sýnin og rýrnun, mm/150 mm. Meðalálág á skriðsýnin yfir tímabilið var u.þ.b. 341 kN.

Dagar	Vg 7, handmæling	Vg 7, streitunemar	Vg 7, rýrnun handmæling	Vg 7, rýrnun streitunemar
18	0.1691	Ekki mælt	-0.0002	Ekki mælt
77	0.2147		0.0220	
108	0.2280		0.0287	
199	0.2377		0.0218	

Tafla 7. Heildarafmyndun Vg 10 mælt frá upphafi áður en álag var keyrt á sýnin og rýrnun, mm/150 mm. Meðalálág á skriðsýnin yfir tímabilið var u.þ.b. 355 kN.

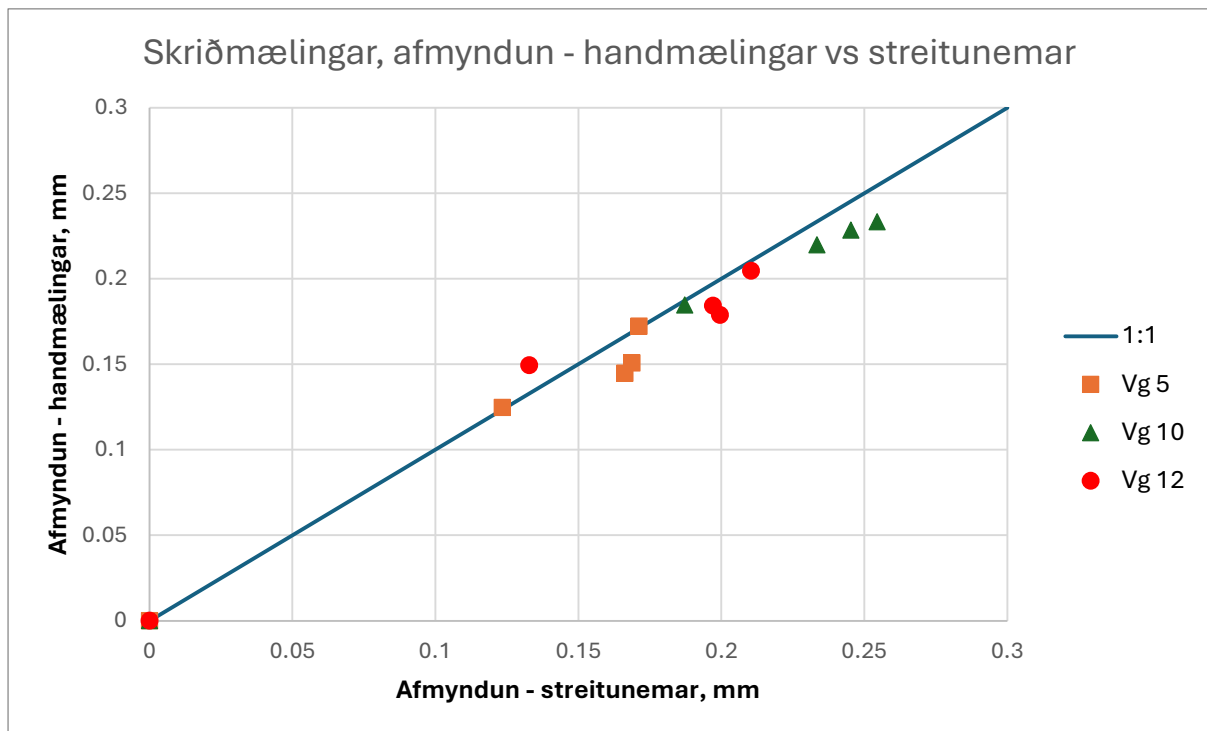
Dagar	Vg 10, handmæling	Vg 10, streitunemar	Vg 10, rýrnun handmæling	Vg 10, rýrnun streitunemar
18	0.1872	0.1847	-0.0004	Ekki mælt
77	0.2334	0.2198	0.0363	
108	0.2453	0.2285	0.0345	
199	0.2545	0.2334*	0.0476	

*aðeins sýni 10.1

Tafla 8. Heildarafmyndun Vg 12 mælt frá upphafi áður en álag var keyrt á sýnin og rýrnun, mm/150 mm. Meðalálág á skriðsýnin yfir tímabilið var u.þ.b. 304 kN.

Dagar	Vg 12, handmæling	Vg 12, streitunemar	Vg 12, rýrnun handmæling	Vg 12, rýrnun streitunemar (12.4)
18	0.1328	0.1494	0.0029	0.0052
77	0.1995	0.1788	0.0380	0.0163
108	0.1971	0.1842	0.0429	0.0184
199	0.2104	0.2047	0.0376	0.0267

Á mynd 26 má sjá samanburð á milli handmælinga og sjálfvirkra mæling með streitunemum. Samanburðurinn leiðir í ljós að gott samræmi er á milli þessara tveggja mæliaðferða.

