

# Frostþol ungrar steinsteypu

Kristján Andrésson<sup>a,b</sup>, Björn Marteinsson<sup>b,c</sup>, Bjarni Besson<sup>b</sup>, Haukur J. Eiríksson<sup>b,d</sup>

<sup>a</sup>Verkís, Ofanleiti 2, 103 Reykjavík

<sup>b</sup>Umhverfis- og byggingarverkfræðideild,

Háskóla Íslands, Hjarðarhaga 2-6, 107 Reykjavík

<sup>c</sup>Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Árleyni 2-8, 112 Reykjavík

<sup>d</sup>Hnit verkfræðistofa, Háaleitisbraut 58-60, 108 Reykjavík

## Fyrirspurnir:

Kristján Andrésson

ka@verkis.is

Greinin barst 30. september 2015.

Samþykkt til birtingar 26. janúar 2016.

## ÁGRIP

Á Íslandi eru mannvirki oft steypd að vetrarlagi við erfiðar aðstæður þar sem lofthiti sveiflast frá plúsgráðum yfir í frost með litlum fyrirvara. Nýlögð steypa inniheldur mikið óbundið vatn sem byrjar strax að hvarfast og bindast við sementið í steypublöndunni. Ef vatnið frýs snemma í hördunarferli steypunnar getur það valdið skemmdum á henni. Í þessari grein er fjallað um rannsókn þar sem áhrif frosts á nýlagða steypu var kannað. Út frá hitastigsgögnum frá Veðurstofu Íslands fyrir mánuðina desember, janúar og febrúar á þriggja ára tímabili var stillt upp tíu mismunandi tilraunum þar sem umhverfshitastig var breytilegt. Hver tilraun samanstóð af mislögum tímabilum af +5°C og -5°C hitastigsköflum í allt að þrjú daga eftir að steypa var framleidd en síðan tóku við staðalastæður við +20°C og 100% raka þar til steypa náði 90 daga aldri. Í hverri tilraun voru gerðar mælingar á þrýstipóli steypunnar við mismunandi aldur hennar sem og mælingar á yfirborðsflögnun í frost-þíðu prófunum. Auk þess var innra hitastig hennar mælt með sírita á meðan hitabreytingar áttu sér stað. Steypvir voru 210 hefðbundnir sívalningar (100x200mm), 11 teningar (150x150x150mm) og eitt plötusýni til að nota við rannsóknirnar. Dæmigerð húsbýggingasteypa var notuð í öll sýni. Meginniðurstaðan var að frostakafi sem ung steypa lendir í lækkar töluvert þrýstistyrk samanborið við sýni sem fá kjöraðstæður. Eftir 90 daga er munurinn þó minni en við 28 daga. Í öllum tilfellum þar sem steypa fékk að harðna fyrst við +5°C í 12 klukkustundir eða lengur náði hún við 90 daga aldur 95% styrk eða hærri af 28 daga styrk viðmiðunarsteypu sem harðnaði við kjöraðstæður allan tímann. Verulega dregur úr yfirborðsflögnun ef steypa fær að harðna í sólarhring eða lengur við +5°C áður en hún lendir í frosti. Í öllum tilraunum stóðust þó steypusýnin viðmiðunargildi fyrir yfirborðsflögnun.

**Lýkilord:** Steinsteypa, frostþol, þrýstistyrkur, yfirborðsflögnun.

## ABSTRACT

It is common in Iceland to carry out concrete work during winter time when temperature can oscillate from plus to minus degrees on short notice. Immediately after mixing of concrete the hydration process of the cement starts and it can take many hours or days depending on the ambient temperature. If fresh concrete is exposed to temperatures below zero unhydrated water can freeze and cause damage of it. The main objective of this paper is to investigate the effect of frost on fresh concrete. Based on temperature data from the Icelandic Meteorological Office for the winter months December, January and February ten test setups were defined where the ambient temperature was varied. Each test consisted of different length of +5°C and -5°C time intervals up to 72 hours from mixing of the concrete. After this the concrete samples were moved to standard concrete test environment +20°C and 100% relative humidity where the samples were kept up to 90 days age. In each test compression strength and surface peeling were measured at different concrete age. In addition internal concrete temperature was monitored. For the whole investigation 210 concrete cylinders, 11 cubes and one plate sample were cast. In all cases common type of building concrete was used. The main results were that the compression strength of the cylinders were degraded compared to strength of reference concrete hardening in standard environment. At the age of 90 days the difference was less than at 28 days age. In all the tests concrete that could harden at +5°C for at least 12 hours or longer had at an age of 90 days more than 95% strength of 28 day strength of reference concrete that could harden in ideal environment at +20°C. Surface peeling was substantial reduced if the samples could harden for at least 24 hours before exposed to frost. In all cases the concrete had less surface peeling than what is considered as acceptable.

**Keywords:** Concrete, frost resistance, compression strength, surface peeling.

## Inngangur

Hördunarhraði steypu og þar með styrkukning hennar er mjög háð hitastigi og aldri steypublöndunnar. Hitastigið er einkum háð umhverfishita en hvörfunarvarmi sementsefjunnar getur einnig haft áhrif, aðallega snemma í hvörfunarferlinu. Á Íslandi er umhverfishiti iðulega fremur lágur og það tekur því lengri tíma en ella fyrir steypuna að ná fullum styrk. Það er nokkuð algengt að steypuvinna sé unnin að haust- eða vetrarlagi á tímabilum þegar lofthiti er lágur en yfir frostmarki, skýjafar og skyndilegar veðurbreytingar geta þó hæglega valdið því að umhverfishiti fellur tímabundið undir frostmark. Slíkar aðstæður hægja óhjákvæmilega á hördun steypunnar og ef hún frýs á óheppilegum tíma í hördunarferlinu þá getur slíkt haft áhrif á endanlegan styrk hennar. Í þessari grein er fjallað um tilraunir með breytilegt umhverfshitastig steypu á hördunarferli hennar, þar sem hitastigið fer tímabundið undir frostmark. Kannað var hvaða áhrif þetta hefur á brotstyrk steypu og frostþol yfirborðs mælt með flögnun. Greinin byggir á meistaraverkefni Kristjáns Andréssonar (2015) sem unnið var við Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands í nánú samstarfi við Nýsköpunarmiðstöð Íslands þar sem allar tilraunirnar voru framkvæmdar.

## Steinsteypa

### Hördunarferli steypu og styrkmyndun

Steypa er blanda fylliefna, sements og vatns, og svo iðulega ýmissa íblöndunarefna sem hafa meðal annars áhrif á flæðieiginleika við niðurlögn og loftkerfi harðnaðrar blöndunnar. Þegar sement blandast vatni og myndar sementsefju þá hefjast margar eðlis- og efnabreytingar

í henni (McMillan, 1958/1966). Efnahvörf verða í sementsefju þegar vatn leysir fyrst upp sementið og síðan hvarfast vatn og sementsefnin. Hversu langt efnahvörfin ganga er háð vatnsmagni í sementsefju (vatns-sements (v/s) hlutfalli), stærð sementskorna og umhverfisaðstæðum (hita og raka). Við hagstæðar aðstæður ganga efnahvörfin langhraðast fyrstu sólarhringana en síðan hægir verulega á. Efnahvörfin stöðvast ef eitthvert eftirfarandi tilvika á sér stað;

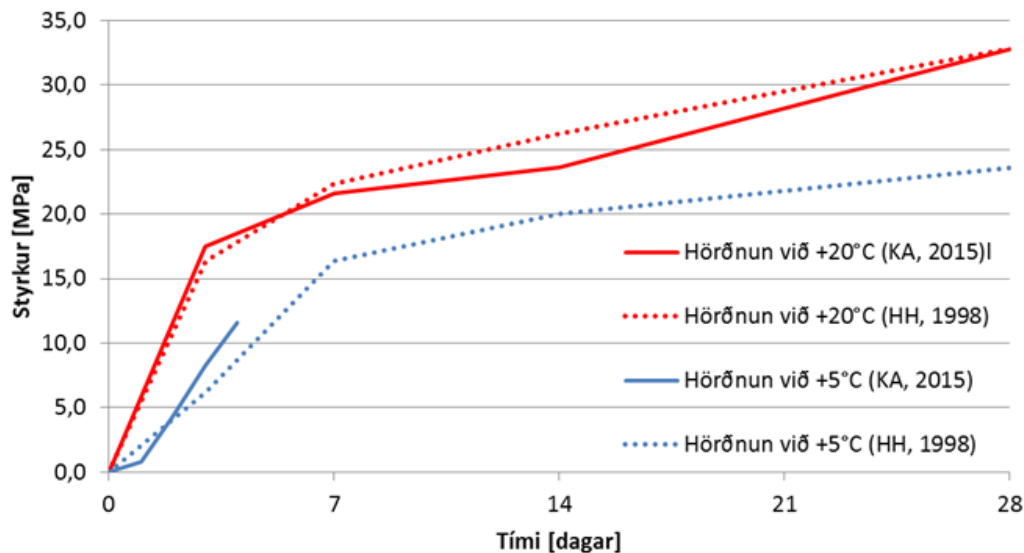
- allt sementið hefur hvarfast
- ekki vatn til staðar fyrir áframhaldandi efnahvörf
- ekki pláss í steypunni fyrir meira af hvörfuðu efni

Það er því alls ekki víst að allt sement hvarfist, og að því tilskyldu að steypan hafi náð tilætluðum styrk er jafnvel heppilegra að steypan nái góðum þéttleika þ.e. efnahvörf stöðvast vegna þriðja skilyrðisins sem nefnt er að ofan.

