



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Luftporestruktur og frostbestandighed for SCC

SCC-Konsortiet, Delprojekt P33 og D21

Udført for:

Innovationskonsortiet for Selvkompakterende Beton



Udført af:

Teknologisk Institut, Betoncentret

Taastrup, den marts 2007



Byggeri

Titel: SCC Demobro

Forfattere: Ane M. Kjeldsen, Lars Nyholm Thrane,
Claus Pade, Claus V. Nielsen

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

UDKAST



Indhold

1. Indledning.....	5
1.1 Baggrund.....	6
1.2 Formål.....	7
2. Eksperimentelle undersøgelser.....	9
2.1 SCC Vægstøbninger i DR-Byen, 21-12-2004.....	9
2.2 SCC Demobro, Ll. Donnerupvej ved Give, 2006.....	11
2.3 Holdbarhedskrav og specifikationer.....	15
3. Resultater og diskussion.....	17
3.1 SCC Vægstøbninger i DR-Byen.....	17
3.1.1 Luftporeanalyser.....	17
3.1.2 Frost/tø-bestandighed.....	20
3.2 SCC Demobro, Ll. Donnerupvej ved Give.....	22
3.2.1 Luftporeanalyser.....	22
3.2.2 Frost/tø-bestandighed.....	25
3.2.3 Kloridindtrængning.....	26
4. Konklusioner.....	27
4.1 Vægstøbninger i DR-Byen.....	27
4.2 SCC Demobro.....	27
5. Litteratur.....	29

Bilag

A. Recepter og måleresultater for SCC Demobro.....	2 sider
B. Prøvningsrapporter, DR-Byen.....	64 sider
C. Prøvningsrapporter, SCC Demobro.....	63 sider





1. Indledning

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

Selvkomprimerende 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:

- 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 udstøbning, 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.

Vejdirektoratet deltager i SCC-Konsortiet med det formål at demonstrere de udviklede SCC-teknikker i stor skala på en vejbro. Nærværende rapport dokumenterer de erfaringer, som er gjort med SCC til konstruktioner, hvor de holdbarhedsmæssige aspekter er meget væsentlige. Det drejer sig om luftpo-



restruktur og frostbestandighed af SCC til aggressiv og ekstra aggressiv miljøklasse.

1.1 Baggrund

En betons holdbarhed er et udtryk for betonens evne til at bevare sine foreskrevne egenskaber i en given periode. De eksterne påvirkninger betonen er udsat for i sin levetid, er bestemmende for hvilken miljø- og eksponeringsklasse betonen dimensioneres efter. Dimensionering efter eksponeringsklasser tager bl.a. højde for risiko for korrosion forårsaget af karbonatisering eller salte, aggressivt kemisk miljø eller risiko for frost/tø-påvirkning.

Hvis betonen er udsat for frost/tø-påvirkning, er der risiko for revnedannelse i og nedbrydning af betonen. Revnedannelsen skyldes at vand udvider sig ca. 9 % ved frysning. Hvis der ikke er tilstrækkelig plads i porerne til denne udvidelse, vil betonen beskadiges pga. indre trækspændinger og revnedannelse. Risikoen for frost/tø-skader er derfor stærkt afhængig af størrelsen og mængden af luftporer i betonen som igen hænger uløseligt sammen med betonens v/c-forhold, ligesom vandmætningsgraden og luftindblandingsmidler spiller en væsentlig rolle. Jo mindre porerne er, jo sværere vil vandet have ved at fryse. Hvis nogen af porerne endvidere er luftfyldte, vil de virke kapillarbrydende, så udefrakommende vand ledes langsommere ind i betonen. Luftfyldte porer vil, ved rette størrelse og fordeling, også kunne sikre, at vand der udvider sig under frysning kan finde plads andetsteds i betonen uden at ødelægge den. En betons frostsikkerhed bedømmes typisk ved at måle et totalt luftindhold og en tilhørende afstandsfaktor. Sidstnævnte siger noget om afstanden mellem luftboblerne samt den specifikke overflade af luftporerne.

I forbindelse med lodrette SCC-støbninger kan etablering af en fornuftig luftporestruktur udgøre en udfordring. Ved støbninger med SCC er det muligt at støbe meget hurtigere end med konventionel beton. Typisk er støbetakten mere end 10 m/time med SCC i modsætning til under 2 m/time med konventionel beton. SCC opfører sig som en væske og der opnås derfor hydrostatisk trykfordeling over stort set hele støbehøjden. Det relativt høje tryk i bunden af en lodret støbning kan betyde, at luftporestrukturen ændres pga. sammenpresning og udpresning af luft. Derved er der øget risiko for, at betonen bliver mindre frostsikker. Dette har specielt relevans for lodrette anlægs-konstruktioner såsom brosjøler, rammeben, støttevægge, bolværker, etc., hvor holdbarhedskravene typisk er høje.



1.2 Formål

Formålet med denne rapport er at undersøge hvorvidt pumpet SCC og lodrette støbninger i SCC opfylder de krav til luftindhold og frostprøvning, der bliver stillet i DS/EN 206-1 og DS 2426.

Luftporestruktur og frostbestandighed af SCC til aggressiv og ekstra aggressiv miljøklasse bedømmes ud fra såvel borekerner, støbte cylindre. Rapporten samler resultater fra prøvestøbninger af tre vægge med SCC i DR-Byen i december 2004 (ekstra aggressiv miljøklasse) samt resultater fra støbninger til SCC Demobro i sommeren 2006 (ekstra aggressiv miljøklasse).

I forbindelse med de lodrette støbninger i DR-Byen er der målt trykfordeling i én af væggene, hvilket har gjort det muligt at bestemme indflydelsen af trykket på luftporestrukturen.

