

# Blöndun slitsterkrar brúarsteypu í steypubíl



Desember 2017

NMÍ 17-06



## **Nýsköpunarmiðstöð Íslands**

**Rannsóknastofa byggingariðnaðarins**

**Desember 2017**

Prof. Ólafur H. Wallevik

Björn Hjartarson

Dr. Jón E. Wallevik

Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar styrkti rannsóknarverkefnið

**Efnisyfirlit:**

1. Inngangur .....	4
2. Blöndun á steinsteypu .....	5
3. Blöndunarvirkni í steypubíl.....	7
3.1 Uppsetning reiknilegra möskvaneta .....	7
3.2 Reiknivél og reiknilíkan .....	8
3.3 Uppsetning reikninga .....	9
3.4 Fræðilegur bakgrunnur .....	9
3.4.1 Aðgreining á lofti og steypu .....	9
3.4.2 Hreyfijafnan .....	11
3.4.3 Flotskerspenna og plastískur seigjustuðull.....	12
3.4.4 Flæði í snúningskerfi tromlu .....	12
3.4.5 Jaðarskilyrði .....	13
3.4.6 Lausnaraðferð.....	13
3.5 Skerhraði og blöndunarvirkni.....	14
3.6 Niðurstaða .....	18
4. Framkvæmd verkefnisins með steypubíl.....	19
4.1 Fyrsta tilraun - 30 desember 2014.....	19
4.1.1 Mælitæki.....	19
4.1.2 Mæliniðurstöður .....	21
4.2 Önnur tilraun – 3. mars 2015 .....	22
4.3 Þriðja tilraun – 3. febrúar 2016 .....	25
5. Yfirlit niðurstaðna og lokaorð .....	29
5.1 Blöndunarvirkni sem fall magni steypu í steypubíl .....	29
5.2 Blöndun slitsterkrar brúarsteypu í steypubíl .....	30
Ritskrá .....	31

## **Nýsköpunarmiðstöð Íslands**

Rannsóknarstofa byggingariðnaðarins

Desember 2017

Ólafur H. Wallevik

Björn Hjartarson

Jón E. Wallevik

Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar styrkti rannsóknarverkefnið; [Blöndun slitsterkrar brúarsteypu í steypubíl](#)

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

## 1. Inngangur

Sérlega endingargóð steypublanda hefur verið þróuð úr fylliefnum úr Harðakambi og fleiri námum til notkunar í nýtt, endingargott slitlag á brúarmannvirki Vegagerðarinnar. Mest hefur steypublandan verið notuð á Borgarfjarðarbrú þar sem steypan hefur verið hrærð í steypustöðinni á staðnum en einnig hefur hún verið notuð sem slitlag á fleiri brúarmannvirki Vegagerðarinnar. Fyrir liggur, með auknu umferðarálagi og aldri brúarmannvirkja, að steypa þarf slitlög á eldri brýr víða um land auk þess sem æskilegt er að steypa sérstök slitlög á nýjar brýr í stað þess að efsta lag yfirbyggingar sé slitlag stept með yfirbyggingunni og úr sömu blöndu. Ljóst er, að á flestum þeim stöðum þar sem endurnýjun á steypum slitlögum er framundan, er aðgangur að nægilega vel búnum steypustöðvum í nágrenni misjafn. Þegar staðan er þannig er eini kosturinn að hræra blönduna í steypubíl á staðnum. Til þess að það gangi þarf að prófa blöndun á staðalblöndunni í steypubíl við mismunandi aðstæður og meta áhrif mismunandi steypubíla (hönnun útbúnaðar þeirra er misjafn) á gæði steypunnar (styrk, frostþol, slitþol o.fl.). Markmið þessa verkefnis er að kanna áhrif þessara þátta og leggja til endurbætur svo að hægt sé að nota þessa aðferð án vandkvæða.

## 2. Blöndun á steinsteypu

Blöndun í steypubíl (e. truck mixing) er ekki nýtt fyrirbæri undir sólinni og slík steypuframleiðsla er talsvert algeng í Evrópu, einkum í Bretlandi. Langur vegur er frá því að gæði steypu séu sjálfkrafa jafn góð úr steypubíl, þar sem blöndun og hrærsla fer fram í einu og sama ferlinu, og í steypustöð eins og við erum að mestu leyti vön á Íslandi. Þar skiptir blöndunarferlið miklu máli en ekki síður hönnun (stærð og staðsetning trombluðlaða o.m.fl.) og ástand sjálfrar steyputromlunnar, svo sem slit, hversu vel tromlan er hreinsuð að innan o.fl.



Mynd 1: Tilraunir með blöndun í steypubíl við Nýsköpunarmiðstöð Íslands.

Margar brýr úti á landi hafa verið steyptar þannig, að slitlagið er efsti hluti yfirbyggingarinnar með því að auka steypuhulu yfirborðsins. Þetta leiðir til þess að yfirborðslagið er í sumum tilvikum óslétt eða a.m.k. ósléttara en æskilegt væri, þar sem útlagnaraðstæður eru erfiðar. Ef yfirborðslagið er steyppt sem sérstakt lag er auðvelt að leggja leiðara og yfirborðið á að geta verið mun sléttara, sbr. hvernig tekist hefur til í slitlagi á Borgarfjarðarbrú, en nýja steypuyfirborðið þar þykir vera til fyrirmyndar.

Til þess að hægt sé að útfæra hugmyndafræðina frá Borgarfjarðarbrú þarf að hanna einskonar ferðaútgáfu af blöndunni sem þar var notuð. Hún þarf að hafa sömu eiginleika og steypan í slitlaginu á Borgarfjarðarbrú þótt fylliefnið sé annað, hafa sömu seigjufræðilega eiginleika, þannig að auðvelt sé að leggja steypuna niður og hafa óbreytt þrýstipól, frostpól og slitpól svo nokkuð sé nefnt. Unnið er að slíku þróunarverkefni í öðru verkefni sem Nýsköpunarmiðstöð Íslands og Vegagerðin sóttu saman um til Rannsóknasjóðsins Vegagerðarinnar. Seinni parturinn í þróun á ferðaútgáfunni er ekki síður mikilvægur en það er að gera blönduna ónæma fyrir því tæki sem hún er blönduð í. Aðgangur að steypustöð er ekki sjálfsagður á þeim stöðum úti á landi þar sem nota þarf blönduna og því er líklegt að í flestum tilfellum verði hún skömmtuð beint í steypubíl og hrærð á staðnum. Í þessu skyni eru fylliefni og sement forvigtuð í stórsekk sem er losaður í bílinn á staðnum og blönduð í honum.

Einn þátturinn í því að gera blönduna ónæma fyrir blöndunaraðferð er að finna bestu aðferðina til að skammta í bílinn til að losna við svokallaða sementsbolta (sements- og trefjaköggla) sem eiga til að myndast við þessar aðstæður. Í okkar tilviki erum við að einnig að eiga við hátt magn af plasttrefjum en reynslan hefur kennt okkur að þær hafa mikla tilhneigingu til að kögglast ef ekki er staðið vel að blöndun í steypustöð. Sú áskorun er enn erfiðari við blöndun í steypubíl. Til dæmis er ástand steyputromlunnar á viðkomandi steypubíl einn lykill að árangri. Það er að segja, blöðin innan í tromlunni eru misslitin eftir því um hvaða bíl er að ræða. Því meira slit, því verri blöndun. Annað vandmál er það magn af harðnaðri steypu sem sest hefur innan í tromluna með tímanum, en steypustöðvar eru stundum að brjóta allt að 1 m<sup>3</sup> af gamalli harðnaðri steypu í reglubundnu viðhaldi (meðal steypubíllinn er að taka 8 m<sup>3</sup> af ferskri steypu þegar hann er smekkfullur). Þessi steypa sýgur vökva úr blöndunni og hefur áhrif á gæðin og vinnanleika. Þriðja málið er áhrif magns steypu í tromlu á blöndunarvirgni þess (þ.e. tengsl rúmmetra fjölda steypu í steypubíl við hrærslu hennar), en þessi tiltekni málaflokkur er umræddur í Kafla 3 fyrir neðan.

Slitlag ýmissa eldri brúa út um land er komið á tíma og þegar ákveðið verður að ráðast í aðgerðir er nauðsynlegt að hafa tiltækar slitlagslausnir úr eins nærtækum námum og kostur er ásamt blöndunaraðferð með steypubíl, sem uppfyllir þær kröfur sem rannsóknin leiðir í ljós.

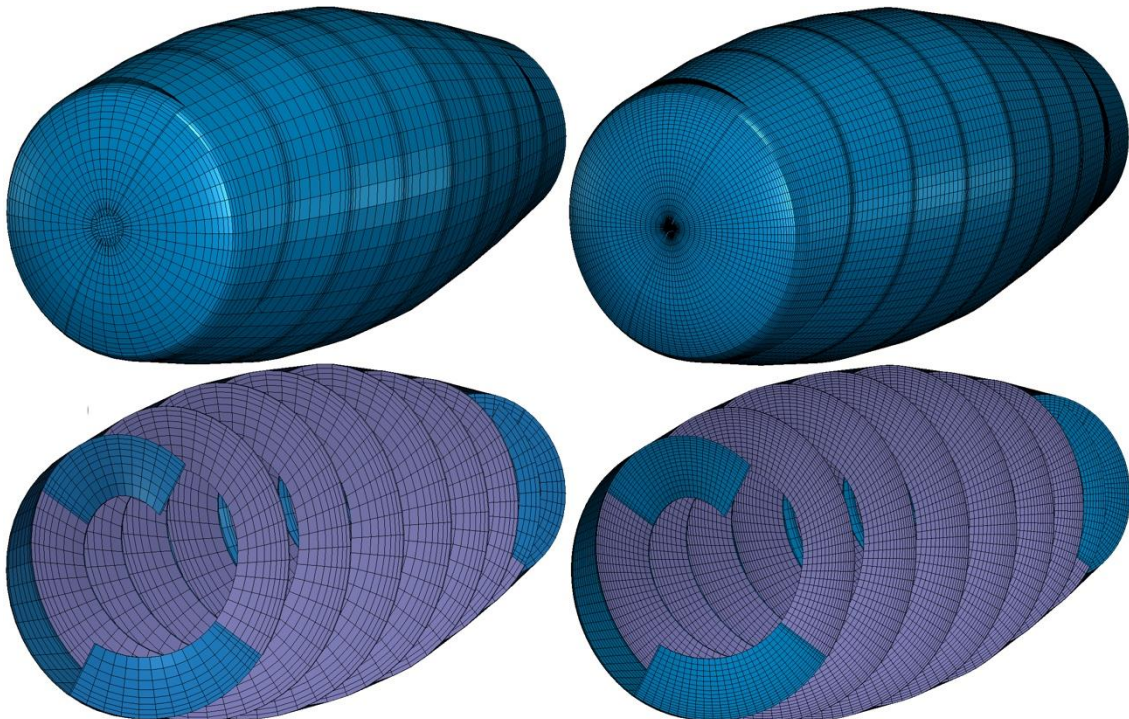
### 3. Blöndunarvirkni í steypubíl

Blöndun hágæða steypu með lága vatns/sements tölu í steypubíl er vandasamt verkefni því blöndunin er svo kölluð frjálst - fallandi (e. *free fall mixing*). Hinsvegar er blöndun í steypustöð gerð með þvingunarblandara (e. *forced mixing*). Með frjálst - fallandi blöndun getur blöndunarvirknin orðið mun minni en æskilegt er (þ.e. slæm hrærsla), nokkuð sem getur t.d. leitt til óeinsletrar blöndu. En í því felst að meirihluti sementsefjunnar hefur ekki náð að blandast nægilega vel við grófa hluta fylliefnanna svo að efjan safnast ásamt trefjunum í sementsbolta (sements- og trefjaköggla). Slík óeinsleitni getur rýrt gæði harðnaðrar steypu til muna, þannig að styrkurinn verði takmarkaður, sem getur aftur leitt aukinnar rýrnunar með tilheyrandi sprungumyndun og síðan aftur til aukinnar ryðmyndunar í járnabindingu o.s.frv.

Til að átta sig betur á blöndunarvirkni í steypubíl voru gerðar tilraunir í reikniheimi með hjálp reiknilegrar straumfræði (e. *computational fluid dynamics* – CFD). Tilraununum og niðurstöðum þeirra er lýst hér á eftir.

