



MANNVIT

FJAÐURSTUÐULL STEINSTEYPU

Rannsóknarverkefni

ÁFANGASKÝRSLA 2

Höfundur:
Sveinbjörn Sveinbjörnsson



Júní 2014



TITILBLAÐ

Skýrsla nr: MV 2014-028	Útgáfunr.: 1	Útgáfudags.: 13.06.2014	Verknúmer: 7-000-297
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Fjaðurstuðull steinsteypu Rannsóknarverkefni, áfangaskýrsla 2			Upplag: 10 Fjöldi síðna: 27
Höfundur/ar: Sveinbjörn Sveinbjörnsson			Verkefnisstjóri (undirskr.): SvSv Yfirfarið (undirskr.): TGS
Verkkaupi: Vegagerðin o.fl.		Tengiliður verkkaupa: Þórir Ingason	
Samstarfsaðilar: Eyþór Rafn Þórhallsson, Háskólanum í Reykjavík; Gylfi Sigurðsson, Vegagerðinni			
Útdráttur: Verkefnið felst m.a. í að kortleggja fjaðurstuðul steinsteypu úr íslenskum fylliefnum sem er á markaðnum á Íslandi í dag og skoða ýmsa þætti sem hafa árif á fjaðurstuðul steinsteypu. Steypusýni hafa verið fengin til rannsóknar frá framleiðendum steypu auk sýna úr nokkrum prófsteypum í rannsóknarstofu Mannvits, alls fjórtíu og fimm sýni. Helstu niðurstöður fram að þessu eru að: 1)Fjaðurstuðull íslenskrar steypu er frá því að vera um 60% og upp í um 115% af viðmiðunargildum fyrir fjaðurstuðul í Eurocode 2. 2)Fjaðurstuðull steypu á höfuðborgarsvæðinu er all breytilegur, frá því að vera um 60% og upp í um 90% af viðmiðunargildum í Eurocode 2, efri gildi fjaðurstuðuls eru sýnilega nokkuð lægri í dag en fengust í rannsókn fyrir um 15 árum. Breytinguna má líklega að hluta til rekja til breytinga á fylliefnanotkun og markaði. Verkefnið hlaut framhaldsstyrk til eins árs frá rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar í ársbyrjun 2014 og verður megin viðfangsefnið í rannsókn á tengslum fjaðurstuðuls steinsteypu og styrks fylliefna			
Efnisorð: Steinsteypa, fjaðurstuðull, þrýstistyrkur, streita, Poissonshlutfall			

Dreifing:



Opin öllum starfsmönnum
(Rafræn í bókasafni)



Lokuð
(Engin dreifing nema með leyfi verkkaupa.)

Breytingasaga:

1	13.06.2014	Útgáfa	SvSv	TGS
Útgáfunr	Dags.	Breyting	Höf.	Yfirfarið

FJADURSTUÐULL STEINSTEYPU

Rannsóknarverkefni

ÁFANGASKÝRSLA 2

Styrktaraðilar 2. áfanga:

Vegagerðin,
Norcem

Höfundur:

Sveinbjörn Sveinbjörnsson
svsv@mannvit.is

Júní 2014

Efnisyfirlit

Skrá yfir töflur.....	5
Skrá yfir myndir.....	5
1. Inngangur	6
2. Kynning	7
2.1 Tilgangur og markmið með öðrum áfanga verkefnisins	7
2.2 Skipulag og framkvæmd.....	7
2.3 Um fjaðurstuðul steinsteypu	8
3. Rannsóknir	9
3.1 Prófunaraðferðir	9
3.2 Prófblöndur í rannsóknarstofu.....	10
3.2.1 Sementsefja	10
3.2.2 Steypublöndur úr þétu fylliefni	10
3.3 Prófun fjaðureiginleika.....	11
3.3.1 Stöðufjaðurstuðull	11
3.3.2 Poissons-hlutfall.....	12
3.3.3 Hreyfðarfjaðurstuðull	13
3.4 Umfjöllun	14
3.4.1 Fjaðurstuðull sementsefju	14
3.4.2 Fjaðurstuðull og áhrif sementsgerða.....	15
3.4.3 Stöðufjaðurstuðull og þrýstistyrkur.....	16
3.4.4 Stöðufjaðurstuðull og holrými fylliefna	17
3.4.5 Stöðufjaðurstuðull og kennistyrkur	19
3.4.6 Poissons-hlutfall og þrýstistyrkur	22
3.4.7 Stöðufjaðurstuðull og hreyfðarfjaðurstuðull.....	23
3.4.8 Samanburður við fyrri rannsóknir	24
3.5 Framhaldsrannsóknir	26
Heimildir:	27

Skrá yfir töflur

Tafla 1	Niðurstöður prófana á harðnaðri sementsefju.....	10
Tafla 2	Niðurstöður prófana á steypu úr þéttu fylliefni.	11

Skrá yfir myndir

Mynd 1	Dæmigerður spennu – streituferill steinsteypu.....	8
Mynd 2	Niðurstöður fjaðurstuðulsmælinga og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í EC2.	12
Mynd 3	Poissons hlutfall og þrýstistyrkur, niðurstöður mælinga.....	12
Mynd 4	Hreyðarfjaðurstuðull á móti þrýstistyrk.....	13
Mynd 5	Fjaðurstuðull hreinnar sementsefju úr mismunandi sementsgerðum og vatnssementstölum við 28 og 90 daga aldur.....	14
Mynd 6	Hreyðarfjaðurstuðull mældur á strendingum úr steypublöndum 1, 2 og 3.....	15
Mynd 7	Mældur fjaðurstuðull og þrýstistyrkur steypusýna og leiðbeinandi gildi fjaðurstuðuls í EC2 sem fall af meðal þrýstistyrknum f_{cm}	16
Mynd 8	Samband fjaðurstuðuls, þrýstistyrks og holrýmdar í fylliefnum prófaðra steypusýna.	17
Mynd 9	Samband fjaðurstuðuls, þrýstistyrks og vatnsdrægni fylliefna í prófuðum steypusýnum.	18
Mynd 10	Samband fjaðurstuðuls og vatnsdrægni fylliefna í steypunni ásamt aðfallslínu fyrir steypusýni með basaltfylliefnum.....	18
Mynd 11	Mældur fjaðurstuðull steypusýna og kennistyrkur þeirra (uppgefinn þrýstistyrksflokkur af framleiðanda) og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í EC2 fyrir kennistyrk.	19
Mynd 12	Samband uppgefins þrýstistyrksflokks steypusýna og mælds þrýstistyrks.....	20
Mynd 13	Samband þrýstistyrksflokks og mælds þrýstistyrks steypusýna eftir endurröðun m.v. þrýstistyrk.....	20
Mynd 14	Mældur fjaðurstuðull steypusýna og kennistyrkur sem er fundin með því að lækka mældan styrk um 8 MPa og afrúnna niður að næsta þrýstistyrksflokki, punktalínur eru viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í EC2 fyrir kennistyrk.....	21
Mynd 15	Mælt Poissons hlutfall sýna á móti meðal þrýstistyrknum f_{cm}	22
Mynd 16	Samband fjaðurstuðuls og Poissons-hlutfalls steypusýna.	22
Mynd 17	Samanburður stöðufjaðurstuðuls E_c og hreyðarfjaðurstuðuls E_d mælingar á 150x300 mm steiptum sívalningum.....	23
Mynd 18	Myndir úr heimild (Ó Wallevik, B Þórðarson, 1999) sem sýna m.a. fjaðurstuðul og þrýstistyrk steypusívalninga við 7, 28 og 90 daga aldur.....	24
Mynd 19	Fjaðurstuðull og þrýstistyrkur steypusýna af höfuðborgarsvæðinu í rannsókn Mannvits og ferlar sem sýna viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í DS411 og 85% og 57% af DS411 sbr. heimildina (Ó Wallevik, B Þórðarson, 1999).	25
Mynd 20	Fjaðurstuðull og þrýstistyrkur steypusýna af höfuðborgarsvæðinu í rannsókn Mannvits, leiðbeinandi gildi fjaðurstuðuls í EC2 og hlutföll af þeim og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í DS411 og meðalferlar úr heimildinni (Ó Wallevik, B Þórðarson, 1999)	25

1. Inngangur

Vinna við rannsóknarverkefnið *Fjaðurstuðull steinsteypu* fór af stað hjá Mannvit hf á fyrri hluta árs 2012 eftir að rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar og Íbúðalánasjóður höfðu úthlutað styrkjum til verkefnisins. Verkefnið hlaut síðan framhaldsstyrk til eins árs frá rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar í ársbyrjun 2013. Gefin var út áfangaskýrsla um verkefnið í maí 2013 um rannsóknir sem unnar voru á fyrsta ári verkefnisins (Sveinbjörnsson S. , 2013).

Í megin dráttum gengur verkefnið út á að kortleggja fjaðurstuðul steinsteypu úr íslenskum fylliefnum sem er á markaðnum á Íslandi í dag og skoða ýmsa þætti sem hafa árif á fjaðurstuðul steinsteypu. Steypusýni hafa verið fengin til rannsóknar frá framleiðendum á höfuðborgarsvæðinu og víðsvegar af landsbyggðinni auk sýna úr nokkrum prófsteypum í rannsóknarstofu Mannvits, alls fjórtíu og fimm sýni. Niðurstöður prófana eru bornar saman við fyrri rannsóknir á Íslandi svo og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í þolhönnunarstaðlinum Eurocode 2 og í íslenska þjóðarviðaukanum við hann. Helstu niðurstöður fram að þessu eru að:

- Fjaðurstuðull íslenskrar steypu er frá því að vera um 60% og upp í um 115% af viðmiðunargildum fyrir fjaðurstuðul í Eurocode 2.
- Fjaðurstuðull steypu á höfuðborgarsvæðinu er all breytilegur, frá því að vera um 60% og upp í um 90% af viðmiðunargildum í Eurocode 2, efri gildi fjaðurstuðuls eru sýnilega nokkuð lægri í dag en fengust í rannsókn fyrir um 15 árum. Breytinguna má líklega að hluta til rekja til breytinga á fylliefnanotkun og markaði.

Verkefnið hlaut öðru sinni framhaldsstyrk til eins árs frá rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar í ársbyrjun 2014. Megin viðfangsefnið í því framhaldsverkefni verður rannsókn á tengslum fjaðurstuðuls steinsteypu og styrks fylliefna.

Í þessari fyrirliggjandi áfangaskýrslu 2 er greint frá framkvæmd og niðurstöðum rannsókna sem gerðar hafa verið í verkefninu á fyrsta og öðru ári þess og fjallað nokkuð um niðurstöður þeirra. Frekari greining og umfjöllun verður í lokaskýrslu sem ráðgert er að líti dagsins ljós á næsta ári, þ.e. 2015.

2. Kynning

2.1 Tilgangur og markmið með öðrum áfanga verkefnisins

Í áfangaskýrslunni frá í maí 2013 er greint frá tilgangi og markmiðum verkefnisins í heild og er vísað til þeirrar skýrslu. Tilgangur með öðrum áfanga verkefnisins var m.a. að afla fleiri steypusýna og gera prófanir á fjaðureiginleikum sýna úr styrkleikaflokkum C40/50 og hærri, en ekki hafði tekist að afla nægilega margra sýna úr þeim flokkunum í fyrsta áfanga verkefnisins. Annar tilgangur var að gera prófblöndur í rannsóknarstofu úr tiltölulega þéttu íslensku fylliefni og kanna áhrif sementsgerða og kísilryksíblöndunar á fjaðurstuðul steypu.