Formålet med målingerne i forbindelse med SCC Demobroen har været at undersøge om transport og pumpning af betonen har en effekt på den færdige luftporestruktur samt at dokumentere at Vejdirektoratets holdbarhedskrav kan overholdes med SCC til ekstra aggressiv miljøklasse.





2. Eksperimentelle undersøgelser

Luftindhold og luftporestruktur kan undersøges både på frisk beton og på hærdnet beton. På den friske beton er der mulighed for at måle total luftindhold med et såkaldt pressure-meter i hht. DS/EN 12350-7. Ved hjælp af et såkaldt air-void-meter (AVA), kan luftporestrukturen af den friske beton desuden bestemmes iht. ASTM C457. Denne metode giver luftporestrukturen udtrykt ved kordelængder, den specifikke overflade af luften samt afstands faktoren.

På den hærdnede beton bestemmes luftporestrukturen iht. DS/EN 480-11. Denne metode giver ligesom AVA bl.a. mængden af luftporer udtrykt ved korder, den specifikke overflade og tilhørende afstands faktor. Luftporestrukturen kan udføres tidligst en lille uge efter betonens udstøbning.

De to metoder til bestemmelse af luftporestruktur kan ikke umiddelbart sammenlignes, da beregningsgrundlaget for korderne er forskelligt. Det bliver dog undersøgt, om de kvalitativt giver samme resultater.

Der skelnes i nærværende rapport mellem luftporestrukturen i hærdnet beton bestemt på støbte cylindre (*C*) og udborede kerner (*K*) og på luftporestrukturen målt på frisk beton (*P*).

På udvalgte borekerner er der desuden bestemt frostbestandighed vha. den svenske standard SS 13 72 44, hvor prøveemnet udsættes for en saltopløsning og 56 frost/tø cykler under kontrollerede klimaforhold.

2.1 SCC Vægstøbninger i DR-Byen, 21-12-2004

I DR-Byen blev der d. 21. december 2004 udstøbt tre SCC-vægge i betontype E40 (ekstra aggressiv miljøklasse). Disse vægge udgjorde et fuldskalafor søg mht. udførelse i SCC-Konsortiets regi. MT Højgaard A/S udførte støbe arbejdet og 4K/Unicon A/S leverede beton fra Prøvestenen betonværk. Recepten for den benyttede SCC fremgår af Tabel 1.

Væggene er 500 mm tykke, 4 m høje og betegnes som letarmerede. Der blev leveret ca. 30 m³ SCC til de tre vægge fordelt på 4 læs á 7 m³ og et lille læs til slut. Betonen blev pumpet i vægformen og der blev målt formtryk på Væg 3 vha. lastceller monteret på klampsjern på støbeformen. Placering af pumpe studs blev varieret i de tre vægge således at i Væg 1 var pumpe studs placeret 0,5 meter under overfladen, i Væg 2 var den placeret 0,5 meter over overfladen mens den i Væg 3 blev holdt konstant ved bunden af formen.



Tabel 1: Grundrecept anvendt til vægstøbninger i DR-Byen, betontype E40.

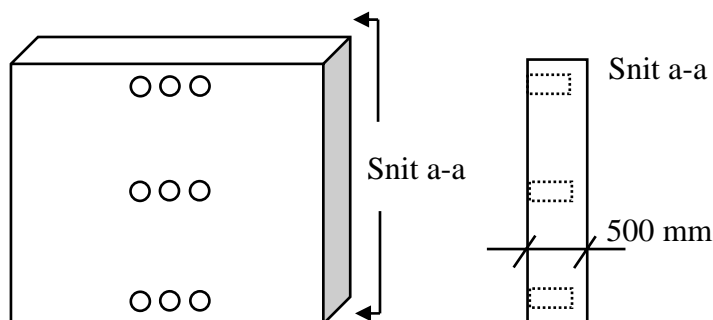
Delmateriale	Kg/m ³
Cement, AAP Lavalkali CEM I 42,5 N (HS/EA>2)	293
Flyveaske, Type B4	72
Mikrosilica, Elkem slurry	15
Vand, vandværk	130
Luftindblandingsmiddel, 4K luft 02	1,065
Superplastificeringsmiddel, 4K superpl. 106	3,423
Sand 00/04, kl. E	760
Sten 04/08, kl. E, Stema, Jelsa	236
Sten 08/16, kl. E, Stema, Jelsa	798

For yderligere detaljer omkring betonegenskaberne og udførelse henvises til rapporten *Støbning af lodrette konstruktioner med SCC – Fuldskalaforsøg i DR-Byen*, SCC-Konsortiet (2007).

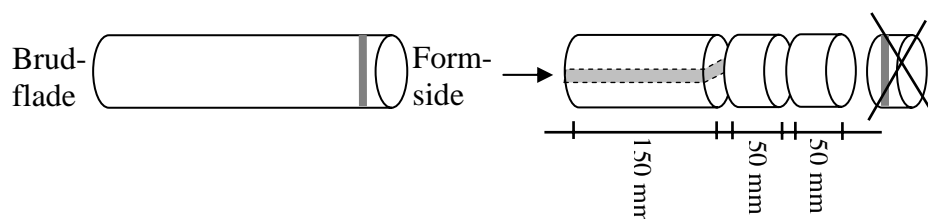
I hver af de tre vægge er der udboret 3 stk. Ø100 mm kerner i væggen top (0,3 m fra overkant), midte og bund (0,3 m fra underkant), dvs. i alt 9 kerner, hver med en længde på ca. 40 cm. Kernerne er ikke gennemgående, se Figur 1.