Hvörfunargráðan  $\alpha$  (e. *hydration degree*) segir til um hversu stór hluti sementsins hefur hvarfast. Iðulega er styrkur steypu á einhverjum tíma sýndur sem hlutfall af 28 daga hördunarstyrk steypu, sem harðnar við 20°C og hátt rakastig. Á mynd 1 eru sýndar mælingar á þrýstistyrk steypu í rannsókninni og til samanburðar reiknaður styrkferill sem byggir á aðferðum úr skýrslu Helga Haukssonar (1998). Steypa sem harðnar við lægra hitastig en 20°C eykur styrk sinn mun hægar. Þannig tók það rúma tvo sólarhringa fyrir steypu við +5°C að ná 5MPa styrk.

## Frostþol steypu

Vatn sem frýs óheft eykur rúmmál sitt um allt að 9%. Ef nýlögð steypa frýs strax í upphafi áður en efnahvörf og binding hefst verður rúmmálsaukning sem getur leitt til þessa að holur og vasar myndast í blöndunni



**Mynd 1.** Styrkukning steypu með tíma og við mismunandi umhverfishita. Sívalningsstyrkur er mældur við ákveðinn aldur steypunnar og bein lína dreginn á milli meðaltalsgilda til að ákvarða feril.

þegar hún þiðnar aftur, sem veikir og skemmir steypuna. Mögulegt er að auka þéttleikann aftur með titrun ef það er gert strax og steypan þiðnar.

Stærstur hluti þórukerfis harðnaðrar sementsefju hefur þóruþvermál stærra en um 40 nm (Gottfredsen og Nielsen, 1997) og vatn í þessum þórum frýs við um 3 frostgráður (Piekarczyk, 2013). Vatn í fingerðustu þórunum frýs ekki fyrr en við 30 frostgráður og þaðan af lægra hitastig, þ.e. í reynd sjaldan í íslenskrri steypu. Á hvörfunartímanum er þetta þórukerfi að myndast samhliða myndun sementsbindinga. Vatn sem frýs í sementsefjunni er ekki lengur aðgengilegt í efnahvörf og verulega hægir á þeim eða þau stöðvast jafnvel. Rúmmálsaukning vegna ísmyndunar mun annarsvegar geta valdið beinum þrýstiáhrifum frá ís á þóruveggi eða í öllu falli aukið þóruþrýsting vatnsfasans og þannig orsakað þrýstiáhrif á veggi þórukerfisins sem getur sprengt og skemmt steypuna (Hákon Ólafsson, 1977; Ljungkrantz, Möller og Peterson, 1997). Hægt er að hafa áhrif á loftkerfi steypu með auka eða minnka loftblendiefni í henni. Í þessari rannsókn var miðað við að skoða hefðbundna húsbýggingasteypu og var magn loftblendiefna því valið í samræmi við það og alltaf notast við sama magn (hlutfall).

Til þess að þola án varanlegra skemmda þær innri spennur sem verða vegna frostáhrifa þá þarf steypan að hafa næð nægjanlegum styrk. Í erlendum ritum er steypa iðulega talin frostþolin ef hún hefur náð 5-6 MPa þrýstipóli áður en hún frýs, og er þá miðað við að endanlegur styrkur megi ekki rýma meira en 5%. Í ÍST EN 13670 (2009) er miðað við að hún sé frostþolin við 5 MPa. Stundum er þó miðað

við lægri mörk, eða allt niður í 3,4 MPa (Rannsóknarstofnun byggingar-iðnaðarins, 1998). Þetta hefur ekki verið kannað sérstaklega fyrir íslenska steypu fyrr en í rannsókninni sem hér er greint frá.

### Hvörfunarvarmi sementsefju

Samfara efnahvörfum í sementsefjunni verður varmamyndun, hvörfunarvarmi (e. *heat of hydration*). Hann er háður sementsgerð, hitastigi sements, vatns og fylliefna við blöndun, v/s hlutfalli, íblöndunarefnum, ytra hitastigi auk annarra þátta sem geta haft áhrif. Algengt er að heildarvarmamyndun í venjulegu Portland sementi sé í kringum 250-300 J/g (Guðmundur Guðmundsson, 2014).

Hraði varmamyndunar vegna efnahvarfanna (e. *rate of heat generation*) er langmestur í stuttan tíma í upphafi en lækkar hratt, vex svo tímabundið á ný og dalar síðan með vaxandi tíma frá upphafi efnahvarfa. Mynd 2 sýnir þetta ferli og jafnframt hve hraði varmamyndunar er háður hitastigi. Við lágt hitastig er varmamyndun mun hægar heldur en við herra hitastig.

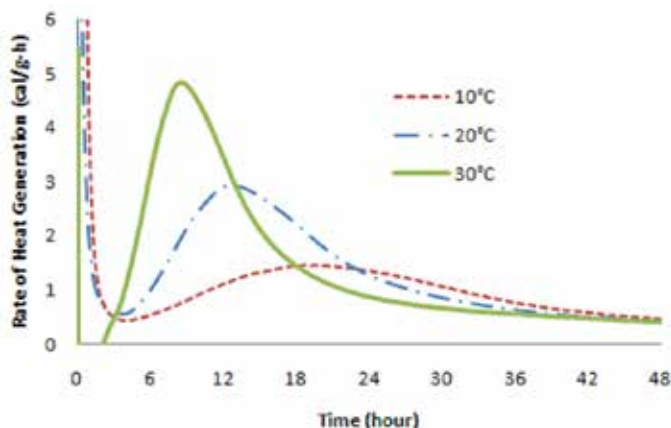
Í töflu 1 er að finna upplýsingar um varmamyndun sem verður í þremur mismunandi steypugerðum fyrstu 72 klst frá því að hún er hrærð við mismunandi hörðunarhitastig. Gildin miðast við hvert gramm af upphaflegu óhvörfuðu sementi sem mun að fullu hvarfast við viðkomandi hitastig.

**Tafla 1.** Varmamyndun steypu á 72 klst við mismunandi hitastig, J/g sements (Neville, 2004)

Sementsgerð	+4 °C	+24 °C	+32 °C	+41 °C
I	154	285	309	335
III	221	348	357	390
IV	108	195	192	214

Hraði varmamyndunar vex verulega eftir því sem efnahvörfin verða við herra hitastig. Heildarvarminn sem efnahvarfið gefur frá sér breytist nánast ekkert þó að hitastigið sé lægra, heldur dreifist hann bara á lengri tíma (Neville, 2004).

Hvörfunarvarminn veldur iðulega vandkvæðum vegna hitaþenslu og hættu á sprungumyndun, einkum í þykkum steypuhlutum (sjá t.d. Kim, Jeon, Kim og Yang, 2003). Stundum eru áhrif hvörfunarvarmans þó jákvæð, þ.e. ef þau hægja nægjanlega á hitastigsbreytingu steypunnar með lækandi umhverfishita þannig að steypan frjósi síður eða að minnsta kosti seinna. Af umfjöllun að ofan má vera ljóst að áhrif hvörfunarvarma á hitastig steypu minnka hratt með lækkuðu hitastigi og minni steypumassa. Í rannsókninni sem hér er greint frá



**Mynd 2.** Hraði varmamyndunar hvörfunarvarma, reiknað á gramm sements, háð tíma og hitastigi (Kim, 2010). Einingin 1 cal/g×h samsvarar 1,163 W/kg

Þótti því áhugavert að fylgjast með steypuhita á hördunartímanum, til að sjá hvort efnishitinn viki umtalsvert frá umhverfishitastigi.

Í reynd má vænta þess að fleiri atriði heldur en lofthiti og hvörfunarvarmi hafi áhrif á steypuhita á hördunartíma; þar munu áhrif geislunar (bæði inn til flatar og útgeislun frá fleti), loftraka og vinds einnig merkjast. Aðhlúun steypunnar á hördunartíma getur því skipt höfuðmáli.