2.2 Skipulag og framkvæmd

Eins og áður er verkefnið samstarfsverkefni Mannvits hf, nokkurra steypuframleiðenda, Háskólans í Reykjavík og Vegagerðarinnar.

Verkefnisstjórn er óbreytt og í henni eru:

- Sveinbjörn Sveinbjörnsson, verkefnisstjóri, Mannvit hf
- Eyþór Rafn Þórhallsson, dósent við Háskólann í Reykjavík
- Gylfi Sigurðsson, verkfræðingur, Vegagerðinni

Um framkvæmd:

Framkvæmd verkefnisins í öðrum áfanga var með sama hætti og lýst er í áfangaskýrslu frá maí 2013 að því er varðar öflun og prófun sýna frá steypuframleiðendum.

Í rannsóknarstofu Mannvits voru gerðar þrjár steypublöndur og prófanir gerðar á þeim. Notað var fylliefni úr innlendu tiltölulega þéttu fylliefni úr einni og sömu námunni, tvær gerðir sements voru notaðar og kísilryksíblöndun var í þriðju blönduna.

Þá voru gerðar sex prófblöndur úr hreinni sementsefju þar sem notaðar voru tvær tegundir sements og kísilryk. Steyptir voru sívalningar úr öllum blöndunum fyrir þrýstistyrks og fjaðurstuðulsmælingar.

Fjaðurstuðulprófanir voru gerðar í samræmi við staðalinn ISO 1920-10:2010 (ISO/TC71-SC1, 2010). Streita steypusívalninga, þ.e. bæði langs og þvers (fyrir fjaðurstuðul og Poissons hlutfall) undir breytilegu þrýstiálagi var mæld með álímdum streitunemum (enska: resistance strain gauges).

Eigintíðni allmargra prófhuta var ákvörðuð með hljóðbylgjumælingum og þær upplýsingar notar til að reikna s.k. hreyfðarfjaðurstuðul (enska: Dynamic modulus of elasticity).

Verkfræðideild Háskólans í Reykjavík hefur komið að verkefninu á þann hátt að tveir nemendur í tækni- og verkfræðideild hafa tekið þátt í prófunum og fengið aðgang að niðurstöðum úr verkefninu og skrifað BSc- og MSc-ritgerðir um efnið (Helgason, 2012) (Björnsdóttir, 2013).

3. Rannsóknir

3.1 Prófunaraðferðir

Stöðufjaðurstuðull

Um prófunarstaðal og prófunaraðferð við ákvörðun á stöðufjaðurstuðli og Poissonshlutfalli er fjallað í áfangaskýrslunni frá í maí 2013 og er vísað til hennar. Þar kemur m.a. fram að stöðufjaðurstuðull steinsteypu, E_c , er skilgreindur sem sniðilfjaðurstuðull og er reiknaður þannig:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\epsilon_a - \epsilon_b}$$

Þar sem

σ_a er efri mörk þrýstispennu ($\sigma_a = F_c/3$)

σ_b = grunnspennan $0,5 \text{ N/mm}^2$,

ϵ_a er meðal streitan við efri mörk þrýstispennu,

ϵ_b = meðal streitan við grunnspennuna $0,5 \text{ N/mm}^2$

Hreyfðarfjaðurstuðull

Eins og getið er um í áfangaskýrslunni frá í maí 2013 var hermitíðni (resonant frequency) ákvörðuð á mörgum sýnum og það var einnig gert í framhaldsverkefninu. Mæliaðferðinni sem beitt var er lýst í bandaríska staðlinum *ASTM C215-08, Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens* (ASTM Subcommittee C09.64). Hreyfðarfjaðurstuðullinn E_d var reiknaður út með jöfnum sem gefnar eru í staðlinum og taka tillit til þátta eins og stærðar, lögunar og massa prófhlutar, bylgjuforms og hermitíðni. Formið á jöfnunum er þannig:

$$E_d = CMn^2$$

Þar sem

C er stuðull sem fer eftir stærð og lögun prófhlutar,

M er massi prófhlutar, og

n er hermitíðni prófhlutar

3.2 Próflöndur í rannsóknarstofu

3.2.1 Sementsefja

Sex blöndur af hreinni sementsefju voru hrærðar í rannsóknarstofu. Tvær blandanna voru úr Portlandsementi (CEM I 52,5N), tvær úr Portlandsementi og 6% kísilyki (CEM I 52,5N + 6% k) og tvær úr Portland-sviföskusementi (CEM II /A-V 42,5R). Önnur blandan með hverri sementsgerð var með bindiefnistölu¹ 0,40 og hin 0,50. Úr hverri blöndu voru steiptir prófhlotir fyrir fjaðurstuðuls- og þrýstistyrksprófanir. Niðurstöður prófana á harðnaðri sementsefju eru í Tafla 1.

Tafla 1 Niðurstöður prófana á harðnaðri sementsefju

Sementstegund	CEM I 52,5 N		CEM I 52,5N+6% k		CEM II/A-V 42,5R	
Bindiefnistala	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40
Rúmþyngd (kg/m ³)	1910	2030	1890	2010	1930	2010
Þrýstistyrkur teninga, 28 d (MPa)	41,8	69,1	39,5	68,4	48,1	69,9
Þrýstistyrkur teninga, 90 d (MPa)	53,3	79,7	53,4	91,1	65,6	87,1
Stöðufjaðurstuðull, 28 d (GPa)	12,3	16,8	12,2	16,7	12,9	17,6
Stöðufjaðurstuðull, 90 d (GPa)	13,3	17,4	12,5	17,5	14,7	20,1

3.2.2 Steypublöndur úr þéttu fylliefni

Þrjár steypublöndur voru hrærðar í rannsóknarstofu úr innlendu tiltölulega þéttu basaltfylliefni og tveimur sementsgerðum auk kísilyksíblöndunar. Sömu blöndunarhlutföll voru í öllum blöndunum, sama vatnssementstala (eða vatnsbindiefnistala) en sementsgerð var breytileg. Í fyrstu blönduna var notað Portlandsement(CEM I 52,5N), í blöndu tvö var notað Portlandsement og 6% kísilyk af þunga sements (CEM I 52,5N+K6%) og í þriðju blönduna var notað Portland-sviföskusement (CEM II/A-V 42,5R). Blöndunarhlutföll voru þannig:

Sement (bindiefni)	320	kg/m ³
Vatn	158	"
Fylliefni	1990	"
Flotefni	2	"
Áætlað loft	3,0	%
Rúmþyngd	2470	kg/m ³

¹ bindiefnistala er hlutfallið: vatn / (sement+kisilyk)

Loftinnihald í ferskri steypu í blöndum 1 og 2 mældist 6,8% og 6,6% en í blöndu 3 mældist það 4,4%.

Úr hverri blöndu voru steypdir sex 150x300mm sívalningar og tveir 100x100x360mm strendingar. Sívalningarnir voru notaðir í þrýstistyrks- og fjaðurstuðulsmælingar og strendingarnir aðallega til mælinga á hreyfðarfjaðurstuðli. Niðurstöður prófana á harðnaðri steypu eru í Tafla 2.

Tafla 2 Niðurstöður prófana á steypu úr þéttu fylliefni.

Blanda nr.	1	2	3
Sementstegund	CEM I	CEM I+K6%	CEM II/A-V
Loftinnihald, fersk steypa (%)	6,8	6,6	4,4
Rúmþyngd hörð steypa (kg/m ³)	2.410	2.410	2.470
Þrýstistyrkur, 28 d (MPa)	38,9	46,9	42,9
Stöðufjaðurstuðull, 28d (GPa)	27,9	30,2	29,7
Hreyfðarfjaðurstuðull sívalninga, 28d (GPa)	35,8	35,6	37,3
Hreyfðarfjaðurstuðull, strendinga, 28 d (GPa)	37,2	38,0	39,1
Hreyfðarfjaðurstuðull, strendinga, 90 d	39,0	39,7	41,3

3.3 Prófun fjaðureiginleika

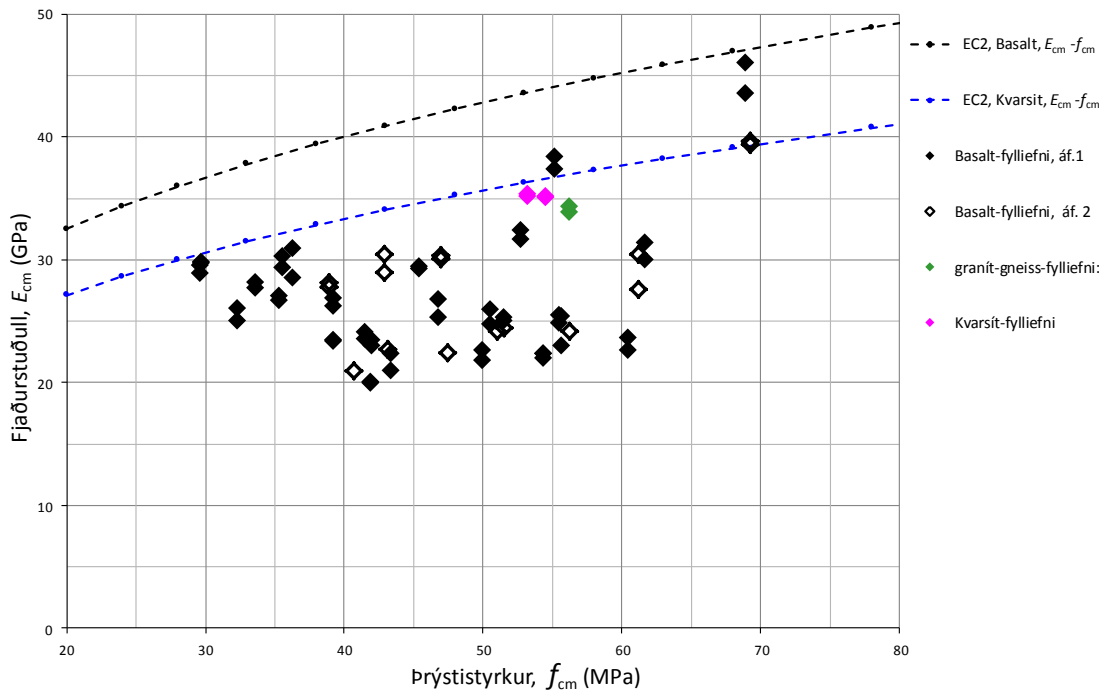
3.3.1 Stöðufjaðurstuðull

Í þessu framhaldsverkefni var stöðufjaðurstuðull eins og áður ákvarðaður í samræmi við viðmiðunaraðferðina í ISO 1920-10:2010 (ISO/TC71-SC1, 2010). Fyrir hvert sýni var þrýstistyrkur fyrst mældur/ákvarðaður á þremur sívalningum og síðan var fjaðurstuðullinn og Poissons hlutfallið ákvarðað á tveimur eða fleiri sívalningum. Alls er búið að prófa fjaðurstuðul og Poissons hlutfall á 38 steypusýnum (78 sívalningum). Þar af eru 31 sýni frá steypuframléiðendum og 7 sýni úr prófblöndum gerðum í rannsóknarstofu.

