



# Samfelldir pensluliðir í vega- og brúargerð – 1. Hluti -Trefjasteypa

## Efniseiginleikar og Íslensk fylliefni

Rannsóknarverkefni  
Október 2016

**þekkingarleit** -ar kvk

1 að afla sér kunnáttu, það að

vilja vita e-ð, efla skilning á e-u

að fylla á viskubrunntnu

þekkingarþorsti, þekkingarþr

fróðleiksást, fróðleiksfýsn, námfýsi

**árangur** árangurs, (árangrar) kvk 1 ávörðun

úrstaða, það sem leiðir af einhverju > hal

(þessa, gefa) góðan árangur • afrek > árangur

áttun 2 / árferði **virðing** -ar, -ar kvk 1 mat, þa

á meðta til verðs 2 álit, heiður • það að virða > njót

virðingar / sýna e-m virðingu / bera virðingu fyrir e-u eð

er **for|skot** kvk 1 frestur 2 forhlaup, sá munur sem keppandi

frám yfir keppinauta sína þegar hann fær t.d. að byrja fyr

15189

C:\Users\larus\Google Drive\VSÓ\2016\15189 - trefjasteypal15189\_Greinargerð\_161015.docx

Október 2016

Nr. útg.	Dagsetning	Unnið	Yfirfarið	Samþykkt
1	14.10.2016	LHL	GM	LHL

## Almenn samantekt

Í þessu verkefni er rakið stuttlega forsendur og hvati fyrir rannsóknum sem framkvæmdar voru í þessari skýrslu. Þær rannsóknir eru á frumstígi, þ.e. myndu flokkast sem grunnrannsóknir og gefa skýrari mynd af því hvað þarf að gera og hvernig.

Reynt var að nálgast verkefnið og markmið þess á sem einfaldastan hátt, sjá fyrst hvort hægt sé að útfæra og blanda ákveðna tegund trefjasteypu með íslenskum fylliefnum að hluta til. Því næst þurfti að skilgreina hvaða æskilegu eiginleika væri verið að leitast eftir og hvernig væri hægt að prófa trefjasteypuna m.a. m.t.t. tækjakosts.

Rannsóknir leiddu í ljós að hægt er að blanda tiltekna trefjasteypu með íslenskum fylliefnum, þó með mjög takmörkuðu magni af íslenskum efnum. Sýnt var fram á að trefjasteypan sýndi þá hegðun sem telst æskilegust til að ná þeim eiginleikum sem eftirsóttastir þykja, þar ber helst að nefna tiltölulega þetta sprungumyndun með nokkuð jafna dreifingu og áframhaldandi burðargeta eftir sprungumyndun. Rannsóknirnar leiddu einnig í ljós að ef að gera á marktækan samanburð á burðarþols-eiginleikum trefjasteypunnar þá þarf huga vel að aðbúnaði og mælitækjum.

Verkefni þetta var unnið af VSÓ Ráðgjöf með styrk frá rannsóknasjóði Vegagerðarinnar í samstarfi við Nýsköpunarmiðstöð Íslands. Að verkefninu kom Lárus Helgi Lárusson, byggingaverkfræðingur hjá VSÓ Ráðgjöf.

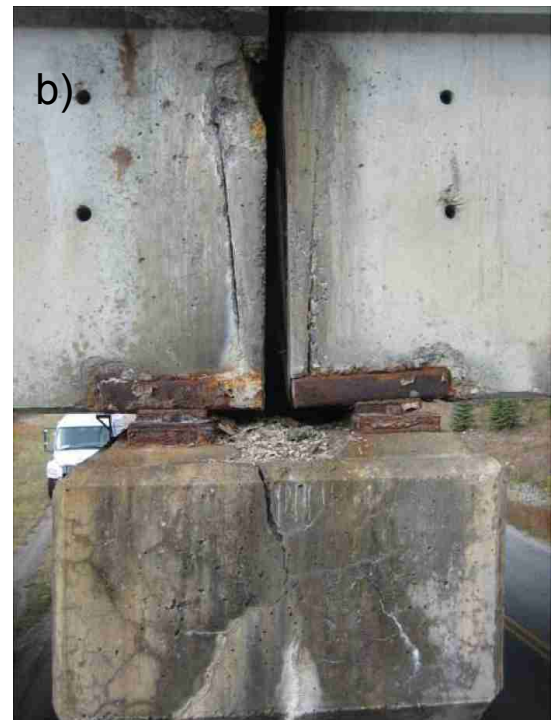
## Efnisyfirlit

<b>Almenn samantekt</b>	<b>1</b>
<b>1 Inngangur</b>	<b>3</b>
1.1 Bakgrunnur – hvati verkefnis	3
1.2 Verkefnið	4
1.3 Markmið verkefnis	4
<b>2 Trefjasteypa</b>	<b>5</b>
2.1 Trefjasteypa almennt	5
2.2 ECC trefjasteypa	6
2.3 Samsetning	6
2.4 Blönduninn	7
<b>3 Uppsetning tilrauna</b>	<b>8</b>
3.1 Almenn um uppsetningu og tilhögun tilrauna	8
3.2 Uppsetning tilrauna	8
<b>4 Tilraunir</b>	<b>9</b>
4.1 Staðlaðar prófanir	9
4.1.1 <i>EN 196-1 – 3 punkta Beygjutogþolspróf</i>	9
4.1.2 <i>EN 196-1 – Þrýstipolspróf</i>	11
4.1.3 <i>ASTM C1609 – 4 punkta beygjutogþolspróf</i>	12
4.2 Aðrar prófanir – Óstaðlaðar prófanir	16
4.2.1 <i>Þunnar plötur í beygjuþrófi – L=120mm</i>	16
4.2.2 <i>Þunnar plötur í beygjuþrófi – L=100mm</i>	18
<b>5 Niðurstöður og athugasemdir</b>	<b>21</b>
5.1 Athugasemdir varðandi efnisval og blöndun	21
5.2 Athugasemdir varðandi uppsetningu og tilraunir	21
5.3 Sprungumyndun og brot-seigla	21
5.4 Almennar athugasemdir um framhaldið	22
<b>6 Heimildir</b>	<b>23</b>

## 1 Inngangur

### 1.1 Bakgrunnur – hvati verkefnis

Stór samgöngumannvirki eins og brýr, þá sérstaklega langar brýr, eru yfirleitt útfærðar með þenslufúgu sem gerir þeim kleift að form-breytast án teljandi fyrirstöðu. Formbreytingarnar eru sökum hitabreytinga, skriðs og rýmunar sem og niðurbeygju vegna not-álags. Þessar þenslufúgur eru oftast útfærðar með einhverskonar mekanískum stál-tönnum eða með kerfi gúmmí hosa og stálplatna. Slíkar útfærslur þarfnast viðhalds og orsaka mikinn viðhaldskostnað á líftíma burðarvirkisins. Þegar slíkar þenslufúgur fara að skemmast, þ.e. losna, tærast, gúmmí að trosna o.s.frv., er hætt við að þær fari að leka, sem leitt getur til alvarlegra skemmda á mannvirkinu, þ.á.m. á undirstöðum og legum brúarinnar.

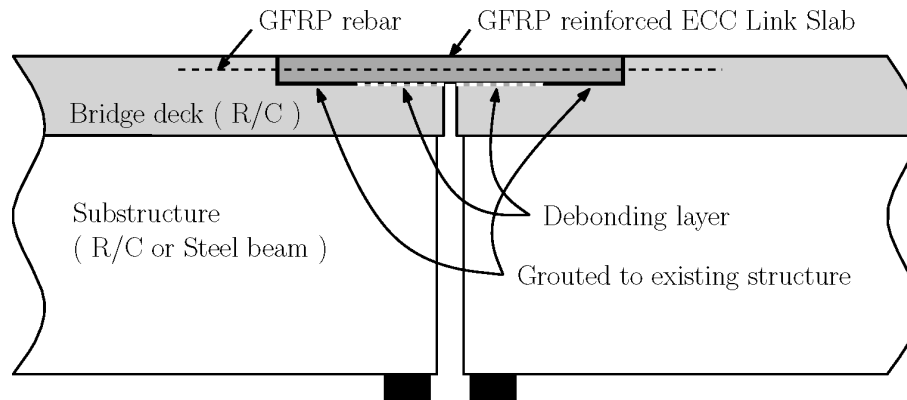


Mynd 1: a) Dæmi um hefðbundna mekanískri þenslufúgu, mynd tekinn á Borgarnesbrú. b) Dæmi um tæringu á legu og undirstöðu brúar vegna leka í þenslulið á yfirborði (Ho & Lukashnko, 2011).

Til að fyrirbyggja eða lágmarka þann viðhalds- og viðgerðarkostnað sem fylgir hefðbundnum þenslufúgum er hægt að nota svokallaða samfellda þensluliði (e. continuous expansion joints eða link slabs) úr steinsteypu. Samfelldir þensluliðir tengja saman tvö brúarhöf þannig að brúardekkið er samfellt en hegðar sér engu að síður sem liður.