Hver kerne er delt på følgende måde (Figur 2):

- Først bortskæres fladen, som er støbt mod form. Der fjernes en skive, der er så tyk, at evt. armering fjernes
- Herefter neddeles kernen i tre cylindre på henholdsvis 50 mm, 50 mm og 150 mm
- Af den største cylinder på 150 mm udskæres en skive som vist skravet på figuren. Denne skive anvendes til luftporeanalyse (afsnit 3.1.1).
- De to cylindre á 50 mm anvendes begge til frost/tø-test (afsnit 3.1.2) således at der er dobbeltbestemmelser af hver kerne. På den måde fås prøveemner til luftporeanalyse, der svarer til de tilsvarende prøveemner til frost/tø-test.



Figur 1: Skitse af kernernes placering i de tre vægge.



Figur 2: Skitse af neddelingen af de udtagne kerner.

2.2 SCC Demobro, LI. Donnerupvej ved Give, 2006

SCC Demobroen ved Give blev udført i 2006 med det formål at demonstrere SCC teknikker i fuldskala på en vejbro, som stiller høje krav til såvel betonkvalitet i form af gode holdbarhedsegenskaber og høj styrke samt til konstruktionens udseende og geometri.

Deltagerne i SCC Demobroen var foruden Teknologisk Institut, Unicon A/S som betonleverandør fra sin betonfabrik i Herning og MT Højgaard A/S som betonentreprenør. Vejdirektoratets afdeling i Skanderborg var som bygherre overordnet ansvarlig for broentreprisens gennemførelse og Gimsing & Madsen A/S var bygherrens rådgiver på projektet og ansvarlig for tilsynet.

SCC Demobroen er en 2-fags bro som fører LI. Donnerupvej hen over den kommende Vejle-Herning motorvej lige uden for Give. Flere detaljer om broens udseende, placering og historikken kan findes i rapporten *SCC Demobro*, SCC Konsortiet, (2007).

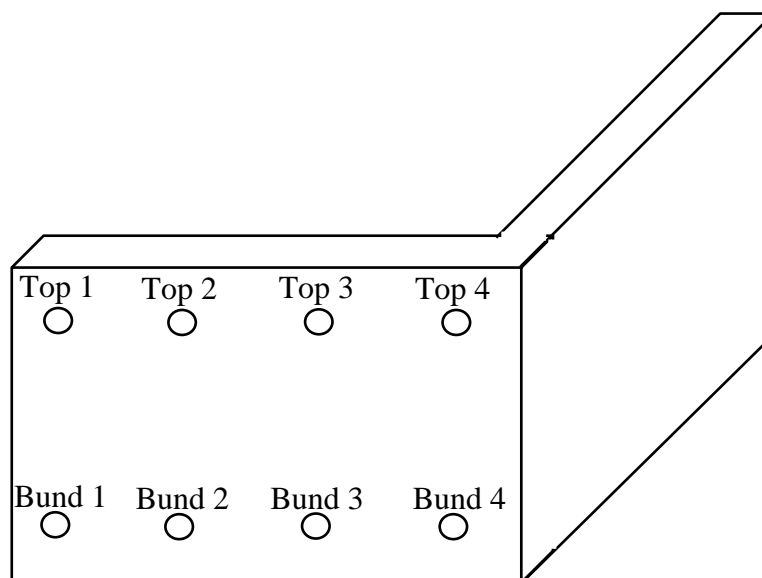
I forbindelse med SCC Demobroen er der foregået et udviklingsarbejde i SCC-Konsortiets regi for at dokumentere at den anvendte SCC opfylder Vejdirektoratets krav til betonen og til broens færdige udseende. I den forbindelse er der udført et antal prøvestøbninger i sommeren 2006 som udmundede i støbning af brodækket 17-10-2006. Under disse prøvestøbninger er der udtaget en lang række prøver i form af frisk beton, borekerner og støbte cylindre. Disse prøver er bl.a. undersøgt mht. luftindhold, luftporestruktur og frost/tøbestandighed. Det er disse prøveresultater, som er dokumenteret i afsnit 3.2.

De øvrige resultater vedr. betonens bearbejdelighed og udførelsesmæssige aspekter ved SCC arbejdet er rapporteret i *SCC Demobro*, SCC Konsortiet (2007).

Broen består af tre fundamenter med tilhørende søjler samt et kontinuert brodæk med kabler til opspænding. Midterfundamentet og midtersøjlen er støbt med traditionel beton E40 med vibrering. De to endefundamenter og endesøjler er støbt i SCC (lagt ud med bånd) og brodækket er støbt i SCC med pumpe.

Fundamenterne og midtersøjlen er alle støbt med beton baseret på Lavalkali sulfatbestandig cement (LASC), mens brodækket og de to endesøjler er støbt med en SCC recept baseret på Rapid cement (ROC). Forskellen i cementvalg skyldes, at der i udviklingen af en egnet SCC recept var problemer med at få Lavalkali cementen til at fungere tilfredsstillende igennem pumpen (*SCC Demobro*, SCC Konsortiet, 2007).

Der er udført to prøvestøbninger (3. og 4. prøvestøbning) undervejs med konstruktionsdele i stor skala. Ved 3. prøvestøbning 08-08-2006, blev en prøvevæg støbt på betonfabrikken i Herning i 2,5 m højde, udstøbt med pumpe for at vurdere betonens flydeevne. Denne prøvevæg blev efterfølgende benyttet til udtagning af borekerner for at vurdere betonens luftporestruktur og frost/tø-bestandighed afhængig af støbehøjden. Figur 3 viser udtagningssteder og benævnelser for disse borekerner.



Figur 3: Skitse af borekernernes placering i søjlevæggen støbt på Unicons fabrik i Herning 08-08-2006. Der blev tillige udboret en lodret kerne i væggen top for at vurdere separation. Denne kerne er ikke medtaget i nærværende rapport. Bund 1 og 2 samt Top 1 og 2 er benyttet til luftporestrukturanalyser. Bund 3 og 4 samt Top 3 og 4 er benyttet til frost/tø-test.