## Aðferðafræði

### Rammi verkefnis

Markmið verkefnisins var að rannsaka áhrif frosts á unga steypu með því að mæla brotstyrk, hitastig og yfirborðsflögnun steypu sem harðnar við mismunandi umhverfisaðstæður. Alls voru skilgreindar 12 ólíkar tilraunir. Tvær þeirra, tilraunir 0-A og 0-B, voru notaðar sem viðmið þar sem umhverfishitasig var fasti allan tímann, annars vegar 20°C í 90 daga og hins vegar +5°C í 96 klst (mynd 3). Í hinum tíu tilraunum voru steypusýnin ýmist fryst beint eða fyrst látin harðna við +5°C í mislangan tíma áður en þau voru útsett fyrir frostkafla við -5°C. Prófaðar voru tvær tímalengdir fyrir frostkaflann; 12 tímar fyrir tilraunir 1-A til 1-E (mynd 4) og 24 tímar fyrir tilraunir 2-A til 2-E (mynd 5). Að frostkafla loknum voru sýnin alltaf flutt í klefa við 20°C og 100% rakastig og látin harðna til enda tilrauna. Ástæðan fyrir þessu vali á lokaumhverfi er að þroskaferill steypu er almennt mjög vel þekktur við staðalaðstæður 20°C og því eðlilegt að bera þroskaferil steypu sem hefur fengið óheppilegar upphafsáðstæður við þessar staðalaðstæður. Við skilgreiningu á dæmigerðri lengd þíðu og frostkafla fyrir tilraunirnar, var stuðst við mælingar Veðurstofu Íslands á lofthita í Reykjavík yfir vetramánuðina, desember, janúar og febrúar fyrir þrjá vetur; 2011-12, 2012-13 og 2013-14 (sjá nánar Kristján Andrússon, 2015). Eins og fram hefur komið voru frostkaflar í þessari rannsókn miðaðir við -5°C. Í rannsókn eftir Yi og félagi (2010) voru skoðuð áhrif frosts þar sem miðað var við -10°C mislanga frostakafla.

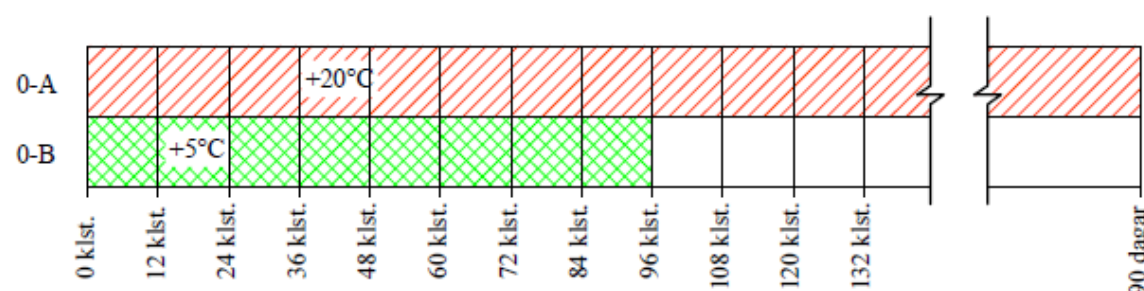
### Steypusýni

Til að ákvarða brotstyrk voru steyptir hefðbundnir steypusívalningar, með 100 mm þvermál og lengdina 200 mm. Notast var við óeinangruð plastmót úr PVC röri. Fyrir hverja tilraun var brotstyrkur mældur með þrýstibroti með hliðsjón af staðli ÍST EN 12390-4. Þrjár prófanir við 3, 7, 14 og 28 daga aldur sýna en sex prófanir við 90 daga aldur.

Tafla 2. Blöndunarhlutföll fyrir 1 m<sup>3</sup> steypu

	Magn (kg)	Innbyrðis hlutföll fylliefnis (%)	Skýringar
Sement	350		Norcem AS, Anleggsement <sup>1</sup>
Vatn	190		
Möl	609	35	Björgun
Sandur	340	20	Björgun
Sandur	797	45	Rauðamelur
Flot	1,44		
Loftblendi	0,88		

1) Portland sement CEM I, styrkflokkur 52,5 N



Mynd 3. Tilraunir 0-A og 0-B sem notaðar voru sem viðmið (Kristján Andrússon, 2015).

Stærð sýna var mæld og þau vegin. Samtals þurfti því 18 sívalninga fyrir hverja 90 daga tilraun (tilraun 0-B var styttri) og voru steyptir 210 sívalningar fyrir öll þrýstibrotsprófin.

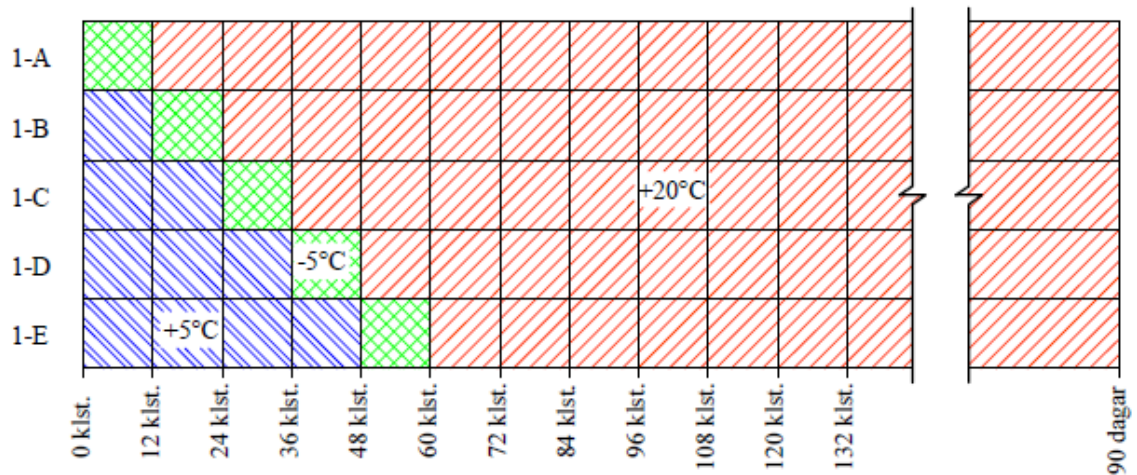
Til að fylgjast með hita í steypu og skoða hvort hvörfunarvarmi hefði merkjanleg áhrif á hann við svo lágt umhverfishitastig var í hluta sívalningssýna steypur inn hitanemi í mitt sýni. Ljóst er að óeinangraður sívalningur er mjög berskjaldaður gegn umhverfishitastigi og því ekki heppilegur til að herma hitastigsþróun í raunverulegri steypri einingu, sem er betur varin gegn umhverfishita. Því var til samanburðar einnig steypur ferningslaga plötusýni með kantlengdina 300 mm og þykkina 150 mm. Það var steypur í mót úr 25 mm þykku timbri sem var jafnframt einangrað að utanverðu á hliðum og í botni með 50 mm steinullereinangrun (mynd 6). Tveir hitanemar voru settir í plötusýnið á 37 og 75 mm dýpi. Fylgst var með hitastigi steypu í bæði sívalningum og plötusýni með sírita.

Til að mæla yfirborðsflögnun voru steyptir teningar af stærðinni 150x150x150 mm fyrir hverja tilraun. Fyrstu 72 klukkustundirnar voru þeir látin harðna samkvæmt tíma- og hitastigsplani viðkomandi tilraunar (myndir 3, 4 og 5). Eftir það voru þeir fluttir í 20°C og 100% loftraka og látin ná 7 daga aldri, þá fluttir í 20°C og 65% loftraka þar til þeir náðu 21 daga aldri. Þrjú sýni voru þá söguð úr hverjum sívalningi og þau svo geymd áfram við 20°C og 65% raka þar til þau náðu 25 daga aldri. Voru þá þétt í mót sem notuð eru í frost-þíðu prófuninni og geymd áfram þar til þau náðu 28 daga aldri og þá fyrst hófst prófun samkvæmt staðli (CEN/TS 12390-9:2006). Fyrst var sett lag af saltlausn yfir sýnin þar til þau náðu 31 daga aldri og hófust þá eiginlegar frost-þíðu prófanir. Flögnun var svo mæld eftir 7, 14, 28, 42 og 56 daga eftir að frost-þíðu prófanir hófust, þ.e. við 31 daga aldur steypunnar.