Ein útfærsla á slíkum liðum eru forsteyptir, teygjanlegir þensluliðir sem hannaðir eru með sérstakri trefjasteypu og bendingu úr samsettum efnum (e. composite materials) í tiltölulega léttari forsteyptri einingu. Í þessari tilteknu útfærslu er notast við ákveðna teygjanlega trefjasteypu (e. Engineered Cementitious Composite eða ECC) sem m.a. takmarkar hámarks sprungustærðir og er styrkt með samsettri teygjanlegri gler-trefja bendingu (e. Glass Fiber Reinforced Polymer eða GFRP). Saman myndar þessi hönnun fremur léttu, teygjanlega, ryðfría og viðhaldsfría lausn sem tiltölulega auðvelt er að skipta út fyrir hefðbundna ósamfellda, mekaníska þenslufúgu.

Á Mynd 2 sést einfölduð skýringarmynd sem sýnir hugmyndafræðina á bak við þetta verkefni. Þar sést hvernig samfelldur þensluliður (e. Link Slab) tengir saman tvö aðliggjandi brúardekk.



Mynd 2: Einföld skýringarmynd af samfelldum þenslulið gerðum úr trefjasteypu og GFRP styrktar-teinum. (Lárusson 2013)

Í þessari útfærslu er gert ráð fyrir að afmarkaður miðhluti forsteyptu einingarinnar sé virkur, þ.e. geti form-breyst í langgátt brúardekksins, á meðan endar einingarinnar eru akkeraðir í aðliggjandi brúardekk. Hér er gert er ráð fyrir að virki miðhluti einingarinnar geti form-breyst lárétta lengdarstefnu um allt að 1,0 % streitu, þ.e. 1 cm fyrir hvern metra.

## 1.2 Verkefnið

Í þessum fyrsti áfanga verkefnis var lagt upp með með það að heimfæra blöndu af tiltekinni trefjasteypu, þ.e. notast við íslensk fylliefni þar sem möguleiki var á. Undirliggjandi markmið var að trefjasteypan sýni ákveðna efnis- og mekaníska eiginleika undir áraun sem nýtast í forsteyptum samfelldum þensluliðum.

Í öðrum áfanga verkefnisins (ekki til umsagnar hér) stendur til að velja heppilega brú með hefðbundinni þenslufúgu (stál eða gúmmí) og rannsaka m.t.t. frammistöðu með það fyrir stafni að skipt verði út þenslufúgu fyrir samfelldum þenslulið í næsta áfanga (3 áfanga verkefnis).

## 1.3 Markmið verkefnis

Megin markmið verkefnisins er að leggja mat á hvort hægt sé að blanda tiltekna háþróaða trefjasteypu (e. High Performace Fiber Reinforced Concrete, HPFRC) hér á landi með því að nýta til þess Íslensk fylliefni að hluta til. Jafnframt er verkefninu ætlað að meta æskilega eiginleika trefjasteypu og vera innlegg í umræður um frekari rannsóknir á þessum sem og tengdum þáttum.

## 2 Trefjasteypa

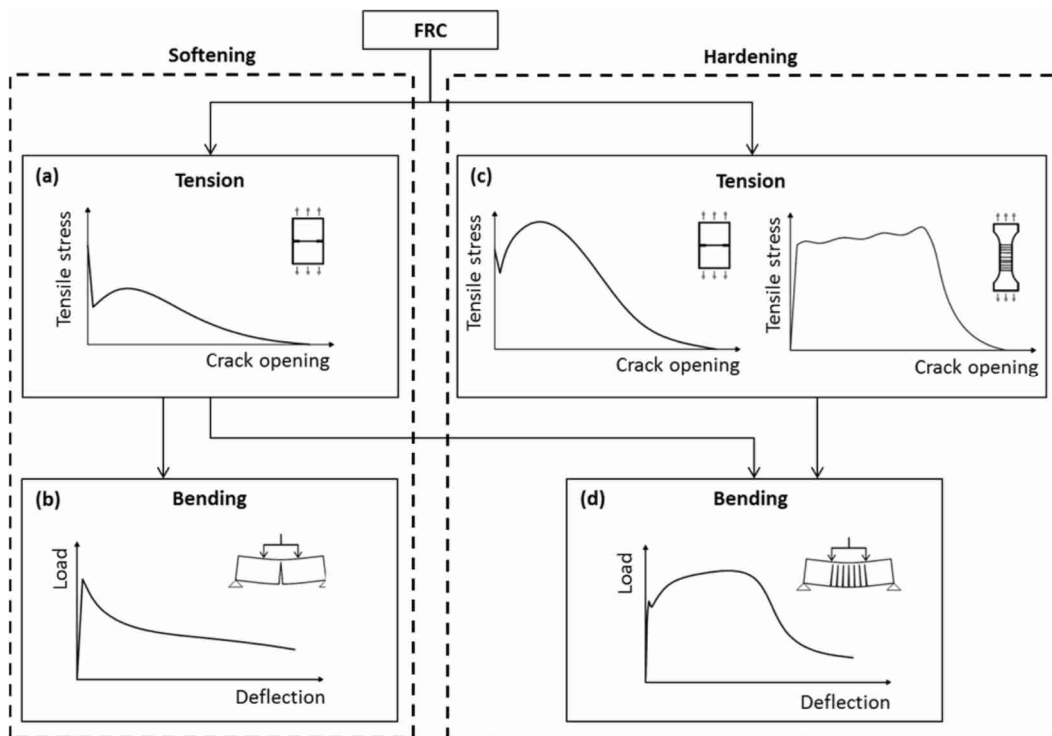
### 2.1 Trefjasteypa almennt

Síðastliðna áratugi hefur notkun trefja í sementsbundnum efnum (þ.e.a.s. trefjasteypu) í erlendum steypuiðnaði aukist til muna. Fjölmargar útgáfur af trefjasteypu (e. Fiber Reinforced Concrete FRC) hafa verið þróaðar með ýmsa eiginleika að leiðarljósi, bæði efnis- sem og mekaníska-eiginleika. Samfara þessum aukna áhuga á trefjasteypu hafa fjölmargar útgáfur á prófum verið þróaðar, staðlaðar sem og óstaðlaðar, þar sem reynt er að skilgreina ítarlega eiginleika eins og til dæmis togstyrk (ákvarðað beint eða óbeint), sveigjanleika (e. ductility), brot seiglu (e. toughness) sem og sprungumyndun (sprungu-þróun).

Trefjasteypu (með stuttum, ósamfeldum trefjum með tilviljunarkenndri áttun og jafnri dreifingu) er hægt að hanna með tilliti til sérstakrar notkunar með ákveðna eiginleika í huga fyrir burðarþolshönnun. Ýmist er trefjasteypa notuð án viðbótar styrktar-bendingar sem og í samblandi við hefðbundna bendingu í minnkuðu magni.

Einn mikilvægasti kostur þess að bæta trefjum við sementsbundin efni er stjórnun sprungumyndunar og geta trefjanna til að viðhalda styrk eftir að sprungur hafa myndast. Áframhaldandi og jafnvel aukin burðargeta eftir myndun fyrstu sprungu, hvort eð er við statískt álag eða dínamískt áraun, þ.e. brot-seigla, er almennt talin vera helsti eiginleiki trefjasteypu (Li & Fischer, 2002).

Almennt er hægt að skipta trefjasteypu í tvennt: þ.e. tog dvínandi (e. tension softening) eða tog herðandi (e. tension hardening) eftir því hvernig trefjasteypan hegðar sér í tograun eftir myndun fyrstu sprungu. Þar sem afar erfitt er að mæla sementsbundin efni í beinu togi er hentugt að notast við mælingar á beygjutogþoli til að meta togstyrk. Þá er talað um beygju dvínandi (e. bending softening eða deflection softening) eða beygju herðandi (e. bending hardening eða deflection hardening) Á Mynd 3 er muninum á þessum flokkum lýst skemaískt, þ.e.a.s. eftir myndun fyrstu sprungu.



Mynd 3: Flokkun trefjasteypu: (a) tog dvínandi (e. tension softening); (b) niðurbeygju dvínandi (e. deflection softening); (c) tog (e. strain hardening); and (d) niðurbeygju herðandi (e. deflection hardening) (Paegle 2015).

## 2.2 ECC trefjasteypa

Samsetning tog herðandi trefjasteypu eins og ECC er byggð á því að virkja samband sementsefju og trefja svo að þegar sprungur myndast geti trefjarnar sem brúa sprunguna tekið upp meiri kraft en sem nemur kraftinum sem myndaði sprunguna. Þessari samsetningu er lýst sem ör-vélrænni hönnunar lögmáli (e. micromechanical design principle) (Li 1993) og er forsenda fyrir tog herðandi eiginleika trefjasteypunnar.

ECC trefjasteypa hefur verið prófuð ítarlega með tilliti til að notkunar í vegagerð, m.a. slitprófanir og frostprófanir (Lepech & Li, 2009). Lepech og Li skýrðu t.d. frá jákvæðum niðurstöðum frost-þýði prófunum á ECC skv. ASTM C666A sem framkvæmd var í samstarfi við vegagerðina í Michigan fylki í bandaríkjunum. Þar voru gerðar 300 frost-þýði endurtekningar á 14 vikna tímabili. Sjá eining aðrar tengdar rannsóknir eftir Sahmaran og Li, (Sahmaran & Li, 2007).

## 2.3 Samsetning

Upplegg að samsetningu ECC er gefin í Tafla 1.

Trefjarnar sem notast er við eru PVA (e. PolyVinyl Alcohol), 8mm langir og 40 mikron að þvermáli, sjá Mynd 4. Þessi tiltekna tegund trefja hefur verið efnis-meðhöndluð af framleiðanda til að uppfylla áður nefnt hönnunar lögmál.