Ved den 4. prøvestøbning 28-09-2006 blev der udstøbt en model af brodækket i halv skala på brostedet. Denne prøvestøbning er efterfølgende blevet brugt til lodrette borekerner, hvoraf to kerner er benyttet til luftporeanalyser samt en bestemmelse af kloriddiffusionskoefficient (afsnit 3.2.3).

De to endefundamenter er ligeledes blevet brugt til udtagning af lodrette borekerner. I Tabel 2 er vist en oversigt over støbninger og tilhørende prøvemner.

Tabel 2: Målinger foretaget i forbindelse med SCC Demobroen. 1. prøvestøbning fra d. 21.06.2006, er ikke rapporteret her, men er omtalt i rapporten "SCC Demobro, (2007)".

Støbning Sted og tidspunkt	Type	FRISK BETON		HÆRDNET BETON	
		Pressure-meter	Air Void Analyzer	Luftporestruktur	Frostbestandighed
4. prøvestøbning Brodæksmodel, Ll. Donnerupvej 28-09-2006	Prøver efter hhv. blanding, transport og pumpe på i alt 4 læs	X	X	-	-
	2 borekerner*	-	-	X	-
3. prøvestøbning Søjlevæg, Herning 08-08-2006	4 borekerner (Fig. 3)	-	-	X	-
	4 borekerner (Fig. 3)	-	-	-	X
	2 cylindre efter transport	X	-	X	-
	2 cylindre efter pumpe	X	-	X	-
2. prøvestøbning Herning 27-07-2006	2 prøver efter blanding	X	X	-	-
	1 prøve efter transport	X	X	-	-
	2 prøver efter pumpe	X	X	-	-
	1 cylinder efter blanding	-	-	X	-
	2 cylindre efter transport	-	-	X	-
	2 cylindre efter pumpe	-	-	X	-
Endefundament (vest) Ll. Donnerupvej 29-06-2006	2 prøver efter blanding	X	X	-	-
	2 prøver efter transport	X	X	-	-
	3 cylindre efter blanding	-	-	X	-
	1 borekerne	-	-	X	-
Endefundament (øst) Ll. Donnerupvej 29-06-2006	2 prøver efter blanding	X	X	-	-
	2 prøver efter transport	X	-	-	-
	1 borekerne	-	-	X	-

Note: * Der er tillige bestemt kloriddiffusionskoefficient på en borekerne (afsnit 3.2.3).

En oversigt over de benyttede grundrecepter er givet i Tabel 3. Grundet den løbende receptjustering er der i Bilag A givet recepter for hver støbning, som viser den aktuelle sammensætning af betonen.



Tabel 3: Grundrecepter benyttet til SCC Demobroen. Betontype 40E med vand-cement tal maksimalt 0,40.

Recept nr.	46822	46538	46833
Delmateriale	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Lavalkali CEM I 42,5 N	357	360	-
Rapid CEM I 52,5 R	-	-	371
Flyveaske	81	82	84
Mikrosilika	12	12	12
Vand	154	155	174
Luft CP 316 1:1	0,09	0,08	0,06
Conplast 212	-	1,81	2,34
Structuro A1510	-	3,86	3,98
Glenium sky 525	4,05	-	-
Sand (Brejning), 0-4 kl. E	713	686	671
Sten (Halsvik), 4-8 kl. E	291	288	278
Sten (Halsvik), 8-16 kl. E	695	687	672



2.3 Holdbarhedskrav og specifikationer

I henhold til DS/EN 206-1, Annex F med tilhørende DS 2426 er holdbarhedskravene til beton givet afhængigt af den aktuelle miljømæssige eksponeringsklasse. Konstruktionsdele som skal stå udendørs udsat for vejrliget, herunder frost/tø-påvirkninger placeres i aggressiv miljøklasse. Det drejer sig typisk om anlægskonstruktioner som ikke er jorddækkede. Specielt udsatte dele såsom kantbjælker og søjleskafter tæt på vejbanen udsættes for tørsalting og sådanne konstruktioner placeres i ekstra aggressiv miljøklasse. Tabel 4. indeholder de væsentligste holdbarhedskrav

Tabel 4: Uddrag af Annex F i DS/EN 206-1 og DS 2426.

Miljøklasse (eksponeringsklasse)	A (XF2, XF3)	E (XF4)
Maksimalt vand-cement forhold	0,45	0,40
Minimum luftindhold i frisk beton (vol-%)	4,5	4,5
Minimum luftindhold i hærdnet beton (vol-%)	3,5	3,5
Maksimal afstandsfaktor (mm)	0,20	0,20
Frostprøvning efter SS 13 72 44	God	God

Vejdirektoratet anvender de samme holdbarhedskrav til beton anvendt i betonbroer og andre anlægsbygværker. Disse krav findes i Almindelige Arbejdsbeskrivelser AAB Betonbroer, kap. 8, Vejdirektoratet, december 2004. Vejdirektoratets krav svarer til dem, som er angivet i Tabel 4.

Frostprøvningskriteriet *god* i Tabel 4 betyder, at betonen skal opfylde ét af følgende to kriterier:

- Den samlede afskalning efter 56 frost/tø-cykler må ikke overstige 0,2 kg/m², eller
- afskalningen efter 56 frost/tø-cykler må ikke overstige 0,5 kg/m² samtidigt med, at forholdet mellem afskalning målt ved hhv. 56 og 28 cykler ikke overstiger en faktor 2.

I de følgende afsnit er forsøgsresultaterne gengivet og sammenlignet med ovennævnte krav.