### Steypugerð

Í samráði við Einar Einarsson, verkfræðing hjá B.M. Vallá var valin steypublanda sem er talin dæmigerð fyrir útisteypu á Íslandi, tafla 2. Hlutföllin eru miðuð við að endanlegur styrkur steypu verði sem næst 30 MPa, vatns-sementstala steypunnar var  $v/s=0,54$ . Steypan var blönduð á rannsóknastofu Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands. Notuð var sérstök rannsóknastofu hrærivél (e. *pan concrete mixer*), þar sem steypan er hrædd með spöðum sem snúast um lóðréttan ás (sbr. eldhúshrærivél). Þetta tryggir jafnari og einsleitari blöndun en fæst í hefðbundinni steypuhrærivél með hallandi tromlu sem snýst.





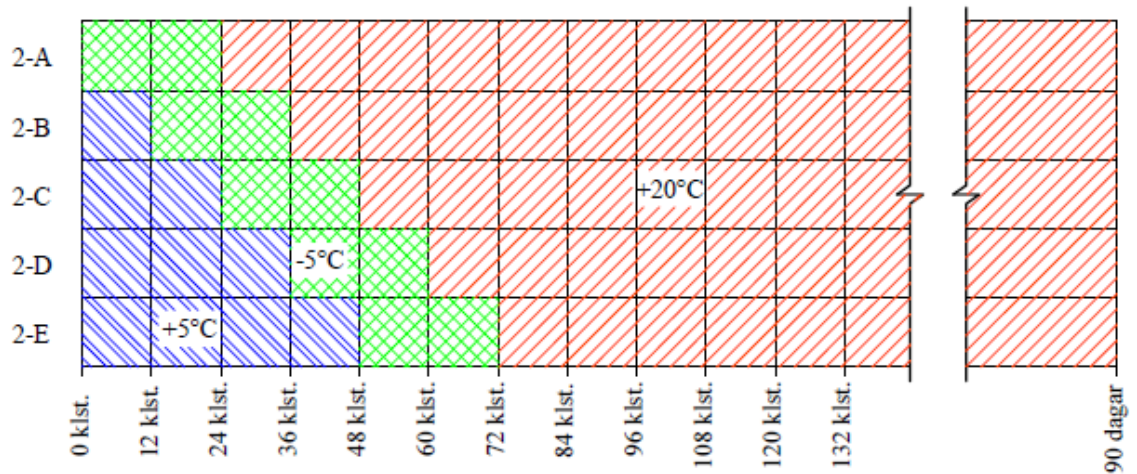
Mynd 4. Tilraunir 1-A til 1-E þar sem lengd frostkafla var 12 klukkustundir (Kristján Andr sson, 2015).

**Niðurstöður**

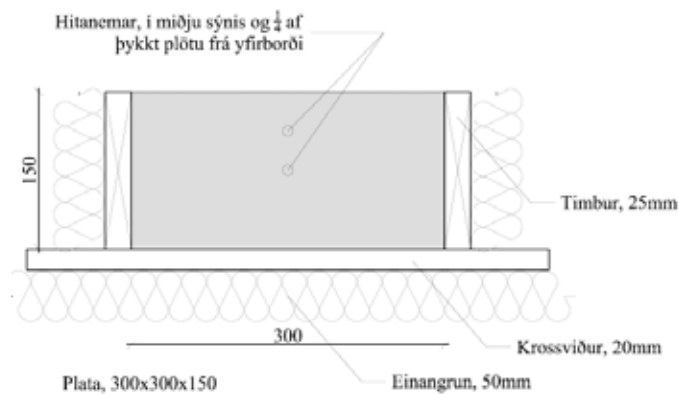
**Hitastig   steypus num**

S valningar voru  einangra ir og lögun þeirra slík   yfirborð var st rt miðað við r mtak, hitanemi var staðsettur   miðju sýni. Ljóst er   áhrif

umhverfshita   steypuhita verða mikil nema hv rfunarvarminn sé því meiri. Við lágt hitastig er hv rfun h g eins og nefnt er ofar og það r  st þ    verulegu leyti   upphafshita, stærð sýnis og e lisr  ilegum eiginleikum blöndunnar hvernig steypuhitinn svarar umhverfisa -



Mynd 5. Tilraunir 2-A til 2-E þar sem lengd frostkafla var 24 klukkustundir (Kristján Andr sson, 2015).



Mynd 7. Pl tus ni sem notað var til   skoða hvernig innri hiti   steypu fellur þegar lofthiti lækkar (Kristján Andr sson, 2015).

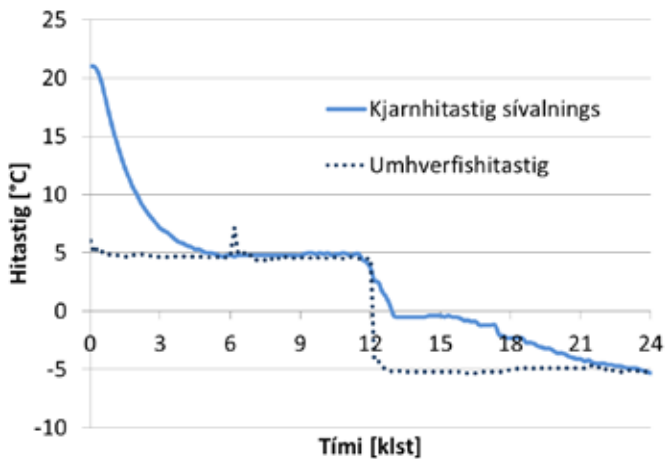
st  um. Steypan var alltaf blönduð við 22-23 C og efnishiti allra fylliefna var einnig 22-23 C.

Mynd 7 sýnir niðurstöður hitam linga fyrir tilraun 1-B þar sem sívalningur var fyrst settur   +5 C   12 klukkustundir áður en frostkafla byrjar. Hitastig   sýninu f ll hratt og var orðið sem næst það sama og umhverfshitinn +5 C    deins 6 klst. Við þetta l ga umhverfshitastig er hv rfunarvarminn svo lítill   áhrifa hans gætir tæpast (sjá einnig mynd 2). Þegar sýnið var orðið 12 stunda gamalt þ  var umhverfshitinn lækkaður   -5 C, efnishitinn f ll við þetta en þ  ekki reglulega. Hitastig   sýninu f ll niður undir frostmark    deins 1 klukkustund, breyttist s dan l ti  næstu 2-3 stundir áður en hitastigið f ll   n  og n di umhverfshitanum -5  C   9-10 stundum frá

lækkun umhverfshitans. H gari hitabreyting   sýninu fyrst eftir   efnishitinn hefur lækkað undir 0 C var sennilega vegna þess   ismyndun   au frystanlegu, lausbundnu vatni   blöndunni ta i ferlið.

Svipað ferli má sjá   mynd 8 sem sýnir mælt hitastig   steypus ni sem var sett strax eftir blöndun   umhverfshitastigi  -5 C (tilraun 1-A). Efnishitinn f ll  deins niður fyrir frostmark   4 stundum en st   svo   stað næstu ( tta) stundirnar.

Þar sem gera má ráð fyrir   allt au frystanlegt vatn   s valningss nunum hafi frosið   fáum stundum, hversu mörgum er breytilegt eftir því hvar hv rfunarferli  er statt, þ  mun hægja verulega eða alveg  



**Mynd 7.** Hitastig í miðjum sívalningi í tilraun 1-B. Sívalningur sem harðnar fyrstu 12 klst. við +5°C, síðan 12 klst. við -5°C og að lokum við +20°C til enda (Kristján Andrússon, 2015).

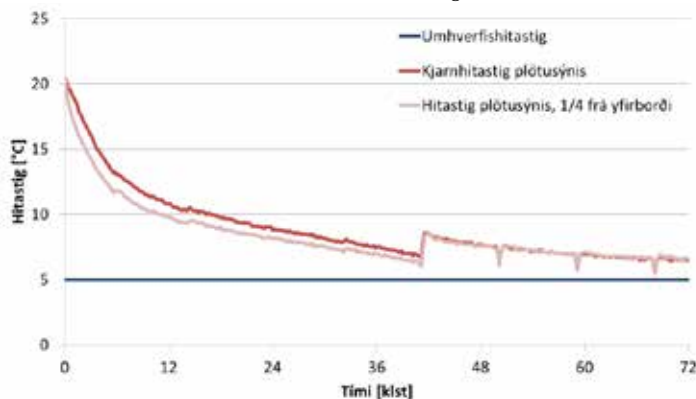
áframhaldandi efnahvörfum vegna vatnsskorts í efjunni. Samanburður við hitamælingu í plötusýni sýndi þó að niðurstöður mælinga í sívalningssýnum gefa sennilega slaka mynd af aðstæðum sem eru til staðar í byggingarhlutum á byggingarstað.

