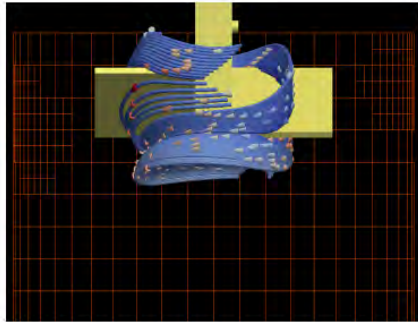


7SR07100

Stöðuleiki og seigjustýring steinsteypu

Dags: 19/03/2012

Þróun á mælitækinu Segrometer-4SCC *-stöðugleikamælingar fyrir ferska steinsteypu*



Dr. Jón E. Wallevik



Efnisyfirlit

1. Inngangur.....	3
2. Aðskilnaður í steypu.....	5
3. Hugmyndafræðin á bakvið Segrometer-4SCC.....	7
3.1 Mælitæki og vispa.....	7
3.2 Flotfræðilegt stöðugleikastig (FSS).....	8
3.3 Steypublöndur og aðskilnaður þeirra.....	11
4. Niðurstöður fyrstu tilrauna.....	13
4.1 Blanda 1: Aukning í SP.....	13
4.2 Blanda 2: Aukning í SP.....	15
4.3 Blanda 1 og 2: Aukning í vatni.....	17
5. Niðurstöður annarra tilrauna.....	19
5.1 Tilraunaruppsetning.....	19
5.2 Nýtt kerfi fyrir AðSkilnaðarEinkunn (ASE).....	21
5.3 Mælingar með Segrometer-4SCC.....	24
5.4 Flotfræðieiginleikar aðskilnaðar-efju: G og H gildi.....	27
5.5 Flotfræðilegt stöðugleikastig FSS reiknað frá G og H gildi.....	28
5.6 Lýsing á FSS korti.....	31
5.7 Niðurstöður FSS sem fall af ASE gildi.....	33
6. Niðurstöður þriðju tilrauna.....	35
6.1 Tilraunaruppsetning.....	35
6.2 AðSkilnaðarEinkunn (ASE).....	37
6.3 Mælingar með Segrometer-4SCC.....	40
7. Niðurstöður fjórðu tilrauna.....	45
7.1 Tilraunaruppsetning.....	46
7.2 AðSkilnaðarEinkunn (ASE).....	48
7.3 Mælingar með Segrometer-4SCC.....	50
8 Greining á hegðun FSS fallsins.....	54
9 Notkun reiknilegs straumfræðis á flæðigreiningu.....	61
10. Niðurstöður og lokaorð.....	65
Heimildaskrá.....	67

1. Inngangur

Sjálífútleggjandi steinsteypa (SÚL steypa) er sérstök tegund af steinsteypu sem ekki þarf að víbra þegar hún er lögð ofan í mót. Þessum eiginleikum er náð með mjög flæðanlegri efju með lágrí flotskerspennu en á sama tíma nógu háum seigjustuðli til þess að styðja við fylliefnin í steypunni og koma þar með í veg fyrir aðskilnað í steypunni. Aðskilnaður í sjálífútleggjandi steinsteypu lýsir sér í að steypnan missir einsleitnis eiginleika sína sem þýðir að fylliefnin (möl og sandur) sökkva til botns en vatn og sement flýtur upp á yfirborðið. Aðskilnaður í steypu getur verið mis mikill eða allt frá litlu yfirborðsblæði sementsefju yfir í algjöran aðskilnað fylliefna og sementsefju. Mikill aðskilnaður í steinsteypu eyðileggur steypuna. Mæling á aðskilnaði er mjög erfitt viðfangsefni og hafa verið þróaðar margar tegundir mæliaðferða sem hafa það sameiginlegt að gefa ónothæfar niðurstöður. Ekki eru til neinar nothæfar vísindalegar aðferðir til þess að meta aðskilnað í sjálífútleggjandi steinsteypu. Þær aðferðir sem notaðar eru í dag eru byggðar á reynslutengdum aðferðum.

Megin markmið verkefnisins er því að þróa og hanna mælitækið Segrometer-4SCC, til þess að meta aðskilnað í sjálífútleggjandi steinsteypu með hjálp ferðaseigjumælis, Rheometer-4SCC, sem þróaður var á Rannsóknastofnun byggingariðnaðarins, en Nýsköpunarmiðstöð Íslands varð til við sameiningu **Rannsóknarstofnunar Byggingariðnaðarins (Rb)** og **Iðntæknistofnunar (ITÍ)**. Þróun mælitækisins Segrometer-4SCC, byggir að hluta til á reynslunni af Rheometer-4SCC og getur mælt stöðugleika steypunnar með tilliti til aðskilnaðar. Markmiðið með þessu er einnig að auka möguleika kerfisins Rheometer-4SCC, þannig að kaupandinn sjái sér meiri hag í að fjárfesta í búnaðinum (aukin samkeppnishæfni).

Auk ofangreindra seigjumælinga, sem mjög mikilvægt er að hafa við rannsóknir og gæðaeftirlit á steypu, þá eru upplýsingar um mögulegan aðskilnað steypu í fersku ástandi afar mikilvægar. Skemmdir og tjón í steiptum nýbyggingum vegna óstöðugar steypu (aðskilnaðar) kosta íslenskt samfélag hundruðir milljóna króna á ári hverju sem einkum kemur fram í steypuskemmdum seinna meir með tilheyrandi viðhaldi en einnig viðgerðum á nýsteiptum mannvirkjum.

Þó svo að Segrometer-4SCC sé ætlaður fyrir sjálífútleggjandi steinsteypu, þá er ekkert því til fyrirstöðu að nota hann einnig til mælinga á hefðbundinni, titraðri steypu. Ástæða þess að megináherslan er lögð á sjálífútleggjandi steinsteypu (SCC, þ.e.a.s. SÚL steypu) í þessu verkefni, er að markaðurinn og styrktaraðilar eru fremur tilbúnir að fjárfesta í mælitækjum fyrir hágæðasteypu

(SÚL) heldur en fyrir hefðbundna, titraða steypu. En það er athyglisvert að notkun á sjálfútleggjandi steypu er á tiltölulega stuttum tíma orðin þriðjungur af steypuframléiðslu í Danmörku.

Athuga ber að verkefnið “*SÚL steypa - Mat á aðskilnaði*”, sem áður var styrkt af Íbúðalánasjóði til eins árs hefur þjónað sem undanfari núverandi verkefnis “*Stöðuleiki og seigjustýring steinsteypu*”. Skýrslu til Íbúðalánasjóðs varðandi fyrrgreinds verkefnis var skilað árið 2008. Til þess að hafa heildstæðan og samhangandi texta um þróun Segrometer-4SCC þá er efni úr þeirri skýrslu endurtekinn hér. Núverandi skýrsla mun verða stækkandi skjal þar sem upplýsingar um þróun, hindranir, lausnir og önnur málefni tengt tækinu verður stanslaust bætt við og uppfærður eftir þörfum. Það er að segja, eftir sem líður á, þá eru nýjum köflum bætt við og jafnframt verða eldri kaflar uppfærðir þegar við á.

Verkefnið fékk styrk úr Tækniþróunarsjóði Rannís haustið 2007 og er til þriggja ára, þannig að Íbúðalánasjóður er skilgreindur sem meðstyrktaraðili þess verkefnis.

2. Aðskilnaður í steypu

Steypa sem aðskilst í framleiðslu eða niðurlögn er ónýtt. Þess vegna er gerð krafa um stöðugleika í ÍST EN 206-1:2000, Kafla 5.2 "Grunnkröfur fyrir samsetningu steypu", blaðsíðu 22.



Aðskilnaður sést oft þegar að grófkorna fylliefni hafa safnast fyrir á botninn í steypumóti. Í versta falli getur myndast steypuhreiður við botninn. Yfirleitt er auðvelt að meta aðskilnaðarhættuna ef óstöðugleikinn er mikill (einfaldlega gert með múrskaið og athugað gróflega fylliefnamagnið við botninn). Vandinn er meiri þegar óstöðugleikinn er ekki greinilegur. Sumar

steypuuppskriftir (e: recipe) geta verið svo viðkvæmar fyrir breytingum í vatnsmagni að fullur aðskilnaður getur orðið við lítils háttar breytingu í vatnsmagni (t.d. vegna breytileika í rakastigi fylliefnis). Dæmi um slíkar uppskriftir er þegar gert er ráð fyrir of litlu magni af fínkornum (e: fines; aggregate fines, limestone fines, etc.).

Þekktar mæliaðferðir á stöðugleika eru **(1) Segregation test (Penetration apparatus)**, **(2) Settlement column segregation test**, **(3) Surface settlement test** og **(4) Wet sieving stability segregation test** (einnig: sieve segregation resistance test) [2].

Þau tæki sem notuð eru við þessar mæliaðferðir eru yfirleitt fyrirferðarmikil í uppsetningu, mikil vinna og tímafrekt að gera mælingar með þeim, má þar á meðal nefna fyrirferðarmikla sigtun á ferskri steypu, hreinsun og þar á eftir skolun tækja. Ein slík mæling getur tekið allt að einni klukkustund (með hreinsun). Annað vandamál með þessi tæki, sem vert er að nefna er að notkun þeirra fylgir mikil erfiðisvinna, nokkuð sem mun minnka allverulega með nýja mælitækisins Segrometer-4SCC. Af fjórum áður nefndum mæliaðferðum, þá er mælt með aðferð númer 4 samkvæmt [3]. Þessi aðferð er einkum óhentug fyrir sjálfútleggjandi steypu (þó svo að hún sé upphaflega gerð fyrir slíka steypu). Þetta er vegna mismikillar afturkræfrar stífni sem getur verið til staðar í slíkri steypu. Það er að segja, steypan stífnar vegna afturkræfrar stífni (e: reversible coagulation) á meðan á biðtímanum (15 mínútur) stendur, svo að lítið magn hennar fer í gegnum 5 mm sigtið, sem leiðir til þess að mæliniðurstaðan gefur til kynna stöðuga steypu, þó svo að hún sé óstöðug.

Nýnæmi Segrometer-4SCC er í þessu ljósi einstakt. Þar á að þróa mælitækni sem fullnægir þörf fyrir stöðugleikamælingar á sjálfútleggjandi steypu, þar sem afturkræf stífni getur ekki truflað niðurstöður mælinganna. Þessi mælitækni munu umsvifalaust gefa til kynna hvort seigju- og stöðugleikaeiginleikum steypu er áfátt og tryggja þannig að gölluð steypa (í þessu tilfalli óstöðug) fari ekki í mótin.

3. Hugmyndafræðin á bakvið Segrometer-4SCC

3.1 Mælitæki og vispa

Frumútgáfa af vispu sem notuð er í verkefninu er sýnd á Mynd 2. Samhliða hönnunarvinnu á vispu var prófunarferlið ákveðið en það gengur út að keyra vispuna á föstum hraða í ákveðinn tíma og skoða svo merkið (þ.e. kraftvægi T) frá tækinu og meta út frá því möguleika á aðskilnaði.

Vispan hefur verið prófuð á rannsóknarstofu Nýsköpunarmiðstöðvar Íslands. Eftir það var vispan send til Norcem í Noregi, sem styrkir einnig verkefnið, þar sem að hún hefur verið prófuð undir stjórn starfsmanns frá NMÍ. Samhliða prófunum á Íslandi og í Noregi voru gerðar mælingar á þeim steypum sem rannsakaðar voru með hefðbundnum reynslutengdum aðferðum (sigmálsflæði (e. *Slump flow*) og mat á aðskilnaði).

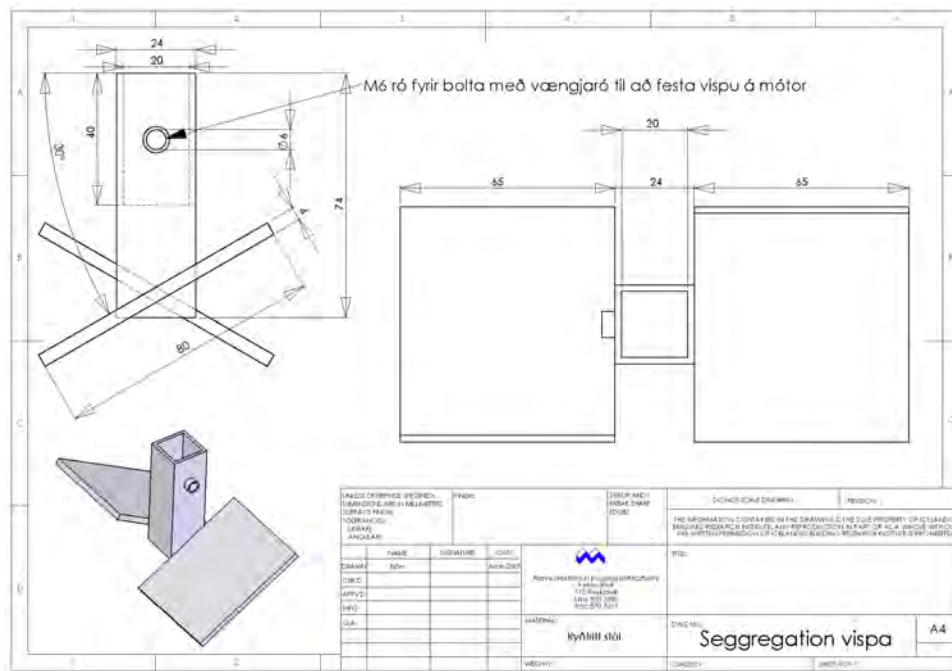
Í þessu verkefni var mat á aðskilnaði alltaf mælt af sama manningum og gaf hann steypunni „aðskilnaðareinkunn“ eftir því hversu honum fannst aðskilnaðurinn vera mikill (sk. ASE gildi, sjá síðar). Slík mæliaðferð er talsvert háð viðkomandi manni sem metur steypuna og því er afar mikilvægt að sami maðurinn sjái um öll prófin. Þetta undirstrikar hinsvegar þörfina fyrir að fá nýtt nákvæmt mælitæki sem getur mælt aðskilnað í steypu á áreiðanlegan hátt byggt á vísindalegum gildum

Tækið sem notað var við prófanirnar er ConTec Rheometer-4SCC, sjá Mynd 1.



Mynd 1: ConTec Rheometer-4SCC (prototype 2) [1].

Hönnuð var sérstök steypuvispa til þess að meta aðskilnað í steypunni. Vispan var fest á Rheometer-4SCC í stað hefðbundinnar steypuvispu. Sjá má málsetta teikningu af nýju vispunni á mynd 2.



Mynd 2: Vispa til að meta aðskilnað.

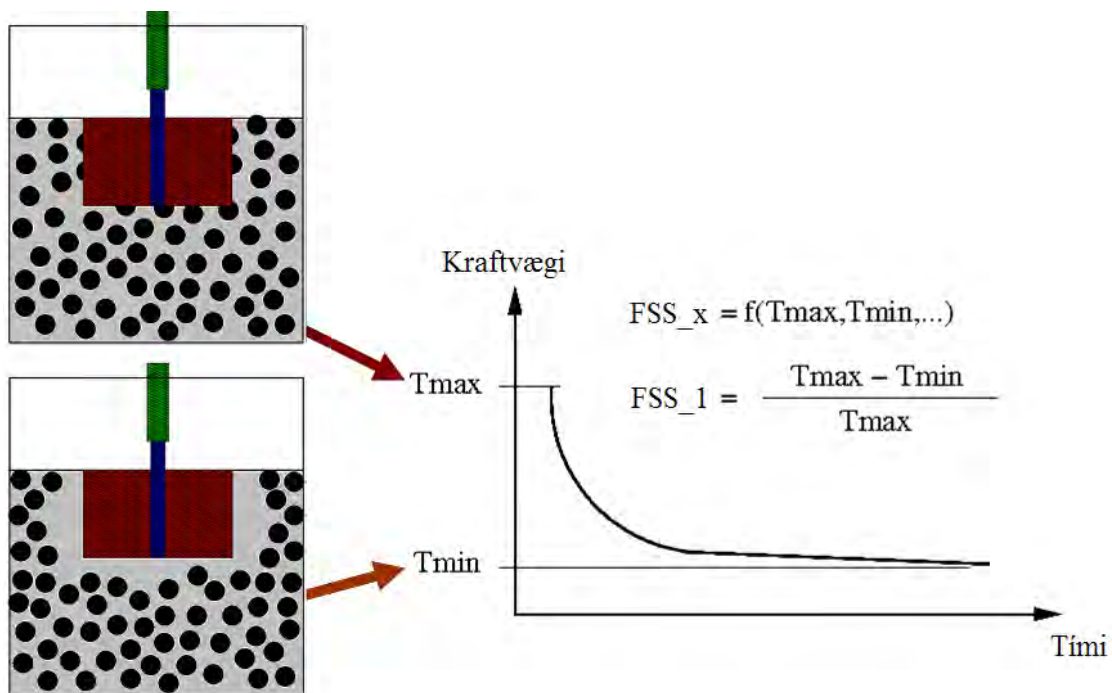
3.2 Flotfræðilegt stöðugleikastig (FSS)

Í sínu upprunalegu ástandi, þá er tilgangurinn með Rheometer-4SCC að mæla flotfræðilega eiginleika á ferskri og stöðugri sjálfútleggjandi steinsteypu (SÚL steypu). Þetta verkefni gengur út á nota þetta tæki einnig sem tæki til mælinga á stöðugleika SÚL steypu. Það er að segja, mælitækið á að gefa upplýsingar um hversu stöðug steypan er. Í þessu samhengi er skilgreint sk. flotfræðilegt -stöðugleikastig, eða FSS. Eins og sýnt er í Jöfnu (1), þá getur gildi FSS spannað frá 0 (sem þýðir stöðuga SÚL steypu) til 1 (sem þýðir fullur aðskilnaður).

$$FSS_x \in [0,1] \tag{1}$$

Breytistærðin x í Jöfnu (1), skilgreindir númer reikniaðferðar (sjá Jöfnur (3) til (9) síðar).

Hugmyndafræði og kenning um eðlisfræði stöðugleikamælingar með Segrometer-4SCC (en það er skilgreint með Segrometer-4SCC tækinu) er eftirfarandi: Mælivispan (Mynd 2) snýst með föstum snúningshraða ($f = \text{fasti}$). Samtímis og snúningurinn byrjar, þá er kraftvægi T mælt sem fall af tíma t . Í upphafi er mælt mesta kraftvægi $T = T_{\text{max}}$ (við $t = 0$) sem síðan dvínar eftir því sem vispan þvingar aðskilnað í steypunni. Vispan mun alltaf ná að þvinga aðskilnað, óháð hversu stöðug steypan er. Slíkt ferli mun taka lengri tíma fyrir stöðuga steypu. Við lok mælingar er gildið $T = T_{\text{min}}$ skráð (við $t = 60$ s) sem tilsvavar minnsta mældu kraftvægið fyrir þann tiltekna snúningshraða f sem er notaður. Gildið T_{min} er tengt flotfræðieiginleikum efjunnar í steypunni, á meðan gildið T_{max} er tengt flotfræðieiginleikum steypunnar í heild sinni (í einsleitnu ástandi). Þetta er sýnt í Mynd 3.



Mynd 3: Kenning um hvernig eðlisfræði stöðugleikamælinga á sér stað.

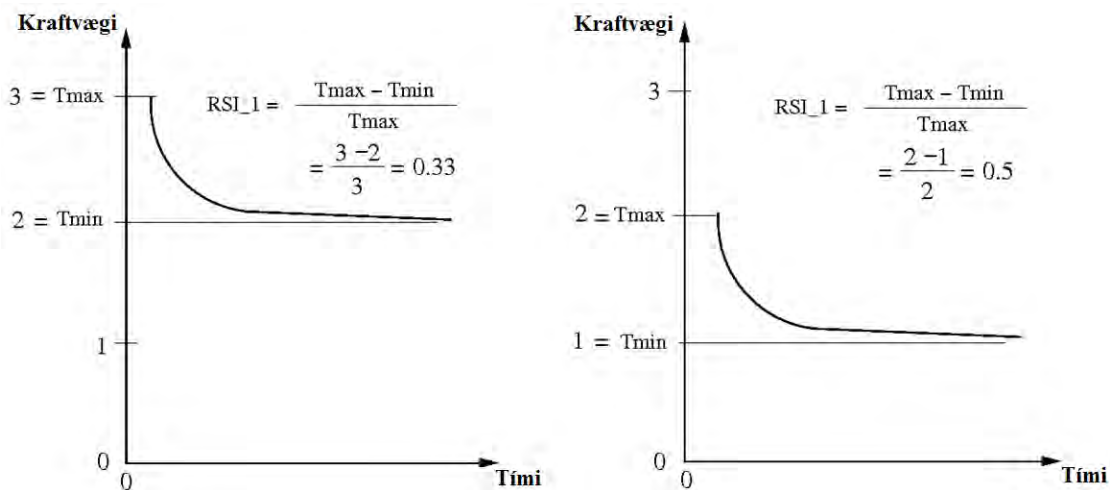
Eins og nefnt hefur verið, þá er snúningshraðinn á vispunni f fasti á meðan mælingu stendur yfir. Hann er fasti í 1 mínútu, og er 1.0 rps. Áður var hærri snúningshraði prófaður eða um $f = 1.3$ rps. En fljótt kom í ljós að sá hraði reyndist illa og var hann því lækkaður niður í $f = 1.0$ rps. Þess ber að geta til fróðleiks að venjuleg flotfræðimæling (þ.e. ekki stöðugleikamæling) á Rheometer-4SCC, þá er hámarks snúningur hafður rúmlega 0.5 rps. Ein af mörgum ástæðum fyrir því að hafa svo lágan snúningshraða er einmitt að minnka líkur á því að aðskilnaður eigi sér stað á meðan á mælingu stendur.

Mergur málsins er sá að það er ekki aðeins beinn mismunur á milli T_{\max} og T_{\min} sem stýrir gildinu á FSS. Slíkt gildi þarf einnig að vera normaliserað m.t.t. hversu stíf steypan er í upphafi. Dæmi um reikning á FSS er eftirfarandi:

$$FSS_{-1} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \quad (2)$$

Gildið á FSS_{-1} eins og skilgreint er í Jöfnu (2) fer frá 0, þegar $T_{\max} = T_{\min}$, til 1 þegar $T_{\min} = 0$. Eins og sýnt er á Mynd 4, þá sést að þó svo að stífur stöðugur massi gefi sama $T_{\max} - T_{\min} = 1$ gildi, þá fáum við samt sem áður hærra $(T_{\max} - T_{\min})/T_{\max}$ gildi fyrir meira fljótandi steypu. Þ.e.a.s það er hinn hlutfallslegi mismunur sem gildi. Þetta er eiginleiki sem þarf að fylgja FSS óháð hvernig hann er reiknaður.

Þess ber að geta að tækin Rheometer-4SCC og Segrometer-4SCC mæla kraftvægi í Amper [A] (*mótstöðu straumur*), en ekki í Nm eins og eðlisfræðirit segja til um. Þetta ber að hafa í huga þegar hinar ýmsu myndir eru skoðaðar seinna. Hinsvegar, þegar FSS gildi er normaliserað eins og sýnt er með Jöfnu (2) hér fyrir ofan, þá hefur einingin á kraftvægi ekkert að segja. Þ.e. sömu FSS gildin eru reiknuð út óháð einingu kraftvægis sem er mældur.



Mynd 4: Dæmi um kraftvægismælingar sem fall af tíma.

Vandamálið með að sannreyna mælitækið Segrometer-4SCC, er að það þarf að vera til staðar rétt svar um ástand steypunnar. Hið rétta svar er þá hægt að bera saman við það sem mælitækið gefur. Notast hefur verið við sk. “*sieve segregation test*” og er aðferðin lýst í riti frá RILEM [2]. Þessi aðferð reyndist mjög illa, þá sérstaklega vegna sk. afturkræfrar stífni (e. *thixotropic behavior*) sem er algengur eiginleiki í SÚL steypum.

Eftir margar misheppnaðar tilraunir með að mynda gott “rétt svar um ástand steypunnar”, var tekin sú ákvörðun að nota mannlegt mat á aðskilnaði, einkskonar “aðskilnaðareinkunn” eftir því hversu matsmanninum fannst aðskilnaðurinn vera mikill. Slík mæliaðferð er talsvert háð viðkomandi manni sem dæmir steypuna og verður því helst að vera gefin af sama einstaklingi í gengum allt ferlið. Þessu mati verður gefið táknið ASE (AðSkilnaðarEinkunn) og hefur einkunnargjöf frá 0 (stöðug steypa) til 1 (fullur aðskilnaður). Þ.e. gildið ASE spannar sömu víddina og FSS gerir (sjá texta fyrir neðan Jöfnu (1) um FSS). Athuga ber að seinna í þessari skýrslu (Kafli 5.2) þá er ASE einkunnarkerfið beturbætt.

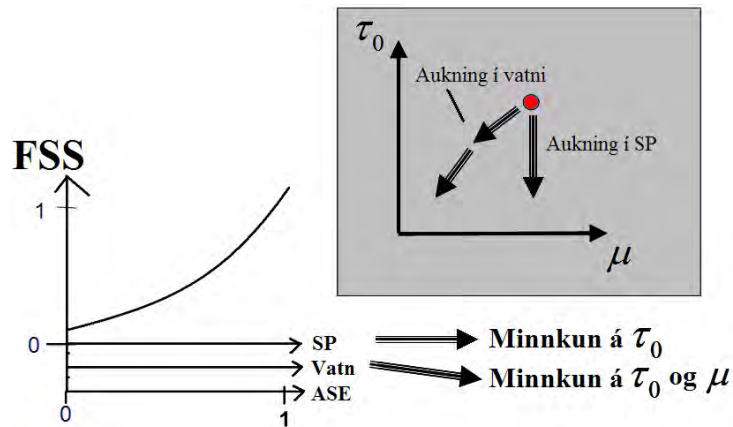
3.3 Steypublöndur og aðskilnaður þeirra

Í Kafli 4 og 5 er notast við tvær grunnsteypur þar sem mismunurinn liggur í að mismunandi tegundir af sandi og mismunandi tegundir af þjálnefni (SP) eru notaðar. Auk þessara tveggja steypublandna, þá í Kafli 5 er bætt við þá þriðju og er sýnd í Töflu 2. Þetta var gert til að spanna ákveðna vídd á tegund SÚL steypu.

Blanda 1:		Blanda 2:	
Efni	kg/m ³	Efni	kg/m ³
Sement (STDFA)	374,4	Sement (STDFA)	371,3
Kísilryk	18,7	Kísilryk	18,6
Vatn	185,3	Vatn	183,8
Sandur 0 - 8 mm (Søberg)	1060,6	Sandur 0 - 8 mm (Árdal)	1051,7
Fylliefni 8 - 11 mm	106,7	Fylliefni 8 - 11 mm	105,2
Fylliefni 11 - 16 mm	284,5	Fylliefni 11 - 16 mm	280,4
Fylliefni 16 - 22 mm	320,1	Fylliefni 16 - 22 mm	315,5
Sika Viscocrete FB-2	0,0	Sika Viscocrete FB-2	3,3
BASF Glenium Sky 550	5,6	BASF Glenium Sky 550	0,0
Eðlisþyngd (kg/m ³)	2367,1	Eðlisþyngd (kg/m ³)	2335,9

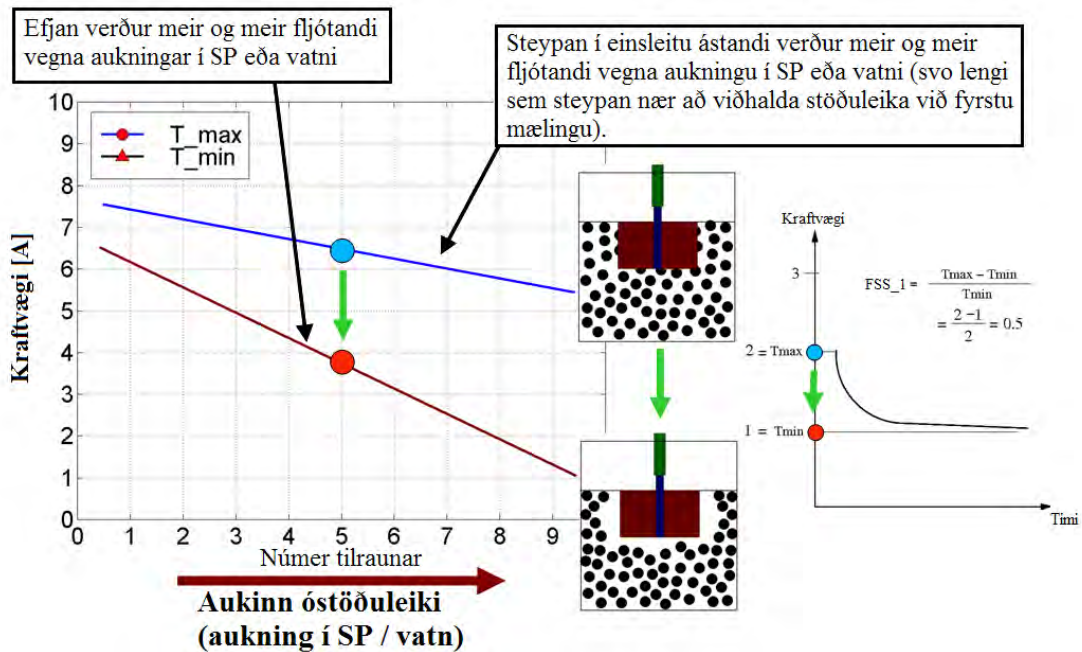
Tafla 1: Grunnblöndurnar sem notaðar eru í verkefninu. Til vinstri er grunnblanda 1 og til hægri, grunnblanda 2.

Tilraun verkefnisins gekk út á að bæta við annaðhvort flotefni (SP) eða vatni í ofangreindum blöndum til að auka óstöðugleika þeirra í ákveðnum skrefum. Í hverju skrefi er mæling gerð með Segrometer-4SCC (FSS) og loks metur matsmaður aðskilnaðinn (ASE). Það ber að athuga að við aukningu á vatni þá koma fram aðrir þjálneiginleikar og aðrar tegundir af aðskilnað, en þegar flotefnið (SP) er bætt við. Með þessu er verið að ná fram mismunandi tegundum af aðskilnaði. Þetta er sýnt á Mynd 5.



Mynd 5: Áhrif vatns og flotefna á flotskerspennu og plastískum seigjustuðli [4].

Fyrst sést að aukið vatn leiðir til bæði minnkunar í flotskerspennu τ_0 og á plastískum seigjustuðli μ , og þá verður óstöðugleikinn og aðskilnaðurinn miklu “harðari” en ella.