#### 3.1 Uppsetning reiknilegra möskvaneta

Við upphaf reiknilegs verkefnis þarf að möskva upp kerfið sem á að rannsaka, þ.e. tromlu steypubílsins í þessu tilfalli. Eins og sýnt er á Mynd 2, voru gerð tvö líkön af sömu tromlu, annarsvegar með um 60.000 sellur (til vinstri) og hinsvegar um 400.000 sellur (til hægri). Mestur hluti útreikninganna var gerður með fyrra líkaninu (60.000 sellur), en hið seinna var notað til að rannsaka svo kallað „*mesh independence analysis*“ og tengist það athugun á nákvæmni og gæði reikninganna.



Mynd 2: Möskvun steyputromlu með 58.888 sellur (vinstri) og með 372.568 sellur (til hægri).



### 3.2 Reiknivél og reiknilíkan

Allir reikningar verkefnisins hafa verið framkvæmdar á ofurtölvunni Garðari sem staðsett er við Háskóla Íslands, í setrinu „*Icelandic High Performance Computing*“ – IHPC (ihpc.is). Sjá má þessa ofurtölvu á Mynd 3 hér á eftir. Garðar var áður hluti af 4 ára norrænu samstarfsverkefni (Ísland, Danmörk, Noregur og Svíþjóð), þá kallað fyrir *Nordic High Performance Computing* – NHPC, en tölvan var ánöfnuð Háskóla Íslands að því loknu (þann 30. des 2015).



*Mynd 3: Ofurtölvurnar Garðar og Garpur við Háskóla Íslands. Til vinstri sést ytra byrði tölvuklasans (ásamt einum greinarhöfunda – Jón Elvar W.) og til hægri er mynd innan úr tölvuklasanum. (Garðar samanstendur af CentOS Linux á HP BladeCenter klasa).*

Notast var eingöngu við líkanið OpenFOAM við reikninga þessa verkefnis (sjá openfoam.org og openfoam.com), en þetta forrit er í eigu ESI (esi-group.com). Steinsteypudeild Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands hefur sett upp tvær útgáfur af þessu líkani á Garðari (Mynd 3). Það sem er sérstakt við OpenFOAM er að það er með svo kallað GPL leyfi (GNU General Public License), nokkuð sem gerir kleift að fá aðgang að forritskóðanum og breyta honum eftir þörfum og vild. Þetta er nokkuð sem var afar nauðsynlegt í þessu verkefni. (*Þess ber að geta að Garðar var lagður niður haustið 2017. Í staðinn var Garpur stækkaður.*)

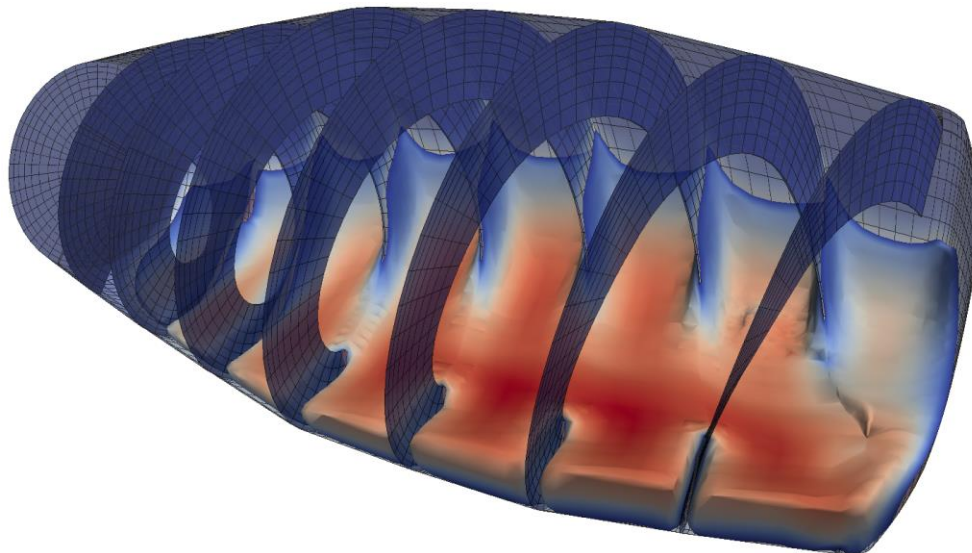
Til verkefnisins fengust um 150.000 reikniklukkutímar (e. *CPU hours*) á Garðari og voru reikningarnir framkvæmdir um haustið 2015 (undir merkjum NHPC – nhpc.hi.is) og vorið 2016 (undir merkjum IHPC – ihpc.is).

### 3.3 Uppsetning reikninga

Reiknitilfellin voru um 160 talsins þar sem áhrif mismunandi seigju, mismikils magns af steypu (í steyputromlunni) og mismikils snúningshraða voru rannsökuð. Nánar tiltekið voru eftirfarandi breytur athugaðar:

- Snúningshraði tromlu  $f = 0.03, 0.07, 0.11, 0.15, 0.19$  og  $0.23$  rps
- Magn steypu  $V = 2.6 \text{ m}^3, 5.4 \text{ m}^3$  og  $8.2 \text{ m}^3$
- Flotskerspenna  $\tau_0 = 0, 150$  og  $300 \text{ Pa}$
- Plastískur seigjustuðull  $\mu = 25, 75$  og  $125 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Mynd 4 sýnir dæmi um flæði steinsteypu ( $2.6 \text{ m}^3$ ) inni í steyputromlu og er niðurstaðan fengin frá reikningum ofurtölvunnar Garðari við HÍ. Flotskerspenna  $\tau_0$  er  $0 \text{ Pa}$  og plastískur seigjustuðull  $\mu$  er  $25 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .



Mynd 4: Flæði steypu inni í steyputromlu – reikningar framkvæmdir í Garðari (steypuflæðið fer vaxandi með litarbreytingum frá bláu yfir í rautt).

### 3.4 Fræðilegur bakgrunnur

#### 3.4.1 Aðgreining á lofti og steypu

Til þess að geta reiknað flæði steypu í tromlu, þá er mikilvægt að geta skipt tromlunni milli yfirborðs loft og ferskrar steypu. Þetta er gert með svo kölluðu frjálsu jaðarlagi. Tölulegum aðferðum sem ráða við slíkt má skipta í tvær grunnaðferðir, eftir því hvaða möskvunartegund er notuð [1]; þetta er annars vegar möskvanet sem getur hreyfst (e. *Lagrangian mesh*) og hinsvegar möskvanet sem er almennt óbreytt/kyrrt (e. *Eulerian mesh*). Þó svo að fyrri möskvanetið geri mögulegt að reikna með skörpum skilum á milli lofts og steypu, þá kemur upp stórt vandamál tengt þeirri aðferð, þegar steypuyfirborðið verður fyrir verulegri bjögun [2]. Af þessari ástæðu er seinni aðferðin oftast notuð (þ.e. *Eulerian mesh*). Dæmi um reiknaðferðir sem byggjast á slíku neti eru *volume-of-fluid* [3], *level set* [1,4] og *marker & cell* [4]. Í þessu

verkefni er volume-of-fluid (VOF) aðferðin notuð og þar af leiðandi miðast neðangreind umfjöllun við hana.

Í hverri reiknisellu er mismikið magn af steypu. Þessu er lýst með breytunni  $\alpha_1$ . Það er, breytan er reiknuð sem  $\alpha_1 = V_c/V_{\text{cell}}$  þar sem  $V_{\text{cell}}$  er rúmmál reiknisellunnar og  $V_c$  er rúmmál steypu í þeirri sellu. Þegar  $\alpha_1 = 1$ , þá er reiknisellan full af steypu og þegar  $\alpha_1 = 0$ , þá er sellan full af lofti. Þar sem steypuyfirborðið er (þ.e. á skilunum milli steypu og lofts) gildir  $0 < \alpha_1 < 1$ .

Eðlisþyngd í hverri sellu er reiknuð samkvæmt Jöfnu (1), sjá að neðan. Í þessari jöfnu er  $\rho_1$  eðlisþyngd steypunnar en  $\rho_2$  er eðlisþyngd lofts [5,6]. Breytistærðin  $\alpha_1$  er hlutfallslegt magn steypu í sellu en  $\alpha_2$  er hlutfallslegt magn lofts í sellu.

$$\rho = \rho_1\alpha_1 + \rho_2\alpha_2 \quad (1)$$

Með svipuðum hætti, þá er gildi seigjunnar í hverri sellu gefin með Jöfnu (2) [5,6].

$$\eta = \eta_1\alpha_1 + \eta_2\alpha_2 \quad (2)$$

Í hverri reiknisellu gildir ávallt eftirfarandi  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ . Þetta þýðir að ef gildi  $\alpha_1$  er þekkt, þá gildir hið sjálfkrafa um  $\alpha_2$  út frá  $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$ . Þetta þýðir að það er nóg að reikna út gildið á  $\alpha_1$ . Reikningurinn á  $\alpha_1$  er gert með svo kallaðri jaðar-flutnings-jöfnu (e. *phase transport equation*). Miðað við þessa jöfnu, þá eru skilin milli steypu og lofts fluttur til eða færður í kyrru möskvaneti. Miðað við flutningsjöfnuna, þá má skipta VOF aðferðinni í tvær mismunandi undiraðferðir (eða í tvær mismunandi fjölskyldur), nefnilega svo kallaðar *beinar aðferðir* (e. *direct methods*) annars vegar og *endurbyggðar aðferðir* hins vegar (e. *reconstruction methods*) [5]. Dæmi um hinar síðarnefndu er PLIC [7] og SLIC [8].

Þar sem *bein aðferð* (e. *direct methods*) er bæði reiknilega hagkvæmari og nothæf við marghyrningamöskvanet (e. *polyhedra mesh*), þá er hún notuð hér. Dæmi um slíkar aðferðir eru CICSAM [9,10,11], HRIC [9,12] og aðferð Wellers (e. *Weller-scheme*) [13,14]. Hin síðastnefnda er notuð í þessari vinnu og er því betur útskýrð hér á eftir.

Flutningsjafnan fyrir hvert gildi á  $\alpha_1$  og  $\alpha_2$  í tveggja vökva kerfi er lýst með eftirfarandi jöfnu þar sem  $i = 1,2$ :

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \mathbf{U}_i) = 0 \quad (3)$$

Athuga ber að ofangreind jafna gildir fyrir óþjappanleg efni (e. *incompressible fluid*). Þar eð  $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$  er nóg að leysa einvörðungu fyrir  $\alpha_1$ . Með  $i = 1$ , verður ofangreind jafna þess vegna svona:

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \mathbf{U}_1) = 0 \quad (4)$$

Til þess að leysa Jöfnu (4) þarf að vita hraðann  $\mathbf{U}_1$  sem steypan  $\alpha_1$  er á. Í upphaflegri fræði um VOF eftir Hirt og Nichols [3], þá er til einföldunar gert ráð fyrir að  $\mathbf{U}_1$  sé jafn blönduðum hraða

$\mathbf{U} = \alpha_1 \mathbf{U}_1 + \alpha_2 \mathbf{U}_2$  [5]. Þetta gildir hinsvegar aðeins ef  $\alpha_1$  tekur gildi sem tröppufall í öllu lausnarkerfinu [5]. Það er að segja, strangt tiltekið gildir þessi nálgun ekki. Hinsvegar, með blöndunarhraðanum  $\mathbf{U} = \alpha_1 \mathbf{U}_1 + \alpha_2 \mathbf{U}_2 = \alpha_1 \mathbf{U}_1 + (1 - \alpha_1) \mathbf{U}_2$  og mismunarhraðanum milli steypu og lofts  $\mathbf{U}_r = \mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_2$ , þá er hægt að breyta  $\mathbf{U}_1$  yfir í  $\mathbf{U}$  [13,14]. Það er, með því að leggja saman  $\alpha_1 \mathbf{U} = (\alpha_1)^2 \mathbf{U}_1 + \alpha_1(1 - \alpha_1) \mathbf{U}_2$  og  $\alpha_1(1 - \alpha_1) \mathbf{U}_r = \alpha_1(1 - \alpha_1) (\mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_2)$ . Með þessu er hægt að sýna fram á að  $\alpha_1 \mathbf{U}_1 = \alpha_1 \mathbf{U} + \mathbf{U}_r \alpha_1(1 - \alpha_1)$  [5], og breytist þá Jafna (4) yfir í Jöfnu (5):

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\mathbf{U}_r \alpha_1 (1 - \alpha_1)) = 0 \quad (5)$$

Breytistærðin  $\mathbf{U}_r$  er hraðavigurinn sem sér um að þjappa skilin á milli lofts og steypu saman og gera yfirborð steypunnar þannig skarpara í reiknilegum skilningi [14]. Í Jöfnu (5), með liðnum  $\alpha_1(1 - \alpha_1)$  er hraðavigurinn  $\mathbf{U}_r$  aðeins virkur við yfirborð steypunnar, þ.e. þar sem gildir að  $0 < \alpha_1 < 1$ .