Mynd 4: PVA trefjar, 8mm langir og 40µm í þvermál

Tafla 1: Upplegg að samsetning ECC trefjasteypu pr. vigt.

Sement	Flugaska	Sandur	Kvarts mál	Vatn	Íblöndunar efni *	Trefjar (rúmmál %)
1,0	2,0	0,35	0,35	0,75	0,012	2,0

\*Flotefni og þykkingarefni.

Notast var við RAPID AALBORG sement og flugösku aðflutta frá Danmörk, sandur er fínsigtaður staðlaður kvartsít sandur (skv. CEN-Standard sand EN 196 Part 1) (<0.25mm), kvarts méli var skipt út fyrir íslenskt basalt méli sem NMÍ útvegaði. Íblöndunarefni (flotefni og þykkingarefni) voru flutt inn frá sitthvorum birgja í Þýskalandi og trefjar innfluttar frá Japan.

Í fyrstu var áætlað að skipta út hluta af fluguösku fyrir kísilryk, þó í mjög takmörkuðu magni þar sem kísilryk er töluvert virkara pozzolan efni en flugaska. Eftir ráðfæringar frá Ólafi Wallevik og nánari greiningu var ákveðið að skipta ekki út flugöskunni. Megin ástæður þess voru annars vegar aukin virkni sem gerir steypuna ómeðfærilegri og eykur



á óvissu hörðunarferlið. Og hins vegar er kísilrykið töluvert dýrari en flugaskan þó svo kísilryk sé afgangsefni úr íslenskri stóriðju (e. byproduct).

Það ber að taka fram að basalt mélið er einnig virkt pozzolan efni samanboreið við kvarts mál sem er það ekki.

## 2.4

### Blönduninn

Gerðar voru 2 tilraunablöndur áður en viðunandi áferð og vinnanleika var náð. Notast var við hefðbundinn 10 lítra steypuhræivél (skál og sleif (e. force mixer)) til að blanda.

Í fyrstu tilraun var blandan eins og uppleggið (sjá Tafla 1) með breytingum sem teknar eru fram í lið 2.2. Til að ná ásættanlegri seigju þurfti að bæta við vatni (ca. 5%). Þegar blandan var sett í mót hafði hún þykknað aðeins og því ákveðið að breyta blöndunni aðeins.

Í annarri tilraun var hlutfall vatns aukið enn meira (ca. 7%) með ásættanlegri áferð og seigja. Þegar tilraunablöndu númer 2 var helt í mót kom fram smá úrfelling/blæðing (e. bleeding).

Ekki þótti ástæða til að blanda aðra tilraunablöndu þar sem dreifing trefja var góð og úrfellingin var ekki veruleg og hægt að laga með því að finnstilla íblöndunarefnin örlítið.

### 3 Uppsetning tilrauna

#### 3.1 Almenn um uppsetningu og tilhögun tilrauna

Fyrir þetta verkefni eru tveir eiginleikar trefjasteypunnar ákjósanlegri en aðrir. Annars vegar geta trefjasteypunnar til að mynda sem flestar sprungur með takmarkaðri sprunguvidd, og þannig dreifa formbreytingum yfir sem stærst svæði. Og hins vegar að viðhalda burðargetu (tog-getu) eftir sprungumyndun. Það má að vísu sýna fram á að síðarnefndi eiginleikinn er afleiðing fyrrnefnda eiginleikans. Saman nefnast þessir eiginleikar brot-seigla (e. toughness).

Í þessari frumrannsókn er sprungumyndun metin sérstaklega, þar að auki er álags/færslur svörun tilrauna skoðuð m.t.t. sprungumyndunar. Togstyrkur trefjasteypunnar er metinn óbeint með 3 og 4 punkta beygjutogþolsprófum (stöðluðum sem og óstöðluðum) á mis stórum strendingum og þunnum plötum úr trefjasteypu. Þessi nálgun er gerð þar sem almennt er erfitt að mæla togstyrk trefjasteypu með beinum hætti.

Helstu stöðluðu beygjutogþols prófanir á trefjasteypu sem þessari, sem komu til greina að hafa að leiðarljósi, voru frá ASTM (American Society for Testing and Materials), JCI (Japan Concrete Institute) og EN (EUROPÄISCHE NORM, e. European Standard). Þeirra helst má nefna: ASTM-C1609, JCI-S-002, EN14651 eða fib Model Code 2010. En allir þeir staðlar sem tilheyra þessum samböndum (og fleiri til) hafa sína kosti og galla hvað varðar uppsetningu, aðferðarfræði, áreiðanleika og eiginleika sem hver þeirra einblínir á.

#### 3.2 Uppsetning tilrauna

Eftir ítarlega heimildar-rannsókn var ákveðið að styðjast við ASTM C1609/C1609M til að meta beygjutogstyrk trefjasteypunnar. Sá staðall notast við 4 punkta beygjutogpróf með óskertu þversniði, þ.e. samanber aðrar uppsetningar þar sem gerður er skurður í þversniðið til að stjórna og afmarka sprungumyndun.

Í ASTM C1609 er styrkur trefjasteypu metinn undir beygjutogþols-áraun. Út frá þeim prófunum er svo hægt að áætla togstyrk óbeint. Í þessum prófunum voru 100x100x350mm strengingar steypdir og prófaðir í 4 punkta beygjutogþolsprófi. Þess ber að geta að ekki var notast við mæligrind sem fyrirskrifuð er í ASTM C1609 þar sem ekki voru fyrir hendi ásættanleg færslumælitæki (e. Linear Variable Displacement Transducers eða LVDT) á rannsóknastofu Nýsköpunar Miðstöð Íslands (NMÍ).

Skv. staðlinum skulu prófanir stjórnast af niðurbeygjum bitans (e. displacement controlled). Í stað þess var notast við nákvæmar færslur pressutjakkis vegna áður nefnds tækjaskorts. Þess ber einnig að geta að undirstöður og álags-ásetubúnaður var ekki á rúllandi legum eins og gert er ráð fyrir og því töluvert stífur miðað við það sem gert er ráð fyrir í ASTM staðlinum.

Eining voru útbúnar þunnar plötur úr trefjasteypu, annarsvegar 50x8x200mm og hinsvegar 50x10x160mm, sem prófaðar voru ýmist í 3 og 4 punkta beygjutogþolsprófum. Hugmyndafræðin á bak við útfærslu og prófunum á þessum tiltölulega þunnu plötum var að kanna sprungumyndun trefjasteypunnar og almenna brot-seiglu.

Þar að auki voru framkvæmdar staðlaðar beygjutogþols- og þrýstipólprófanir skv. EN 196-1 þar sem bæði stærð prufa sem og samanburður við hefðbundna sementsefju þótti hentugt. Fyrirskrift EN 196-1 er að ákvarða styrk sements, en til þess voru 40x40x160mm strendingar steypdir og prófaðir í þriggja punkta beygjutogþolsprófi. Þar eftir var strendingurinn (þ.e.a.s. sitthvor helmingurinn) þrýsti-prófaður skv. fyrirskrift EN 196-1.

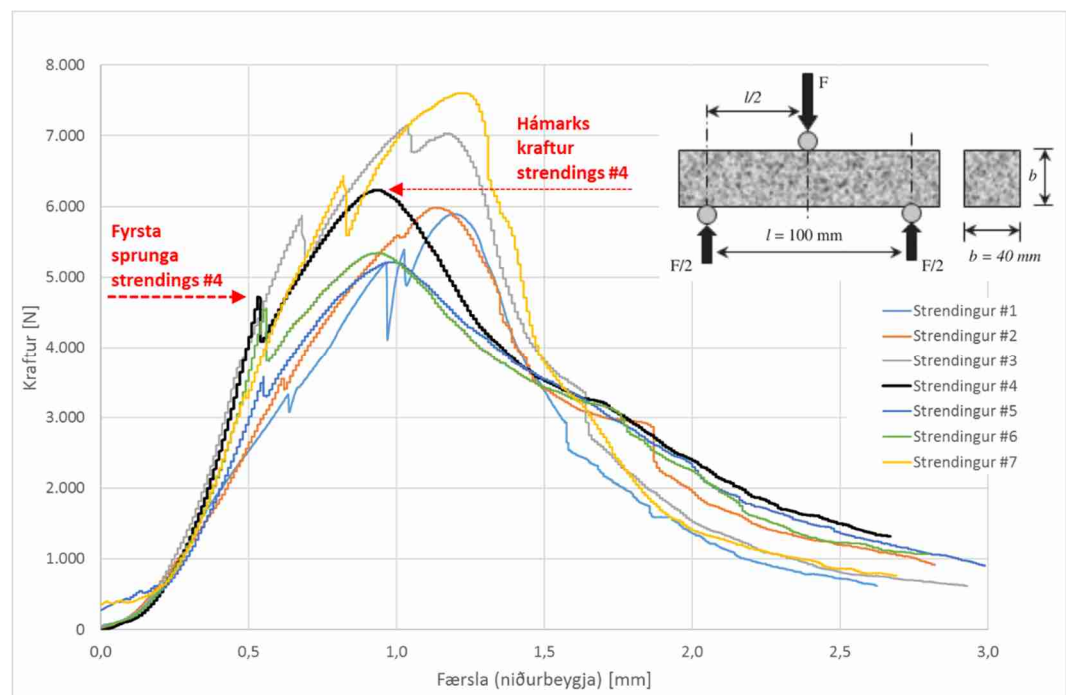
## 4 Tilraunir

### 4.1 Staðlaðar prófanir

#### 4.1.1 EN 196-1 – 3 punkta Beygjutogþolspróf

Prófaðir voru 7 40x40x160mm strendingar í 3 punkta beygjutogþolsprófi skv. fyrirskrift EN 196-1. Gerð var sú breyting á fyrirskrift staðalsins að álag á strendingana var færslustýrt með 0,2 mm/min. Til samanburðar gerir staðallinn ráð fyrir að álag aukning sé álagsstýrð með  $50 \pm 10$  N/min. Þessi breytinga er gerð þar sem almennt er færslustýring algengari í tilraunum með trefjasteypu. Niðurstöður álags/færslu ferla eru sýndar á Mynd 5.