Eins og áður er getið gefur einangraða plötusýnið betri mynd af aðstæðum í steyptri plötu í raunveruleikanum heldur en sívalningur (mynd 6). Einangrun á hliðum sýnisins gerir að verkum að hitatap þar er mun minna heldur en í óeinangruðu sívalningssýni og líkir því betur eftir aðstæðum í stórrí plötusteypu, en vænta má þess að þegar komið er frá plötujáðrinum þá sé ekkert hitatap lárétt í plötusteypunni. Einangrun á botni plötusýnis gerir að verkum að hitastig í sýninu er svipað og gildir fyrir botnplötu sem steypst er á einangrun eða nálgun við hitastig í tvöfalt þykkari plötu (300 mm) sem loft leikur um beggja vegna. Hitamælingar í einangruðu plötusýninu, mynd 9, sýndi talsvert hægari hitabreytingu heldur en var í sívalningssýnunum. Á línuritinu er snögg efnishitabreyting um 40 stundum eftir að steypa var blönduð; það er engin skýring á þessu og sennilegt að hliðra ætti fyrri hluta kúrfunnar upp sem nemur þessu stökki (kúrfan byrjar undir 20°C en hefði að öllu eðlilegu átt að byrja í 22-23°C), fremur en að síðari hlutinn sé of hár. Það liðu því allt að þrjú sólarhringar áður en steypuhitinn í plötusýninu var kominn niður í umhverfishitann 5°C.

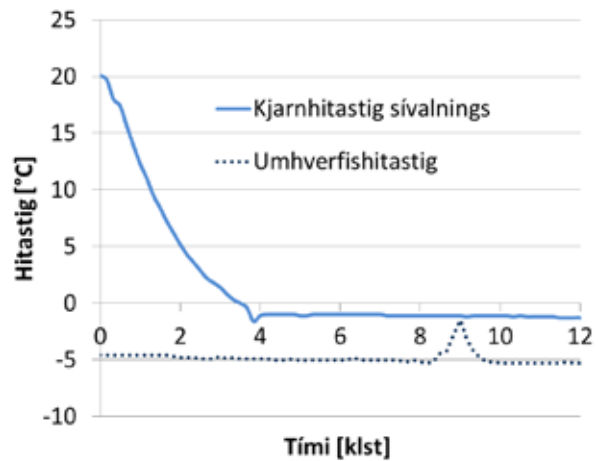
### Brotstyrkur

Það er venja í stöðlum og heimildum að miða steypustyrk við 28 daga styrk þegar steypa hefur harðnað allan tímann við 20 °C við 100% loftraka. Í tilraunum sem hér greinir frá var umhverfishitastig í byrjun hörðunar almennt +5°C eða lægra og því þurfti að leggja mat á hvaða áhrif þessi lági umhverfishiti hafði á hraða styrkukningar.

Á mynd 1 eru sýndir ferlar fyrir mældan styrk steypublöndunar sem notuð var í rannsókninni (tafla 1); annars vegar hörðun við 20 °C í



**Mynd 9.** Hitastig í plötusýni; umhverfishiti, hitastig í miðju sýnis og fjórðungsdýpi (Kristján Andrússon, 2015).



**Mynd 8.** Hitastig í kjarna sívalnings í tilraun 1-A. Sívalningur sem harðnar fyrstu 12 klst. við -5°C og síðan +20°C til enda (Kristján Andrússon, 2015).

28 daga og hins vegar 5°C í 72 klst. Steypa sem harðnaði við síðar nefnda hitastigið jók styrk sinn mun hægar heldur en sú sem harðnaði við hefðbundnar rannsóknarstofu aðstæður. Steypa sem harðnaði við 20 °C náði 5 MPa þrýstipóli, sem iðulega er notað til marks um að steypa sé orðin frostþolin, eftir rúmlega 11 stundir en þegar umhverfishitinn er 5°C þá tók það steypuna um 49 stundir að ná þeim styrk.

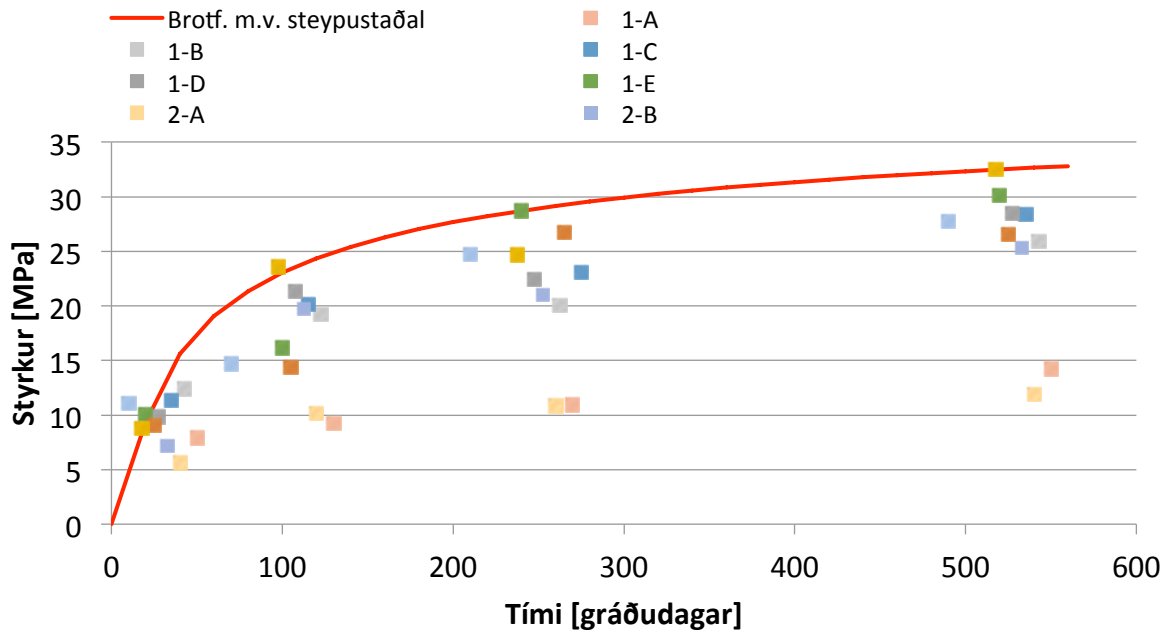
Mældur brotstyrkur steypu í rannsókninni sem fékk að harðna við kjöraðstæður (20°C í 28 daga) bar í aðalatriðum vel saman við staðalferil samkvæmt ÍST EN 1992-1-1 (2004). Á mynd 10 er mældur brotstyrkur úr öllum tilraunum rannsókna (sjá myndir 3 og 4) sýndur þar sem búið er að reikna hvert tilvik yfir í gráðudaga hörðunar þegar brotstyrkurinn er mældur. Framlag til gráðudaga reiknast hér þegar umhverfishitastig er hærra en 0°C. Steypa sem harðnar við kjöraðstæður hefur náð 20x28=540 gráðudögum eftir 28 daga hörðunarferli. Eins og sést liggja svo gott sem öll mældu gildin fyrir neðan staðalferilinn sem má túlka þannig að hörðunarferlið gengur hægar þegar umhverfishitinn er lægri en 20°C fyrstu klukkustundirnar. Lægstu gildin eru frá þeim tilraunum þar sem steypusýnin fóru beint í frost, 1-A og 2-A.

Dæmi um áhrif óheppilegra umhverfisáðstæðna á styrkþróun steypu, eru sýnd á myndum 11 og 12.

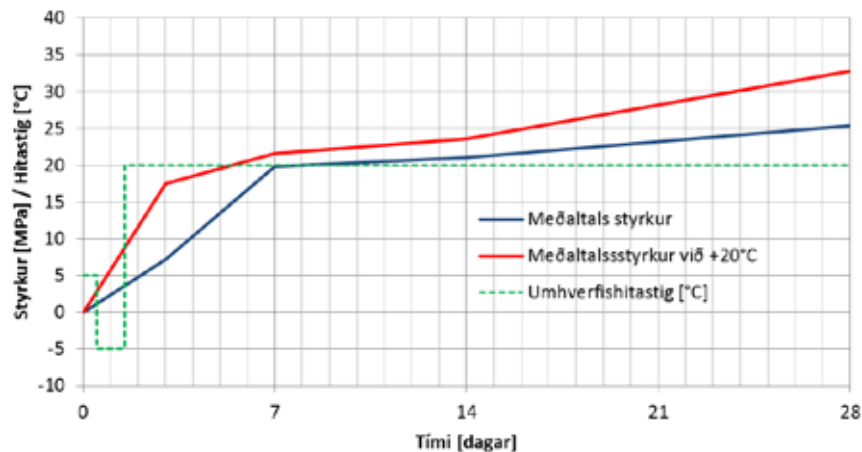
Steypa sem harðnaði í 12 stundir í umhverfishita 5°C og síðan við -5°C í 24 klst (mynd 11) náði óverulegum brotstyrk þegar hún fraus. Steypuhitastigið í miðju sýni fylgdi sem næst umhverfishita þegar hann byrjaði að falla (mynd 7) og féll hratt rétt niður fyrir frostmark en seig síðan hægar og það tók allan frostakafinn fyrir steypuhitann að falla niður í umhverfishitann -5°C. Það má því vænta þess að megnið af vatni í steypunni hafi frosið, þó svo það taki lengri tíma fyrir vatnið í fíngerðari þórunum. Eftir 28 daga þá var mældur styrkur steypunnar um 77% af hönnunarstyrk. Styrkþróun steypunnar eftir þetta hitaáfall var mun hægari heldur en í steypu sem var við hagstæð skilyrði allan tímann, eftir 90 daga hafði hún þó náð 96% af hönnunarstyrk (sjá einnig umfjöllun síðar).