3. Resultater og diskussion

3.1 SCC Vægstøbninger i DR-Byen

3.1.1 Luftporeanalyser

Luftporeanalyser er udført på 9 borekerner. Resultaterne fremgår af Tabel 5. Foruden luftindholdet målt på hærdnede borekerner indikerer tabellen også det friske luftindhold målt med pressure-meter på de enkelte læs beton, som blev leveret på støbedagen.

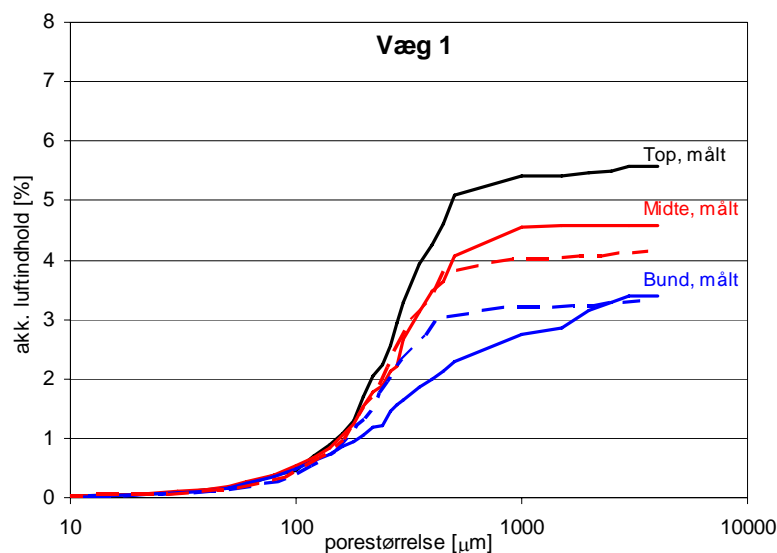
Det ses, at alle de testede kerner overholder kravene (jf. Tabel 4), undtagen én enkelt borekerne udtaget i bunden af væg 1, hvor det totale luftindhold kun er 3,0 %.

Tabel 5: Resultater af luftporeanalyse (DS/EN 480-11) på hærdnet beton. Til Væg 1 er benyttet læs 1 samt noget af læs 2, til Væg 2 er benyttet resten af læs 2 samt det meste af læs 3, osv. Luftindhold i frisk beton (DS/EN 12350-7) er bestemt på byggepladsen for hvert læs inden betonen pumpes (dog ikke læs 5). Prøvningsrapporter findes i Bilag B.

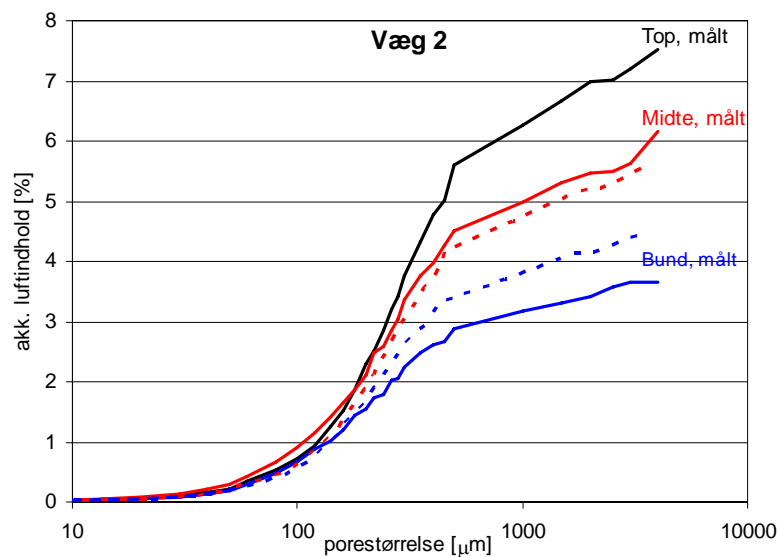
	Læs nr.	Væg 1 pumpestuds neddykket ½ m			Væg 2 pumpestuds ½ m over overfladen			Væg 3 pumpestuds konstant placeret neddykket i bunden af formen		
		1	2		3		4	5		
	Følgeseddel	53589	53599		53601		53605			
	Luftindhold i frisk beton	5,0%	6,6%		8,1%		5,1%		-	
	Kerne nr.	bund	midte	top	bund	midte	top	bund	midte	top
Luftindhold [%]	1	3,5	4,2	5,5	3,6	6,8	7,9	4,5	3,7	5,4
	2	3,8	4,8	6,0	3,9	6,0	7,9	3,8	3,7	6,2
	3	3,0	4,9	5,6	3,8	6,1	7,1	4,8	3,9	5,3
	Middel	3,4	4,6	5,7	3,8	6,3	7,6	4,4	3,8	5,6
Specifik overflade [mm ⁻¹]	1	39	34	33	35	35	30	33	32	28
	2	33	37	33	41	33	30	35	37	27
	3	34	27	34	44	42	33	28	31	28
	Middel	35	33	33	40	37	31	32	33	28
Afstands-faktor [mm]	1	0,14	0,15	0,14	0,16	0,11	0,11	0,15	0,17	0,16
	2	0,16	0,13	0,13	0,13	0,13	0,11	0,15	0,15	0,16
	3	0,18	0,18	0,13	0,12	0,10	0,11	0,17	0,17	0,17
	Middel	0,16	0,15	0,13	0,14	0,11	0,11	0,16	0,16	0,16

Generelt fås det mindste luftindhold i bunden af væggene, undtagen i væg 3. Dette skyldes den høje støbetakt, som gør at betonen i bunden ikke er afbundet, når toppen støbes. Derved presses luften sammen af tryk fra den overliggende beton. Derfor fås de laveste luftindhold i borekernerne udtaget i væggen bund. Samtidig bliver luftporerne mindre og den specifikke overflade stiger, hvorfor afstands faktoren kun øges marginalt fra top til bund.