Á heildina litið eru niðurstöður frekar dreifðar, fyrsta sprunga myndast á bilinu 3,4 kN (strendingur #1) og upp í 6,3 kN (strendingur #7) og hámarks krafti náð í 5,2 kN (strendingur #5) upp í 7,6 kN (strendingur #7). Dæmi um fyrstu sprungu og hámarks álag fyrir strending #4 er gefin á Mynd 5. Helstu niðurstöður fyrir álags/færslu ferlana á Mynd 5 eru teknar saman í Tafla 2, þ.e. álag við fyrstu sprungu, hámarksálag ásamt uppreiknaðri beygjutogþolspennu,  $f_{3point}$  (m.v. fyrstu sprungu, sjá Jöfnu 1)



Mynd 5: : Niðurstöður beygjuþolsprófs skv. EN 196-1, 40x40x160mm strendingar. Skýringarmynd í hægra horni: (Safi et. al. 2013).

Fyrir 3 punkta beygjutogþolspróf er hægt að reikna beygjutogþolspennu (e. flexural strength)  $f_{3point}$  við fyrstu sprungu skv.:

$$f_{3point} = \frac{3P_1L}{2b^3} \quad \text{Jafna 1}$$

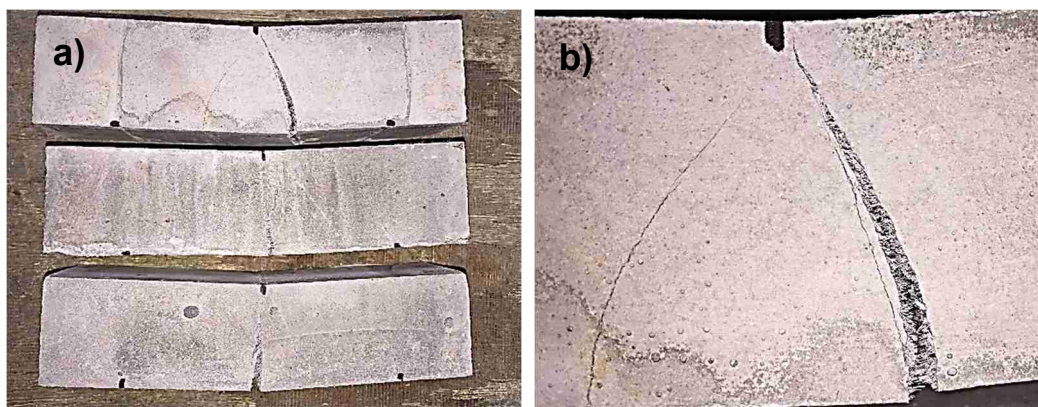
Þar sem  $P_1$  er álagið við brotmark (fyrstu sprungu) í N,  $L$  er spanið í mm og  $b$  er breidd eða hæð rétthyrnds þversniðs í mm.

Tafla 2: Niðurstöður beygjutogþolsprófs fyrir 7 strenginga, meðaltal (Avr) og staðalfrávik (Std).

Strengingar:	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	Avr	Std
Álag við fyrsta sprungu: $P_1$ [kN]	3,4	3,6	5,8	4,7	3,7	4,5	6,4	4,6	1,08
Hámars álag: $P_p$ [kN]	5,9	6,0	7,1	6,3	5,3	5,4	7,6	6,2	0,81
Beygjutogþ.spenna: $f_{3point}$ [MPa]	8,0	8,3	13,6	11,0	8,6	10,5	15,0	10,7	2,52

Eins og sést á Mynd 5 þá eykst álagið alltaf eftir að fyrsta sprunga myndast. Þetta er dæmigert fyrir tog-herðandi hegðun ECC trefjasteypu.

Óreglan í álags/færslu-svörun gefur til kynna að töluverðar óreglulegar færslur eiga sér stað utan strengingsins sjálfs. Þetta getur ýmist verið vegna færslu í undirstöðu- og eða álags-búnaði, t.d. vegna óreglu í ásetu. Þar að auki gæti rýrð áslæg frelsisgráða í álags-búnaðs haft neikvæð áhrif, þ.e.a.s. kúlulega ofan sílinders var tiltölulega stíf miðað við stærð prufu.



Mynd 6: a) dæmi um sprungumyndun í 3 strengingum eftir 3 punkta beygjutogþolspróf, b) stækkuð mynd af sprungumyndun efsta strengingsins í a).

Allir strengingarnir mynduðu staka staðbundna (e.localiced) sprungu beint undir álagspunkti eða áttu upptök sín beint undir álagspunkti. Í einhverjum tilfellum urðu til tvær sprungur áður en önnur þeirra stækkar (sjá dæmi á Mynd 6). Trefjar ýmist rifna eða eru dregnir út, það fyrrnefnda heyrir glögglega meðan á prófun stóð. Á Mynd 6 a) sjást trefjarnar sem dregist hafa út.

Til samanburðar má bera saman þessar niðurstöður við niðurstöður sömu prófana á strengingum úr sementsblöndum frá Sementsverksmiðjunni, sjá Tafla 3:

Tafla 3: Samanburður á niðurstöðum fyrir ECC, meðaltal (Avr) og staðalfrávik (Std).

Samanburður:	ECC trefjasteypa		Anlegg sement**		Standardsement FA.**	
	Avr	Std	Avr	Std	Avr	Std
Álag við fyrsta sprungu: $P_1$ [kN]	4,6	1,08	3,3*	0,12*	3,1*	0,24*
Hámars álag: $P_P$ [kN]	6,2	0,81	3,3*	0,12*	3,1*	3,1*
Beygjutogþ.spenna: $f_{3point}$ [MPa]	10,7	2,52	7,7	0,28	7,3	0,56
Þrýstipólpróf $f_c$ [MPa]	74,0	2,3	60,7	1,96	53,3	2,04

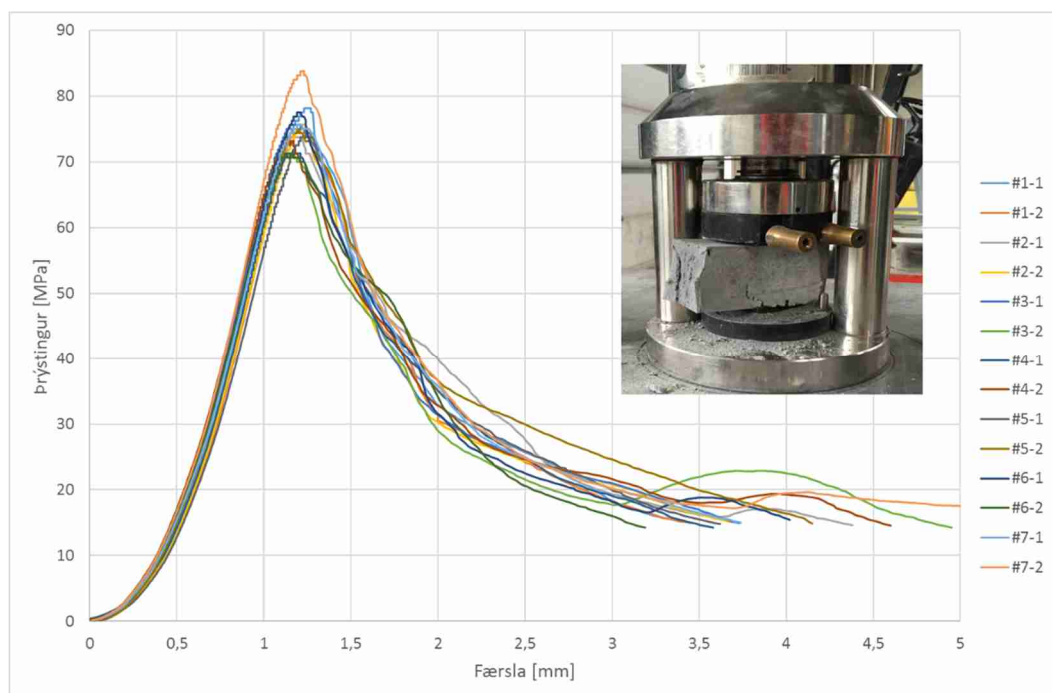
\*Bak-reiknað m.v. uppgefna beygjuþolspennu, g.r.f. að álag við fyrstu sprungu er einnig hámarks álag.

\*\*Niðurstöður frá NMÍ með leyfi Sementsverksmiðjunnar.

Töluverður munur er á staðalfrávik í þessum samanburði, líklegt er að uppstilling prófana (undirstöður og álagspunktur) sem og álagshraði hafi áhrif hér.