Steypusívalningur sem harðnaði í 24 stundir við umhverfishita +5°C og svo -5°C í 12 klst hafði aðeins náð um 3 MPa brotstyrk þegar umhverfishitinn féll (mynd 12). Styrkukning var þó í reynd ekki línuleg eins og línuritid gefur til kynna. Steypuhitastigið í miðju sýni hefur væntanlega fylgt umhverfishitanum og steypa frosið. Eftir 28 daga þá var mældur styrkur steypunnar um 87% af styrk viðmiðunarsýnis.

Mynd 13 sýnir styrk steypu við 28 daga aldur úr öllum tilraunum, þar sem steypa fékk frostkafla snemma í storkunarferlinu (myndir 5 og 6), sem hlutfall af styrk viðmiðunarsteypu sem harðnaði við staðaláðstæður við 20°C í 28 daga. Styrkurinn var ákvarðaður sem meðaltal þriggja sýna. Almennt þá óx styrkurinn eftir því sem steypa fékk



Mynd 10. Mældur steypustyrkur sem fall af gráðudögum. Rauði ferillin er staðalferill samkvæmt ÍST EN 1992-1-1 (2004).

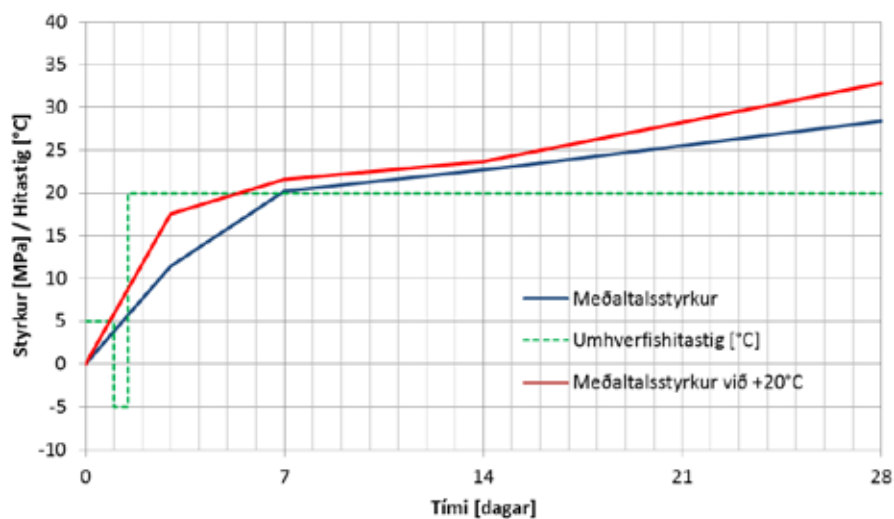


Mynd 11. Mældur brotstyrkur og umhverfishitastig fyrir tilraun 2-B sem fall af tíma. Fyrst hörðun við umhverfishitastig +5°C í 12 klst., síðan við -5°C í 24 klst. og að lokum í +20°C þaðan í frá. Til samanburðar er sýndur mældur brotstyrkur steypu sem harðnaði við 20°C allan tímann (Kristján Andrésson, 2015).

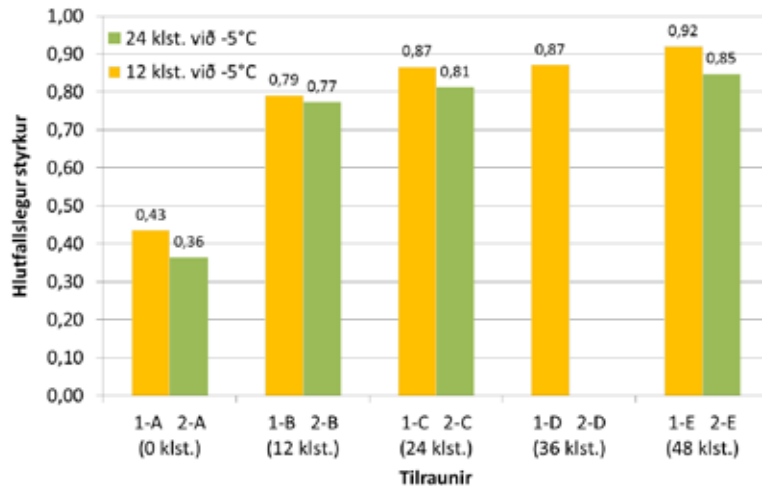
lengri tíma til að harðna áður en hún var sett í frost. Styrkur minnkaði greinilega við aukna lengd á frostkafla. Einnig sést að steypa sem fór beint í frost (tilraunir 1-A og 2-A) hafði minna en helming af styrk

viðmiðunarsteypunnar við 28 daga.

Eins og komið hefur fram þá þarf steypa sem verður fyrir frosthreifum að ná 95% af endanlegum styrk sínum til að teljast frostþolin.



Mynd 12. Mældur brotstyrkur í tilraun 1-C. Sívalningar sem harðna við umhverfishitastig +5°C í 24 klst. sem lækkar í -5°C í 12klst og að lokum í +20°C til enda (Kristján Andrésson, 2015).



**Mynd 13.** Hlutfallslegur 28 daga styrkur steypu í tilraunum 1-A, ..., 2-E af 28 daga styrk steypu sem fær að harðna við staðalaðstæður (20°C í 28 daga). Niðurstöður fyrir tilraun 2-D er sleppt þar sem mistök urðu í þeim mælingum (Kristján Andrésson, 2015).

Niðurstöður á mynd 12 sýna glögglega að þessu marki er ekki náð á 28 daga hörðunartíma steypu sem harðnar fyrst við +5°C og er síðan fryst, þó svo hún fái þaðan í frá hagstæðar hörðunaraðstæður. Í lok þessa tímabils er steypan þó enn að auka styrk sinn marktækt, og áhugavert að skoða hvaða styrk hún nær á lengra tímabili.

Á mynd 14 er sýndur hlutfallslegur styrkur steypu við 90 daga aldur úr öllum frost tilraununum þar sem hlutfallið er miðað við 28 daga styrk í viðmiðunarsteypu (skilgreindan hönnunarstyrk). Steypusívalningar sem fengu að harðna í 12 klst eða lengur við +5°C og fóru eftir það í frost sem varði í 12 klst náðu allir brotstyrk við 90 daga aldur sem var hærri en 28 daga brotstyrkur viðmiðunarsteypu. Sýni sem fengu að harðna í 12 klst eða lengur og fóru eftir það í 24 klst langan frostkafla ná öll 95% styrk af 28 daga styrk viðmiðunarsteypu og stundum meiri. Styrkurinn er þó lægri en hjá sýnunum sem fengu styttri frostkaflann. Mældur 90 daga þrýstistyrkur sýna sem fara beint í frost (12 klst eða 24 klst) liggur langt fyrir neðan styrk viðmiðunarsteypu við 28 daga aldur.