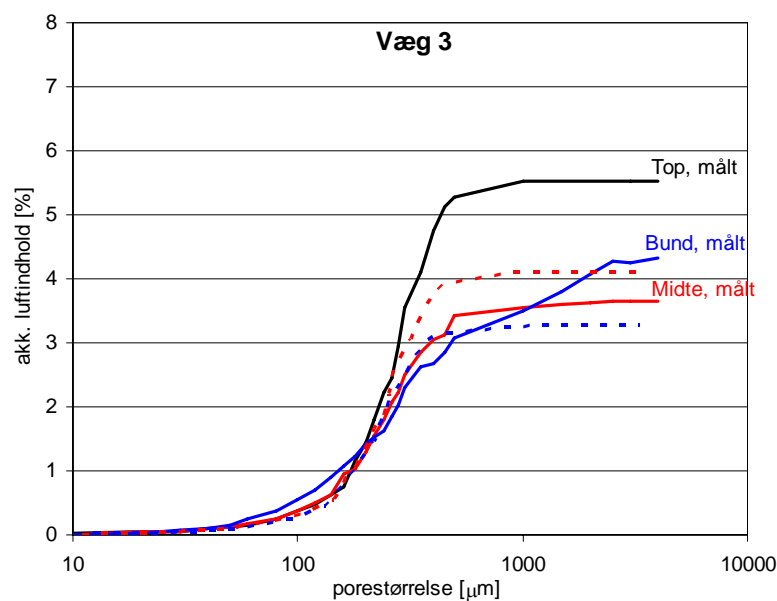
Den trykrelaterede reduktion af luftens volumen kan beregnes vha. Boyle-Mariottes lov, der forudsiger, at produktet af tryk og volumen er konstant ved konstant temperatur. I Figur 4 til 6 er den målte luftporestørrelsesfordeling i væggen top, omregnet til ækvivalente størrelsesfordelinger i væggen midte og bund (stiplede linier). Beregningen er lavet under forudsætning af hydrostatisk tryk hidrørende fra tyngden af den overliggende beton. For midten svarer dette til 2 m og for bunden til 3,7 m betontryk. Til sammenligning er de målte størrelsesfordelinger i midte og bund vist på diagrammerne. De målte kurver er gennemsnit af tre borekerner.



Figur 4: Luftporestørrelsesfordeling i væg 1. Pumpestuds dykket ca. $\frac{1}{2}$ meter under betonoverfladen under formfyldning.



Figur 5: Luftporestørrelsesfordeling i væg 2. Pumpestuds holdt ca. 1/2 meter over betonoverfladen under formfyldning.



Figur 6: Luftporestørrelsesfordeling i væg 3. Pumpestuds fastholdt i bunden af støbformen under fyldning.

Det ses, at omregningen vha. Boyle-Mariottes lov passer bedst for væg 1 og 2. Beregningen passer dårligt på væg 3, hvor pumpestudsens har været placeret i formens bund og fyldning af betonen er sket ved pumpning nedefra. Forklaringen kan være, at det ikke kun er trykket, der påvirker luftporestrukturen, men også den mekaniske påvirkning, betonen udsættes for under støbningen. Ved støbning med en pumpestuds i bunden af formen, bliver en stor del af betonen omrørt under hele støbningen. Det ser ud til, at denne fyldningsmetode har tendens til at få en del af luften til at forsvinde fra betonen, idet væg 3 generelt har det laveste luftindhold af de tre vægge i såvel midte som top.



I et eksamensprojekt fra BYG-DTU har Jensen (2005) undersøgt indflydelsen af tryk på luftporestruktur og frostbestandighed af SCC vha. udstøbte betoncylindre holdt dem under konstant tryk i hærdeperioden. Der er undersøgt trykniveauer svarende til 0, 2, 4 og 6 m støbetryk. Jensen (2005) har fundet en meget klar sammenhæng mellem støbetryk og luftporestruktur vha. Boyle-Mariottes lov.

For Væg 1 og Væg 3 gælder det, at kurveformen lader til at være afhængig af trykket. For fordelingen i midte og top kan således groft opdeles i to områder. 0-500 μm og $>500 \mu\text{m}$. I begge tilfælde har hovedparten af alle luftporer størrelser under 500 μm . Anderledes er fordelingen i bunden af Væg 1 og 3, hvor kurven er jævnt stigende til største luftporestørrelse på ca. 5 mm. Se måledata i Bilag B.

