



MANNVIT

FJAÐURSTUÐULL STEINSTEYPU

Rannsóknarverkefni

Styrktaraðilar:

**Íbúðalánasjóður, Vegagerðin,
Aalborg Portland Íslandi**

ÁFANGASKÝRSLA





TITILBLAÐ

Skýrsla nr: MV 2013-021	Útgáfunr.: 1	Útgáfudags.: 17.05.2013	Verknúmer: 7-009-297
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Fjaðurstuðull steinsteypu Rannsóknarverkefni		Upplag: 10 Fjöldi síðna: 19	
Höfundur/ar: Sveinbjörn Sveinbjörnsson		Verkfænisstjóri (undirskr.): <i>Sveinbjörn Sveinbjörnsson</i> Yfirfarið (undirskr.): <i>Toni Ó. Sigurðsson</i>	
Verkkaupi: Íbúðalánasjóður, Vegagerðin o.fl.	Tengiliður verkkaupa: Helga Arngrímsdóttir ÍLS Þórir Ingason, Vegagerðin		
Samstarfsaðilar: Eyþór Rafn Þórhallsson, Háskólanum í Reykjavík; Gylfi Sigurðsson, Vegagerðinni			
Útdráttur: Verkefnið, sem fjallar um fjaðureiginleika steinsteypu, var unnið í samstarfi við Háskólann í Reykjavík, Vegagerðina og sjö steypuframleiðendur sem lögðu til steypusýni til prófana. Fjaðurstuðli steinsteypu, erlendum og innlendum rannsóknum á honum eru gerð nokkur skil og fjallað er um prófunaraðferðir. Fjaðurstuðull og Poissonshlutfall var prófað á þrjátíu steypusýnum, þ.a. tuttugu og átta frá steypuframleiðendum á höfuðborgarsvæðinu og landsbyggðinni og á tveimur sem steipt voru í rannsóknarstofu Mannvits. Niðurstöður prófananna eru bornar saman við fyrri rannsóknir og við viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í evrópska þolhönnunarstaðlinum fyrir steypuvirki, ÍST EN 1992-1-1:2004 (Eurocode 2), og við ákvæði um fjaðurstuðul í íslenska þjóðarviðaukanum ÍST EN 1992-1-1:2004/NA:2010.			
Efnisorð: Steinsteypa, fjaðurstuðull, þrýstistyrkur, streita, Poissonshlutfall			

Dreifing:

 Opín öllum starfsmönnum
(Rafræn í bókasafni)

 Lokuð
(Engin dreifing nema með leyfi verkkaupa.)

Breytingasaga:

1	17.05.2013	Útgáfa	SvSv	TGS
Útgáfunr	Dags.	Breyting	Höf.	Yfirfarið

Steypuframleiðendur sem tóku þátt í verkefninu:

Bíladrangur ehf, Vík

BM Vallá, Reykjavík

Plastiðjan Ylur ehf, steypustöð Egilsstöðum

Steypustöð Akureyrar ehf

Steypustöðin Borg ehf, Hafnarfirði

Steypustöðin ehf, Reykjavík

Steypustöðin ehf, útibú Selfossi

Vegagerðin

Efnisyfirlit

1. Inngangur	5
2. Kynning	6
2.1 Tilgangur og markmið verkefnisins	6
2.2 Skipulag og framkvæmd verkefnis	6
2.3 Um fjaðurstuðul steinsteypu	8
2.4 Yfirlit um fyrri rannsóknir	9
2.4.1 Erlendar rannsóknir	9
2.4.2 Rannsóknir á Íslandi	10
3. Rannsóknir	12
3.1 Prófunarstaðall	12
3.2 Prófun fjaðureiginleika	13
3.2.1 Niðurstöður fjaðurstuðulsmælinga	13
3.2.2 Niðurstöður mælinga á Poissons-hlutfalli	14
3.3 Umfjöllun	15
3.3.1 Fjaðurstuðull og þrýstistyrkur	15
3.3.2 Fjaðurstuðull og holrými fylliefna	16
3.3.3 Fjaðurstuðull og kennistyrkur	17
3.3.4 Poissons-hlutfall og þrýstistyrkur	18
3.4 Framhaldsrannsóknir	18
Heimildir:	19

Skrá yfir myndir

Mynd 1	Sívalningur með álímdum streitunemum og áfestri grind með færslunema.	7
Mynd 2	Dæmigerður þrýstispennu - streituferill steinsteypu.....	8
Mynd 3	Samband fjaðurstuðuls og þrýstistyrks, rannsóknir í Sviss, teknar saman af Roš (1937), mynd fengin úr Beton-Bogen, 2.útg. 1985.	9
Mynd 4	Niðurstöður úr prófun á fjaðurstuðli steypusýna hjá Rb 1986-87, mynd úr heimild (Sveinbjörnsson, 1988).	10
Mynd 5	Fjaðurstuðull sem fall af mældu þrýstipoli, myndir úr heimild (Ó Wallevik, B Þórðarson, 1999)	11
Mynd 6	Niðurstöður fjaðurstuðulsmælinga og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í ÍST EN 1992-1-1:2004	13
Mynd 7	Poissons hlutfall og þrýstistyrkur, niðurstöður mælinga.....	14
Mynd 8	Mældur fjaðurstuðull sýna og gildi fjaðurstuðuls í ÍST EN 1992-1-1:2004 sem fall af meðal þrýstistyrknum f_{cm}	15
Mynd 9	Fjaðurstuðull og holrýmishlutfall fylliefna í steypu.....	16
Mynd 10	Mældur fjaðurstuðull steypusýna og kennistyrkur þeira (uppgefinn þrýstistyrksflokkur af framleiðanda) og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í ÍST EN 1992-1-1:2004 fyrir kennistyrk.....	17
Mynd 11	Mælt Poissons hlutfall sýna sem fall af meðal þrýstistyrknum f_{cm}	18

1. Inngangur

Þegar hanna skal byggingu eða mannvirki úr steinsteypu þurfa m.a. að liggja fyrir upplýsingar um fjaður- eða formbreytingareiginleika þeirra efna sem nota skal í burðarvirki byggingarinnar. Svignun byggingarhluta úr steinsteypu fer að miklu leyti eftir eiginþunga og notálagi svo og stífleika burðareininga og fjaðurstuðli steypunnar. Fjaðurstuðullinn ræðst af eiginleikum hlutfæna steypunnar og samsetningu hennar, þ.e. hlutföllum efnanna í steypunni.

Á undanförnum áratug eða svo, hafa orðið miklar breytingar á framboði og aðgengi fylliefna og sements hér á landi, svo og á öðrum þáttum er varða framleiðslu og notkun steinsteypu. Fylliefnanámur og sementstegundir hafa horfið af markaði og aðrar komið í staðinn, steypustöð kaupir ekki endilega fylliefni frá sama framleiðanda í dag og í fyrra o.s.fr.

Nýr þolhönnunarstaðall fyrir steypuvirki, ÍST EN 1992-1-1:2004 (Eurocode 2) tók gildi hér á landi árið 2010 ásamt þjóðarviðaukum við hann, þ.á.m. eru ákvæði um fjaðurstuðul steinsteypu. Sama ár var gefin út nýr staðall um prófun á fjaðurstuðli steinsteypu hjá ISO, en forveri hans var frá 1982.

Steypuframleiðendur hafa gæðaeftirlit með sinni framleiðslu og fylgjast með og sjá til að eiginleikar steypu uppfylli tilteknar kröfur, s.s. um þjálmi, loftinnihald, vatnssementstölu og þrýstistyrk. Fjaðurstuðull steypu er hins vegar að öllu jöfnu ekki mældur og framleiðendur gefa hann almennt ekki upp. Hönnuðum er hins vegar oft mikilvægt að vita nokkuð nákvæmlega hvaða fjaðurstuðul er raunhæft að vinna með frekar en að þeir setji kröfu um lágmarksfjaðurstuðul sem þegar að framkvæmd verks kemur reynist mjög kostnaðarsamt að uppfylla.