Niðurstöður nefndra fjaðurstuðulprófana, þ.e.a.s. á hverjum og einum sívalning, eru sýndar á Mynd 2 á móti meðalþrýstistyrk sívalninganna þriggja sbr. ofan. Steypusýni sem innihalda basalt-fylliefni (íslensk fylliefni) eru sýnd með svörtum tígulum, þau sem hafa bæst við í þessum áfanga rannsóknarinnar eru sýnd með opnum tígulum. Eitt steypusýnanna er úr granít-gneiss-fylliefni (innflutt fylliefni) og er það auðkennt með grænum tígulum. Bleikir tíglar sýna niðurstöður fyrir steypublöndurnar sem gerðar voru í rannsóknarstofu úr kvarsít-fylliefnum.

Á Mynd 2 eru einnig sýnd viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í þolhönnunarstaðlinum ÍST EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2 (CEN/TC250, 2004) (hér eftir kallaður EC2) fyrir steypu úr basalt-fylliefnum sem fall af meðalstyrk steypu ($f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)), sbr. EC2, table 3.1 (svört punktalína). Á sama hátt eru gildi fjaðurstuðuls fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum (gildin í töflu 3.1 í EC2) sýnd á línuritinu (blá punktalína).

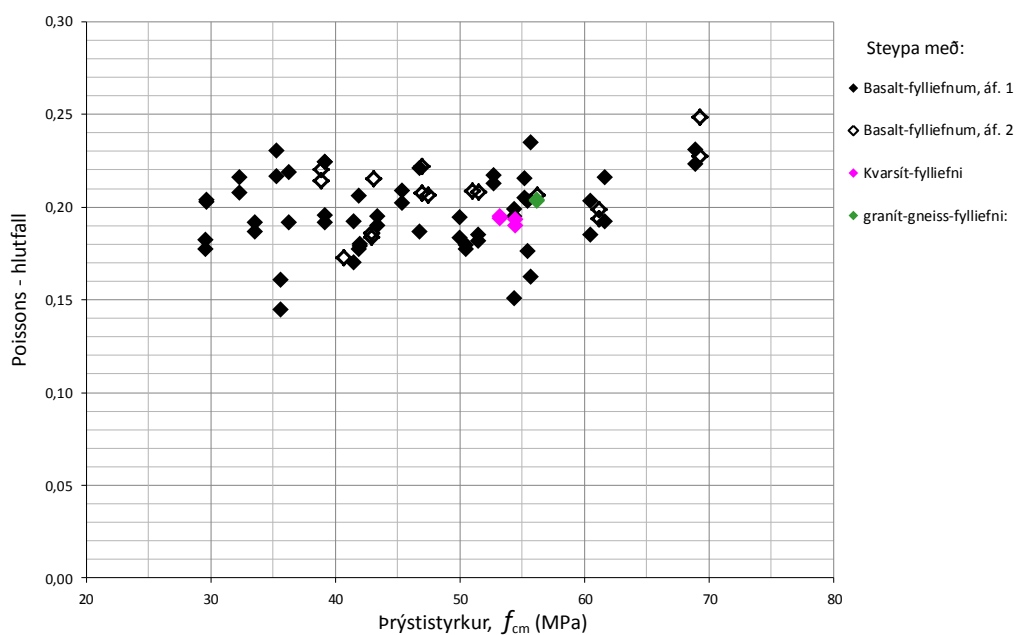
Á Mynd 2 má sjá að steypusýnin voru með þrýstistyrk frá um 30 MPa og og uppí tæplega 70 MPa og fjaðurstuðull stakra prófhluta mældist lægstur 20 GPa og hæstur liðlega 45 GPa. Dreifing á niðurstöðunum er því allmikil, enda er um að ræða steypusýni frá nokkuð mörgum framléiðendum, úr mismunandi styrkleikaflokkum og fylliefnum úr mörgum námum.



Mynd 2 Niðurstöður fjaðurstuðulsmælinga og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í EC2.

3.3.2 Poissons-hlutfall

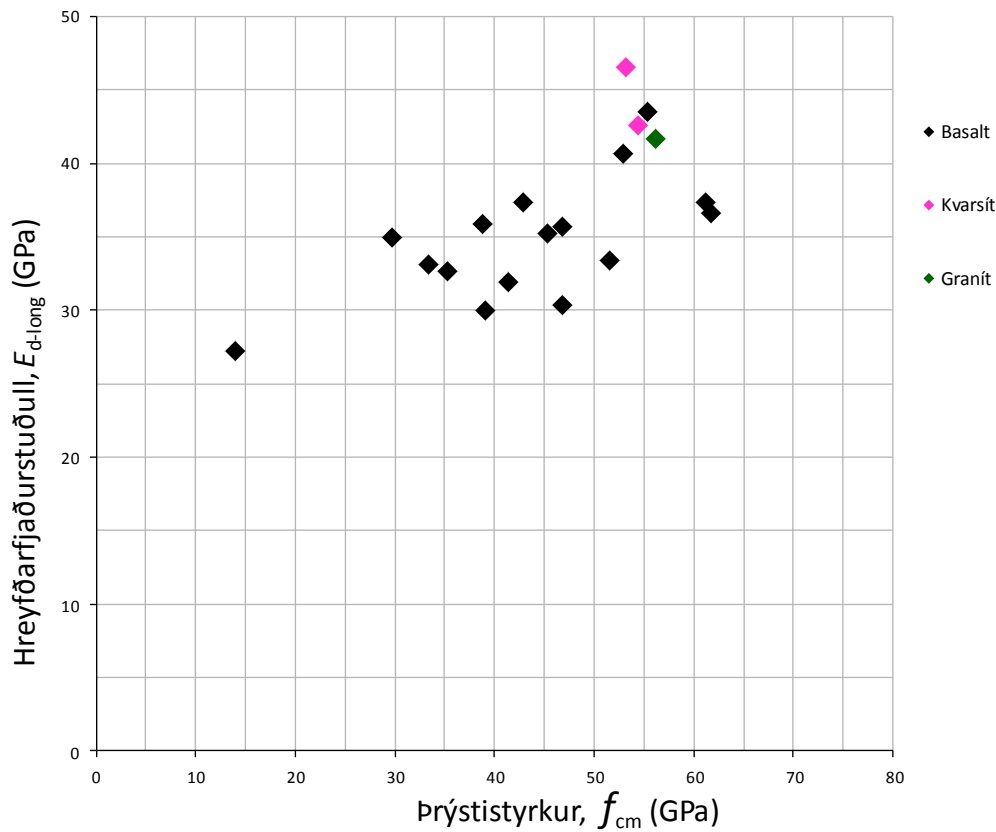
Ummálsaukningin eða Poissons-hlutfallið var ákvarðað á öllum sömu sýnum og fjaðurstuðulsmælingar tóku til. Niðurstöður allra prófananna, þ.e. á hverjum sívalning, eru sýndar á móti þrýstistyrk á Mynd 3. Öll steypusýni sem innihalda basalt-fylliefni (íslensk fylliefni) eru sýnd sem svartir tíglar. Steypusýnið úr granít-fylliefni (innflutt fylliefni) er sýnt með grænum tíglum og bleiku tíglarnir sýna niðurstöður fyrir steypublöndur úr kvarsít-fylliefnum. Sýnin sem prófuð voru í þessum áfanga rannsóknarinnar eru sýnd með opnum tíglum.



Mynd 3 Poissonshlutfall og þrýstistyrkur, niðurstöður mælinga

3.3.3 Hreyfðarfjaðurstuðull

Hermitíðni var ákvörðuð á sívalningum 19 sýna sem síðar voru notaðir í stöðufjaðurstuðulsprófanir. Hermitíðnin var ákvörðuð með samsveiflun bæði lang- og þverbylgja og hreyfðarfjaðurstuðull þeirra reiknaður. Á Mynd 4 er sýndur meðal hreyfðarfjaðurstuðull hvers sýnis (meðaltal tveggja sívalninga) sem var ákvarðaður með samsveiflun langbylgja.



Mynd 4 Hreyfðarfjaðurstuðull á móti þrýstistyrk

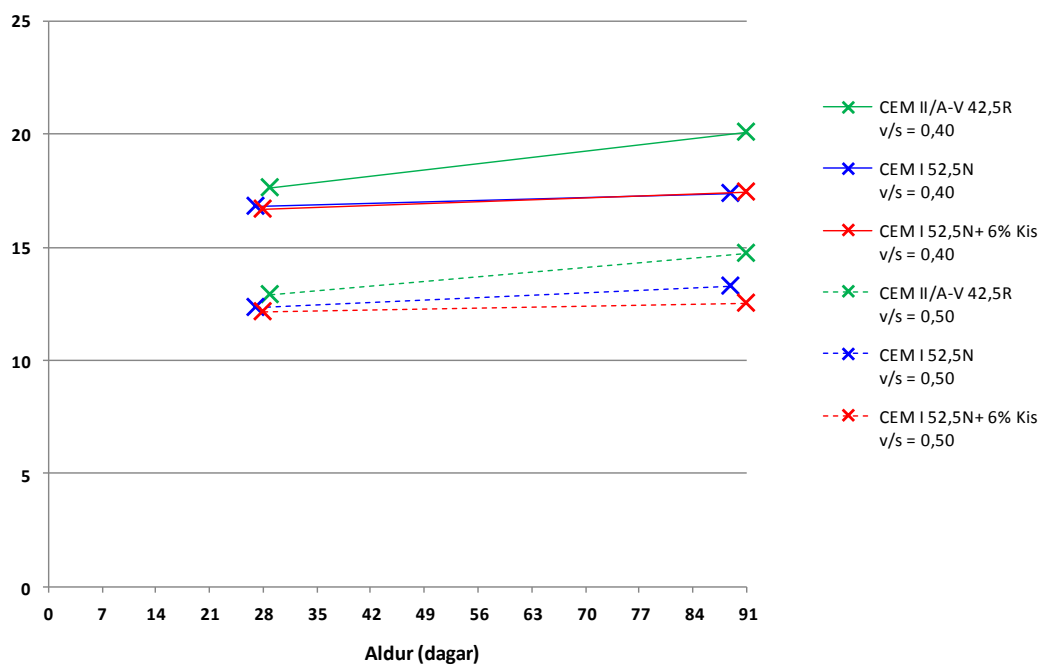
3.4 Umfjöllun

3.4.1 Fjaðurstuðull sementsefju

Fjaðurstuðull var ákvarðaður á sex mismunandi blöndum af hreinni sementsefju. Fjaðurstuðullinn var mældur við 28 og 90 daga aldur prófhluta úr blöndunum. Niðurstöður mælinganna eru sýndar á Mynd 5.

Fjaðurstuðull allra blandna með bindiefnistölu 0,50 við 28 daga aldur mældist um 12,5 GPa og blandna með bindiefnistölu 0,40 er fjaðurstuðullinn um 17 GPa við sama aldur. Við 3ja mánaða aldur hefur fjaðurstuðullinn hækkað mest frá 28 daga aldri hjá Portland-sviföskusementsblöndunni, eða um 15%, meðan Portlandsements-blöndurnar hafa aðeins hækkað um 3 til 8 %.