Eitt mikilvægt atriði varðandi Jöfnu (5) er númerísk brytjun aðstreymishlutans  $\nabla \cdot (\alpha_1 \mathbf{U})$ . Síður nákvæm aðferð eins og fyrsta stigs aðstreymisaðferð (e. *first order upwind method*) gerir skilin milli lofts og steypu ógreinilegan með tölulegri dreifingu (e. *numerical diffusion*) á meðan aðferðir með meiri nákvæmni (til dæmis það sem er kallað „*second order upwind method*“) eru óstöðugar, nokkuð sem leiðir til myndunar tölulegrar sveiflna á þessum sömu skilum [4]. Þess vegna þarf að beita sérstakri aðstreymistækni sem getur hjálpað til við að viðhalda skörpum skilum og myndað jafnari dreifingu á  $\alpha_1$  í steypuhlutanum og á  $(1 - \alpha_1)$  í lofthluta kerfisins [4]. Til þess að gera þetta er svo kölluð *Flux Corrected Transport* tækni (FCT) notuð. Þetta er aðferð sem var þróuð af Boris og Book [15] og seinna betrubætt af Zalesak [16]. FCT fallið sem er virkt í OpenFOAM pakkanum er kallað MULES (e. *Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*), og er uppsetning þess svipuð og eins og sú sem var sett upp af Zalesak [17].

Hægt er að líta á FCT sem samþjöppunar- og diffuraðferð og sem hefur sem slík verið notuð beint á Jöfnu (4), með  $\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}$  [4]. Með FCT (sem er sett upp í MULES) og með þeirri sérstöku þjöppunaraðferð sem Jafna (5) endurspeglar, er í raun beitt tvöfaldri þjöppunaraðferð á skilin milli steypu og lofts. Í þessari vinnu er FCT notuð á báða aðstreymishlutana í Jöfnu (5).

### 3.4.2 Hreyfijafnan

Sementsbundin efni flokkast undir ólínulega vökva (e. *non-Newtonian fluids*) og hreyfingu þeirra má lýsa með Cauchy jöfnunni, Jöfnu (6) [18,19]. Þar sem Navier–Stokes jafnan er leidd út frá Cauchy jöfnunni, þá gildir Jafna (6) einnig fyrir línulegan vökva (e. *Newtonian fluids*) eins og loft.

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) + \mathbf{F}_{\text{cor}} + \mathbf{F}_{\text{cen}} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_s \quad (6)$$

Þar sem VOF samanstendur af einu þrýstingskerfi (e. *single pressure system*) [2], þá er þrýstingurinn  $p$  í Jöfnu (6) reiknaður sem ein heild, bæði fyrir steypu,  $\alpha_1$  og loft,  $\alpha_2$ . Það er, hin sama breytistærð  $p$  gildir bæði fyrir steypu og loft (en fær auðvitað mismunandi tölugildi háð því hvort staðsetningarvigurinn  $\mathbf{x}$  er í steypu eða í lofti). Hið sama gildir fyrir hraðavigurinn  $\mathbf{U}$ ,

sem strangt tiltekið er jafn  $\alpha_1 \mathbf{U}_1 + \alpha_2 \mathbf{U}_2$ . Það er að segja,  $\mathbf{U}$  er reiknaður sem eitt auðkenni í Jöfnu (6). Auk þessa er þrýstingnum  $p$  skipt út með breyttum þrýstingi (e. *modified pressure*), gefinn með  $p^* = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$  [14], þar sem  $\mathbf{x}$  er vigur fyrir staðsetningu vökvaagna (e. *fluid particle*). Hagræðið af því að nota breyttan þrýsting  $p^*$  í stað venjulegs er vel útskýrt í [2,5,14].

Eðlisþyngdin  $\rho$  í Jöfnu (6) er reiknuð samkvæmt Jöfnu (1). Gildið  $t$  er tíminn og  $\mathbf{g}$  er þyngdarhröðunarvigurinn. Vigurinn  $\mathbf{F}_s$  er kraftur sem lýsir yfirborðsspennu milli steypu og lofts og er reiknaður samkvæmt CSF aðferðinni (e. *Continuum-Surface-Force*), þróaðri af Brackbill et al. [20]. Finna má góðan kynningartexta um CSF í [10] sem ekki þarf að endurtaka hér.

Vigrarnir  $\mathbf{F}_{\text{cor}}$  og  $\mathbf{F}_{\text{cen}}$  verða útskýrðir í Kafla 3.4.4 en spennutensorinn  $\mathbf{T}$  sem einnig kemur fyrir í Jöfnu (6) er útskýrður í Kafla 3.4.3.

Auk Jöfnu (6) er samfellujafnan fyrir ósamþjappanlegan vökva (e. *incompressible fluid*)  $\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$  er notuð til að mynda þrýstingsjöfnuna (e. *pressure equation*), en hún er notuð til að reikna út þrýstinginn  $p^* = p^*(x, y, z, t)$  sem fall af staðsetningu og tíma [5,21].

### 3.4.3 Flotskerspenna og plastískur seigjustuðull

Spennutensorinn  $\mathbf{T}$  sem er notaður hér er það sem er kallað GNM (e. *Generalized Newtonian Model*) [22] og er gefinn með [23]

$$\mathbf{T} = 2 \eta \dot{\boldsymbol{\epsilon}} \quad (7)$$

Stærðin  $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}$  er svo kallaður bjögunarhraða-tensor (e. *rate of deformation tensor*) og er reiknaður sem  $(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)/2$  [18,19]. Seigjan  $\eta$  í ofangreindri jöfnu er reiknuð samkvæmt Jöfnu (2), þar sem steypunni (sem er táknuð með breytistærðinni  $\alpha_1$ ) er lýst sem Bingham vökva,  $\eta_1 = \mu + \tau_0/\dot{\gamma}$ , á meðan loftinu (þ.e.  $\alpha_2$ ) er lýst sem Newtonskum vökva,  $\eta_2 = \text{fasti}$ . Stærðin  $\tau_0$  er flotskerspennan,  $\mu$  er plastískur seigjustuðull og  $\dot{\gamma}$  er skerhraði sem er lýst í Kafla 3.5. Hvað steypuna snertir er  $\eta_1$  forritað með svokallaðri *samræmingaraðferð* (e. *regularization approach*) [24,25,26,27,28,29,30].

### 3.4.4 Flæði í snúningskerfi tromlu

Tromlan í steypubíl snýst með snúningshraðanum  $\boldsymbol{\omega}$  frá 0 til 1.46 rad/s (það er,  $f = |\boldsymbol{\omega}|/2\pi$  tekur gildi milli 0 og 0.23 rps). Þessi snúningshraði er settur inn í reiknilíkanið í gegnum svo kallaða SRF aðferð (e. *single reference frame approach*) [31]. Þetta þýðir að möskvanetið í Mynd 2 er kyrrstætt en þyngdarhröðunin  $\mathbf{g}$  er látin hverfast um möskvanetið með snúningshraðanum  $\boldsymbol{\omega}$ . Með öðrum orðum, í staðinn fyrir tromlu sem snýst í þyngdarsviði kyrrstæðrar Jarðar, þá er tromlan kyrrstæð meðan Jörðin snýst í kringum tromluna. Með því að nota þessa vel þekktu aðferð, þá er tromlan ekki lengur tregðukerfi (e. *non-inertial reference frame*) og þar af leiðandi þarf að bæta við krafti Coriolis  $\mathbf{F}_{\text{cor}} = 2 \rho \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U}$  og miðflóttakraftinum  $\mathbf{F}_{\text{cen}} = \rho \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x})$  inn í Jöfnu (6) [32]. Að undanskildum vigrinum  $\boldsymbol{\omega}$ , þá eru allar breytistærðir tilgreindar í snúningskerfi tromlunnar (sem er s.k. „ekki-tregðukerfi“ eða „non-inertial reference frame“

eins og nefnd að ofan). Þess ber að geta að jöfnur sem lýsa breytingu á skalagildi (þ.e. ekki vigurgildi) eins og til dæmis Jafna (5) gerir, eru óbreyttar á milli tregðukerfa (e. inertial reference frame) og ekki-tregðukerfa. Sama gildir um öll skalagildi [32]. Hinsvegar gildir slíkt ekki fyrir hraðavigurinn  $\mathbf{U}$ . Breytingin milli hinna tveggja kerfa er  $\mathbf{U}_{in} = \mathbf{U} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}$  þar sem  $\mathbf{U}_{in}$  er hraðavigurinn í tregðukerfi [32].

### 3.4.5 Jaðarskilyrði

Neðangreind jaðarskilyrði eru notuð samhliða reikningum út frá Jöfnum (5) og (6), ásamt þrýstingsjöfnunni (e. *pressure equation*) sem nefnd er í lok Kafla 3.4.2.

Fyrir hraðavigurinn  $\mathbf{U}$  (þ.e. fyrir Jöfnu (6)) er svokallað Dirichlet jaðarskilyrði notað fyrir alla tromluna, sem þýðir að  $\mathbf{U}|_j = 0$  ( $j$  stendur fyrir jaðar). Þetta skilyrði er valið vegna hrjúfleika hennar að innanverðu, þ.e. slits. Einnig er þetta skilyrði valið vegna gamallar steypu sem er oft föst á innanverðu yfirborði tromlunnar eins og sýnt er á Mynd 7.

Fyrir  $\alpha_1$  (þ.e. fyrir Jöfnu (5)) er svo kallað Neumann jaðarskilyrði notað. Því er lýst með  $\partial\alpha_1/\partial\mathbf{n}|_j = \mathbf{n} \cdot \nabla\alpha_1|_j = 0$ . Þetta þýðir að yfirborðsspennan er ekki látin hafa áhrif á steypuflæðið, nokkuð sem er eðlileg forsenda í svona stóru kerfi. Fyrir þrýstinginn  $p^*$  (þ.e. fyrir þrýstingsjöfnuna), þá er jaðarskilyrðið sett sem  $\partial p^*/\partial\mathbf{n}|_j = 0$ .

### 3.4.6 Lausnaraðferð

Til að framkvæma þá reikninga sem hér eru gerðir, var sérhannaður leysir (e. *solver*) forritaður á Nýsköpunarmiðstöð Íslands. Þessi leysir er kallaður **interDrumFoam** og byggir á staðlaða forritinu **interFoam**. Fyrir **interDrumFoam** eru Jöfnur (5) og (6) svo og samfellujafnan (þ.e. þrýstingsjafnan) leystar saman til að finna staðsetningu steypunnar  $\alpha_1$ , hraðavigurinn  $\mathbf{U}$  og þrýstinginn  $p^*$  inni í tromlunni. Það er að segja, lausnin er gerð með samtvinnun af SIMPLE [33] og PISO [33] aðferðinni (saman eru þetta nefnd PIMPLE), með samhliða notkun á svo kallaðri breyttri Rhie–Chow brúun fyrir reiknisellur sem hafa allar breytistærðir í miðju sinni [21]. Fyrir **interDrumFoam**, þá samanstendur PIMPLE af eftirfarandi aðgerðum

1. Uppsetning á Jöfnu (5) og hún leyst
2. Uppsetning á Jöfnu (6) með slaka (e. *relaxation*)
3. Jafna (6) leyst (skref sem val)
4. Straumflæði reiknað á jaðri hvernar sellu  $\varphi = \mathbf{S} \cdot \mathbf{U}$ 
  - a. Vigurinn  $\mathbf{S}$  er yfirborðsvektor á hverri sellu [34]
5. Leysa þrýstingsjöfnuna fyrir  $p^*$
6. Leiðréttu yfirborðsflæðið  $\varphi$  þannig að samfellujafnan sé örugglega uppfyllt
7. Beita slökun (e. *under relaxation*) á þrýstinginn  $p^*$
8. Leiðréttu hraðavigurinn  $\mathbf{U}$  út frá nýju gildi á  $p^*$
9. Uppfæra jaðarskilyrðin
10. Endurtaka ofangreind skref þar til samleitni fæst (e. *convergence*)
11. Fara yfir á næsta tímaskref