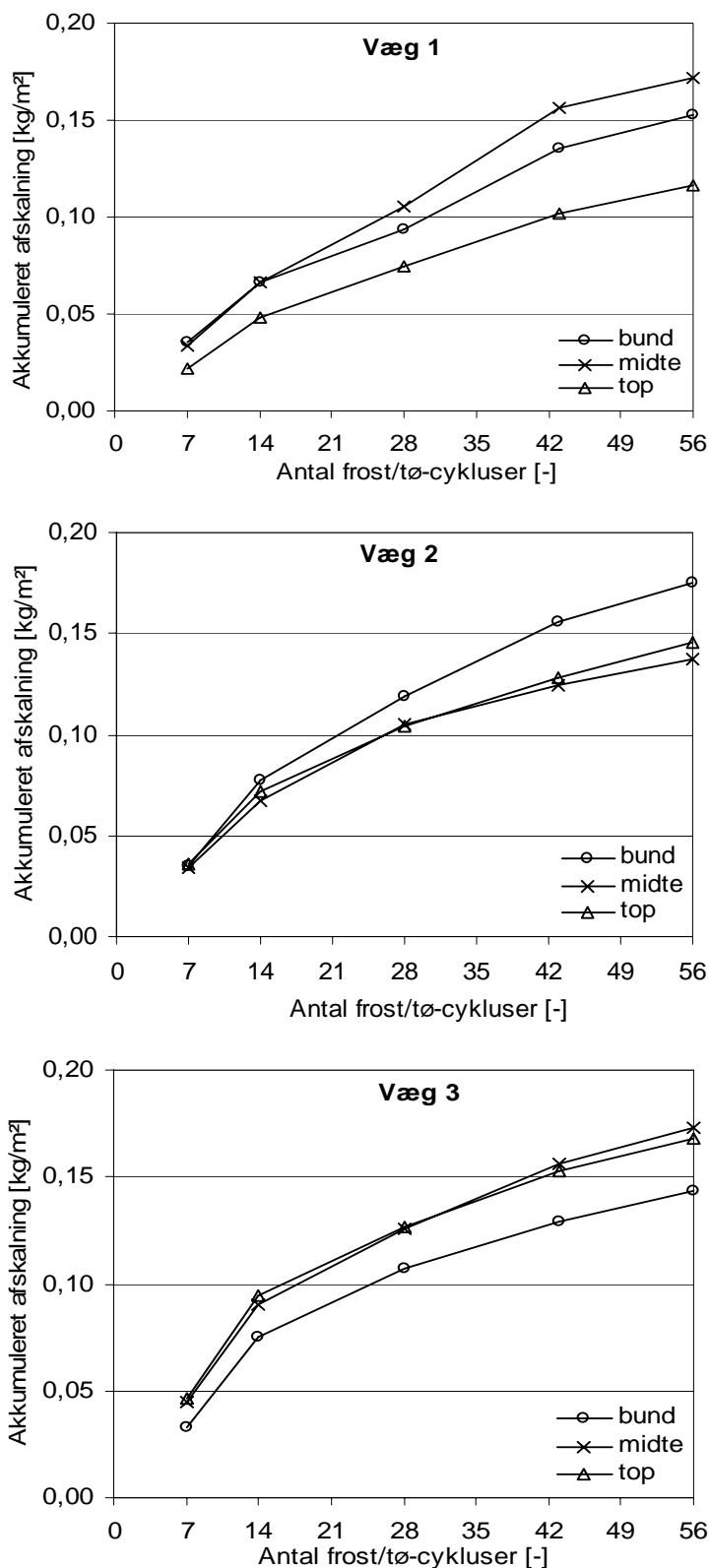
For Væg 2 er der ikke denne forskel i kurveformen. I denne væg er pumpestudsen placeret så betonen falder frit med op til $\frac{1}{2}$ m, hvilket formodentlig er årsagen til, at en del større luftbobler indesluttet, især i den øvre halvdel af væggen.

3.1.2 Frost/tø-bestandighed

Frostbestandigheden er registeret vha. 56 frost/tø cykler på 9 borekerner (2 prøvninger pr. borekerne) ligesom for luftporeanalysen. Resultaterne fremgår af Bilag B (Figur 7).

Ifølge Tabel 4 skal beton i miljøklasse A og E opnå resultatet *god* ved afprøvning i en accelereret frost/tø-test. Det ses umiddelbart, at alle prøveemnerne opfylder begge krav (afsnit 2.3) og, at frostbestandigheden for alle væggene derfor må karakteriseres som tilstrækkelig. Afskalmingsniveauet er for alle vægge fundet til nogenlunde det samme omfang og der er heller ikke fundet nogen nævneværdig indflydelse fra om prøveemnet stammer fra top, midte eller bund af væggen.

Dette er i overensstemmelse med Jensen (2005), som viser vha. frost/tø-prøvning, at den trykrelaterede ændring i luftporestrukturen ikke har nogen nævneværdig indflydelse på frostbestandigheden. Jensen (2005) har benyttet SCC baseret på Rapid cement og med vand-cement tal på 0,35 svarende til ekstra aggressiv miljøklasse ligesom i nærværende undersøgelse fra DR-Byen.



Figur 7: Afskalning registreret i frost/tø-test (SS 13 72 44). Se Bilag B.



3.2 SCC Demobro, LI. Donnerupvej ved Give

3.2.1 Luftporeanalyser

I Tabel 6 på næste side er vist de resultater der er opnået i forbindelse med SCC Demobroen i oversigtsform.

Frisk luftindhold

Af resultaterne i Tabel 6 ses, at alle støbningerne overholder kravet på mindst 4,5 % til frisk luftindhold i Annex F i DS/EN 206-1 og den tilhørende DS 2426. Ved hjælp af pressure-meter er der registreret 6 til 8 % luft i hovedparten af blandingerne. Der er desuden konstateret en udmærket sammenhæng mellem pressure-meter og Air-Void-Analyzer, når det gælder det friske luftindhold. Sidstnævnte vil typisk ligge lidt lavere end pressure-meter måling.

Luftporestruktur

Ligesom for luftindholdet i frisk tilstand opfylder luftindholdet i hærdnet tilstand kravet på mindst 3,5 % givet i Tabel 4.

Af de to borekerner udtaget af 3. prøvestøbning 08-08-2006 ses det, ligesom for vægstøbningerne i DR-Byen, at luftindholdet er lavest i bunden af væggen (jf. Tabel 5). Det skal bemærkes at 3. prøvestøbning omfatter en 2,5 m høj væg til forskel fra DR-Byen, hvor væggene var 4 m høje.

I de blandinger hvor der er målt på den friske betons luftporestruktur (vha. Air Void Analyzer) og den hærdnede betons luftporestruktur (iht. DS/EN 480-11) er resultatet mht. specifik overflade plottet i hhv. figur 8 og 9.