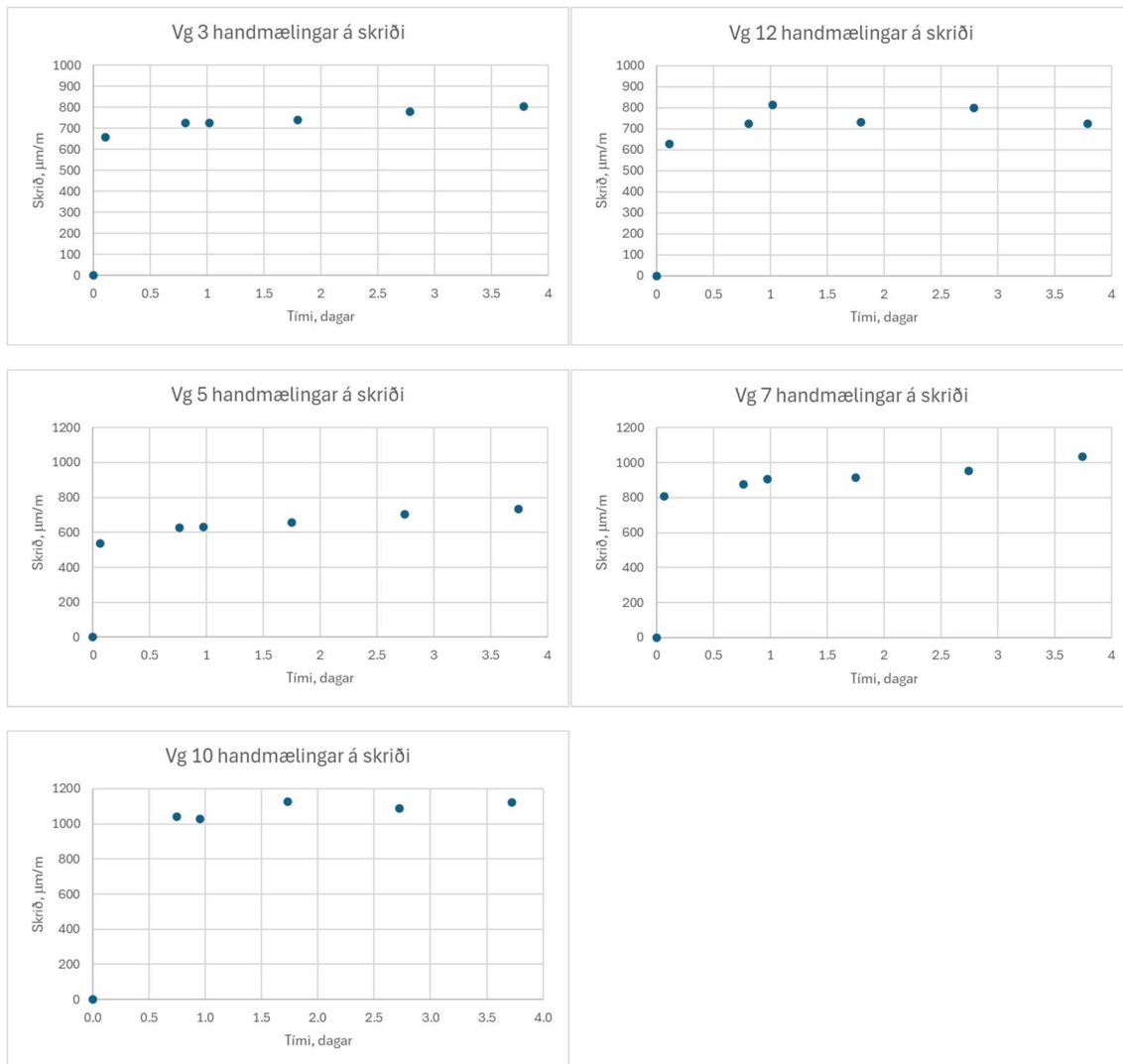


Mynd 26. Afmyndun skriðsýna í mm, handmælingar á y-ás og mælingar með streitunemum á x-ás. Handmælt skrið og rýrnun, sem $\mu\text{m}/\text{m}$. Mælingar ná yfir 199 daga tímabil.

Fjaðurstuðull

Upphaf skriðmælinganna var notað til þess að ákvarða fjaðurstuðul steypublandnanna, bæði fyrir handmælingar og sjálfvirkar mælingar.

Á mynd 27 má sjá handmælda afmyndun fyrstu fjóra sólarhringana.



Mynd 27. Handmælingar á afmyndun fyrstu fjóra sólarhringana. Vg 3 og Vg 12 eru í sama skriðrekka og með sama álagið, Vg 5 og Vg 7 eru í sama skriðrekka og með sama álagið og Vg 10 er eitt í skriðrekka.

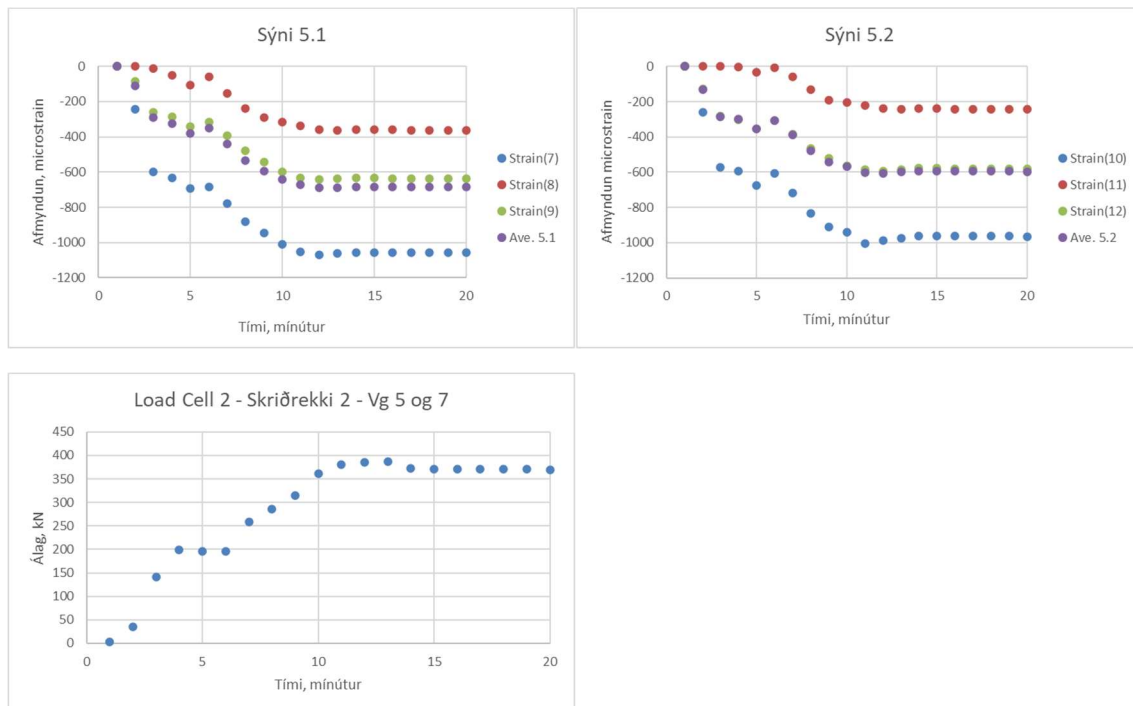
Í töflu 9 eru gefnar þær upplýsingar sem þarf til þess að reikna fjaðurstuðul út frá fyrstu handmældu gögnunum. Mælingarnar voru gerðar eftir 1,5 eða 2,6 klukkutíma. Upphafsmælingin fyrir Vg 10 misfórst og við útreiking á fjaðurstuðli þess sýnis voru gögn mæld um 17,8 tímum eftir að álagið var keyrt upp.

Fjaðurstuðullinn var reiknaður samkvæmt jöfnu (1).

Tafla 9. Útreiknaður fjaðurstuðull og gögn sem þarf til þess að reikna út fjaðurstuðul út frá handmælingunum.