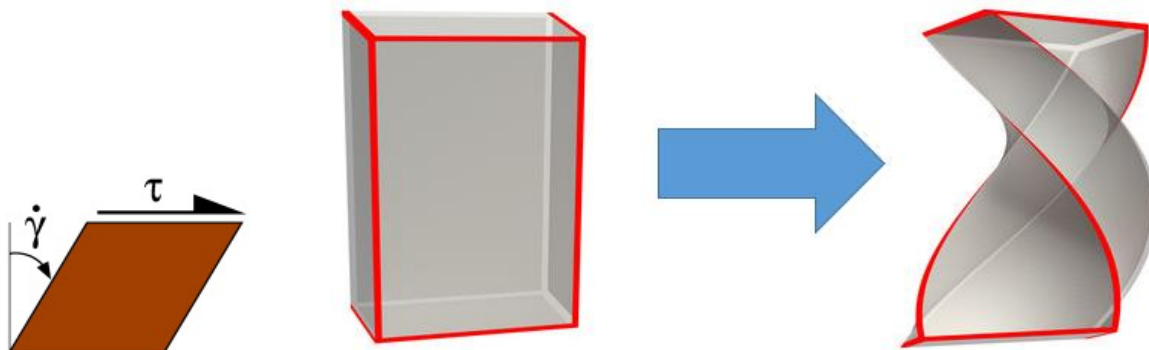
### 3.5 Skerhraði og blöndunarvirkni

Niðurstöður reikningana eru sýndar með tillit til skerhraða (*e. shear rate*). Eins og sýnt er á Mynd 5, þá lýsir skerhraði bjögunarhraða steypunnar. Það er að segja, skerhraðinn lýsir í raun þeim hraða sem verið er að vinda upp á steypuna með (eins og vinda blautt viskustykki) inn í tromlunni. En slíkur vindingur er afar mikilvægur við aflfræðilega blöndun steypunnar þar sem þetta ferli veldur tilfærslu/blöndun milli fylliefna, sements, vatns og svo framvegis. Þar að leiðandi lýsir skerhraðinn þeirri aflfræðilegu blöndunarvirkni sem steypan verður fyrir í tromlunni. Vegna þess að skerhraðinn er mjög óeinsleitur inni í steypunni og er einnig mjög tímaháð fyrirbæri, þá eru áhrif hans ekki eins einföld eins og sýnt er á vinstri hlið Myndar 5. Með mismiklum og tímaháðum skerhraða  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(x, y, z, t)$ , þá eru þrívíð áhrif skerhraða meiri, eins og sýnt er til hægri. Táknið  $\tau$  í Mynd 5 stendur fyrir skerspennu og í þessu tilfalli myndast hún vegna áhrifa þyngdarhröðunar  $\mathbf{g}$  út frá snúningi tromlunnar  $f$ .

Skerhraðinn er reiknaður út frá eftirfarandi jöfnu [35]:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\dot{\boldsymbol{\epsilon}} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}} \quad (8)$$

Eins og þegar hefur verið nefnt er  $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}$  bjögunarhraða-tensorinn. Jafna (8) er samþykkt í fræðiheimi og má sjá nákvæma réttlættingu hennar í [35].



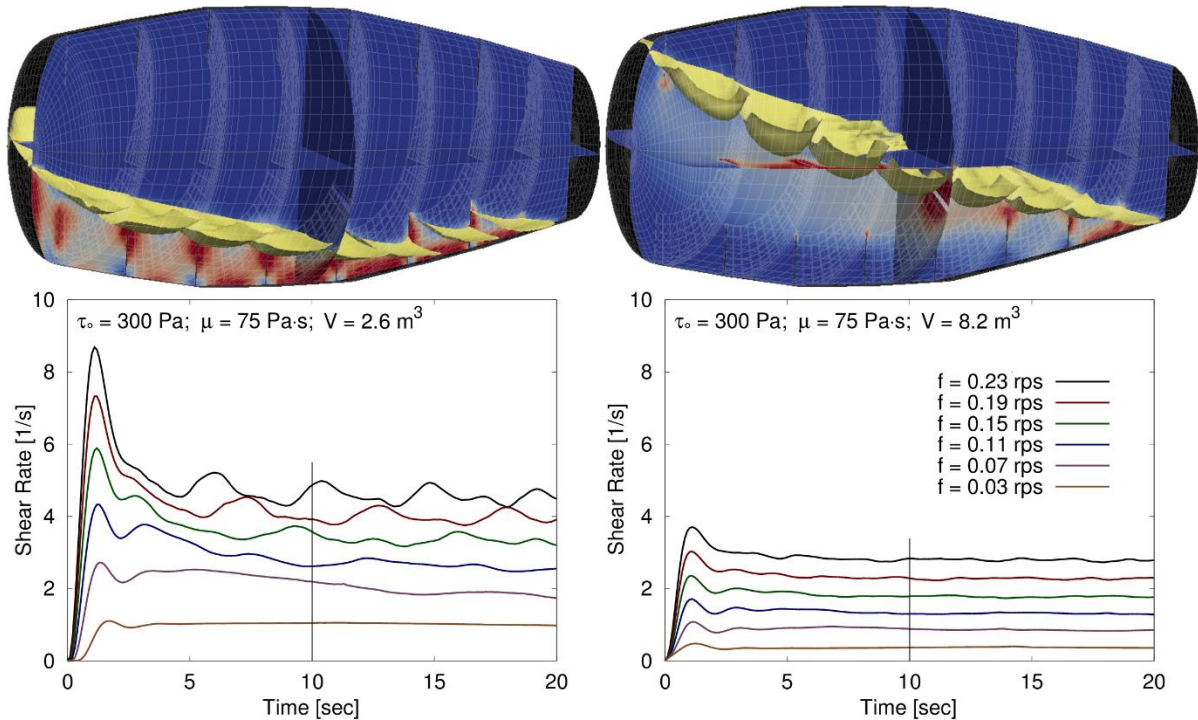
Mynd 5: Til vinstri: Tvívíð og einsleit lýsing á skerhraða,  $\dot{\gamma} = \text{fasti}$ . Miðja og til hægri: Þrívíð og óeinsleit (þ.e. almenn) rúmfræðileg lýsing á skerhraða,  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(x, y, z, t)$ .

Eins og nefnt hefur verið að framan er skerhraðinn  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(x, y, z, t)$  mjög óeinsleitur inni í steypunni og er einnig mjög tímaháð fyrirbæri. Til þess að geta gert kerfisbundinn samanburð mismunandi reiknilifella (sjá Kafla 3.3), er mikilvægt að ganga út frá meðalskerhraða, sem fæst úr Jöfnu (9).

$$\bar{\dot{\gamma}}(t) = \frac{1}{V} \iiint_V \dot{\gamma}(x, y, z, t) dx dy dz \quad (9)$$

Efri hlutar Myndar 6 sýnir hversu óeinsleitur skerhraðinn er í þversniði steypunnar í tromlu fyrir tvö tilfelli, annarsvegar fyrir steypumagn sem er  $V = 2.6 \text{ m}^3$  (til vinstri) og hinsvegar  $8.2 \text{ m}^3$  (til hægri). Guli liturinn sýnir yfirborð steypunnar en litrófið frá bláu að rauðu sýnir skerhraða,  $\dot{\gamma}$  frá 0 til  $5 \text{ s}^{-1}$  (blái liturinn táknar  $0 \text{ s}^{-1}$  en rauði liturinn táknar skerhraða um og yfir  $5 \text{ s}^{-1}$ ). Af þessum myndum er nokkuð augljóst að skerhraðinn inni í steypunni (í tromlunni) er

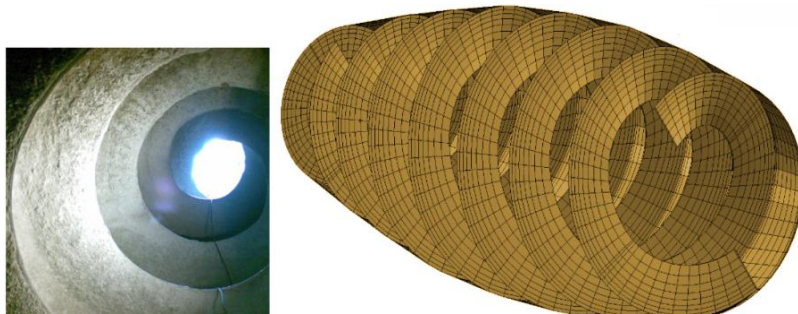
mjög óeinsleitt fyrirbæri nokkuð sem gerir Jöfnu (9) afar nauðsynlega til að fá vel skilgreind tölugildi fyrir greiningu og samanburð.



Mynd 6: Meðaltal skerhraða samkvæmt Jöfnu (9) sýndur sem fall af tíma,  $t$ .

Á Mynd 6 eru einnig sýnd reiknuð gildi á meðalskerhraða samkvæmt Jöfnu (9) sem fall af tíma,  $t$ . Eins og áður þá gildir myndin til vinstri fyrir steypumagn sem er  $V = 2.6 \text{ m}^3$  og myndin til hægri fyrir steypumagn sem er  $8.2 \text{ m}^3$ . Þessi gildi eru reiknuð fyrir mismunandi snúningshraða á tromlunni,  $f = 0.03, 0.07, 0.11, 0.15, 0.19$  og  $0.23 \text{ rps}$  ( $\text{rps} = \text{revolutions per seconds}$ ), sjá nánar í Kafla 3.3.

Niðurstaðan í Mynd 6 gildir fyrir þau (reiknilega erfiðari) tilfelli, þegar flotskerspennan er  $\tau_0 = 300 \text{ Pa}$  og plastíski seigjustuðullinn er  $\mu = 75 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Í reikningunum er eðlisþyngd steypunnar settur  $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$  og gildir það fyrir öll reikniritfelli.



Mynd 7: Inni í steyputromlunni eru tvö sveigð-snúin tromlublöð sem víxlverka við steypuna til að ýta undir og hjálpa við blöndun hennar.

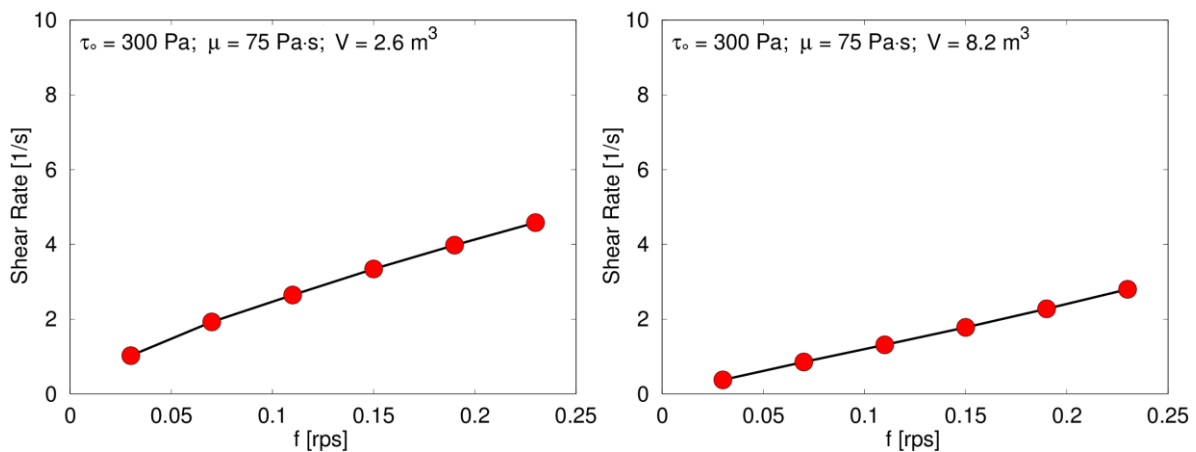
Fyrir Mynd 6 gildir að í byrjun reikninga er steypa kyrr (þ.e. hraðavigurinn er  $\mathbf{U} = [0,0,0] \text{ m/s}$ ) og þar af leiðandi er skerhraðinn  $\dot{\gamma}$  núll (þ.e. engin hreyfing þýðir enginn skerhraði). Þegar



tromlan byrjar að snúast gengur skerhraðinn í vissum bylgjum (Mynd 6) vegna víxlverkunar steypunnar við tromlublöðin eins og sýnt er á Mynd 7. Þetta bylgjuferli breytist með breytingum á flotskerspennu  $\tau_0$ , seigjustuðli  $\mu$ , magni steypu í tromlunni,  $V$  og tromluhraða,  $f$ . Eins og sjá má á Mynd 6 minnka þessar bylgjuhreyfingar eftir um 10 s, þannig að með því að heilda Jöfnu (9) eins og sýnt er með Jöfnu (10), þá eru þessar byrjunarbylgjur ekki teknar með í reikninginn. Þetta er eðlilegt þar sem snúningshraði er yfirleitt fasti við blöndunina.