Í ljósi ofangreindrar þróunar og breytinga á áherslum og viðhorfum eru ýmsar ástæður fyrir því að fram fari almenn úttekt eða rannsókn á fjaðureiginleikum steypu sem framleidd er á Íslandi í dag. Skýrsluhöfundur þótti ástæða til að gangast fyrir því verkefni og kannaði undirtektir hjá steypuframleiðendum á höfuðborgarsvæðinu og á Akureyri. Einnig var kannað með áhuga Tækni- og verkfræðideildar Háskólans í Reykjavík og hjá Vegagerðinni. Undirtektir voru alls staðar jákvæðar sem leiddi til þess að skilgreint var rannsóknarverkefni og sótt um styrki til Íbúðalánasjóðs (ÍLS) og Vegagerðarinnar (Vg) um verkefni til eins árs. ÍLS og Vg samþykktu í byrjun árs 2012 að styðja verkefnið og fór það fljótlega af stað. Fleiri aðilar hafa samþykkt stuðning við verkefnið og sótt var um framhaldsstyrk til Vg í ársbyrjun 2013. Vg samþykkti að veita framhaldsstyrk og hefur verkefnið því verið aukið og framlengt um eitt ár.

Í þessari skýrslu, sem líta ber á sem áfangaskýrslu, er greint frá framkvæmd og niðurstöðum rannsókna sem gerðar hafa verið til þessa, auk þess sem fjallað er almennt um fjaðurstuðul steinsteypu og lítillaga um erlendar og innlendar rannsóknir á viðfangsefninu.

2. Kynning

2.1 Tilgangur og markmið verkefnisins

Í umsóknum til styrktaraðila voru m.a. eftirfarandi atriði tilgreind fyrir tilgangi og markmiðum með verkefninu:

Tilgangur:

- Gera prófanir á fjaðureiginleikum steinsteypu (fjaðurstuðli og Poissons-hlutfalli) sem framleidd er á Íslandi í dag með prófunaraðferð samkvæmt nýlegum ISO-staðli, ISO 1920-10:2010 (ISO/TC71-SC1, 2010).
- Bera niðurstöður sem fást saman við niðurstöður hérlendra fyrri rannsókna og við gildi fjaðurstuðuls í þolhönnunarstaðalinum Eurocode 2 (CEN/TC250, 2004) og við íslenska þjóðarviðaukann við staðalinn.
- Annar tilgangur með verkefninu er að kanna fræðigreinar um fjaðureiginleika steinsteypu og reiknilíkana sem til kunna að vera fyrir eiginleikana og aðlaga þau fyrir íslenska steypu.

Markmið:

- Að fyrir liggi nýleg og haldgóð vitneskja og þekking á fjaðureiginleikum steinsteypu sem framleidd er á Íslandi úr innlendum fylliefnum og með hefðbundnum íslenskum aðferðum.
- Að niðurstöður verði nýttar, ef tilefni verður til, til að endurskoða íslenska þjóðarviðaukann við Eurocode 2 um fjaðurstuðul steinsteypu.
- Að unnt verði að stýra fjaðureiginleikum steypu með aðstoð reiknilíkans og á grundvelli þekkingar á eiginleikum hlutefna steypu.

Eins og getið er í inngangi er skýrsla þessi áfanga skýrsla og verður því í henni ekki fjallað ýtarlega um öll atriði tilgangs og markmiða með verkefninu og bíður það lokaskýrslu.

2.2 Skipulag og framkvæmd verkefnis

Eins og fram kemur í inngangi er verkefnið samstarfsverkefni Mannvits hf, nokkurra steypuframleiðenda, Háskólans í Reykjavík og Vegagerðarinnar.

Verkefnisstjórn var sett á laggirnar og í henni eru:

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

Í verkefnislýsingu var gert ráð fyrir að prófa fjaðureiginleika (fjaðurstuðul og Poissons hlutfall) á allt að þrjátíu steypusýnum sem flest yrðu lögð til af steypuframleiðendunum. Prófanir og rannsóknir yrðu allar unnar í rannsóknarstofu Mannvits.

Lagt var upp með steypusýnin væru dreifð úr framleiðslu steypustöðvanna og spannaði alla framleiðslu þeirra m.t.t. þrýstistyrksflokka og annarra breytistærða. Steypusýnum myndu fylgja ákveðnar upplýsingar um eiginleika steypu og hlutefna í þeim, þ.m.t. um styrkleikaflokk.

Til viðbótar sýnum frá steypustöðvunum var ráðgert að framleiða tvö steypusýni í rannsóknarstofu Mannvits úr innfluttum kvarsít-fylliefnum. Tilgangurinn með þessum steypusýnum var að bera fjaðurstuðul þeirra saman við fjaðurstuðulsgildin töflu 3.1 í Eurocode 2, en þau eru fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum.

Um framkvæmd:

Hjá steypustöðvunum voru sýni fyrir prófun fjaðureiginleika tekin samtímis sýnum fyrir þeirra eigið gæða- og framleiðslueftirlit. Hvert sýni var að jafnaði sex prófhlutir (sex stk. 150x300 mm sívalningar). Stöðvarnar sáu um að koma sýnunum til rannsóknarstofu Mannvits hf þar sem tekið var við þeim og þau sett í staðlað hita og rakaumhverfi til geymslu fram að prófun.

Í rannsóknarstofu Mannvits var búin til steypa úr kvarsít-fylliefnum sem fengin voru erlendis frá. Gerðar voru tvær steypublöndur með sama þrýstistyrk, önnur loftblendin en hin án loftíblöndunar. Steyptir voru sívalningar úr báðum blöndunum fyrir þrýstistyrks og fjaðurstuðulsmælingar.

Fyrsta sýnið frá steypuframleiðenda í þessum áfanga rannsóknarinnar barst rannsóknarstofunni um miðjan mars 2012 og það síðasta í desember sama ár og var það prófað í janúar 2013.

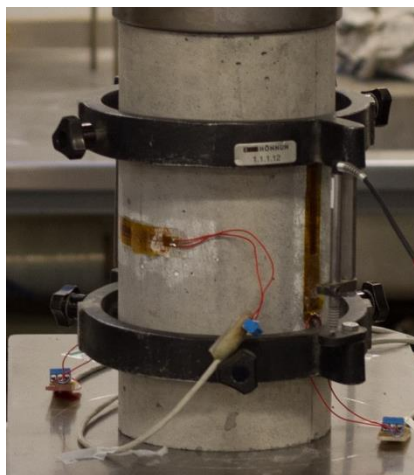
Alls bárust 28 sýni (168 sívalningar) frá steypuframleiðendunum. Eitt þessara sýna mældist með afbrigðileg gildi og er það sýni ekki með með í úrvinnslu á niðurstöðum. Tvö sýni voru framleidd í rannsóknarstofu og voru prófuð sýni því alls þrjátíu að tölu.

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

Auk mælinga með álímdum streitunemum, var lengdarbreyting prófhlyta í nokkrum tilfellum einnig mæld með aðferð sem samrýmast staðli ASTM C469 en ekki ISO-staðlinum (mynd 1). Um er að ræða aðferð þar sem notuð er grind sem fest er á sívalning og í er einn mælir sem nemur lengdarbreytingar. Þetta er sama eða svipuð aðferð og mun hafa verið notuð í fjaðurstuðulsrannsóknum hérlandis (sjá 2.4.2).

Að lokum skal þess getið að eigintíðni allmargra prófhlyta var ákvörðuð með hljóðbylgjumælingum. Þær upplýsingar má nota til að reikna s.k. hreyðar-fjaðurstuðul (enska: Dynamic modulus of elasticity).

Verkfræðideild Háskólans í Reykjavík kom að verkefninu á þann hátt að nemandi í byggingaverkfræði tók þátt í prófunum á nokkrum sýnum og skrifaði meistararitgerð um þær rannsóknir (Helgason, 2012).