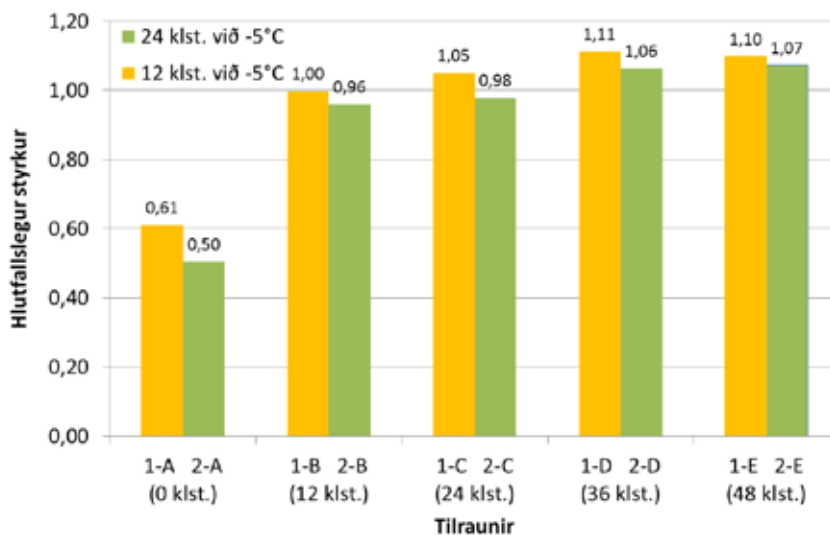
## Flögnun

Í Byggingarreglugerð 112/2012 (2014) er kveðið á um að flögnun sé ekki meiri en 1 kg/m<sup>2</sup> eftir 56 frost-þíðu umferðir. Yfirborðsflögnun byggð á stöðluðu frost-þíðu prófi (CEN/TS 12390-9, 2006) var mæld 7, 14, 28, 42 og 56 dögum eftir að prófið hófst sem miðast við 31 daga

aldur sýna. Gerðar voru mælingar á yfirborðsflögnun fyrir allar tilraunir þar sem steypa var fryst í 12 eða 24 klst. Til samanburðar var mæld yfirborðsflögnun í viðmiðunarsýni sem harðnaði við +20°C allan tímann, tilraun 0-A (mynd 15). Á grafinu má sjá að megnið af flögnuninni átti sér stað fyrstu 28 dagana en sýnin flögnuðu lítið eftir það. Meðaltal heildarflögnunar var um 0,23 kg/m<sup>2</sup>. Þetta gildi er notað sem viðmið hér á eftir.

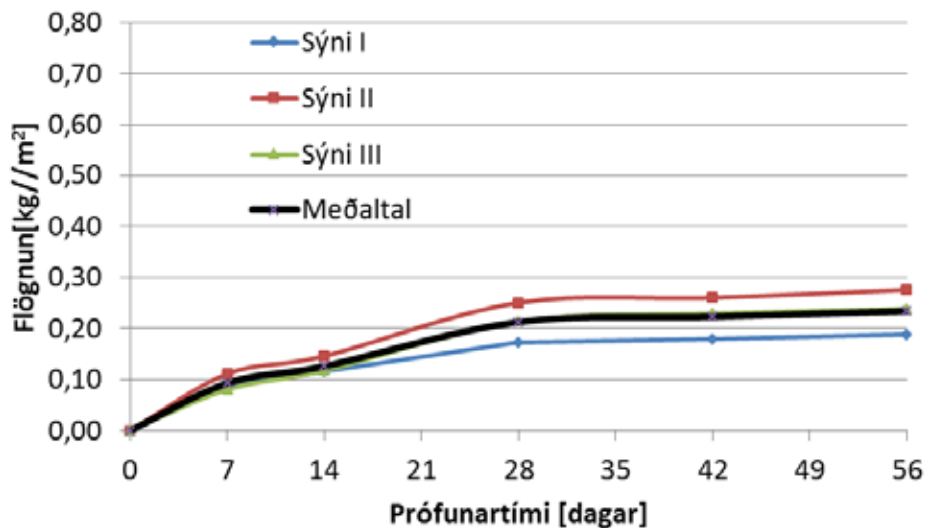
Mæld flögnun var í öllum tilvikum vel innan marka Byggingarreglugerðar. Á mynd 16 er sýnd niðurstaða flögnunarmælinga á sýnum sem fylgdu tilraun 2-A, þ.e. sem fóru beint í -5°C frost í 24 tíma áður en þau voru færð í 20°C; sem voru verstu aðstæður sem prófaðar voru. Flögnunin var jöfn og þétt allan tímann og töluvert meiri en fyrir viðmiðunarsýnið. Meðaltal eftir 56 daga í frost-þíðu prófi var 0,50 kg/m<sup>2</sup> og versta sýnið sýndi tæplega 0,70 kg/m<sup>2</sup> flögnun. Á mynd 17 er sýnd heildarflögnun allra tilrauna sem hlutfall af flögnun viðmiðunarsýnis. Súlan fyrir tilraun 2-C sker sig þó úr, en í ljós kom að loftinnihald í þeirri steypu var um 5% í stað 7-8% sem var í öðrum tilraunum.

Greinilegt er að flögnunin var töluvert meiri fyrir þau sýni sem fóru beint í frost (tilraun 1-A og 2-A) en þau sem byrjuðu að harðna við +5°C. Það er jafnframt ljóst að hafi steypa lent í frostakafli á óheppilegum tímavarki í hörðunarfæri hennar, þá gefa niðurstöður á mældri flögnun í frost-þíðuprófi ekki rétta mynd af gæðum steypunnar; styrkráun getur verið meiri heldur en ásætlanlegt er.

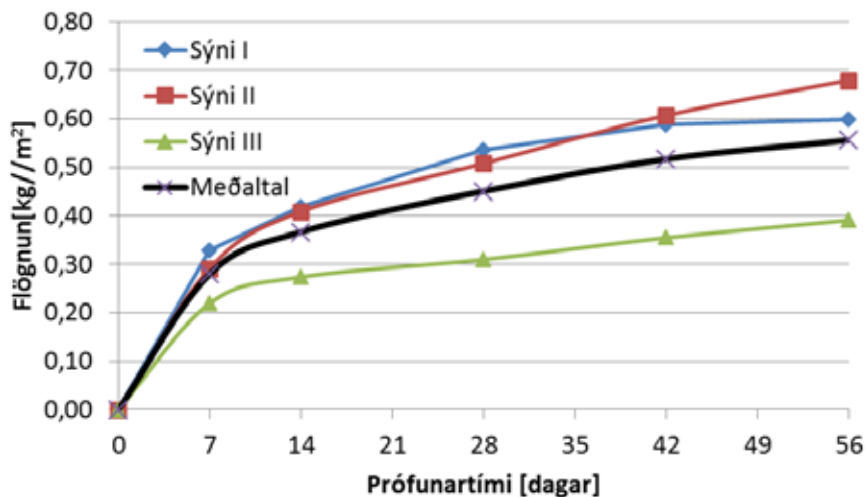


**Mynd 14.** Hlutfallslegur 90 daga styrkur steypu í tilraunum 1-A, ..., 2-E af 28 daga styrk steypu sem fær að harðna við staðalaðstæður (20°C í 28 daga).





Mynd 15. Yfirboðsflögnun í frost-þíðuprófi viðmiðunarsýna sem hördnuðu í 28 daga við +20°C (Kristján Andrésson, 2015).



Mynd 16. Yfirboðsflögnun sýna úr tilraun 2-A sem voru fyrst fryst 24 klst áður en þau fóru í +20°C (Kristján Andrésson, 2015).

### Lokaorð

Rannsóknarverkefnið gekk út á að kanna áhrif frost á nýlagða steypu. Skilgreindar voru alls 10 tilraunir þar sem steypa var látin harða við mismörg tímabil af +5°C og -5°C hitastigsköflum í allt að þrjú sólarhringa eftir að steypa var framleidd. Frostkaflarnir höfðu annað hvort 12 klst eða 24 klst varanda. Hitastig í steypu var mælt, sem og brotstyrkur og yfirborðsflögnun. Niðurstöður brotþolsrannsókna miðast fyrst og fremst við óeinangraða steypusívalninga (100mmx200mm), en mælingar á yfirborðsflögnun við sagaðar sneiðar úr teningum (150x150x150 mm). Hitastig var mælt bæði í óeinangruðum sívalningum og í einangruðu plötusýni. Meginniðurstöður rannsóknarinnar voru:

Það tók steypusívalningana rúma tvo sólarhring að ná 5MPa þrýstistyrk við +5°C. Í heimildum er gjarnan miðað við að steypa þurfi að hafa náð 5MPa þrýstistyrk til að teljast frostþolin.

Steypusívalningar sem hördnuðu í 48 klst við +5°C og náðu þannig 4,5 MPa styrk áður en þeir fóru í frost (12 klst eða 24 klst) urðu fyrir skemmdum og náðu ekki við 28 daga aldur 95% styrk viðmiðunarsteypu. Í reynd var það þannig að allir steypusívalningar sem fóru í -5°C frost hvort heldur strax eða eftir 48 klst náðu ekki 95% styrk af viðmiðunarsteypu við 28 daga aldur.

