



# Formfyldning med SCC, DR Byen

## SCC-Konsortiet, Delprojekt P33

*Udført for:  
Innovationskonsortiet for Selvkompakterende Beton*



*Udført af:  
Teknologisk Institut, Betoncentret*

*Taastrup, maj 2007*



TEKNOLOGISK  
INSTITUT

Titel: Formfyldning med SCC, DR Byen

Forfatter: Lars Nyholm Thrane

Reproduktion af dele af rapporten er tilladt, hvis kilde angives.



## Indhold

1.	Indledning.....	5
1.1	Prøvningsomfang .....	6
1.2	Udstøbningsmetode.....	7
1.3	Betontyper.....	8
2.	Støbeforløb .....	11
3.	Den friske betons egenskaber .....	15
3.1	Kravspecifikation til flydeegenskaber .....	15
3.2	Prøvningsoversigt, frisk beton .....	15
3.3	J-Ring forsøg til vurdering af blokering .....	15
3.4	Reologiske egenskaber målt med 4C-Auto Slump Flow (Prototype).....	17
3.5	Resultater .....	19
4.	Den hærdnende betons egenskaber .....	21
4.1	Varmeudvikling .....	21
4.2	Styrkeudvikling.....	22
5.	Observationer .....	23
5.1	Formfyldning .....	23
5.2	Blokering.....	24
5.3	Separation – Statisk og dynamisk .....	25
5.4	Formtryk .....	28
5.5	Overfladefinish.....	30
6.	Sammenfatning.....	33
6.1	Friske betonegenskaber.....	33
6.2	Formfyldning .....	33
6.3	Separation.....	34
6.4	Formtryk .....	34
6.5	Overfladefinish.....	34
7.	Litteratur.....	35

## Bilag

A.	Tegninger af vægge V1-V5 og NØ .....	10 sider
B.	Støbeforløb for V1-V5 .....	6 sider
C.	J-Ring resultater.....	2 sider
D.	Prøvningsattester .....	32 sider
E.	Simulering af støbeforløb for væg V3.....	2 sider
F.	Formtryk .....	2 sider
G.	Statisk separation.....	3 sider
H.	Makroanalyse .....	7 sider
I.	Overfladefinish.....	2 sider





# 1. Indledning

SCC-konsortiet er et innovationskonsortium støttet af Ministeriet for Videnskab, Teknologi og Uddannelse over en tre-årig periode startende ultimo 2003.

Konsortiet ledes af Teknologisk Institut, Betoncentret med deltagerne fra den danske betonbranche og både danske og udenlandske forskningsinstitutioner. Mere information om konsortiets sammensætning findes på [www.SCC-konsortiet.dk](http://www.SCC-konsortiet.dk).

Selvkompakterende beton forkortes SCC efter dets engelske betegnelse (Self-Compacting Concrete). Andre betegnelser for denne type materiale er flydebeton og vibreringsfri beton. Som navnet antyder dækker det over et betonmateriale med særlige flydeegenskaber som gør, at betonen kan placeres i formen uden brug af mekanisk påvirkning (vibrering). SCC flyder ud og omslutter armeringen ved egen kraft og alene ved den bevægelsesenergi, som tilføres når betonen placeres via pumpe eller spand. Der vil dog være behov for en let manuel påvirkning og afretning.

Innovationskonsortiet arbejder med en række delopgaver indenfor områderne:

- P1 – Materialemodellering omkring mix design, delmaterialernes indflydelse og materialeegenskaber, herunder specielt flydeegenskaberne.
- P2 – Fremtidens betonfabrik omhandler produktionstekniske aspekter ved SCC.
- P3 – Udførelse omhandler den udførendes teknikker såsom formfyldning, efterbehandling og curing.
- D1 – Produktivitet og arbejdsmiljø indeholder en kvantificering af SCC's betydning for byggeriets effektivitet og arbejdsmiljø.
- D2 – Formidling og implementering indeholder rapportering, SCC portal på internettet, demonstrationsprojekter, etc. for at sikre at resultaterne kommer ud til slutbrugerne.

Delopgaverne P1-P3 omfatter udviklingsprojekter, hvor en given teknisk opgave belyses og løses i det omfang det er muligt. Delopgaverne D1 og D2 er discipliner, som ligger på tværs af udviklingsprojekterne.

## 1.1 Prøvningsomfang

Der er støbt fem ens indvendige letarmerede kældervægge uden udsparinger og en kernevæg med udsparinger af forskellig størrelse. Tegninger og detaljer fremgår af Bilag A.

De fem vægge er 4 m høje, 5 m lange og 0,5 m tykke. Armering består af Y16/150 i for- og bagside og U-bjl. Y12/300 i støbeskel i bund og top svarende til en armeringsmængde på ca. 88 kg pr. m<sup>3</sup>.

Kerneväggens vægtykkelse varierer mellem 250 og 350 mm og højden er 4 m. Armering består af Y12/200 i begge sider og i begge retninger plus udragende U-bjl. fra fundament. I døroverligger er der ilagt 2 Y16 US samt U-bjl. Y10/200. Over huller ligger 2 Y16 på overside og underside samt bjl. Y10/200. Armeringsmængden varierer fra ca. 90 til 125 kg/m<sup>3</sup>.

Tabel 1: Vægge, der indgår i fuldskalaforsøg.

	Væg 1	Væg 2	Væg 3	Væg 4	Væg 5	Kerne
Tegnings-ID (Bilag A)	V1	V2	V3	V4	V5	NØ
Støbedato	21.12.04	21.12.04	21.12.04	30.12.04	30.12.04	18.01.05
Betontype	E40	E40	E40	M30 <sup>(1)</sup>	M30 <sup>(1)</sup>	M30 <sup>(2)</sup>

Billeder af væggene på byggepladsen er vist i Figur 1-1 og Figur 1-2.



Figur 1-1: Der er støbt fem ens indvendige letarmerede plane kældervægge, her vist V1-V3.



Figur 1-2: Der er støbt én indre kernevæg (NØ) med forskellige udspartinger.

## 1.2 Udstøbningsmetode

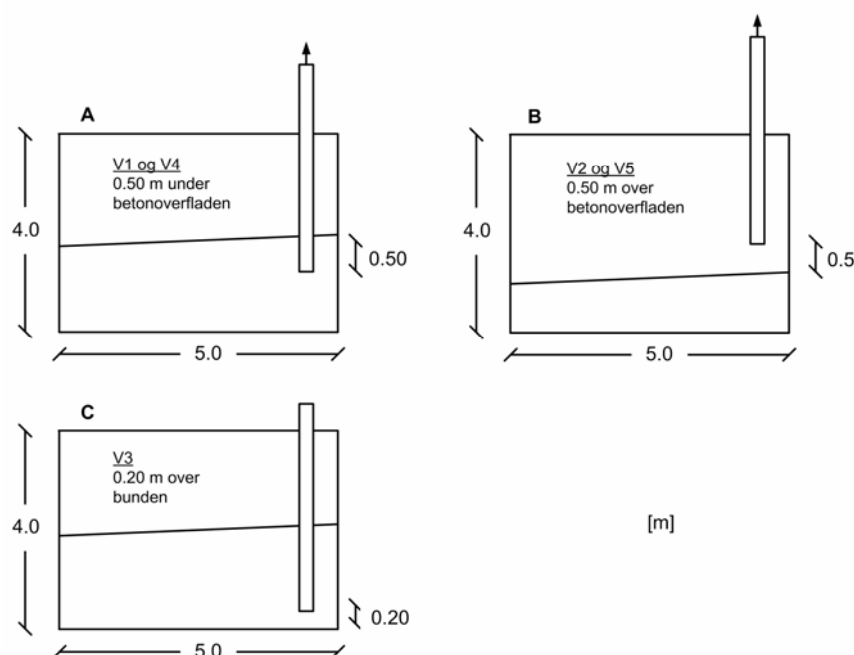
Ved alle støbninger er betonen pumpet ned i formen. For de letarmerede kældervægge (V1-V5) er pumpestudsene placeret på 3 forskellige måder set i forhold til betonoverfladen (Figur 1-3):

- Pumpestuds placeret ca. ½ m under betonens overflade under hele støbningen (A).
- Pumpestuds placeret ca. ½ m over betonens overflade under hele støbningen (B).
- Pumpestuds placeret ved formens bund under hele støbningen (C).

Under alle støbninger er pumpestudsene placeret ca. 20 cm fra den ene ende af formen. Pumpningen foregik via et Ø100 mm stålrør.

Tabel 2: Fyldningsmetoder for vægge.

Væg	V1	V2	V3	V4	V5	NØ
Lodret placering af pumpestuds	A ½ m under overflade	B ½ m over overflade	C Ved formens bund	A ½ m under overflade	B ½ m over overflade	Variierer
Vandret placering af pumpestuds	Ca. 20 cm fra den ene ende					Variierer



Figur 1-3: Illustration af den anvendte støbeteknik for V1-V5.

Ved støbning af NØ væggen blev pumpe-slangen med jævne mellemrum flyttet. I modsætning til støbning V1-V5 blev der anvendt en støbestrømpe i stedet for et stålrør, da det ellers ikke havde været muligt at undgå store frie fald pga. en tættere armering omkring hjørner og udspæringer. Strømpen blev holdt 0-2 m over betonoverfladen og løbende flyttet under støbningen.