$$\dot{\gamma}_t = \frac{1}{(20s - 10s)} \int_{10s}^{20s} \dot{\gamma}(t) dt \quad (10)$$

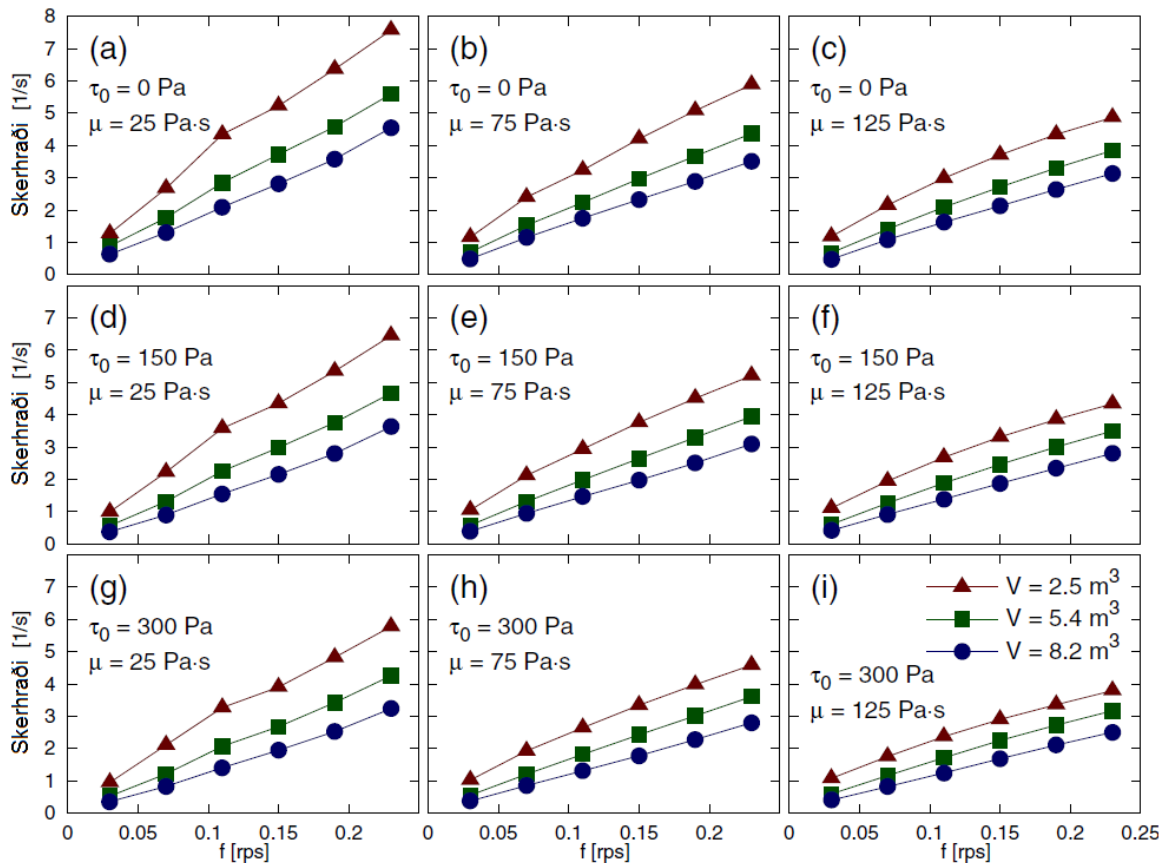
Eins og fram kemur í Jöfnu (10), þá er aðeins seinni hluti ferlana í Mynd 6 nýttur. Heildið byrjar á  $t = 10$  s eins og sýnt er með lóðréttu línunni í Mynd 6. Útkoma Jöfnu (10) sem hliðstæðu við Mynd 6, má sjá á Mynd 8.



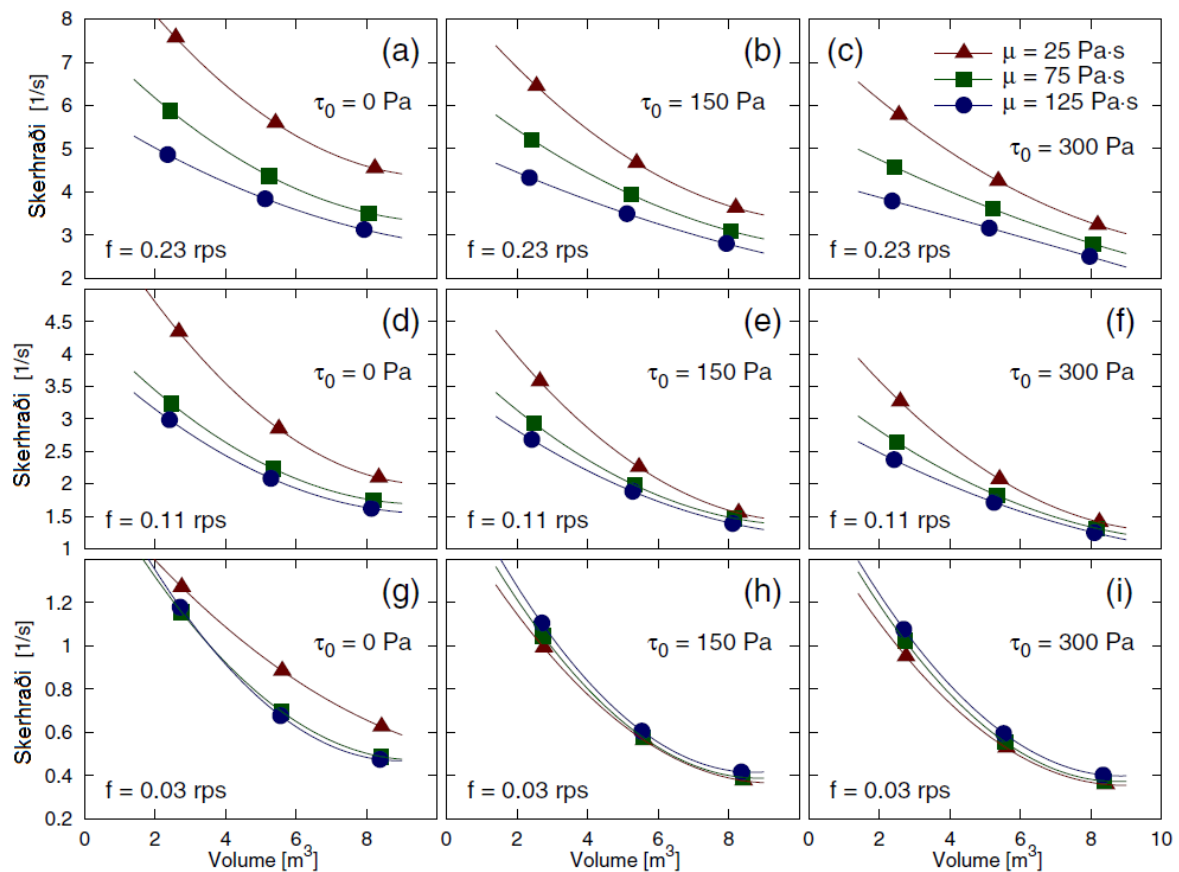
Mynd 8: Tímameðaltal á skerhraða samkvæmt Jöfnu (10) sem fall af tromluhraða  $f$ .

Eins og þegar hefur verið nefnt, þá byrjar heildið í Jöfnu (10) við 10 s, í stað 0 s, til að hrærslan hafi náð jafnvægisástandi. Þetta jafnvægisástand svarar þá til gildis sem steypan nær fljótlega við fastan snúningshraða tromlunnar. Þar sem allar niðurstöður er gefnar með tilliti til Jöfnu (10), þá er rúmmáls- og tímaheildið af skerhraða (þ.e. Jafna (10)) einfaldlega nefnt „skerhraði“ héðan í frá.

Mynd 9 sýnir mynd af skerhraða samkvæmt Jöfnu (10) sem fall af snúningshraða tromlu,  $f$ . Þessar niðurstöður gilda fyrir mismunandi flotskerspennu  $\tau_0$  og plastískan seigjustuðli  $\mu$ . Í hverri mynd frá (a) til (i) eru þrjár niðurstöður sem gilda fyrir mismunandi magn af steypu  $V$ , nefnilega  $2.6 \text{ m}^3$ ,  $5.4 \text{ m}^3$  og  $8.2 \text{ m}^3$ . Í heildina, þá sýnir Mynd 9 að skerhraðinn (eða blöndunarvirknin) eykst með auknum snúningshraða og þetta er nokkuð sem er viðbúið. Hinsvegar, eins og sést á Myndum 9a, 9d og 9g, þarf þessi aukning ekki að vera línuleg. Það er að segja, við snúningshraðann  $f = 0.1$  rps er smá sveigja sem minnkar við aukið steypumagn  $V$  og með hækkandi plastískum seigjustuðli  $\mu$ .



Mynd 9: Skerhraði samkvæmt Jöfnu (10) sem fall af snúningshraða tromlu,  $f$ .



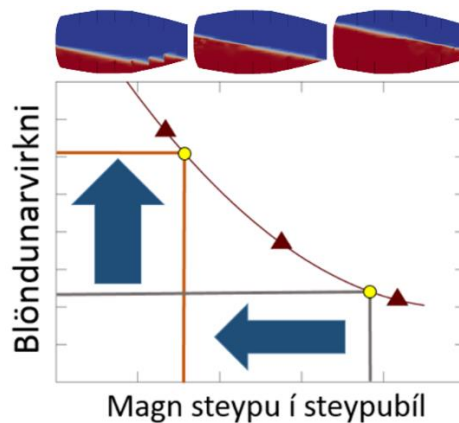
Mynd 10: Skerhraði samkvæmt Jöfnu (10) sem fall af magni steypu í tromlu,  $V$ .

Mynd 10 sýnir skerhraða samkvæmt Jöfnu (10) sem fall af magni steypu í tromlu  $V$ . Gildin sem eru sýnd á þessari mynd eru þau sömu og sýnd eru á Mynd 9 fyrir tilfellið  $f = 0.23$  rps (Mynd 10a–c),  $f = 0.11$  rps (Mynd 10d–f) og  $f = 0.03$  rps (Mynd 10g–i).

### 3.6 Niðurstaða

Af Mynd 10 er nokkuð ljóst að skerhraðinn, og þar að leiðandi blöndunarvirknin, minnkar mjög hratt sem fall af steypumagni í tromlu. Með öðrum orðum, fyrir blöndun á hágæðasteypu í steypubíl, þar sem mikil blöndunarvirkni þarf að vera til staðar, þá verður greinilega að takmarka magn steypunnar.

Til að hámarka blöndunarvirkni er greinilegt af Mynd 10 að best er að halda sig við kringum 3 rúmmetra af steypu og ekki fara mikið yfir það magn. Ef magnið er aukið fram yfir það, mun blöndunarvirknin minnka hratt. Ef blöndunarvirknin er lítil mun útkoman verða óeinsleit og skemmd steypa. Þessari niðurstöðu má lýsa með yfirlitsmynd, Mynd 11.



Mynd 11: Áhrif steypumagns í tromlu á blöndunarvirkni.

## 4. Framkvæmd verkefnisins með steypubíl

Verklegar tilraunir Vegagerðarinnar og Steinsteypudeildar Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands (Steinsteypa – Efnisfræði) hafa verið gerðar í þremur áföngum:

- Fyrsta tilraun var gerð 30. desember 2014 (Kafli 4.1)
- Önnur tilraun var gerð 3. mars 2015 (Kafli 4.2)
- Þriðja tilraun var gerð 3. febrúar 2016 (Kafli 4.3)

Steypubílar sem notaðir voru í verkefninu rúmuðu 8 til 9 rúmmetra af steypu. Í samræmi við niðurstöðuna í Kafli 3, var ákveðið að blanda aðeins 3 rúmmetra í einu.

Tafla 1 sýnir samsetningu blöndunnar sem var notuð í þessu verkefni. Hún er svo til eins og sú sem hefur verið notuð sem slitlag á Borgarfjarðarbrú. Fylliefnið er Harðikambur og er blandað úr þrem stærðaflokkum, þ.e. 0 – 8 mm (51%), 8 – 16 mm (35%) og 16 – 22 mm (14%). Eitt af hönnunarskilyrðunum er að steypan sé mjög frostheldin og loftlaus til að auka þéttleika hennar (þ.e. engu loftblendi er bætt í blöndurnar og dæmigert loftinnihald er hennar um 2%). Vatnsbindiefnahlutfallið er 0.26. Í Köflum 4.1 og 4.3 er sementið Aalborg Rapid Cement, en í Kafli 4.2 er Norcem Anleggsement notað. Að öðru leyti eru blöndurnar svo til eins. Þess ber að geta að fyrrgreinda sementið er það sem hefur verið notað í slitlag Borgarfjarðarbrúar.