Við 90 daga aldur náðu hins vegar sívalningar sem hördnuðu við +5°C í 12 tíma eða lengur meiri en 95% þrýstibrotstyrk 28 daga viðmiðunarsteypu óháð því hvort frostkaflinn varði í 12 tíma eða 24 tíma. Þessi rannsókn styður því við þá kenningu að það virðist næg-

anlegt viðmið að til þess að steypa teljist frostþolin þá nægi að hún hafi náð 5 MPa þrýstipoli eða jafnvel minni styrk áður en hún frýs. Hafa verður þó í huga að í rannsókninni fóru steypusýni í öllum tilraunum í 20°C hita og kjörkastig innan 3 daga og héldum þeim aðstæðum fram að 90 daga aldri. Við íslenskar útiáðstæður eða vetráðstæður sem eru mismunandi sem og aðbúnaður steyptra eininga getur tekið langan tíma að ná hönnunarstyrk.

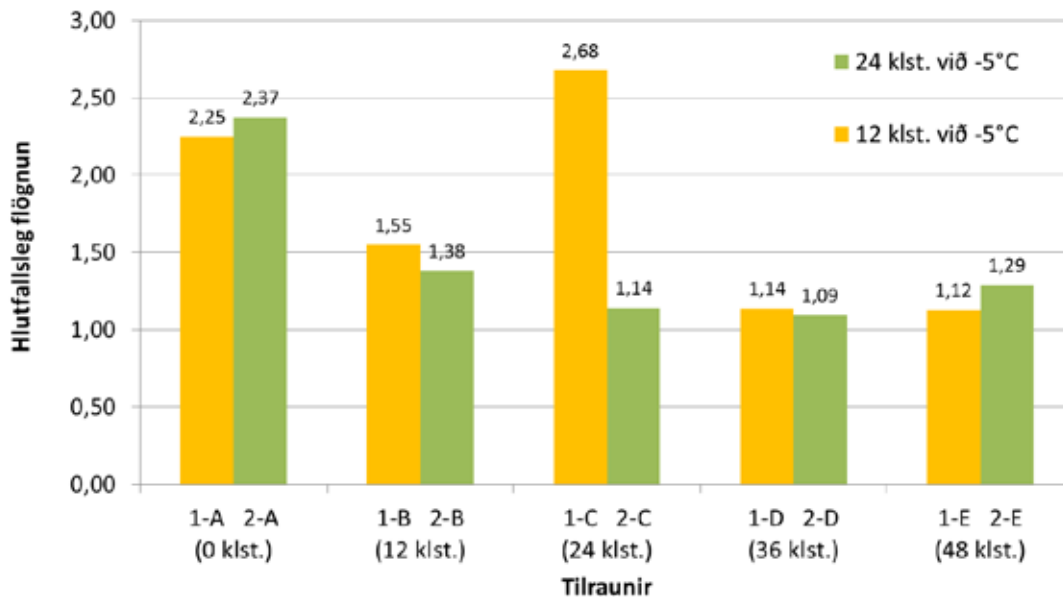
Steypusívalningar sem hördnuðu við +5°C í allt að tvo sólarhringa urðu fyrir meiri skemmdum ef þeir voru settir í -5°C frost í 24 klst samanborið við 12 klst. Þetta bendir til þess að eftir 12 klst sé ekki allt laust vatn frosið og því aukist skemmdir ef frostkaflinn varir lengur.

Steypusýni sem fór beint í -5°C frost, hvort heldur í 12 klst eða 24 klst, lágu langt undir 28 daga styrk viðmiðunarsteypu. Þau sýni virðast hafa skemmt varanlega og má samkvæmt þessum tilraunum ætla að séu ónýt.

Samanburður á hitastigsmælingum í sívalningum og einangruðu plötusýni sýndi að það tekur mun lengri tíma að kæla plötusýnið en berskjaldaðan steypusívalning. Á byggingarstað geta aðstæður verið hagstæðari þar sem steypa er betur varin en sívalningssýnin í þessari rannsókn. Á móti kemur að veðuraðstæður geta verið óhagstæðari en hér, bæði getur verið meira frost (lægga hitastig og lengri varandi) sem og meiri vindkæling.

Sýni úr öllum tilraununum stóðust frost-þíðu prófin miðað við kröfur Byggingarreglugerðar. Mælingar á yfirborðsflögnun sýndu ennfrem-





**Mynd 17.** Hlutfallsleg heildarflögnun miðað við viðmiðunarsýni (tilraun 0-A) eftir 56 umferðir í frost-þíðu prófi. Gildi í sviga er tíminn sem steypa harðnaði við +5°C áður en hún fór í frost (Kristján Andrésson, 2015).

ur að ef steypuþeningar fengu að harðna í sólarhring við +5°C áður en þeir voru frystir, að þá hafði -5°C frost ekki veruleg áhrif á yfirborðsflögnun þeirra. Það er ljóst að hafi steypa lent í frostakafli á óheppilegum tímipunkti í hörðunarferli hennar, þá gefa niðurstöður á mældri flögnun í frost-þíðuprófi ekki rétta mynd af gæðum steypunnar; styrkrýnnun getur verið meiri heldur en ásætlanlegt er.

Rannsóknin vekur upp nokkrar spurningar sem áhugavert væri að skoða í náinni framtíð. Þannig mæti skoða hvaða áhrif það hefur að vinna með einangraða sívalninga og þannig líkja betur eftir plötu eða vegg á byggingarstað. Einnig væri áhugavert að láta steypuna harðna lengur en hér var gert þannig að tryggt sé að hún hafi náð 6 MPa þegar hún fer í frost og athuga hvaða áhrif það hefur á 28 daga styrk. Þá mætti einnig íhuga að skoða áhrif þess að vinna með lægra hitastig, t.d. -10°C, sem og að lengja frostakafliann. Loks væri áhugavert að skella sýnum aftur í lágt hitastig (t. d. +5°C eða +10°C) eftir frostakafli og mæla hversu lengi steypa er að ná 95% styrk af 28 daga styrk viðmiðunarsteypu.

Til að fækka sýnum og minnka vinnu við tilraunir mætti miða mælingar við 24 klst hörðunarþrep í stað 12 klst eins og var gert í þessari rannsókn. Möguleikarnir eru margir en ljóst að þekking vex eftir því sem meira er rannsakað.

## Heimildir

- Byggingarrelgugerð nr. 112/2012 ásamt áorðnum breytingum. (2014). Mannvirkjastofnun Íslands.  
 CEN/TS 12390-9. (2006). Testing hardened concrete –Part 9: Freeze-thaw resistance –Scaling. Staðlaráð Íslands. European Committee for Standardization.  
 Gottfredsen, F. R., Nielsen, A. (1997). Bygningmateriale, grundlæggende

- egenskaber. Lyngby: Polyteknisk Forlag.  
 Guðmundur Guðmundsson. (2014). Hitamyndun í steinsteypu. Sótt 13.10.2014. á <https://sites.google.com/site/sersteypa/hitamyndun-i-steinsteypu>.  
 Hákon Ólafsson. (1977). Vetrarsteypa. Keldnaholt: Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins.  
 Helgi Hauksson. (1998). Hörðun kísilryksblandaðrar steinsteypu við mismunandi hitastig. Keldnaholt: Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins.  
 ÍST EN 13670. (2009). Execution of concrete structures. Staðlaráð Íslands, European Committee for Standardization.  
 ÍST EN 1992-1-1. (2004). Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Staðlaráð Íslands, European Committee for Standardization.  
 Kim, S. G. (2010). Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement. Graduate theses and Dissertation. Paper 11675. Iowa State University.  
 Kim, K-H., Jeon, S-E., Kim, J-K., Yang, S. (2003). An experimental study on thermal conductivity of concrete. Cement and Concrete Research. 33, 363-371.  
 Kristján Andrésson. (2015). Frostþol ungrar steypu. MS-ritgerð. Umhverfis- og byggingarverkfræðideild. Háskóli Íslands. 91 bls.  
 Ljungkrantz, C., Möller, G., Peterson, N. (1997). Betong-handbok. Stockholm. AB Svensk Byggtjänst.  
 McMillan, F. R. (1966). Steinsteypukver (Dr. Guðmundur Guðmundsson verkfræðingur þýddi). Keldnaholt: Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins. (Upphaflega gefið út 1958).  
 Neville, A. M. (2004). Properties of concrete. Malaysia. John Wiley & Sons.  
 Piekarczyk, B.L. (2013). The frost resistance versus air voids parameters of high performance self compacting concrete modified by non-air-entrained admixtures. Construction and building materials. 48, 1209-1220.  
 Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins (1998). Rb-blað Eq.003.3 Vetrarsteypa. Keldnaholt: Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins.  
 Yi, S.T., Pae, S. W., Kim, J.K. (2010). Minimum curing time prediction of early-age concrete to prevent frost damage. Construction and building Materials, 25(3), 1439-1449.