#### 4.1.2 EN 196-1 – Þrýstipólspróf

Eftir að beygjutogþolsprófanir voru búnar og strengingarnir brotnir í tvennt voru helmingarnir þrýsti-prófaðir skv. fyrirskrift EN 196-1. Alls voru prófaðar 14 prufur með álagshraða 2,4kN/s, niðurstöður þeirra er að finna á Mynd 7.



Mynd 7: niðurstöður þrýstiprófs skv. EN196-1

Skv. BS 1881 er minnkunarstuðull fyrir steypu-prufu undir þrýstingi 0,8 þegar hlutfall hæðar og breiddar (h/d) er 1.0 en ASTM C42 og AASHTO T22 notast við minnkunarstuðulinn 0,87 þegar h/d er 1,0. Það ber að taka fram að þessir stuðlar miðast

við 150x150 teninga. Í EN 196-1 eru breidd steypuprufu í þrýstingi jöfn hæð í einn ás en er tekið að jafnaði fyrir báða ása í þessari nálgun.

Að undanskilinni einni prufu voru þrýstipolsprófanir á bilinu 70-77 MPa. Með því að notast við minnkunarstuðlinum 0,8 minnka þessi gildi í 56-62 MPa. Sá þrýstistyrkur er í takt við þær mælingar sem framkvæmdar hafa verið í öðrum löndum á PVA-ECC trefjasteypu (Larsson et al. 2011, Paegle 2015). Ef hins vegar er tekið er mið af minnkunarstuðlinum 0,87 þá fæst 61-67 MPa sem er í hærra lagi en ekki talið óeðlilegt.

Í ofangreindri uppsetningu og tilhögun (skv. EN 196-1) er fjaðurstuðull sementsbundinna efna ekki metinn, en almennt er fjaðurstuðull ECC trefjasteypu í kringum 16-18 GPa (Larsson et al. 2011, Paegle 2015).

#### 4.1.3 **ASTM C1609 – 4 punkta beygjutogpolspróf**

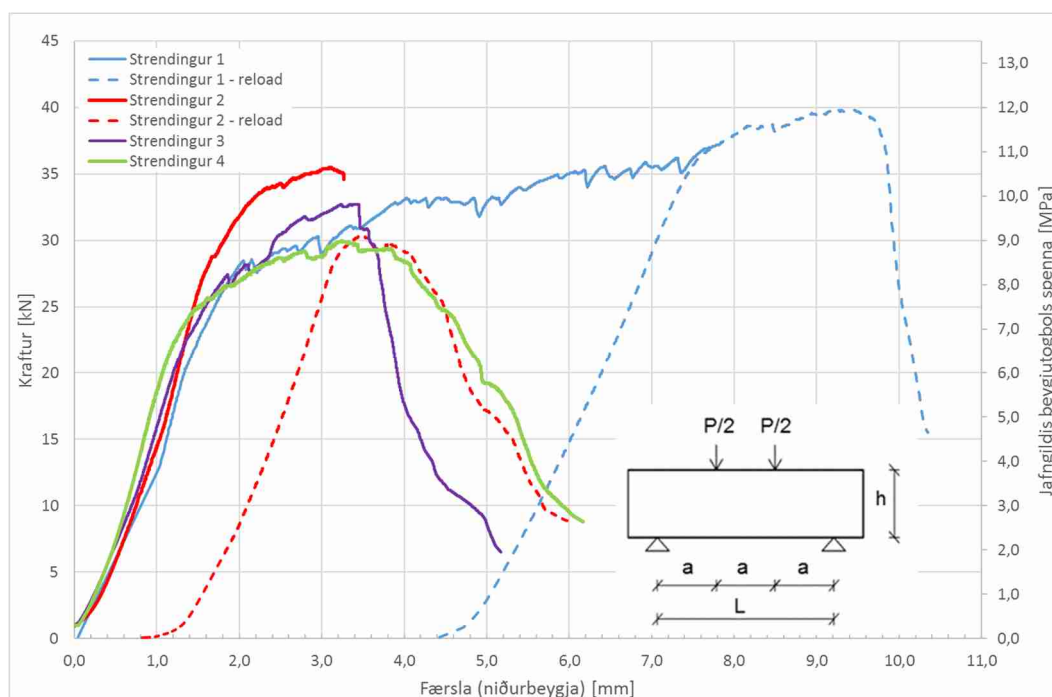
Alls voru prófaðir 4 strengingar, 100x100x350mm, í 4 punkta beygjutogspósi með ASTM C1609 að viðmiði. Eins og áður kom fram var reynt að fylgja staðalinum í uppsetningu, álagshraða og tilhögun eftir því sem tæki og tól á NMÍ leyfðu.

Mælingar miðuðust við færslu pressutjakks sem og stýringu álagshraða. Álagshraðinn skv. fyrirskrift staðals er 0,025-0,075mm/min upp að niðurbeygju L/900 (~0,333mm m.v. L=300mm), en 0,05-0,20mm/min eftir það. Þar sem ekki var hægt að styðjast við mælingar á niðurbeygju beint var ákveðið að notast við 0,075mm/min (hraði 1) fyrst um sinn og skipta svo yfir í 0,20mm/min (hraði 2) þegar fyrstu sprungurnar voru komnar fram. Þetta er annarsvegar gert til að reyna að tryggja að sprungumyndun í upphafi tilrauna sjáist greinilega í álags-færslu svörun og hins vegar til að flýta tilraunum fyrir.

Álags/Færslu svörun fyrir prófanir á öllum fjórum strengingum er að finna á Mynd 8. Jafnframt er gefið upp til viðmiðunar beygjutogpols spennan í strengingunum í 4 punkta beygjutogpósinu skv. ASTM C1609:

$$f_{4point} = \frac{P_1 L}{bd^2} \quad \text{Jafna 2}$$

Þar sem  $f_{4point}$  er beygjutogpósspenna brotmarks gefin í MPa,  $P_1$  er álagið við brotmark (fyrstu sprungu) í N,  $L$  er spanið í mm,  $b$  er breidd og  $d$  er hæð þversniðs í mm.



Mynd 8: Niðurstöður beygjutögbolsprófs að uppleggi skv. ASTM C1609, 100x100x350mm strendingar

Í álagsprófi fyrsta strendingins (Strendingur 1) var hraði 1 notaður þangað til tilraun var hætt þar sem ekki tókst að breyta hraða í stýrikerfi (e. load sequence) vegna tæknilegra örðuleika. Álag var því næst aftur sett á Strendingur 1 með hraða 2 (sjá „Strendingur 1 – reload“).

Sökum áframhaldandi örðuleika með stillingar á stýrikerfi fór svo að álag á Strendingur 2 var sett of hratt, ca. 10mm/min, . Eftir að vandamálið var leyst var álag aftur sett á strendingurinn á hraða 2 (sjá „Strendingur 2 – reload“).

Tilraunir á Strendingum 3 og 4 gegnu betur fyrir sig m.t.t. álagsstýringar. En við prófun á strendingi 3 sást að álags-búnaður sat ekki jafnt á strendinginum, það orsakaði að sprungur mynduðust fyrr öðru megin, þ.e. þeim megin (þegar horft er eftir langás) sem álags-búnaður settist fyrst á strendinginn. Ákveðið var að klára tilraunina fremur en að stoppa. Skipt var frá álagshraða 1 yfir í hraða 2 þar sem ferill Strending 3 á Mynd 8 nær ca 2,3mm færslu. Þessi skekkja í álags-búnaði var löguð áður en prófun á strendingi 4 hófst.

Mynd 9 og Mynd 10 sýna sprungumyndun á hlið og undirsíðu allra strendinga eftir að prófunum lauk.

Af öllum fjórum strendingunum er mesta sprungumyndunin í strendingi 1. Þar eru sprungur nokkuð jafndreifðar, með 28 sprungur að meðaltali yfir 100mm mið-þriðjungshlutann (meðaltal af þremur jafndreifðum talningum) sem jafngildir ca. 3,6mm á milli sprunga. Þessi mikla sprungumyndun er í beinu samhengi við álags/færslu svörun strendingins . Þar eykst færslan (niðurbeygjan) jafnt og þétt á sama tíma og fleiri sprungur myndast, á sama tíma eykst álagið töluvert. Hér sést bersýnilega svokallaður niðurbeygju herðandi ferill (e. deflection hardening) þar sem tog herðandi eiginleikar trefjasteypunnar kemur fram. Undir lokinn verður ein sprunga staðbundinn og stækkar.

Sprungumyndun í strendingi 2 er töluvert minni en á strendingi 1. Hér er tekið fram að langsamlega flestar sprungurnar eru lokaðar og sjást ekki með berum augum nema með því að bera vatn á yfirborðið. Þó voru taldar að meðaltali 14 sprungur yfir 100mm mið-priðjungshlutann sem jafngildir ca. 7,1mm meðalts millibili. Það má gera ráð fyrir að ástæða fyrir því að álags/færslu svörun strendingsins nær töluvert hærri álagi í upphafi tilraunar en aðrir strendingar sé vegna þess hve hratt álagið var sett á hann. Um leið og ljóst var hve álagshraðinn var mikill var tilrauninni hætt. Í endur-pröfun nær strendingurinn einungis ca. 85% af hámars álagi fyrri tilraunar áður en það dvínar tiltölulega fljótt aftur.