Mynd 1 Sívalningur með álímdum streitunemum og áfestri grind með færslunema.

2.3 Um fjaðurstuðul steinsteypu

Þegar rætt er um fjaðurstuðul steinsteypu er oftast átt við það sem kalla má stöðufjaðurstuðul (enska: Static modulus of elasticity in compression) sem í grófum dráttum er hlutfall spennu og streitu í steypu undir þrýstiálagi.

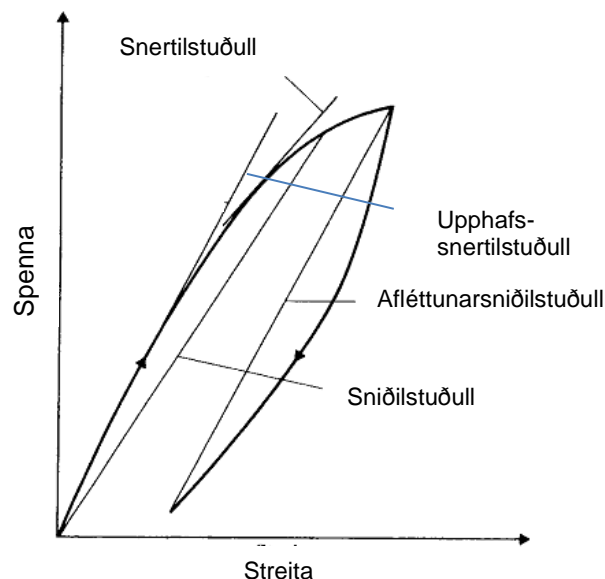
Annar fjaðurstuðull steypu, sem hér verður kallaður hreyfðarfjaðurstuðull (enska: Dynamic modulus of elasticity) er ákvarðaður með titringsálagi og er þá mæld eigintíðni prófhluta og/eða hraði hljóðbylgna gegnum efnið.

Almennt er fjaðurstuðull efnis skilgreindur sem hlutfallið milli krafts sem virkar á efnið og formbreytingar sem verður á efninu í stefnu kraftsins og gert ráð fyrir að formbreytingin sé í beinu hlutfalli við stærð kraftsins (línuleg) og að hún gangi að fullu til baka þegar krafturinn hættir að verka á efnið.

Það mun hafa verið um 1660 að Robert nokkur Hooke setti fyrstur manna fram kenningu um ofangreint og hefur hún síðan verið kölluð lögmál Hooks (Hooke's law). Síðar, eða um 1800, sýndi Tomas Young fram á að lögmál Hooks gildi aðeins upp að vissu marki, eftir það verði varanleg formbreyting. Skömmu síðar birti Siméon Denis Poisson athuganir sínar á fjaðrandi formbreytingum efna þar sem hann benti á að sé togað í efni í lengdarstefnu þess, minnki þvermál þess og sé því þrýst saman aukist þvermál þess. Líkingin sem hann setti fram og lýsir þessu er í dag kallað Poissonshlutfall.

Steinsteypa er ekki hreint fjaðrandi efni og fylgir því ekki lögmáli Hooks. Hvort tveggja er að spennu-streituferill hennar er ekki bein lína og formbreytingin gengur ekki að fullu til baka þegar krafti sem varað hefur um hríð er létt af henni, sjá mynd 2. Stöðufjaðurstuðull steinsteypu hefur því verið skilgreindur sem s.k. sniðilfjaðurstuðull (enska: Secant-modulus), þ.e. halli línu milli tveggja punkta á spennu-streituferlinum á notálagssviði steypunnar.

Þegar hreyfðarfjaðurstuðull er mældur veldur titringsálagið óverulegri spennu í steypunni og er talið að hann sé u.þ.b. jafn upphafsnertilfjaðurstuðulinn þegar prófað er með þrýstiálagi, sjá mynd 2.

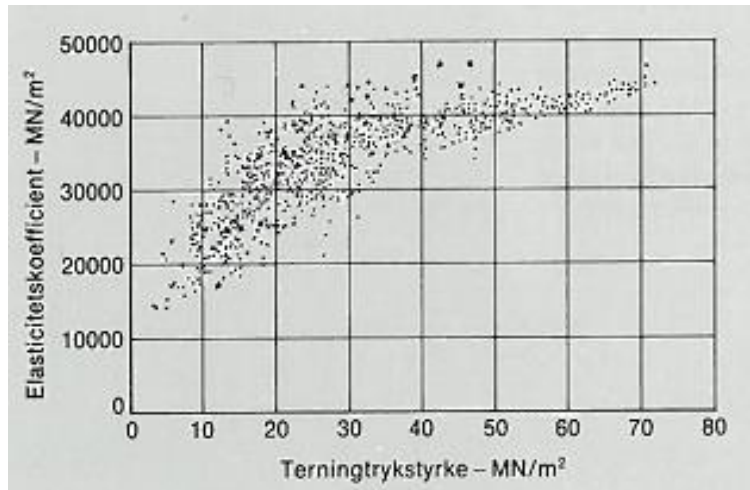


Mynd 2 Dæmigerður þrýstisþennu - streituferill steinsteypu.

2.4 Yfirlit um fyrri rannsóknir

2.4.1 Erlendar rannsóknir

Fjaðurstuðull steypu hefur mikið verið rannsakaður alla götur síðan Roš (1937) gerði samantekt á þá fyrirliggjandi gögnum um fjaðurstuðul steypu, sjá mynd 3.



Mynd 3 Samband fjaðurstuðuls og þrýstistyrks, rannsóknir í Sviss, teknar saman af Roš (1937), mynd fengin úr Beton-Bogen, 2.útg. 1985.

Settar voru fram líkingar/jöfnur fyrir útreikning á fjaðurstuðli steypu sem mætti nota þegar ekki væru tók á að mæla eða prófa fjaðurstuðul steypu. Líkingarnar byggðu á að fjaðurstuðullinn væri eingöngu háður þrýstistyrk steypunnar og rötuðu slíkar líkingar í þolhönnunarstaðlana. (Pauw, 1960) kannaði áhrif rúmþyngdar steypu á fjaðurstuðulinn auk þrýstistyrks, og setti fram líkingu fyrir fjaðurstuðul sem tók tillit til beggja þáttanna. Mönnum var þó ljóst að fleiri atriði skiptu máli, og komu brátt fram líkingar eða líkön þar sem gengið var út frá að steypan væri tveggja þátta efni, þ.e. sementsefja og fylliefni, hvort með sinn mismunandi fjaðurstuðul (í samfelldaraflfræðinni þekkt sem „the Reuss and Voigt models“). Í þessum efnum voru það Hansen (1958), Dantu (1958) og Kaplan (1959) sem voru í fararbroddi. Í kjölfarið komu svo (Hirsch, 1962) og (Counto, 1964) sem endurbættu líkönin.

(Monteiro, 1993) sýndi fram á að líta beri á steypu sem þriggja þátta efni, þ.e. fylliefni, sementsefju og fasaskilin milli efjunnar og fylliefnakornanna, en áður höfðu nokkrir rannsakendur komist að því að fasaskilin væru veikir hlekkur í steypunni. Miklar rannsóknir og athuganir hafa síðan verið gerðar á þessum atriðum, s.s. á eiginleikum, þéttleika og þykkt fasaskilanna. Meðal athyglisverðra niðurstaðna eru jákvæð áhrif lækkandi vatnssementstölu og kísilryks á fasaskilin.