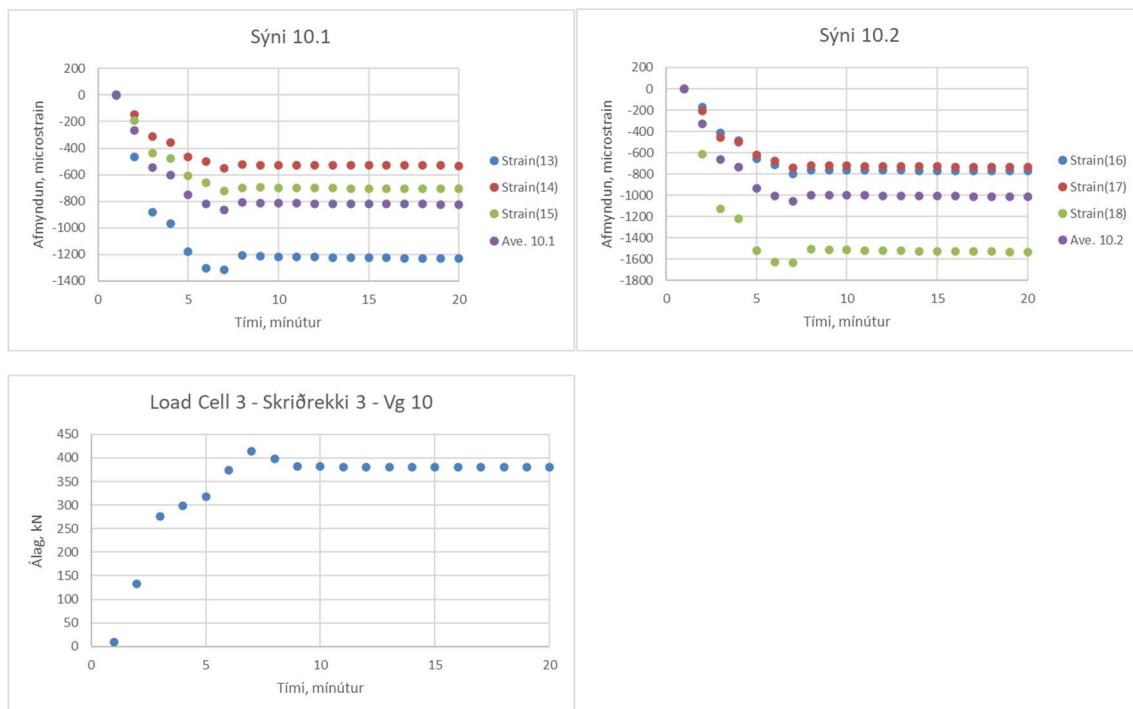
	Vg 3	Vg 5	Vg 7	Vg 10	Vg 12
Fyrsta handmæling, tímar	2,62	1,52	1,52	17,83	2,62
Álag, MPa	19,44	20,76	20,76	20,43	19,44
Afmyndun við fyrstu mælingu mm	0,0006591	0,000538	0,0008075	0,0010338	0,0007255
Fjaðurstuðull, GPa	29,49	38,59	25,71	19,76	26,79

Á myndum 28 til 30 má sjá sjálfvirkar mælingar á afmyndun og álag í upphafi prófana. Á mynd 28 má sjá afmyndun Vg 5 fyrstu 20 mínúturnar og einnig má sjá hvernig álagið var keyrt upp á sýninu. Sýni Vg 7 er einnig í sama skriðrekka (2) og á því álagskeyrslan einnig við Vg 7.



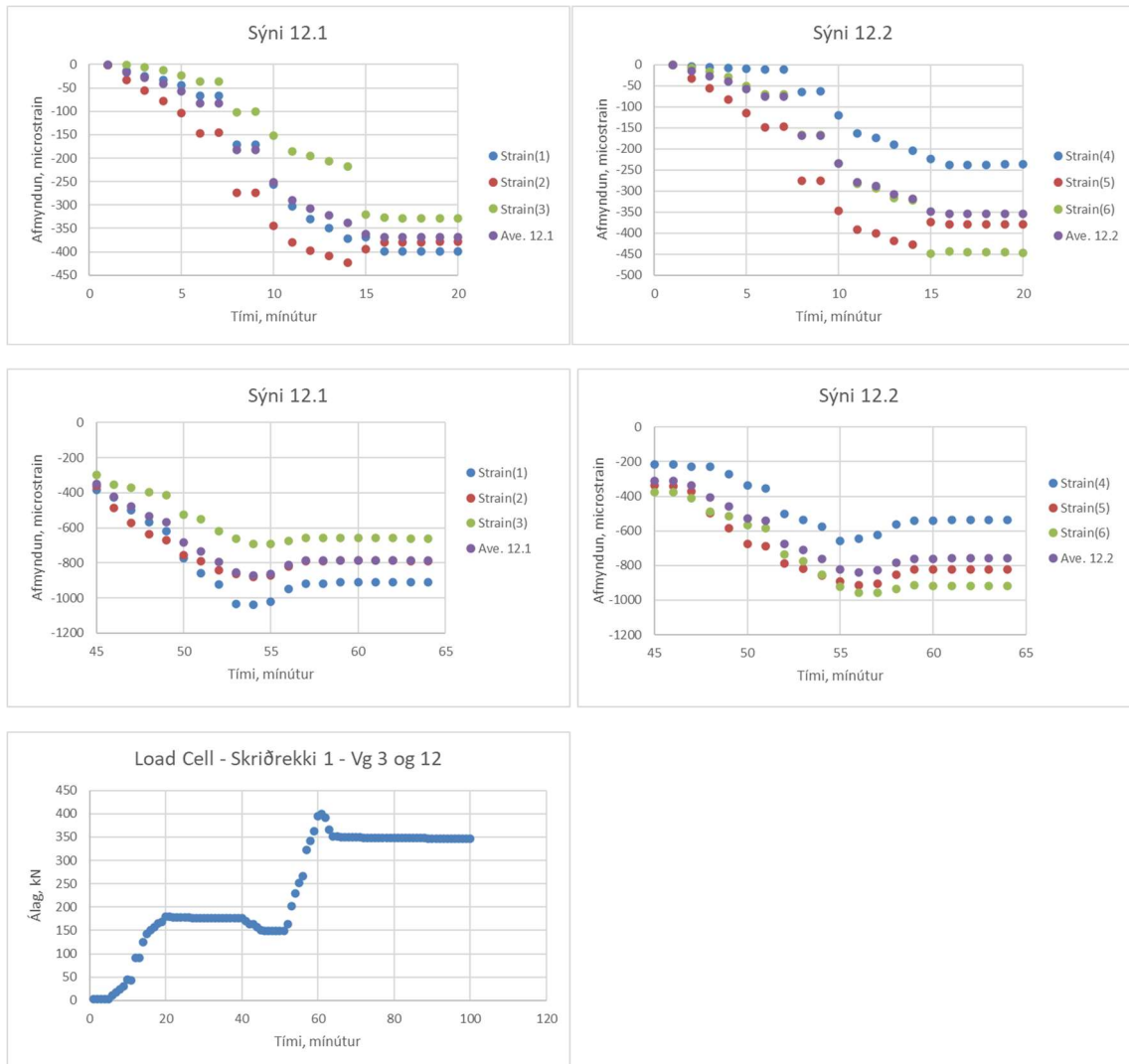
Mynd 28. Afmyndun Vg 5 í upphafi skriðmælinga. Álagið á sýni 5 og 7 (aðeins handmælingar) er sýnt á neðri myndinni.