### 1.3 Betontyper

Der er benyttet to typer SCC, som det fremgår af Tabel 3:

- E40 med karakteristisk styrke på 40 MPa og beregnet til ekstra aggressiv miljøklasse. Ækvivalent v/c tal må højst være 0,40.
- M30 med karakteristisk styrke på 30 MPa og beregnet til moderat miljøklasse. Ækvivalent v/c tal må højst være 0,55.

Tabel 3 viser sammensætningen af de anvendte betoner. Beton E40 og M30<sup>(1)</sup> blev benyttet til støbning af henholdsvis V1-V3 og V4-V5. Beton M30<sup>(2)</sup> blev benyttet ved støbning af NØ.

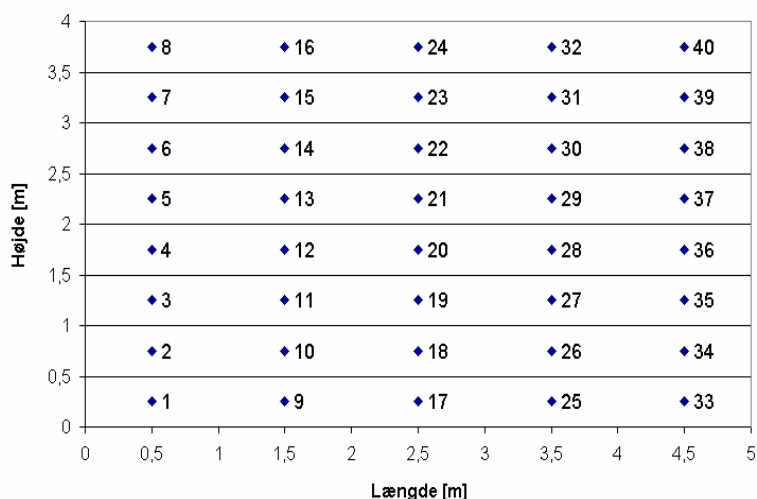
Tabel 3: Tilstræbte recepter. Alle mængder er angivet i  $\text{kg/m}^3$ .

Betonbetegnelse		E40	M30 <sup>(1)</sup>	M30 <sup>(2)</sup>
Væg		V1-V3	V4-V5	NØ
Cement, Aalborg Portland RAPID (CEM I 52,5 R)			245	260
Cement, Aalborg Portland Lavalkali CEM I 42,5 N (HS/EA/<2)		319		
Flyveaske, Type B4		79	57	68
Mikrosilica, Elkem slurry		33	25	20
Vand, vandværk		143,8	159,6	156,2
Luftindblandingsmiddel, 4K luft 02		0,410	0,360	0,550
Superplastificeringsmiddel, 4K superpl. 106		3,729	3,144	3,710
Tilslag, A	Tilslag, M			
00/04, Kl. E, RN Avedøre	Sand 0/4, Svogerslev kl. P	749	392	357
04/08, E, Stema, Eikefet	Sand 0/4, kl. E	748	397	364
08/16, E, Stema, Eikefet	Sten 4/8, Prøvestenen kl. M	225	209	222
	Sten 8/16, Prøvestenen kl. M		747	770
Ækv. v/c		0,37	0,53	0,497



## 2. Støbeforløb

Ved støbning af V1-V5 er støbeforløbet dokumenteret ved brug af termofølere. Termofølerne blev placeret i væggenes symmetriplan, som vist i Figur 2-1. Ved at måle temperaturen som funktion af tiden er det muligt at bestemme placeringen af betonens overflade under støbningen.



Figur 2-1: Placering af termofølere i V1-V5. Alle termofølere er placeret i symmetriplanen (0.5 m tykkelse).

Levering af beton fra 4K's fabrik på Prøvestenen foregik som følger:

- Fire læs à ca. 7 m<sup>3</sup> og ét læs à ca. 3 m<sup>3</sup> ved støbning af V1-V3.
- To læs à ca. 10 m<sup>3</sup> ved støbning af V4 og V5.
- Fire læs à 7 m<sup>3</sup> og ét læs à 9 m<sup>3</sup> ved støbning af NØ kernevæg.

Tabel 4 og Tabel 5 viser tidspunkt, læsnummer og støbehøjde for støbning af henholdsvis V1-V3 og V4-V5.

Figur 2-2 viser støbehøjde som funktion af tiden, hvor tiden 0 angiver støbestart for hver enkelt væg. For en detaljeret oversigt over støbefrontens lodrette og vandrette placering som funktion af tiden henvises til bilag B.

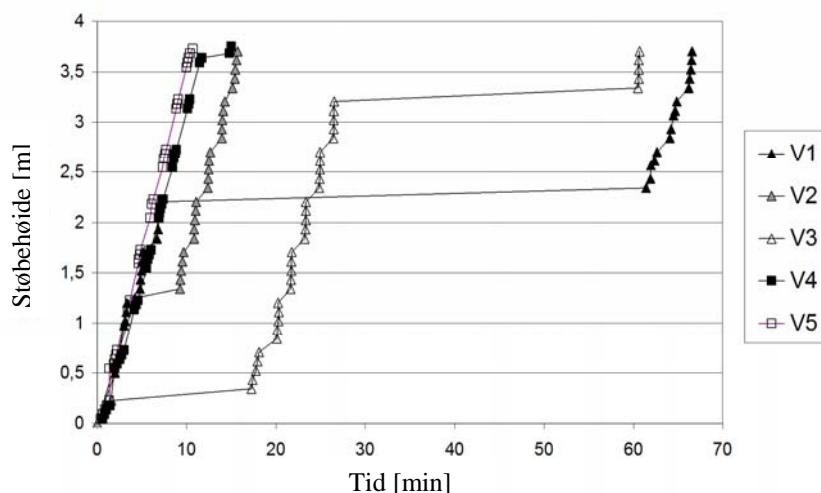


Tabel 4: Oversigt over støbning af V1-V3 med E40 den 21.12.04.

Tid	Støbning	Læs	Estimeret støbehøjde i m		
			V1	V2	V3
9:16	Start	1 (start)	0		
9:26		1 (slut)	2,3		
10:15		2 (start)	2,3		
10:21	Slut	2	4		
10:30	Start	2		0	
10:34		2 (slut)		1,3	
10:42		3 (start)		1,3	
10:50	Slut	3		4	
11:13	Start	3			0
11:15		3 (slut)			0,3
11:30		4 (start)			0,3
11:40		4 (slut)			3,3
12:11		5 (start)			3,3
12:15	Slut	5			4

Tabel 5: Oversigt over støbning af V4 og V5 med M30<sup>(1)</sup> den 30.12.04.

Tid	Støbning	Læs	Estimeret støbehøjde i m	
			V4	V5
10:32	Start	1 (start)	0	
10:43		1 (slut)	3,6	
10:46		2 (start)	3,6	
10:48	Slut	2	4	
11:02	Start	2		0
11:14	Slut	2 (slut)		4



Figur 2-2: Støbehøjde som funktion af tiden ved støbning af V1-V5.

Af Figur 2-2 ses, at støbehastigheden i støbeperioderne er næsten den samme svarende til ca. 20 m/time. Der var dog perioder med støbestop af forskellige årsager. Disse perioder ses som vandrette linier. For V1 var der således en støbepause på næsten en time efter at ca. halvdelen af væggen var udstøbt.

Tabel 6 viser tidspunkter for betonleverancer ved støbning af NØ væggen. Der blev forsøgt at måle støbehøjden i en udvalgt sektion af formen, men det har ikke været muligt at opnå en entydig tolkning af resultaterne pga. væggenes varierende udformning og armering.

Tabel 6: Oversigt over støbning af NØ væg med M30<sup>(2)</sup> den 18.01.05.

Tid	Støbning	Læs	Estimeret støbehøjde
17:05	Start	1	
17:49	Start	2	
18:12	Start	3	Støbehøjden varierer efter placering af indløbet.
18:43	Start	4	
19:20	Start	5	



### 3. Den friske betons egenskaber

Den friske betons egenskaber omfatter flydeegenskaber, tilslagsstabilitet, luftindhold, temperatur, og densitet.

Flydeegenskaberne er målt med udbredelsesmål efter Annex U i DS 2426 og 4C Auto Slump Flow (prototype) til bestemmelse af de reologiske egenskaber.

Tilslagsstabilitet er målt med J-Ringen (Engelsk: *Japan-Ring*).

Luftindhold, densitet og temperatur er målt efter gældende standarder.

Der findes på nuværende tidspunkt ikke gode metoder til bestemmelse af risikoen for separation. Derfor er den kun vurderet ud fra visuelle observationer af betonen ved levering til pladsen. Ved tydelig tendens til statisk separation ville læsset blive kasseret.

#### 3.1 Kravspecifikation til flydeegenskaber

Da formålet var at opnå erfaringer med lodrette støbninger var der ikke på forhånd sat nogen håndfaste grænser op for godkendelse af flydeegenskaberne. Der blev foretaget en vurdering på stedet for hvert læs beton især i forhold til separationstendensen. På baggrund af denne vurdering blev der ikke kasseret nogen læs.