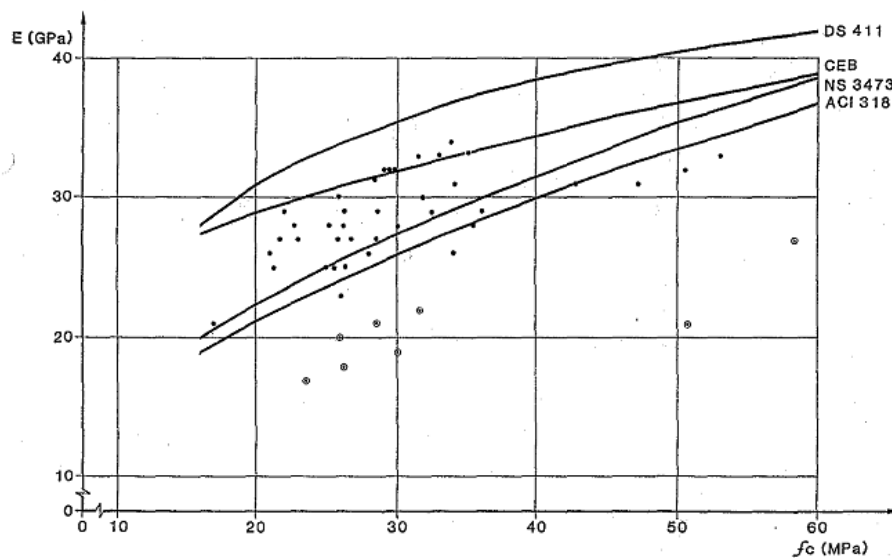
Þá hafa margir stillt upp reiknilíkönum fyrir fjaðurstuðul m.v. að steypan sé þriggja þátta efni, og að auki tekið ýmsar aðrar breytur inn, s.s. kornalögun og kornadreifingu fylliefna.

2.4.2 Rannsóknir á Íslandi

Hér á landi hafa verið gerðar tvennar skipulagðar rannsóknir á fjaðurstuðli steinsteypu, sú fyrri um miðjan 9. áratug síðustu aldar (Sveinbjörnsson, 1988) og sú seinni í lok tíunda áratugsins (Ó Wallevik, B Þórðarson, 1999) og voru báðar unnar hjá þáverandi Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins (Rb), nú Nýsköpunarmiðstöð Íslands (NMÍ).

Niðurstöður fyrri rannsóknarinnar voru kynntar í erindi á Steinsteypudegi 1988, eins dags ráðstefnu Steinsteypufélags Íslands og í Verktækni, fréttablaði VFÍ. Í rannsókninni var fjaðurstuðull mældur á fjórtíu og sex steypusívalningum, flestum úr steypu af Reykjavíkursvæðinu en nokkrum frá landsbyggðinni og úr ýmsum prófsteypum hjá Rb. Við fjaðurstuðulsmælingarnar var stuðst við bandarískan staðal, ASTM C469. Niðurstöður mælinganna voru bornar saman við leiðbeinandi gildi fjaðurstuðuls í nokkrum þágildandi þolhönnunarstöðlum, þ.e. CEB, ACI318, norska staðlinum NS 3473 og danska staðlinum DS411 sem þá var sá staðall sem fylgja átti hér á landi. Fjaðurstuðulsgildin sem fengust voru öll mun lægri en gildin í DS411 og flest lægri en CEB. Steypusýni sem talin voru gerð úr mjög blöðróttu fylliefni mældust með áberandi lægri fjaðurstuðul en sýni úr þéttum fylliefnum, sjá mynd 4. Í heimildinni segir:

“Af myndinni má sjá að fjaðurstuðull íslenskrar steypu er nokkru lægri en viðmiðunargildi CEB og danska staðalsins. Aftur á móti virðist fjaðurstuðull íslensku steypunnar, ef undan er skilin steypa með blöðróttu fylliefni, vera svipaður og þau gildi sem norski og bandaríski staðallinn gefa.”

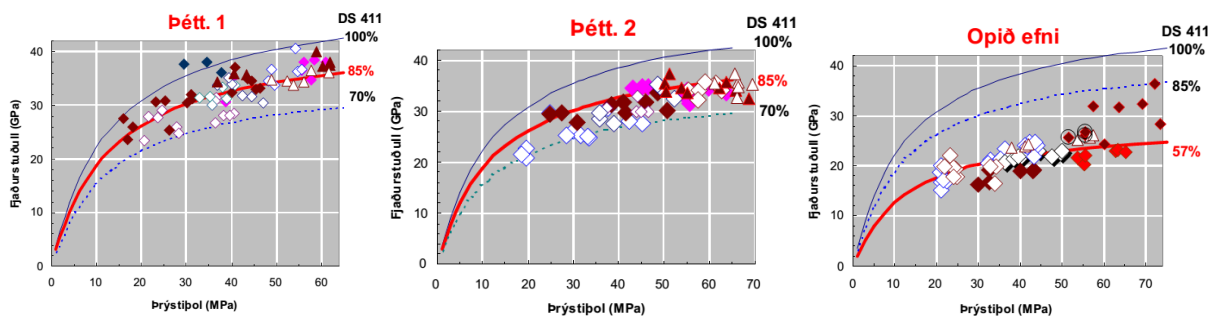


Mynd 4 Niðurstöður úr prófun á fjaðurstuðli steypusýna hjá Rb 1986-87, mynd úr heimild (Sveinbjörnsson, 1988).

Seinni rannsóknin sem nefnd er hér að framan var nokkuð umfangsmeiri en sú fyrri. Markmið verkefnisins var: *“að kanna hvaða áhrif gleygni fylliefna og styrkur steinsteypu úr íslenskum efnum hafa á fjaðurstuðul steypunnar”*. Í rannsókninni var fjaðurstuðull prófaður á sýnum úr 22 steypublöndum frá þremur steypustöðvum á höfuðborgarsvæðinu, sem notuðu hver sitt fylliefni. Fylliefnanámurnar og gleygni (einnig nefnd holrýmd, vatnsdrægni og mettivatn) fylliefnanna úr þeim var auðkennd þannig:

- Björgunarefni - Þétt 1, ferskt basalt, að mestu þétt, og ferskt þétt basaltgler.
- Esjubergsefni - Þétt 2, að mestu ummyndað þétt basalt og ummyndað þétt diabas.
- Vatnsskarðsefni - Opið efni, ferskt blöðrótt basalt.

Fjaðurstuðull var prófaður á sýnunum á mismunandi aldri þeirra (7, 28 og 90 daga) og prófunaraðferðin var skv. staðli ISO 6874. Megin niðurstöður voru að “gleygni” fylliefna hefði veruleg áhrif á fjaðurstuðulinn og að fjaðurstuðull steypu með þéttu fylliefni væri 85% af viðmiðunargildum í danska þolhönnunarstaðlinum DS-411 og fjaðurstuðull steypu með mjög gleyptum fylliefnum væri 57% af viðmiðunargildum staðalsins. Á línuritum í mynd 5, sem fengin eru úr heimildinni, er samband mælds fjaðurstuðuls og þrýstistyrks allra prófhluta í rannsókninni dregið upp, flokkað eftir gleygni fylliefnanna, sbr.ofan. Jafnframt eru gildi fjaðurstuðuls í DS-411 færð inn á línuritin.



Mynd 5 Fjaðurstuðull sem fall af mældu þrýstipóli, myndir úr heimild (Ó Wallevik, B Þórðarson, 1999)

Niðurstöður úr ofangreindri rannsókn voru nýttar við gerð íslensks þjóðarskjals (Byggingarstaðlaráð, Þjóðarskjöl við íslensku forstaðlana um þolhönnun, 2002) við evrópska forstaðalinn um þolhönnun steinsteypuvirkja (CEN/TC/250, 1991) á þann hátt að gildi fjaðurstuðuls í forstaðlinum skuli margfalda með stuðlum sem eru 0,6 eða 0,9 eftir því hvort fylliefni steypu eru „opin“ (gleypin) eða „ekki áberandi opin“. Jafnframt er í þjóðarskjalinu vísað í Rb-blað (Ólafsson, 1999) varðandi nánari upplýsingar.