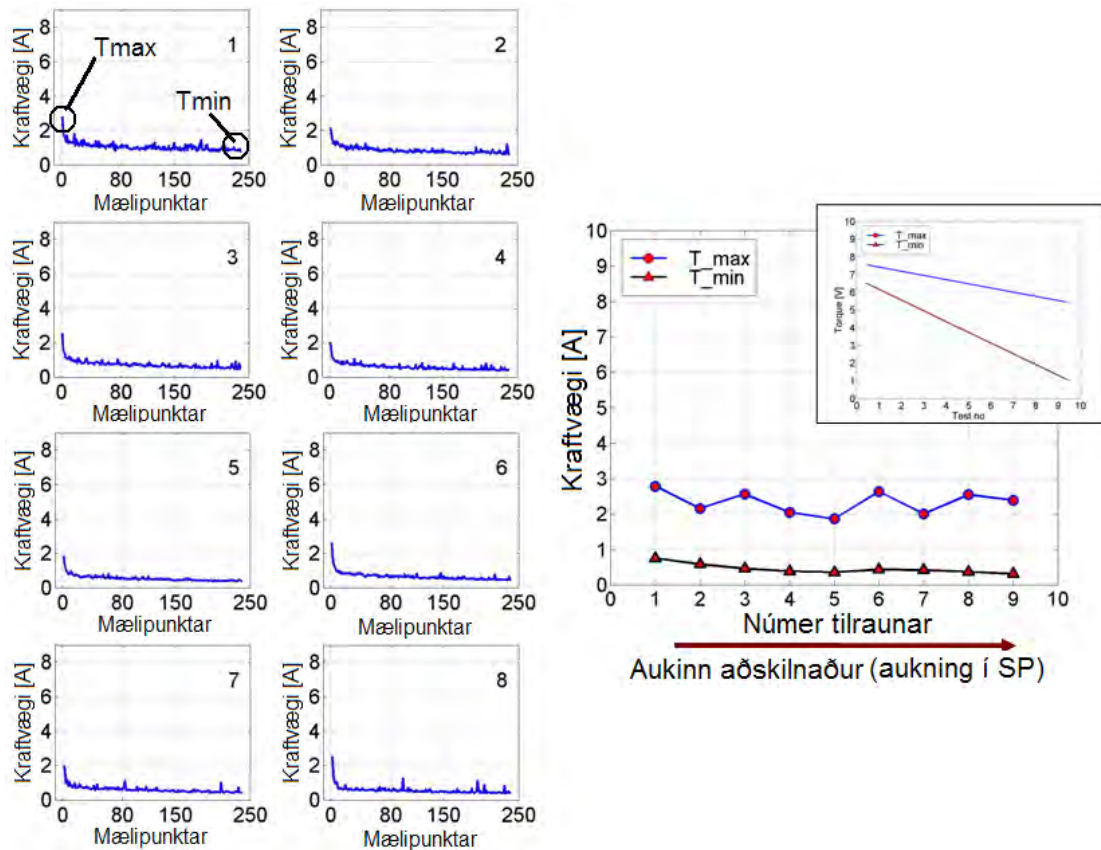
Mynd 6: Dæmi um kraftvægismynd (ath að kraftvægi er mælt sem Amper, en ekki Nm).

Mynd 6 sýnir dæmi um kraftvægismynd. Slíkar myndir verða sýndar fyrir allar niðurstöður í næsta kafla, þannig að ágætt er að hafa þessa mynd í huga þegar sá kafli er lesinn.

4. Niðurstöður fyrstu tilrauna

4.1 Blanda 1: Aukning í SP

Niðurstaðan sem er sýnd á Mynd 7, sýnir röð mynda (merktar 1 til 8) af kraftvægi T mælt sem fall af fjölda mælipunkta. Fyrsti mælipunkturinn 1 er á tíma $t = 0$ og síðasti punkturinn 240 er á tíma $t = 60$ s. Þannig að runurnar (eða seríurnar) sýna í raun mælt kraftvægi sem fall af tíma. Við fyrstu tilraun (1 í Mynd 7) þá er magn þjáltniefnis (SP) 1,5% af magn sements. Við aðra tilraun (2 í Mynd 7) þá er bætt við 0.15% af þjáltniefni, og svo koll af kolli að tilraun 8. Við meiri og meiri aukningu á floti, þá byrjar steypan að aðskilja sig meir og meir.



Mynd 7: Niðurstöður mælingar fyrir blöndu 1, þegar SP er bætt við í skrefum (0.15%).

Eins og hægra graf á Mynd 7 sýnir, þá er sáralítill breyting á T_{max} og T_{min} sem fall af númer tilraunar. Þessi niðurstaða er frekar óhagstæð þar sem allir útreikningar á FSS munu vera háð þessum tiltekna mismuni.

Eftirfarandi jöfnur á FSS voru prófaðar:

$$FSS_1 = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \quad (3)$$

$$FSS_2 = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{mean}_f}} \quad (4)$$

$$FSS_3 = \frac{\max(T_{\text{bias}}) - \min(T_{\text{bias}})}{\max(T_{\text{bias}})} \quad (5)$$

Þar sem,...

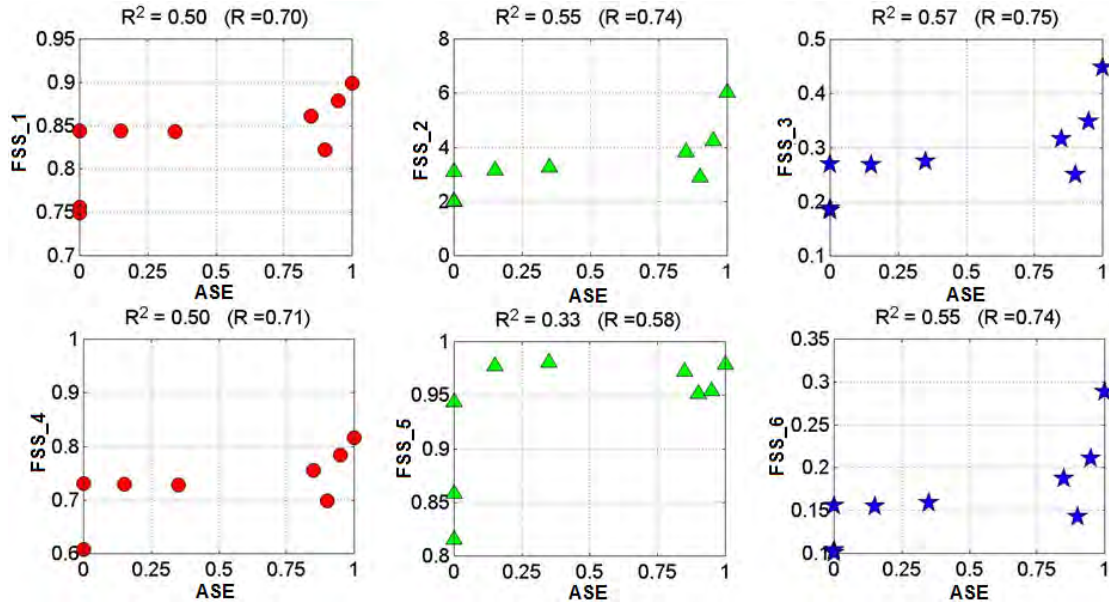
$$T_{\text{bias}} = \exp\left(\frac{T}{10 \cdot \text{mean}(T)}\right)$$

$$FSS_4 = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \quad (6)$$

$$FSS_5 = \frac{T_{\max} - G_{\text{segr}}}{T_{\max}} \quad (7)$$

$$FSS_6 = \frac{\max(T_{\text{bias}}) - \min(T_{\text{bias}})}{\max(T_{\text{bias}}) + \min(T_{\text{bias}})} \quad (8)$$

Niðurstöðu á ofangreindum jöfnum má sjá á Mynd 8.



Mynd 8: Niðurstöður reikninga á hinum mismunandi FSS föllum.

Eins og sést á Mynd 8, þá er erfitt að finna nothæft FSS fall. Grunnurinn í þessu vandamáli liggur einfaldlega í því hversu T_{\max} og T_{\min} breytast lítið sem fall af númer tilraunar (sjá Mynd 7, til hægri). Önnur föll sem prófuð hafa verið til að bjarga þessu eru:

$$FSS_7 = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{30 \cdot T_{\min}} \quad (9)$$

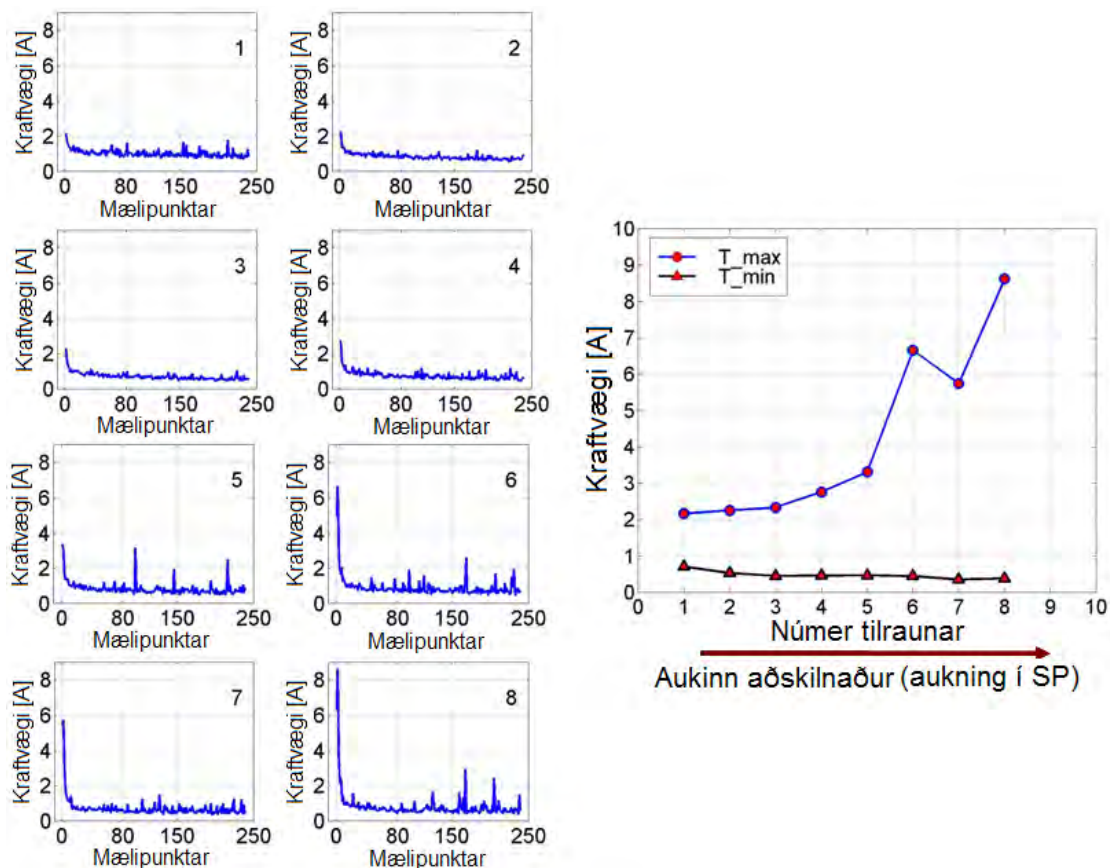
$$FSS_8 = \frac{\max(T_1, \dots, T_{10}) - G}{\max(T_1, \dots, T_{10})} \quad (10)$$

$$RSI_9 = f(H_{\text{segr}}, T_{\max}, T_{\min}) \quad (11)$$

Fallið FFS_9 er almennt, og er sett fram til að undirstrika að töluvert fleiri FSS jöfnur voru prófaðar en sýndar er í þessar skýrslu. Til að mynda var reynt að notast við hallann á kraftvægismælingunni en án árangurs. Í Jöfnu (10) er svo kallað G gildi notað. Þetta gildi er útskýrt seinna í Kafla 5.4.

4.2 Blanda 2: Aukning í SP

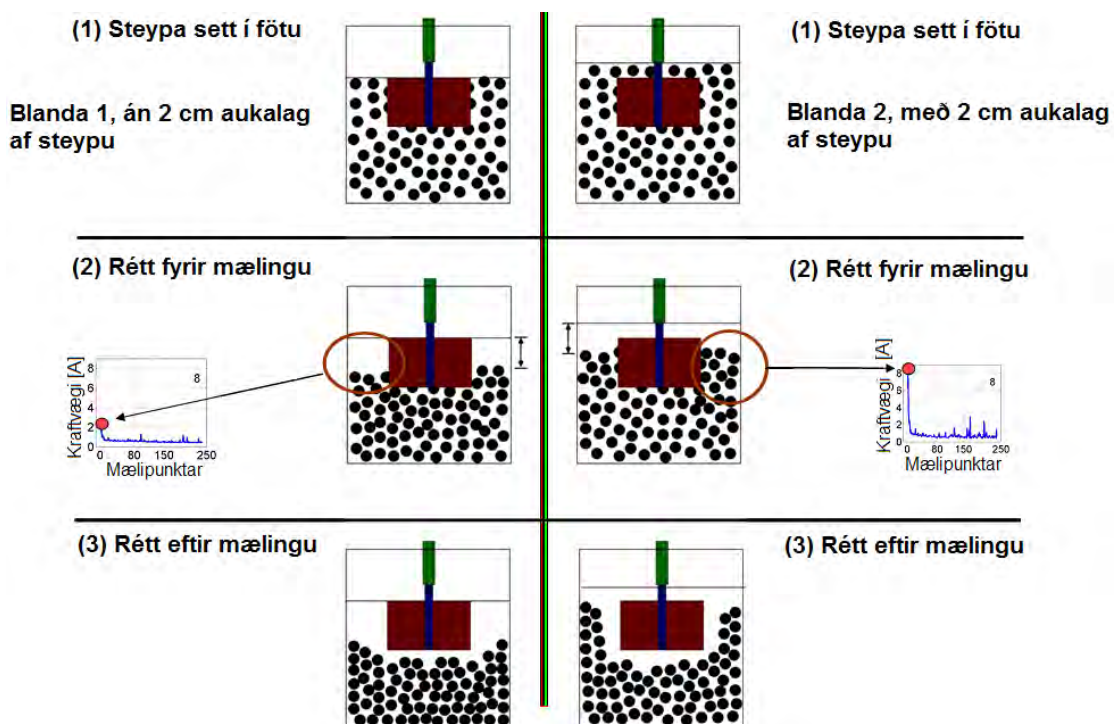
Tafla 1 sýnir mismun á blöndu 1 og 2 og eins og sést þar þá liggur mismunurinn í mismunandi tegund af sandi og þjálnefni. Niðurstaða mælinga fyrir blöndu 2 er sýnd á Mynd 9. Eins og gildir fyrir Mynd 7, þá samanstendur hún af röð mynda af kraftvægi T mælt sem fall af mælipunkta (þ.e. fall af tíma).



Mynd 9: Niðurstöður mælinga fyrir blöndu 2, þegar SP er bætt við í skrefum (0.15%).

Eins og vinstri hlið Myndar 9 sýnir, þá gerist svolítið merkilegt. Gildið T_{\max} eykst sem fall af fjölda tilrauna (þ.e. sem fall af óstöðugleika). Það óvænta er að hærra T_{\max} gildi fæst við óstöðuga steypu en það sem fæst við stöðuga steypu. Eins og hægra grafið sýnir (Mynd 9), þá eykst mismunurinn á milli T_{\max} og T_{\min} við aukinn aðskilnað. Þetta er mikilvægur eiginleiki, því þá gefst möguleiki á að finna góða jöfnu FSS sem hægt er að nota við útreikning á stöðugleika. Mismunur á útfærslu tilraunar fyrir blöndu 1 og 2 (við aukningu á SP) er að í síðara tilfalli var alltaf bætt við 2 cm aukalag af steypu í mælifötuna. Þetta er skýrt efst í Mynd 10.

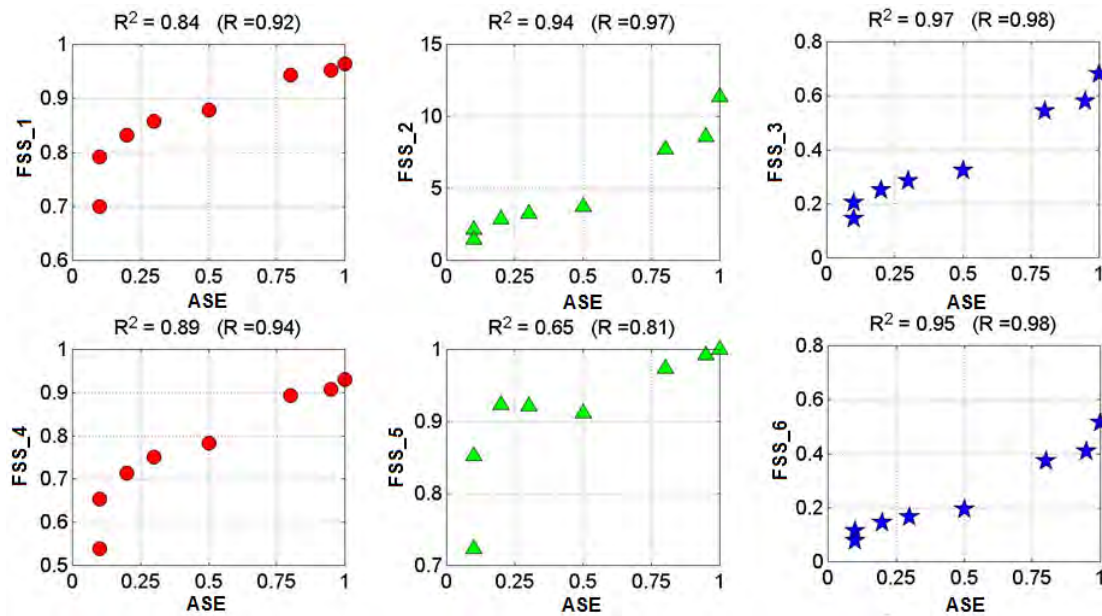
Mynd 10 sýnir hugsanlega ástæðu fyrir þessari merkilegu aukningu á T_{\max} sem fall af fjölda tilraunar. Kenningin gengur út á að þegar við fyrstu mælingu, þá hefur steypan aðskilist nokkuð. Eftir því sem hún verður óstöðugri, þeim mun stærri verður aðskilnaðurinn í byrjun. Þetta leiðir til þess að meira magn af grófu fylliefni er í nálægð vispunar þegar byrjunar kraftvægið T_{\max} er mælt, miðað við þegar fylliefnið er jafndreift um steypuna.



Mynd 10: Kenning fyrir ástæðu þess að T_{\max} eykst sem fall af fjölda tilraunar (óstöðugleika) fyrir blöndu 2, en ekki fyrir blöndu 1.

Með því að nota Jöfnur (3) til (8), á grunnöggnin sýnd á Mynd 9, þá fæst mun betri niðurstaða. Það er að segja, að það fást mismunur á milli T_{\max} og T_{\min} sem fall af óstöðugleika leiðir til góðrar útkomu fyrir FSS, svo til óháð hvernig hún er reiknuð. Jöfnur (3) til (11) hafa í þessu tilfalli

eitthvað til að “vinna með”. Eins og má sjá þá er fylgnistuðulinn milli FSS og ASE mun hærri fyrir Mynd 11, samanborið við Mynd 8.

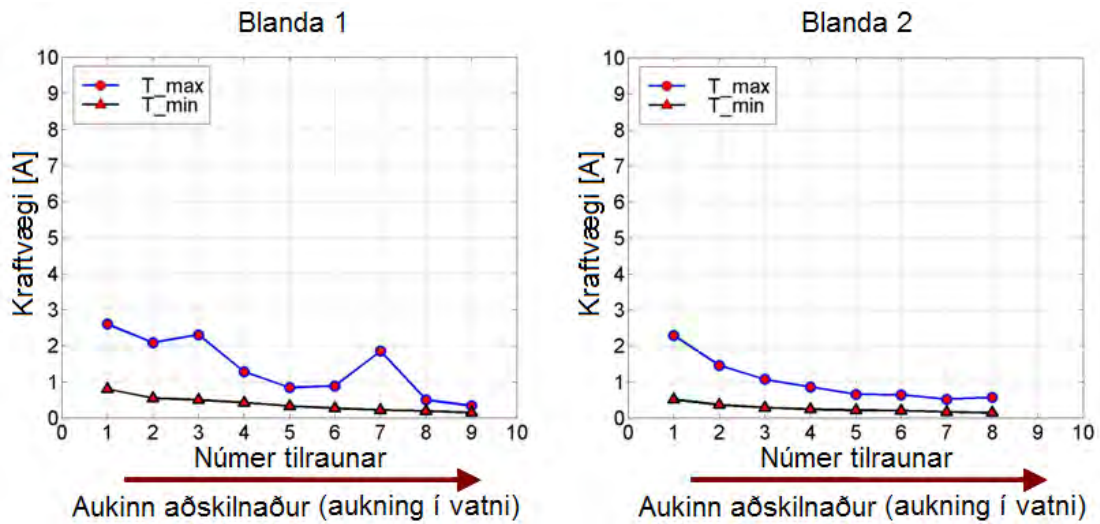


Mynd 11: Niðurstöður reikninga á hinum mismunandi FSS föllum.

4.3 Blanda 1 og 2: Aukning í vatni

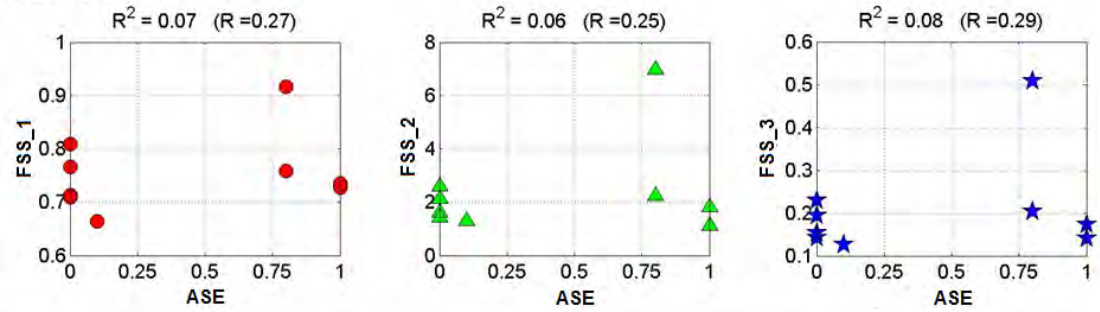
Eins og nefnt hefur verið áður í þessari skýrslu, þá var einnig gerð stöðugleikamælingar þegar vatni er bætt við í staðin fyrir þjálnefni (SP). Í þessum tveim tilteknum runum var 2 cm steypu lagi ekki bætt til viðbótar þeirri “venjulegu magni” af steypu í fötunni. Í raun var þetta 2 cm aukalag slys sem átti aldrei að vera, en reyndist mögulega vera góð lausn.

Við fyrstu mælingu er vatnsmagnið rúmlega 185 lítrar per m^3 steypu í báðum tilvikum (sjá Töflu 1). Eftir það er bætt við 15 lítrum í hverju mæliskrefi. Mynd 12 sýnir niðurstöðu mælinganna bæði fyrir blöndu 1 og 2. Eins og sést þá minnkar mismunurinn á milli T_{max} og T_{min} sem fall af óstöðugleika. Þó svo að hér sjáist mismunur sem fall af óstöðugleika, þá er hann ekki nógu skýr til að vera nothæfur til reikninga á FSS. Þetta sést á Mynd 13, þar sem fylgnistuðulinn á milli FSS og ASE er frekar lágur. Aðeins eru sýndar niðurstöður þegar Jöfnur (3) til (6) eru notaðar, en allmargar aðrar jöfnur voru notaðar án árangurs.

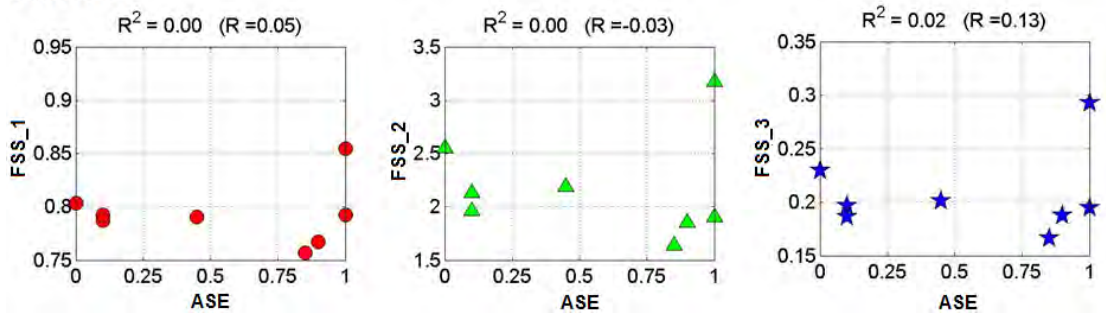


Mynd 12: Niðurstöður mælingar fyrir blöndu 1 og 2, þegar vatni er bætt við í skrefum (15 lítra per m³).

Blanda 1:



Blanda 2:



Mynd 13: Niðurstöður reikninga á hinum mismunandi FSS föllum.

5. Niðurstöður annarra tilrauna

Eins og kom fram í Kafla 4, þá hefur aðeins ein tilraunasería af fjórum heppnast. Sú velheppnaða sería (sjá Mynd 11), virðist vera út af 2 cm steypulagi sem var bætt við í mælifötu tækisins (sjá Mynd 10). Þetta aukalag var ekki bætt við í hinum seríunum (sem misheppnuðust). Í raun var þetta 2 cm aukalag slys sem átti aldrei að vera, en virðist vera lausn á tæknilegum vandamálum Segrometer-4SCC. Í þessum kafla verður skýrt frá tilraunaniðurstöðum, þar sem mælingar eru endurteknar með annarsvegar 2,5 cm steypulagi og svo einnig helmingi hærra, eða um 5 cm steypulagi. Þetta er gert til samanburðar.

5.1 Tilraunaruppsetning

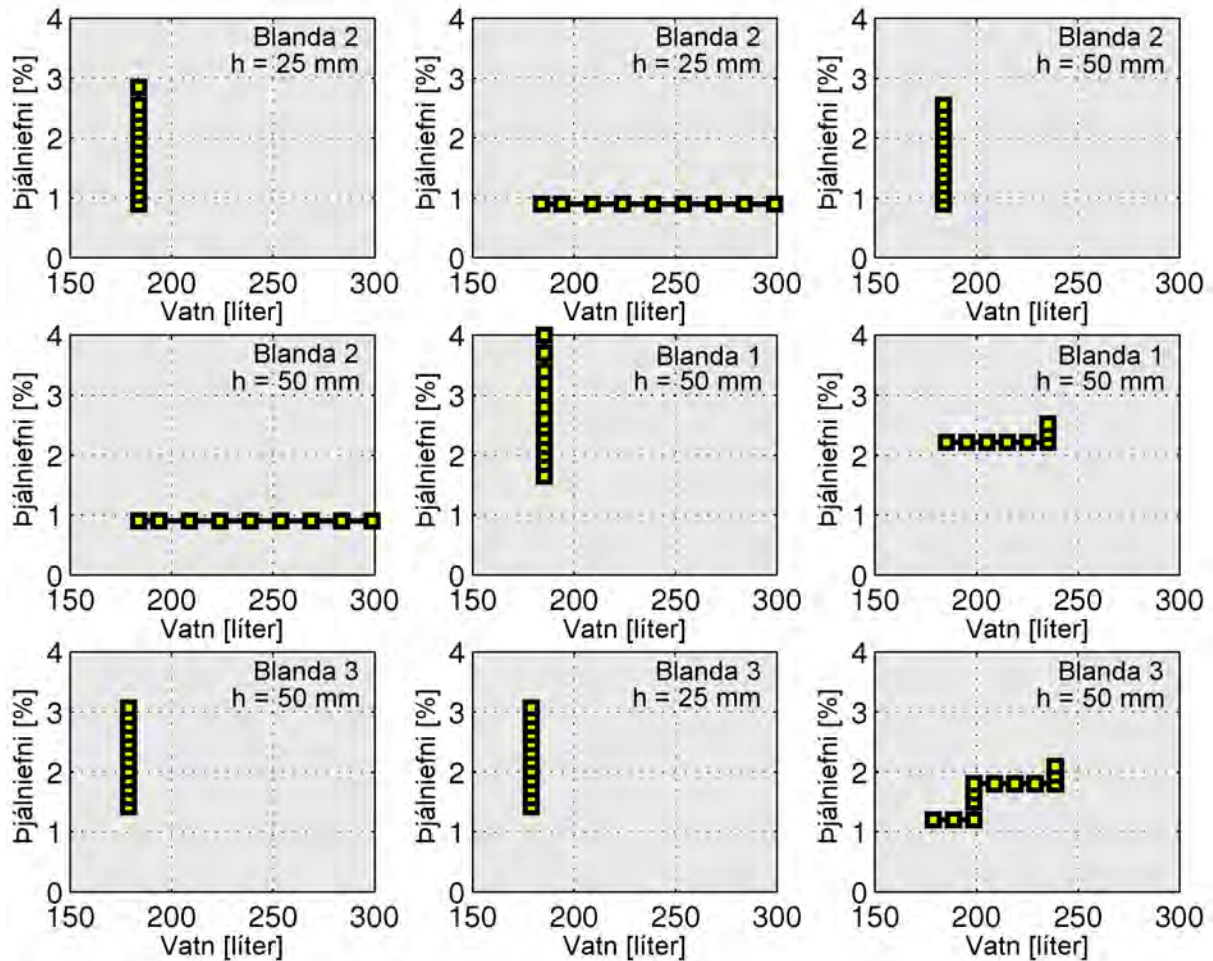
Til viðbótar við steypublöndurnar sem sýndar eru í Töflu 1 (grunnblanda 1 og 2), þá er einni aukablöndu bætt við í tilraunaseríunni (sem hér er kölluð grunnblanda 3) og er sýnd í Töflu 2. Þessari blöndu var bætt við til að fjölga tegundum steinsteypu í verkefninu þannig að betri gagnagrunnur náist við greiningu á gögnum frá tækisins Segrometer-4SCC.

Blanda 3:	
Efni	kg/m ³
Sement (STDFA)	378.0
Kísilryk	18.9
Vatn	178.8
Sandur 0 - 8 mm (Árdal)	790.3
Fylliefni 8 - 11 mm	105.4
Fylliefni 11 - 16 mm	281.0
Fylliefni 16 - 22 mm	316.1
Fínsandur 0-2 mm (Árdal)	264.8
Sika Viscocrete FB-2	5.7
Eðlisþyngd (kg/m ³)	2342.0

Tafla 2: Grunnblanda 3. Grunnblöndur 1 og 2 eru sýndar í Töflu 1.

Mynd 14 sýnir tilraunauppsetninguna sem var keyrð fyrir aðra tilraunaseríu. Þar má sjá hvernig mismunandi magni af þjálnefni (e. superplasticizer) er bætt við hverja steinsteypu og svo mismunandi magni af vatni. Eins og áður hefur verið nefnt, þá eru þessum efnunum bætt við til að gera steinsteypuna meira og meira óstöðuga. Eitt vandamál í tengslum við þetta er að þjálnistap hefur unnið á móti óstöðugleikanum. Þetta á sérstaklega við þegar steypan var gerð óstöðug með vatni. Það er að segja, stöðugleiki steinsteypunnar gat verið sá sami fyrir og eftir vatnsviðbót hreinlega vegna mikils þjálnistaps (u.þ.b. 10 mínútur eru á milli mælinga). Lausn á þessu vandamáli var að bæta við þjálnefni í sömu seríunni. Þetta sést til dæmis á Mynd 14, neðst til

hægri. Út af þjálnistapi, þá þurfti yfirleitt mikið af vatni til að alfarið eyðileggja steypublöndunar (AES = 1).