Sprungumyndun í strendingi 3 svipar til sprungumyndunar í strendingi 2 þegar litið er á hlið strendingana (Mynd 9), en þó sjást færri sprungur á undirsíðu strendingsins (Mynd 10) Á undirsíðu strendings mynduðust ca. 9 sprungur á 100mm mið-hlutanum (ca. 11,1mm meðalts millibil) áður en ein af þeim varð staðbundinn og stækkaði. Af álags/færslu svörun strendingsins að dæma virðist sem sprunga hafi myndast tiltölulega snemma, eða við 23,0kN álag. Álags-svörunin nær svo 32,4kN álagi áður en svörunin dvínar tiltöluleg fljótt.

Fjöldi sprungna á 100mm miðsvæði strendings 4 (talið á undirsíðu, Mynd 10) er ca. 10, sem jafngildir 10mm millibil að meðaltali, en þó meira áberandi með berum augum en strengingar 2 og 3. Sprungur eru meira áberandi þar sem þær eru opnari, samanber meiri færslu í álags-færslu ferli strendingsins.

Samantekt af álagi við fyrstu sprungu ( $P_1$ ), Hámarksálag ( $P_P$ ), beygjutogþols styrkur (e. flexural strenght eða e. modulus of rupture) og sprungu millibil (e. crack spacing) er að finna í Tafla 4.

Tafla 4: Niðurstöður beygjutogþolsprófs fyrir 7 strendinga, meðaltal (Avr) og staðalfrávik (Std).

Strendingar:	#1	#2	#3	#4	Avr	Std
Álag við fyrsta sprungu: $P_1$ [kN]	28,5	33,9	23,0*	25,0	27,6**	4,14**
Hámars álag: $P_P$ [kN]	40,0	35,4	32,7	30,0	37,0	3,12
Beygjutogþ.styrkur: $f_{4point}$ [MPa] skv. Jafna 2.	44,5	53,0	42,8	39,1	44,8	5,09
Meðal millibil sprungna [mm] (e. crack spacing)	3,6	7,1	11,1	10,0	8,0	2,91

\*mögulega við 27,4kN, \*\*mögulega breytist

Það getur verið villandi að bera saman strendinga 2-4 saman við strending1 þar sem formbreytingin á 2-4 virka litlar í samanburði við 1, en eru töluverðar.





Mynd 9: Sprungumyndun á hliðum allra strendingana úr ASTM C1609 prófum.



Mynd 10: Sprungumyndun á undirsíðu allra strendingana úr ASTM C1609 prófum. Hér er búið að bleyta yfirborð strendingana til að gera skýrari skil á sprungumyndun á yfirborði.

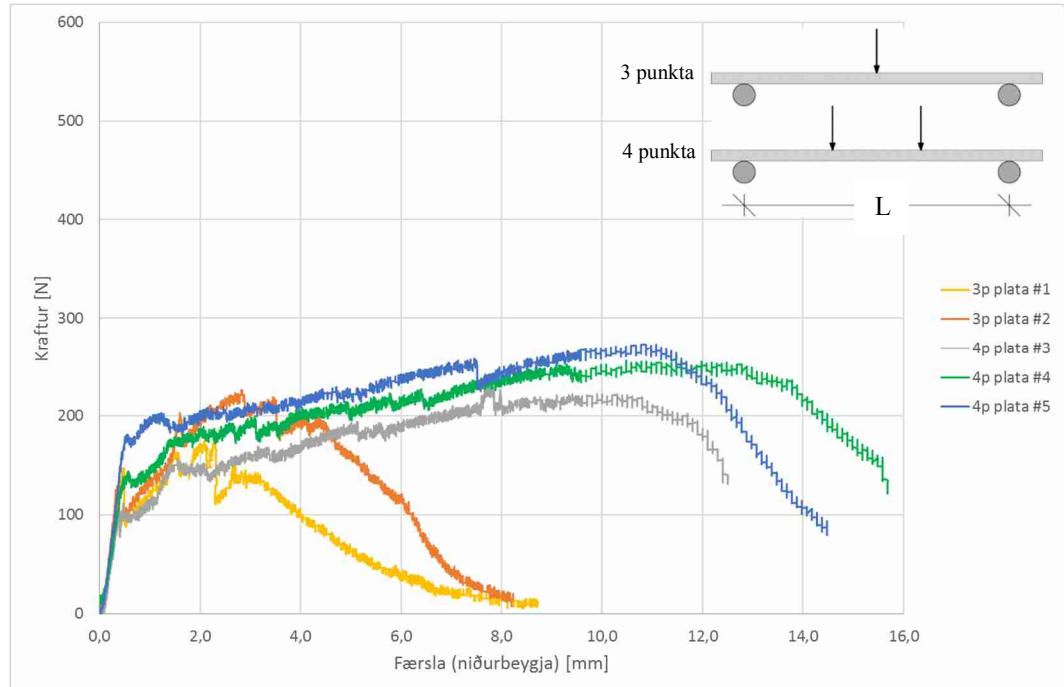
## 4.2 Aðrar prófanir – Óstaðlaðar prófanir

Þessar 50mm breiðar plötur voru steypar og prófaðar í 3 og 4 punkta beygjuprófi, annarsvegar  $L=120\text{mm}$  ( $t=8\text{mm}$ ) og hins vegar  $L=100\text{mm}$  ( $t=10\text{mm}$ ).

### 4.2.1 Þessar plötur í beygjuprófi – $L=120\text{mm}$

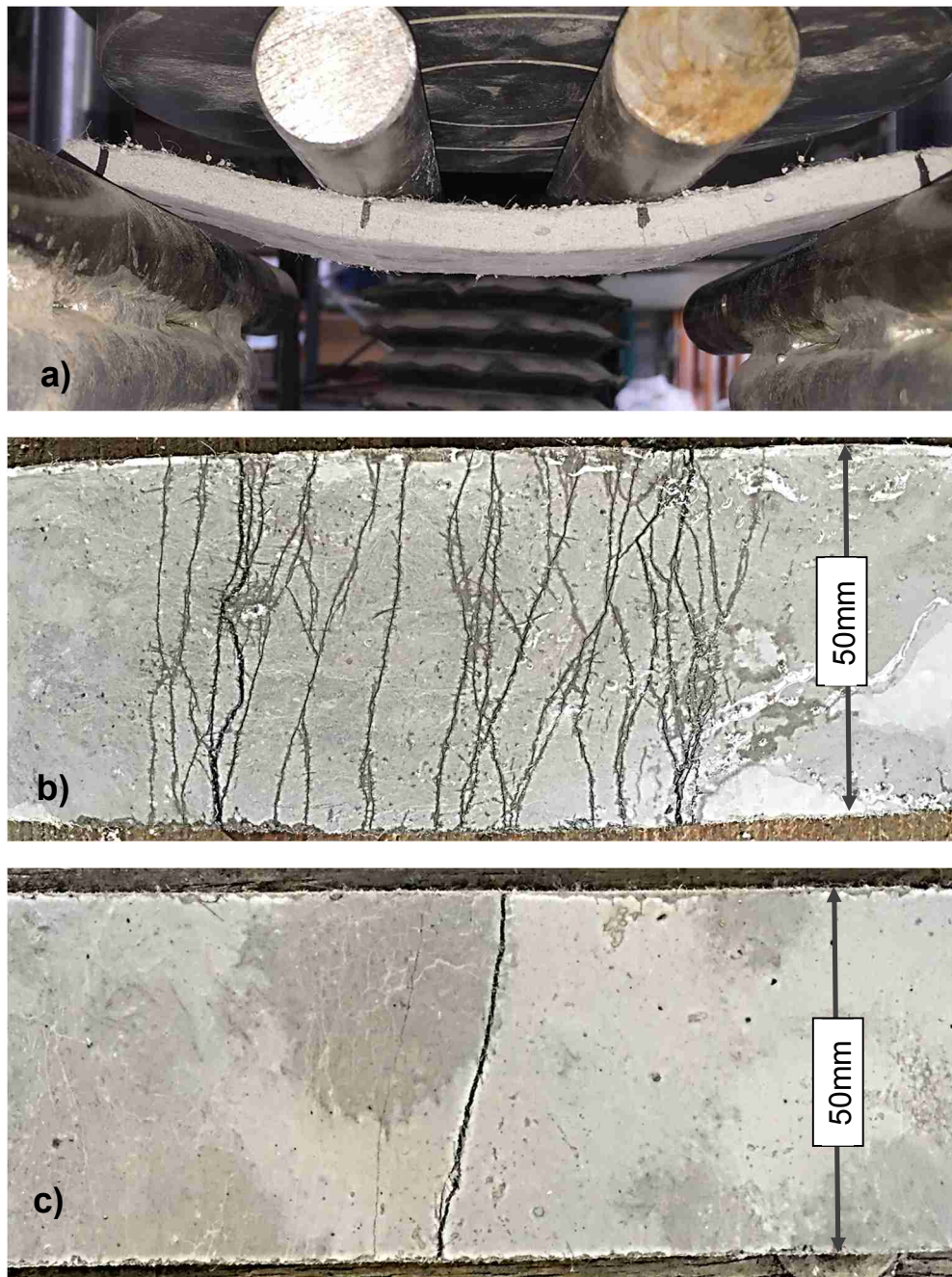
Alls voru prófaðar 5 plötur af stærðinni  $50\times 8\times 200\text{mm}$ , 3 í 4 punkta beygjuprófi og 2 í 3 punkta beygjuprófi. Í þessari uppsetningu var spanið  $L=120\text{mm}$ . Niðurstöður prófana, þ.e. álags/færslu ferlar, er að finna í Mynd 11 þar sem bæði eru gefnar 3 punkta prófanirnar sem og 4 punkta prófanirnar. Eins og við var að búast er augljós munur á 3 punkta og 4 punkta beygjuprófum platnanna þar sem formbreytingar (og þar með færslur) 4 punkta prófana verða töluvert meiri sökum jafnari álags yfir stærra svæði. Þetta verður eining

augljósara þegar skoðuð er sprungumyndun á plötum eftir 4 punkta og 3 punkta prófun á Mynd 12.