Í núgildandi þolhönnunarstaðli, ÍST EN 1992-1-1:2004 (Eurocode 2) er að finna leiðbeinandi eða áætluð gildi (enska: approximate values) sniðilfjaðurstuðuls, E_{cm} , sem gilda á bilinu $\sigma_c = 0$ til $0,4f_{cm}$ fyrir steypu úr kvarsítfylliefnum (sjá Section 3 í Eurocode 2, table 3.1). Jafnframt er þar að finna jöfnu fyrir sniðilfjaðurstuðul steypu úr kvarsítfylliefnum:

$$E_{cm} = 22 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3}$$

Þá segir í staðlinum að gildin ætti að lækka um 10% fyrir steypu úr kalksteinsfylliefnum og um 30% fyrir steypu úr sandsteinsfylliefnum og að fyrir steypu úr basaltfylliefnum ætti að hækka gildin um 20%.

Í þjóðarviðaukanum við Eurocode 2 (Byggingarstaðlaráð, Icelandic national Annexes to Eurocodes, 2010) eru stuðlar (0,6 og 0,9, sömu stuðlar og í þjóðarskjalinu 2002) sem sagt er að skuli nota til að margfalda gildin í EN 1992-1-1, háð fylliefnunum og gleygni þeirra. Enn fremur er vísað í áður nefnt Rb-blað varðandi ýtarlegri upplýsingar. Í Rb-blaðinu kemur nokkuð skýrt fram í umfjöllun að fylliefni í steypunni sem til rannsóknar var, var gerð úr basaltfylliefnum.

3. Rannsóknir

3.1 Prófunarstaðall

Í þessu verkefni var fjaðurstuðull mældur í samræmi við prófunaraðferð samkvæmt staðli ISO 1920-10:2010. Staðallinn tilgreinir aðferð til að ákvarða stöðufjaðurstuðul harðnaðrar steinsteypu undir þrýstiálagi (Static modulus of elasticity in compression of hardened concrete). Tilgreindar eru tvær aðferðir, þ.e. viðmiðunaraðferð (reference method) og valkvæð aðferð (alternative method). Viðmiðunaraðferðin er fremur ætluð til prófana á steypum sýnum en valkvæða aðferðin til prófana á sýnum teknum úr mannvirkjum.

Í megin dráttum gengur prófunin út á að grunnálag, 0,5 MPa, er sett á prófhlut og síðan er þrýstiálagið aukið smám saman í 1/3 af sívalningsþrýstistyrk steypunnar. Streita steypunnar er mæld og fjaðurstuðullinn fundinn með því að deila mismun streitugildanna við hærra og lægra þrýstiálagið upp í mismuninn á hærra og lægra þrýstiálaginu.

Prófhlotir:

Þegar prófað er eftir viðmiðunaraðferðinni á að nota minnst fimm steypa prófhluti. Þrjú þeirra eru notaðir til að ákvarða þrýstistyrk steypunnar og tveir til að ákvarða fjaðurstuðullinn. Prófhlutir fyrir þrýstistyrksprófun eiga að vera sívalningar með hlutfallið hæð/þvermál=2,0 og er eindregið er mælt með að nota sívalninga sem eru 150 mm í þvermál og 300 mm að hæð.

Ákvörðun fjaðurstuðuls:

Mæla á lengdarbreytingar eða streitu á minnst tveimur lóðréttum línunum á yfirborði prófhlutar. Prófhlut með áfestum streitumælum er komið fyrir í pressu þannig að lóðrétt miðlína þrýstiplötu pressunnar og prófhlutar falli saman. Grunnálag, 0,5 N/mm², (σ_b), er keyrt upp og því álagi haldið í 60 sekúndur áður en streitan er lesin á hverjum mæli. Álagið er síðan aukið á jöfnum hraða innan markanna 0,20 til 0,60 N/(mm²·s) þar til spennan í prófhlutnum er orðin einn þriðji af þrýstistyrk sívalninganna þriggja ($\sigma_a = F_c/3$). Þessu álagi er haldið í 60 sekúndur áður en streitan er lesin af hverjum mæli. Ef streitan á einhverjum mælanna vísar meira en 20% frá meðalstreitu allra mælanna við spennuna σ_a , á að snúa og “endurmiðja” prófhlutinn og endurtaka prófunina. Ef ekki reynist unnt að minnka mismuninn þannig að hann verði innan 20% markanna, á að hætta prófun á viðkomandi prófhlut. Ef og þegar mismunur milli streitunema er innan marka á að minnka álagið á sama hraða og það var aukið, niður í grunnálagið (σ_b) og halda því í 60 sek. Síðan á að endurtaka þennan forálagshring a.m.k. tvisvar sinnum. Þegar síðustu forálagshringnum er lokið og 60 sek. biðtíma með spennunni $\sigma_b = 0,5 \text{ N/mm}^2$, er streitan lesin á mælunum innan 30 sek. Álagið er því næst aukið í ($\sigma_a = F_c/3$) og því haldið stöðugu í 60 sek. og streitan lesin innan næstu 30 sekúndna. Þegar fjaðurstuðulsmælingum er lokið er álagið aukið þar til prófhlutur brestur. Ef brotstyrkur prófhlutar vísar meira en 20% frá þrýstistyrknum F_c , ber að geta þess í rannsóknarskýrslu.

Útreikningar og niðurstöður:

Að prófun lokinni er stöðufjaðurstuðullinn E_c 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 þrýstispenntu ($\sigma_a = F_c/3$)

σ_b = grunnspennan 0,5 N/mm²,

ϵ_a er meðal streitan við efri mörk þrýstispenntu,

ϵ_b = meðal streitan við grunnspennuna 0,5 N/mm²

3.2 Prófun fjaðureiginleika

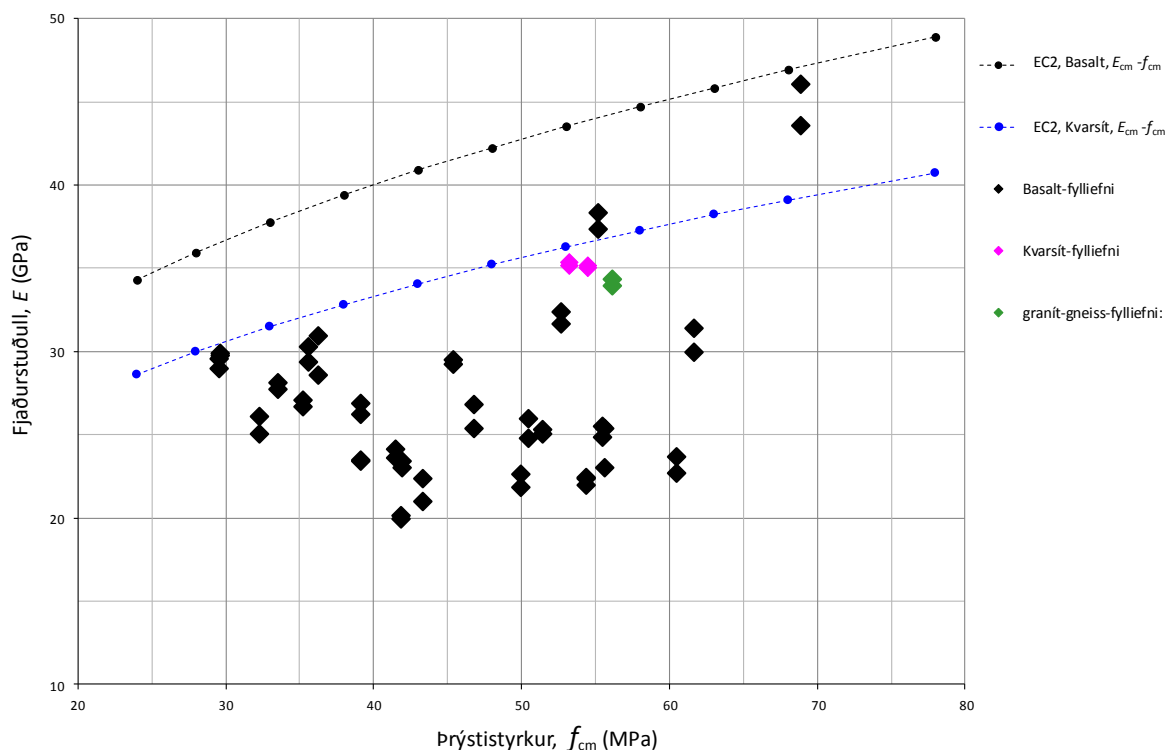
3.2.1 Niðurstöður fjaðurstuðulsmælinga

Í verkefninu var fjaðurstuðull ákvarðaður í samræmi við viðmiðunaraðferðina í ISO 1920-10:2010 á þrjátíu sýnum eins og getið er hér að framan. Fyrir hvert sýni var þrýstistyrkur fyrst mældur/ákvarðaður á þremur sívalningum og síðan var fjaðurstuðullinn og Poissons hlutfallið ákvarðað á tveimur sívalningum.