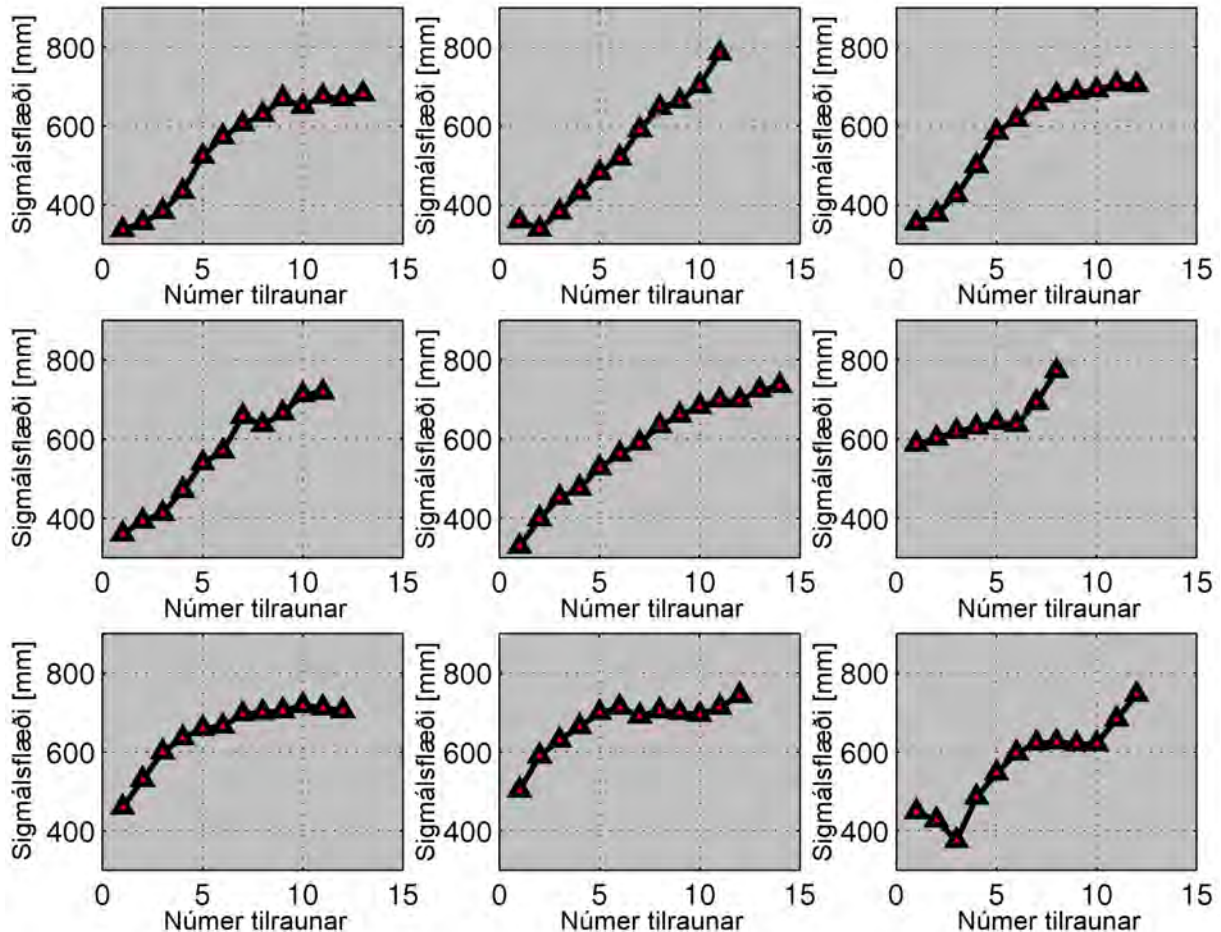
Mynd 14: Tilraunaruppsetning fyrir blöndur 1, 2 og 3 (sjá Töflur 1 og 2).

Í Mynd 14 má einnig sjá við hvaða mismunandi þykkt af steypulagi var bætt við fyrir hvert tilfelli (sjá Mynd 10 um hvað er átt við með þykkt steypulags).

Athuga ber að allar niðurstöður sem eru héðan í frá sýndar í Kafla 5, tilsvara Mynd 14. Til dæmis, ef litið er á Mynd 15, efst til vinstri, þá tilsvavar sú niðurstaða uppsetningunni sem er sýnd efst til vinstri á Mynd 14 (þ.e. í þessu tilfelli er verið að mæla sigmálsflæði sem fall af aukinni notkun af þjálniefni).

Mynd 15 sýnir sigmálsflæði og voru þessar mælingar gerðar fyrst og fremst til að meta stöðugleika steypunnar á sigmálsborðinu, nokkuð sem er útskýrt nánar í Kafla 5.2. Eins og nefnt er í inngangi, þá eru allar grunnblöndur í þessu verkefni hannaðar sem sjálfútleggjandi steinsteypur. Hinsvegar, til að byrja með, þá var sigmálsflæðið yfirleitt haft í kringum á 400 mm. Þetta var gert til að hafa mjög stöðuga steypu í byrjun mælingar og þannig vel skilgreint ASE = 0 gildi. Undir lok á hverri

mælingu, þá var búið að fara þannig með steypuna að hún var í raun handónýt (algerlega aðskilin). Þetta var gert til að fá vel skilgreint $ASE = 1$ gildi. Sigmálsflæðið var oft rétt í kringum 800 mm fyrir slík tilfelli.



Mynd 15: Sigmálsflæði sem fall af númer tilrauna (sjá Mynd 14).

5.2 Nýtt kerfi fyrir AðSkilnaðarEinkunn (ASE)

Eins og nefnt hefur verið í Köflum 3.1 og 3.2, þá hefur verið notast við svokallaðan ASE (AðskilnaðarEinkunn) sem hefur einkunnarskala frá 0 (stöðug steypa) til 1 (fullur aðskilnaður). Það er, gildið ASE spannar sömu víddina og FSS gerir (sjá texta fyrir neðan Jöfnu (1) um FSS). Ástæða þess að ASE kerfið var tekið upp er vegna misheppnaðrar tilrauna við að mynda gott “rétt svar um ástand steypunnar” með notkun á velþekkt og hefðbundnum mælitækjum. Þetta hefur þegar verið rætt í Köflum 3.1 og 3.2.

ASE kerfið eins og það hefur verið notað í fyrri köflum hafði sýnt sig að vera of ónákvæmt (þ.e. of grófhannað). Þess vegna var ákveðið að fíngera ASE kerfið og þá sérstaklega með tillit til hvernig

ástand steypunnar lítur út í blandara og hvernig hún lítur út á sigmálsborði. Þetta var gert til að fá betri gæði á gagnagrunni verkefnisins. Nýja uppsetningin er lýst í Töflum 3 og 4 og voru þær gerðar af Norskum samstarfsaðila Knut Lervik (SINTEF).

0 / 0.1	Stöðug og einsleit steypa
0.2 / 0.3	Steypan er byrjuð að fá rjómakennt yfirborð. Litlar loftbólur á yfirborðinu. Steypan er þó ennþá stöðug.
0.4 / 0.5	Byrjun á aðskilnaði. Mikið að litlum loftbólum á yfirborðinu. Á til með að mynda efju-sull á yfirborðinu. Myndunar á svartri himnu á yfirborðinu.
0.6 / 0.7	Greinilegar vísbendingar um aðskilnað. Mikið af loftbólum. Efju-sull. Svört himna. Stærri steinar (gróf fylliefni) eru byrjuð að sökkva.
0.8 / 0.9	Mjög mikið af loftbólum (steypan farin að “sjóða”). Augljós vatnshimna. Á yfirborðinu er 5 til 20 mm af efju-sulli. Fylliefni eru sokkin til botns.
1	Algjör aðskilnaður “sprungin steypa”

Tafla 3: AðskilnaðarEinkunn ASE fyrir blandara ASE_BL (lágmarkskrafa er 0.45).

0 / 0.1	Stöðug og einsleit steypa. Fylliefni og efja fljóta vel út.
0.2 / 0.3	Stöðug og einsleit steinsteypa. Flýtur vel út, en hefur fengið glansandi yfirborð með mögulegar svartar útfellingar.
0.4 / 0.5	Fær nú til viðbótar tilhneigingu til myndunar á efjurönd á ytri kannti sigmálsflæðisins. Hinsvegar fylgir fylliefnið ennþá vel út að jaðar steypublöndunar. Steinsteypa er ennþá stöðug.
0.6 / 0.7	Greinileg efjurönd á ytri kannti sigmálsflæðis. Grófir steinar/korn í fylliefninu hafa tilhneigingu til að sitja eftir í miðjunni.
0.8 / 0.9	Blæðir (vatni) á ytri kannti sigmálsflæðis. Efju-sull / vatn er á ytri kannti.
1	Algjör aðskilnaður “sprungin steypa”

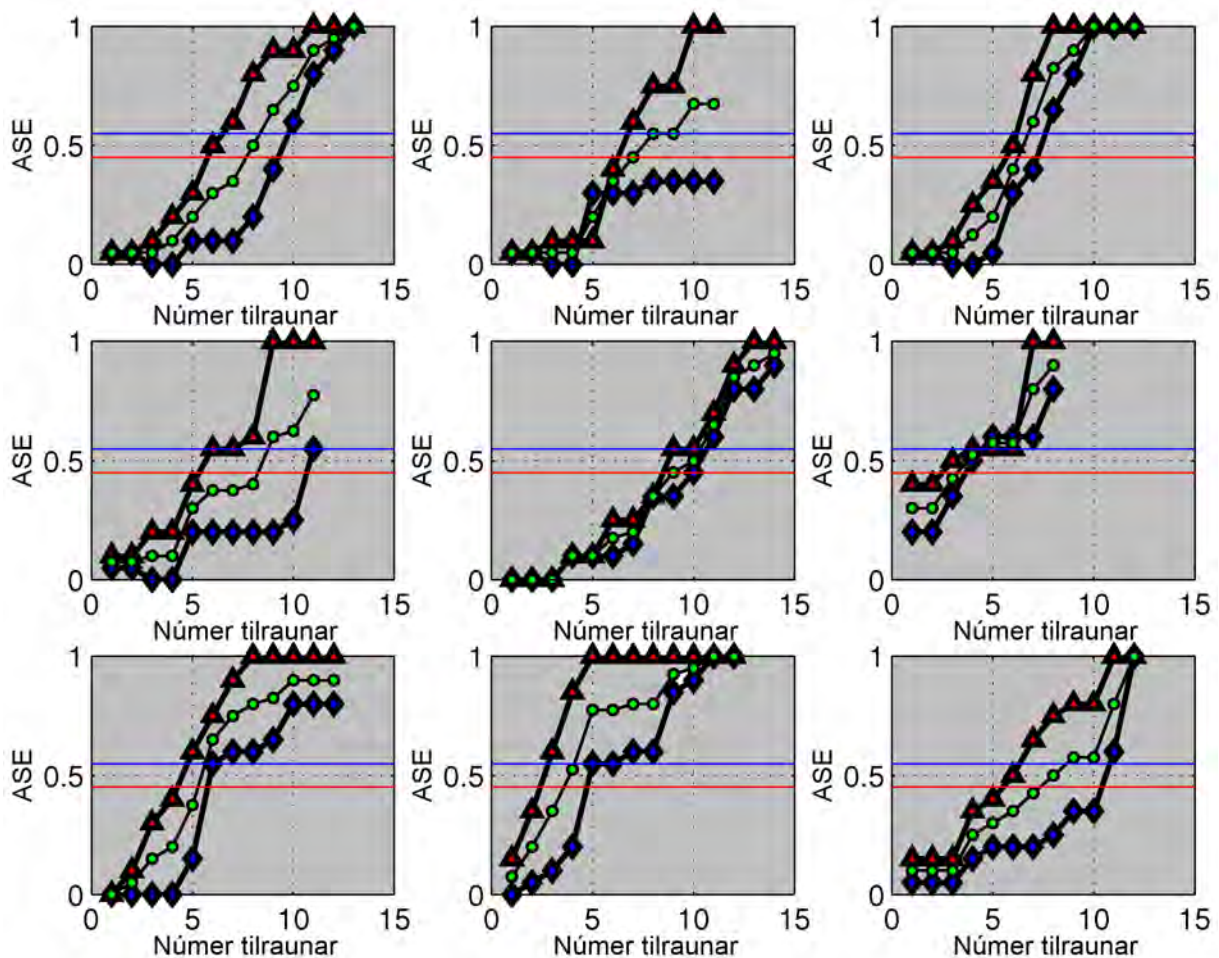
Tafla 4: AðskilnaðarEinkunn ASE fyrir sigmálsborð ASE_SF (lágmarkskrafa er 0.55).



Mynd 16: Stöðugleikaástand steypu í blandara (til vinstri) og á sigmálsborði (til hægri).

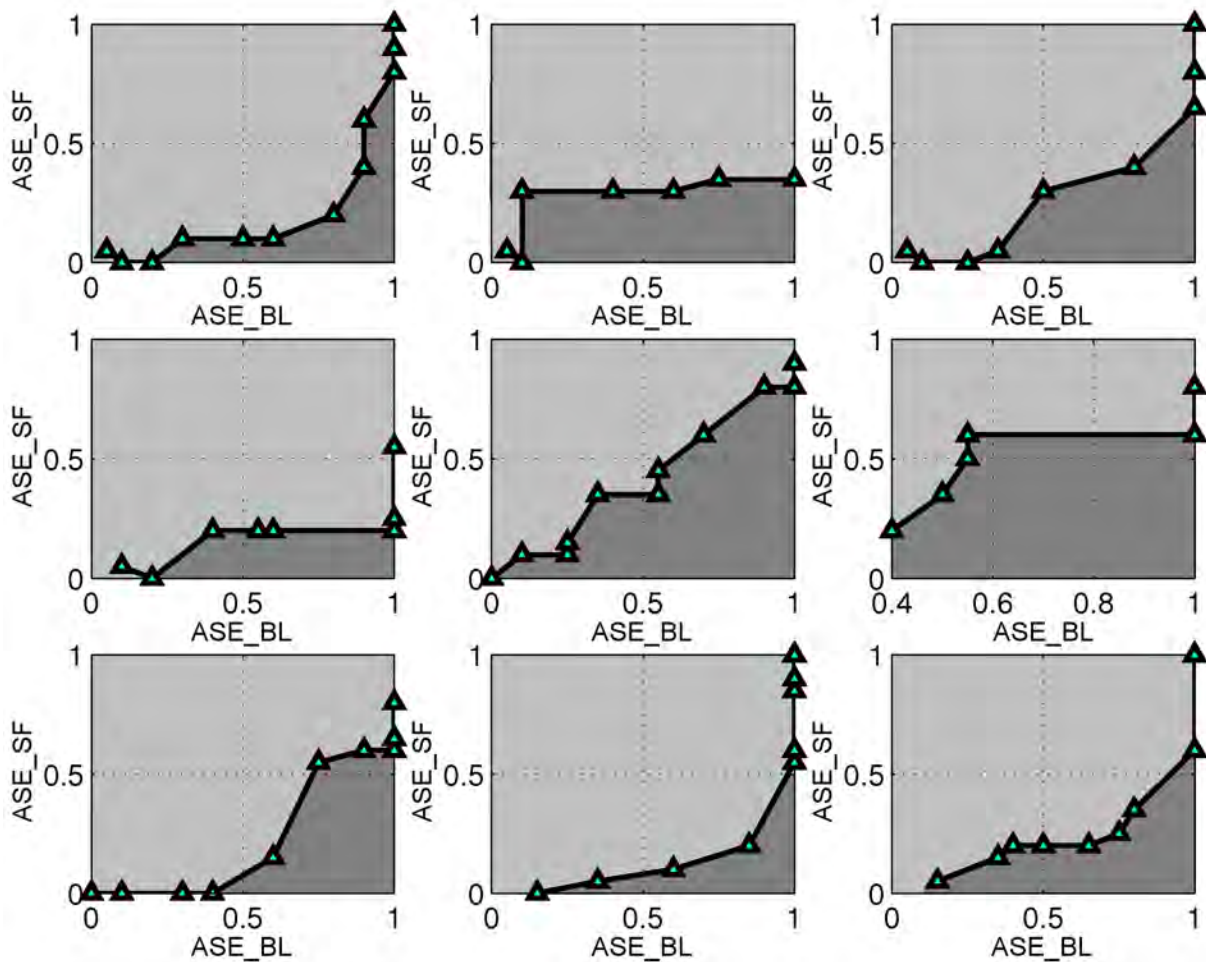
ASE_BL stendur fyrir **AðSkilnaðarEinkunn** frá **BL**andara, á meðan **ASE_SF** stendur fyrir **AðSkilnaðarEinkunn** frá **SigmálsFlæði**. Lágmarkskrafa um aðskilnaðareinkunn í blandara ASE_BL er á milli 0.4 og 0.5, eða 0.45. Lágmarkskrafa um aðskilnaðareinkunn frá sigmálsborði ASE_SF er á milli 0.5 og 0.6, eða um 0.55. Mynd 16 til vinstri sýnir ástand steypublöndu í blandara á meðan hægri myndin sýnir ástand hennar á sigmálsborði. Í báðum tilfellum er greinilega búið að fara fram úr lágmarkskröfu um stöðugleika. Athuga ber að Segrometer-4SCC er ekki ætlað að mæla slík augljós tilfelli. Tilgangur tækisins er að geta sagt til um stöðugleikann þegar erfiðara er að meta ástand steypunnar, það er þegar hún er nákvæmlega í lágmarkskröfunni eða undir henni.

Athuga ber að raunverulegt stöðugleika ástand steypunnar kemur mismunandi fram í blandara og á sigmálsborði (það er að segja, ekki eins og sýnt er í Mynd 16). Þetta kemur sérstaklega fram í Mynd 17, en þar er einmitt borin saman ASE_BL (rauðu þríhyrningarnir) við ASE_SF (bláu tígularnir). Einnig er meðalgildi þessara tveggja gilda sýnt (grænu hringirnir). Rauða lárétta línan sýnir lágmarkskröfu fyrir ASE_BL á meðan blá línan lágmarkskröfu fyrir ASE_SF.



Mynd 17: ASE_BL (rautt) og ASE_SF (blátt) sem fall af númer tilraunar (sjá Mynd 14).

Það sem er merkilegt á niðurstöðunum sýndar á Mynd 17 er að óstöðugt ástand steypu kemur fyrir fram í blandara miðað við það sem kemur fram á sigmálsborði. Það er talið að það sem sjáist í blandara sé réttara en það sem sést á sigmálsborði. Það er að segja, það er auðveldlega hægt að vanmeta ástand steypunnar ef það er einungis metið út frá sigmálsborði.



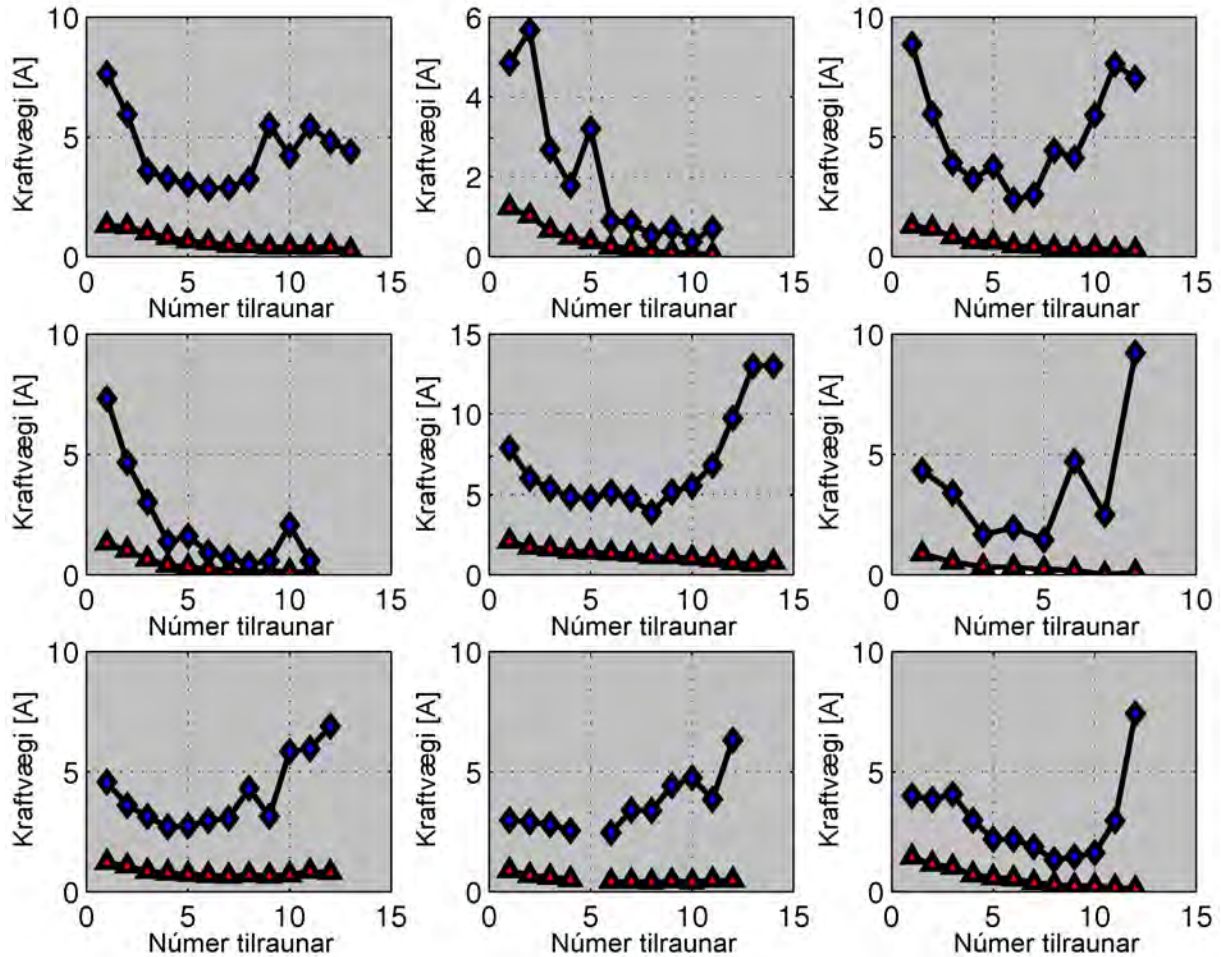
Mynd 18: Gildi ASE_SF teiknað sem fall af ASE_BL (sjá Mynd 14).

Það er, töluverður mismunur er á milli mati frá blandara og frá sigmálsborði. Á Mynd 18 má sjá gildi ASE_SF teiknað sem fall af gildi ASE_BL. Í aðeins einu tilfellanna af 9, þá er um það bil sama ASE gildið skráð frá blandara og frá sigmálsborði (miðju myndin). Almennt séð, þá er gildi ASE_SF lægra en gildi ASE_BL, en eins og áður hefur verið nefnt, þá gefur hið síðarnefnda réttari mynd af stöðugleikaástandi steypunnar.

5.3 Mælingar með Segrometer-4SCC

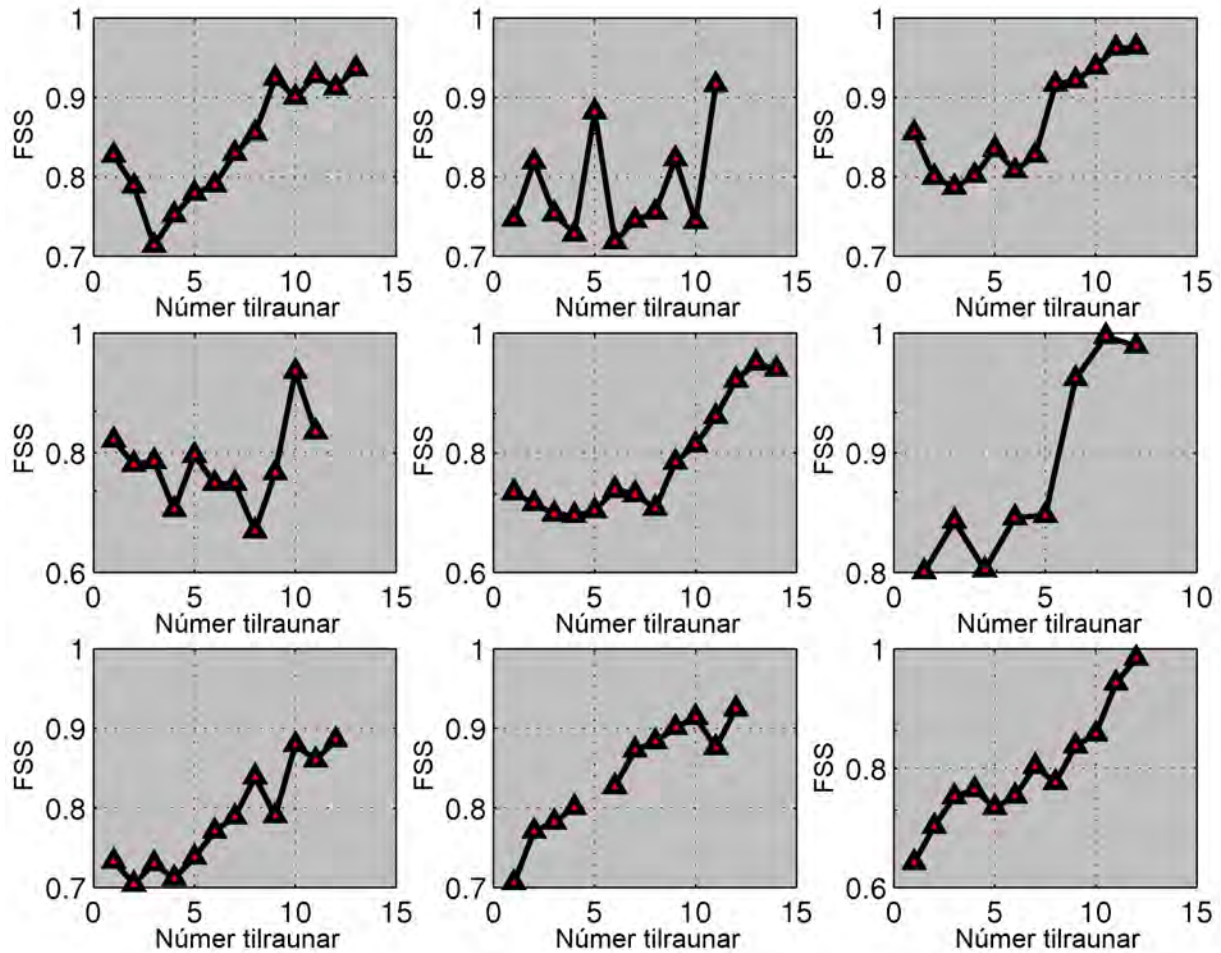
Mynd 19 sýnir mæld T_{max} og T_{min} gildi sem fall af númer tilrauna. Mynd 6 gefur lýsandi skýringu í fljótu bragði um hvað Mynd 19 er í raun að sýna. Takmarkið með þessum mælingum er að athuga

hvor 2.5 cm og/eða 5 cm lag af steypu (sjá Mynd 10) gefi kerfisbundna breytingu í T_{\max} og T_{\min} . Þetta er sérstaklega mikilvægt ef FSS Jöfnur (3) til (11) ættu að hafa eitthvað til að vinna með. Mynd 14 sýnir hvenær 2.5 cm lag er notað og hvenær 5 cm lag er notað í hverju tilfalli.



Mynd 19: T_{\max} og T_{\min} sem fall af númer tilrauna (sjá Myndir 6 og 14).

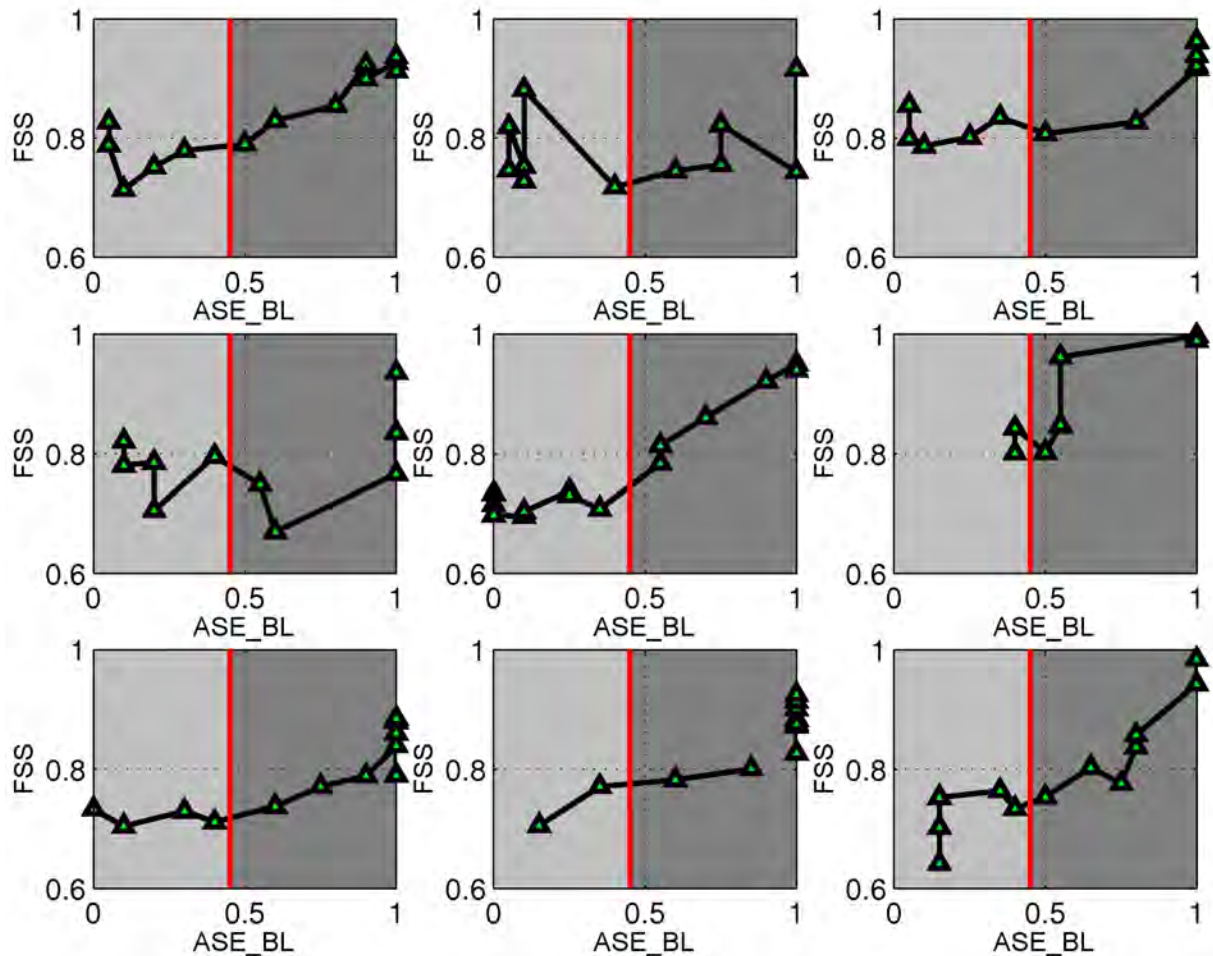
Eins og sést í Mynd 19, þá fæst ákveðin breyting í T_{\max} og T_{\min} sem fall af númer tilrauna. Ef Jafna (3) er notuð til að reikna út FSS gildi sem eru síðan einnig teiknuð sem fall af númer tilrauna, þá fæst Mynd 20. Eins og sést á síðastnefndu myndinni, þá virðast koma góðar niðurstöður. Það er að segja, oft fæst kerfisbundin aukning í FSS sem fall af númer tilrauna. Hinsvegar, ef þetta tiltekna FSS gildi (skv. Jöfnu (3)) eru teiknað sem fall af raunverulegu stöðugleikaástandi steypunnar ASE_BL (sjá Kafla 5.2), fæst Mynd 21. Rauða lóðrétta línan skilgreinir lágmarkskröfu um stöðugleika eins og nefnt er í Kafla 5.2. Af þessari mynd sést greinilega að FSS gildið reiknað samkvæmt Jöfnu (3) virka mjög illa. Það sama hefur verið rannsakað fyrir Jöfnur (4) til (11) (ekki sýnt). Almennt virðist vera að FSS gildi sem eru háð T_{\max} eða T_{\min} með einum eða öðrum móti virki mjög illa. Í raun má segja að hvorki 2,5 cm né 5 cm steypulag (sjá Mynd 10) hafi nægjanleg áhrif á T_{\max} og T_{\min} til þess að gefa nothæf áhrif fyrir FSS reikningana.