Á mynd 29 má sjá afmyndun Vg 10 fyrstu 20 mínúturnar og einnig má sjá hvernig álagið var keyrt upp á sýninu.



Mynd 29. Afmyndun Vg 10 í upphafi skriðmælinga. Álagið er sýnt á neðri myndinni.

Á mynd 30 má sjá afmyndun Vg 12 fyrstu 60 mínúturnar og einnig má sjá hvernig álagið var keyrt upp á sýninu. Sýni Vg 3 er einnig í sama skriðrekka (1) og á því álagskeyrslan einnig við Vg 3. Álagið keyrt upp í tveimur þrepum, í lokin var álagið síðan aðeins lækkað. Allt ferlið tók rúmar 60 mínútur.



Mynd 30. Afmyndun Vg 10 í upphafi skriðmælinga. Álagið á Vg 3 (handmælt) og Vg 12 er sýnt á neðri myndinni. Eins og sjá má þá var álagið keyrt upp í tveimur þrepum, í lokin var álagið síðan aðeins lækkað. Allt ferlið tók rúmar 60 mínútur.

Fjaðurstuðull fyrir blöndur Vg 5, Vg 10 og Vg 12 var reiknaður út á sama hátt og hann var fundinn með handmældu gögnunum, þ.e. með jöfnu (1). Niðurstöður fyrir fjaðurstuðul eru gefnar upp í töflu 10. Fyrir Vg 5 og Vg 10 var afmyndunin og álagið eftir að álagið hafði verið á sýnunum í 20 mínútur. Fyrir Vg 12 var álagið keyrt hægar upp og fullt álag var ekki komið á sýnin fyrr en eftir rúmar 60 mínútur. Fyrir Vg 12 var fjaðurstuðullinn reiknaður fyrir afmyndun og álag sem var eftir 20 og 60 mínútna keyrslu.

Tafla 10. Útreiknaður fjaðurstuðull og gögn sem þarf til þess að reikna út fjaðurstuðul út frá sjálfvirkum mælingum.

	Vg 5	Vg 10	Vg 12
Mæling tekin, mín	20	20	20 og 60
Álag, MPa	20,94	21,49	10,09 og 22,38
Afmyndun, mm	0,000641	0,000918	0,000361 – 0,000773
Fjaðurstuðull, GPa	32,67	23,41	27,95 – 28,95

Frostþol

Frostþolið var metið út frá flögnun í 3 % NaCl lausn. Einnig var vatnsupptaka mæld í sýnunum þegar þau voru formettuð sem og í f/p-prófununum, á sama tíma og flögnunin var mæld.

Flögnun

Í töflu 11 eru sýndar niðurstöður prófana á öllum prófblöndunum, bæði 28 og 90 daga prófsýnunum, sem flögnun skv. prófunaraðferðinni SS 137244. Flögnunin er uppsöfnuð, þ.e. skráð sem summa af flögnun fyrri f/p-umferða.

Tafla 11. Niðurstöður úr f/p-prófun sem flögnun, kg/m². Flögnun mæld eftir 7, 28 og 56 f/p-umferðir, samkvæmt SS134472.

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
F/p-flögnun kg/m ² , 7 daga	0,019	0,034	0,027	0,024	0,055
F/p-flögnun kg/m ² , 28 daga	0,052	0,087	0,070	0,081	0,113
F/p-flögnun kg/m ² , 56 daga	0,070	0,153	0,173	0,157	0,169

Vatnsupptaka

Niðurstöður mælinga á vatnsupptöku í prófsýnunum eru sýndar í töflu 12. Í íslenskri byggingarreglugerð er ekki gerð krafa varðandi innri skemmdir, en í eldri rannsóknum er talað um að innri skemmdir eigi sér stað þegar vatnsupptaka er orðin 1,2 kg/m² eða meiri². Vatnsupptakan er reiknuð samkvæmt jöfnu (3), hafa ber í huga að þar sem vatnsupptakan er mæld í sömu sýnum og flögnunin var mældi, geta mælingar á vatnsupptöku verið nokkuð óáreiðanlegar þegar flögnunin er veruleg.

Í þessari rannsókn var vatnsupptaka mæld þegar prófsýnin voru formettuð fyrir f/p-prófunina. Formettunin fer þannig fram að um 3 mm djúpt vatnslag er látið þekja yfirborð sýnanna í 3 sólarhringa. Vatnsupptakan er ákvörðuð úr frá þyngdarbreytingum sýnanna. Engin gildi eru til um skaðlegt magn vatns í sýnunum. Vatnsupptakan í formettuninni er gefin í töflu 12.

Tafla 12. Niðurstöður úr f/p-prófun sem vatnsupptaka, kg/m². Vatnsupptakan mæld eftir 7, 28 og 56 f/p-umferðir, samkvæmt SS134472.

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
F/p-vatnsupptaka kg/m ² , formettun	0,599	0,401	0,396	0,387	0,519
F/p-vatnsupptaka kg/m ² , 7 daga	0,334	0,141	0,168	0,145	0,233
F/p-vatnsupptaka kg/m ² , 28 daga	0,640	0,367	0,333	0,325	0,497
F/p-vatnsupptaka kg/m ² , 56 daga	0,810	0,569	0,453	0,482	0,706

²Gísli Guðmundsson, 2003. Endurbætt prófunaraðferð við mat á veðrunarþoli steinsteypu (https://www.researchgate.net/publication/299430626_Endurbaett_profunaradferd_vid_mat_a_vedrunartholi_st_einsteypu).