Niðurstöður allra fjaðurstuðulsprófananna, þ.e. á hverjum og einum sívalning, eru sýndar á línuritinu í mynd 6 sem fall af meðalþrýstistyrk sívalninganna þriggja sbr. ofan. Steypusýni sem innihalda basaltfylliefni (íslensk fylliefni) eru sýnd með svörtum tíglum. Eitt steypusýnið er úr granít-gneiss-fylliefni (innflutt fylliefni) og er það auðkennt með grænum tíglum. Bleiku tíglarnir sýna niðurstöður fyrir steypublöndurnar sem gerðar voru í rannsóknarstofu úr kvarsít-fylliefnum.

Á línuritinu eru einnig sýnd viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í þolhönnunarstaðlinum ÍST EN 1992-1-1:2004 fyrir steypu úr basaltfylliefnum á móti meðalstyrk steypu ($f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)), sbr. ÍST EN 1992-1-1:2004, table 3.1. Á sama hátt eru gildi fjaðurstuðuls fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum (gildin í töflu 3.1 í staðlinum) sýnd á línuritinu (blá punktalína).

Á mynd 6 má lesa að þrýstistyrkur sýna (meðal styrkur þriggja sívalninga) mældist lægstur um 30 MPa og hæstur tæplega 70 MPa. 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 framleiðendum, úr mismunandi styrkleikaflokkum og fylliefnum úr mörgum námum.

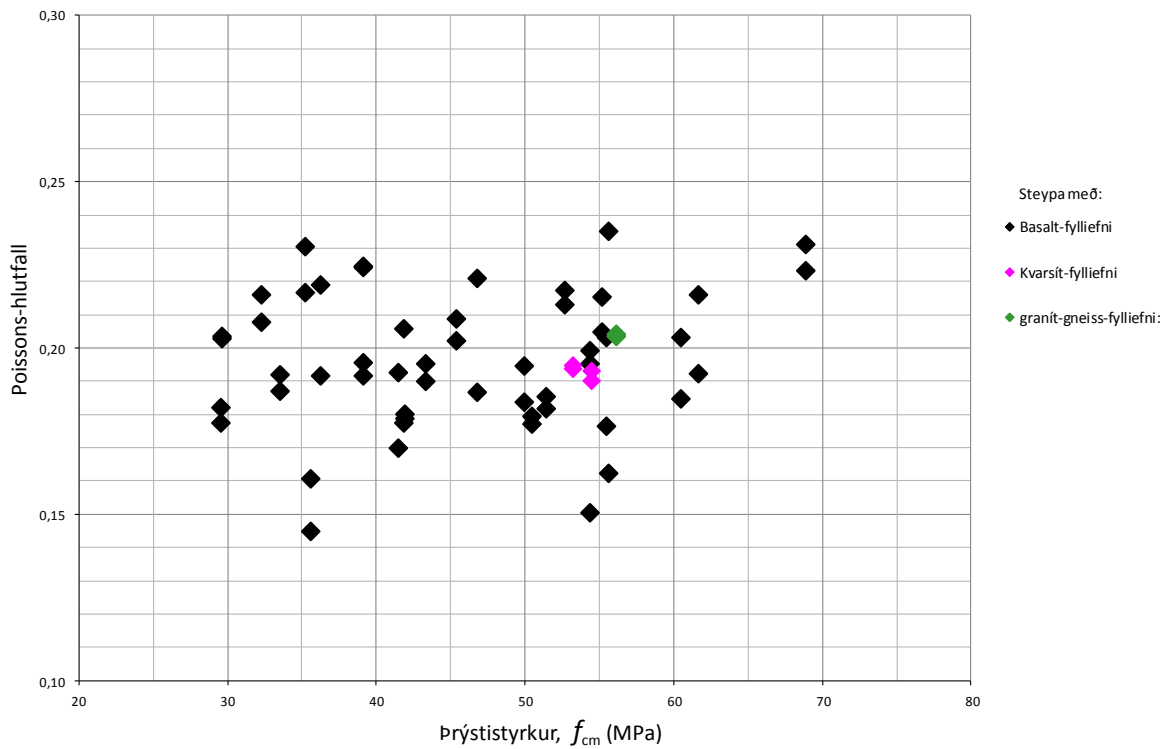


Mynd 6 Niðurstöður fjaðurstuðulsmælinga og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í ÍST EN 1992-1-1:2004

3.2.2 Niðurstöður mælinga á Poissons-hlutfalli

Ummálsaukningin eða Poissons-hlutfallið var ákvarðað á öllum sömu sýnum og fjaðurstuðulsmælingar tóku til.

Niðurstöður allra prófananna, þ.e. á hverjum sívalning, eru sýndar sem fall af þrýstistyrk á línuritinu í mynd 7. 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 steypublöndurnar sem gerðar voru úr kvarsít-fylliefnum. Eins og sjá má raða niðurstöðurnar sér í kringum 0,2 – línuna.



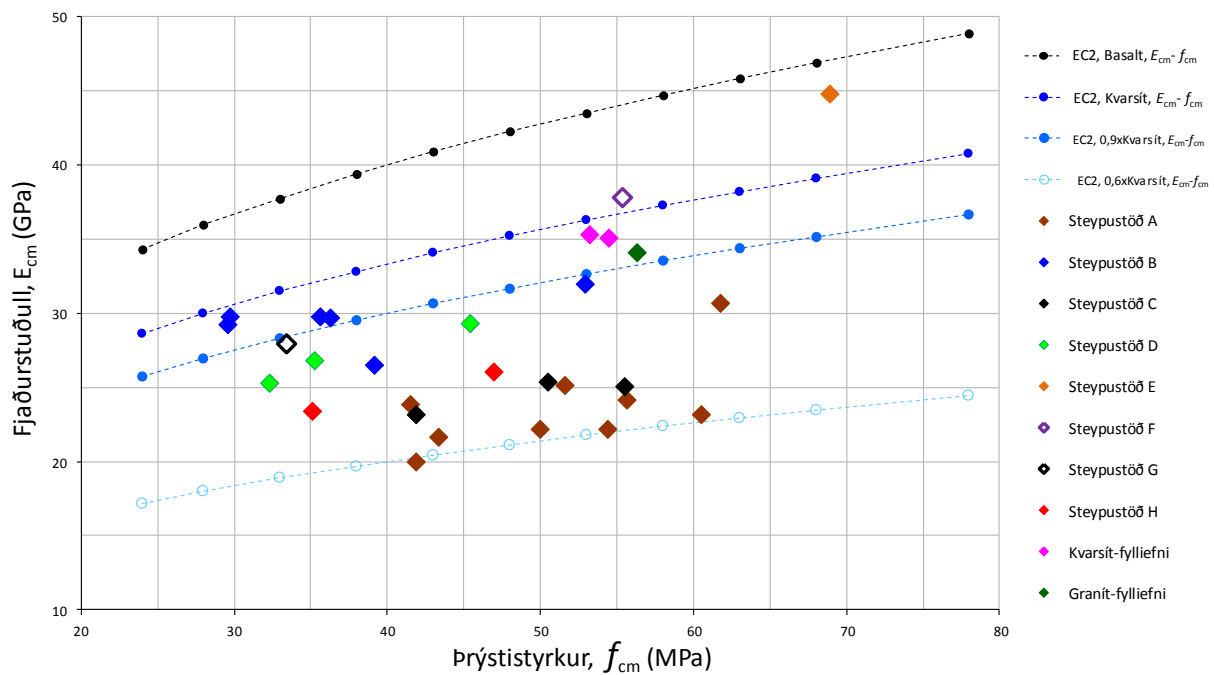
Mynd 7 Poissonshlutfall og þrýstistyrkur, niðurstöður mælinga

3.3 Umfjöllun

3.3.1 Fjaðurstuðull og þrýstistyrkur

Á mynd 8 eru niðurstöður fjaðurstuðulsmælinga sýndar fyrir hvert sýni (meðaltal tveggja prófhluta) og sýnin frá hverjum framleiðanda eru auðkennd með sérstökum lit. Þá eru gildi fjaðurstuðuls fyrir steypu úr basalt- og kvarsít-fylliefnum skv. þolhönnunarstaðlinum ÍST EN 1992-1-1:2004 sýnd á sama hátt og gert er á mynd 6. Ljósbláu punktalínurnar sýna gildi fjaðurstuðuls fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum margfölduð með stuðlunum 0,9 og 0,6.