Mynd 20: FSS gildi frá Jöfnu (3), teiknuð sem fall af númer tilrauna (sjá Mynd 14).

Eitt mikilvægt atriði sem má læra af niðurstöðum sem sýndar eru á Myndum 20 og 21 er að það er alrangt að teikna FSS gildi sem fall af númer tilrauna. Þó svo að í hverju skrefi (þ.e. við aukið númer tilrauna) sé bætt við þjálnefni og/eða vatni til að auka óstöðugleikann, þá mun þjálnistap alltaf trufla samhengið á milli númer tilrauna og raunverulegt stöðugleikaástand steypunnar. Reynt hefur verið að laga þetta vandamál með notkun á sérstökum íblöndunarefnum (t.d. seinkara), en án árangurs.

Eins nefnt hefur verið að ofan (og sést á Mynd 21), þá skilgreinir rauða lóðrétta línan lágmarkskröfu um stöðugleika (sjá Kafla 5.2). Þannig að dökk gráa svæðið er ósættaleg steinsteypa sem mætti alls ekki nota í byggingaframkvæmdum.



Mynd 21: FSS gildi frá Jöfnu (3), teiknuð sem fall af stöðugleika steypunnar ASE_BL (sjá Mynd 14).

5.4 Flotfræðieiginleikar aðskilnaðar-efju: G og H gildi

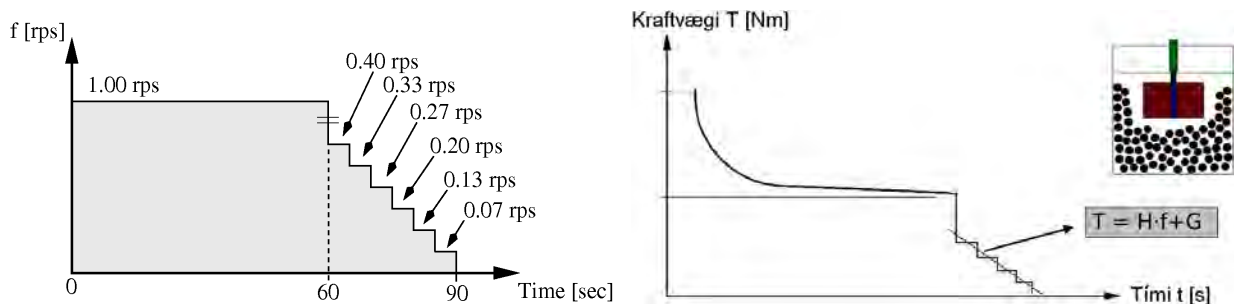
Eins og áður hefur verið nefnt, þá gengur mæling út á eftirfarandi: Mælvispan (Mynd 2) snýst við fastan snúningshraða ($f = \text{fasti}$). Samtímis og snúningurinn byrjar, þá er kraftvægi T mælt sem fall af tíma t . Í upphafi er mælt mesta kraftvægi $T = T_{\max}$ (við $t = 0$) sem síðan dvínar eftir því sem vispan þvingar aðskilnað í steypunni. Vispan mun alltaf ná að þvinga aðskilnað, óháð hversu stöðug steypa er. Við lok mælingar er gildið $T = T_{\min}$ skráð (við $t = 60$ s) sem tilsvavar minnsta mælda kraftvæginu fyrir þann tiltekna snúningshraða f sem er notaður. Gildið T_{\min} er þá tengt flotfræðieiginleikum efjunnar í steypunni, á meðan gildið T_{\max} er tengt flotfræðieiginleikum steypunnar í heild sinni (í einsleitnu ástandi). Þetta var sýnt á Mynd 3.

Auk ofangreinds ferlis, þá strax eftir að T_{\min} er fundinn við $t = 60$ s, þá er hraðinn á vispunni minnkaður í skrefum niður í 0.4 rps, og síðan í 0.33 rps, 0.27 rps, 0.20 rps, 0.13 rps, og loks niður í 0.07 rps. Þetta sést á Mynd 22 sem er í raun framhald á Myndum 3 og 6. Tímalengd hvers hraða

skrefs er 5 s, þannig að heildar tími einnar mælingar er $60 \text{ s} + 6 \cdot 5 \text{ s} = 90 \text{ s}$. Eins og Mynd 22 sýnir, þá er hægt að taka línulega bestun á tilsvareandi kraftvægis gildi. Þessi lína sést einnig á Mynd 22. Með hallatölu H og skurðpunkti G verður til kraftvægis jafnan

$$T = H \cdot f + G \quad (12)$$

Gildin tvö G og H lýsa í raun flotfræðieiginleikum þeirri efju (eða aðskildum massa) sem er í og kringum vispunar Mynd 2 (sjá einnig Mynd 22, til hægri) og ekki af steypunni í heild sinni, í einsleitnu ástandi. Þessi efja verður kölluð fyrir “aðskilnaðar-efja” hér eftir.



Mynd 22: Snúningshraði vispu sem fall af tíma (til vinstri) og mælt kraftvægi sem fall af tíma (til hægri). Síðast nefnda myndin gefur myndræna lýsing á því hvernig gildin G og H eru fengin.

Gildið G er mál á flotskerspennu τ_0 og gildið H er eitt mál á plastískum seigjustuðli μ . Hin eðlisfræðilega eining fyrir G og H eru ekki í Nm og Nm·s, heldur í A (þ.e. Ampere) og A·s. Þetta er vegna þess að mælitækið mælir kraftvægi í A, en ekki í Nm.

Það ber að hafa í huga að hið flotfræðilega ástand á aðskilnaðar-efjunni er ekki sú sama og af hreinni efju sem er á milli grófsteina í stöðugri steypu. Aðskilnaðar-efjan getur innihaldið bæði steina og sand agnir, í mismiklum mæli háð stöðugleika steypunnar. Við mjög óstöðuga steypu þá mun aðskilnaðar-efjan innihalda meira af vökva (vatni) en efjan mundi ellegar gera í stöðugri steypu.

5.5 Flotfræðilegt stöðugleikastig FSS reiknað frá G og H gildi

Í þessu verkefni hafa verið prófaðar ótal margar tegundir af FSS jöfnum sem eru fall af G og H gildi. Í raun hefur leitin eftir nothæfu FSS jöfnu verið mikil vinna með endalausum prófunum. Sú jafna sem hefur gefist best hingað til er eftirfarandi:

$$FSS = \frac{\alpha}{\sqrt{H \cdot f_m + G}} - \beta \quad (13)$$

Gildið f_m er meðal snúningshraðinn þegar gildin G og H eru mæld (sbr. Kafli 5.4) og er jafnt og $f_m = (0.40 + 0.33 + 0.27 + 0.20 + 0.13 + 0.07)/6 = 0.233$ rps. Gildin α og β eru fastar byggðir á reynslu (e. empirical constants), líkir 12 og 0.25 í þessari skýrslu ($\alpha^2 = 144$ mA og $\beta = 0.25$).

Eðlisfræðileg eining H í ofangreindri jöfnu er mA·s, á meðan eining G er mA. Eins og nefnt var í Kafli 3.2, þá mælir tækið kraftvægi í Amper [A] (*mótstöðu straumur*), en ekki í Nm eins og eðlisfræðirit segja til um. Sem dæmi um notkun á Jöfnu (13), þá ef mælt er $H = 2893$ mA·s og $G = 325$ mA, þá reiknast $FSS = 12/\sqrt{2893 \cdot 0.233 + 325} - 0.25 = 0.13$.

Í einstaka tilvikum er H gildið mælt neikvætt, sem er þá villa vegna mjög mikils óstöðugleika í steypunni. Það sama getur átt sér stað fyrir G gildið. Vegna þessa þá er notast við tölugildin af G og H . Það er að segja í forritinum sem reiknar stöðugleika, er Jafna (13) sett fram sem

$$FSS = \frac{\alpha}{\sqrt{|H| \cdot f_m + |G|}} - \beta$$

Þó svo að Jafna (13) er byggð á reynslu, þá er ákveðin eðlisfræðilegur grunnur í henni sem verður nú lýst:

Eins og lýst var í Kafli 3.2, þá þýðir $FSS = 0$ stöðuga SÚL steypu. Ef þetta ástand er sett í Jöfnu (13) að ofan, þá fæst eftirfarandi:

$$FSS = \frac{\alpha}{\sqrt{H \cdot f_m + G}} - \beta = 0 \tag{14}$$

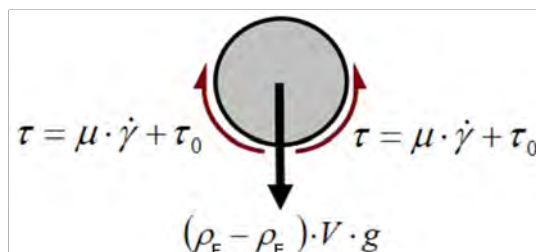
Ofangreinda jöfnu er hægt að umskrifa yfir í...

$$\frac{\alpha}{\sqrt{H \cdot f_m + G}} = \beta \quad \Rightarrow \quad \frac{\alpha}{\beta} = \sqrt{H \cdot f_m + G} \tag{15}$$

...sem leiðir til...

$$\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2 = H \cdot f_m + G \tag{16}$$

Jafna (16) gildir þá við $FSS = 0$.



Mynd 23: Jafnvægisástand einnar fylliefnisögn með efju í kringum sig.

Ef hugsað er út í jafnvægisástand einnar fylliefnisagnar með efju í kringum sig eins og sýnt er á Mynd 23, þá höfum við eftirfarandi jöfnu:

$$(\rho_F - \rho_E) \cdot V \cdot g = (\mu \cdot \dot{\gamma} + \tau_0) \cdot A \quad (17)$$

Það er, ofangreind jafna er mynduð út frá jafnvægi milli Buoyancy kraftsins (frá lögmáli Arkimedes), þyngdarkraft fylliefnis og skerspennu kraftsins. Stærðirnar ρ_F , ρ_E , V , A og g eru eðlisþyngd fylliefnis, eðlisþyngd efjunnar (og/eða eðlisþyngd aðskilnaðar-efju), rúmmál fylliefnis agna, yfirborðsflatarmál þess og þyngdarkrafturinn. Stærðirnar μ , $\dot{\gamma}$ og τ_0 er plastíski segjustuðullinn, skerhraðinn og flotskerspenna efjunnar (og/eða eðlisþyngd aðskilnaðar-efju) sem umlykur fylliefnið.

Við fullkominn stöðugleika $FSS = 0$, þá verður áhrifin frá skerspennu og Buoyancy áhrifin að vera stærri en þyngdarkraftur fylliefnis. Þessu er lýst með eftirfarandi jöfnu,...

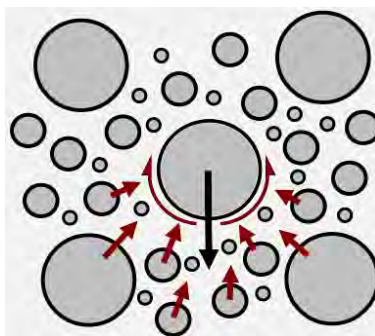
$$(\rho_F - \rho_E) \cdot V \cdot g < (\mu \cdot \dot{\gamma} + \tau_0) \cdot A \quad (18)$$

...sem er hægt að umskrifa yfir í eftirfarandi...

$$k \cdot (\rho_F - \rho_E) \cdot \frac{V}{A} \cdot g = \mu \cdot \dot{\gamma} + \tau_0 \quad (19)$$

þar sem $k > 1$. Þegar $k = 1$ í ofangreindri jöfnu, þýðir það að skerspennukrafturinn og Buoyancy áhrifin ná rétt svo að jafnast út við áhrifum þyngdarkraftsins. Það er að segja, það þarf ekki mikið til svo að þyngdarkrafturinn byrji að ná yfirhöndinni og fylliefnis kornið byrjar að sökkva. Þetta ástand myndi tilsvara til dæmis $FSS = 0.25$.

Einn áhrifaþátturinn sem hefur ekki verið tekið með í Jöfnu (19) er svokallað “confinement effect” á ensku (einnig kallað fyrir “lattice effect” [5]). Lýsing á þessu fyrirbæri er sýnt á Mynd 24.



Mynd 24: Myndræn lýsing á áhrifum “confinement effect”.

Confinement effect (innlokunaráhrifum) er lýst þannig að fylliefni af bæði stórum og litlum ögnum vinna á móti þess að tiltekinn ögn sökkvi. Það er, kerfið samanstendur ekki af einungis einni fylliefnis ögn með efju, heldur mörgum fylliefniskornum sem í sameiningu hjálpa til með að

viðhalda stöðugleika steypunnar. Þessi áhrif eru háð kornakúrfu, yfirborðs eiginleika, rúmmáls eiginleikar (angularity, aspect ratio, etc.). Þessi áhrif verða lýst með stuðlinum ξ .

Ef áhrif *confinement effect* er haft með í Jöfnu (19), þá fæst eftirfarandi:

$$k \cdot (\rho_F - \rho_E) \cdot \frac{V}{A} \cdot g = (\mu \cdot \dot{\gamma} + \tau_0) + \xi \quad (20)$$

Hægt er að segja að vinstri hlið Jöfnu (20) reynir að koma á ójafnvægi á meðan hægri hliðin hjálpar til með stöðugleika. Þessa jöfnu má umskrifa yfir í...

$$k \cdot (\rho_F - \rho_E) \cdot \frac{V}{A} \cdot g - \xi = \mu \cdot \dot{\gamma} + \tau_0 \quad (21)$$

Jafna (21) lýsir jafnvægisástandi fyrir stöðugleika steinsteypu. Eins og nefnt hefur verið áður, þá fyrir $k > 1$, þá gildir $FSS = 0$. Þar sem Jafna (16) lýsir einnig stöðugleika steinsteypunnar við $FSS = 0$ þá eru Jöfnur (21) og (16) jafngildar, nokkuð sem er lýst með Jöfnu (22) að neðan.

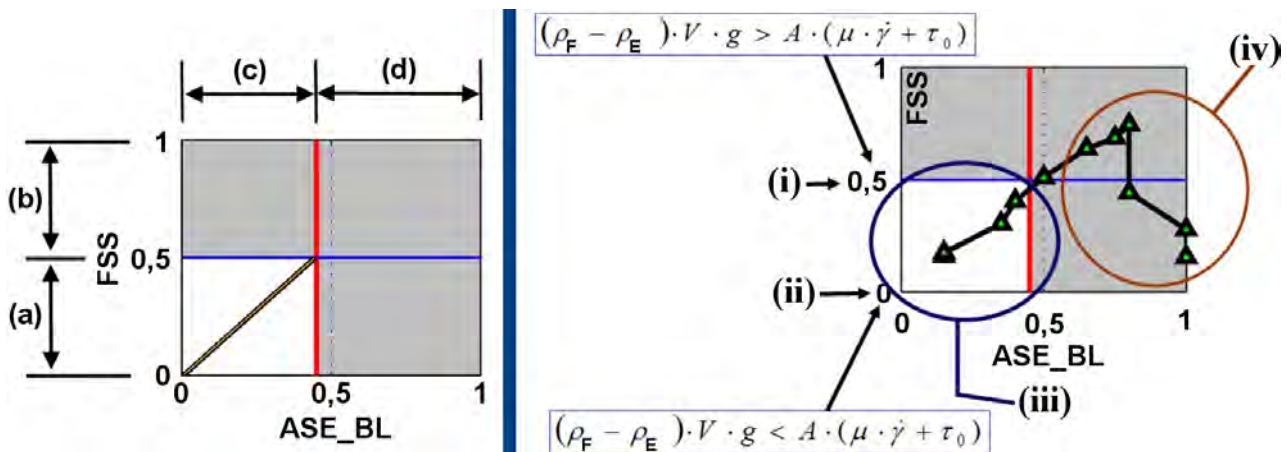
$$\underbrace{k \cdot (\rho_F - \rho_E) \cdot \frac{V}{A} \cdot g - \xi}_{\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2} = \underbrace{\mu \cdot \dot{\gamma} + \tau_0}_{H \cdot f_m + G} \quad (22)$$

Það sem má lesa út úr ofangreindri jöfnu er að reynslufastarnir α og β innihalda bæði (að minnsta kosti) áhrif Buoyancy og svo einnig fyrrgreinds *confinement effect*, með áhrifum þyngdarkraftsins. Mergur málsins er að α og β eru háð mismunandi efniseiginleikum steypunnar með tillit til aðskilnaðar og stöðugleika. Vonin er sú að þessir tveir reynslufastar breytist ekki mikið frá einni steypu tegund til hins næsta, þannig að Jöfnu (13) mætti nota á svo til allar SÚL steypur.

5.6 Lýsing á FSS korti

Áður en farið er í gegnum niðurstöður mælinga þar sem Jafna (13) er notuð, þá þarf að fara stuttlega í gegnum hvernig niðurstöðurnar eru settar fram og hvað er mikilvægt og ekki mikilvægt í þessu samhengi.

Niðurstöðurnar í Kafla 5.7 verða settar fram með svo kölluðu FSS korti. Lýsing á slíku korti er gert í Mynd 25. Á x-ásnum er aðskilnaðareinkunn frá blandara ASE_BL, á meðan FSS gildið reiknað samkvæmt Jöfnu (13) er á y-ásnum. Eins og sést á Mynd 25, þá er FSS kort upp deilt í fjögur hólf. Mikilvægasta hólfid er í ASE_BL frá 0 til 0.45 (x-ásinn) og FSS frá 0 til 0.5 (y-ásinn). Þetta svæði er merkt með (iii) á hægri hlið Mynd 25.



Mynd 25: Uppsetningu á svokallaðri FSS-korti.

Svæðin (a), (b), (c) og (d) á vinstri hlið Myndar 25 lýsa eftirfarandi:

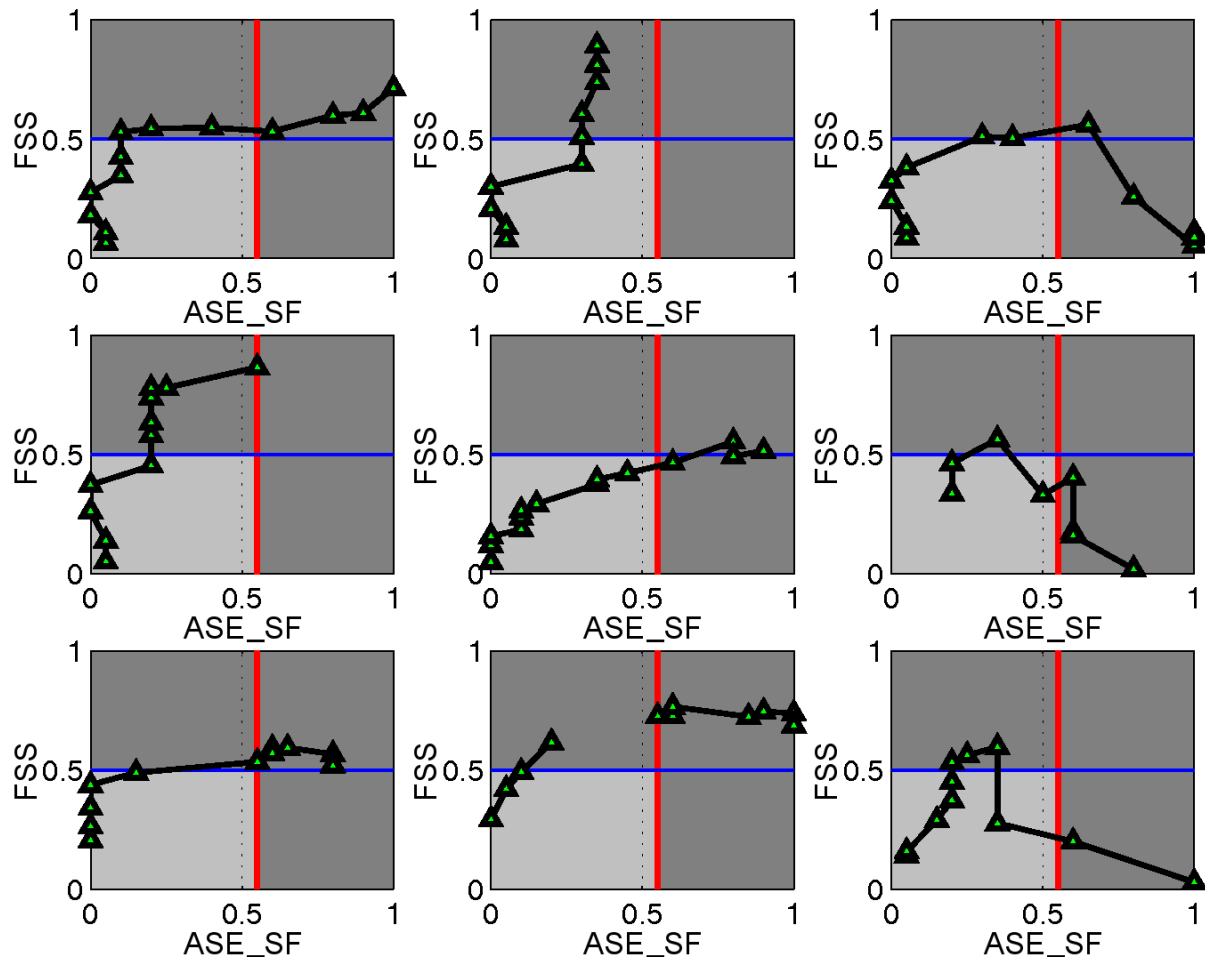
- (a) FSS gildi frá 0 til 0.5 stendur fyrir steypu sem er nógu stöðug til notkunar á byggingarstað. Eftir því sem FSS gildið nálgast 0.5 verður steypan meira krítísk (ónothæfari).
- (b) FSS gildi frá 0.5 til 1 samsvarar steypu sem er það óstöðug að hún er skilgreind sem ónýt.
- (c) ASE_BL gildi frá 0 til 0.45 lýsir steypu sem er nógu stöðug til notkunar á byggingarstað. Á þessu svæði er erfitt að dæma steypuna út frá útliti hennar, og er þetta svæði þess vegna áhugasviðið með tillit til mælitækisins Segrometer-4SCC. Með öðrum orðum, það er mikilvægt að fá góða niðurstöðu með mælitækinu á þessu svæði.
- (d) Augljóslega óstöðug og ónýt steypa. Þar sem það er auðvelt að dæma steypuna ónothæfa á þessu sviði, þá þarf ekki mælitæki til að greina það. Það er að segja, að fá góða samsvörun frá mælitækinu hér er minna mikilvægt en í lið (c) að ofan.

Svæðin (i), (ii), (iii) og (iv) á hægri hlið Myndar 25 lýsa eftirfarandi:

- (i) FSS = 0.5. SÚL steypan er á mörkunum að vera nothæft byggingarefni. Smávægilegar breytingar í magni þjáltniefnis eða raka getur fljótt gert hana ónothæfa.
- (ii) FSS = 0. SÚL steypan er mjög stöðug. Til þess að gera hana óstöðuga, þá þarf mikið magn þjáltniefnis eða raka.
- (iii) Þetta svæði er mikilvægast. Hér er erfiðast að dæma steypuna án sérstaks mælitækis, og þar að leiðandi mikilvægasta hólfíð fyrir Segrometer-4SCC.
- (iv) Að mælitækið Segrometer-4SCC gefi villandi niðurstöðu í þessu hólfí er í lagi, þar sem steypan er augljóslega ónothæf. Mælitækið er hannað fyrir að gefa niðurstöðu þegar erfitt er að meta hana.

5.7 Niðurstöður FSS sem fall af ASE gildi

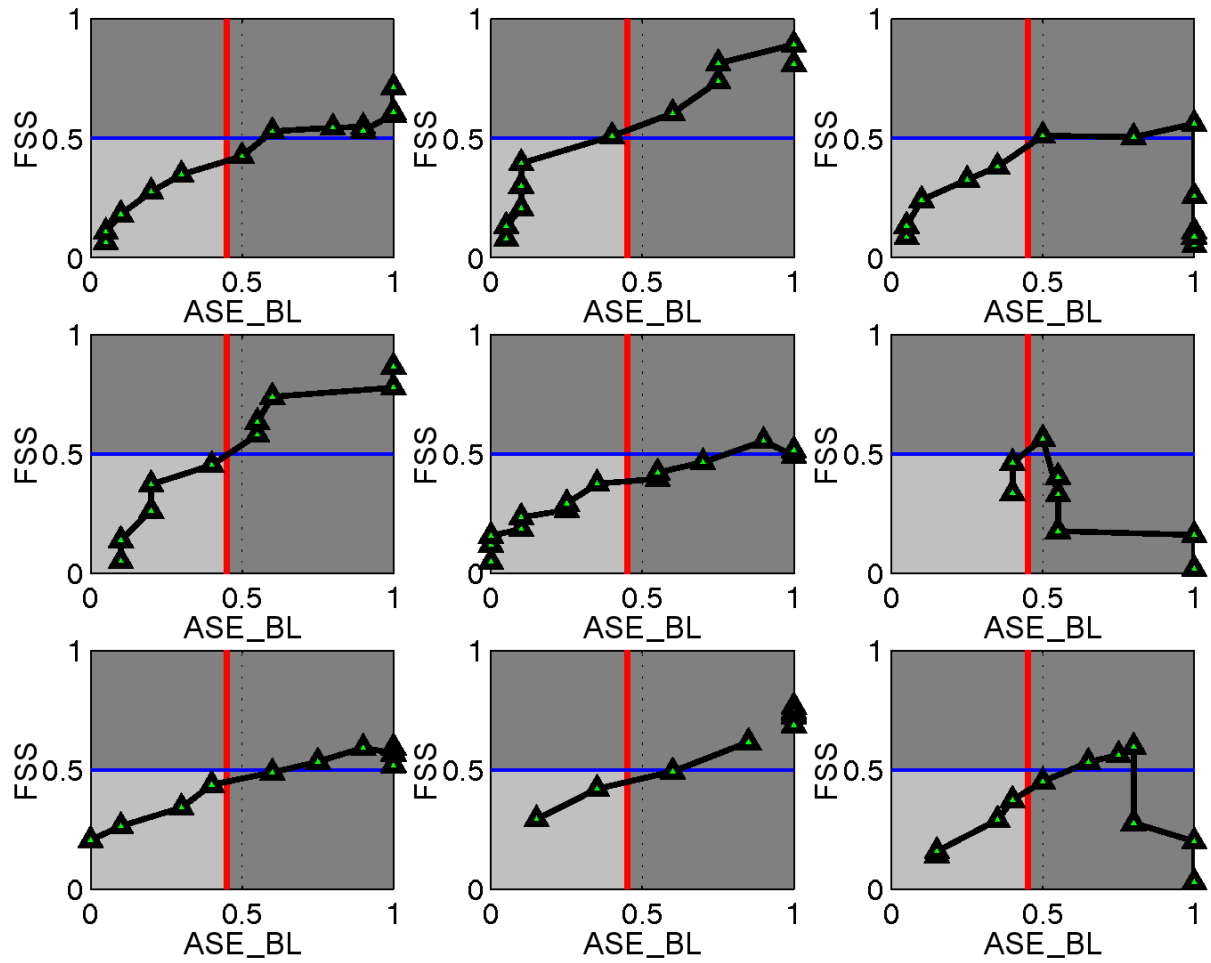
Mynd 26 sýnir FSS niðurstöður (reiknað skv. Jöfnu (13)) á móti aðskilnaðareinkunn frá sigmálsborði ASE_SF. Eins og sést, þá eru niðurstöðurnar ekki neitt sérlega góðar, og aðeins í fá tilfalli eru niðurstöðurnar nothæfar. Eins og sést í Kafla 5.2 þá er greinilegur munur á einkunnargjöf gefnar út frá blandara (ASE_BL) og gefnar út frá sigmálsborði (ASE_SF).



Mynd 26: FSS gildi frá Jöfnu (3), teiknuð sem fall af stöðugleika steypunnar ASE_SF (sjá Mynd 14).

Þar sem það er talið að ASE_BL gefi réttara til kynna um ástand steypunnar miðað við ASE_SF (sbr. Kafla 5.2) þá er hin slæma niðurstaða sem er sýnd á Mynd 26 ekki svo alvarleg. Það er að segja, þar sem það er auðveldlega hægt að vanmeta ástand steypunnar ef það er einungis metið út frá sigmálsborði (sem gefur slæm ASE_SF gildi) þá er það ekki krafa að niðurstaða Myndar 26 sé góð.

Mynd 27 sýnir FSS niðurstöður (reiknað skv. Jöfnu (13)) á móti aðskilnaðareinkunn frá blandara ASE_BL. Eins og sést, þá eru niðurstöðurnar mjög góðar.



Mynd 27: FSS gildi frá Jöfnu (13), teiknuð sem fall af stöðugleika steypunnar ASE_BL (sjá Mynd 14).

Í næsta kafla, þá verða niðurstöður Myndar 27, og niðurstöður þriðju tilraunaseríu skoðaðar og bornar saman.

6. Niðurstöður þriðju tilrauna

Eins og kom fram í Kafla 5.7, þá virkar Jafna (13) mjög vel sem formúla fyrir FSS og þá a.m.k. fyrir aðra tilraunaseríu. Þessi jafna er háð G og H gildum hins aðskilda massa. Markmið með þriðju tilraunaseríu er að athuga enn frekar ágæti Jöfnu (13) sem formúlu fyrir FSS, og þá með því að nota nýjar steypugerðir.

6.1 Tilraunaruppsetning

Í þessum hluta eru þrjár nýjar steypublöndur notaðar, og sýndar í Töflu 5, og eru kallaðar fyrir Grunnblöndur 4, 5 og 6 (Grunnblöndur 1 og 2 eru sýndar í Töflu 1, á meðan Grunnblanda 3 er í Töflu 2). Grunnblöndur 4, 5 og 6 voru bættar við til að fjölga tegunda steinsteypu í verkefninu þannig að betri gagnagrunnur náist við greiningu á gögnum frá tækinu Segrometer-4SCC.

Blanda 4:		Blanda 5:		Blanda 6:	
Efni	kg/m ³	Efni	kg/m ³	Efni	kg/m ³
Sement (ANLFA)	390	Sement (ANLFA)	390	Sement (ANLFA)	390
Kísilryk	20	Kísilryk	20	Kísilryk	20
Vatn	163	Vatn	163	Vatn	163
Sandur (Árdal)	1044	Sandur (Árdal)	1059	Sandur (Árdal)	1049
Fylliefni 5.6-16 (Eklogitt)	377	Fylliefni 8 – 16 (Árdal)	363	Fylliefni 8 – 16 (Árdal)	360
Fylliefni 16-22 (Eklogitt)	423	Fylliefni 16 – 22 (Árdal)	302	Fylliefni 16 – 22 (Árdal)	300
Sika Viscocrete HT 250	5.07	Sika Viscocrete HT 250	5.07	Sika Viscocrete HT 250	5.08
Sika AER (1:9)	1.95	Sika AER (1:9)	1.37	Sika AER (1:9)	1.37
Sika 4R	0.98	Sika 4R	0.98	Sika 4R	0.98
Plast trefjar	0	Plast trefjar	0	Plast trefjar	5.01
Eðlisþyngd (kg/m ³)	2427.4	Eðlisþyngd (kg/m ³)	2304.2	Eðlisþyngd (kg/m ³)	2294.2

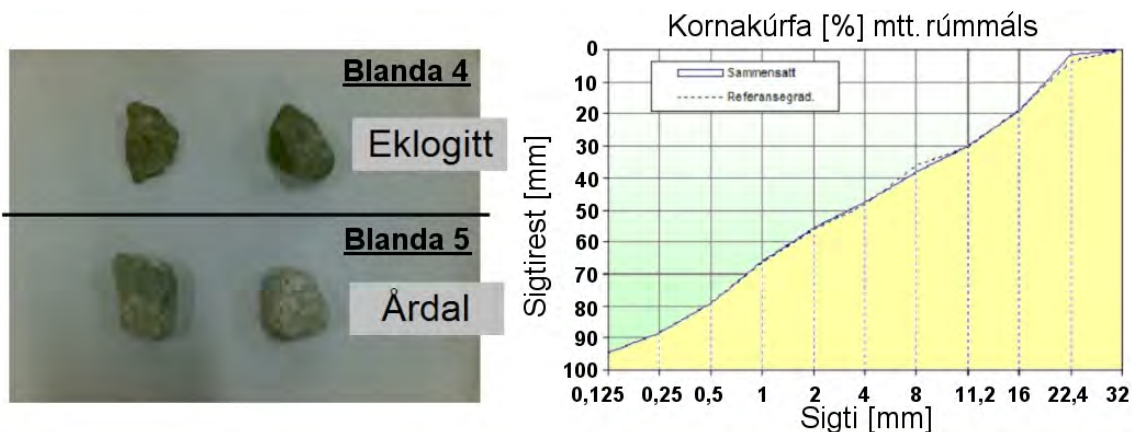
Tafla 5: Grunnblöndur 4 til 6 (Grunnblöndur 1 til 3 eru sýndar í Töflum 1 og 2).