Klóríðleiðni (NT Build 492)

Klóríðleiðni var mæld samkvæmt aðferðinni NT Build 492. Út frá mæliniðurstöðunum var klóríðleiðnistuðull reiknaður út. Klóríðleiðnin var mæld á 28 og 99 daga sýnum. Niðurstöður mælinganna eru gefnar í töflu 13.

Tafla 13. Niðurstöður úr mælingum á klóríðleiðnistuðli samkvæmt NT Build 492.

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
Klóríðleiðnistuðull mm ² /sec, 28 daga	1,65E-11	6,56E-12	9,26E-12	4,20E-12	8,22E-12
Klóríðleiðnistuðull mm ² /sec, 99 daga	8,84E-12	5,49E-12	3,79E-12	2,09E-12	3,90E-12

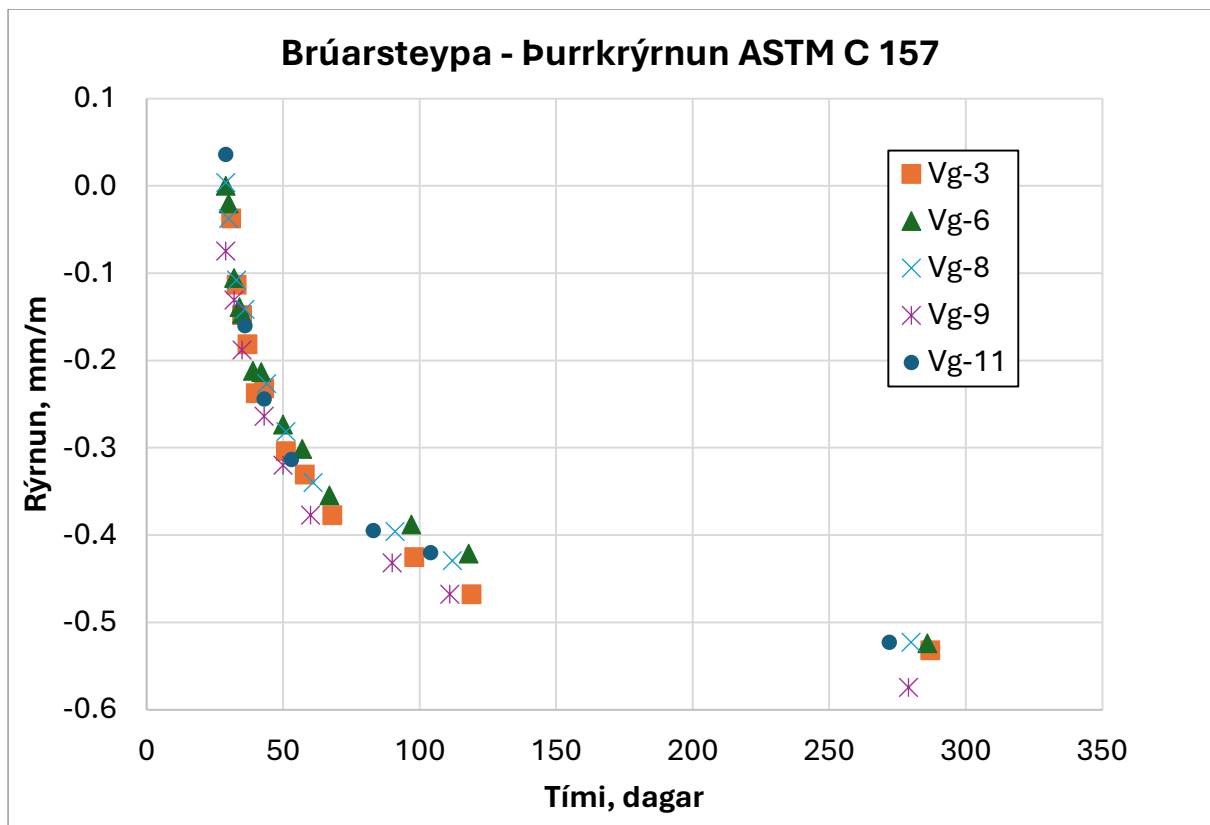
Rýrnun – þurrkrýrnun og autogeneous rýrnun (ASTM C 157)

Rýrnun samkvæmt ASTM C 157 sem þurrkrýrnun og sem autogeneous rýrnun var mæld á sýnum úr öllum blöndunum. Niðurstöður mælinganna eru gefnar í töflu 14.

Tafla 14. Þurrkrýrnun og autogeneous rýrnun samkvæmt ASTM C 157, mm/m

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
Þurrkrýrnun, mm/m	-0,377 (37 dagar)	-0,355 (38 dagar)	-0,340 (33 dagar)	-0,377 (31 dagur)	-0,313 (25 dagar)
Þurrkrýrnun, mm/m	-0,468 (119 dagar)	-0,421 (118 dagar)	-0,429 (112 dagar)	-0,468 (111 dagar)	-0,420 (104 dagar)
Þurrkrýrnun, mm/m	-0,532 (287 dagar)	-0,524 (286 dagar)	-0,523 (280 dagar)	-0,575 (279 dagar)	-0,523 (272 dagar)
Autogeneous rýrnun, mm/m	Ekki mælt	0,072 (43 dagar)	0,029 (37 dagur)	0,047 (36 dagar)	Ekki mælt
Autogeneous rýrnun, mm/m	Ekki mælt	0,080 (286 dagar)	0,031 (280 dagar)	0,051 (279 dagar)	Ekki mælt

Þurrkrýrnunin er einnig sýnd á mynd 31.



Mynd 31. Þurrkrýrnun steypublandna eftir um 280 daga í um 50 % RH og um 23 °C.

Þyngdarbreytingar á rýrnunar sýnunum eru gefnar í töflu 15.

Tafla 15. Þurrkrýrnun og autogeneous rýrnun samkvæmt ASTM C 157, þyngdarbreytingar, %. Ath. að póstítf gildi sýna þyngdartap og negatítf gildi sýna þyngingu.