#### 3.2 Prøvningsoversigt, frisk beton

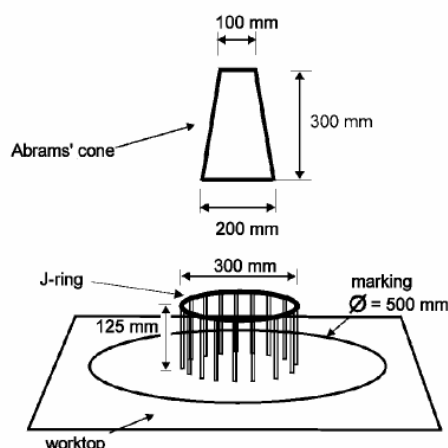
Det blev tilstræbt at måle på alle læs på henholdsvis fabrikken og ved ankomst til pladsen. På pladsen er prøver til måling af den friske betons egenskaber hovedsageligt udtaget før pumpe. En resultatoversigt findes i Tabel 7.

#### 3.3 J-Ring forsøg til vurdering af blokering

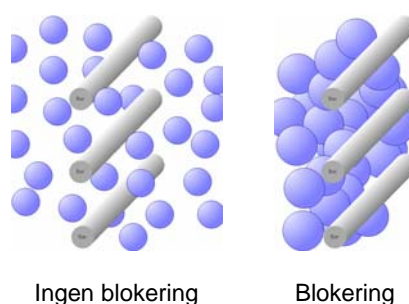
En af de metoder, der foreslået til at vurdere blokeringsrisikoen er den såkaldte J-Ring (*Japan-Ring*) som vist i Figur 3-1.

Der udføres et udbredelsesforsøg med en cirkulær ring af armeringsjern.

Blokering er defineret som ophobning af tilslag bag armering, som illustreret i Figur 3-2. Når tilslag ophobes bag armeringen er det kun pasta, der flyder igennem armeringen. Når betonen, som helhed, ikke kan passere armeringen dvs. både tilslag og pasta tilbageholdes, er det et udtryk for en lav passeringsevne (på engelsk: *Passing ability*). I dette tilfælde forbliver betonen homogen og passeringsevnen afhænger af de reologiske egenskaber.

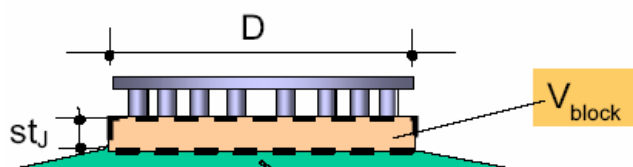


Figur 3-1: J-Ring testen til vurdering af blokeringsrisikoen [1].



Figur 3-2: Illustration af definitionen på blokering. Tilslag ophobes bag armeringen.

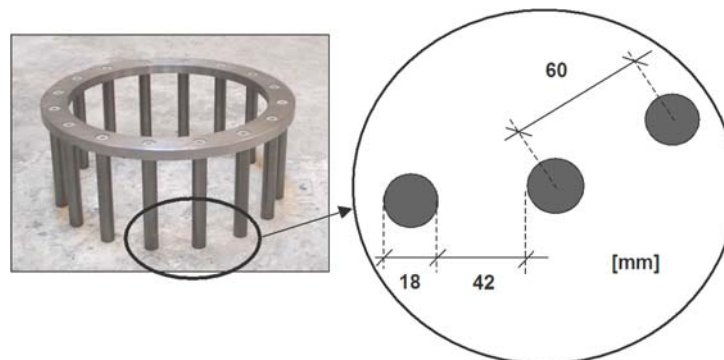
Tolkning af resultaterne fra J-Ringen er diskuteret i forskellige publikationer (se bl.a [2]). Konklusionen er, at forskellen mellem udbredelse målt ved udbredelsesmål med og uden J-Ring ikke kan anvendes som et kvantitativt udtryk for blokering, da blokering kan betyde, at man risikerer at måle udbredelsen på pasta i stedet for homogen beton i J-Ringen. En anden metode er at bestemme parameteren  $st_j$  (step of blocking), der udtrykker en gennemsnitlig højdeforskel mellem betonen på den indvendige og udvendige side af armeringen (Figur 3-3).



Figur 3-3: Principskitse for beregning af det såkaldte blokeringsindex  $st_j$ .

Blokeringssteppet ( $st_j$ ) beregnes som gennemsnittet af fire målepunkter. Der måles i to retninger vinkelret på hinanden (to målepunkter i hver retning).

Den anvendte J-Ring er vist i Figur 3-4 og resultaterne er samlet i Bilag C.



Figur 3-4: Geometri for den anvendte J-Ring.

Konklusionen er, at bestemmelse af  $st_j$  ikke umiddelbart giver en entydig bestemmelse af blokeringsrisikoen. Den visuelle bedømmelse anses at være lige så vigtig. Eksempelvis registreres høje  $st_j$  værdier for M30<sup>(1)</sup> til V4 og V5 uden at der bemærkes nogen væsentlig grad af blokering. I dette tilfælde er der tale om ringe passeringsevne, som relaterer sig til de reologiske egenskaber.

Desuden er bestemmelse af  $st_j$  med i alt otte målepunkter tidskrævende og ikke umiddelbart et operationelt værktøj til at vurdere blokeringstendensen på en byggeplads. Desuden bør afstanden mellem de lodrette stænger tilpasses en given støbning således at det er repræsentativt for armeringen i formen.

### 3.4 Reologiske egenskaber målt med 4C-Auto Slump Flow (Prototype)

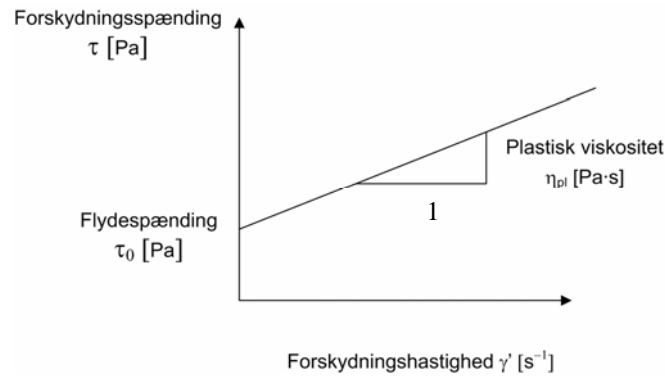
De reologiske egenskaber beskriver sammenhængen mellem forskydningsspændinger og forskydningshastigheder i en flydende væske. SCCs egenskaber kan beskrives med en Bingham model givet ved en lineær sammenhæng mellem disse størrelser:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$$

hvor  $\tau$  = forskydningsspændingen,  $\dot{\gamma}$  = forskydningshastigheden,  $\tau_0$  = flydespændingen og  $\eta_{pl}$  = plastiske viskositet. Bingham modellen er illustreret i Figur 3-5.

De reologiske egenskaber er afgørende for at opnå en tilfredsstillende formfyldning.

Flydespændingen er et udtryk for betonen deformationsevne dvs. hvor langt den kan flyde, og den plastiske viskositet er et udtryk for deformationshastigheden dvs. hvor hurtigt betonen flyder.

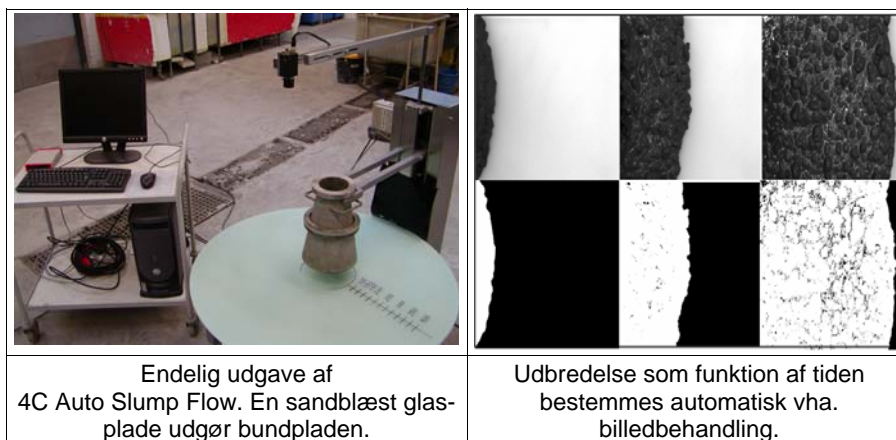


Figur 3-5: Bingham model.

De reologiske egenskaber er målt med en prototype udgave af 4C Auto Slump Flow, som er en automatiseret udførelse af et udbredelsesforsøg. De reologiske egenskaber bestemmes ved at sammenligne de eksperimentelle flydekurver med simuleringer af flydesætmålet. Flydekurverne henviser til betonens udbredelse som funktion af tiden. I prototypen blev keglen løftet med konstant hastighed,  $v_{løft} \approx 4$  cm/s og bundpladen bestod af en plyfaplade, som blev tørret af for at undgå slip (Figur 3-6). Den endelige udgave af 4C Auto Slump Flow systemet er vist i Figur 3-7.



Figur 3-6: Eksempel på test med en prototype af 4C Auto Slump Flow systemet.



Figur 3-7: Den endelige udgave af 4C Auto Slump Flow systemet.