Fjaðurstuðull (GPa)
sementsefju

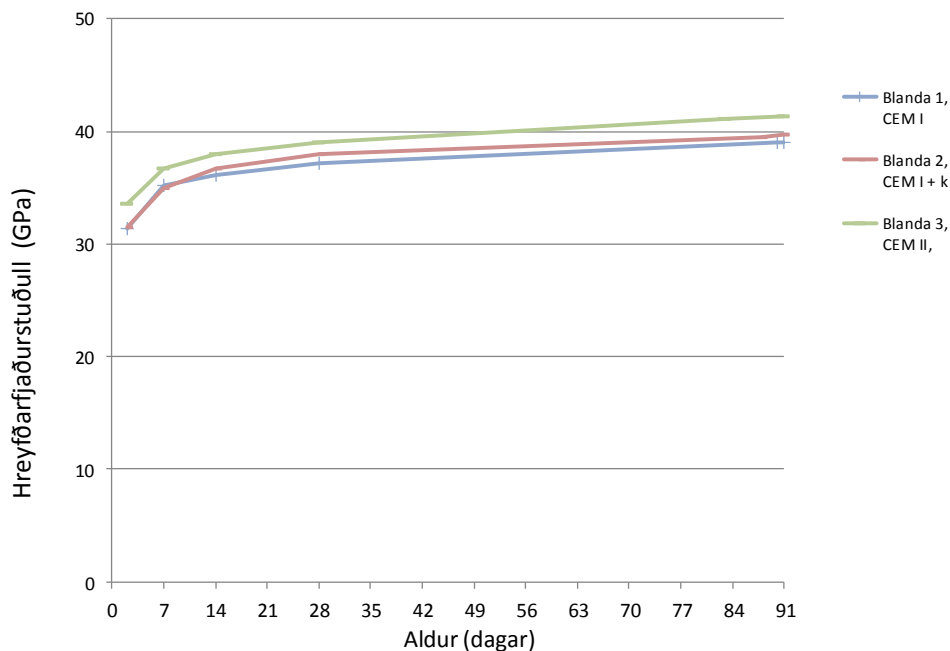


Mynd 5 Fjaðurstuðull hreinnar sementsefju úr mismunandi sementsgerðum og vatnssementstölum við 28 og 90 daga aldur.

3.4.2 Fjaðurstuðull og áhrif sementsgerða

Steypublöndur nr. 1 og 2 eru með svo til sama loftinnihald og eru því nákvæmlega eins að öðru leyti en því að í blöndu 2 er 6 % af sementinu skipt út fyrir kísilyrk sbr. gr 3.2.2 og Tafla 2. Þrýstistyrkurinn mældist 38,9 MPa hjá blöndu 1 en 46,9 MPa hjá blöndu 2, eða rúmlega 20 % hærrí. Fjaðurstuðull hjá blöndu 2 mældist 30,2 GPa, sem er rúmlega 8 % hærra en hjá blöndu 1. Hækkun fjaðurstuðuls er heldur meiri en nemur aukningunni í þrýstistyrk þegar reiknað er skv. líkingunni fyrir viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í EC2.

Loftinnihaldið í blöndu 3, sem er úr Portland-sviföskusementi mældist 4,4 % og er því ekki hægt að bera þrýstistyrk og fjaðurstuðul hennar beint saman við blöndur 1 og 2. Þekkt er að þrýstistyrkur steypu lækkar um u.þ.b. 5 % fyrir hvert viðbótar % loftinnihalds og að fjaðurstuðull lækki um 2 til 3%. Ef þessari þumalputtareglu er beitt á blöndu 3 hefði þrýstistyrkur hennar orðið um 39 MPa og stöðufjaðurstuðullinn um 28 til 28,6 GPa, með sama loftinnihaldi og í blöndum 1 og 2 (þ.e. 6,7% loft). Þrýstistyrkur blöndu 3 er því mjög sambærilegur við blöndu 1 og fjaðurstuðullinn einnig eða örlítið hærrí ef eitthvað. Það má búast við meiri aukningu í styrk og fjaðurstuðli hjá steypu úr Portland-sviföskusementi frá 28 daga aldri til 3ja mánaða aldurs en hjá Portlandssementssteypu, sbr. niðurstöður í sementsefjusteypunum. Þess sér þó ekki merki í niðurstöðum hreyfðarfjaðurstuðuls-prófananna á strendingum sbr. Mynd 6.



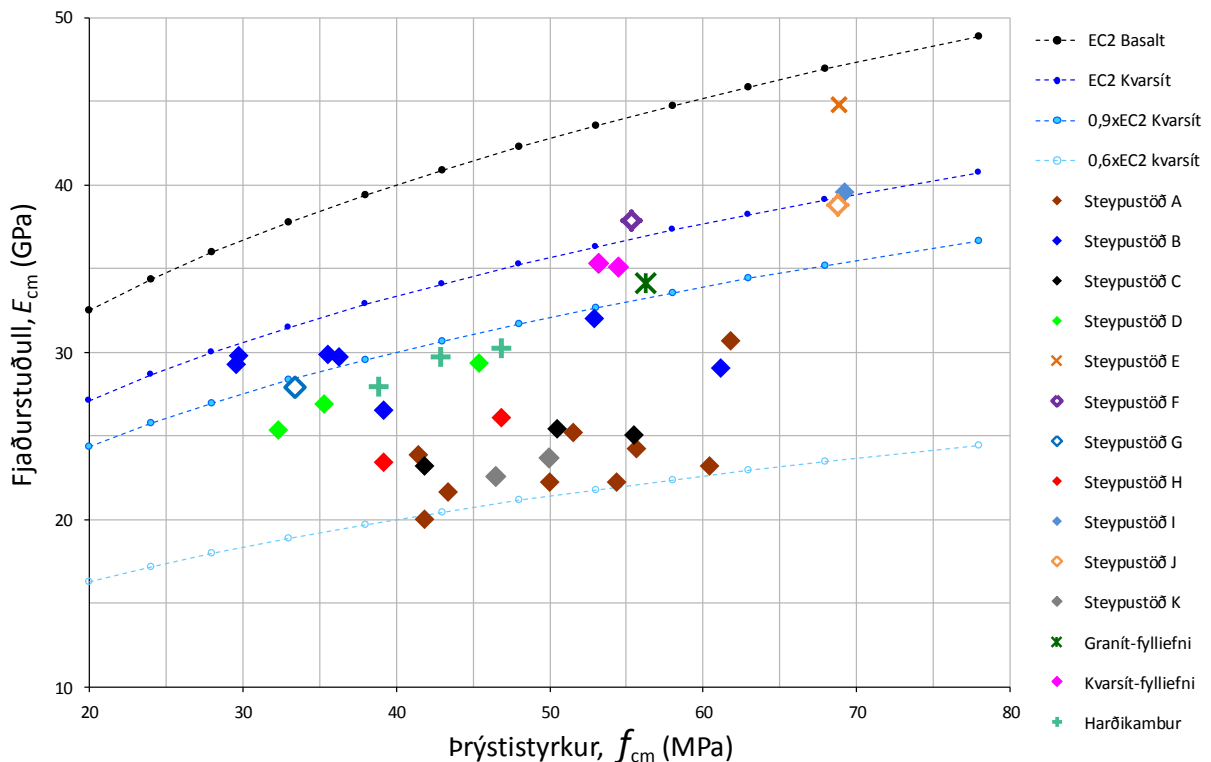
Mynd 6 Hreyfðarfjaðurstuðull mældur á strendingum úr steypublöndum 1, 2 og 3.

3.4.3 Stöðufjaðurstuðull og þrýstistyrkur

Niðurstöður fjaðurstuðuls- og þrýstistyrksmælinga fyrir hvert sýni eru sýndar á Mynd 7. Sýnin frá hverjum framleiðanda eru auðkennd með sér lit. Þá eru leiðbeinandi gildi fjaðurstuðuls fyrir steypu úr basalt- og kvarsít-fylliefnum skv. þolhönnunarstaðlinum EC2 sýnd á sama hátt og gert er á Mynd 2. Ljósbláu punktalínurnar sýna gildi fjaðurstuðuls fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum margfölduð með stuðlunum 0,9 og 0,6.

Eins og sjá má á Mynd 7 er nokkuð misjafnt milli framleiðenda hvar fjaðurstuðulsgildin liggja. Þannig liggja flest gildi sýna frá steypustöð A um og rétt yfir ferlinum (0,6xEC2 Kvarsít), meðan gildi sýna frá steypustöð B og G liggja nálægt ferlinum (0,9xEC2 Kvarsít) með undantekningum þó. Gildi sýna frá þremur framleiðendum, steypustöðvum C, D og H, liggja á milli þessara ferla, en þó mislangt frá þeim. Fjaðurstuðulsgildi sýna frá þremur framleiðendum, steypustöð F, I og J, eru við (EC2 Kvarsít) ferilinn. Eitt sýni, steypustöð E, er með fjaðurstuðul um 115% af viðmiðunargildi EC2 fyrir Kvarsít-fylliefni og er nálægt viðmiðunargildi EC2 fyrir basaltfylliefni. Fjaðurstuðullinn í steypum úr kvarsít-fylliefnunum er nálægt viðmiðunargildum í EC2 en granít-fylliefnasteypan er heldur lægri.

Þess ber að geta að litirnir merkja ekki endilega steypu með fylliefni úr ákveðinni námu því sumir steypuframleiðendur nota fylliefni úr tveimur eða jafnvel fleiri námum. Hvert steypusýni getur því innihaldið blöndu af fylliefnum úr tveimur eða fleiri námum eins og fjallað er um síðar.



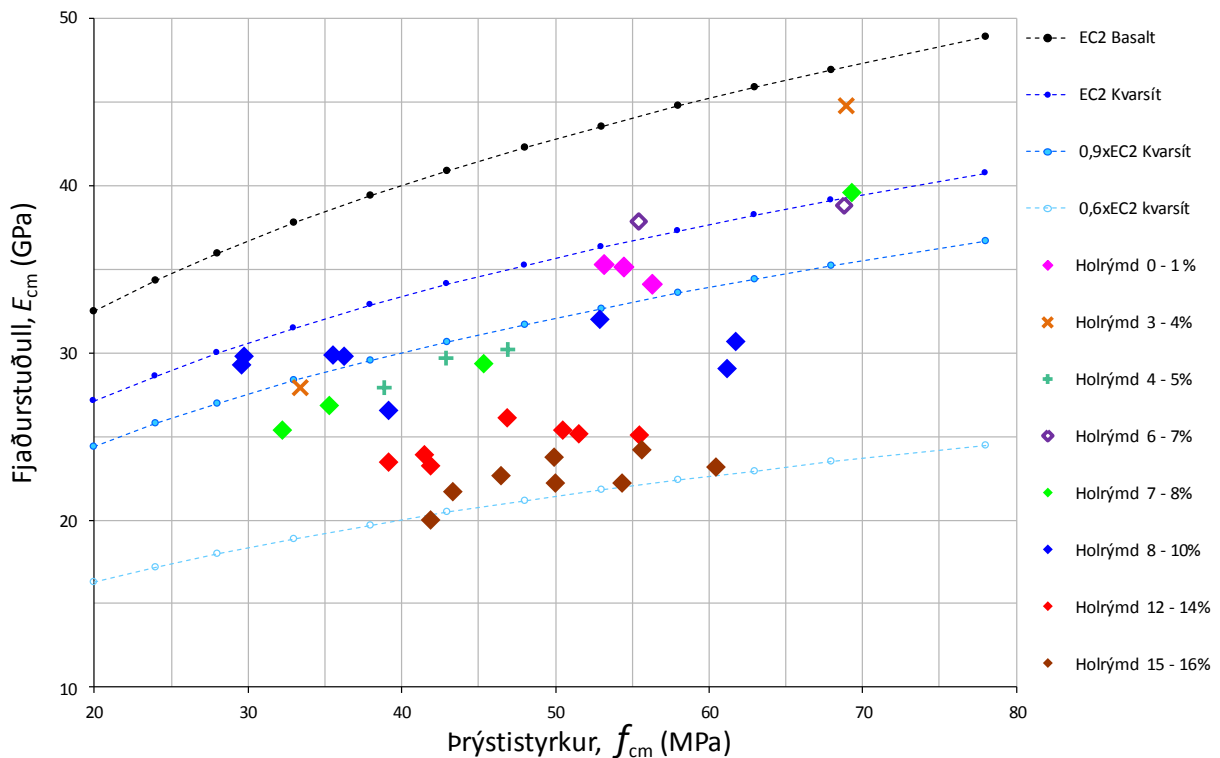
Mynd 7 Mældur fjaðurstuðull og þrýstistyrkur steypusýna og leiðbeinandi gildi fjaðurstuðuls í EC2 sem fall af meðal þrýstistyrknum f_{cm} .