Eins og sjá má er nokkuð misjafnt milli framleiðenda hvar fjaðurstuðulsgildin liggja. Þannig liggja gildi sýna frá steypustöð A um og rétt yfir ferlinum ($0,6 \times$ kvarsít $E_{cm} - f_{cm}$), meðan gildi sýna frá steypustöð B og G liggja nálægt ferlinum ($0,9 \times$ kvarsít $E_{cm} - f_{cm}$). Gildin sýna frá þremur framleiðendum, steypustöðvum C, D og H, liggja á milli þessara ferla, en mislangt frá þeim. Fjaðurstuðulsgildi sýna frá tveimur framleiðendum, Steypustöð E og F eru hins vegar mun hærri. Fjaðurstuðullinn í steypum úr kvarsít-fylliefnunum er mjög nálægt viðmiðunargildum í þolhönnunarstaðlinum ÍST EN 1992-1-1:2004 og granít-fylliefnasteypan er litlu lægri.

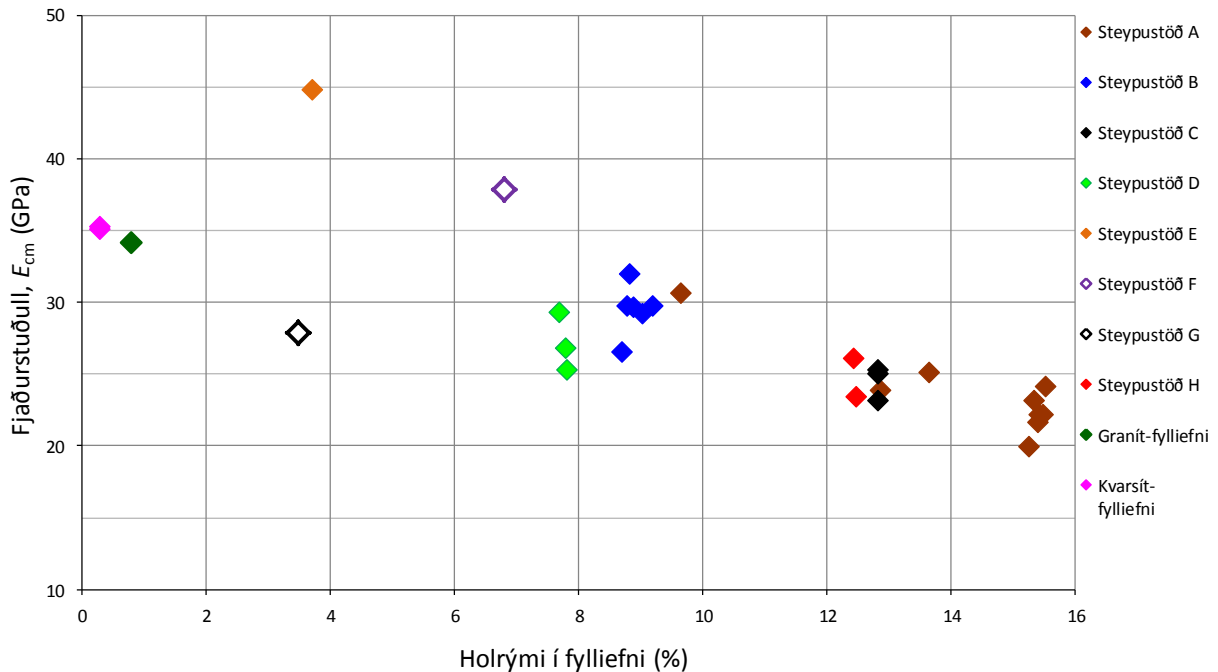


Mynd 8 Mældur fjaðurstuðull sýna og gildi fjaðurstuðuls í ÍST EN 1992-1-1:2004 sem fall af meðal þrýstistyrknum f_{cm} .

3.3.2 Fjaðurstuðull og holrými fylliefna

Innlend fylliefni eru nær undantekningalaust úr basalti, 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 holrýmnd í því („porositet“ eða vatnsdrægni).

Fylliefni í steypusýnunum bera þessa merki og var gerð athugun á holrýmnd þess. Niðurstöður eru sýndar á mynd 9. Holrými fylliefna er sýnt sem hlutfall (%) af heildarrúmmáli fylliefnis í steypunni. Af myndinni má ætla að áhrif holrýmishlutfalls fylliefna á fjaðurstuðul steypu eru talsverð.

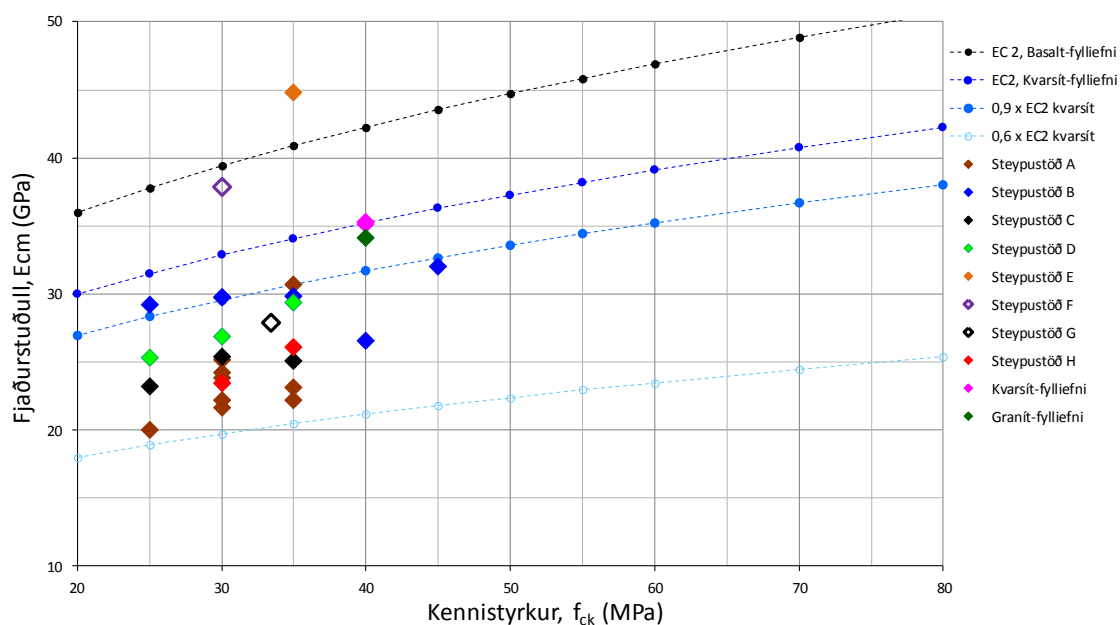


Mynd 9 Fjaðurstuðull og holrýmishlutfall fylliefna í steypu

3.3.3 Fjaðurstuðull og kennistyrkur

Á gögnum sem fylgdu steypusýnum frá framleiðendum kom m.a. fram styrkleikaflokkur (kennistyrkur) viðkomandi steypu. Á mynd 10 kemur fram samhengi mælds fjaðurstuðuls sýna og uppgefins styrkleikaflokks. Á línuritinu eru einnig sýnd gildi fjaðurstuðuls skv. Eurocode 2 fyrir steypu úr basaltfylliefnum (svört punktalína) á móti kennistyrk steypu (f_{ck}), sbr Eurocode 2, table 3.1. Á sama hátt eru gildi fjaðurstuðuls fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum (gildin í töflu 3.1 í staðlinum) 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 staðlinum, sem eru fyrir steypu úr kvarsít-fylliefnum, vera tekin sem gildi fjaðurstuðuls sem íslenski þjóðarviðaukinn vísar til.