### 3.5 Resultater

Tabel 7: Målinger af den friske betons egenskaber for V1-V5.

Væg	V1	V2	V3			V4	V5
Læs	1 <sup>A</sup>	2 <sup>A</sup>	3 <sup>A</sup>	4 <sup>A</sup>	5 <sup>A</sup>	1 <sup>M</sup>	2 <sup>M</sup>
Følgeseddel	53589	53599	53601	53605	53612	53823	53828
Blandetid	08:12	09:34	09:58	10:52	11:44	09:27	
Udbredelsesmål jf. DS 2426 Anneks U [mm]							
Fabrik	680	670	660	650	710	660	670
Plads (før pumpe)	720	700 (700 efter pumpe)	660	700		590	590
J-Ring målinger på pladsen før pumpe [mm]							
Udbredelse	660	630	650	655		580	590
ST <sub>j</sub>	2	14	13	17,1		12	13
Bemærkninger	1 <sup>A</sup> : Yderste 1 cm uden sten / 2 <sup>A</sup> : Tendens til blokering / 3 <sup>A</sup> : Tendens til blokering / 4 <sup>A</sup> : Yderste 1 cm uden sten / 1 <sup>M</sup> : Ingen bemærkninger / 2 <sup>M</sup> : Ingen bemærkninger						
Luftindhold [%]							
Fabrik	4,9	7,0	8,0	6,4	6,6		
Plads (før pumpe)	5,0	6,6 (efter pumpe 7,4)	8,1	5,1		8,5	7,1
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]							
Fabrik	2335	2290	2250	2306			
Temperatur [°C]							
Fabrik	11	12			14		
Plads (før pumpe)	16	16 (efter pumpe 16)	17	16			
4C Auto-slump reologiske egenskaber							
Tid	9:11		11:08		12:11	10:09	11:22
Flydespænding [Pa]	20		20		20	60	45
Plastisk viskositet [Pa·s]	60		60		60	34	34



Tabel 8: Målinger af den friske betons egenskaber for NØ væg.

Følgeseddel	54427	54429	54430	54431	54432
Blandetid	16:01	16:44	17:08	17:39	18:15
Udbredelsesmål jf. DS 2426 [mm]					
Fabrik	670	670	670	700	710
Plads (Før pumpe)	720	710	705	705	730
J-Ring målinger på pladsen før pumpe [mm]					
Udbredelse		635	615	695	710
ST <sub>j</sub>	10,4	18,8	15,8	4,6	2,0
Bemærkninger	1 <sup>m2</sup> : ingen bemærkninger / 2 <sup>m2</sup> : Tendens til blokering / 3 <sup>m2</sup> : Ingen bemærkninger / 4 <sup>m2</sup> : Ingen bemærkninger / 5 <sup>m2</sup> : Ingen bemærkninger				
Luftindhold [%]					
Fabrik	4,2	5,4	4,2	6,0	5,0
Plads (Før pumpe)	4,1	4,0	3,6	4,2	3,4
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]					
Fabrik	2299	2250	2295	2205	2233
Temperatur [°C]					
Fabrik	13	13	13	12	13
4C Auto-slump reologiske egenskaber					
Tid					19:28
Flydespænding [Pa]					18
Plastisk viskositet [Pa·s]					30

## 4. Den hærdnende betons egenskaber

### 4.1 Varmeudvikling

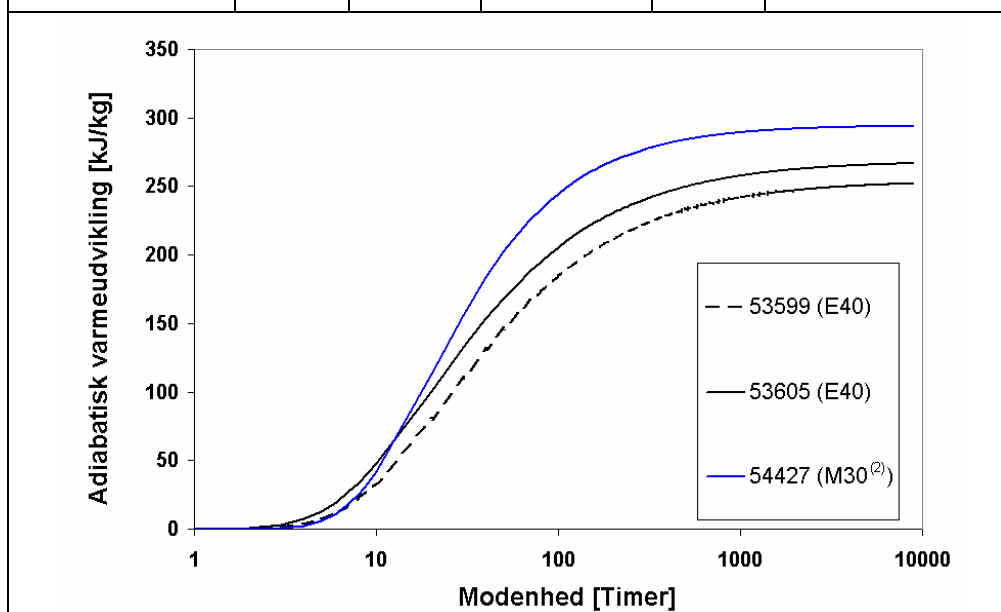
Der er udtaget prøver til bestemmelse af varmeudviklingen ved hækseforsøg. Der er målt varmeudvikling for to læs leveret til V1-V3 (E40) samt for et læs leveret til NØ (M30<sup>(2)</sup>). Varmeudviklingen beskrives som

$$Q = Q_{uend} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha\right)$$

hvor  $Q$  = varmeudvikling som funktion af modenheden [kJ/kg],  $Q_{uend}$  = den totale varmeudvikling [kJ/kg],  $M$  = modenhed [h],  $\tau_e$  = tidskonstant [h] og  $\alpha$  = hærdningsparameter. De målte parametre og varmeudviklingen er vist i Tabel 9.

Tabel 9: Varmeudvikling målt for læs leveret til V1-V3 og NØ. Varmeudviklingen er angivet i kJ pr. kg pulver.

Følgeseddel	Vægt [kg]	Q-uend [kJ/kg]	$\tau_e$ [timer]	$\tau_0$ [timer]	$\alpha$
53599	12,119	254,3	24,0	6,9	0,80
53605	12,046	268,7	19,6	5,7	0,81
54427	11,907	294,6	19,2	7,2	1,02

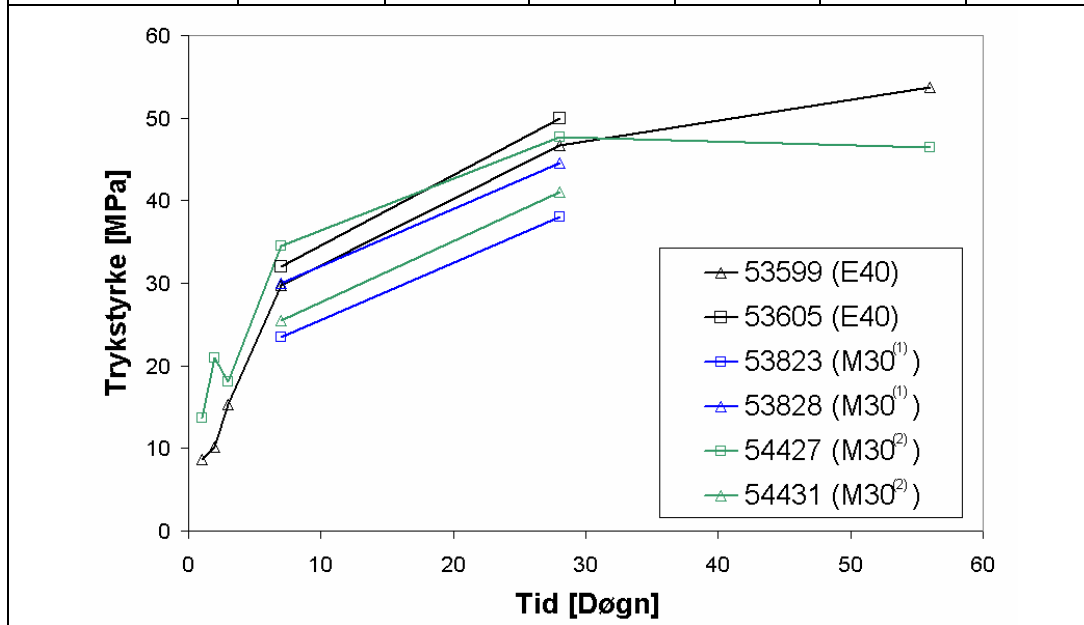


## 4.2 Styrkeudvikling

Der er udtaget prøver til bestemmelse af trykstyrken i henhold til DS/EN 12390-3. Resultaterne er angivet og illustreret i Tabel 10.

Tabel 10: Trykstyrke målt for læs leveret til V1-V3, V4-V5 og NØ. Trykstyrkerne er angivet i MPa.