Einkenni Grunnblandna 4 og 5 er að þær hafa hærra sigmálsflæði (SF) við fullan stöðugleika (þ.e. við FSS = 0) en áður gilt verið fyrir Grunnblöndur 1 til 3. Auk þessara tveggja, þá er ein steypublanda prófuð til viðbótar með 0.6% af plasttrefjum og er kölluð Grunnblanda 6.

Fyrir utan tegunda grófra fylliefna, þá eru Grunnblöndur 4 og 5 alveg eins. Grunnblanda 4 er með svo kölluðu Eklogitt fylliefni, en eðlisþyngd þess er 3120 kg/m³ (“bone dry”) nokkuð sem er hærra en venjulega gerist fyrir fylliefni. Eðlisþyngd Árdal fylliefnis er á 2650 kg/m³ (“bone dry”) nokkuð sem er dæmigert fyrir fylliefni sem eru almennt notuð í steinsteypu. Eins og sést á Mynd 28, þá er kornakúrfan fyrir Grunnblöndu 4 og 5 eru alveg eins m.t.t. rúmmáls. Með þessu er vonast til að mismunurinn liggja einvörðungu í eðlismassa grófra fylliefna og þannig hægt verði að rannsaka

áhrif eðlismassa fylliefna. Meiri eðlisþyngd Eklogitt á móti Árdal, ætti að ýta undir meiri aðskilnað.

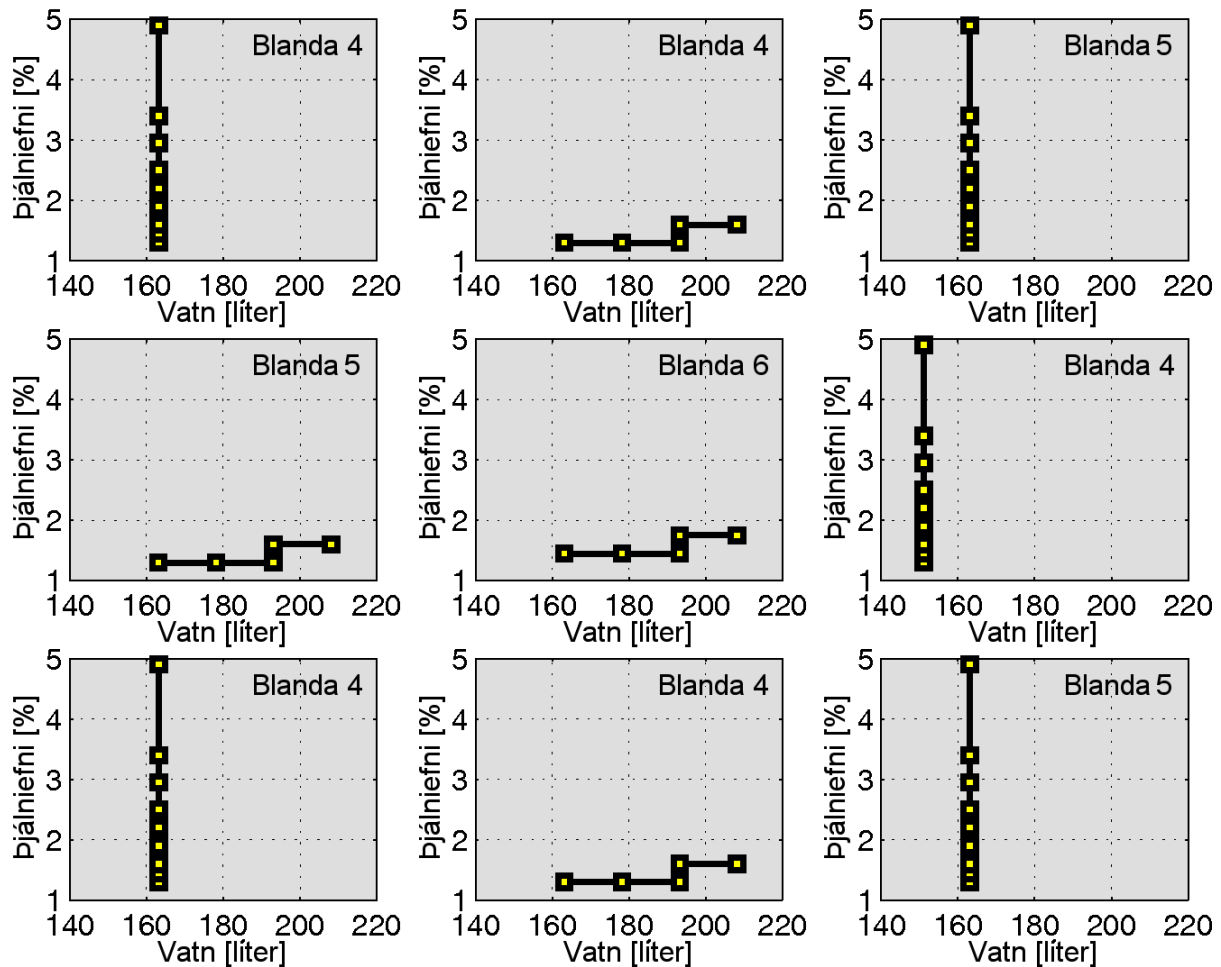
Vinstri hlið Mynd 28, sýnir greinilega að Eklogitt steinarnir eru aðeins meir kantaðir miðað við Árdal steinanna. Þetta er nokkuð sem getur truflað samanburðinn með tillit til eðlisþyngd fylliefnanna. En áhrif þessa mismunar gæti að hluta til verið mótvirkað vegna mismun í kant-eiginleikar þessa tveggja fylliefna, nokkuð sem gæti leitt til þeirra sömu α og β gilda fyrir bæði Eklogitt og Árdal (sjá Jöfnu (13)).



Mynd 28: Kant-leiki Árdal og Eklogitt fylliefnanna (til vinstri). Heildar kornakúrfa fyrir Grunnblöndur 4 og 5 með tillit til rúmmáls (til hægri).

Mynd 29 sýnir tilraunauppsetninguna sem var keyrð fyrir þriðju tilraunaseríu. Þar má sjá hvernig mismunandi magni af þjáltniefni (e. superplasticizer) er bætt við hverja steinsteypu og svo mismunandi magni af vatni. Eins og áður hefur verið nefnt, þá eru þessum efnum bætt við til að auka óstöðugleika steypunnar í skrefum. Eins og þegar hefur verið nefnt í Kafla 5, þá hefur eitt vandamál í tengslum við þetta verið að þjáltnistap hefur unnið á móti óstöðugleikanum. Þetta á sérstaklega við þegar steypan var gerð óstöðug með vatni. Það er að segja, stöðugleiki steinsteypunnar gat verið sá sami fyrir og eftir vatnsviðbót hreinlega vegna mikils þjáltnistaps (u.þ.b. 10 mínútur eru á milli mælinga). Lausn á þessu vandamáli var að bæta við þjáltniefni einu sinni í sömu seríunni. Þetta sést á Mynd 29.

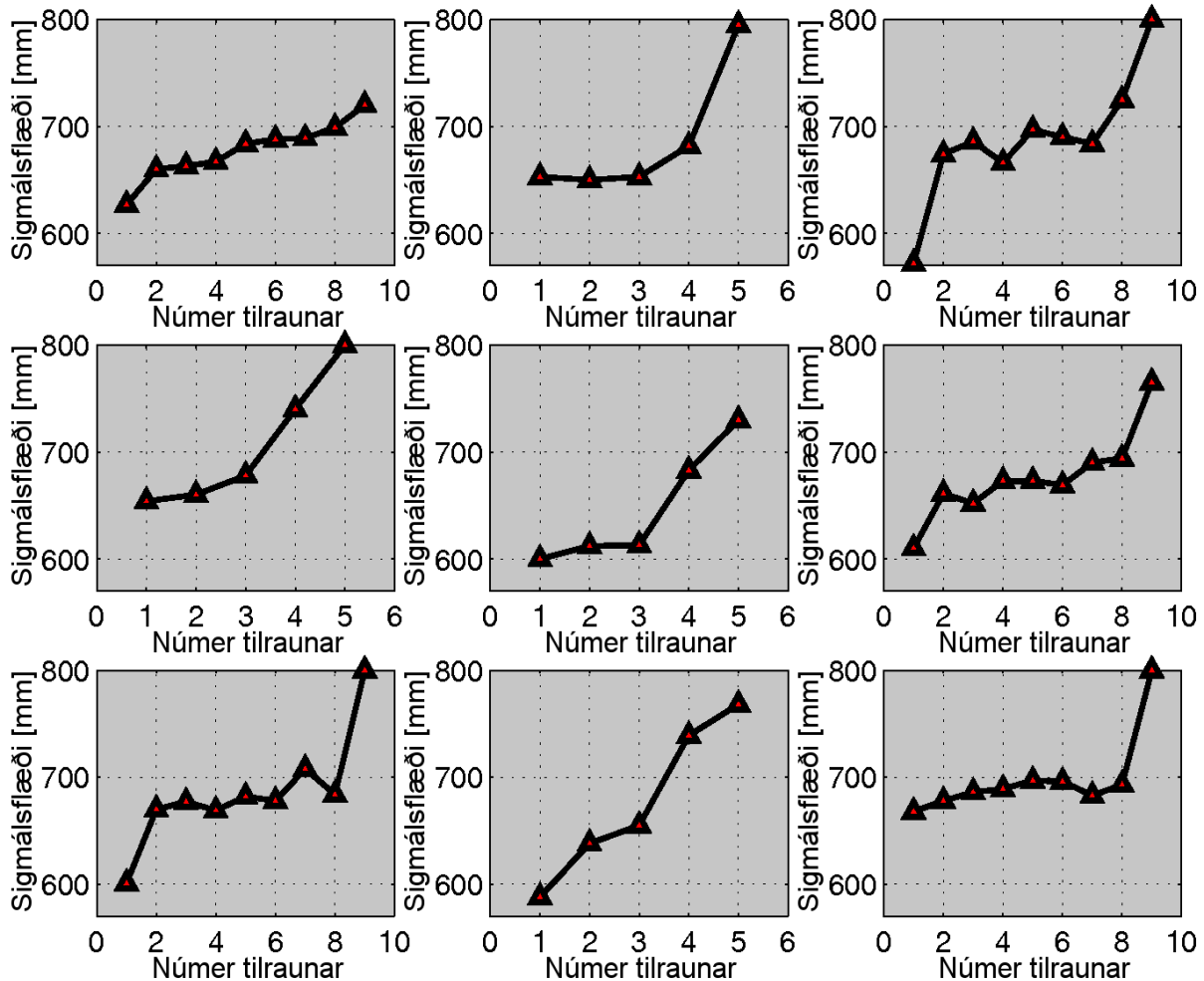
Athuga ber að allar niðurstöður sem eru héðan í frá sýndar í Kafla 6, tilsvara Mynd 29. Til dæmis, ef lítið er á Mynd 29, efst til vinstri, þá tilsvavar sú niðurstaða uppsetningunni sem er sýnd efst til vinstri á Mynd 30 (þ.e. í þessu tilfalli er verið að mæla sigmálsflæði sem fall af aukinni notkun af þjáltniefnis).



Mynd 29: Tilraunaruppsetning fyrir blöndur 4, 5 og 6 (sjá Töflu 5).

6.2 AðskilnaðarEinkunn (ASE)

Eins og sést á Mynd 15, þá er byrjunargildi sigmálsflæðis fyrir Grunnblöndur 1 til 3 yfirleitt fyrir neðan 400 mm (með einni undantekningu þó). Þar sem markmið þriðju tilraunaseríu er að athuga betur ágæti Jöfnu (13) sem formúlu fyrir FSS, þá var talið betra að notast við nýja gerð steinsteypu sem náði að halda stöðugleika ($FSS=0$) við herra sigmálsflæði (SF). Í þessu samhengi, þá var markmiðið fyrst of fremst að hafa aðra gerð steinsteypu, en Grunnblöndur 1 til 3 (það hefði þess vegna mátt taka skrefið í hina áttina, þ.e. gera stífari steinsteypu, en það skref hefði leitt til að minna væri um steypur með sjálfútleggjandi eiginleika). Eins og Mynd 30 sýnir, þá eru byrjunargildi sigmálsflæðis fyrir nýju blöndurnar, Grunnblöndur 4 til 6, yfirleitt yfir 600 mm.

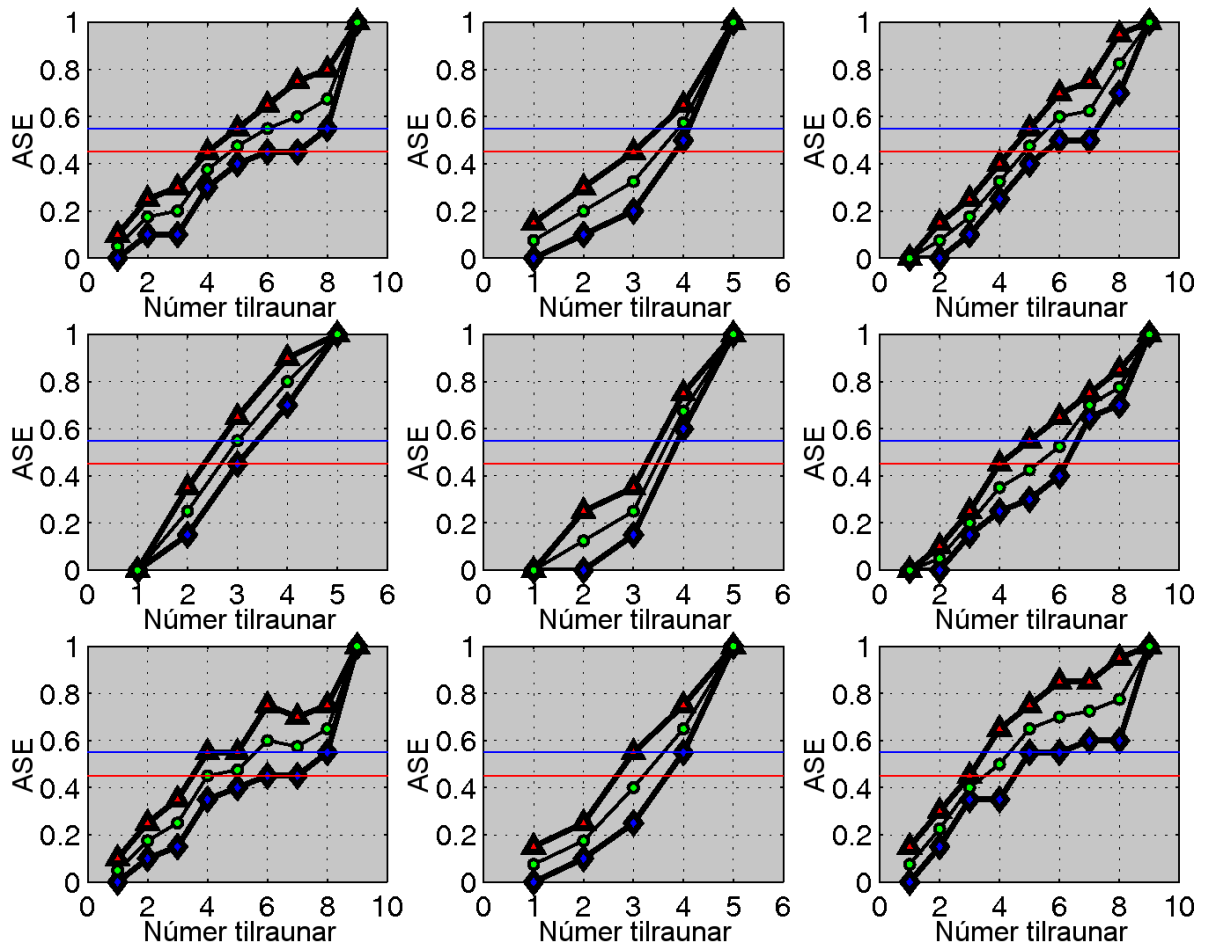


Mynd 30: Sigmálsflæði (SF) sem fall af númer tilrauna (sjá Mynd 29).

Mynd 30 sýnir sigmálsflæði og voru þessar mælingar gerðar fyrst og fremst til að meta stöðugleika steypunnar á sigmálsborðinu ASE_SF samkvæmt Kafla 5.2, Töflu 4 (sjá einnig Mynd 16). Samhliða þessu var gert einnig stöðugleikamat á steypunni í blandara ASE_BL samkvæmt Töflu 3 (sjá einnig Mynd 16). Afrakstur þessara tveggja niðurstaðna má sjá á Mynd 31, þar sem ASE_BL (rauðu þríhyrningarnir) er borin saman við ASE_SF (bláu tígularnir). Einnig er meðalgildi þessara tveggja gilda sýnt (grænu hringirnir). Rauða lárétta línan sýnir lágmarkskröfu fyrir ASE_BL á meðan bláa línan lágmarkskröfu fyrir ASE_SF (eins og áður hefur komið fram, þá stendur ASE_BL fyrir AðSkilnaðarEinkunn frá BLandara, á meðan ASE_SF stendur fyrir AðSkilnaðarEinkunn frá SigmálsFlæði).

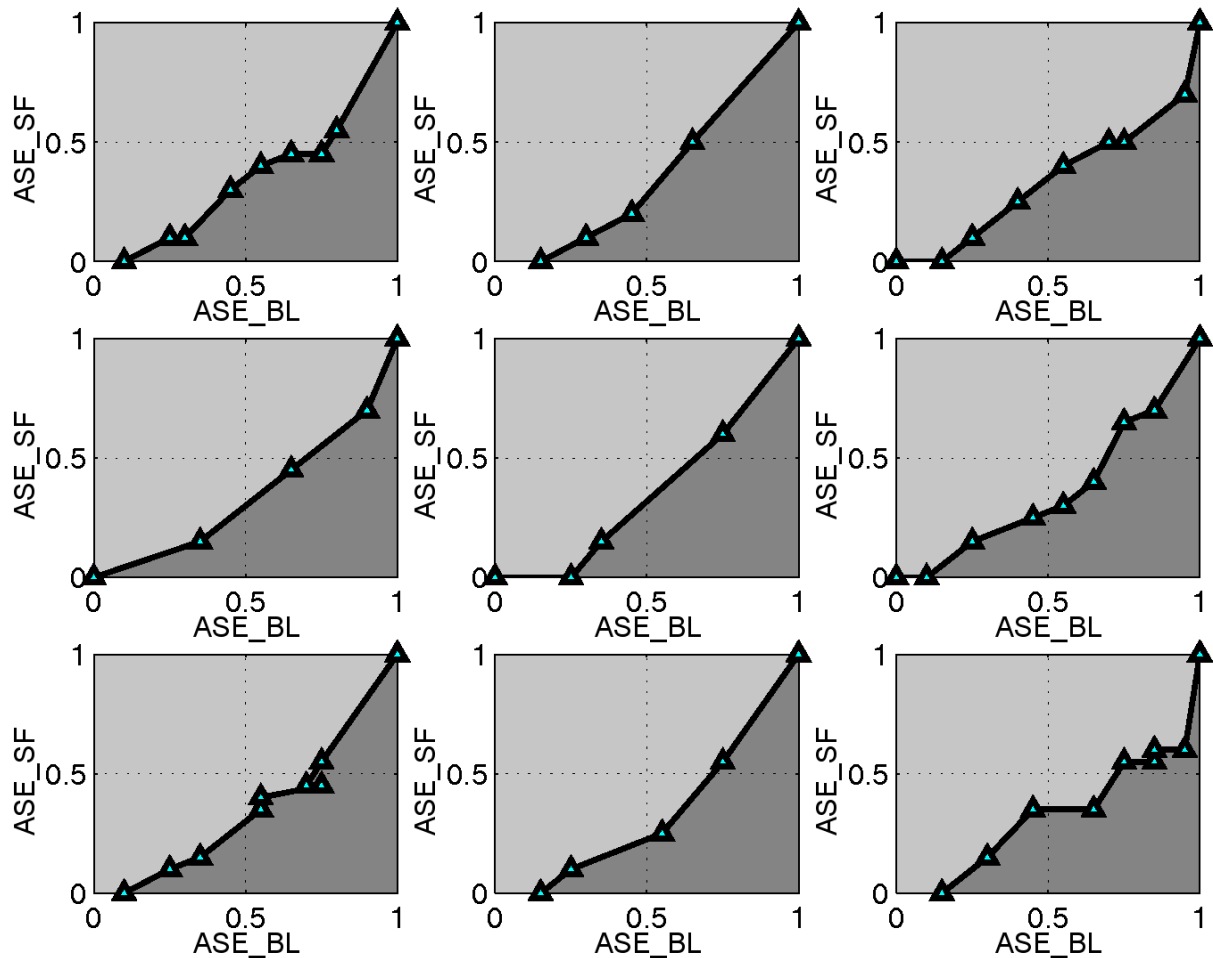
Eins og sést á Mynd 31, þá kemur stöðugleika ástand steypunnar mismunandi fram í blandara og á sigmálsborði og fékkst samskonar niðurstaða fyrir Grunnblöndur 1 til 3 eins og sést á Mynd 17. Það er að óstöðugt ástand steypu kemur fyrr fram í blandara miðað við það sem kemur fram á sigmálsborði. Talið er að það sem sjáist í blandara sé réttara en það sem sést á sigmálsborði. Það er

að segja, það er auðveldlega hægt að vanmeta ástand steypunnar ef það er einungis metið út frá sigmálsborði.



Mynd 31: ASE_BL (rautt) og ASE_SF (blátt) sem fall af númer tilraunar (sjá Mynd 29).

Það er, töluverður mismunur er á mati frá blandara og frá sigmálsborði. Á Mynd 32 má sjá gildi ASE_SF teiknað sem fall af gildi ASE_BL. Almennt séð, þá er gildi ASE_SF lægra en gildi ASE_BL og fékkst þessi niðurstaða einnig fyrir Grunnblöndur 1 til 3 (sjá Mynd 18).

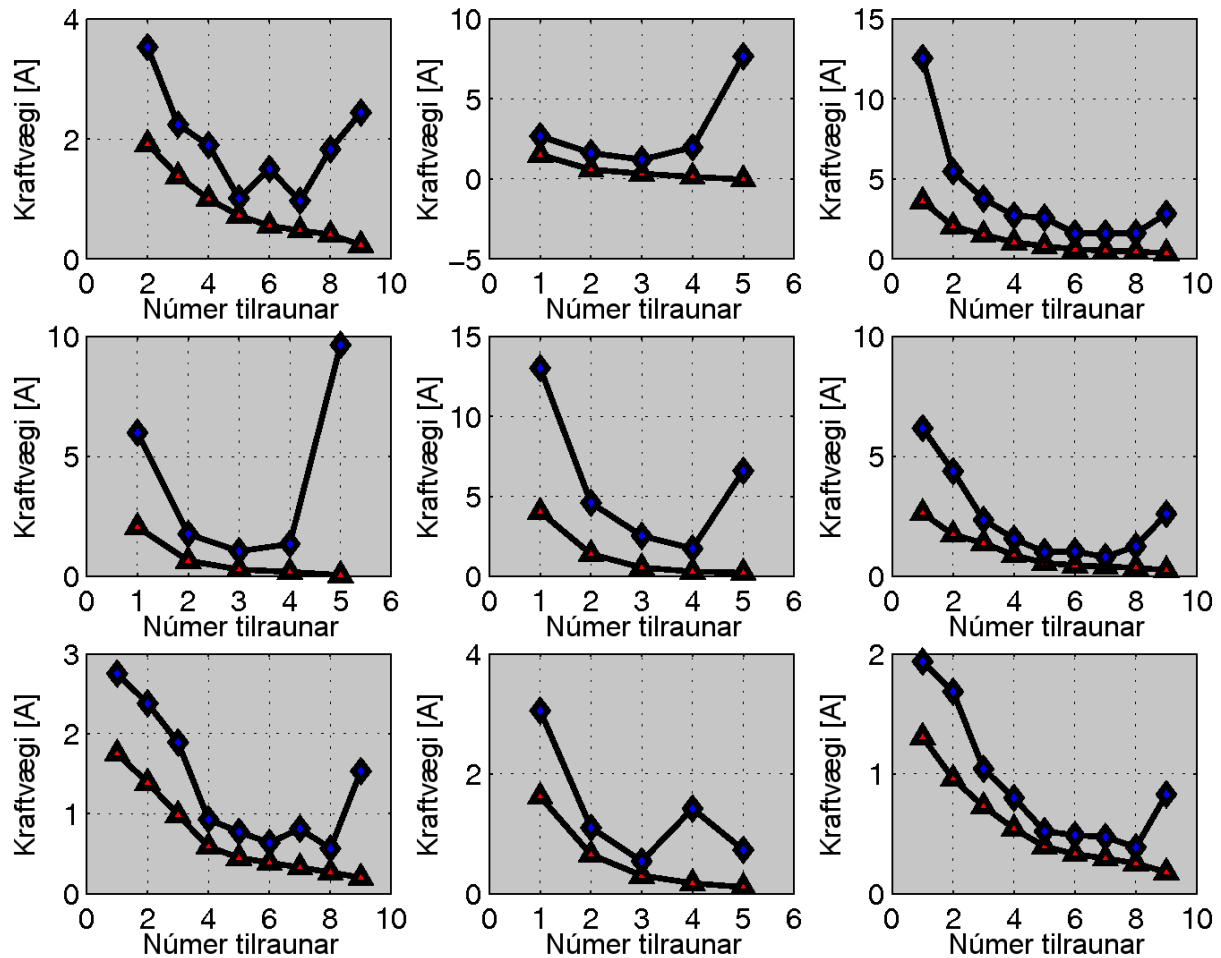


Mynd 32: Gildi ASE_SF teiknað sem fall af ASE_BL (sjá Mynd 29).

6.3 Mælingar með Segrometer-4SCC

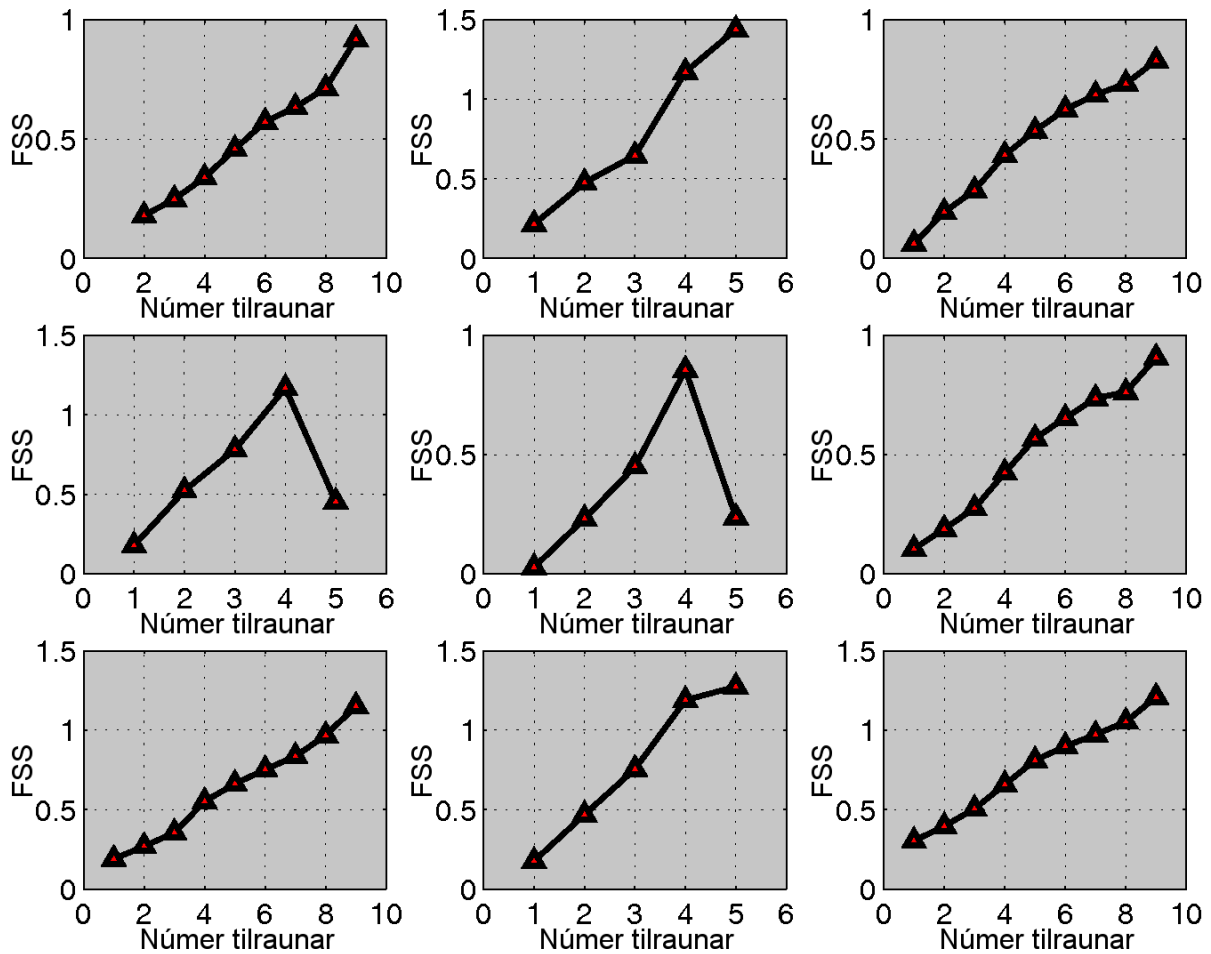
Mynd 33 sýnir mæld T_{\max} og T_{\min} gildi sem fall af númer tilrauna. Mynd 6 gefur lýsandi skýringu í fljótu bragði um hvað Mynd 33 sýnir í raun. Takmarkið með þessum mælingum er að athuga hvort hægt sé að fá kerfisbundna og nothæfa breytingu í T_{\max} og T_{\min} . Þetta er sérstaklega mikilvægt ef FSS Jöfnur (3) til (11) ættu að hafa eitthvað til að “vinna með”.

Eins og sést í Mynd 33, þá fæst ákveðin breyting í T_{\max} og T_{\min} sem fall af númer tilrauna. Hinsvegar er þessi breyting ekki nógu skilmerkileg að hægt sé að nota T_{\max} og T_{\min} í FSS reikninga. Þetta kemur sérstaklega fram þegar FSS reikningar með T_{\max} og T_{\min} eru teiknaðir á móti ASE_BL. Samsvarandi niðurstaða fæst eins og sýnd er á Mynd 21, fyrir Grunnblöndur 1 til 3.



Mynd 33: T_{\max} og T_{\min} sem fall af númer tilrauna (sjá Myndir 6 og 29).