Tafla 1: Samsetning steypublöndu þessa verkefnis.

Efni	Þyngd [kg]
Sement	545
Kísilryk	44
Vatn	155
Fylliefni (Harðikambur)	1830
Chryso Premia 196	5.5
Omnicon SPC-25	3.5
Dramix (stál trefjar)	25
Strux 85/50 (plast trefjar)	1.5

### 4.1 Fyrsta tilraun - 30 desember 2014

Eins og ofangreindur titill gefur til kynna þá var fyrsta tilraunin gerð milli jóla og nýárs árið 2014. Tilgangurinn var fyrst fremst að sjá hvort þessi blöndunaraðferð (þ.e. að blanda í steypubíl) væri yfir höfuð möguleg. Minni áhersla var lögð á afkastagetu og blöndunartíma, þ.e. að blöndun væri keyrð á afmörkuðum tíma.

#### 4.1.1 Mælitæki

Í þessari tilraun voru notaðar 3 mæliaðferðir. Fyrstu tvö tækin eru ConTec Viscometer 5 (sjá Mynd 12) og ConTec Rheometer-4SCC (sjá Mynd 13). Þriðja tækið er sigmáls- og sigmálsflæði (sjá ASTM C 143 og/eða EN 12350-2).



Mynd 12: Seigjumælirinn ConTec Viscometer 5.

ConTec Viscometer 5 er sérstakur seigjumælir sem er hannaður og byggður á Íslandi. Þetta mælitæki samanstendur af fötu (eða mælihláti) og innri sívalningi sem gengur inn í mælihlátið meðan mæling stendur yfir. Fyrir mælingu er mælihlátið fyllt með steypu og komið fyrir í seigjumælinum með innri sívalning fyrir ofan (sjá Mynd 12). Síðan er innri sívalningurinn (sem mælir kraftvægi) látin sökkva ofan í steypuna. Mælihlátið er látið snúast á mismunandi hraða sem fall af tíma. Kraftvægi innri sívalnings er mælt samtímis. Með því að skoða graf af kraftvægi sem fall af snúningshraða er hægt að reikna út flotskerspennuna  $\tau_0$  og plastískan seigjustuðul  $\mu$  út frá svo kallaðri Reiner-Riwlin jöfnu [39] (sjá einnig [27,28] um notkun).

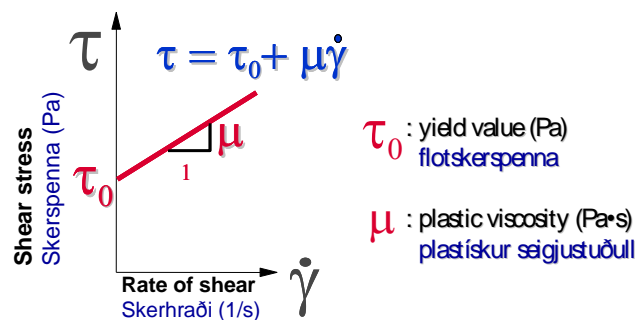


Mynd 13: Mælitækið ConTec Rheometer-4SCC (til vinstri) og Tattersall vispan (til hægri).

Hægt er að líta á ConTec Rheometer-4SCC (Mynd 13), sem ferðaútgáfu af ConTec Viscometer 5. Aðalmismunur þessara tveggja tækja er að ConTec Viscometer 5 getur gefið mæliniðurstöður í eðlisfræðilegum grunnstærðum. Þessar grunnstærðir eru flotskerspenna,  $\tau_0$  [Pa] (e. *yield value* eða *yield stress* skv. British Standard BS 5168:1975 „*Glossary of rheological terms*“) og plastískur seigjustuðull,  $\mu$  [Pa·s] (e. *plastic viscosity*) efnisins (sjá einnig Kafla 3.4.3). Eins og

sýnt er á Mynd 14 er flotskerspenna skerstyrkur steypunnar í byrjun hreyfingar en plastíski seigjustuðullinn segir til um mótstöðu gegn auknum skerhraða í efninu.

Helstu hlutar Rheometer-4SCC (sjá Mynd 13) eru stýrieining (lítur út eins og ferðataska), steypuúlát (fata) og mótör (sést lengst til vinstri) með vispu. Við allar mælingar eru notuð svo kölluð Tattersall vispa (Mynd 13, lengst til hægri). Eins og nefnt er að ofan, þá mælir Rheometer-4SCC (Mynd 13) ekki seigju í sömu einingum og ConTec Viscometer 5 (Mynd 12). Það er að segja, niðurstöður fyrrgreinda tækisins er svo kölluð  $G$  og  $H$  gildi. Þó svo að þessi tvö tæki mæli ekki seigju í sömu einingum, þá eru sterk tengsl á milli  $G$  [A] og flotskerspennu  $\tau_0$  [Pa]. Einnig eru sterk tengsl á milli  $H$  [A·s] og plastísks seigjustuðuls,  $\mu$  [Pa·s].



Mynd 14: Skissa sem skýrir hugtökin plastískur seigjustuðull og flotskerspenna.

Athuga ber að  $H$  gildið er einnig nefnt „ $H$ -Viscosity“ og  $G$  gildið „ $G$ -yield“. Í þessari skýrslu verður notast við hugtökin „ $G$  gildi“ og „ $H$  gildi“.

#### 4.1.2 Mæliniðurstöður

Blandan sem var notuð við tilraunina er dæmigerð Borgarfjarðarbrúar blanda, sem er hágæðasteypa með lága vatnssementstölu. Notaðir voru um 14 pokar af fylliefnum og sementi, og var blandað í steypubíl frá BM Vallá. Almennt séð tókst blöndunin vel. Tafla 2 sýnir mæliniðurstöðurnar frá þessari fyrstu tilraun. Eins og þegar hefur verið nefnt, var magn steypu í steypubílnum haft um þrjú rúmmetrar til þess að hámarka blöndunarvirknina. Þetta er samkvæmt niðurstöðunni í Kafla 3.6. Steypublönduninni lauk rétt um klukkan þrjú, og var fyrsta mæling gerð stuttu eftir það, eða 15:14. Mælt var sem fall af tíma, meðal annars til að fylgjast með þróun þjálnistaps (e. *workability loss*). Mælingunum var fram haldið í kringum 40 mínútur. Þá hafði flotskerspennan  $\tau_0$ , ríflega þrefaldast (úr 49 Pa í 175 Pa) en á sama tímabili var plastískur seigjustuðull svo til óbreyttur í kringum  $\mu \approx 150$  Pa·s. Ennfremur var sigmálsflæðið komið niður í 550 mm.

Út af háum plastískum seigjustuðli,  $\mu \approx 150$  Pa·s var steypan fremur óþjál. Til að laga þetta var bætt vatni í steypubílinn (þ.e. í tromluna) og má sjá áhrif þess klukkan 16:39 í Töflu 2. Seigjustuðullinn lækkar í  $\mu = 108$  Pa·s sem gerði steypuna aðeins meðfærilegri. Einnig minnkar flotskerspennan  $\tau_0$  með auknu vatni og lækkaði í 81 Pa.



Tafla 2: Mæliniðurstöður fyrstu tilraunar (30 desember 2014).

Tími	$\tau_0$ [Pa]	$\mu$ [Pa·s]	G [A]	H [A·s]	SF [mm]	S [mm]
1514	49	149	0.87	9.9		
1521	91	142	0.94	10.3		
1524	89	148	0.97	10.0	615	260
1541	116	159	0.95	9.9		
1548	138	158	0.40	12.4	635	240
1552	175	151	0.34	14.1		
1553			0.33	11.3		
1605					550	240
1639	81	108	0.11	10.2		
1642	92	111	0.28	9.3	595	255
1646	68	116	0.40	8.5		

Mynd 15 sýnir mynd af fyrsta sigmálsflæði steypunnar eftir að lokið var við að blanda hana í steypubíl (u.þ.b. klukkan þrjú). Eins og myndin sýnir er hún nokkuð einsleit að sjá. Það sem varð hinsvegar áhyggjuefni við þessa tilraun, og varð nokkuð augljóst, er hversu langan tíma það tók að blanda steypuna í steypubíl. Samanlagt var blöndunartíminn orðinn rúm klukkustund þegar hér var komið sögu og má þetta rekja til að hér voru menn að fikra sig áfram. Til dæmis hvernig best væri að nota lyftarann til að lyfta upp pokunum með steypuefnunum til að losa þá (sjá Mynd 16 í næsta kafla), og hvernig heppilegast væri að opna eða skera pokana til að losa þá í steypubílinn og svo framvegis.



Mynd 15: Mynd af sigmálsflæði af steypunnar eftir blöndun í steypubíl.

#### 4.2 Önnur tilraun – 3. mars 2015

Í næstu tilraun var einnig blandað í steypubíl frá BM Vallá, en þó ekki í sama bíl og í fyrstu tilraun (Kafli 4.1). Í blönduna var notað Norskt Anleggsement ásamt fylliefni frá Harðakambi. Gert var forpróf í rannsóknastofu til þess að finna heppilegt magn vatns og þjálniefna (e. *superplasticizer*) í fyrirhugaðri truckasteypu og var byggt á þeirri niðurstöðu varðandi líklegt magn sömu efna í truckaprófinu. Í steypuframléiðsluna voru notaðir 15 pokar með fylliefnum með kornastærð 0 – 8 mm, 8 – 16 mm og 16 – 24 mm sem og sementi.

Fyrsti sekkur var blandaður (0 – 8 mm) klukkan 11:25. Síðasti sekkur (16 – 24 mm) var kominn í bíl klukkan 12:04 (39 mínútna blöndunartími). Blandað var á miðlungs hraða fram til 11:55, síðan var steyputromlan sett á hámarks snúningshraða. Magn steypu í steyputromlu var um þrjár rúmmetrar, í samræmi við niðurstöðu í Kafla 3.6. Áður en sandur var settur í tromlu, var bæði

vatn og floti dælt í, en fyrir bæði tilfalli var þó haldið eftir 18% af áætluðu magni. Tímaskráning fyrir áfangana í blöndun og losun er sýnd í Töflu 3.

Tafla 3: Tímatafla fyrir blöndun og losun í annarri tilraun (3. mars 2015).

Tími	Aðgerð
0 mín 28 sek	0 - 8 mm
2 mín og 40 sek	8 - 16 mm
5 mín og 17 sek	0 - 8 mm
7 mín 28 sek	16 - 24 mm
13 mín og 9 sek	sement
16 mín og 10 sek	sement
18 mín og 47 sek	sement
21 mín og 9 sek	sement
23 mín og 2 sek	8 - 16 mm
27 mín og 27 sek	sement
29 mín og 28 sek	16 - 24 mm
30 mín og 9 sek	flot
31 mín og 12 sek	flot
32 mín og 28 sek	16 - 24 mm
34 mín og 57 sek	8 - 24 mm
36 mín og 45 sek	16 - 24 mm
41 mín og 50 sek	losun 1
50 mín og 30 sek	losun 2
52 mín og 10 sek	losun 3
58 mín og 51 sek	sement
66 mín og 48 sek	losun 4
80 mín og 12 sek	vatn 30 lítrar
85 mín og 49 sek	losun 5
87 mín og 10 sek	losun 6

Við losun 1 (41 mín og 50 sek í Töflu 3), kom í ljós að blandan var ekki nægilega vel hrærð, þ.e. á yfirborðinu var of mikið af sýnilegum steinum. Blandan var þá hrærð meira og losað aftur í hjólbörur þegar liðnar voru 50 mínútur og 30 sekúndur frá upphafspunkti (losun 2). Þá var blandan orðin vel hrærð en helst til mikið fljótandi (losun 3), þ.e., ef sigmál eða sigmálsflæði hefði verið mælt hefðu fengist há gildi. Til þess að þykkja blönduna var fyrst bætt við sementi á tímanum 58 mínútum og 51 sekúndu og losað aftur (losun 4) í hjólbörur á tímanum 66 mínútum og 48 sekúndum frá upphafi (sjá Töflu 3).

Tafla 4: Mæling eftir losun 4 (66 mín og 48 sek).