Modenhedsdøgn	1	2	3	7	28	56
Følgeseddel	V1-V3 (E40)					
53599	8,7	10,2	15,3	30,2 29,4	45,5 44,4 46,1 50,7	53,7
53605				32	50	
	V4-V5 (M30 <sup>(1)</sup> )					
53823				23,5	38	
53828				30,0	44,5	
	NØ (M30 <sup>(2)</sup> )					
54427	13,7	20,9	18,1	34,5	49,6 45,7	46,4
54431				25,5	41,0	



## 5. Observationer

Nedenstående beskriver observationer fra støbningerne omkring formfyldning, blokering, separation og formtryk.

### 5.1 Formfyldning

For V1-V5 udgjorde formgeometri og armeringskonfiguration ikke vanskeligheder i forhold til at fylde formen, men der var interessante observationer vedrørende overfladens hældning efter, at betonen havde nået 4 m i den ende af væggen, hvor pumpestudsens var placeret.

For væg V4 (½ m under overflade) og V5 (½ m frit fald) fremstod overfladen med et fald på ca. 20 promille svarende til en højdeforskel på 10 cm over væggens længde.

For væg V1-V3 var der et fald på et par centimeter over væggens længde svarende til 8 promille (Tabel 11).

Forskellen i længdefald skyldes forskellen i flydespænding dvs. desto højere flydespænding desto større længdefald.

*Tabel 11: Betonoverfladens hældning efter at den tilstræbte støbehøjde var nået i den ende pumpestudsens var placeret.*

Væg	V1	V2	V3	V4	V5
Lodret placering af pumpestuds	½ m under overflade	½ m over overflade	Ved formens bund	½ m under overflade	½ m over overflade
Flydespænding $\tau_0$ [Pa]	20			60	45
Plastisk viskositet $\eta_p$ [Pa·s]	60			35	35
Hældning	~ 0.8 %			~ 2.0 %	

For at fylde formene fuldstændig blev pumpestudsens afslutningsvis flyttet langs betonoverfladen og rettet af manuelt.

Kerneveggen (NØ) var i modsætning til V1-V5 vanskeligere at fylde pga. en mindre vægtykkelse, tættere armering og en mere kompliceret formgeometri (udsparinger etc.). Indløbets placering blev løbende varieret under hensyntagen til at støbehøjden på hver side af udsparringer fulgte hinanden for at undgå at påføre skader på konstruktionen. Betonens lave flydespænding (ca. 20 Pa) betød, at betonen løb langt i forhold til indløbets placering. Der blev observeret flydeafstande på ca. 10 m.

Det kan være fordelagtigt med en lav flydespænding, hvis betonen skal flyde i snævre geometrier, men i forhold til separationsrisikoen øger en lang flydeafstand risikoen for

separation. Det ville have været muligt at opnå en tilfredsstillende formfyldning af denne type konstruktion med en højere flydespænding. Det vil dog betyde, at indløbet skulle flyttes flere gange, men det vil give en øget resistens overfor separation.

## 5.2 Blokering

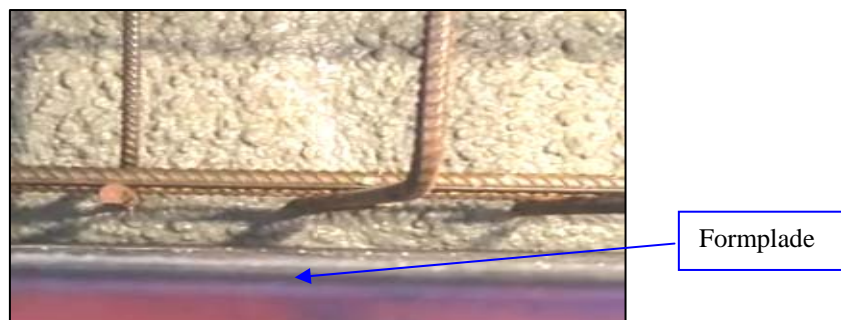
J-Ringen blev benyttet til at vurdere blokeringsrisikoen og resultaterne er sammenholdt med de visuelle observationer fra støbning af væg V1-V5, hvor det var muligt til at overvåge strømmingen i formen. Et eksempel på en J-Ring test på pladsen er vist i Figur 5-1.



Figur 5-1: Eksempel på J-Ring test på byggepladsen.

Indsnævringsforholdet i J-Ringen er 2.6 for en max. stenstørrelse på 16 mm. I V1-V5 forekommer det mindste indsnævringsforhold mellem armering og formside, hvor det er ca. 3,2. J-Ringen er således mere kritisk end V1-V5.

Med udgangspunkt i de kvalitative vurderinger blev der ikke observeret tydelig blokering i J-Ring forsøgene, dog tendens til blokering i et par læs med E40 ved støbning af V1 og V2 samt i et enkelt læs ved støbning af NØ. Det synes at være i god overensstemmelse med observationerne under støbningerne, hvor der ikke blev observeret blokering ved et indsnævringsforhold på 3.2 (Figur 5-2).



Figur 5-2: Betonens strømning omkring armering i V4.

For NØ væggen var det pga. mørket og støbeforholdene ikke muligt at observere eventuel blokering under støbningen. Efter afformning blev der observeret enkelte stenreder omkring udsparingerne.



### 5.3 Separation – Statisk og dynamisk

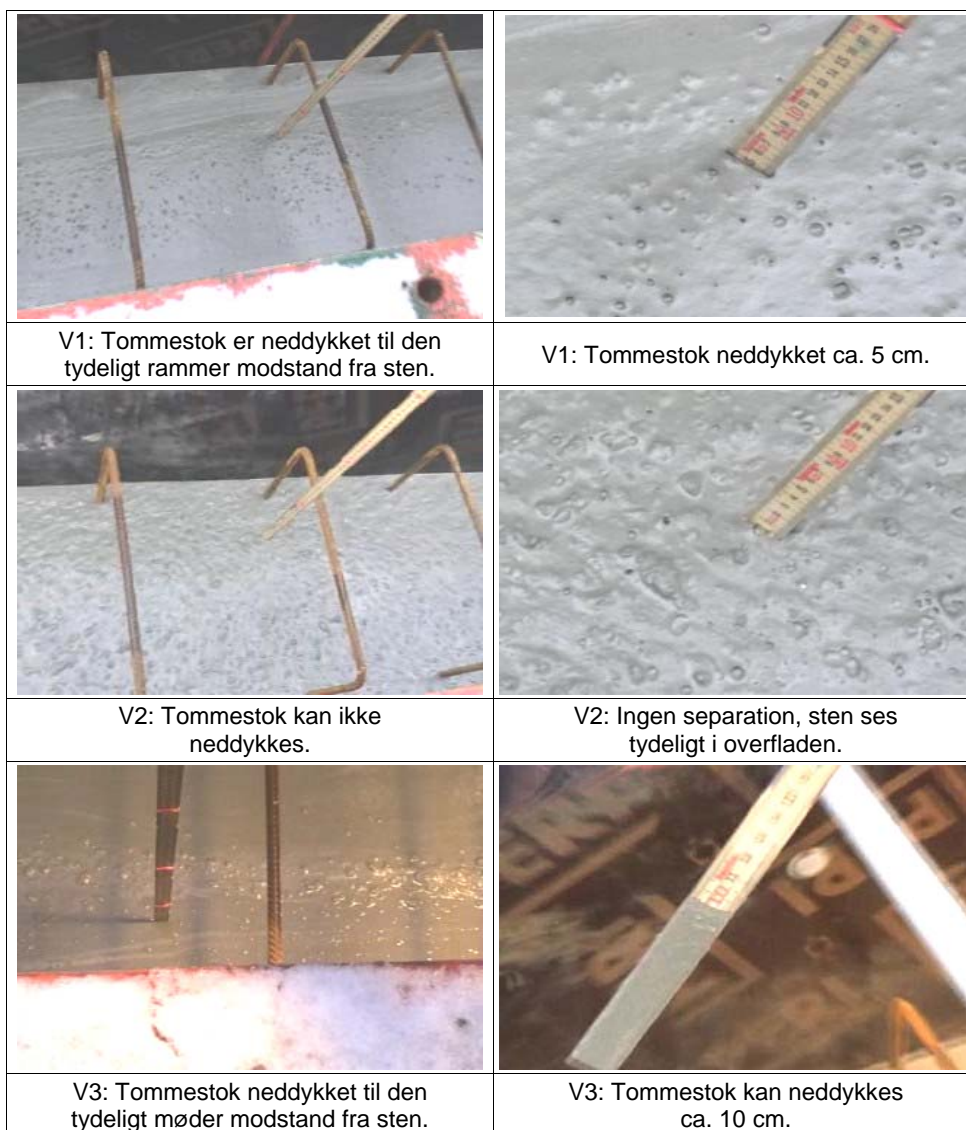
Statisk separation forekommer når stenene begynder at synke, når betonen ikke flyder. En diskussion af statisk separation kan findes i Bilag G. Konklusionen er, at der endnu ikke findes en pålidelig teoretisk model til at forudsige risikoen for statisk separation samt at der mangler pålidelige kvantitative målemetoder, der kan benyttes på den friske beton. Man må således indtil videre forlade sig på en kvalitativ bedømmelse af betonen, når separationsrisikoen skal vurderes i betonens friske stadie.

Ingen af de anvendte betoner udviste tydelig tendens til statisk separation ved observationer af betonen i trillebøren. Ved at sammenligne de forskellige betoner vurderes det, at M30<sup>(2)</sup> den 18. januar var på grænsen til separation.