Þegar FSS gildi samkvæmt Jöfnu (13) er teiknuð sem fall af númer tilrauna, fæst Mynd 34. Í þessari mynd fæst mjög góð og kerfisbundin niðurstaða. Jafnvel þó að þessi niðurstaða líti vel út, þá er hún í raun ónothæf. Þetta er vegna þess að það er ekki beint sambengi á milli númer tilraunar og hinn raunverulega stöðugleikaástand steypunnar. Þó svo að aukning í notkun þjálnefnis/vatns eigi sér stað við aukið tilraunanúmer, þá mun þjálnistap ávalt trufla tengingu þess við raunverulegan stöðugleika. Hið réttara er að teikna gildi FSS Jöfnu (13) á móti gildi ASE_BL og er það gert með Mynd 35. Í þessu verkefni hefur FSS verið einnig teiknað á móti ASE_SF (ekki sýnt), en slíkt gaf mun verri niðurstöðu en sýnd er á Mynd 35 (sjá Mynd 26 fyrir Grunnblöndur 1 til 3). En þar sem ASE_SF gefur verr til kynna um eiginlegt stöðugleikaástand steypunnar en ASE_BL, þá er það fyrst og fremst gildi FSS teiknað á móti ASE_BL sem er mikilvægast.



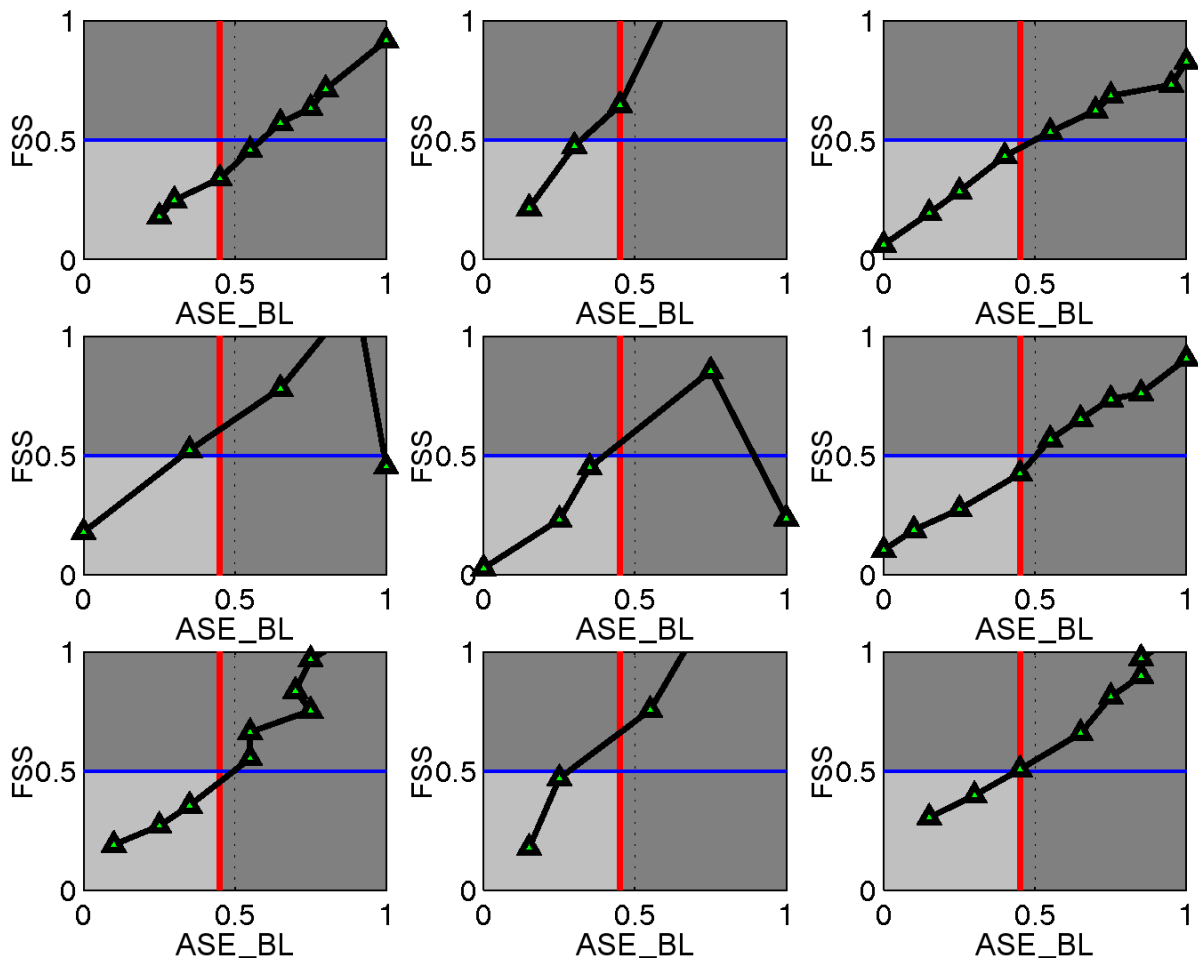
Mynd 34: FSS gildi frá Jöfnu (13), teiknuð sem fall af númer tilrauna (sjá Mynd 29).

Mynd 27 (Kafli 5) sýnir FSS niðurstöður (reiknað skv. Jöfnu (13)) á móti aðskilnaðareinkunn frá blandara ASE_{BL} fyrir Grunnblöndur 1 til 3. Mynd 35 sýnir samsvarandi niðurstöður fyrir Grunnblöndur 4 til 6. Neikvæð niðurstaða í Myndum 27 og 35 er hægt að skilgreina með tvennu móti:

- **1. ÓÁSÆTTANLEG VILLA (SLÆM NIÐURSTAÐA):** Þegar FSS gildið er miklu lægra en ASE_{BL} gildið nálægt rauðu lóðréttu línunni (þ.e.a.s. í svæðinu ASE_{BL} = 0.45). Að FSS gildið skuli vera miklu lægra á þessu svæði þýðir að Segrometer-4SCC er að vanmeta ástand steypunnar með þeim hætti að steypa er raunverulega í verra ástandi en FSS mæligildi gefur til kynna. Afleiðingin getur verið að ónýt steypa verði notuð á byggingarstað, nokkuð sem mundi gefa töluverðan viðgerðarkostnað. Í Myndir 27 og 35, þá er slæm niðurstaða í 2 myndum af 18, sem þýðir 2/18 = 11% tilfellanna.

- 2. ÞOLANLEG VILLA: Þegar FSS gildið er miklu hærra en ASE_BL í kringum rauðu lóðréttu línunni, þá þýðir það að Segrometer-4SCC er að yfir áætla óstöðugleika steypunnar. Afleiðingar þess er að steypa sem er í lagi með tillit til stöðugleika, yrði hafnað af formanni á byggingarstað. Á Myndum 27 og 35, þá eru 3 myndir af 18 með slíka villu, sem þýðir $3/18 = 17\%$

Frá ofangreindum texta, þá sést að um 89% af niðurstöðunum sýndar á Myndum 27 og 35 annaðhvort af þolanlegri villu eða af engri villu (72% af niðurstöðunum standa af engri villu). Þetta sýnir klárlega hversu FSS Jafna (13) virkar í raun vel. Athuga ber að í þessu verkefni hafa verið prófaðar töluvert margar mismunandi tegundir og gerðir af FSS jöfnum, og mun meira en sýnt er í þessari skýrslu. Engar af þeim aragrúa af jöfnum sem prófaðar hafa verið hafa komist nálægt í þeim gæðum sem Jafna (13) býður upp á.



Mynd 35: FSS gildi frá Jöfnu (13), teiknuð sem fall af stöðugleika steypunnar ASE_BL (sjá Mynd 29).

Eitt af markmiðum þriðju tilraunaseríu var að athuga notagildi Jöfnu (13) og þá aðallega á tveim útfærslum af sömu steypu tegundinni, ein með fylliefni með eðlisþyngdina 2650 kg/m^3 , og hin með

eðlisþyngdina 3120 kg/m^3 (Grunnblöndur 4 og 5 í Töflu 5). Með þessu, þá var hinn breytilegi parametri eðlisþyngd fylliefnanna. Niðurstaða þessa samanburðar er sá að ekki þurfti að breyta nokkuð reynsluföstunum α og β í Jöfnu (13). Má það vera að mismunur í kornformi á milli hinna tveggja fylliefna hafi unnið á móti áhrifum mismunandi eðlisþyngdar. Með öðrum orðum, þar sem hið eðlisþyngra fylliefni var meira kantað, þá kann það að hafa hægt á aukins áhrifum aðskilnaðar stafandi af aukins eðlisþyngdar.

7. Niðurstöður fjórðu tilrauna

Eins og kom fram í Köflum 5.7 og 6.3, þá virkar Jafna (13) mjög vel sem formúla fyrir FSS, en þessi jafna er háð G og H gildum hins aðskilda massa. Hinsvegar, eins og kom fram í Kafla 6.3, þá fyrir aðra (Kafli 5) og þriðju (Kafli 6) tilraunaseríu er til staðar svo kölluð **ósættanleg villa** í 11% tilfella fyrir Jöfnu (13). En slík vill lýsir sig í því þegar FSS gildið er mun lægra en ASE_BL gildið nálægt rauðu lóðréttu línunni í Myndum 27 og 35 (þ.e.a.s. í svæðinu ASE_BL = 0.45). Að FSS gildið skuli vera miklu lægra á þessu svæði þýðir að Segrometer-4SCC er að vanmeta ástand steypunnar með þeim hætti að steypan er raunverulega í verr ástandi en FSS mæligildi gefur til kynna. Afleiðingin getur verið að ónýtt steypa verði notuð á byggingarstað, nokkuð sem mundi gefa töluverðan viðgerðarkostnað.

Að breyta Jöfnu (13) til losna við þessa **ósættanleg villu** er ekki talið ráðlegt, því það mundi leiða til meiri villu fyrir hin 89% tilfellanna sem eru í lagi. Þeir sem hafa unnið við stöðugleikamælinga að einhverju ráði mundi ekki hika við að skilgreina 11% skekkju sem almennt mjög gott, því þessar tegundir af mælingum eru almennt mjög erfiðar, mun erfiðari en t.d. mælingar á þjálmi.

Við sölu á Segrometer-4SCC er ekki hægt að segja einfaldlega að það geti komið villa fram við mælingu. Það þarf að skilgreina við hvaða aðstæður hin **ósættanleg villa** geti komið fram (eða að minnsta kosti við hvaða aðstæður líklega villur koma fram). Er þetta markmiðið með fjórðu tilraunaseríu. Athuga ber að þessi tilraunasería var ekki upphaflega ráðgerð í verkefninu og hefur hún leitt til þess að aðrir þættir þess hafa verið minnkaðir. Hér er mjög nauðsynlegt að vandað sé vel til verka við þróun tækisins.

Hingað til, þá hafa svo til allar steypublöndurnar verið í aðalatriðum eins og þær hafa komið frá steypustöðum (þá oft tengt sérverkefnum) og eru þannig “raunverulegar” blöndur. Þetta var talið nauðsynlegt þar sem mælitækið á að geta gefið upplýsingar um raunverulegar sjálfútleggjandi steypur, og ekki fyrir “tilbúna” steypu gerða einvörðungu í tilraunastofu. Þó svo að þessi ákvörðun sé góð og gild, þá hefur hún hindrað sjálfbæra athugun á mælitækinu með kerfisbundna breytingu með “tilrauna”-steypublöndu. En þetta er nákvæmlega markmiðið með fjórðu tilraunaseríu. Það er, að gera smávægilegar kerfisbundna breyting á ákveðinni grunn steypu og sjá áhrifum þess. Í þessari seríu er hlutfalli vatns á móti fínefni (svo kölluð w/p tala, eða water powder ratio) breytt frá 0.30, 0.35, 0.40 og 0.44 (athuga ber að hlutfalli vatns á móti fínefni w/p er i þyngd, það er, kg á móti kg). Til að viðhalda sömu w/p tölunni, þá var óstöðugleiki aðeins gerður með notkun

þjálfefnis. Það er að segja, stöðugleiki var ekki aukin með auknu magni af vatni, því slíkt mundi sjálfkrafa breyta w/p tölunni.

7.1 Tilraunaruppsetning

Steypublöndurnar eru sýndar í Töflu 6, og eru kallaðar fyrir Grunnblöndur 7, 8, 9 og 10 (Grunnblöndur 1 og 2 eru sýndar í Töflu 1, á meðan Grunnblanda 3 er í Töflu 2 og Grunnblöndur 4, 5 og 6 eru sýndar í Töflu 5). Eins og nefnt var fyrir ofan, þá í þessum hluta er w/p talan (þ.e. vatns á móti fínefni eða “*water powder ratio*”) breytt með kerfisbundnum hætti í Grunnblöndum 7, 8, 9 og 10, frá 0.30, 0.35, 0.40 og 0.44. Er þetta greinilega sýnt í Töflu 6.

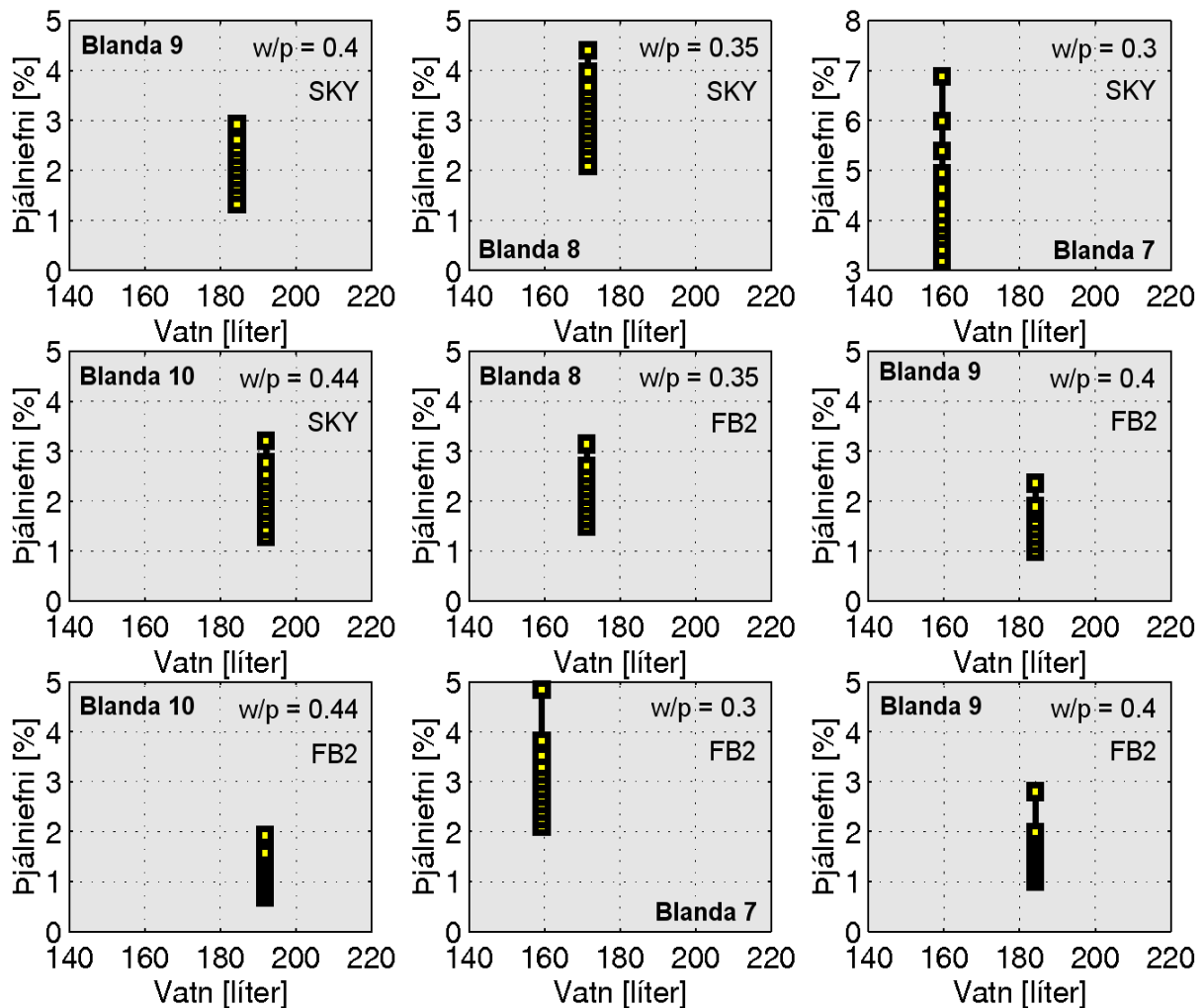
Blanda:	7	8	9	10
Efja (líter/m ³)	313	313	313	313
w/b = vatn / (sement + kísilryk)	0.36	0.42	0.50	0.55
Efja + fínsandur (líter/m ³)	345	345	345	345
w/p = vatn / allt fínefni undir 125 µ	0.30	0.35	0.40	0.44
Efni	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Sement (STDFA)	422	389	353	332
Kísilryk (Elkem)	21	19	18	17
Vatn	159	171	184	192
Sandur 0-2 mm	212	212	212	212
Sandur 0-8 mm	752	752	752	752
Fylliefni 8-16 mm	583	583	583	583
Fylliefni 16-22 mm	221	221	221	221
Eðlisþyngd (kg/m ³)	2379	2356	2331	2317

Tafla 6: Grunnblöndur 7 til 10 (Grunnblöndur 1 til 6 eru sýndar í Töflum 1, 2 og 5).

Markmiðið með breyttri w/p tölu er að athuga með kerfisbundnum hætti við hvaða w/p gildi hin FSS Jafna (13) hættir að virka, eða einnig öfugt, við hvaða w/p gildi virkar Jafna (13) best. Að athuga w/p tölugildið með þessum hætti er mikilvægt því w/p er mjög sérstakt kennimerki steypunnar. Lág w/p tala yfirleitt þýðir sjálfútleggjandi-hástyrkleikasteypa/háendinga-steypa (high-strength/high-performance SCC), og herra gildi á w/p þýðir þá sjálfútleggjandi steypa sem er í lægra styrktar- og/eða endingarflokki (t.d. C25/30, M90). Einnig verða niðurstöðurnar hér notaðar seinna í Kafla 8 til að athuga hversu mikilvægt *G* er annarsvegar og *H* hinsvegar í FSS Jöfnu (13). Við kerfisbundinni aukningu á w/p gildi, þá er gert ráð fyrir að *H* gildið muni minnka. Við upphafi tilraunar var óvíst hvernig *G* gildið mundi breytast sem fall af w/p, hinsvegar var talið líklegt að *G* myndi minnka sem fall af þjálfefnis notkun. Vegna þess síðarnefnda, þá voru notaðar tvönnskonar þjálfefni í þessa tilraunaseríu. Annarsvegar BASF Glenium Sky 550 (með 0.3% Sika Tard 930 seinkara) og hinsvegar Sika Viscocrete FB-2 (með 0.45% Scansem R10 seinkara). Hið fyrrgreinda er meira notað á steypustöð við gerð tilbúinnar steypu (e. ready mix plant) á meðan hið

síðarnefnda er sérstaklega hannað fyrir einingaverksmiðju í huga (e. precast plant). Upphafsmagn þjálfefnis og má sjá á Mynd 36.

Mynd 36 sýnir tilraunuppsetninguna sem var keyrð fyrir hinu fjórðu tilraunaseríu. Þar má sjá hvernig mismunandi magni af þjálfiefni (e. superplasticizer) er bætt við hverja steinsteypu. Eins og áður hefur verið nefnt, þá eru þessum efnum bætt við til að auka óstöðugleika steypunnar í skrefum.



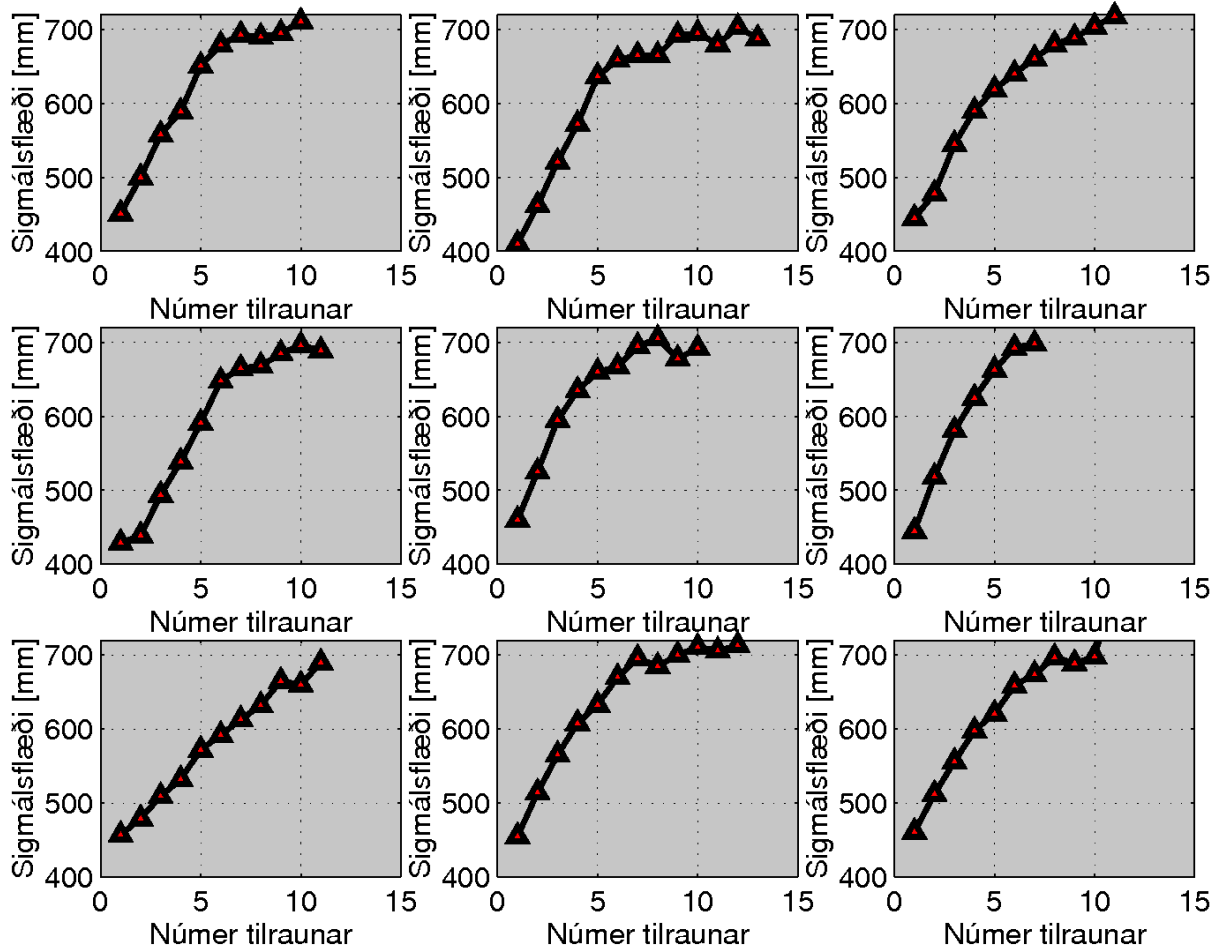
Mynd 36: Tilraunuppsetning fyrir blöndur 7 til 10 (sjá Töflu 6).

Athuga ber að allar niðurstöður sem eru héðan í frá sýndar í Kafla 7, tilsvara Mynd 36. Til dæmis, ef litið er á Mynd 36, efst til hægri, þá tilsvavar sú niðurstaða uppsetningunni sem er sýnd efst til vinstri á Mynd 37. Það er, í þessu tilfalli er verið að prófa blöndu 9, með þjálfiefnið BASF Glenium Sky 550 á $w/p = 0.3$.

Í öllum lilvikum er Árdal fylliefni notað (eðlisþyngd er 2650 kg/m³, “bone dry”). Einnig er sama magn af fylliefni og svo sama kornakúrfan notuð fyrir öll tilfelli. Markmiðið er að einungis einblína á áhrif á w/p. Aukaathugun felst í að athuga mismunandi áhrifa af BASF Glenium Sky 550 annarsvegar og hinsvegar Sika Viscocrete FB-2.

7.2 AðSkilnaðarEinkunn (ASE)

Eins og sést á Mynd 37, þá er byrjunargildi sigmálsflæðis fyrir Grunnblöndur 7 til 10 yfirleitt kringum 450 mm. Þar sem markmið fjórðu tilraunaseríu er fyrst og fremst að athuga áhrif w/p tölu á Jöfnu (13) sem formúlu fyrir FSS, þá var ekki talið nauðsynlegt að steinsteypan byrjaði endilega á 600 mm í sigmálsflæði (SF) eins og gert var í Kafla 6.

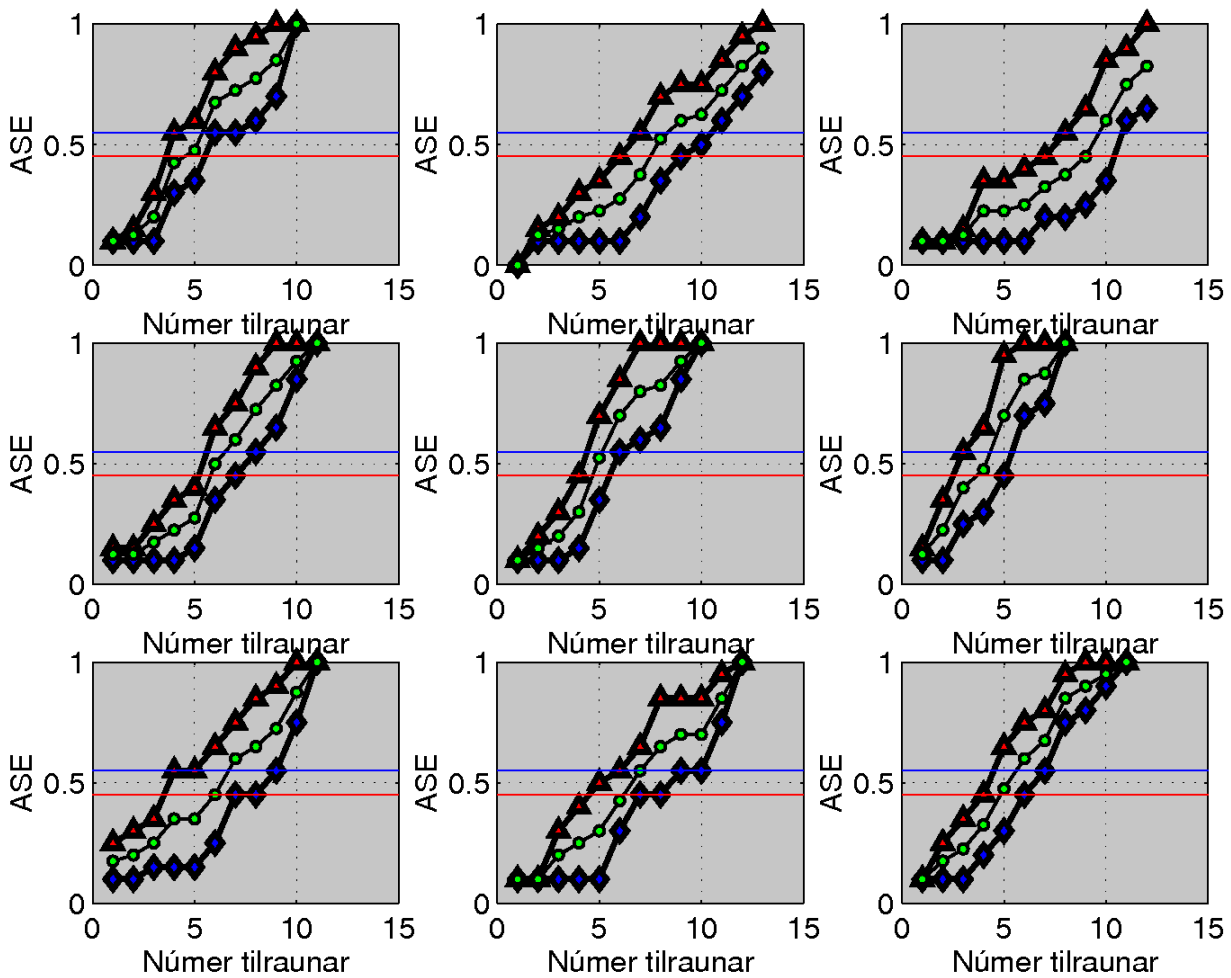


Mynd 37: Sigmálsflæði (SF) sem fall af númer tilrauna (sjá Mynd 36).

Mynd 37 sýnir sigmálsflæði sem fall af númer tilraunar og voru þessar mælingar gerðar fyrst og fremst til að meta stöðugleika steypunnar á sigmálsborðinu ASE_SF samkvæmt Kafla 5.2, Töflu 4 (sjá einnig Mynd 16). Samhliða þessu var gert einnig stöðugleikamat á steypunni í blandara

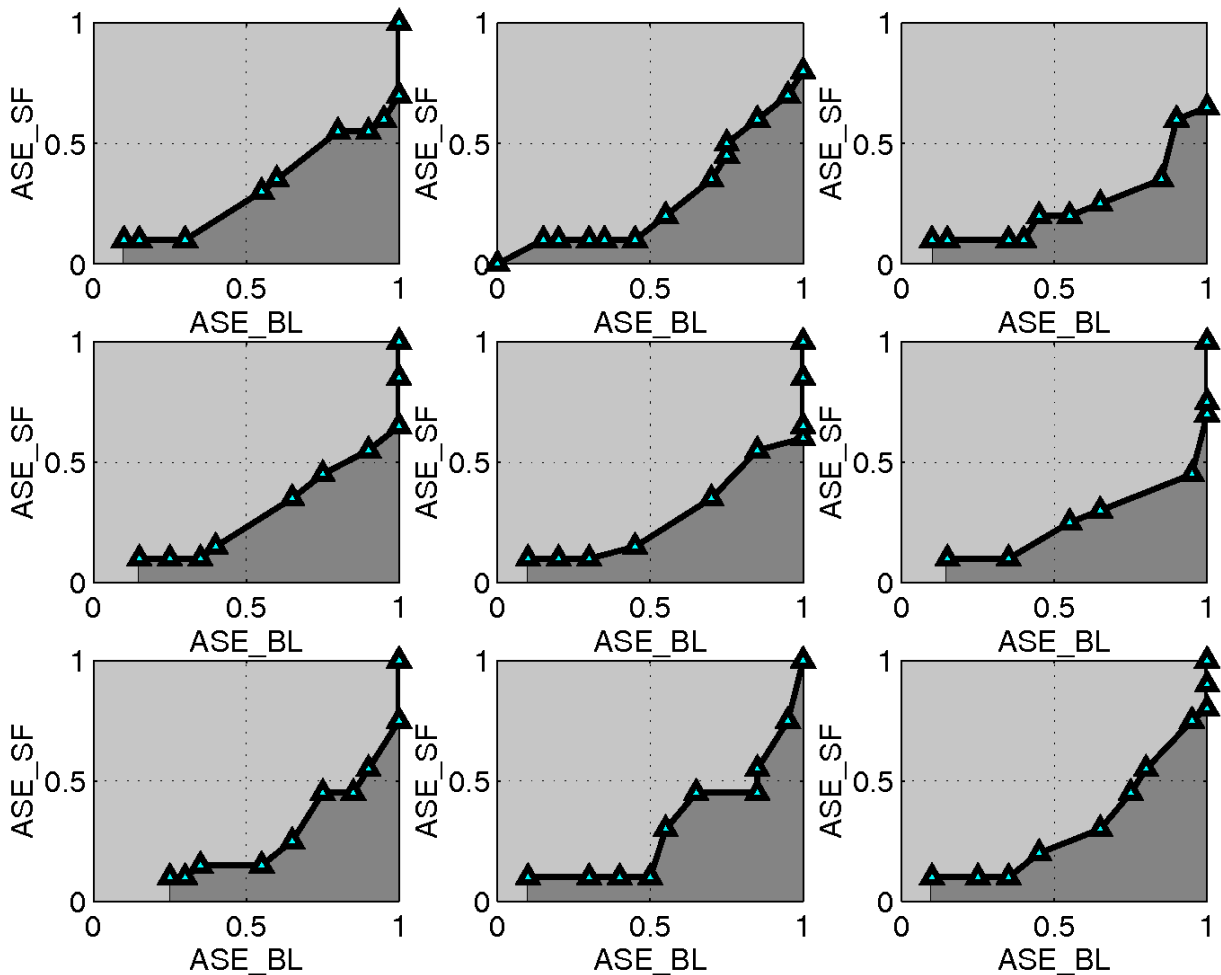
ASE_BL samkvæmt Töflu 3 í Kafla 5.2 (sjá einnig Mynd 16). Afrakstur þessara tveggja niðurstaðna má sjá á Mynd 38, þar sem ASE_BL (rauðu þríhyrningarnir) er borin saman við ASE_SF (bláu tígularnir). Einnig er meðalgildi þessara tveggja gilda sýnt (grænu hringirnir).