Mynd 11: Niðurstöður 3 og 4 punkta beygjuþolprófa 50x8x200mm platna með span L=120mm

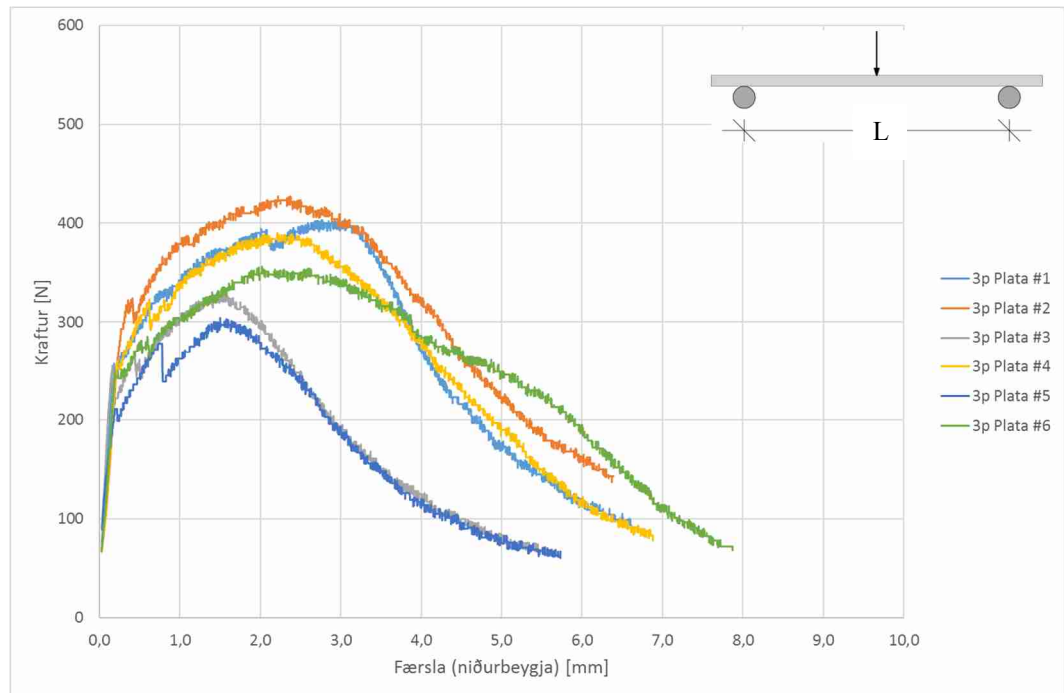
Mynd 12 sýnir plötu #4 í a): 4 punkta beygjuþrófi og b): samsvarandi sprungumyndun eftir að tilraun var stoppuð og c): sprungumyndun eftir 3 punkta próf til samanburðar. Vinstra megin á mynd b) sést ein sprunga sem er stærri en hinar, þ.e. þar sem sprungumyndun varð staðbundin (e. localized). Þess má geta að á báðum plötunum, á b) og c) voru staðbundnu sprungurnar staðsettar beint undir álagspunkti.



Mynd 12 a): þunn trefjasteypu plata, 50x8x160mm, í 4 punkta beygjuprófi, b): sprungumyndun í eftir 4 punkta beygjupróf, c): sprungumyndun í plötu eftir 3 punkta beygjupróf.

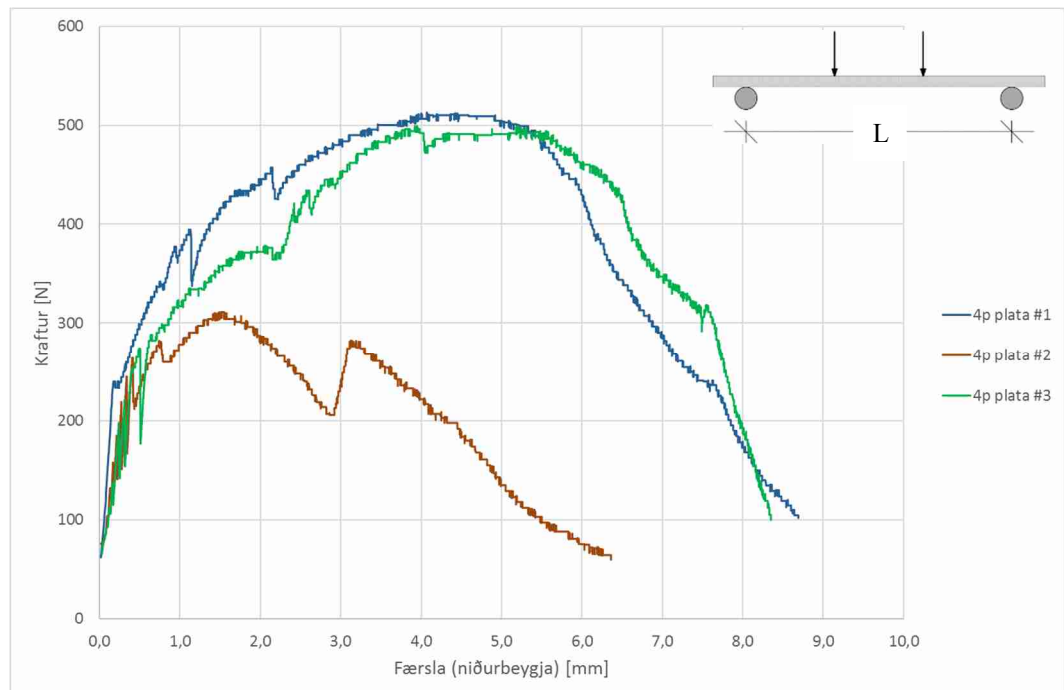
#### 4.2.2 Þunnar plötur í beygjuprófi – L=100mm

Alls voru prófaðar 9 plötur af stærðinni 50x10x160mm, 6 plötur í 3 punkta beygjuprófi og 3 plötur í 4 punkta beygjuprófi þar sem spanið var L=100mm. Niðurstöður 3 punkta beygjuprófana, þ.e. álags/færslu ferlar, er að finna í Mynd 13, og niðurstöður 4 punkta prófananna er að finna á Mynd 14.



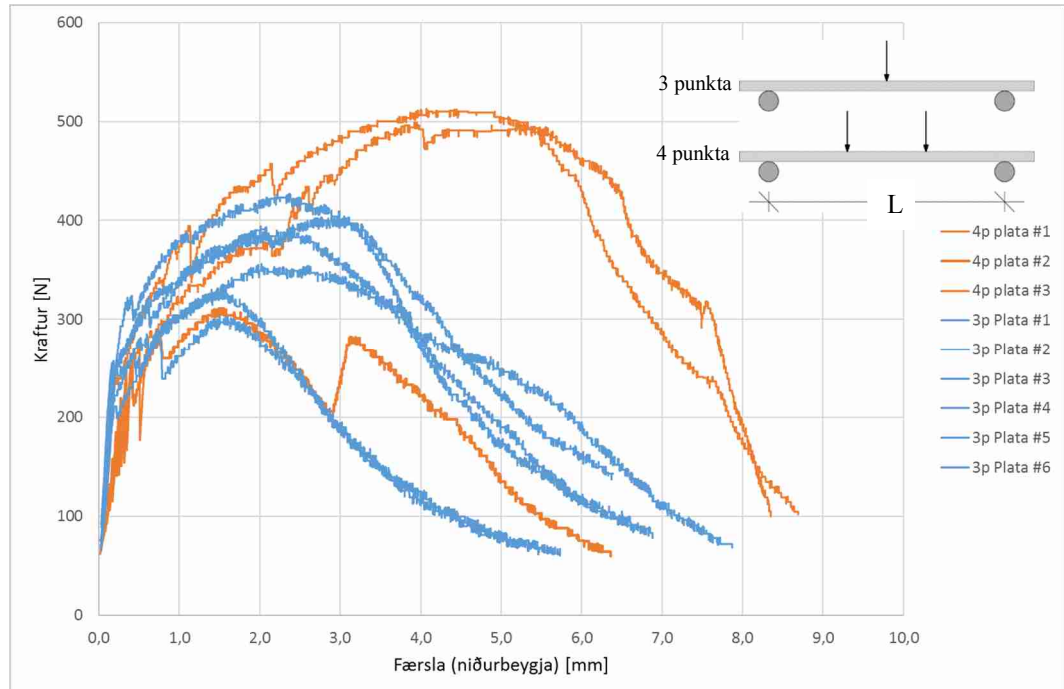
Mynd 13: Niðurstöður 3 punkta beygjuþolprófs 50x10x160mm platna með span L=100mm

Álags/færslu ferlar 3 punkta beygjuþrófana á Mynd 13 sýna nokkra samleitni fjöggra ferla sem eru á sama reiki á meðan 2 ferlar eru aðeins lakari. Í síðari nefndum tilvikunum myndast staðbundinn sprunga (e. localised) fyrr sökum veikleika í þversniði. Það sama á við um ferla 4 punkta beygjuþrófa á Mynd 14, þar er ágætis samleitni tveggja ferla á meðan einn afleiðist. Þó er vert að benda á að þó svo ferill virðist vera að dvína hratt þá getur trefjasteypan náð upp verulegum styrk s.b. plötu #2 á Mynd 14.