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
Þurrkrýrnun, % þyngd	0,58 (40 dagar)	0,37 (39 dagar)	0,53 (44 dagar)	0,51 (43 dagar)	0,70 (43 dagar)
Þurrkrýrnun, % þyngd	1,34 (119 dagar)	1,06 (118 dagar)	1,12 (112 dagar)	1,11 (111 dagar)	1,31 (104 dagar)
Þurrkrýrnun, % þyngd	1,72 (287 dagar)	1,42 (286 dagar)	1,49 (280 dagar)	1,50 (279 dagar)	1,69 (272 dagar)
Autogeneous rýrnun, % þyngd	Ekki mælt	-1,06 (43 dagar)	-1,23 (37 dagar)	-1,09 (36 dagar)	Ekki mælt
Autogeneous rýrnun, % þyngd	Ekki mælt	-1,27 (286 dagar)	-1,42 (280 dagar)	-1,46 (279 dagar)	Ekki mælt

Kolsýring eftir um 110 daga í andrúmslofti og 65 % RH og 25 °C

Kolsýring var mæld í sýnunum eftir að hafa verið geymd í lofti við 65 % RH og 25 °C. Niðurstöður mælinganna eru gefnar í töflu 16.

Tafla 16. Kolsýring steypublandna. Sýni geymd við 55-65 % RH og 22 °C í andrúmslofti (CO₂ um 425 ppm).

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
Kolsýring í loft, daga	120	119	113	112	105
Kolsýring (min-max), mm	1,33 – 2,95	0 – 1,68	1,40 – 2,65	1,42 – 3,01	2,18 – 2,72
Kolsýring miðgildi, mm	2,14	0,84	2,03	2,13	2,45

Tilgangur mælinganna var að kanna áhrif kolsýringar á frostþolið. Kolsýringin var mæld á sýnunum sem sýnd er á mynd 32, en samhliða þeim voru sýnin sem fóru síðan í f/p-prófun, einnig kolsýrð á sama hátt.



Mynd 32. Kolsýring brúarsteypusýnanna. Sýnin eru frá vinstri til hægri: Vg 3-4, Vg 5-6, Vg 7-8, Vg 9-10 og Vg 11-13. Sjá má kolsýringu í yfirborði sýnanna sem ólitaða steypu.

Frostþol eftir kolsýringu

Þegar búið var að kolsýra yfirborð sýnanna voru þau sett í frost/þíðu-prófun. Þótt sýnin hafi ekki verið mikið kolsýrð, var kolsýringin talin vera nægjanleg til þess að meta hvort kolsýring hafi áhrif á frostþol steypu. Niðurstöður f/p-prófunarinnar sem flögnun á öllum sýnunum nema blöndu Vg 3-4 er gefin í töflu 17. Áhrif kolsýringar á blöndu Vg 3-4 var ekki prófað.

Tafla 17. Niðurstöður úr f/p-prófun sem flögnun, kg/m². Flögnun mæld eftir 7, 28 og 56 f/p-umferðir, samkvæmt SS134472.

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
F/p-flögnun kg/m ² , 7 daga	Ekki prófað	0,083	0,130	0,136	0,121
F/p-flögnun kg/m ² , 28 daga	Ekki prófað	0,236	0,342	0,347	0,330
F/p-flögnun kg/m ² , 56 daga	Ekki prófað	0,317	0,453	0,455	0,431

Niðurstöður f/p-prófunarinnar sem vatnsupptaka á öllum sýnunum nema blöndu Vg 3-4 er gefin í töflu 18.

Tafla 18. Niðurstöður úr f/p-prófun sem vatnsupptaka, kg/m². Vatnsupptakan mæld eftir 7, 28 og 56 f/p-umferðir, samkvæmt SS134472.

	Vg 3-4	Vg 5-6	Vg 7-8	Vg 9-10	Vg 11-13
F/p-vatnsupptaka kg/m ² , formettun	Ekki prófað	0,665	0,747	0,661	0,877
F/p-vatnsupptaka kg/m ² , 7 daga	Ekki prófað	0,300	0,190	0,202	0,287
F/p-vatnsupptaka kg/m ² , 28 daga	Ekki prófað	0,776	0,421	0,492	0,707
F/p-vatnsupptaka kg/m ² , 56 daga	Ekki prófað	1,152	0,595	0,685	1,001

Kolefnisspor

Framtíð kísilryks og flugösku í steypu er óráðin en bæði efnin eru úrgangsefni úr stóriðju. Flugaska kemur úr kolaorkuverum sem vonir stóðu til með að hyrfu úr notkun, en því miður eru kol áfram brennd í stórum stíl og nóg er til af kolaösku.

Nóg er til af móbergi á Íslandi og öðrum sambærilegum efnum. Efnin eru náttúrulegt efni og líklegt að námuvinnsla þeirra muni valda deilum vegna umhverfisspjalla. Þó má nefna að Hekluvíkur hefur verið unnin til útflutnings í allmörg ár.

Erfitt er að finna lausn í umhverfismálum sem allir sætta sig við, en á heimsvísu er steinsteypa mikið notuð, þannig að vandamálið (kolefnislosun) er stórt og brýnt að leysa það.

Þær leiðir sem hægt er að fara til að draga úr kolefnislosun vegna steinsteypu er að minnka hlutfall sements í steypu, nota íauka (SCM), nota „activators“ s.b.r. sprautusteypu, nota rafmagn í framleiðslu á sementi og binda CO₂ í bergi. Samkvæmt bygg.reglugerð:

Kolefnisspor steypu (kg CO₂/m³) = Kolefnisspor sements * Magn sements + Viðbót frá öðru en sementi (40 kg CO₂/m³).

Fyrir steypublöndur úr þessu verkefni:

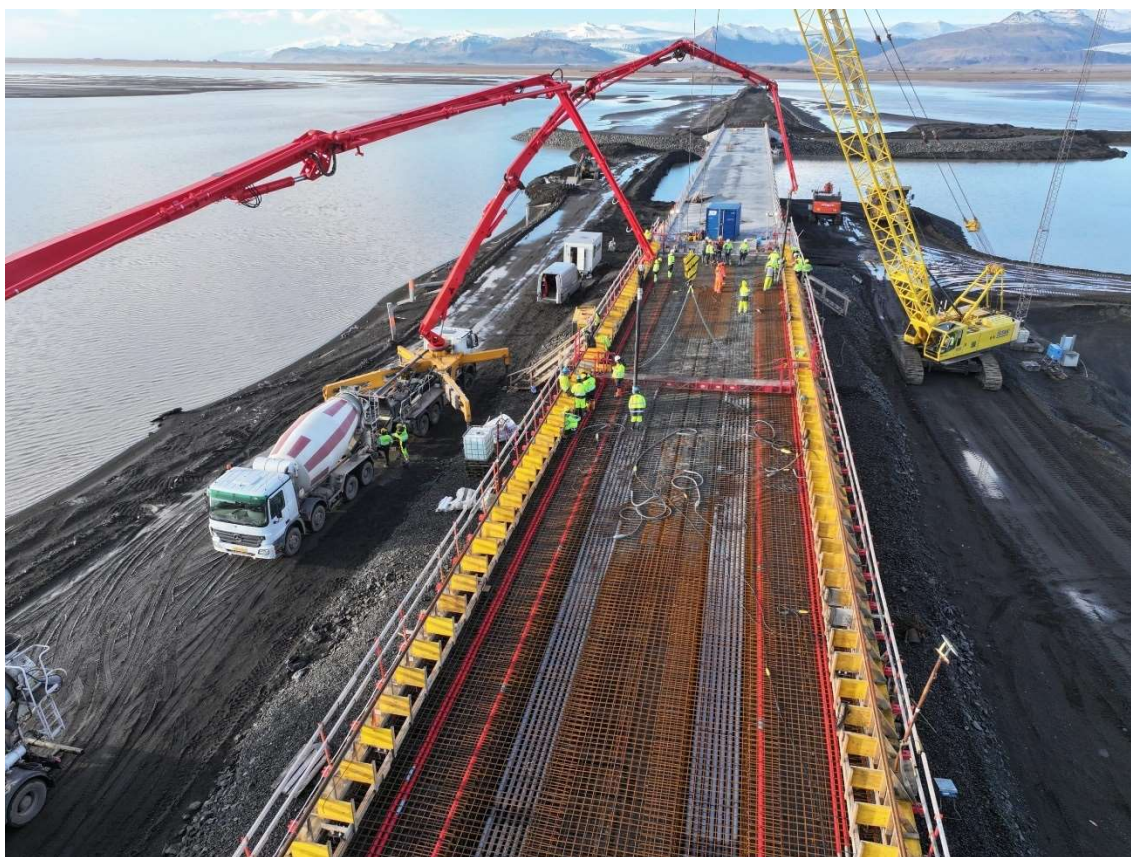
Vg 3-4. CEM I:	$693 \text{ kg CO}_2/\text{tn} * 0.4 \text{ tn}/\text{m}^3 + 40 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 = 317 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ (brúttó)
Vg 5-6. CEM I + SF:	$693 \text{ kg CO}_2/\text{tn} * 0.375 \text{ tn}/\text{m}^3 + 40 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 = 300 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ (brúttó)
Vg 7-8. FA:	$566 \text{ kg CO}_2/\text{tn} * 0.4 \text{ tn}/\text{m}^3 + 40 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 = 266 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ (brúttó)
Vg 9-10. FA + SF:	$566 \text{ kg CO}_2/\text{tn} * 0.375 \text{ tn}/\text{m}^3 + 40 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 = 252 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ (brúttó)
V 11-13. Ind+mób.*:	$651 \text{ kg CO}_2/\text{tn} * 0.32 \text{ tn}/\text{m}^3 + 40 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 = 248 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ (brúttó)
*móberg kolefnisspor (4 % af kolefnisspori sements – 30 kg CO ₂ /m ³)	

Dæmi um kolefnissparnað við brúargerð.

Brúargerð við Hornafjarðarfljót. Steypumagnið var um 2900 m³.

- Ef öll steypa var eins og Vg 5-6, þ.e. 375 kg/m³ af sementi og 25 kg/m³ kísilryk þá var kolefnisspor steypublöndunnar um 870 tonn CO₂,
- Ef öll steypa var eins og Vg 9-10, þ.e. FA (Brevik) og 25 kg/m³ kísilryk þá var kolefnissporið um 731 tonn CO₂ og
- Ef öll steypa var eins og Vg 11-13 þá var kolefnissporið um 806 tonn CO₂.

Þannig hefði CO₂ sparnaður orðið um 7,4 til 16 % miðað við steypu Vg 3-4.



Mynd 33. Brúargerð við Hornafjarðarfljót. Mynd af heimasíðu Vg.

Niðurstöður

2 daga þrýstistyrkur allra blandanna reyndist meiri en 30 MPa nema steypublandan með flugösku sem með um 24 MPa. Blöndurnar með kísilyki voru með 28 daga styrk um 50 MPa. Blandan með hreinu Anleggsementi og með Industrisementi og móbergi voru með 28 daga styrk um 44 MPa og blandan með flugösku var með lægstan 28 daga styrk, 36 MPa. Blandan með Anleggsementi og kísilyki var með hæstan 90 daga styrk, um 60 MPa. Blöndur með flugösku og kísilyki og með industrisementi og móbergi voru með 90 daga styrk um 55 MPa, blandan með hreinu Anleggsementi var með um 48 MPa styrk og blandan með flugöskusmenti var með lægstan 90 daga styrk um 42 MPa. Þegar þessar tölur eru bornar saman þarf að hafa í huga að v/b-hlutfallið var aðeins lægra í blöndum Vg 7-8, Vg 9-10 og Vg 11-13. Einnig var loftmagnið mismikið í þessum blöndum.

Niðurstöður á mælingum á skriði liggja ekki fyrir á þessum tímapunkti, enda eru prófanirnar hugsaðar sem langtímaprófanir. Gerð verður grein fyrir þeim niðurstöðum sem liggja fyrir í B.S. ritgerð frá HR vorið 2026. Hins vegar er búið að reikna út afmyndun sýnanna fyrir fyrstu 199 dagana. Bæði fyrir handmælingar og sjálfvirkar mælingar. Samanburður milli þessara tveggja aðferða leiðir í ljós gott samræmi milli þeirra. Afmyndun sýna er háð álaginu sem er á sýnunum og álagið var ekki það sama. Samt sem áður er heildarafmyndun sýnanna svipuð, hún er minnst í sýni Vg 5 um 0,1712 mm og mest í sýni Vg 10 um 0,2525 mm.

Fjaðurstuðullinn fyrir sýnin með handmældum gögnum liggur á bilinu frá 20 GPa fyrir Vg 10 til 39 GPa fyrir Vg 5, önnur sýni eru með fjaðurstuðullinn frá 26 til 29 GPa. Sjálfvirku mælingarnar gefa lægri fjaðurstuðul fyrir Vg 5 eða 33 GPa og stuðullinn fyrir Vg 10 er 23 GPa. Sjálfvirku mælingarnar fyrir Vg 12 eru ekki alveg sambærilegar við aðrar mælingar þar sem álagið var keyrt

hægar upp, en fjaðurstuðullinn var á milli 28 og 29 GPa. Við túlkun á þessum niðurstöðum þarf að hafa í huga álagið sem var á sýnunum. Áætlað var að hafa álagið um 40 % af 90 daga styrk. Fyrir flest sýnin var álagið á bilinu 34 til 41 %, nema fyrir sýni Vg 7-8 en hjá því var álagið um 49 % af 90 daga styrk. Sýni Vg 5-6 og Vg 7-8 voru í sama skriðrekka og það var óheppileg þörun þar sem Vg 7-8 var með lægsta þrýstistyrkinn og Vg 5-6 með hæsta þrýstistyrkinn. Betra hefði verið að hafa Vg 5-6 og Vg 11-13 saman í skriðrekka og Vg 7-8 stakt í skriðrekka eða með Vg 3-4.