Eins og neft hefur verið í Kafla 5.2, þá sýnir rauða lárétta línan lágmarkskröfu fyrir ASE_BL á meðan bláa línan lágmarkskröfu fyrir ASE_SF (eins einnig hefur komið fram í Kafla 5.2, þá stendur ASE_BL fyrir AðSkilnaðarEinkunn frá BLandara, á meðan ASE_SF stendur fyrir AðSkilnaðarEinkunn frá SigmálsFlæði).



Mynd 38 sýnir hvernig stöðugleikaástand steypunnar kemur mismunandi fram í blandara og á sigmálsborði. Þetta er í samræmi við niðurstöður frá Mynd 17 (Kafli 5.2) og Mynd 31 (Kafli 6.2). Það er að óstöðugt ástand steypu kemur fyrr fram í blandara miðað við það sem kemur fram á sigmálsborði. Eins og áður hefur verið nefnt, þá er talið er að það sem sjáist í blandara sé réttara en það sem sést á sigmálsborði. Það er að segja, það er auðveldlega hægt að vanmeta ástand steypunnar ef það er einungis metið út frá sigmálsborði.

Það er, tölurverður mismunur er á milli mati frá blandara og frá sigmálsborði. Á Mynd 39 má sjá gildi ASE_SF teiknað sem fall af gildi ASE_BL. Almennt séð, þá er gildi ASE_SF lægra en gildi ASE_BL og má einnig samsvarandi niðurstöður fyrir aðrar steypublöndur þessa verkefnis (sjá Myndir 18 og 32).



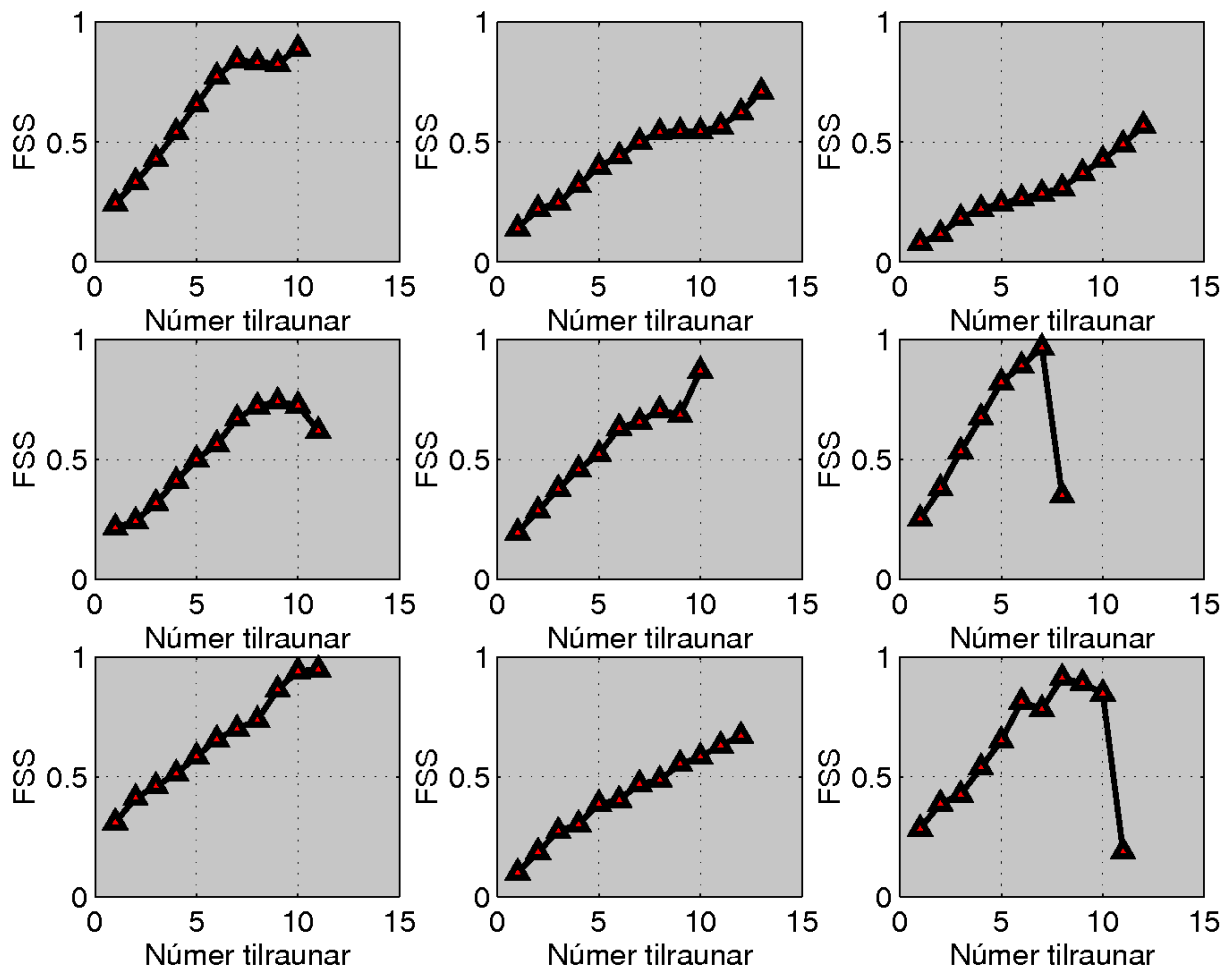
Mynd 39: Gildi ASE_SF teiknað sem fall af ASE_BL (sjá Mynd 36).

7.3 Mælingar með Segrometer-4SCC

Mynd 40 sýnir mæld Tmax og Tmin gildi sem fall af númer tilrauna. Myndir 3 og 6 (frá Kafla 3) gefa lýsandi skýringu í fljótu bragði um hvað Tmax og Tmin standa fyrir og hvað Mynd 40 sýnir í raun. Eins og áður, þá hefur takmarkið með þessum mælingum verið að athuga hvort hægt sé að fá kerfisbundna og nothæfa breytingu í Tmax og Tmin. Þetta er sérstaklega mikilvægt ef FSS Jöfnur (3) til (11) ættu að hafa eitthvað til að “vinna með”.

Eins og sést í Mynd 40, þá fæst ákveðin breyting í Tmax og Tmin sem fall af númer tilrauna. Hinsvegar er þessi breyting ekki nógu skilmerkileg að hægt sé að nota Tmax og Tmin í FSS reikninga. Þetta kemur sérstaklega fram þegar FSS reikningar með Tmax og Tmin eru teiknaðir á móti ASE_BL. Samsvarandi niðurstaða fékkst með Myndir 21 og 33 í Kafla 5 og 6 (það er, fyrir aðra og þriðju tilraunaseríu).

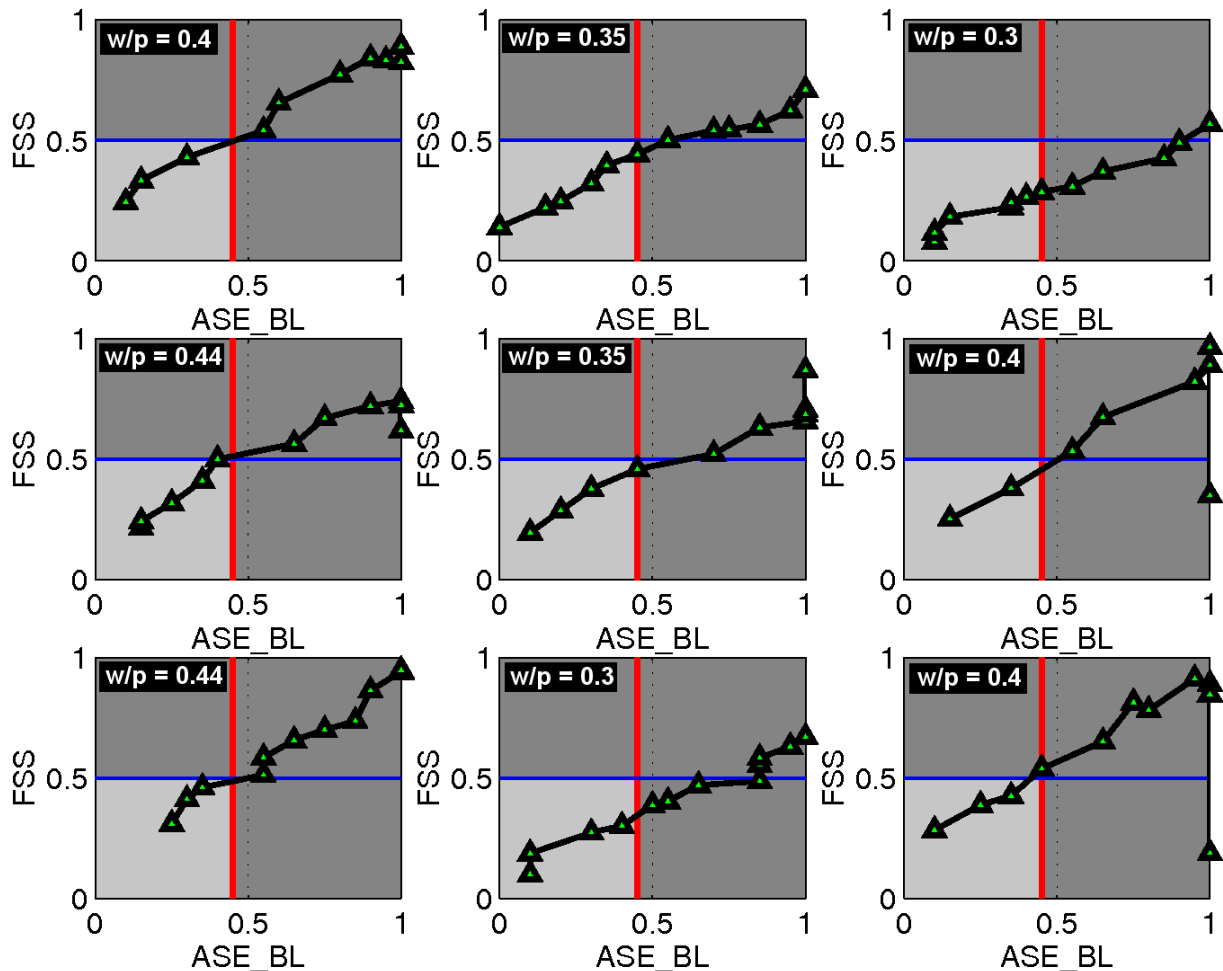
Þegar FSS gildi samkvæmt Jöfnu (13) er teiknuð sem fall af númer tilrauna, fæst Mynd 40. Vegna þess að það er ekki beint sambengi á milli númer tilraunar og hinn raunverulega stöðugleikaástand steypunnar, þá er þessi niðurstaða í raun ekki nothæf. Það er mjög freistandi að taka Mynd 40 sem gilda niðurstöðu sérstaklega vegna þess hver kerfisbundin niðurstaðan er.



Mynd 40: FSS gildi frá Jöfnu (13), teiknuð sem fall af númer tilrauna (sjá Mynd 36).

Þó svo að aukning í notkun þjálfnefnis eigi sér stað við aukið tilraunannúmer í Mynd 40, þá mun þjálfnistap ávalt trufla tengingu milli númer tilraunar og hin raunverulega stöðugleika. Hið réttara er að teikna gildi FSS Jöfnu (13) á móti gildi ASE_BL og er það gert með Mynd 41.

Mynd af FSS Jöfnu (13) sem fall af ASE_SF er ekki sýnd hér, en í stuttu máli kemur slík niðurstaða mjög illa útfæst (tilsvarandi niðurstaða fæst eins og sýnd er á Mynd 26). Þetta er í samræmi við fyrri tilgátu um að ASE_BL gefi mun betur til kynna um hið eiginlega og rétta stöðugleikaástand steypunnar en ASE_SF. Þannig að það er fyrst og fremst gildi FSS teiknað á móti ASE_BL sem er mikilvægast.



Mynd 41: FSS gildi frá Jöfnu (13), teiknuð sem fall af stöðugleika steypunnar ASE_BL (sjá Mynd 36).

Eitt af markmiðum fjórðu tilraunaseríu var að athuga notagildi Jöfnu (13) og þá aðallega með tillit tils hlutfalli vatns á móti fínefni (svo kölluð w/p tala, eða water powder ratio). Eins og má sjá á Mynd 41, þá er w/p tölunni breytt frá 0.30, 0.35, 0.40 til 0.44 (sjá einnig Töflu 6).

Eins og nefnt var í Kafla 6.3 og í byrjun Kafla 7, þá á “ósættanleg villa” sér stað þegar FSS gildið er miklu lægra en ASE_BL gildið í svæðinu ASE_BL = 0.45 (það er, þegar steypan er að verða/er orðinn ónýtt). Markmiðið með breyttri w/p tölu er að athuga með kerfisbundnum hætti við hvaða w/p gildi, hin FSS Jafna (13) er með ósættanlega villu (einnig öfugt: við hvaða w/p gildi virkar Jafna (13) best).

Mynd 41 sýnir að FSS Jafnan gefur óásættanlega villu við $w/p = 0.30$. Hinsvegar við herra w/p gildi, þá virkar FSS Jafna (13) mjög vel. Það er að segja, þegar w/p er að minnka, þá er hætta fyrir að FSS Jafna (13) hættir að virka eins og til er ætlað. Þessi niðurstaða kemur fram óháð hvort BASF Glenium Sky 550 (sýnt sem “SKY” í Mynd 36) eða Sika Viscocrete FB-2 (sýnt sem “FB2” í Mynd 36) er notað. Þetta er mikilvæg niðurstaða sem mun vera skýrt frá í notendabók Segrometer-4SCC. Það er, hin **ósættanleg villa** virðist koma fram í auknu mæli eftir því sem w/p talan er minnkuð. Einnig bendir niðurstaðan til að þessi hegðun virðist vera óháð tegund þjálnefnis sem er notað í steypunni.

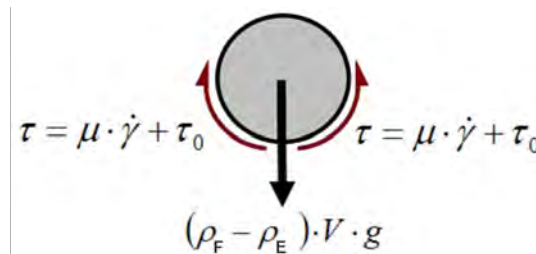
8 Greining á hegðun FSS fallsins

Hér er gerð athugun á áhrif G og H gildi hins aðskilda massa áhrif á Jöfnu (13) með kerfisbundnum hætti. Spurningar eins og hvort hægt er að sleppa G gildinu alveg í Jöfnu (13), eða hvernig spílaskinn vægi H gildis á móti G gildis er svarað í þessum kafla.

Eins og greinilega hefur komið fram í Köflum 5 til 7, þá hefur hið flotfræðilega stöðugleikastig FSS reiknað samkvæmt Jöfnu (13) virkað vel, þó með nokkrum undantekningum. Þessar undantekningar er aðal ástæða núverandi kafla. Til að auðvelda lestur, þá er þessi Jafna (13) endurtekin fyrir neðan, með Jöfnu (23):

$$\text{FSS} = \frac{\alpha}{\sqrt{H \cdot f_m + G}} - \beta \quad (23)$$

...þar sem $\alpha = 12 \text{ A}^{1/2}$ og $\beta = 0.25$ (β er einingalaus tala). Eins og lýst er með Jöfnu (22) í Kafla 5.5, þá er ákveðið samhengi á milli $\mu \cdot \dot{\gamma}$ og $H \cdot f_m$ annarsvegar, og τ_0 og G hinsvegar. Gildið μ er plastíski segjustuðullinn og τ_0 er flotskerspennan hins aðskilda massa/aðskilnaðarefju (sjá nánar í Kafla 5.5). Eins og sýnt er á Mynd 42 (endurtekin frá Mynd 23), þá lýsa τ_0 og μ þeirri viðleitni steypunnar til að viðhalda stöðugleika.



Mynd 42: Jafnvægisástand einnar fylliefnisögn með efju í kringum sig (frá Mynd 23).

Hið mikilvæga gildi FSS fallsins er við 0.5. Markmiðið er að þetta gildi lýsir þeim punkti þar sem steypan er alveg á mörkunum (eða orðinn) ósættanlega óstöðug og þar að leiðandi ónothæf/ónýt. Það er, markmiðið er að fá $\text{FSS} = 0.5$ við $\text{ASE_BL} = 0.45$ (samanber Kafla 5.2, þá gefur ASE_BL hinu rétta lýsingu á stöðugleika steypunnar). Til að átta okkur á hvenær vægi $H \cdot f_m$ er jafnt vægi gildisins G við slíkar aðstæður, þá er hægt að skrifa $H \cdot f_m = G = y$ inn í FSS Jöfnu (23). Við það fæst eftirfarandi:

$$\text{FSS} = \frac{\alpha}{\sqrt{H \cdot f_m + G}} - \beta = \frac{\alpha}{\sqrt{y + y}} - \beta = 0.5 \quad (24)$$

$$FSS = \frac{12}{\sqrt{2y}} - 0.25 = 0.5 \quad (25)$$

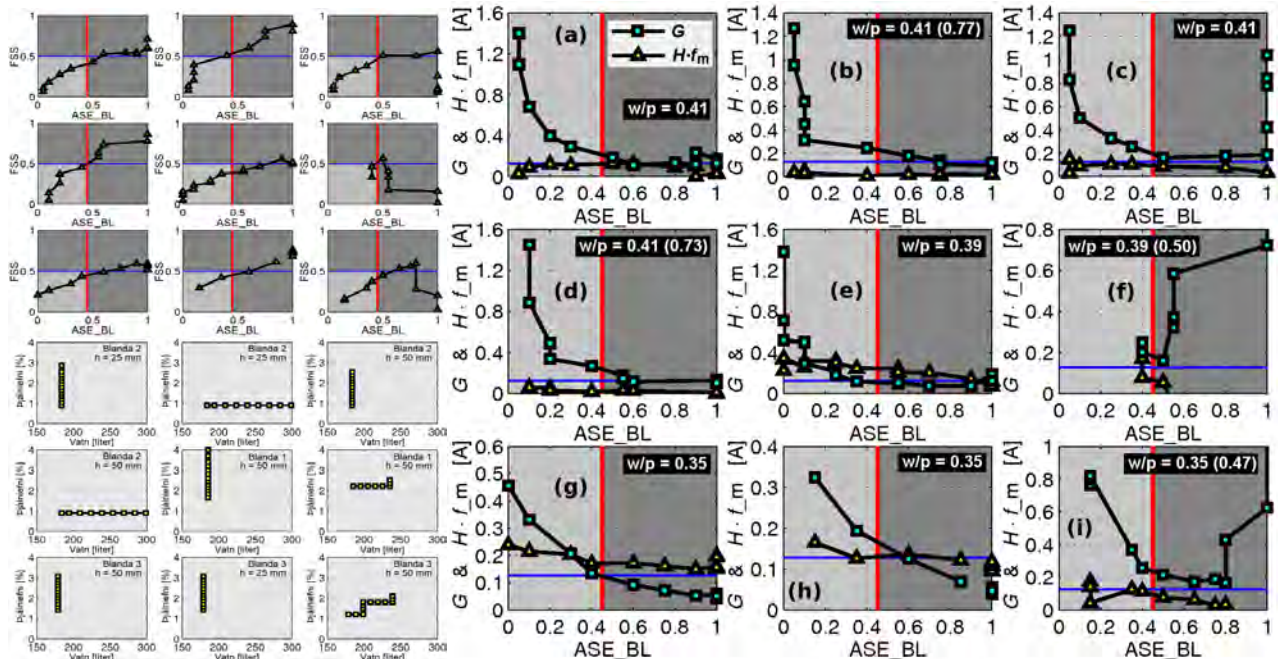
$$\frac{12}{\sqrt{2y}} = 0.75 \quad (26)$$

Jafna (26) gefa okkur síðan eftirfarandi niðurstöðu:

$$y = \frac{1}{2} \left(\frac{12}{0.75} \right)^2 = 128 \text{ mA} = 0.128 \text{ A} \quad (27)$$

Það er að segja, Jafna (27) gefur okkur að við $H \cdot f_m = G = y = 0.128 \text{ A}$, þá er $FSS = 0.5$. Gildið $y = 0.128 \text{ A}$ er sýnt á Mynd 43 til hægri sem blá lárétt lína. Athuga ber að notagildi þessa línu kemur ekki fram í þessari skýrslu, en hún er samt sem áður einnig teiknuð í Myndir 43, 45 og 47 út af mögulegri viðbótar-greiningu á þessum gögnum í framtíðinni.

Hægra megin á Mynd 43 er sýnd w/p talan sem er notuð í hverri steypuseríu (e. *water powder ratio*), sem er þá hlutfalli þyngds vatns á móti þyngds fínafna (hefur þegar verið rætt í Kafla 7). Þegar svigi er sýndur með w/p tölunni, þá á það við þegar steypan er gerð óstöðug með vatni. Við aukið vatnsgildi mun w/p talan stækka og er tölugildið inni í sviganum þá hin loka w/p talan við síðustu mælingu. Neðst til vinstri má sjá hversu miklar breytingar í vatnsmagni á sér stað fyrir hverja mæliseríu (vinstri hlið Myndar 43, er fengin frá Myndir 14 og 27 og eru endurteknaðar hér til að auðvelda samanburð). Ofangreind lýsing á einnig við um Myndir 45 og 47.



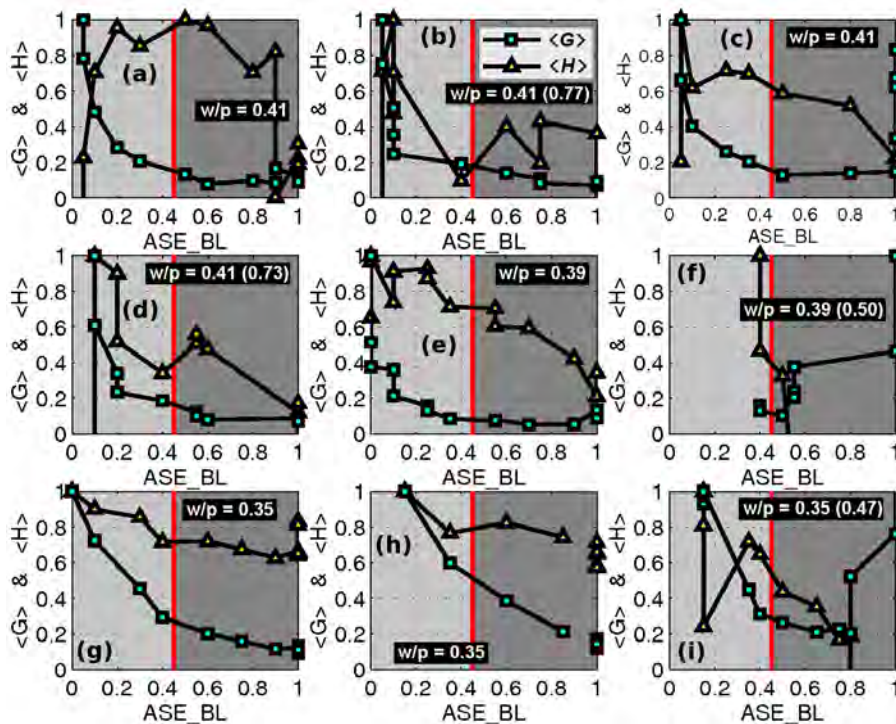
Mynd 43: Niðurstöður annara tilrauna, frá Kafla 5 (Vinstri hlið er frá Myndir 14 og 27).

Eins og sést á Mynd 43, þá er stundum erfitt að átta sig á hvernig G og H eru að þróast sem fall af ASE_BL í tiltekinni tilraunaseríu. Fyrir Mynd 43 á þetta sérstaklega við þegar H (eða þ.e. $H \cdot f_m$)

gildið er mjög lágt, eins og sést til dæmis efst til hægri (Mynd 43c). Þar á þetta ekki svo mikið við um G gildið þar sem það er yfirleitt mun stærra en $H \cdot f_m$, en þetta mun snúast við fyrir aðrar niðurstöður, sýndar seinna. Markmiðið er að geta séð hversu mikil kerfisbundin þróun á sér stað í G og H sem fall af ASE_BL óháð hámarksgildum þeirra. Til að skoða þetta betur, þá þarf að skilgreina tvö ný gildi $\langle G \rangle$ og $\langle H \rangle$. Þessi gildir eru skilgreindar út frá eftirfarandi jöfnu:

$$\langle G \rangle = \frac{G}{G_{\max}} \quad \text{og} \quad \langle H \rangle = \frac{H}{H_{\max}} \quad (28)$$

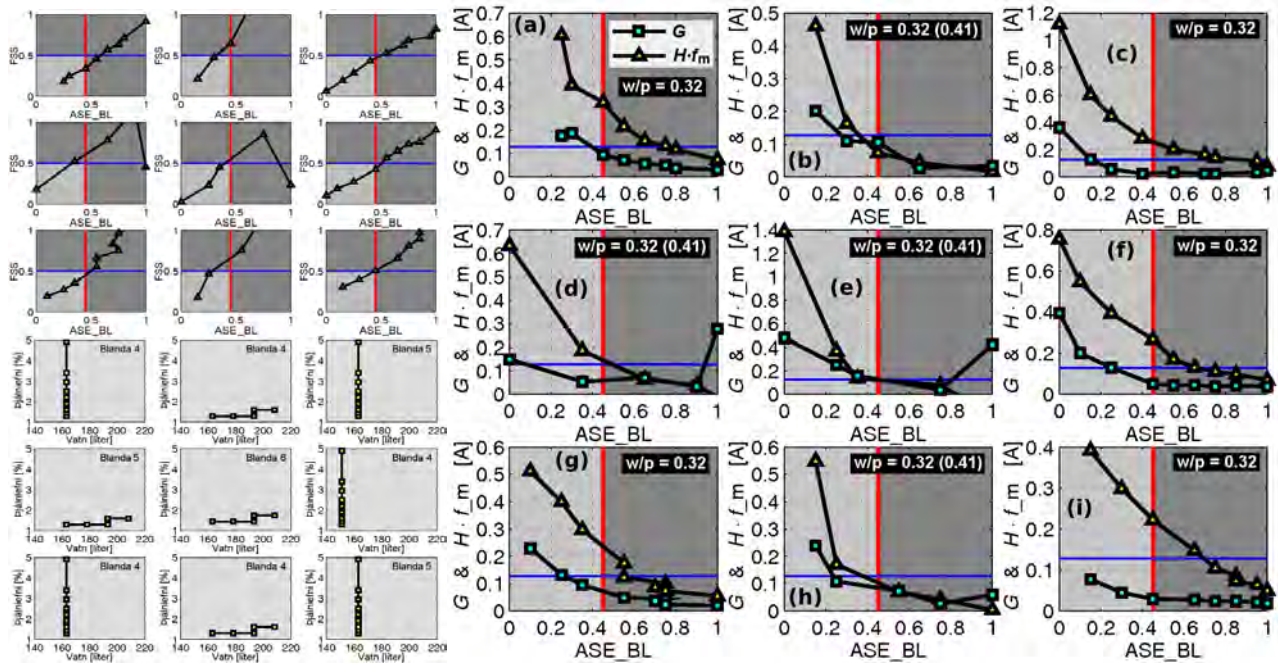
Gildin G_{\max} og H_{\max} lýsa hámarksgildi G og H fengnar úr tiltekinni tilraunaseríu. Til dæmis ef litið er á Mynd 43 efst til hægri (Mynd 43c), þá er hámarksgildi G gefið með $G_{\max} = 1.28$ A. Öll gildi $\langle G \rangle$ gildin á Mynd 44 efst til hægri (Mynd 44c) er þá normaliseruð með tillit til $G_{\max} = 1.28$ A. Fyrir aðra tilraunaseríu, til dæmis þá sem er sýnd í Mynd 43i er $G_{\max} = 0.82$ A og reiknast þá $\langle G \rangle$ sem $G/0.82$ í þeirri seríu (Mynd 44i). Þetta þýðir að hámarksgildið á $\langle G \rangle$ í hverri seríu er alltaf 1 eins og sést á Mynd 44. Hin sama útfærsla gildir fyrir $\langle H \rangle$, H og H_{\max} .



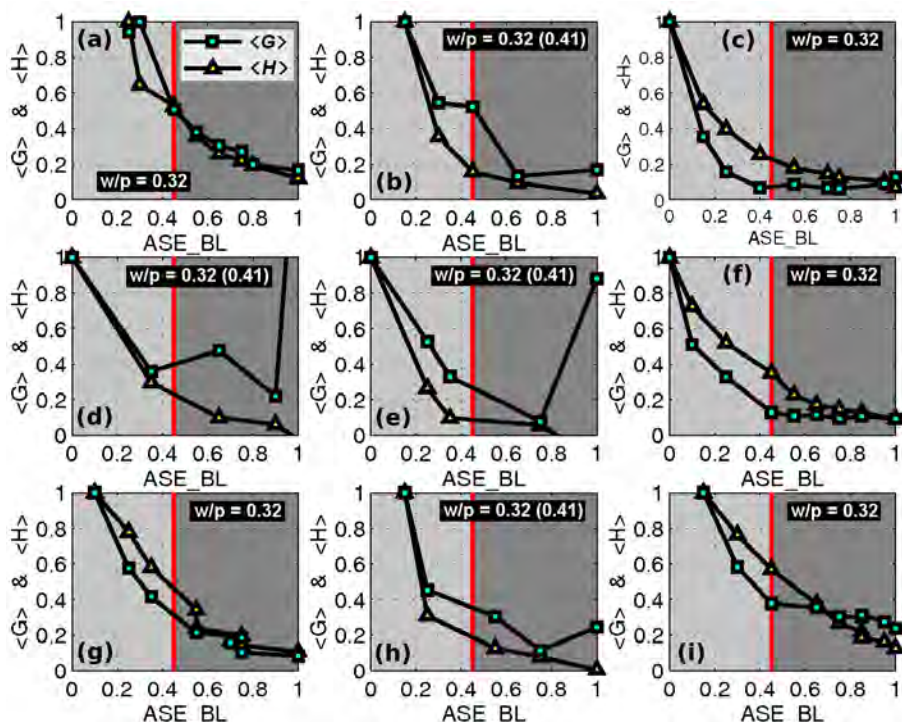
Mynd 44: Niðurstöður annara tilrauna, frá Kafli 5 (Sjá einnig Mynd 43).