Mynd 14: Niðurstöður 4 punkta beygjuþolprófs 50x10x160mm platna með span L=100mm

Í samanburði 3 punkta prófana (Mynd 13) og 4 punkta prófana (Mynd 14) sem teknar eru saman í Mynd 15 sést að jafnari álags-dreifni skilar bæði hærri álagi sem og meiri formbreytingum. Í öllum prufum nær álagið mun hærra en eftir fyrstu sprungumyndun sem sýnir tog-herðunar hegðun trefjasteypunnar.



Mynd 15: samanburður á 3 punkta (blátt) og 4 punkta (appelsínugult) beygjuprófunum

## 5 Niðurstöður og athugasemdir

Her verður farið í gegnum hvern lið fyrir sig og reynt að draga fram helstu þætti.

### 5.1 Athugasemdir varðandi efnisval og blöndun

Eitt af meginmarkmiðum verkefnisins var að leggja mat á það með hvaða hætti væri hægt að notast við íslensk fylliefni í blöndu af ECC trefjasteypu. Vegna m.a. skerts vinnanleika og aukins kostnaðar sem fylgir notkun kísilryks er ekki ráðlegt að skipta út flugösku fyrir kísilryki.

Notkun Basaltmél í stað Kvartsméls virðist gefa góða raun. Það er gert ráð fyrir að notkun basaltmélisins orsaki að hluta til meiri vatnspörf blöndunar og komi til með að auka styrk sementsefjunar, þá sérstaklega þegar til lengri tíma er litið sökum virkni þess sem pozzolan efni.

Efnasamsetning flugöskunnar hefur eining mikið með vatnspörf blöndunar að segja. Flugaska er breytileg eftir því m.a. hvaðan hún kemur og þarf yfirleitt að aðlaga vatnsmagnið eftir því, sér í lagi þar sem mikið magn af henni er í tiltekinni blöndu.

Íblöndunarefnin, þ.e. þykkingarefni og flotefni, og trefjarnar eru hefðbundin fyrir umrædda trefjasteypu og eru aðflutt frá framleiðslulandi.

Gera þarf prófanir á stærri blöndum, þ.e. til að kanna afmarkanir þeirra blöndunartækja sem eru til staðar hér á landi, þar á meðal í NMÍ.

### 5.2 Athugasemdir varðandi uppsetningu og tilraunir

Svo bera megi saman niðurstöður prófana sem framkvæmdar eru hér á landi við aðrar rannsóknir þarf uppsetningin og mælibúnaður að vera sambærilegur.

Notkun á færslumælingum pressutjakks (e. piston displacement) í stað mæligrinda til að mæla raunverulegar niðurbeygjur við beygju-áraun er fjarri því að vera ákjósanlegt. Eins er það óásættanlegt að notast við undirstöðu og álags-ásetubúnað með ónóga færslu getu og sem notaður var við.

Þrátt fyrir það er hægt að draga þær niðurstöður að hegðun trefjasteypunnar undir beygju áraun sýndi tog herðingu og myndaði fjölmargar sprungur.

### 5.3 Sprungumyndun og brot-seigla

ECC trefjasteypan sýndi ítrekað myndun fjölmargra sprungna í flestum tilraununum.

Færstu sprungurnar mynduðust við 3 punkta beygjutogþolspróf á litlum strendingum (með hliðsjón af EN 196-1) eins og væntast mátti. Engu síður sést niðurbeygju herðing í öllum prufunum þar sem áraun eykst eftir myndun fyrstu sprungu.

Í 4 punkta beygjutogþolspróf á stórum strendingum (með hliðsjón af ASTM C1609) myndaðist nokkuð jöfn sprungudreifing á öllum prufum, en þó áberandi best í fyrsta strendinginum þar sem meðal millibil milli sprungna niður í 3,6mm. Í þessari uppsetningu sést niðurbeygju herðing sem og tog herðing í öllum strendingum.

Í beygjuþrófunum á plötum var myndun fjölda sprungna áberandi í öllum 4 punkta þrófunum á meðan 3 punkta prófanirnar sýndu færri sprungur. En eins og í öðrum uppsetningum sýndu allar plötuprófanirnar niðurbeygju herðingu.

Það er augljóst út frá þeim prófunum sem framkvæmdar voru hér að 4 punkta beygjuprófanir eru betur fallnar til að sýna myndun fjölda sprungna en 3 punkta prófanirnar vegna jafnara álags í þversniði 4 punkta uppsetningarinnar.

Sú sprungumyndun og brot-seigla sem ECC trefjasteypan þróaði með sér undir áraun í ofanefndum tilraunum sýnir æskilega og í raun nauðsýnilega eiginleikar fyrir samfellda þensluliðinn sem kynntur er í þessu verkefni.

#### 5.4 Almennar athugasemdir um framhaldið

Fyrir þetta tiltekna verkefni, þar sem áætlað er að steypa þunna þensluliðs-einingu úr trefjasteypu, er eftirsóknaverðasti eiginleiki trefjasteypunnar myndun og jafn-dreifni sprungna þvert á þenslustefnu.

Það hefur einnig verið sýnt í fyrri rannsóknum (td. Mitchell et al. 1996, Bischoff & Paixao 2004, Sooriyaarachchi & Pilakoutas 2005, Larusson 2013) að með því að bæta bendingu við trefjasteypu, og þá sérstaklega tiltölulega mjúkri bendinga með lágan fjaðurstuðul), eins og t.d. gler trefja stöngum GFRP (ca. 20-25 % af fjaðrastuðli stáls) tryggir það jafnari og þéttari sprungumyndun undir tog áraun. Slík glertrefjabending getur form-breytist línulega upp í 2,5-3,5 % streitu sem er töluvert hærra en sú 1,0 % formbreyting sem gert er ráð fyrir í þensluliðinum.

Þar sem eðli þensluliða er að formbreytast/í lengjast er æskilegast í raun ákjósanlegast að togstyrkur trefjasteypunnar sé jafnframt sem lægstur. Þannig má hugsa virka stífni þensluliðsins koma einungis frá bendingunni og tog stífandi (e. tension stiffening) eiginleika bendingar og trefjasteypu.

Mælst er með því að framkvæmdar verði fleiri tilraunir, eins og þeim sem líst er í þessu verkefni, þar sem aðbúnaður og mælitæki eru betrubætt svo einsleitari niðurstöður fáist og staðalfrávik niðurstaðna lækki.



## 6 Heimildir

- Ho, E. & Lukashenko, J., 2011. Link Slab Deck Joints, TAC Conference & Exhibition-Transportation successes: Lets build on them. 2011 Annual Conference of the Transportation Association of Canada
- Larusson, L.H., 2013. Development of Flexible Link Slabs using Ductile Fiber Reinforced Concrete, PhD thesis, Technical University of Denmark.
- Li, V.C., & Fischer G., 2002. Reinforced ECC - An Evolution from Materials to Structures, Proceedings of the First FIB Congress, Osaka, Japan, Oct., pp. 105-122.
- Paegle, I., 2015. Characterization and modeling of fiber reinforced concrete for structural applications in beams and plates, PhD thesis, Technical University of Denmark.
- Li, V. C., 1993. From micromechanics to structural engineering -the design of cementitious composites for civil engineering applications, Structural Engineering/Earthquake Engineering, 10, pp. 1-34.
- Lepech, M. D. & Li, V. C., 2009, Application of ECC for bridge deck link slabs, Materials and Structures, 42, pp. 1185-1195.
- Sahmaran, M. & Li, V. C., 2007. De-icing Salt Scaling Resistance of Mechanically Loaded Engineered Cementitious Composites, Journal of Cement and Concrete Research, J. Cement and Concrete Research, 37, 1035-1046, 2007.
- ASTM C1609/C1609M-12 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), 2012
- JCI-S-002, 2003. JCI-S-002-2003 Method of test for load-displacement curve of fiber reinforced concrete by use of notched beam, Japan Concrete Institute Standard.
- EN14651, 2007. DS/EN 14651 Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), Danish Standard.
- fib, 2012. Model Code for Concrete Structures 2010 - Final draft, fib Bulletin No. 65 and 66, Ernst & Sohn.
- BS EN 196-1:1995, Methods of testing cement. Determination of strength, British Standard.
- Lárusson, L.H., Fischer, G. & Jönsson, J., 2011. Mechanical interaction between concrete and structural reinforcement in the tension stiffening process. In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6. Springer.
- Safi B., Ghernouti Y., Rabehi B. & Aboutaleb D., 2013, Effect of the Heat Curing on Strength Development of Self-compacting Mortars Containing Calcined Silt of Dams and Ground Brick Waste. Materials Research. 16(5): 1058-1064
- Bischoff, P. H. & Paixao, R., 2004. Tension stiffening and cracking of concrete reinforced with glass fibre reinforced polymer (GFRP) bars. Canadian Journal of Civil Engineering, 31, pp. 579-588.
- Sooriyaarachchi H., Pilakoutas K., Byars E., 2005. Tension stiffening behaviour of GFRP-reinforced concrete, American Concrete Institute (ACI) SP-230, pp. 975-989.