Tími	$\tau_0$ [Pa]	$\mu$ [Pa·s]	G [A]	H [A·s]
1301	271	50	1.06	3.03
1305			1.30	3.30
1308	303	58	1.10	4.21
1312	292	61		
Meðalg.	289	56	1.15	3.51

Við þessa losun (losun 4) voru flotfræðieiginleikarnir mældir, sbr. Kafla 4.1.1, og nánari niðurstöður má sjá í Töflu 4. En í aðalatriðum eru meðalgildin eftirfarandi:  $G = 1.15$  A og  $H =$



3.51 A·s (Mynd 13),  $\tau_0 = 289$  Pa og  $\mu = 56$  Pa·s (Mynd 12). Sigmál var 210 mm og sigmálsflæði 360 mm.

Við skoðun á blönduninni, kom í ljós að viðbætt sement (á tíma 58 mín og 51 sek) hafði ekki hrærst nógu vel saman við blönduna. Einnig var blandan orðin allt of stíf eins og flotfræðimælingarnar sýndu. Þó svo að seigjan hafi verið lág eða  $H = 3.51$  A·s (dæmigert gildi á Borgafjarðarbrúarsteypu er  $H = 7$  A·s), þá var  $G = 1.15$  A (dæmigert gildi á Borgafjarðarbrúarsteypu er  $G = 0.6$  A). Þetta háa  $G$  gildi endurspegladist einnig í of lágu sigmáli.

Tafla 5: Mæling eftir losun 5 (85 mín og 49 sek).

Tími	$\tau_0$ [Pa]	$\mu$ [Pa·s]	G [A]	H [A·s]
1334	188	24	0.61	1.19
1337	199	27	0.74	1.33
1341	212	28	0.86	1.37
Meðalg.	200	26	0.74	1.30

Til að minnka stífleika steypunnar, var bætt við vatni (sjá „80 mín og 12 sek“ í Töflu 3) og losað aftur í hjólbörur eftir 85 mínútur og 49 sekúndur frá upphafi (þ.e. losun 5 í Töflu 3). Við þessa losun voru flotfræðieiginleikarnir mældir og niðurstöðurnar má sjá í Töflu 5. En í aðalatriðum eru meðalgildin eftirfarandi:  $G = 0.74$  A og  $H = 1.30$  A·s fyrir Rheometer-4SCC og  $\tau_0 = 200$  Pa og  $\mu = 26$  Pa·s fyrir ConTec Viscometer 5.



Mynd 16: Blöndun í steypubíl (til vinstri) og losun 6 í ker (til hægri).

Þegar hér var komið í sögu hafði *G* breytistærðin (þ.e. flotskerspennan) náð réttu gildi. Hinsvegar var *H* gildið (plastísk seigja) orðið nokkuð lítið, miðað við venjuleg gildi á Borgarfjarðarbrúarsteypu. Samt var steypan samhangandi, vel útlítandi, lítill eða enginn aðskilnaður sjáanlegur eða óeinsleitni, og voru því allir sæmilega sáttir við hana. Hafa ber í huga að hér var um að ræða aðra frumraun við blöndun hágæðasteypu í steypubíl. Að lokum var losað (losun 6) í kar eftir 87 mínútur og 10 sekúndur frá upphafi og má sjá það ferli hægra megin á Mynd 16.

### 4.3 Þriðja tilraun – 3. febrúar 2016

Niðurstöðurnar úr annarri tilraun (Kafli 4.2) sýndu að unnt er að búa til góða blöndu í steypubíl. En einnig kom í ljós að þróa þurfti aðferðina betur, sérstaklega til að stytta blöndunartímann í steypubílnum (og þar með losunartímann). Þetta er vegna þess að hver steypubíll þarf að geta farið út á brú á u.þ.b. 25 mínútna fresti. Til að stytta blöndunartímann var þokum fækkað úr 15 í 8 stærri poka. Þá reyndist ekki hægt að notast við lyftarann (Mynd 16), heldur varð að nota krana (Mynd 17). Einnig var tromla steypubílsins látin snúast á sem mestum hraða á meðan blöndun stóð til að stytta blöndunartímann.

Í fyrstu og annarri tilraun (Kafli 4.1 og 4.2) var maður látinn standa upp á grind steypubíls við hlið trektar ofan í tromluna, til þess að skera á poka og stýra þannig losun þeirra (þetta fyrirkomulag sést ógreinilega vinstra megin á Mynd 16). Þar sem hvert brúarverkefni samanstendur af u.þ.b. 12 steypubílahrærum, þá er slíkt fyrirkomulag talið óhæft. Ákveðið var að bæta aðstöðu þeirra sem skera á pokana með því að reisa vinnupall fyrir þá, sjá Mynd 17 hægra megin svo og Mynd 18.



Mynd 17: Til þess að geta fækkað í þokum frá 15 niður í 8, var ákveðið að notast við krana.



Mynd 18: Fyrirkomulag vinnupalls aftan við steypubíl.

Eins og áður segir, var pokunum fækkað úr 15 í 8 stórsekkir til að stytta blöndunartímann. Þessir stórsekkir skiptast í:

- Þrjú sandpoka, 0 – 8 mm
- Tvo sementspoka
- Tvo malarpoka, 8 – 16 mm
- Einn malarpoka, 16 – 22 mm

Niður úr stórsekkjunum sem fylliefnin voru sekkjuð í, kom það sem kalla má trekt, sem er lokað með því að binda fyrir hana. Til að opna pokann var nægilegt að skera á bandið, þá opnaðist trektin og efnið féll niður úr sekknum. Þessi gerð sekkja reyndist einkar hentug, en þeir fást m.a. hjá Saltkaupum í Hafnarfirði.

Ástæðan fyrir stærðafloknum 16 – 22 mm í steypunni, er að hann stuðlar að auknu slitþoli. Vafasamt var talið að leggja upp með stærðarflokkinn 0 – 8 mm og 8 – 22 mm, því magn fylliefnis á stærðabilinu 16 – 22 mm kann þá að reynast mjög breytilegt milli stórsekkja þegar mikil framleiðsla á steypu á sér stað (þ.e. t.d. 12 bílar). Flokkun efnisins í 0 – 8 mm og 8 – 16 mm ætti á hinn bóginn að tryggja þökkalegan stöðugleika í kornakúrfu.

Stál- og plastrefjar höfðu verið vigtaðar og skipt á nokkra malarpoka (þ.e. sett í ofangreinda stórsekkir með fylliefni). Íblöndunarefni voru einnig tilbúin vigtuð upp í plastfötur. Í þetta sinn var notaður mjög nákvæmur vatnsmælir með stafrænu mæliúri til þess að mæla vatnsmagnið í tromlu (keypt í Fálkanum). Þessi mælir var tengdur við sverari vatnslögn sem hafði verið notaður í Kafla 4.1 og 4.2. Þessi nýi vatnsmælir var prófaður deginum áður með dælingu í fiskiker og vigtun þess. Þetta var gert til að meta nákvæmni mælisins.

Tafla 6: Blöndun og losun í þriðju tilraun (3. febrúar 2016).

Poki	Innihald	Losun hefst	Losun líkur	Athugasemdir
[No.]		[mín:sek]	[mín:sek]	
1	0 - 8 mm	00:00	00:55	Vatni dælt í með slöngu jafnóðum (80% af heild)
2	8 - 16 mm	01:16	01:46	
3	0 - 8 mm	02:09	02:40	
4	16 - 22 mm	03:05	03:43	
5	Sement	04:06	08:10	Sementssekkur stíflaði trekt í ca 2 og 1/2 mínútu
6	0 - 8 mm	08:40	09:20	Flot sett í á eftir
7	Sement	09:50	11:17	
8	8 - 16 mm	12:00	12:36	
		13:30		Floti bætt í
		16:30		Floti bætt í
		20:00		Fyrsta sýni losað í hjólbörur og mælt (losun 1)
		22:30		30 l af vatni bætt í bíl (þ.e. 10 l/m <sup>3</sup> )
		25:30		Sýni losað í hjólbörur (losun 2)
		40:30		Sýni losað í hjólbörur (losun 3)

Í Töflu 6 má sjá í hvaða röð pokarnir voru settir í tromlu steypubílsins ásamt tímasetningu. Þessi röð var ákveðin út frá fyrri mælingum á sömu steypu tegund í tilraunastofu Nýsköpunarmiðstöð Íslands. Þar var meðal annars rannsökuð íblöndunarefnaþörf sements og einnig þjálmitap.

Nokkur vandamál tengdust losun sements í steypubílinn. Innra byrðið á sementssekkjunum var klætt plasti, sem vildi fylgja sementinu niður í bílinn, nokkuð sem var erfitt að koma í veg fyrir. Sementið þyrklaðist auk þess í allar áttir og framan í þá sem stóðu upp á pallinum við losun (sjá Mynd 18).

Tafla 7: Niðurstaða þriðju tilraunar (3 febrúar 2016).

Losun	Tími [mín:sek]	$\tau_0$ [Pa]	$\mu$ [Pa·s]	G [A]	H [A·s]	SF [mm]	S [mm]
1 (20:00)	00:00	240	243	0.13	13.9	478	245
	-	-	-	0.17	14.2		
	08:00	294	217	0.08	15.0		
2 (25:30)	00:00	227	138	1.02	9.3	355	215
	02:00	259	127	0.80	9.3		
	04:00	283	129	0.72	8.3		
3 (40:30)	00:00	696	184	2.22	7.3		
	05:00	710	161	2.32	5.9		
	09:00	-	-	1.77	8.7		
	18:00	753	145	1.90	8.7		
	22:00	965	107	2.12	8.4		
	33:00	927	128	2.67	7.7		80
	40:00	952	117	2.64	7.4		

Í Töflu 7 má sjá niðurstöður flotfræðimælinganna sem voru gerðar. Fyrsta sýnið sem tekið var úr bílnum leit mjög vel út, en plastísk seigja var nokkuð mikil eða  $H = 13.9$  A·s. Flotskerspennan var í minna lagi eða  $G = 0.13$  A. Eins var sigmálið frekar hátt eða um 245 mm. Til að minnka  $H$  gildið var 30 lítrum af vatni bætt við, sem þá lækkað niður í  $H = 9.3$  A·s.

Við lok mælingar í „losun 2“, (sjá „2 (25:30)“ á 04:00 í Töflu 7), voru  $G$  og  $H$  gildin orðin mjög góð, þ.e. eins og dæmigerð gildi í steypu slitlagi fyrir Borgarfjarðarbrú.

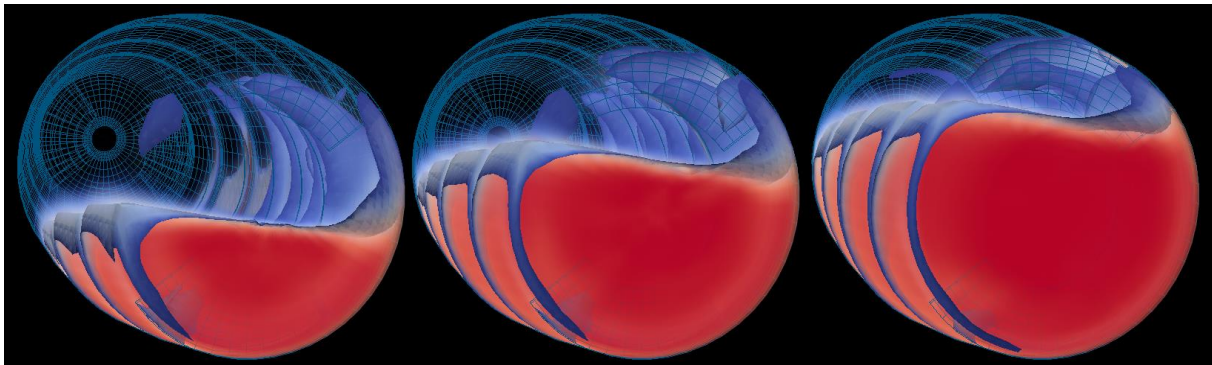
Í „losun 3“ í Töflu 7, var steypa orðin um það bil 40 mínútna gömul (sjá „3 (40:30)“ á 00:00), og þá voru gerðar mælingar í 40 mínútur til viðbótar til að athuga þjálmitap. Í þessu tilfalli hélst  $H$  gildið nokkuð stöðugt sem fall af tíma, hinsvegar jókst  $G$  gildið nokkuð og var komið í 2.64 A, eða  $\tau_0 = 952$  Pa undir lokin. Fyrir öll tilfelli í „losun 3“, er  $G$  gildið orðið of hátt.