Þegar vinstri hlið Mynd 43 er skoðuð, þá er eftirtektavert að sjá hvernig FSS gildin virka mjög vel. Það er, $FSS = 0.5$ er nokkurnvegin alltaf á $ASE_BL = 0.45$. Það sem er mikilvægt að sjá í þessu samhengi er að í Myndum 43a-i, þá er það G gildið sem er í aðalatriðum að stjórna söðugleikanum. Þetta sést á því að G gildið er mun stærra en gildi $H \cdot f_m$. Einnig sést þetta þegar skoðuð eru Myndir 44a-i, út frá $\langle G \rangle$ og $\langle H \rangle$. Þar sem $\langle G \rangle$ er alltaf með kerfisbundna breytingu

sem fall af ASE_BL (að undanskilinni Mynd 44f), þá gildir slíkt mun minna um fyrir $\langle H \rangle$. Það er, $\langle H \rangle$ er oft með einhverskonar slembibreytingu (e. random values) sem fall af ASE_BL.



Mynd 45: Niðurstöður þriðju tilrauna, frá Kafli 6 (Vinstri hlið er frá Myndir 29 og 35).



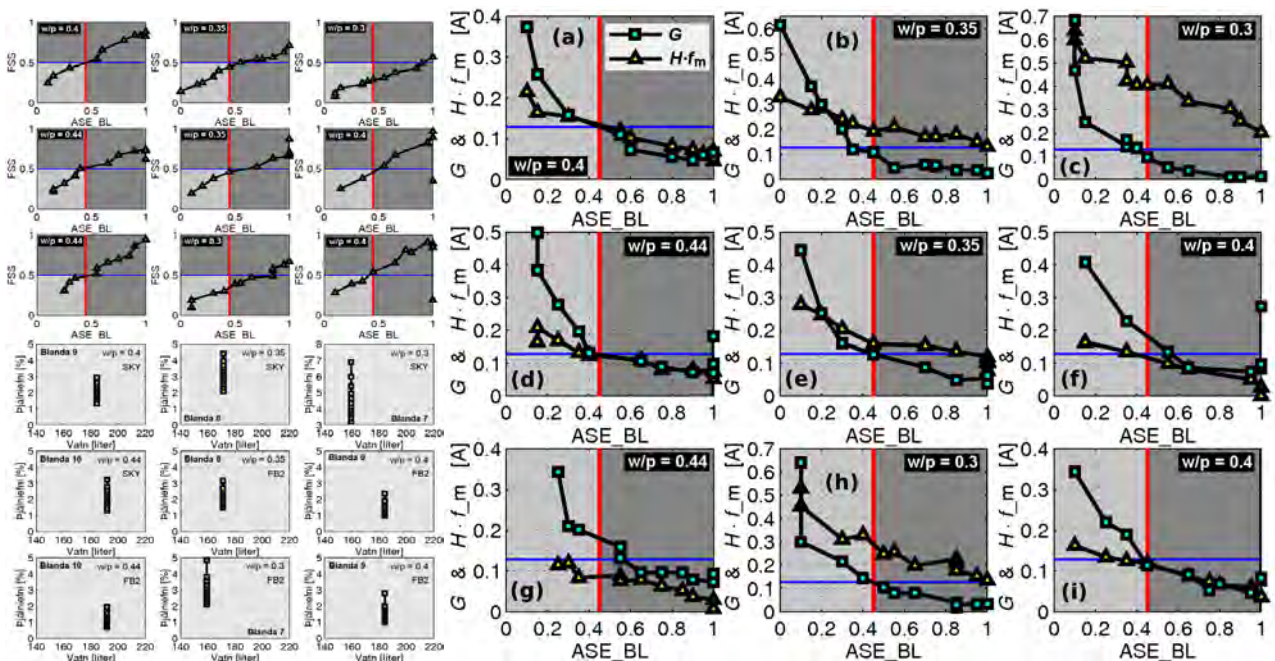
Mynd 46: Niðurstöður þriðju tilrauna, frá Kafli 6 (Sjá einnig Mynd 4).

Fyrir þriðju tilraun (Kafli 6), þá er eftirtektarvert að sjá á Mynd 45 (til vinstri) hvernig FSS gildir virka stundum illa við $FSS = 0.5$. Það er, í sumum tilfellum er FSS gildið hærra eða lægra en 0.5 þegar ASE_BL er á 0.45. Tilsvarendi G og $H \cdot f_m$ gildi má sjá á Myndir 45a, b, d og h. Í öllum

Þessum tilvikum er $H \cdot f_m$ um það bil jafnt stórt og G eða stærra ($H \cdot f_m \geq G$). Með öðrum orðum, þá stjórna H gildið stöðugleikanum með jafnmiklum hætti eða meira en G gildið. Það er eins og vandamál FSS fallsins byrji við slíkar aðstæður. Athuga þer að þessi hegðun er ekki alsráðandi. Það er að segja, í mörgum tilfellum þá er $FSS = 0.5$ við $ASE_BL = 0.45$ þó svo að $H \cdot f_m \geq G$. Þetta má sjá til dæmis á Mynd 45i (neðst til vinstri). Þetta þýðir að það er í raun ekki hægt að breyta FSS Jöfnu (23), því þá mundi all margar aðrar (velhepnaðar) FSS niðurstöður fara úr skorðum.

Það er eftirtektarvert að sjá í þessu samhengi (það er að segja, þegar $H \cdot f_m \geq G$), hversu mun meiri kerfisleg breyting á sér stað í $\langle H \rangle$ á Mynd 46, miða við það sem gerist í Mynd 44. Svo til sama kerfislega breytingin á sér stað í $\langle G \rangle$ og $\langle H \rangle$.

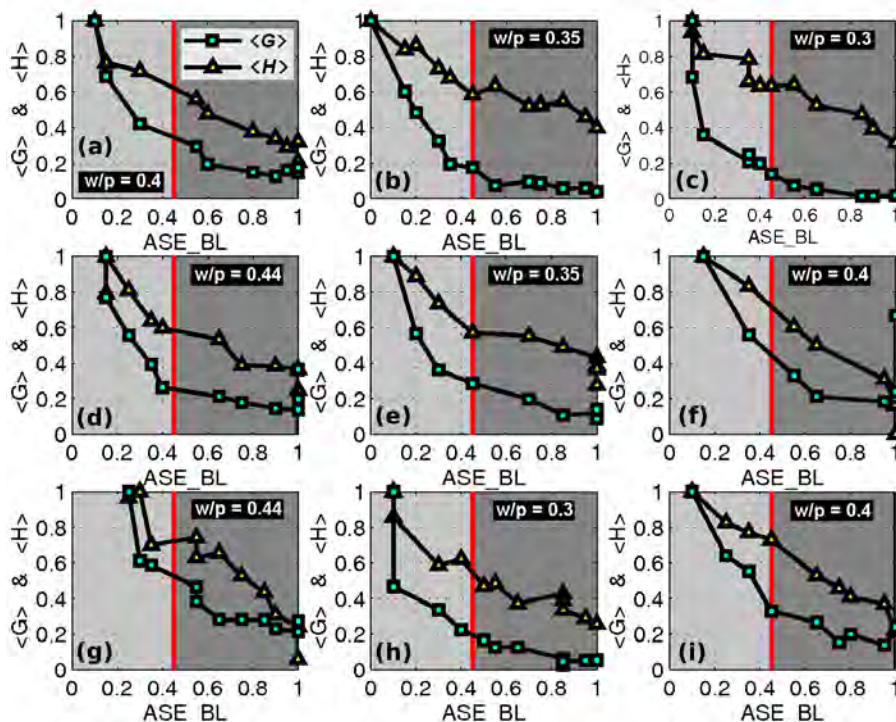
Eins og nefnt var í Kafla 7, þá var w/p tölunni breytt með kerfisbundnum hætti (w/p er hlutfall þyngds vatns á móti þyngds fínefna), breytt frá 0.30, 0.35, 0.40 og loks til 0.44. Til að viðhalda sömu w/p tölunni, þá var óstöðugleiki aðeins gerðir með notkun þjálfefnis (ekki með vatni, því slíkt mundi sjálfkrafa breyta w/p tölunni). Greining niðurstöðum þessa tilrauna má sjá á Myndum 47 og 48 (fyrir Myndir 43 til 46, þá hafa steypublöndurnar verið í aðalatriðum eins og þær hafa komið frá steypustöðum og eru þannig “raunverulegar” blöndur).



Mynd 47: Niðurstöður fjórðu tilrauna, frá Kafla 7 (Vinstri hlið er frá Myndir 36 og 41).

Þegar vinstri hlið Mynd 47 er skoðuð (fjórða tilraun frá Kafla 7), þá sést hvernig FSS gildin virka illa við $FSS = 0.5$ fyrir tvö tilfelli. Í báðum tilfellum er FSS gildið lægra en 0.5 þegar ASE_BL er á

0.45. Tilsvarandi G og $H \cdot f_m$ gildi má sjá á Myndir 45c og h. Þar sést að í báðum tilfellum stendur $H \cdot f_m$ af mun stærra gildi en G , eða $H \cdot f_m > G$. Fyrir öll hin tilföllin er G gildið annaðhvort stærra eða um það bil jafnt stórt og $H \cdot f_m$. Þetta styður fyrri niðurstöðu um að það er G gildið sem er í aðalatriðum að stjórna söðugleikanum. Með öðrum orðum, við hátt H gildi (eða það er, við hátt $H \cdot f_m$ gildi), þá getur ASE_BL samt sem áður verið á 0.45, sem þýðir að stöðugleiki steypunnar er stundum óásættanleg við hátt H gildi. Með öðrum orðum, þá þýðir þetta að hátt H gildi (það er, hár plastískur segjustuðull μ) tryggir ekki stöðugleika steypu. Eins og áður hefur verið sagt, þá ber að athuga að þessi hegðun er ekki alsráðandi, það er, í mörgum tilfellum þá er $FSS = 0.5$ við ASE_BL = 0.45 þó svo að $H \cdot f_m > G$. Þetta má sjá til dæmis á Mynd 45i. Þetta þýðir að það er í raun ekki hægt að breyta FSS Jöfnu (23) (til dæmis með því að sleppa H), því þá mundi aðrar (góðar) FSS niðurstöður fara úr skorðum.



Mynd 48: Niðurstöður fjórðu tilrauna, frá Kafla 7 (Sjá einnig Mynd 47).

Þetta er mjög áhugaverð niðurstaða, því hún segir okkur að samtímis að H gildið (þ.e. gildi segjustuðuls μ) á efjunni er mjög hátt, þá er það ekki nauðsynlega nóg trygging til að viðhalda stöðugleika eins og matið ASE_BL = 0.45 sýnir.

Ofangreind niðurstaða gefur að hátt gildi á segjustuðli μ er ekki trygging fyrir stöðuga steypu. Frá Mynd 47, þá virðist þetta sérstaklega gilda fyrir blöndur með $w/p < 0.35$. Það er þetta sem virðist helst trufla útkomu Jöfnu (23) (þ.e. Jöfnu (13)). Hægt væri að breyta Jöfnu (23) með eftirfarandi:

$$FSS = \frac{\alpha}{\sqrt{H \cdot f_m \cdot h_{\text{corr}}(w/p) + G}} - \beta \quad (29)$$

þar sem $h_{\text{corr}} = h_{\text{corr}}(w/p)$ er leiðréttingagildi (sem fall af w/p) fyrir áhrifum á $H \cdot f_m$ gildið. Fyrir $w/p \geq 0.35$ væri $h_{\text{corr}} = 1$. Að FSS jafna skuli vera með slíkan leiðréttingastuðull er ekki heppilegt, því að þá þarf notandinn að slá inn w/p tölu í hvert sinn þegar tækið Segrometer-4SCC er notað. Vandamálið er að notandinn á byggingarstað veit yfirleitt ekki hlutföll steypunnar. Betra er að merkja mælitækið á þá leiðina ef um hástyrkleika/hágæða steypu er að ræða, þá getur átt sér stað undirmat á söðugleika steypunnar.

Helsta niðurstaða þessa kafla er að hátt H gildi aðskilnaðarefju (það er, hár plastískur segjustuðull μ efjunnar) tryggir ekki nauðsynlega stöðugleika steypu og það er sá óheppilegi eiginleiki sem er stundum að trufla FSS reikningana (hin svokallaða “ósættanleg villa” sem nefnd var í byrjun 7 kafla). Þessi niðurstaða virðist helst gilda við lágt w/p gildi ($w/p < 0.35$), þannig að þegar þessi truflun kemur fram, þá mun það vera aðallega fyrir hástyrkleika/hágæða-steypur (það er, steypur með mjög lágt w/p gildi)

Sýnt hefur verið í þessum kafla að G gildi hins aðskilda massa spilar mjög stórt hlutverk í reikningum á FSS, þannig að ómögulegt væri að sleppa því úr Jöfnu (23) (þ.e. Jöfnu (13)). H gildið spilar líka stórt hlutverk, en það eru helst mæliniðurstöður þess sem trufla FSS reikningana.

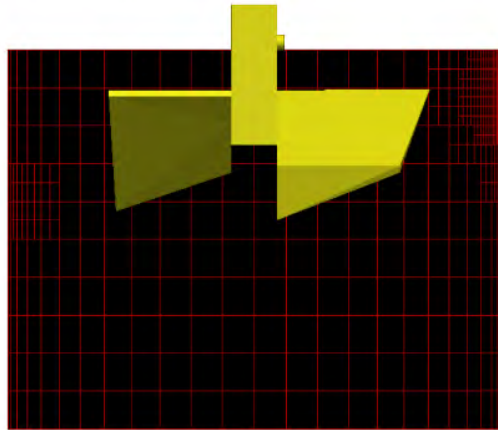
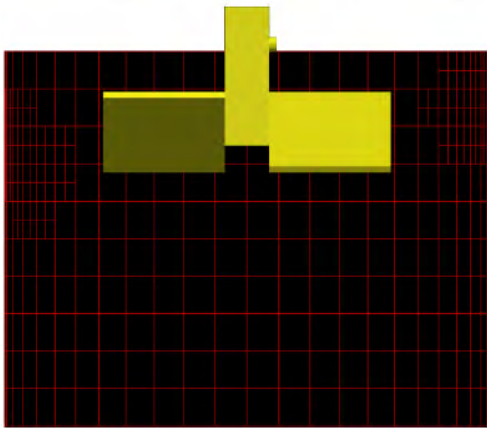
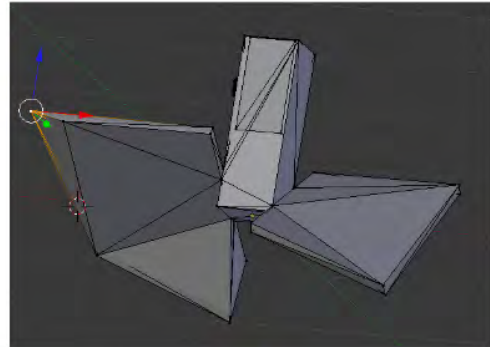
9 Notkun reiknilegs straumfræðis á flæðigreiningu

Í þessum kafla verðu stuttlega farið í notkun á straumfræðilegri reiknihermun (e. computational fluid dynamics) við mælitækjapróun á Segrometer-4SCC. Athuga ber að þessi áfangi var ekki fyrirhugaður í þessu verkefni og var í raun ekki settur í gang fyrr en í lokaáfangi þess. Þar að leiðandi gefur þessi kafli ekki neinar endanlegar niðurstöður og er það heldur ekki tilgangur þess. Tilgangur með þessum kafla er afturámóti hugsaður fyrir þá sem vilja þróa nýja útfærslu á Segrometer-4SCC (eftir núverandi verkefnislok). Markmiðið er að benda á öfluga og mjög hagkvæma lausn við áframhaldandi þróun á nýrri útfærslu tækisins.

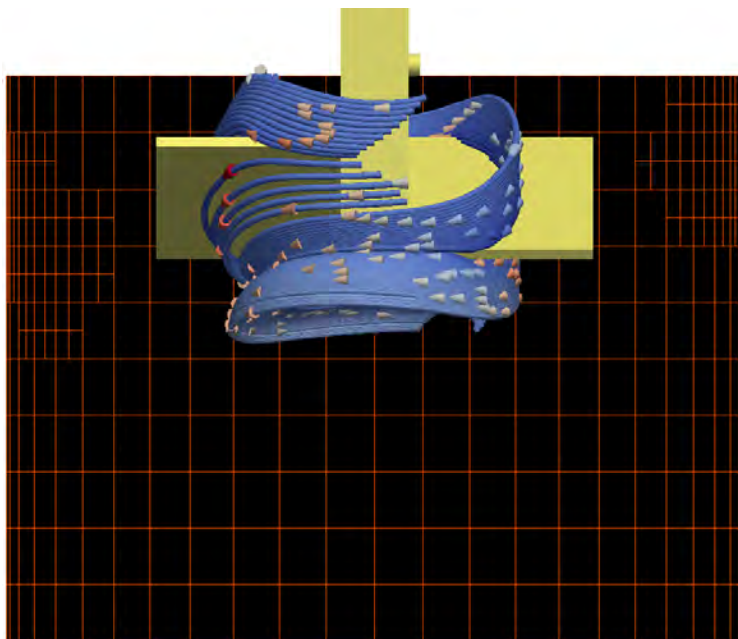
Helsta niðurstaða Kafla 8 (það er, fyrrgreinda kafla) er að við tiltekna efniseiginleika steypu þá geta FSS reikningarnir orðið rangir (samanber hinni “ósættanlega villu” nefnd í byrjun Kafla 7). Hér verður þó að athuga að þessi niðurstaða er bundinn við þá mælivispu sem er sýnd á Mynd 2 og notuð í þessu verkefni, ásamt þeirri fötu sem notuð er. Það má vera vel mögulegt að með annarri gerð spaða, þá væri hægt að útiloka hina “ósættanlegu villu”. Að prufa nýja útgáfu af spaða með tilraunum er ógerningur út af þeim kostnaði sem mundi fylgja slíkri tilraun. Í þessu verkefni hafa verið gerðar milli 400 til 500 steypumælingar og er kostnaður við slíkt töluvert mikill. Ástæðan fyrir nauðsyn þessa fjölda af steypumælingum er til að tryggja áræðanleika. Það er ekki gert með einungis með t.d. 50 mælingum. Með nauðsynlegan fjölda af 400-500 mæliniðurtöðum kemur efniskostnaður, launakostnað, fundahald um næstu skref, undirbúning fyrir tilraun, sjálf tilraunin, þrif eftir tilraun og ekki síst við greiningu á öllum þeim aragrúa mæliniðurstöða sem síðan fást ásamt tilheyrandi forritun fyrir ítarlega gagna greiningu.

Út af fyrrgreindri málsgrein, þá er það augljóst að það fellst mikil vinna og kostnaður við að prufa nýja tegund af mælivispu sem þýðir að það þarf að vanda mjög til verka við hönnun slíks áður en hin raunverulega og kostnaðarsama tilraunasería er keyrð. Ein aðferð við að hanna og beturbæta mælivispu (áður en hún er prófuð með kostnaðarsamari tilraun) er að athuga hana með hjálp straumfræðilegrar reiknihermunar (e. computational fluid dynamics). Með öðrum orðum, eftir að búið er að teikna nýja gerð af mælivispu, þá er hún reiknilega prófuð. Mynd 49 til vinstri sýnir hvernig núverandi mælivispa (og fata) er sett up í reiknihermi. Á myndinni til vinstri er sýnd dæmi um breytta mælivispu og hvernig hún (ásamt fötu) er sett í reiknihermi. Dæmi um niðurstöðu má sjá á Mynd 50 (óbreytta mælivispa) og Mynd 51 (breytt mælivispa), þar sem straumlínur (e. streamlines) eru teiknaðar. Í hinum reiknilegum niðurstöður sýndar á þessum tveim myndum, er snúningshraðinn á vispunni ω settur á 3 rad/s. Hinn plastíska segjustuðull μ er á 45 Pa·s og

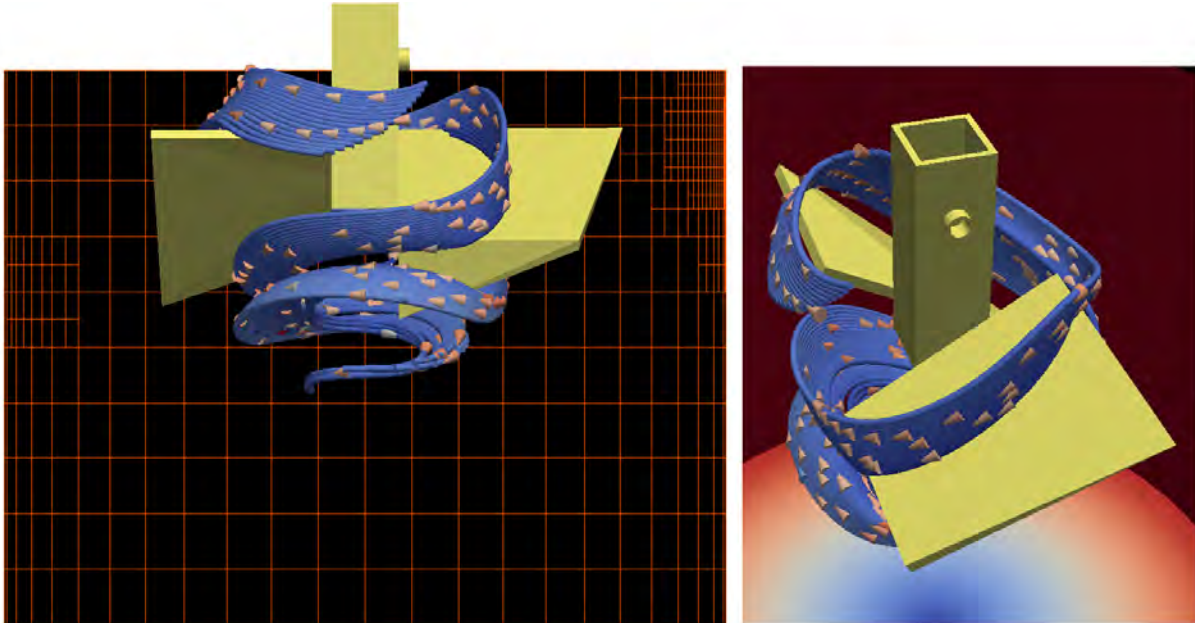
flotskerspennan τ_0 er á 0 Pa. Samanburður á Myndum 50 og 51 sýna að straumlínurnar ná örlítið lengra niður í steypunna (í fötunni) fyrir nýju mælivispu, nokkuð sem þýðir að hún nær að virkja steypuna betur lengra niður í fötunni. Þetta er einungis dæmi um mikilvægt atriði sem ber að taka tillit til við þróun á nýrri tegund af mælivispu. Annað dæmi eru reikningar á kröftum, sýndar fyrir neðan.



Mynd 49: Núverandi mælivispa (og fata) uppsett í reiknihermi (til vinstri). Breytt mælivispa (ásamt fötu) er uppsett í reiknihermi (til hægri).



Mynd 50: Niðurstöður reiknilíkans á flæði fyrir óbreytta vispu.



Mynd 51: Niðurstöður reiknilíkans á flæði fyrir breytta vispu.

Kraftar reiknaðir frá steypu yfir á vispu eru gerðir samkvæmt eftirfarandi jöfnu [6,7]:

$$\mathbf{F}_{\text{vispa}} = \int_{\text{vispa}} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} dA \quad (30)$$

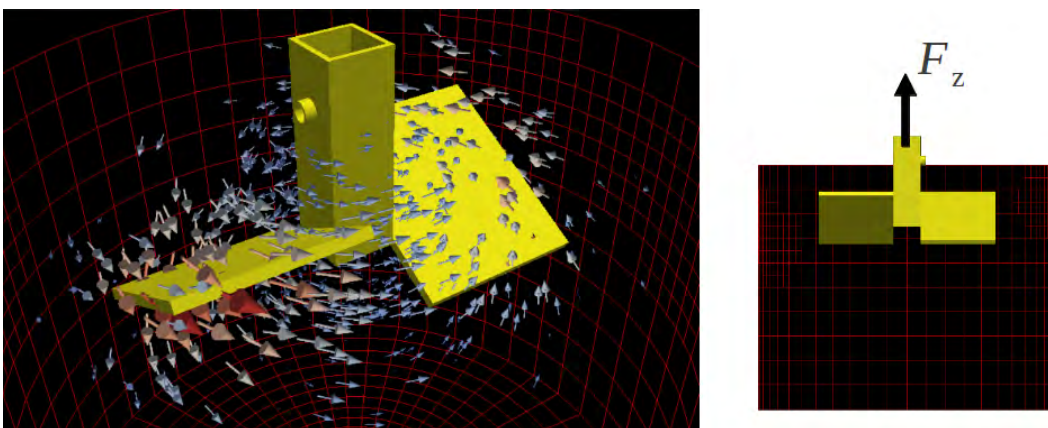
...þar sem \mathbf{n} er normalvigur vispunnar (breytilegur eftir staðsetningu) og $\boldsymbol{\sigma}$ er spennu tensorinn gefinn með $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \mathbf{T}$. Stærðin \mathbf{T} er svo kallaður “extra stress tensor”, gefinn með [6,7]:

$$\mathbf{T} = 2 \left(\mu + \frac{\tau_0}{\sqrt{2\dot{\boldsymbol{\epsilon}}:\dot{\boldsymbol{\epsilon}}}} \right) \dot{\boldsymbol{\epsilon}} \quad (31)$$

þar sem

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}} = (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) / 2 \quad (32)$$

...er kallaður “rate of deformation tensor” [6,7].



Mynd 52: Við snúning vispunnar, myndast lóðréttur krafturinn F_z skv Jöfnu (33).

Lóðrétti hluti krafts F_z eins og sýndur er á Mynd 52, er sérstaklega áhugaverður og reiknast samkvæmt Jöfnu (33).

$$F_z = \mathbf{F}_{\text{vispa}} \cdot \mathbf{i}_z \quad (33)$$

Með $\omega = 3 \text{ rad/s}$, $\mu = 45 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ og $\tau_0 = 0 \text{ Pa}$, þá reiknast $F_z = 2.9 \text{ N}$ fyrir venjulegu vispuna og $F_z = 3.6 \text{ N}$ fyrir breyttu vispunna. Eins og áður hefur verið nefnt, þá er þetta krafturinn frá steypu yfir á mælivispu. Þar sem mælivispann er ekki að bogna (það er að segja, að gefa sig), þá samkvæmt þriðja lögmáli Newtons, er þessi kraftur jafn þeim krafti sem vispan er að ýta á steypunna (þó með öfugu formerki). Í þessu samhengi þá er það breytta mælivispan (Mynd 51) sem er að ýta meira á steypuna, nokkuð sem gæti gefið til kynna um meiri aðskilnaðarkraft en óbreytta vispan gerir. Þetta er einungis annað dæmi um mikilvægt atriði sem ber að taka tillit til við þróun á nýrri tegund af mælivispu.

Eins og sagt var í upphafi þessa kafla, þá er tilgangur þess ekki að koma með endanlega niðurstöðu á nýrri útfærslu á mælivispu fyrir Segrometer-4SCC. Tilgangurinn hér er að sýna dæmi um aðferð við mælitækjapróun með hjálp reiknilegra hermunar, nokkuð sem mundi spara töluvert miklar fjárhæðir.

10. Niðurstöður og lokaorð

Eins og greinilega hefur komið fram í Köflum 5 til 6, þá hefur hið flotfræðilega stöðugleikastig FSS reiknað samkvæmt Jöfnu (13) (eða Jöfnu (23)) virkað vel, þó með nokkrum undartekningum. Hinsvegar, eins og kom fram í Kafla 6.3, þá fyrir aðra (Kafli 5) og þriðju (Kafli 6) tilraunaseríu er til staðar svokölluð ósættanleg villa í 11% tilfella fyrir Jöfnu (13). En slík vill lýsir sig í því þegar FSS gildið er mun lægra en ASE_BL gildið nálægt rauðu lóðréttu línunni í Myndum 27 og 35 (þ.e.a.s. í svæðinu ASE_BL = 0.45). Að FSS gildið skuli vera miklu lægra á þessu svæði þýðir að Segrometer-4SCC er að vanmeta ástand steypunnar með þeim hætti að steypa er raunverulega í verra ástandi en FSS mæligildi gefur til kynna. Afleiðingin getur verið að ónýt steypa verði notuð á byggingarstað, nokkuð sem gæti gefið töluverðan viðgerðarkostnað.

Með kerfilegri breytingu á w/p gildinu í Kafla 7, og með frekari greiningu í Kafla 8, þá fékkst að hátt H gildi aðskilnaðarefju (það er, hár plastískur segjustuðull μ efjunnar) tryggir ekki nauðsynlega stöðugleika steypu og það er sá óheppilegi eiginleiki sem er stundum að trufla FSS reikningana (hin svokallaða “ósættanleg villa” sem nefnd var í byrjun 7 kafla). Þessi niðurstaða virðist helst gilda við lágt w/p gildi (w/p < 0.35). Þar að leiðandi þegar þessi villa kemur fram, þá er það aðallega fyrir hástyrkleika/hágæða-steypur (það er, steypur með mjög lágt w/p gildi).

Sýnt hefur verið í þessari skýrslu að G gildi hins aðskilda massa spilar mjög stórt hlutverk í reikningum á FSS, þannig að ómögulegt væri að sleppa því úr Jöfnu (23) (þ.e. Jöfnu (13)). H gildið spilar líka stórt hlutverk, en því miður þá er það gildi sem helst truflar mæliniðurstöður FSS reikningana, og þá helst þegar lágt w/p gildi er til staðar í steypunni (w/p < 0.35).

Steyputækni ehf. (ConTec) hyggst selja Segrometer-4SCC til styrktaraðila. Meðfylgjandi munu vera leiðbeiningar sem einmitt lýsa ofangreindum eiginleika. Verður tækið selt til þeirra sem tilraunarútgáfa, með það að markmiði að notendurnir komi með athugasemdir og uppástungur um lagfæringar sem þarf á að halda.

Athuga ber í þessu samhengi, þá er þróun á mælitæki sem mælir aðskilnað í steypu mjög erfitt viðfangsefni, sem einna helst sést á því að hin ýmsu tæki hafa komið og horfið af markaðnum. Til dæmis, þá hefur höfundur þessa rits notast við mæliaðferðina “Wet sieving stability segregation test” sem er mælt er með í “*The European Guidelines for Self Compacting Concrete*”. En þessi aðferð hefur komið mjög illa út, sem eiginlega lýsir vel hversu erfitt viðfangsefnið er (það er

mæling á stöðugleika steypu). Með tillit til þessa, þá hefur þróun á mælitækinu Segrometer-4SCC heppnast mjög vel.

Heimildaskrá

- [1] B. Hjartarson, Rheometer-4SCC, a Portable Rheometer for Self Compacting Concrete, Master Thesis, Faculty of Engineering, University of Iceland, 2006.
- [2] P. J. M. Bartos, M. Sonebi, and A. K. Tamimi (editors). Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests; Report of RILEM Technical Committee TC 145-WSM, Workability of Special Concrete Mixes. RILEM Publications S.A.R.L., Cachan Cedex, France, 2002.
- [3] The European Guidelines for Self Compacting Concrete, Annex B: Test Methods, AnnexPart B4: Testing fresh concrete. pp.57-59
- [4] O. H. Wallevik and O. E. Gjörv. Development of a coaxial cylinder viscometer for fresh concrete. Proceedings of the Rilem Colloquium: Properties of Fresh Concrete, pages 213–224, 1990.
- [5] O.H. Wallevik. IBRI at Your Service; The Rheology of Fresh Concrete. Keldnaholti, IS-112 Reykjavik, Iceland, 1999.
- [6] G.E. Mase, Schaums Outline Series: Theory and Problems of Continuum Mechanics, McGraw–Hill Inc., USA, 1970.
- [7] L.E. Malvern, Introduction to the Mechanics of Continuous Medium, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1969.