Eins og sjá má á mynd 10 eru flest steypusýnin í þrýstistyrksflokkunum C25/30 til C35/45, en aðeins tvö í flokknum C40/50 og eitt í C45/55. Ástæðan er að lítið sem ekkert var framleitt af steypu í hærri styrkflokkum á tímabilinu sem sýnataka stóð yfir. Það vantar því tilfinnanlega fleiri sýni úr styrkleikaflokk C40/50 og hærri til þess að auka breidd rannsóknarinnar í heild.



Mynd 10 Mældur fjaðurstuðull steypusýna og kennistyrkur þeirra (uppgefinn þrýstistyrksflokkur af framleiðanda) og viðmiðunargildi fjaðurstuðuls í ÍST EN 1992-1-1:2004 fyrir kennistyrk.

Fjaðurstuðull nær allra steypusýnanna liggur milli ferlanna sem merktir eru ($0,9 \times$ kvarsít $E_{cm} - f_{ck}$) og ($0,6 \times$ kvarsít $E_{cm} - f_{ck}$) en þeir sýna 90% og 60% af gildum fjaðurstuðuls í töflu 3.1 í Eurocod 2 staðlinum og sem gilda fyrir steypu úr kvarsít fylliefnum.

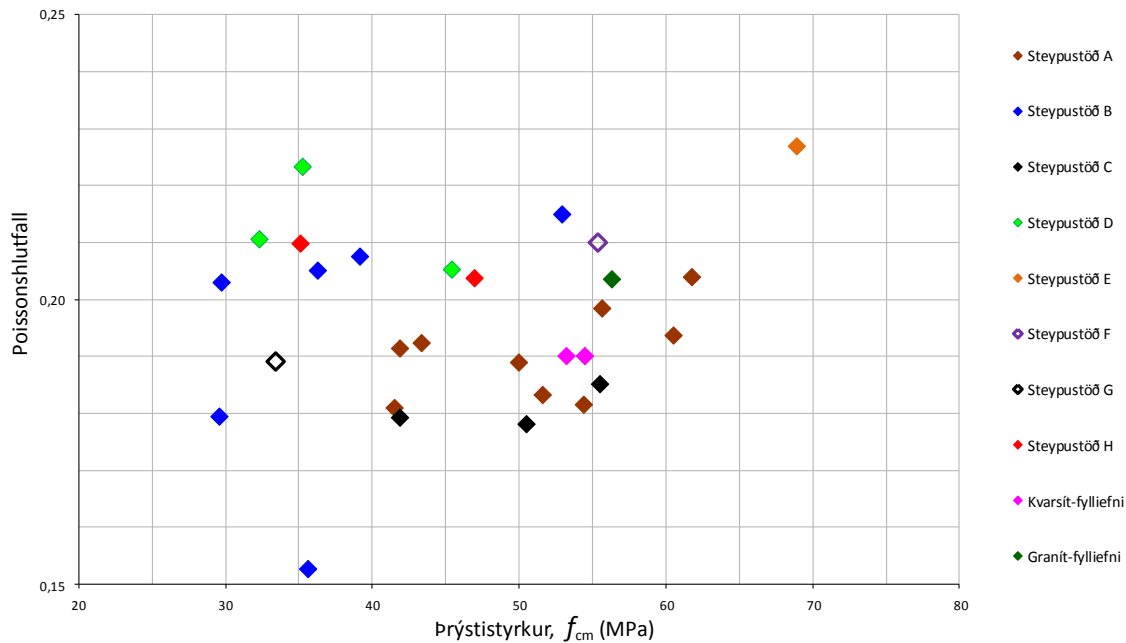
Holrýmishlutfall fylliefna virðist ráða miklu um gildi fjaðurstuðuls steypunnar en með samanburði á mynd 9 og mynd 10 má sjá að steypa með þétt fylliefni gefur hvað hæst gildi fjaðurstuðuls.

Viðmiðunargildi fjaðurstuðuls sem Eurocode 2 gefur fyrir steypu úr basaltfylliefnum eru langtum hærri en gildin sem fengust í þessari rannsókn. Þannig samsvara efri viðmiðunargildin ($0,9 \times$ kvarsít $E_{cm} - f_{ck}$) sem algengast er að nota hér á landi um 75% af viðmiðunargildum staðalsins fyrir steypu úr basaltfylliefnum, þ.e. ($0,75 \times$ basalt $E_{cm} - f_{ck}$). Á sama hátt samsvara neðri viðmiðunargildi 50% af viðmiðunargildum staðalsins fyrir steypu úr basaltfylliefnum, þ.e. ($0,50 \times$ Basalt $E_{cm} - f_{ck}$).

Tvö sýni úr basaltfylliefnasteypum skera sig þó úr og er fjaðurstuðull þeirra af sömu stærðargráðu og viðmiðunargildi staðalsins. Fylliefnin í þessum sýnum eru fremur þétt (lítið holrými) miðað við það sem algengt er hér á landi og e.t.v. svipuð basaltfylliefnum sem finnast á meginlandi Evrópu.

3.3.4 Poissons-hlutfall og þrýstistyrkur

Á mynd 11 eru niðurstöður Poissons hlutfalls mælinga sýndar fyrir hvert sýni (meðaltal tveggja prófhluta) og sýnin frá hverjum framleiðanda eru auðkennd með sérstökum lit. Mæld gildi eru nánast öll innan markanna 0,18 til 0,22. Það má greina þá tilhneingingu að steypa með lægra holrýmishlutfall hafi hærra Poissons hlutfall og öfugt. Eurocode 2 mælir með að nota 0,2 sem Poissons hlutfall fyrir ósprungna steypu. Niðurstöður þessara mælinga virðast því vera í ágætu samræmi við Eurocode 2.



Mynd 11 Mælt Poissons hlutfall sýna sem fall af meðal þrýstistyrknum f_{cm}

3.4 Framhaldsrannsóknir

Eins og fram kemur í inngangi hefur verkefnið verið framlengt til eins árs. Fyrirhugað er að bæta við sýnum úr styrkleikaflokkum C40/50 og hærra og auka með því beidd rannsóknarinnar. Það er auðvitað háð því að steypustöðvarnar framleiði eitthvað af steypu í þessum hærra styrkleikaflokkum á komandi mánuðum. Þá er stefnt að því að prófa fjaðureiginleika steypublandna sem framleiddar verða í rannsóknarstofu úr þekktum þéttum fylliefnum, án og með kísilryksíblöndun auk einnar gerðar blendisements. Það verður byrjunin á að kanna áhrif kísilryks og annarra íauka (pozzolana) á fasaskil sementsefju við fylliefnakornin. Í þessu sambandi er vert að geta þess að líklega hafa öll steypusýnin í framangreindum rannsóknum Rb á fjaðurstuðli, verið úr steypu með kísilryksíblönduðu sementi, því á árabílinu frá ca 1980 til ca 2000 innihélt nær allt sement sem notað var á Íslandi ca 7% kísilryk.

Heimildir:

- Byggingarstaðlaráð. (2002). Þjóðarskjöl við íslensku forstaðlana um þölnönnun. *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.
- 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.