3.4.4 Stöðufjaðurstuðull og holrými fylliefna

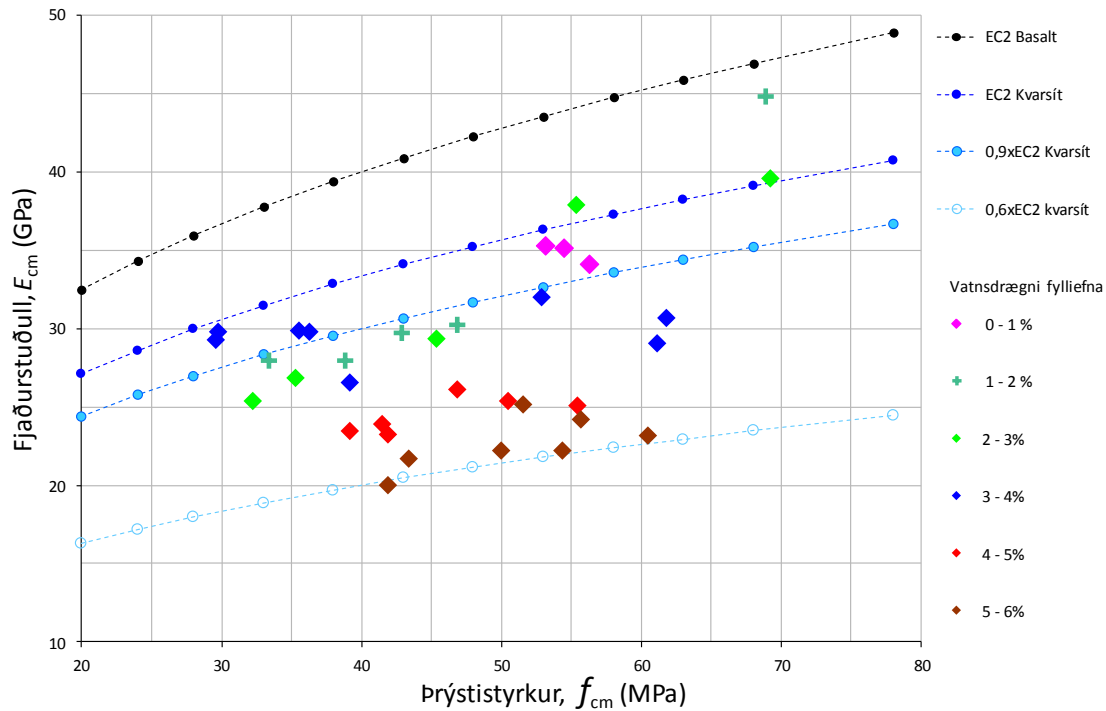
Innlend fylliefni eru nær undantekningalaust úr basaltbergi, en það hefur myndast við gosvirkni á löngu tímabili við breytileg skilyrði. Basaltið er því mjög breytilegt að efnis- og eðliseiginleikum, t.d. að því er varðar holrýmdu í því. Holrýmdu í bergi hefur áhrif á fjaðurstuðul þess og það hefur aftur áhrif á fjaðurstuðul steinsteypu sem úr því er gerð.

Til að kanna áhrif þessa var holrýmdu fylliefna í steypusýnunum reiknuð út frá fyrirliggjandi upplýsingum um blöndunarhlutföll og vatnsdrægni (einnig nefnt mettivatn) fylliefnanna. Holrýmdu fylliefnis er hlutfall af heildarrúmmáli þess, en vatnsdrægni er hlutfall vatns, sem fylliefni getur dregið í sig, og þurrpunga fylliefnisins. Á Mynd 8 er sýnt samband fjaðurstuðuls, þrýstistyrks og holrýmdar fylliefna í steypunni og á Mynd 9 hefur holrýmdu fylliefnis verið umreiknuð í vatnsdrægni fylliefna. Holrýmdu og vatnsdrægni sem hér er reiknuð út er vegið meðaltal sands og malar í hverju steypusýni, en ath. ber að holrýmdu og vatnsdrægni þarf ekki að vera sú sama fyrir mól og sand, jafnvel þó efni séu úr sömu námu.

Með því að skoða myndirnar má sjá að fjaðurstuðull steinsteypu er háður holrými og vatnsdrægni fylliefnanna.

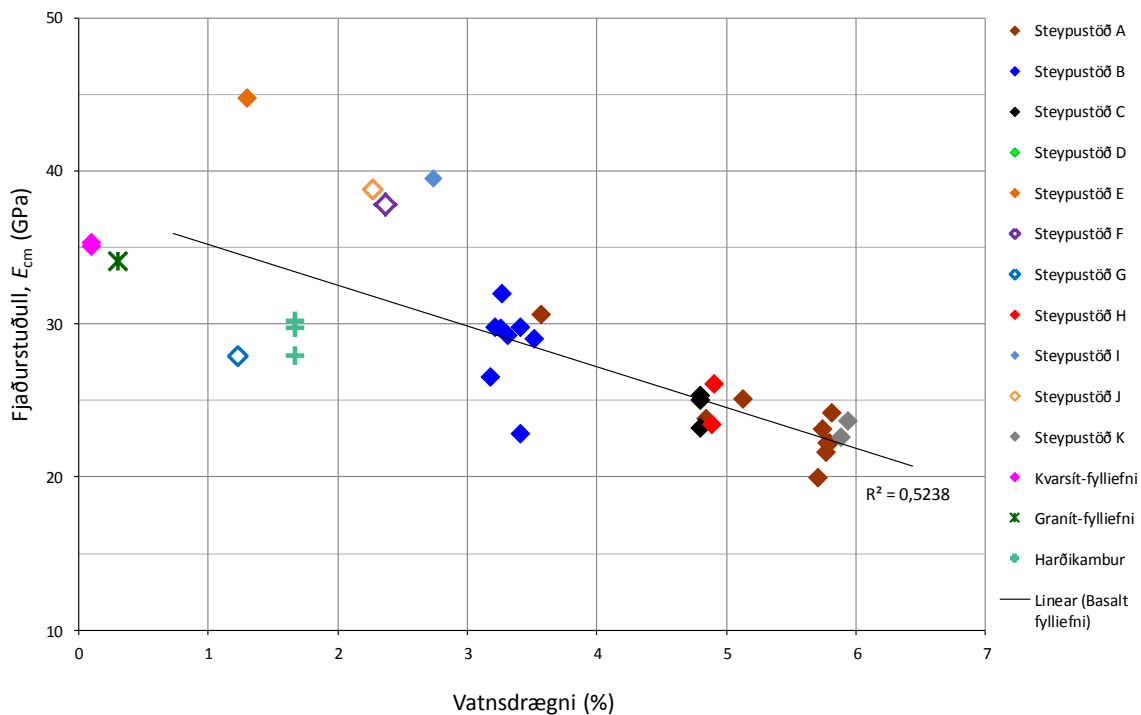


Mynd 8 Samband fjaðurstuðuls, þrýstistyrks og holrýmdar í fylliefnum prófaðra steypusýna.



Mynd 9 Samband fjaðurstuðuls, þrýstistyrks og vatnsdrægni fylliefna í prófuðum steypusýnum.

Mynd 10 sýnir samband fjaðurstuðuls og vatnsdrægni fylliefna fyrir öll prófuð steypusýni. Það má sjá greinilega fylgni fjaðurstuðuls steypu við vatnsdrægni fylliefna. Dreifingin er hins vegar nokkuð mikil, enda um að ræða steypusýni frá mörgum framleiðendum og með breytilega samsetningu, styrk o.s. fr.

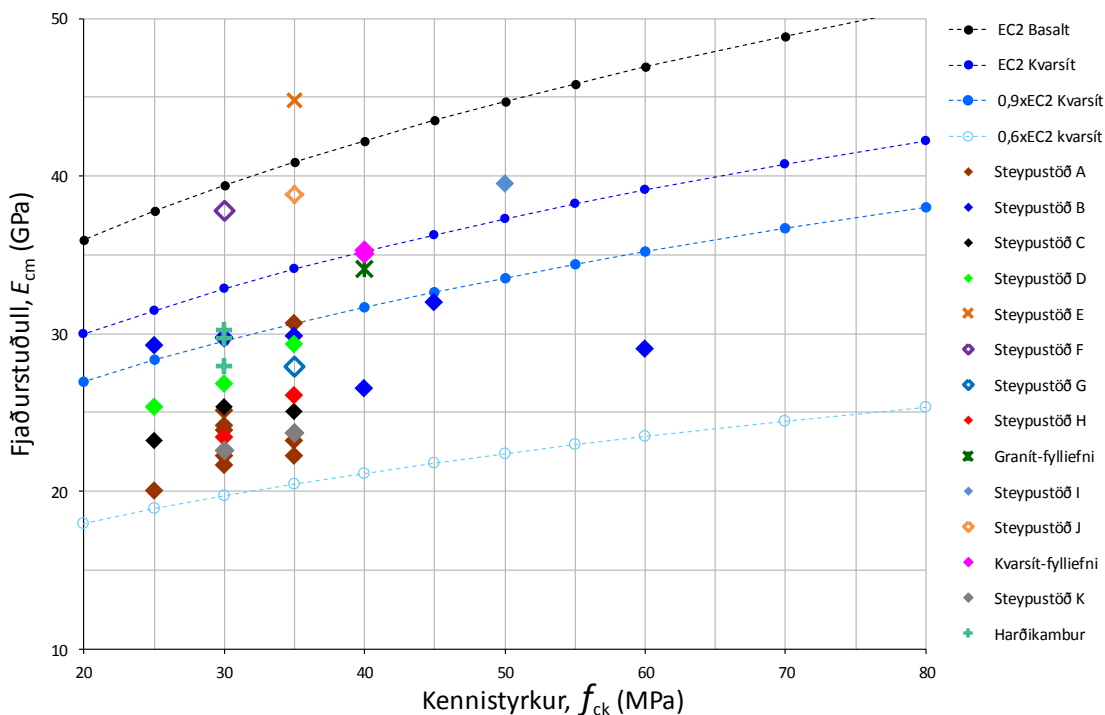


Mynd 10 Samband fjaðurstuðuls og vatnsdrægni fylliefna í steypunni ásamt aðfallslínu fyrir steypusýni með basaltfylliefnum.