Dynamisk separation forekommer, når stenene udskilles mens betonen er i bevægelse og observationerne viser, at udstøbningsmetoden er en afgørende parameter. For væg V1-V3 støbt med E40 blev der observeret forskellig grad af separation. Ved udstøbning med pumperøret placeret i bunden, ½ m under betonoverflade og ved ½ m over betonoverflade blev der observeret et pastalag på henholdsvis 10 cm, 5 cm og 0 cm. Makroanalyser af borekerner udtaget fra toppen af væggen bekræftede disse observationer (Bilag H).

For væggene V4 og V5 støbt med M30<sup>(1)</sup> blev der tydeligt observeret sten på toppen og dermed mulighed for etablering af et ru støbeskel. Figur 5-3 og 5-4 viser billeder fra henholdsvis V1-V3 og V4-V5.

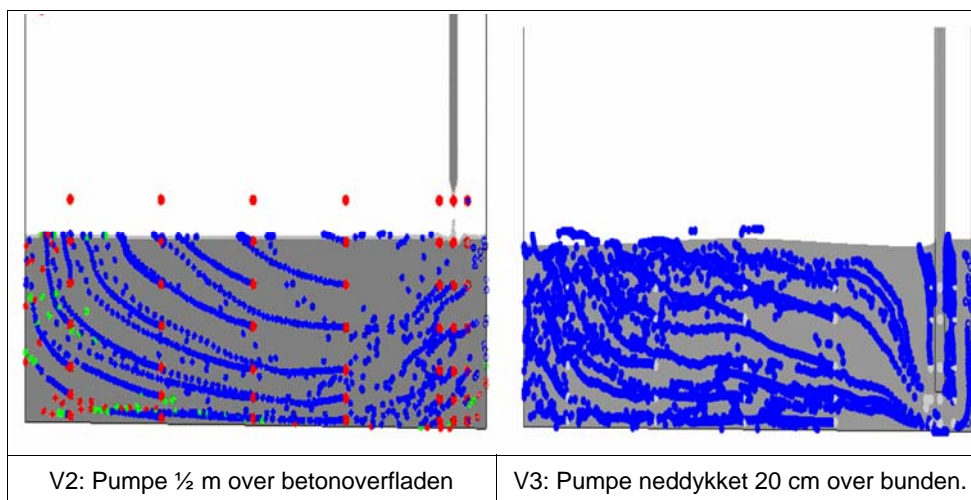
Figur 5-5 viser det simulerede strømningsforløb for V2 og V3. For V3 (i bunden) flyder betonen fra bunden mod toppen imod tyngdekraften. Hvis pastaen ikke kan bære stenene starter en filtreringsproces, som i til sidst ender med et pastalag på toppen. For V2 (½ m over overflade) foregår fyldningen mere i lag og betonen tvinges ikke i en opadrettet retning. Ved at sammenligne forsøgene med samme udførelsesmetode er det muligt at vurdere effekten af de reologiske egenskaber. For væg V1 og V4 (½ m neddykket) tyder det på, at separationen i V1 skyldes en lavere flydespænding (20 Pa ved V1 og 60 Pa i V4). Umiddelbart kan en højere plastisk viskositet (60 Pa·s for V1 og 34 Pa·s i V4) ikke at opveje for denne forskel.



Figur 5-3: Billeder fra toppen af V1-V3, hvor en tommestok indikerer graden af separation.

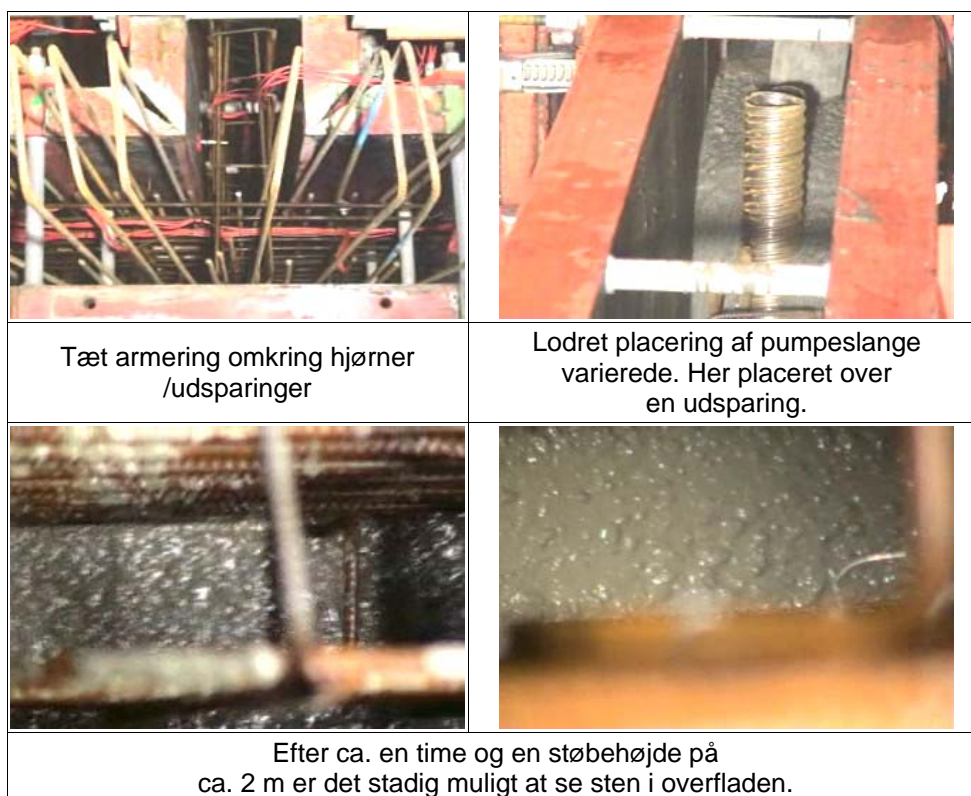


Figur 5-4: Billeder fra toppen af væg V4 og V5. Stenene ses tydeligt i overfladen.



Figur 5-5: Simulering af strømningsforløb for V2 og V3.

Som tidligere nævnt var det ikke muligt at gennemføre støbning af kernen under samme kontrollerede forhold som V1-V5. Figur 5-6 viser billeder fra støbning af NØ.



Figur 5-6: Billeder fra støbning af NØ væg.

På basis af visuelle observationer opstod der separation af varierende grad i formen. I dele af formen blev der observeret sten i overfladen indtil en støbehøjde på ca. 2 m. Efter afformning blev der udtaget fire borekerner fra toppen. En makroanalyse af den ene kerne viser tydelig separation på ca. 30 cm. Desuden består de øverste 2 cm af et meget skumagtigt porøst lag (Bilag H). Det består af iblandet luft, og var ikke jævnt

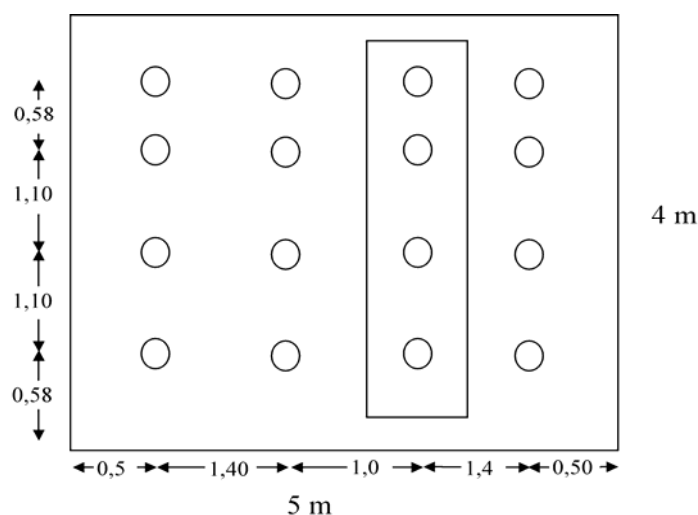
fordelt, men ophober sig enkelte steder. Der blev ikke observeret et skumlag for de øvrige tre borekerner dog var de øverste 10 cm pastarige.

## 5.4 Formtryk

Formtrykket er målt ved støbning af V3 og V5.

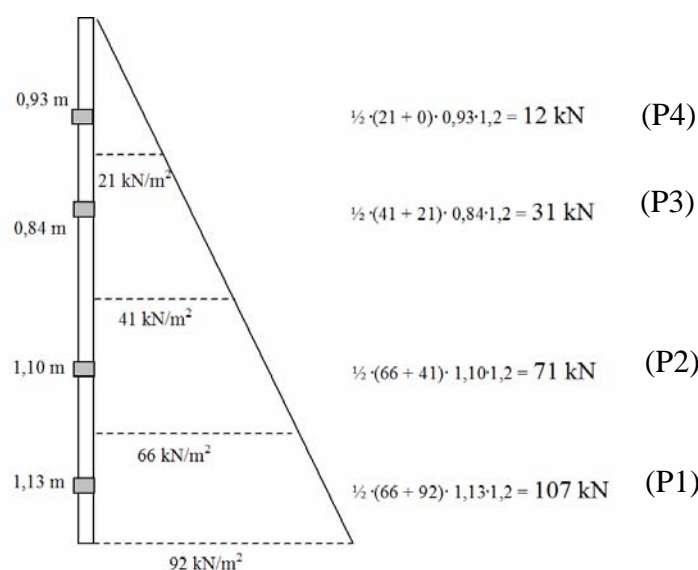
SCC giver mulighed for at støbe væsentlig hurtigere end med konventionel beton. Tidligere undersøgelser har vist, at der bør regnes med hydrostatisk tryk og at støbehastigheden er den væsentligste faktor [3, 4].