## 5. Yfirlit niðurstaðna og lokaorð

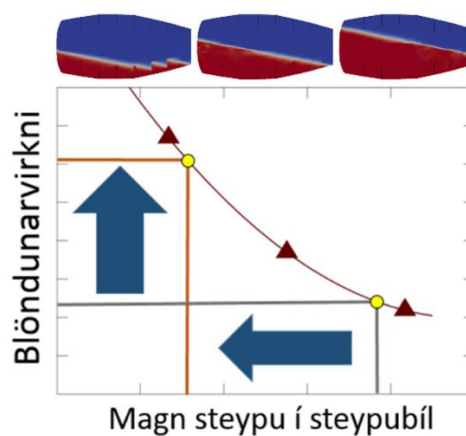
### 5.1 Blöndunarvirkni sem fall magni steypu í steypubíl

Blöndunarvirkni er mjög mikilvægt atriði sem þarf að hafa í huga þegar steypa er blönduð í steypubíl. Slæm hrærsla (þ.e. lítil blöndunarvirkni) leiðir t.d. til misleitrar blöndu. En í því felst að meirihluti sementsefjunnar nær ekki að blandast nægilega vel við grófari hluta fylliefnanna en verður þess í stað að sementsboltum (sements- og trefjaköggjum). Slík misleitni getur rýrt gæði harðnaðrar steypu til muna, svo að burðargetan verður takmörkuð, rýrnun eykst með tilheyrandi sprungumyndun sem aftur getur leitt til aukinnar ryðmyndunar í járnabindingu svo eitthvað sé nefnt.



Mynd 19: Prófað magn steypu í tromlu er  $2.6 \text{ m}^3$ ,  $5.4 \text{ m}^3$  og  $8.2 \text{ m}^3$  (sjá Kafla 3).

Mynd 19 sýnir það magn steypu í tromlu steypubíls sem reiknað var með í Kafla 3. Aðal niðurstaðan er að blöndunarvirkni (þ.e. hrærslugeta) er töluvert háð magni steypu í tromlu (þ.e. rúmmáli blöndunnar). Þetta má sjá í grófum dráttum á Mynd 20. Eins og örvarnar sýna eykst blöndunarvirknin til muna með minnkandi magni af steypu í tromlunni. Nákvæmlega hversu mikið er háð snúningshraða, flotskerspennu og plastískum seigjustuðli. Þetta samhengi má sjá á Mynd 10 í Kafla 3. En í aðalatriðum er niðurstaðan sú að ef tryggja á góða hrærslu þarf að takmarka magn steypu í tromlu, sérstaklega ef verið er að blanda hágæðasteypu með lítið vatnsinnihald (t.d. slitsterkra brúarsteypu). A.m.k. þarf að fíkra sig hægt upp á við, ef reyna á að hræra stærri blöndur í einu.



Mynd 20: Áhrif steypumagns í tromlu á blöndunarvirkni [36,37].

## 5.2 Blöndun slitsterkrar brúarsteypu í steypubíl

Markmið þessa verkefnis er að þróa aðferð til að blanda hágæðasteypu í steypubíl. Í Kafla 3 var lýst tengslum blöndunarvirgni við magn steypu í steypubíl. Þar var sýnt fram á að best væri að blanda (u.þ.b.) 3 rúmmetra af steypu í einu (sjá Kafla 5.1). Kafla 4 lýsir verklegum tilraunum gerðar voru á Nýsköpunarmiðstöð Íslands. Markmið fyrstu tilraunar í Kafla 4.1, var að fá úr því skorið hvort það væri yfir höfuð hægt að blanda hágæðasteypu í steypubíl (í þessu tilfelli steypu með mjög lága vatnssementstölu og trefjum). Í Kafla 4.2 er lýsing á frekari þróun þessarar blöndunaraðferðar. Í Kafla 4.3 er aðferðinni lýst eins og ætlast er til að henni verði beitt á verkstað.

Í Kafla 4.3, voru allir þættir tilraunarinnar mjög vel undirbúnir. Flutningur og hífing gekk vel og hratt fyrir sig, að undanteknum smá vandkvæðum vegna fyrri sementspokans. Ekki var talið raunhæft (eða þjóna tilgangi) að auka hraðann á mötun efnanna í bílinn umfram það sem gert var í þessum kafla, því blandan þarf ákveðinn tíma til þess að hrærast nægjanlega í honum, þ.e. bíllinn sjálfur er flöskuhálsinn. En sýnt hefur verið fram á, að unnt er að blanda hágæða brúarsteypu í steypubíl með nægilegum afköstum og án nokkurra vandkvæða, ef vel er staðið að öllum undirbúningi. Í slíku verkefni er hinsvegar nauðsynlegt er að nota seigjumæli til að stýra vatnsmagni.

Ofangreind aðferð hefur nú verið notuð við steypuframleiðslu í slitlag á Blöndubrú (við Blönduós) og má sjá aðstæður á blöndunarstað á Mynd 21. Steypt var 14. september 2016 og síðan aftur 17. janúar 2017.



Mynd 21: Blöndun steypu í steypubíl á Blönduósi (14. september 2016).

Skýrsluhöfundar á Nýsköpunarmiðstöð Íslands vilja þakka samstarfsmönnum sínum hjá Vegagerðinni fyrir samvinnuna í þessum verkefnum, sérstaklega Aroni Bjarnasyni, Gylfa Sigurðssyni, Halli Sigurðssyni, Ingunni Loftsdóttur og síðast en ekki síst brúarvinnuflokki Vegagerðarinnar á Hvammstanga. Að lokum þökkum við Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar fyrir stuðning við þróunarverkefnið en aðkoma hans að þessum verkefnum hefur verið mikilvæg og sýnir nauðsyn þess að hafa öflugan rannsóknarsjóð sem er tilbúin að styrkja rannsóknir á steinsteypu.

## Ritskrá

- [1] D. Gerlach, G. Tomar, G. Biswas, F. Durst, Comparison of volume-of-fluid methods for surface tension-dominant two-phase flows, *Int. J. Heat. Mass. Tran.* 49 (2006) 740–754.
- [2] E. Berberovic, Investigation of Free-Surface Flow Associated With Drop Impact: Numerical Simulations and Theoretical Modeling, Technische Universitat Darmstadt, Darmstadt, 2010. Ph.D. thesis.
- [3] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.* 39 (1) (1981) 201–225.
- [4] V.R. Gopala, B.G.M. van Wachem, Volume of fluid methods for immiscible-fluid and free-surface flows, *Chem. Eng. J.* 141 (2008) 204–221.
- [5] J. Klostermann, K. Schaake, R. Schwarze, Numerical simulation of a single rising bubble by VOF with surface compression, *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 71 (8) (2013) 960–982.
- [6] K. Kissling, J. Springer, H. Jasak, S. Schutz, K. Urban, M. Piesche, A coupled pressure based solution algorithm based on the volume-of-fluid approach for two or more immiscible fluids, in: J.C.F. Pereira, A. Sequeira (Eds.), *Fifth European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD 2010*, Lisbon, Portugal, June 2010.
- [7] D.L. Youngs, An interface tracking method for a 3D Eulerian hydrodynamics code, Technical Report AWRE/44/92/35, Atomic Weapons Research Establishment. 1987.
- [8] W. Noh, P. Woodward, SLIC (simple line interface calculation), in: A.I. van de Vooren, P. Zandbergen (Eds.), *Proceedings of the Fifth International Conference on Fluid Dynamics, Lecture Notes in Physics vol. 59*, Springer-Verlag, Berlin, 1976,
- [9] T. Waclawczyk, T. Koronowicz, Comparison of CICSAM and HRIC high-resolution schemes for interface capturing, *J. Theor. Appl. Mech.* 46 (2) (2008) 325–345.
- [10] O. Ubbink, Numerical Prediction of Two Fluid Systems With Sharp Interfaces, Imperial College of Science, Technol. Med., 1997. Ph.D. thesis.
- [11] O. Ubbink, R.I. Issa, Method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes, *J. Comput. Phys.* 153 (1999) 26–50.
- [12] S. Muzaferija, M. Peric, P. Sames, T. Schelin, A two-fluid Navier-Stokes solver to simulate water entry, *Proc. Twenty-Second Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1998.
- [13] H.G. Weller, Derivation modelling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations, Technical Report TR/HGW/02, Nabla Ltd. 2002.
- [14] H. Rusche, Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions, Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology & Medicine, London, 2002. Ph.D. thesis.
- [15] J.P. Boris, D.L. Book, Flux-corrected transport, I. SHASTA, a fluid transport algorithm that works, *J. Comput. Phys.* 11 (1973) 38–69.
- [16] S.T. Zalesak, Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids, *J. Comput. Phys.* 31 (1979) 335–362.



- [17] S.M. Damian, An Extended Mixture Model for the Simultaneous Treatment of Short and Long Scale Interfaces, Facultad de Ingenieria y Ciencias Hidricas, Universidad Nacional del Litoral, 2013. Ph.D. thesis.
- [18] G.E. Mase, Schaums Outline Series: Theory and Problems of Continuum Mechanics, McGraw-Hill Inc., USA, 1970.
- [19] L.E. Malvern, Introduction to the Mechanics of Continuous Medium, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1969.
- [20] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach, A continuum method for modelling surface tension, *J. Comput. Phys.* 100 (1992) 335–354.
- [21] F.P. Karrholm, Rhie-Chow Interpolation in OpenFOAM, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2006.
- [22] R.I. Tanner, K. Walters, Rheology: An Historical Perspective, Elsevier Science B.V., Netherlands, 1998.
- [23] H.A. Barnes, J.F. Hutton, K. Walters, An Introduction to Rheology, Elsevier Science B.V., Netherlands, 1989.
- [24] M. Bercovier, M. Engelman, A finite element method for incompressible non-Newtonian flows, *J. Comput. Phys.* 36 (1980) 313–326.
- [25] A.J. Taylor, S.D.R. Wilson, Conduit flow of an incompressible, yield-stress fluid, *J. Rheol.* 41 (1) (1997) 93–101.
- [26] G.R. Burgos, A.N. Alexandrou, V. Entov, On the determination of yield surfaces in Herschel-Bulkley fluids, *J. Rheol.* 43 (3) (1999) 463–483.
- [27] J.E. Wallevik, Rheology of Particle Suspensions - Fresh Concrete, Mortar and Cement Paste With Various Types of Lignosulfonates, Department of Structural Engineering The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2003, Ph.D. thesis. <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/236410>
- [28] J.E. Wallevik, Minimizing end-effects in the coaxial cylinders viscometer: viscoplastic flow inside the ConTec BML Viscometer 3, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 155 (2008) 116–123.
- [29] D. Feys, J.E. Wallevik, A. Yahia, K.H. Khayat, O.H. Wallevik, Extension of the Reiner-Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers, *Mater. Struct.* 46 (2013) 289–311.
- [30] J.E. Wallevik, K. Krenzer, J.H. Schwabe, Numerical errors in CFD and DEM modeling, in: N. Roussel, A. Gram (Eds.), *Simulation of Fresh Concrete Flow*, Springer, Netherlands, 2014.
- [31] ANSYS FLUENT 6.3 User's Guide 2006, ANSYS Inc., USA, 2006.
- [32] M.L. Salby, *Fundamentals of Atmospheric Physics*, Academic Press. 1996.
- [33] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*, 2nd Ed. ed., Pearson Education Limited, England, 2007.

- [34] OpenFOAM User Guide, Version 2.3.1, The OpenFOAM Foundation. 2014.
- [35] J.E. Wallevik, Effect of the hydrodynamic pressure on shaft torque for a 4-blades vane rheometer, *Int. J. Heat Fluid Flow* 50 (2014) 95–102.
- [36] J.A. Nelder, R. Mead, A simplex method for function minimization, *Computer. J.* 7 (1965) 308–313.
- [37] Jon E. Wallevik, Olafur H. Wallevik, Analysis of Shear Rate inside a Concrete Truck Mixer, SCC 2016 - 8 th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 15-18 May 2016, Washington DC, USA.
- [38] Jon Elvar Wallevik, Olafur Haralds Wallevik, Analysis of shear rate inside a concrete truck mixer, *Cement and Concrete Research*, 95 (2017), 9-17.
- [39] M. Reiner. *Deformation and Flow; An Elementary Introduction to Theoretical Rheology.* H. K. Lewis & Co. Limited, Great Britain, 1949.



**Nýsköpunarmiðstöð  
Íslands**

Akureyri | Egilsstaðir | Húsavík | Höfn | Ísafjörður | Reykjavík | Sauðárkrúkur | Vestmannaeyjar