3.4.5 Stöðufjaðurstuðull og kennistyrkur

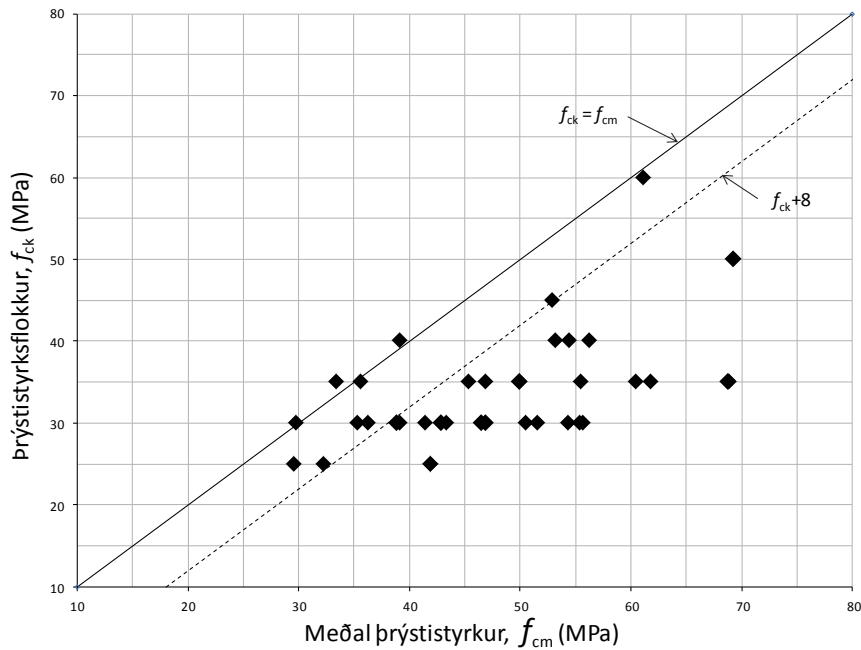
Steypuframleiðendur gáfu m.a. upp þrýstistyrksflokk (kennistyrk) þeirrar steypu sem sýnin voru tekin úr. Á Mynd 11 er samhengi uppgefins styrkleikaflokks og mælds fjaðurstuðuls sýnanna teiknað upp. Á myndinni eru einnig sýnd leiðbeinandi gildi fjaðurstuðuls skv. EC2 fyrir steypu úr basalt-fylliefnum (svört punktalína) á móti kennistyrk steypu (f_{ck}), sbr EC2, table 3.1. Á sama hátt eru gildi fjaðurstuðuls fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum (gildin í töflu 3.1 í EC2) sýnd á línuritinu (blá punktalína) og margfeldi þeirra gilda með stuðlunum 0,9 og 0,6 (ljósbláar punktalínur). Þetta er gert vegna þess að almennt munu gildin í töflu 3.1 í EC2, sem eru fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum, vera tekin sem gildi fjaðurstuðuls sem íslenski þjóðarviðaukinn vísar til.

Á Mynd 11 má sjá að fjaðurstuðull flestra sýnanna liggja á milli gildanna 60 % og 90 % af leiðbeinandi gildum fjaðurstuðuls í EC2 fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum. Öll sýni eru með fjaðurstuðul hærri en 60% línán, 8 sýni eru hærri en 90% línán og 4 eru hærri en 100% línán (leiðbeinandi gildi fjaðurstuðuls fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum). Kvarsít og granít steypusýnin eru ekki með í þessari upptalningu.



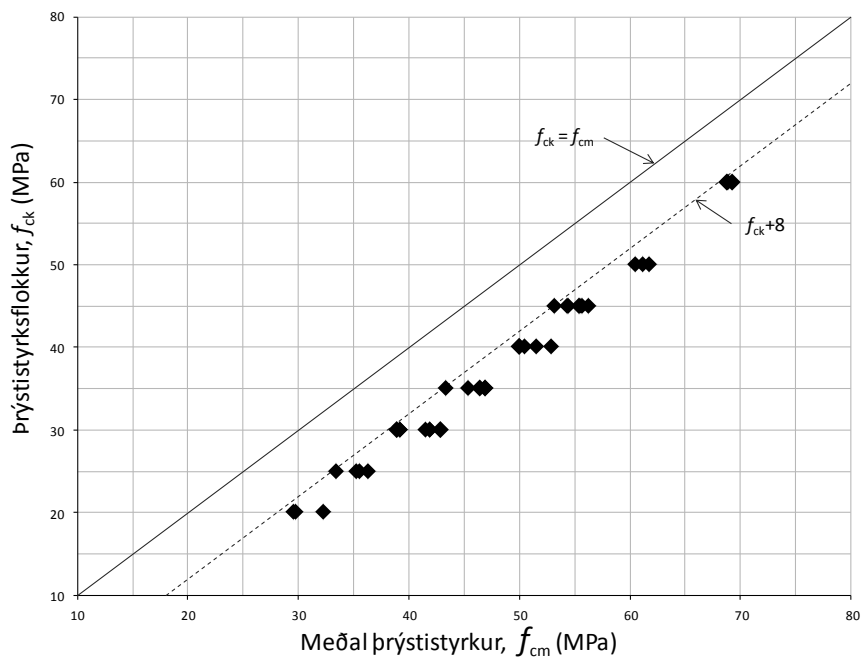
Mynd 11 Mældur fjaðurstuðull steypusýna og kennistyrkur þeirra (uppgefinn þrýstistyrksflokkur af framleiðanda) og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í EC2 fyrir kennistyrk.

Eins og áður er komið fram er fjaðurstuðull ákvarðaður með hliðsjón af þekktum þrýstistyrk steypu en ekki miðað við uppgefinn styrkflokk eða kennistyrk. Mældur þrýstistyrkur flestra steypusýnanna er, eins og búast mátti við, hærri en uppgefinn styrkflokkur, í sumum tilfellum munar mörgum styrkflokkum sbr. Mynd 12. Ástæða þess er að líkum skilyrðið um yfirstyrk, það er að meðalstyrkur framleiðslunnar sé hærri en kennistyrkurinn þannig að ekki meira en 5 % mögulegra sýna hafi styrk sem er lægri en kennistyrkurinn. Aðrar ástæður geta t.d. verið að krafa um lága vatnssementstölu (tilgreint hámarksgildi), eða lágmarks sementsinnihald, eða að krafa um frostþol, geri að verkum að þrýstistyrkur steypunnar verði mun hærri er tilgreindur kennistyrkur (þrýstistyrksflokkur).



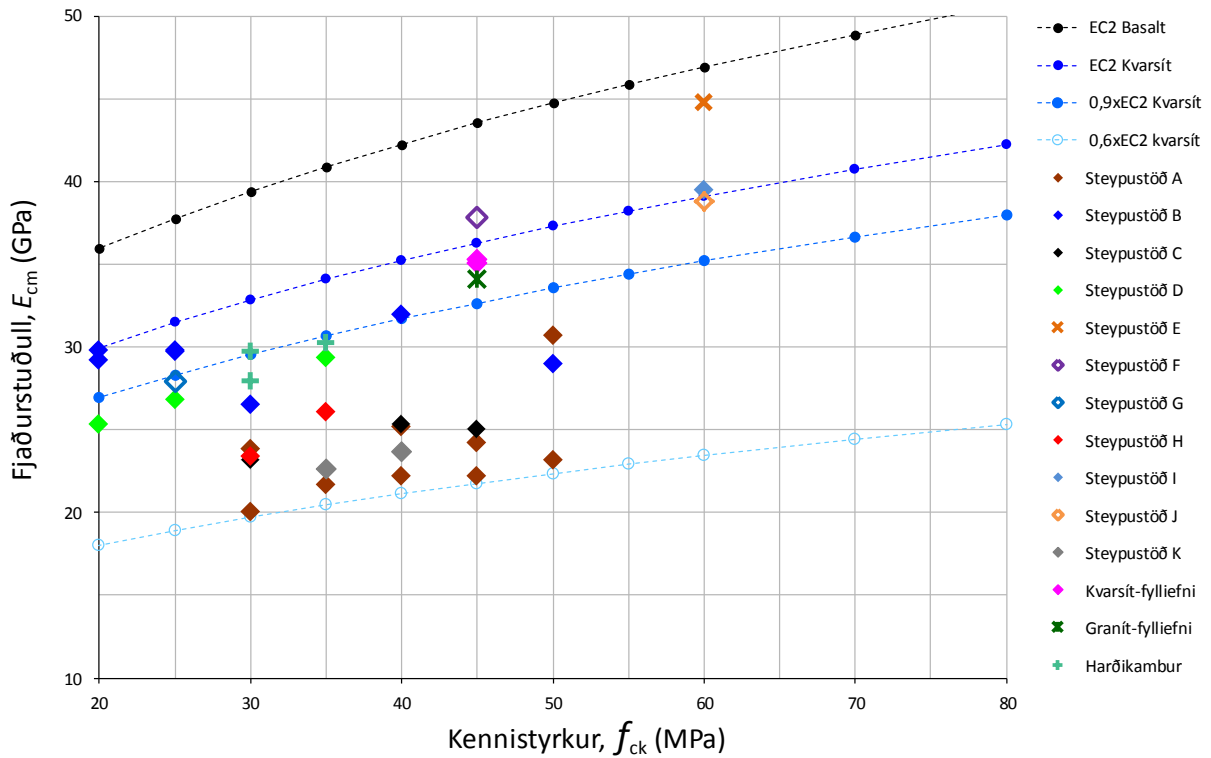
Mynd 12 Samband uppgefins þrýstistyrksflokks steypusýna og mælds þrýstistyrks.

Þar sem mældur styrkur var í mörgum tilfellum langt yfir uppgefnum styrkflokki sýnis (og örfá undir) er áhugavert skoða áhrif þess að raða sýnunum í styrkflokka (CXX/ZZ, eða kennistyrk, $f_{ck,cyl}$) eftir mældum þrýstistyrk þeirra, $f_{cm,cyl}$. Við það er hliðsjón höfð af EC2 sem gerir ráð fyrir að meðalstyrkur sé 8 MPa hærrí en kennistyrkurinn. Frá mældum þrýstistyrk voru því dregið 8 MPa og sýni raðað í næsta þrýstistyrksflokk fyrir neðan gildið ($f_{cm,cyl} - 8$). Við þetta lækka 10 sýni um einn eða fleiri þrýstistyrksflokka og 27 sýni eru óbreytt eða hækka um einn eða fleiri flokka. Útkoman úr þessari endurröðun sýnanna í styrkflokka er sýnd á Mynd 13.



Mynd 13 Samband þrýstistyrksflokks og mælds þrýstistyrks steypusýna eftir endurröðun m.v. þrýstistyrk.