Formtrykket er målt ved at placere lastceller ved klampsjernene og måle stangkræften. For V3 og V5 blev lastcellerne placeret som vist i Figur 5-6.



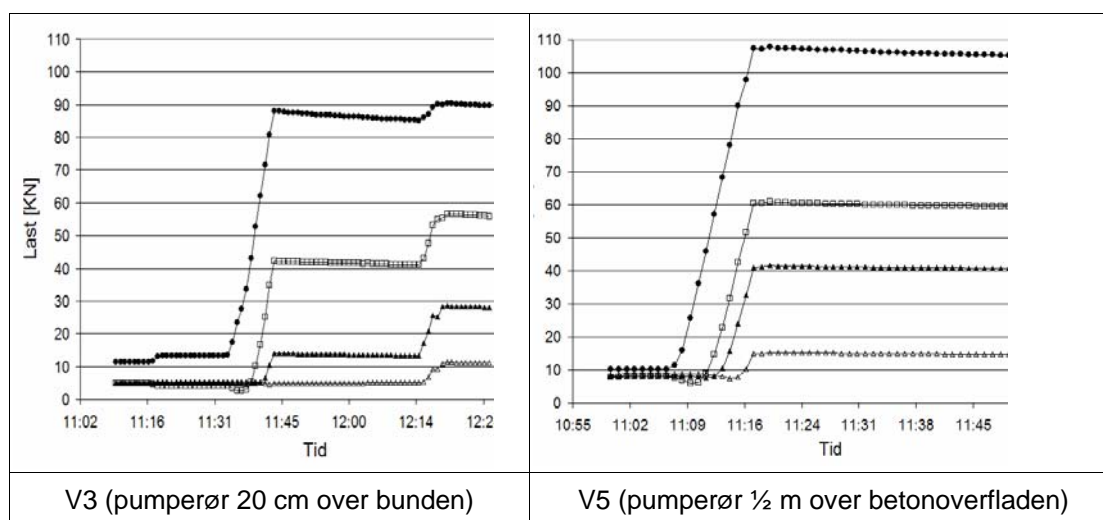
Figur 5-6: Placering af lastceller til måling af formtryk ved støbning af V3 og V5.

Under antagelse om hydrostatisk trykfordeling er det statiske system vist i Figur 5-7, hvor lasten optages af klampsjernene, som er benævnt P1-P4.



Figur 5-7: Det statiske system under antagelse om hydrostatisk trykfordeling.

De målte stangkræfter under støbning af V3 og V5 er vist i Figur 5-8.



Figur 5-8: Den målte last (kN) for de fire lastceller på V3 og V5.

I det følgende behandles resultaterne med udgangspunkt i lastcelle P1, som optager den største last.

Resultaterne for V3 viser, at lasten efter en kort stigning kl. 11:16 forbliver konstant indtil ca. 11:30 pga. et støbestop (se Figur 2-2). Herefter støbes med en hastighed på ca. 18 m/timen indtil en højde på ca. 3,25 m, hvor lasten stiger til ca. 90 kN. Herefter er der støbestop i ca. 30 min. I denne periode aftager lasten lidt til ca. 85 kN. Formen fyldes nu helt til 4 m, og kraften begynder at stige igen, men kun til det tidligere niveau på ca. 90 kN. Selvom der støbes fra bunden opnås altså ikke hydrostatisk trykfordeling over den fulde højde på 4 m svarende til P1=107 kN. At der ikke opnås hydrostatisk trykfordeling skyldes, at betonen har opbygget en indre struktur, som ikke

bliver nedbrudt under den sidste støbeperiode. Hvis det havde været muligt at støbe væggen kontinuerligt over en time, svarende til en støbehastighed på 4 m/time, ville det sandsynligvis være muligt at opnå endnu mindre formtryk.

Resultaterne for V5 viser, at lasten stiger lineært fra ca. 10 til 109 kN mellem kl. 11:06 til 11:16 svarende til hydrostatisk trykfordeling. I modsætning til støbning af V3 er der ikke noget støbestop, men hele væggen støbes med en hastighed på 24 m/time. Efter støbningen ses det, at lasten aftager med nogenlunde samme hastighed som ved støbning af væg V3.

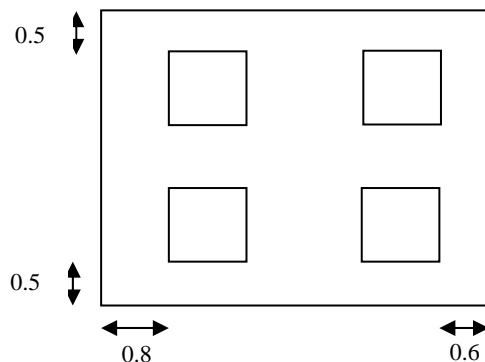
## 5.5 Overfladefinish

For V1-V5 er overfladefinishen vurderet ved tælling af porer i overfladen, idet der anvendes samme inddeling af porer som ved beskrivelse af overfladegeometri jf. [5].

På hver af væggene V1-V5 er der anvendt to typer formolie, idet der er anvendt én type olie på den ene side af formen, og én anden type på den anden. De to typer er Bricon Unislip 9-12, der er en mineralsk formolie, og P-Emulfix LL, der er en vegetabilsk formolie. Ved en visuel vurdering var der ingen forskel på væggenes modstående sider, svarende til at de to typer formolie er lige gode.

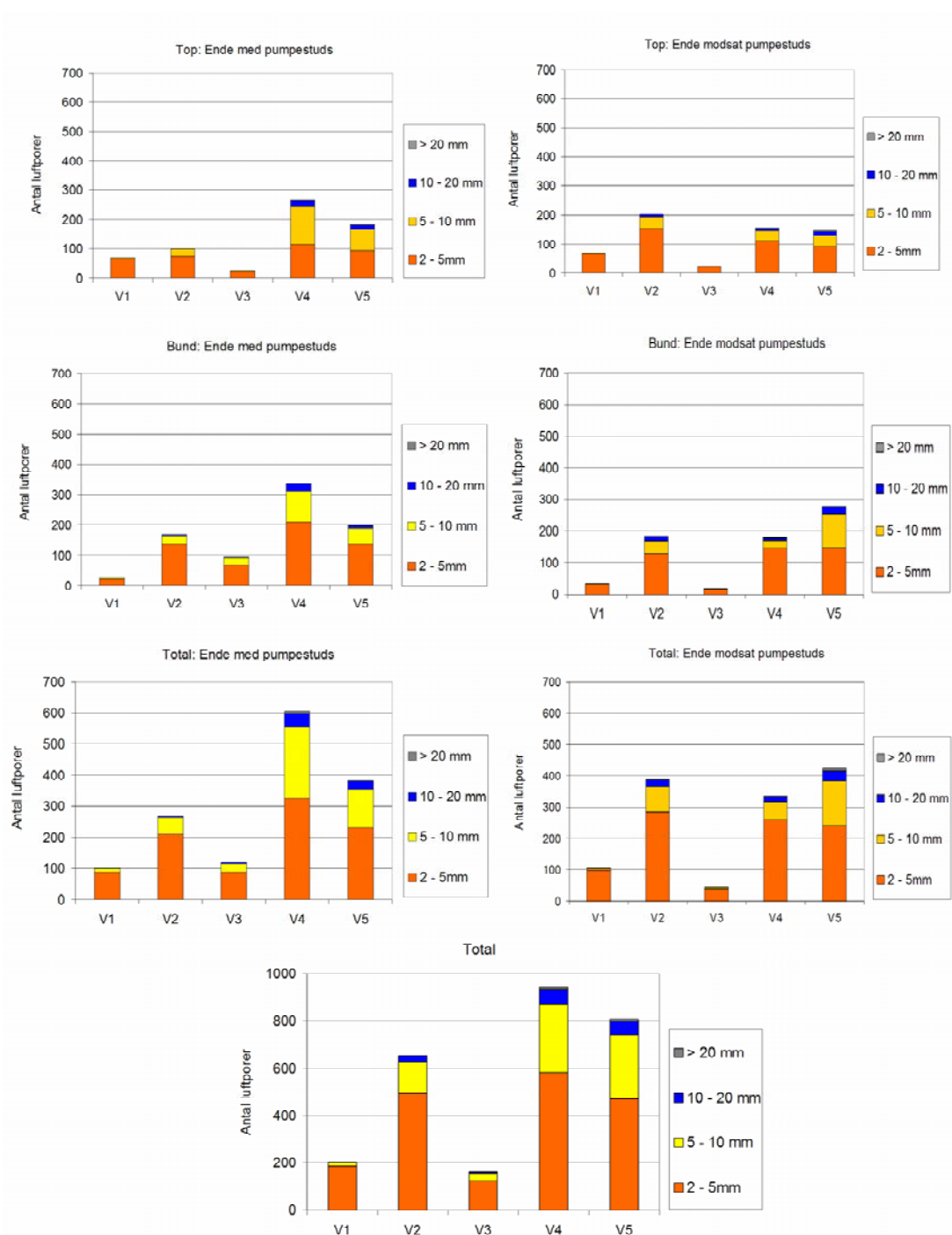
Da væggenes modstående sider tilsyneladende er ens mht. finish, er det valgt kun at foretage optælling på den ene side. På hver væg er der udvalgt fire felter på hver  $1 \times 1 \text{ m}^2$ , hvor tællingerne er foretaget. Felterne er placeret:

- *Top og bund.* De to øverste felter er placeret med overkant 0,5 m under færdigt loft, mens de to nederste felter er placeret med underkant 0,5 m over gulvet (Figur 5-9).
- *Modstående ender.* To felter (1 i top og 1 i bund) er placeret omkring nedstiksstedet for pumpeudslen, dvs. med yderkant 0,6 m fra kældrens ydervæg, mens to felter er placeret med yderkant 0,8 m fra væggenes frie ende (Figur 5-9).