Útreiknaður fjaðurstuðull er í engu samræmi við 90 daga styrk eða loftmagn. Loftið í blöndunum er í hærri kanntinum en það virðist ekki hafa mikil áhrif á fjaðurstuðulinn. Reyndar er töluvert ósamræmi í loftmagni hvort það er mælt í ferski steypu eða talið í harðnaðri steypu.

Allar blöndurnar voru með mjög gott frostþol. Flögnunin eftir 56 f/þ-umferðir reyndist vera á bilinu frá 0,07 til 0,17 sem er mjög lítil flögnun. Loftkerfið var mjög gott í þessum blöndum, loftmagnið var í hærri kantinum, fjarlægðarstuðullinn mjög lágur og yfirborð loftbóla þokkalegt. Áhrif af íaukum er á þá leið að minnst er flögnunin hjá viðmiðunarsýninu Vg 3-4 og svo svipuð hjá hinum sýnunum. Vatnsupptakan í f/þ-prófuninni er mjög lág eða á bilinu frá 0,45 til 0,81 kg/m². Viðmiðunargildi fyrir venjulega steypu sem byrjuð er að skemmast er talið vera 0,12 kg/m². Viðmiðunarsteypa Vg 3-4 mælist með hæsta gildið.

Kolsýringin mældist á bilinu 0,84 til 2,45 mm eftir um 110 daga. Lægst kolsýring mældist í blöndu Vg 5-6 og svo svipuð í öðrum sýnum. Tilgangur mælinganna var [m.a.](#) að kanna áhrif kolsýringar á frostþol steypu. Æskilegra hefði verið að kolsýra sýnin meira, en um 2 mm kolsýring var talin vera nægjanleg til þess að kanna áhrif á frostþol, þar sem búist var við lítilli flögnun. Flögnunin í kolsýrðu sýnunum reyndist vera á bilinu frá 0,32 til 0,45 kg/m². Sýni Vg 3-4 var ekki prófað. Flögnunin er lítil, en er nokkru meiri en mældist í ókolsýrðum sýnum. Sama má segja um vatnsupptökuna en hún er nokkru hærri en í ókolsýrðu sýnunum. Kolsýring virðist ekki hins vegar ekki hafa meiri áhrif á frostþol í steypum með íauka en í steypu með hreinu sementi eða litlu magni af íauka.

Það er ekki alveg ljóst hvernig ber að túlka niðurstöður úr frost/þíðu-prófunum á kolsýrðu sýnunum. Steypa heldur áfram að þróa. Á þessum um 110 dögum hefur steypa þornað þar sem sýnin voru geymd í 65 % raka. Best hefði verið að prófa ókolsýrð sýni samhliða þessum prófunum.

Klóríðleiðnistuðull var mældur eftir að sýnin hörðnuðu við >99 % raka og 23 °C í 28 og 90 daga. Leiðnistuðullinn telst almennt vera sæmilegur. Áhrif íauka eru greinileg, blanda Vg 9-10 sem er flugöskusement með kísilryki er með lægsta gildið og blöndur með íaukum eru með lægri leiðnistuðul en viðmiðunarblandan Vg 3-4. Leiðnistuðullinn lækkar við hörðun í 90 daga, eins og eðlilegt er, sbr. aukinn þrýstistyrk með aldri. Leiðnistuðull í brúarsteypu hefur verið ákvarðaður í nokkrum mannvirkjum Vegagerðarinnar^{3,4}. Stuðullinn í 13 til 31 ára mannvirkjum er töluvert lægri en mælist í þessu verkefni eða allt að stærðargráðu lægri. Gera má ráð fyrir að ástæðan fyrir því sé lækkan leiðnistuðuls með auknum aldri.

Þurrkrýrnun var mæld sérstaklega og svo sem hluti af skriðmælingunum. Eftir um 280 daga prófanir var þurrkrýrnunin mjög svipuð í öllum sýnunum. Miðað er við að prófa sýnin í eitt ár. Rýrnunin var mest í Vg 9-10 en svipuð í hinum sýnunum. Rýrnunin sem var framkvæmd sem hluti af skriðmælingunum gefur svipaðar niðurstöður. Sýnin eru ekki eins í laginu og verulegur munur

³ Gísli Guðmundsson, 2006. Eftirspennt Brúargólf Klóríðinnihald í nokkrum steiptum brúargólfum. Hönnun, 29 bls.

⁴ Gísli Guðmundsson, 2018. Steypa í Sjávarfallaumhverfi. Mannvit, 64 bls.

á efnismagni og því eru mæliniðurstöðurnar ekki sambærilegar. Samt sem áður eru niðurstöðurnar svipaðar, með mesta rýrnun í sýni Vg 9-10 og svipaða rýrnun í hinum sýnunum, nema Vg 7-8 er með minnstu rýrnunina.

Í þessu verkefni er verið að prófa fimm mismunandi gerðir af brúarsteypum, ein gerðin (Vg 3-4) á við 45 ára og eldri mannvirki, ein er eins og verið er að nota í dag (Vg 5-6) og þrjár með mismikið af íaukum sem lítil til engin reynsla er komin á.

Niðurstöður úr þeim prófunum sem liggja fyrir benda til þess að steypur með flugöskusementi (Vg 7-8), flugöskusementi blandað með kísilryki (Vg 9-10) og iðnaðarsementi með fínmöluðu móbergi (Vg 11-13) hafi sambærilega endingu og brúarsteypa sem Vegagerðin er að nota í dag. Niðurstöður prófana á skriði liggja ekki fyrir.

Vísbendingar eru um að lækka mætti sementsmagnið úr 400 kg/m^3 í 375 kg/m^3 með kísilryki og 320 kg/m^3 með móbergi. Samfara þessum breytingum þá lækkar kolefnisspor vegasteypu um 7 til 16 %.