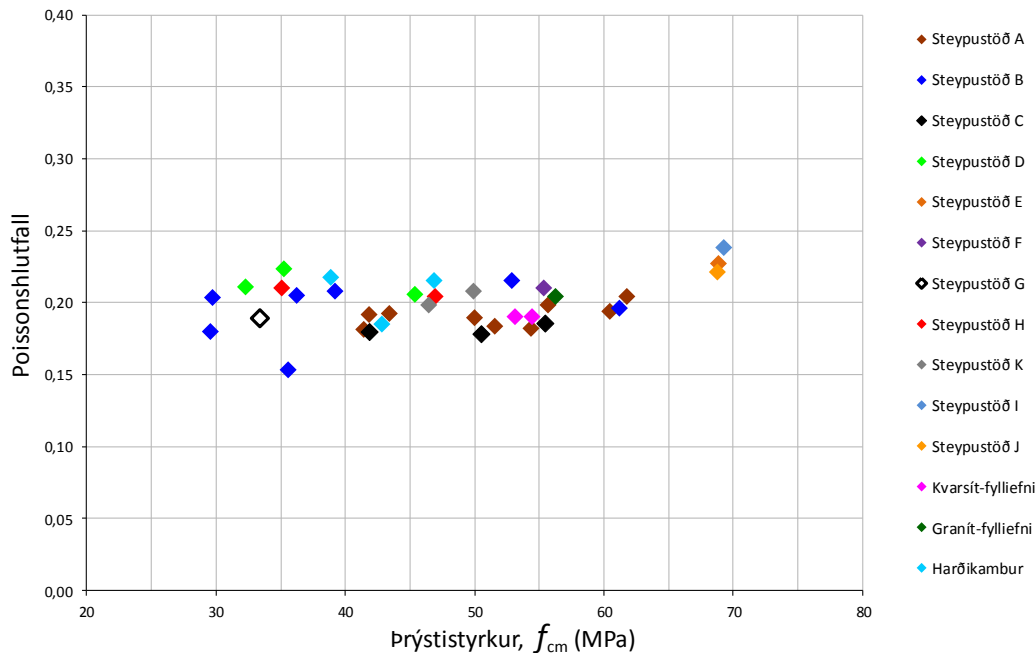
Samband þannig endurmetins styrkflokks (eða kennistyrks) og fjaðurstuðuls er sýnt á Mynd 14. Með samanburði við Mynd 11 má sjá nokkra breytingu. Fjaðurstuðull steypusýna sem lækka um styrkflokk hækkar og öfugt, þ.e. að fjaðurstuðull sýna sem hækka um styrkflokk lækkar. Eins og áður eru þó flest sýnin milli markanna 60 % og 90 % af leiðbeinandi gildum fjaðurstuðuls skv. EC 2 fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum og 9 sýni eru yfir 90% mörkunum.



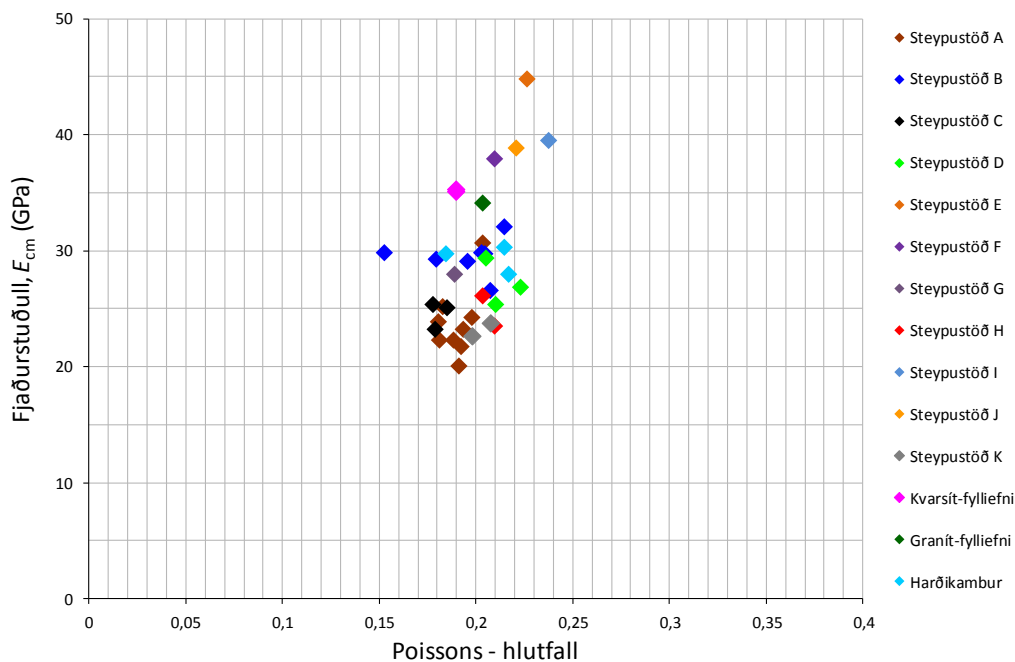
Mynd 14 Mældur fjaðurstuðull steypusýna og kennistyrkur sem er fundin með því að lækka mældan styrk um 8 MPa og afrúnna niður að næsta þrýstistyrksflokki, punktalínur eru viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í EC2 fyrir kennistyrk.

3.4.6 Poissons-hlutfall og þrýstistyrkur

Á Mynd 15 er Poissons hlutfall fyrir hvert prófað sýni (meðaltal tveggja prófhluta) teiknað upp á móti þrýstistyrk. Sýnin frá hverjum framleiðanda eru auðkennd með sér lit. Fengin gildi eru nánast öll innan markanna 0,18 til 0,22. Greina má þá tilhneigingu að steypa með lægra holrýmishlutfall hafi hærra Poissons hlutfall og öfugt. EC2 mælir með að nota 0,2 sem Poissons hlutfall fyrir ósprungna steypu. Niðurstöður þessara mælinga virðast því vera í ágætu samræmi við EC2. Samband fjaðurstuðuls og Poissons hlutfalls er sýnt á mynd Mynd 16.



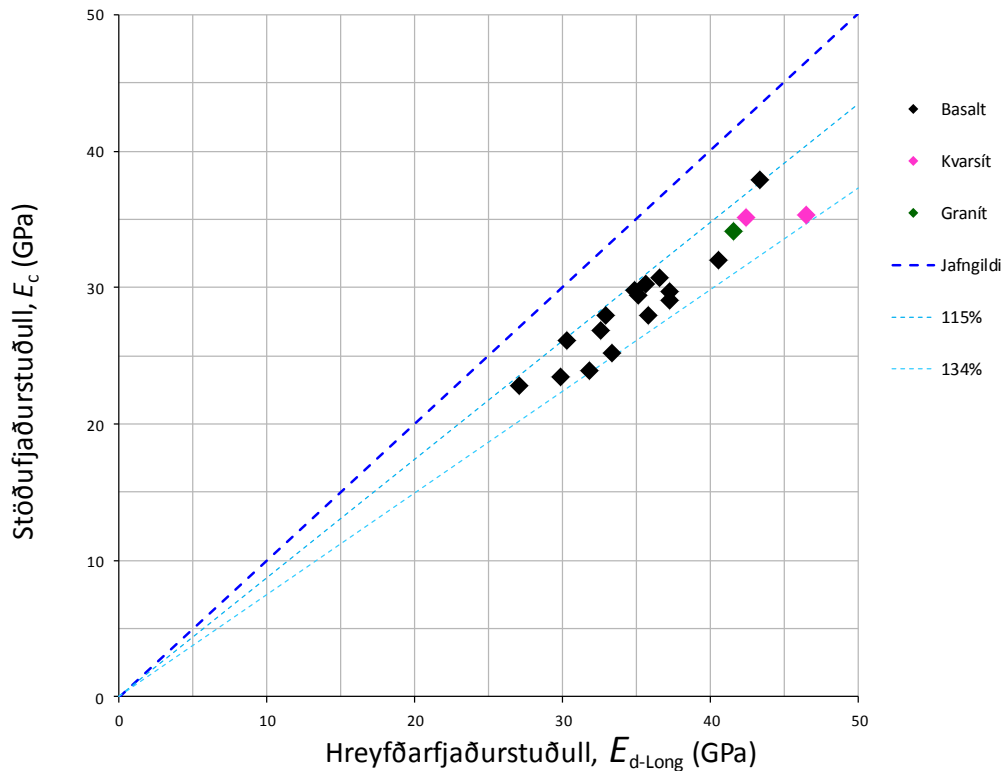
Mynd 15 Mælt Poissons hlutfall sýna á móti meðal þrýstistyrknum f_{cm}



Mynd 16 Samband fjaðurstuðuls og Poissons-hlufalls steypusýna.

3.4.7 Stöðufjaðurstuðull og hreyfðarfjaðurstuðull

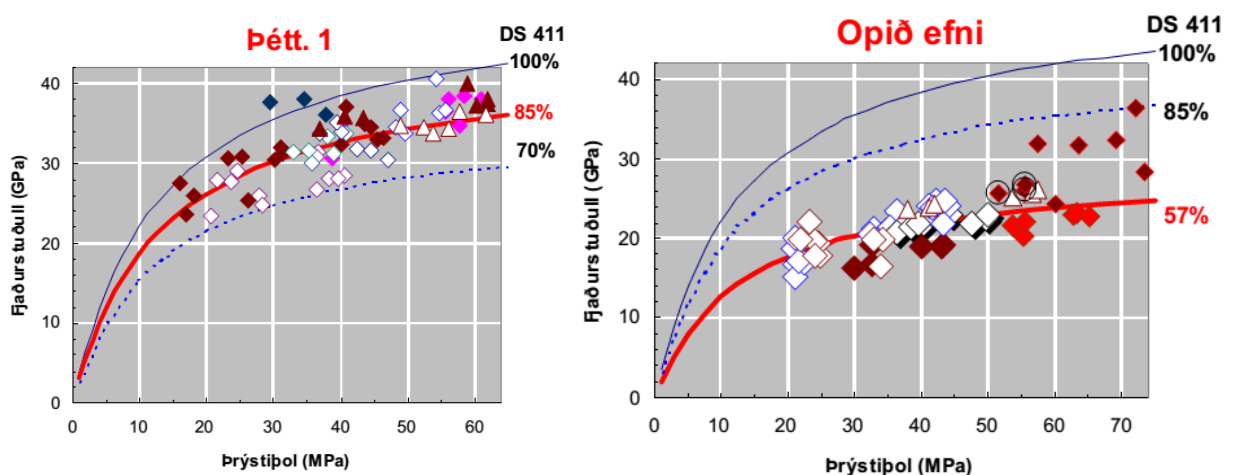
Mynd 17 sýnir samhengi stöðufjaðurstuðuls og hreyfðarfjaðurstuðuls fyrir 19 sýni sem prófuð hafa verið í verkefninu. Eingöngu eru sýndar niðurstöður fyrir prófun með langbylgjusamsveiflun (longitudinal resonance). Hreyfðarfjaðurstuðullinn sem fékkst í þessum prófunum er að meðaltali um 23% hærri en stöðufjaðurstuðullinn og lágmarks og hámarksgildin eru 15% og 34% hærri en stöðufjaðurstuðulsgildin. Um samband fjaðurstuðlanna tveggja sjá gr. 2.3.



Mynd 17 Samanburður stöðufjaðurstuðuls E_c og hreyfðarfjaðurstuðuls E_d mælingar á 150x300 mm steypum sívalningum.