Figur 5-9: Placering af felter ( $1 \text{ m}^2$ ) til optælling af antallet af luftporer i overfladen for V1-V5.

Resultaterne er vist i Figur 5-10 og i Bilag I findes talværdierne.



Figur 5-9: Oversigt over antal luftporer i overfladen for V1-V5.

Det ses, at støbeteknik og de reologiske egenskaber har stor betydning for den opnåede overfladefinish.

En sammenligning af V1-V3 viser, at der dannes få luftporer, når betonen pumpes fra bunden af formen (V3), dog er der en del porer lige omkring pumpestudsene. Der er



næsten dobbelt så mange porer, når pumperøret er neddykket  $\frac{1}{2}$  m under overfladen (V1), og der er mere end fire gange så mange porer, når pumperøret er  $\frac{1}{2}$  m over overfladen (V2). Simuleringerne viser, at når betonen pumpes fra bunden (væg V3) vil store dele af betonmassen strømme fra indløbet og opad. Det betyder, at der ved store dele af formsiderne sker en kontinuerlig strømning af betonen over overfladerne med mulighed for at generere pasta til formsiden.

Den eneste egentlige "døde område" er i bunden ved endevæggen, dog ligger det udenfor det målte område. Ved støbning af V2 er der mindst strømning over formsiden og her observeres de fleste luftporer i overfladen. Samtidig er V2 også støbt hurtigst og uden væsentligt støbestop. Eksempelvis ved V1 er de første 2 m støbt kontinuerligt, hvorefter der er et støbestop på ca. 50 min, hvilket giver tid til at luftporer kan migrere til den fri overflade.

For V4 og V5 er der i begge tilfælde mange porer og der er ikke nogen væsentlig forskel på, om pumpeudsen følger lige over eller lige under støbefronten. Ud fra strømningsmønstret var det umiddelbart forventeligt at V4 havde færrest luftporer i overfladen. At dette ikke sker skyldes sandsynligvis, at de reologiske egenskaber og især flydespændingen er højere.

I forhold til BPS 24 består V1 og V3 kravene til BO 34 for vægoverflader med pladsstøbt beton i glat form. V2 opfylder kravet til BO 42 for indvendige vægge med pladsstøbt beton i glat form. V4 og V5 opfylder ikke kravet til BO 42.

Konklusionen er, at det ikke er muligt at sige om SCC giver bedre eller dårligere overfladefinish end traditionel beton. SCC vægges overfladefinish afhænger i høj grad af betonens flydeegenskaber og udstøbningsteknikken.

## 6. Sammenfatning

Følgende sammenfatter resultater og observationer baseret på støbninger i DR-Byen i 2004 og 2005.

### 6.1 Friske betonegenskaber

#### *Reologiske egenskaber*

Det er vigtigt at karakterisere SCC's flydeegenskaber ved de reologiske egenskaber; flydespænding  $\tau_0$  og plastisk viskositet  $\eta_{pl}$ . De reologiske egenskaber er uafhængige parametre, der giver en fysisk og entydig beskrivelse af SCC's flydeegenskaber i modsætning til empiriske metoder. De reologiske egenskaber kan bestemmes ved brug af et rheometer. I dette projekt er der anvendt 4C-Auto Slump systemet.

#### *Blokering*

Det er ikke muligt at opnå en entydig vurdering af blokeringsrisikoen alene på baggrund af de kvantitative resultater fra J-Ringen. Det vurderes umiddelbart, at en kvalitativ vurdering med fotodokumentation er mere egnet, da det er muligt at tage højde for evt. separation og ringe passeringsevne.

#### *Separation*

Det anbefales indtil videre, at forlade sig på en kvalitativ bedømmelse af betonen, når risikoen for statisk separation skal vurderes i betonens friske stadie. Det anbefales, at benytte fotodokumentation. Der findes ikke egnede metoder til at vurdere risikoen for dynamiske separation.

### 6.2 Formfyldning

At opnå komplet formfyldning i simple plane vægge kan ske med betoner indenfor et bredt spektrum af reologiske egenskaber. En simpel væg vil typisk kunne fyldes fra et enkelt påfyldningssted. Afhængig af de reologiske egenskaber vil det dog være nødvendigt at flytte pumpeslangen til slut for at efterfylde, da toppen ellers vil fremstå med fald.

Ved mere komplicerede formgeometrier og armeringskonfigurationer er det nødvendigt i højere grad at overveje samspillet mellem de reologiske egenskaber og udførelsesmetoden. Eksempelvis kan det være nødvendigt med en tilstrækkelig lav flydespænding for, at betonen flyder ud i alle hjørner af formen, hvis der ikke er mulighed for at flytte indløbets placering. Det er dog vigtigt, at betonen ikke får lov at flyde for langt fra indløbets placering, da det øger risikoen for separation.

Formgeometri og armeringskonfiguration forhindrer ikke høje støbehastigheder op til 25 m/time. Dog kan hensyn til overfladefinish og formtryk forhindre så høje støbehastigheder.

## 6.3 Separation

Risikoen for dynamisk separation afhænger af strømningsretningen og den afstand betonen frit kan flyde i forhold til indløbets placering. Således er risikoen størst når betonen presses fra bunden mod toppen (slangen neddykket til bunden) og betonen får lov at flyde langt. Flydeafstanden bør kontrolleres, og på baggrund af disse forsøg anbefales det at undgå flydeafstande på mere end ca. 6 m for at undgå dynamisk separation.

Risikoen for dynamisk separation kan reduceres ved et øge flydespændingen og den plastiske viskositet. Det er dog ikke i alle tilfælde muligt at øge begge parametre, da eksempelvis formgeometrien kan kræve en lav flydespænding for at opnå en fuldstændig formfyldning.

Hvis der opstår dynamisk separation er det nødvendigt at foretage en afrensning af det øverste pastalag for at opnå et ru støbeskel, og det kan være nødvendigt at eftervise styrkekrav på borekerner.

## 6.4 Formtryk

Ved lodrette støbninger med SCC skal der regnes med hydrostatisk trykfordeling, når der anvendes høje støbehastigheder (observeret for 18 m/time) uanset de reologiske egenskaber og støbeteknik.

Det er forventeligt, at de reologiske egenskaber og støbeteknik har indflydelse på formtrykket ved væsentligt lavere støbehastigheder (< 2 m/time [4]).

## 6.5 Overfladefinish

Overfladefinishen afhænger i høj grad af valg af støbeteknik og reologiske egenskaber.

Støbeteknikken er en afgørende parameter. Det er fordelagtigt, at støbe med røret under overfladen, da det bl.a. medfører en længerevarende kontinuerlig strømning langs formsiderne, som kan generere pasta til overfladen og smøre siderne. Således opnås færrest luftblærer ved at have pumperøret placeret i bunden og op mod fire gange så mange ved støbning med ½ m fald over overfladen.

De reologiske egenskaber er afgørende for, hvor nemt partikler og luftporer kan migrere. Det er fordelagtigt med lave værdier for de reologiske egenskaber.



## 7. Litteratur

- 1: [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org), *The European guidelines for Self-Compacting Concrete, specification, production and use*, Efnarc Publications, May 2005
- 2: Wustholz, T., *Fresh Properties of Self-Compacting Concrete (SCC)*, Otto Graf Journal, Vol. 14, 2003.
- 3: Frederiksen, J.O., Glavind, M., *Formtryk med selvkompakterende beton*, Dansk Beton, nr. 4, 2001.
- 4: Billberg, P., *Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete*, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 271-280.
- 5: BPS-publikation 24: *Typiske beskrivelsesafsnit – indvendige betonoverflader til malebehandling og tapetopsætning* (2. udgave, 1989).
- 6: Saak, A. W., Jennings, H. M., Shah, S. P., *New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete*, ACI Materials Journal, vol. 98, no. 6, pp. 429-439, 2001.
- 7: Bethmont, S., Schwarzenruber, L., Stefani, C., Leroy, R., *Defining the Stability Criterion of Sphere Suspended in a Cement Paste: A Way to Study the Segregation Risk in Self-Compacting Concrete (SCC)*, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 94-105.