3.4.8 Samanburður við fyrri rannsóknir

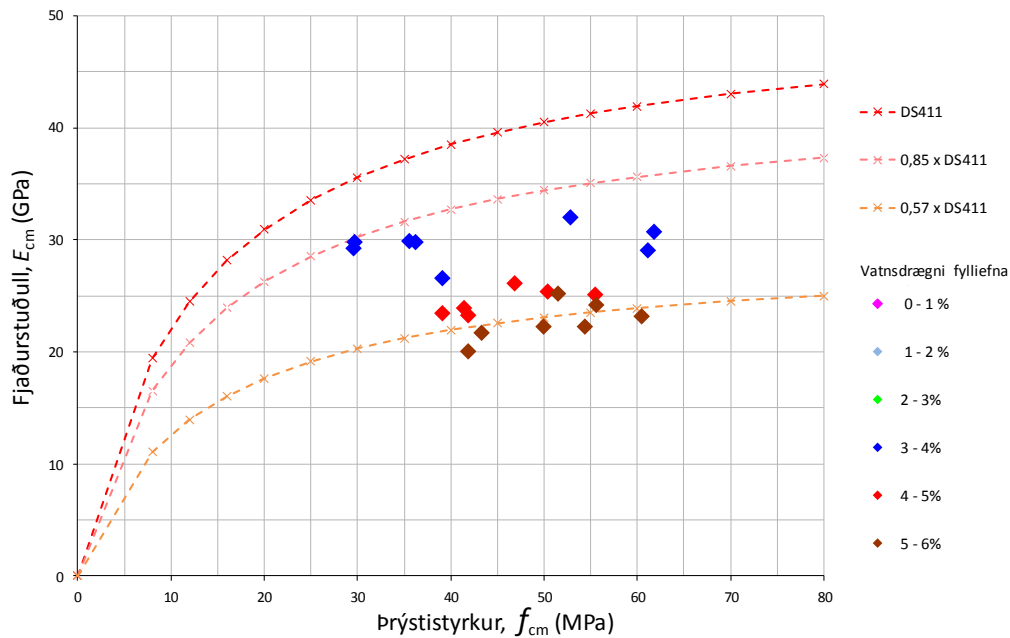
Hér verður gerður lauslegur samanburður á niðurstöðum úr fyrirbyggjandi rannsókn Mannvits og rannsókn Rb frá 1999 (Ó Wallevik, B Þórðarson, 1999). Rannsókn Rb var einskorðuð við steypu á höfuðborgarsvæðinu og nær samanburðurinn því eingöngu til steypusýna frá framleiðendum á höfuðborgarsvæðinu. Mynd 18, sem fengin er úr heimildinni, sýnir niðurstöður fjaðurstuðulsmælinga á steypusívalningum frá tveimur steypustöðvum sem notuðu fylliefni hvor úr sinni námu, nefnd “Þétt. 1” og “Ópið efni”. Á hvoru línuriti á Mynd 18 eru niðurstöður fyrir u.þ.b. níu steypusýni. Samkvæmt heimildinni var fjaðurstuðull prófaður fyrir hvert sýni á þremur sívalningum í hvert sinn við 7, 28 og 90 daga aldur, og skýrir það punktafjöldann á línuritunum. Auk niðurstaðna fjaðurstuðulsprófananna er sýndur ferill á línuritunum fyrir viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í þágildandi þolhönnunarstaðli, DS411, skv. jöfnu í staðlinum, og ferlar sem eru 85% og 57% af DS411 viðmiðunargildunum. Ferillinn 85% er u.þ.b. meðalferill gegnum punktildin fyrir fylliefnið “Þétt. 1” og ferillinn 57% er meðalferill gegnum punktildin fyrir fylliefnið “Ópið efni” sbr. heimildina.



Mynd 18 Myndir úr heimild (Ó Wallevik, B Þórðarson, 1999) sem sýna m.a. fjaðurstuðul og þrýstistyrk steypusívalninga við 7, 28 og 90 daga aldur.

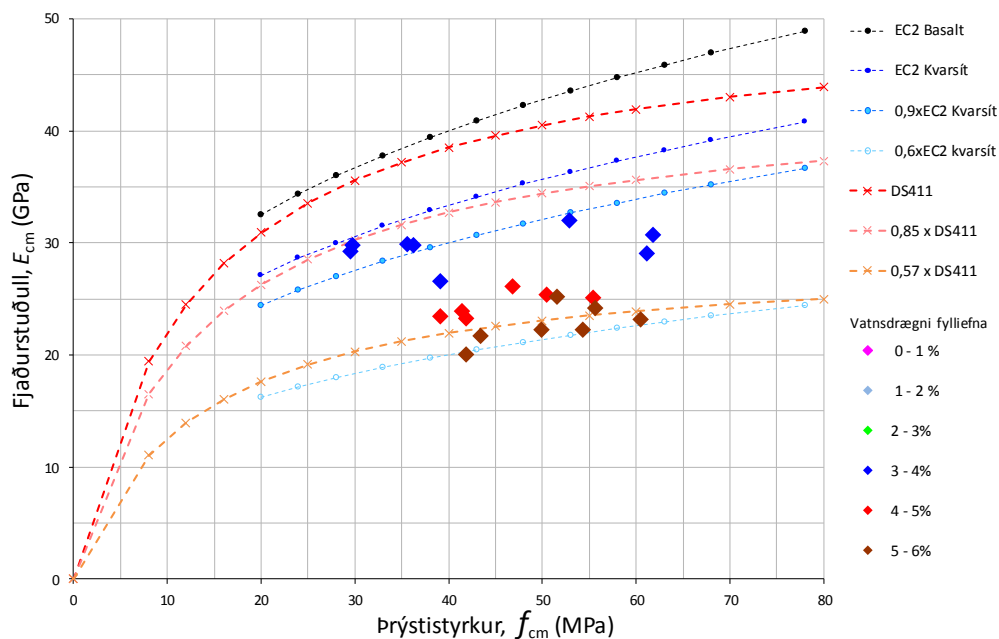
Í línuritinu á Mynd 19 eru sýndar niðurstöður fjaðurstuðulsprófananna í rannsókn Mannvits fyrir steypusýni af höfuðborgarsvæðinu, alls 21 sýni frá þremur framleiðendum. Ofangreindur ferill fyrir viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í DS411 ásamt 85% og 57% meðalferlunum eru einnig færðir inn á myndina. Það er gert til að auðvelda samanburð á niðursöðum rannsóknanna en ekki til að bera þær saman við viðmiðunargildin í DS411. Sýnunum á mynd 19 er skipt í flokka (með litum) eftir vatnsdrægni fylliefnanna í steypunni. Steypusýnin af höfuðborgarsvæðinu falla í flokkana vatnsdrægni fylliefna 3 – 4%, 4 – 5% og 5 – 6%. Fylliefnið í flokknum 5 – 6% vatnsdrægni og fylliefnið “Ópið efni” má telja að séu mjög sambærileg, enda að mestu úr sömu námunni. Ef myndir 18 og 19 eru bornar saman má sjá að punktildi steypusýna með þessum fylliefnum raðast í kringum ferilinn 57% af DS411. Einnig má sjá á Mynd 19 að fjaðurstuðull allra sýna af höfuðborgarsvæðinu í rannsókn Mannvits er lægri en gildin sem ferillinn 85% af DS411 markar. Það eru einungis fimm sýni sem eru rétt við ferilinn og þau eru undir honum. Önnur sýni liggja milli ferlanna 57% og 85% af DS411.

Af ofanrituðu mætti draga þá ályktun að minni munur sé á fjaðurstuðli steypu milli framleiðenda á höfuðborgarsvæðinu nú en var þegar nefnd Rb-rannsókn var gerð. Kemur það einkum fram í því að steypa með “háan” fjaðurstuðul, þ.e.a.s. steypa með fjaðurstuðul kringum um 85% af DS411 virðist ekki almennt vera á markaðnum á höfuðborgarsvæðinu í dag. Hins vegar virðist steypa með fjaðurstuðul kringum 57% af DS411 vera á markaði, svo og steypa með fjaðurstuðul sem liggur milli þessara gilda.



Mynd 19 Fjaðurstuðull og þrýstistyrkur steypusýna af höfuðborgarsvæðinu í rannsókn Mannvits og ferlar sem sýna viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í DS411 og 85% og 57% af DS411 sbr. heimildina (Ó Wallevik, B Þórðarson, 1999).

Á Mynd 20 hafa, auk upplýsinga sem eru á mynd 19, verið færðir inn ferlar fyrir viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í EC2 og í íslenska þjóðarviðaukanum, sbr. Mynd 7. Sjá má á Mynd 20 að lægstu gildi fjaðurstuðuls steypusýna í rannsókn Mannvits liggja við ferilinn 0,6xEC2 Kvarsít og hæstu gildin liggja kringum ferilinn 0,9xEC2 Kvarsít. Fjaðurstuðull flestra sýnanna liggja þó einhvers staðar á milli þessara viðmiðunargilda íslenska þjóðarviðaukans við EC2.



Mynd 20 Fjaðurstuðull og þrýstistyrkur steypusýna af höfuðborgarsvæðinu í rannsókn Mannvits, leiðbeinandi gildi fjaðurstuðuls í EC2 og hlutföll af þeim og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í DS411 og meðalferlar úr heimildinni (Ó Wallevik, B Þórðarson, 1999)

3.5 Framhaldsrannsóknir

Eins og fram kemur í inngangi hefur verkefnið verið framlengt til eins árs. Í framhaldsverkefninu er fyrirhugað að kanna áhrif mekanisks styrks fylliefna á fjaðurstuðul steypu. Holrýmd hefur vissulega áhrif á styrk fylliefnis og hefur verið einblínt nokkuð á það. En fleiri þættir en holrýmd hafa áhrif á styrk bergs, svo sem bergbrigði og ummyndunarstig. Í framhaldsverkefninu verða nokkur valin fylliefni með breytilega eiginleika rannsökuð með tilliti til styrks (Los Angeles), holrýmdar o.fl. Gerðar verða nokkrar steypublöndur úr fylliefnunum í rannsóknarstofu, steptir prófhlotir og fjaðureiginleikar þeirra ákvarðaðir. Greining verður gerð á tengslum fjaðurstuðuls steypunnar og styrks fylliefnanna í þeim.

Heimildir:

- ASTM Subcommittee C09.64. (án dags.). ASTM C215-08. *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*¹. USA: ASTM International.
- Björnsdóttir, Þ. (Desember 2013). *Fjaðurstuðull steinsteypu*. Reykjavík, Ísland: Háskólinn í Reykjavík.
- Byggingarstaðlaráð. (2002). Þjóðarskjöl við íslensku forstaðlana um þolhönnun. *Þjóðarskjal með FS ENV 1992-1-1:1991 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Staðlaráð Íslands.
- Byggingarstaðlaráð. (2010). Icelandic national Annexes to Eurocodes. *ÍST EN 1992-1-1:2004/NA:2010*. Reykjavík: Staðlaráð Íslands.
- CEN/TC/250. (1991). FS ENV 1992-1-1:1991. *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings*. Reykjavík: Staðlaráð Íslands.
- CEN/TC250. (2004). EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: European committee for standardization.
- Counto, U. J. (1964). The effect of the elastic modulus of the aggregate on the elastic modulus, creep and creep recovery of concrete. *Magazine of Concrete Research*.
- Helgason, G. (2012). *Fjaðureiginleikar íslenskrar steinsteypu*. Reykjavík: Háskólinn í Reykjavík, tækni og verkfræðideild.
- Hirsch, T. J. (1962). Modulus of Elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate. *journal of the American Concrete Institute*, 427-451.
- ISO/TC71-SC1. (2010). ISO 1920-10:2010 Testing of concrete - Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression. Geneva: ISO International standard.
- Monteiro, A. U. (1993). Concrete: A three phase material. *Cement and Concrete research*, 147-151.
- Neville, A. M. (1997). *Properties of concrete*. NY, USA: Wiley.
- Ó Wallevik, B Þórðarson. (1999). *Fjaðurstuðull íslenskrar steinsteypu, Mælingar á sýnum úr steypustöðvum*. Reykjavík: Rb.
- Ólafsson, H. (1999). *Rb Eq4.017.2 Fjaðurstuðull íslenskrar steinsteypu*. Reykjavík: Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins.
- Pauw, A. (1960). Static modulus of elasticity of concrete as affected by density. *ACI Journal* (bls. 679-687). ACI.
- Sveinbjörnsson, S. (1988). *Fjaðurstuðull íslenskrar steypu. Steinsteypudagur 1988*. Reykjavík: Steinsteypufélag Íslands.
- Sveinbjörnsson, S. (Maí 2013). *Fjaðurstuðull steinsteypu, rannsóknarverkefni, Áfangaskýrsla*. Reykjavík: Mannvit hf.