Som det ses, er der en tendens til en øgning i specifik overflade efter pumpning af betonerne, på nær et enkelt resultat. Dette gælder både for betoner med Rapid og Lavalkali cement og afspejles både i målinger på frisk og hærdnet beton. Ændringen i specifik overflade lader ikke til at være reflekteret i en ændring af det totale luftindhold. Dette antyder, at pumpningen slår nogle af de større luftporer i stykker, så resultatet er nogenlunde uændret luftindhold, men fordelt på mindre luftporer.

Umiddelbart giver begge metoder samme oplysninger om poresystemet, nemlig at der er tale om et velindblandet luftporesystem. Det er dog ikke muligt at sammenligne resultaterne kvantitativt, da variationer og usikkerheder er store.

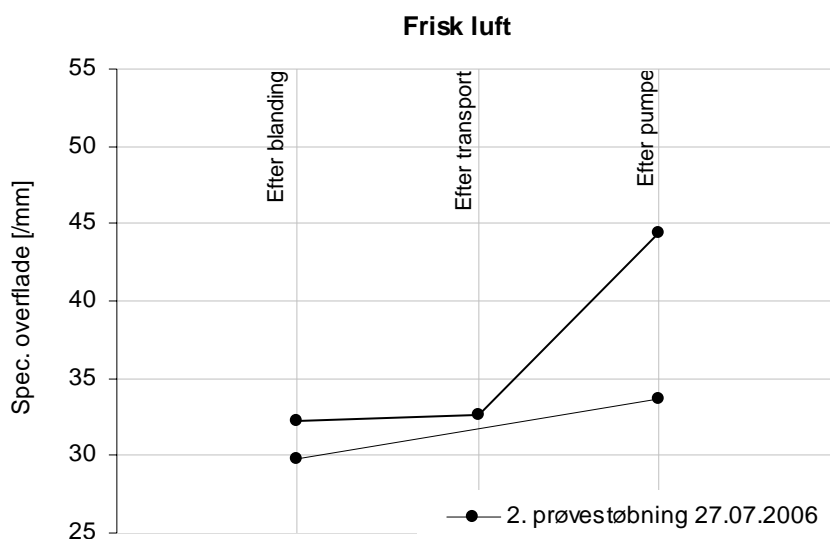


Tabel 6: Resultater af luftporeanalyser på hærdnet beton samt luftanalyser på frisk beton i forbindelse med SCC Demobroen.
Kopi af prøvningsrapporterne ses i bilag C.

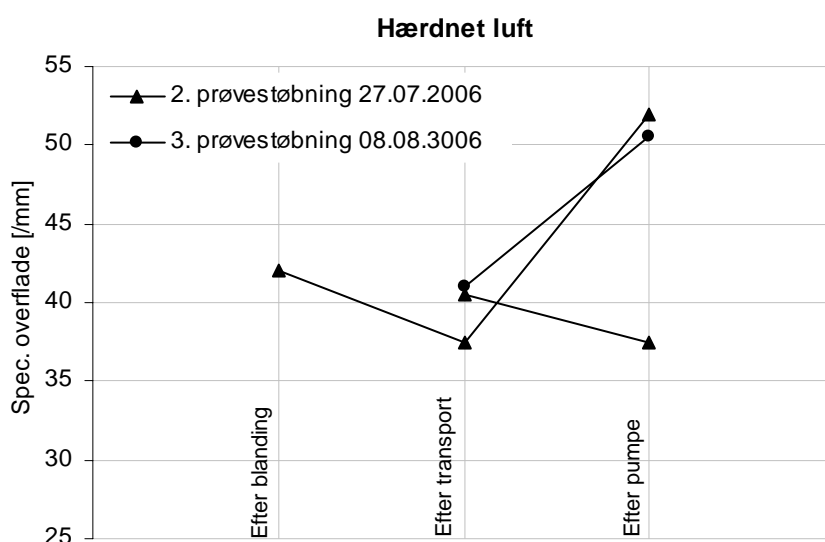
Støbning Sted og tidspunkt	Receipt nr.	Prøveemner P = Frisk betonprøve K = Borekerner C = Støbt cylinder	Luft målt på frisk beton				Luftporestruktur målt på hærdnet beton		
			Pressure- meter [%]	Air Void Analyzer			Luft < 4 mm [%]	Spec. overfl. [mm ⁻¹]	Afstands- faktor [mm]
			Luft < 2 mm [%]	Spec. overfl. [mm ⁻¹]	Afstands- faktor [mm]				
4. prøvestøbning Brodæksmodel, Ll. Donnerupvej 28-09-2006	46833	P 53916 (efter blanding)	7,8	6,7	37,7	0,12			
		P 53916 (efter transport)	7,1						
		P 53916 (efter pumpe)	7,1						
		K3 Midt i brodæk – kernebund					4,7	50	0,11
		K3 Midt i brodæk – kernetop					5,6	44	0,11
		K5 Kantbjælke – kernebund					5,1	48	0,11
		K5 Kantbjælke – kernetop					5,0	43	0,12
3. prøvestøbning Søjlevæg, Her- ning 08-08-2006	46833	K Top 2					5,1	38	0,14
		K Top 1					5,3	43	0,12
		K Bund 1					3,6	58	0,11
		K Bund 2					4,1	50	0,11
		C 800-1 (efter transport)					4,6	41	0,13
		C 800-2 (efter transport)					4,6	41	0,13
		C 800-6 (efter pumpe)					4,2	48	0,12
		C 800-7 (efter pumpe)					4,4	53	0,11
		P 800 (efter blanding)	4,8						
		P 800 (efter transport)	4,8						
P 800 (efter pumpe)	6,2								
2. prøvestøbning Herning 27-07-2006	46538	P 5778 (efter blanding)	5,8	5,5	29,8	0,164			
		C 5778-14 (efter transport)					5,4	38	0,13
		C 5778-15 (efter transport)					6,1	43	0,11
		C 5778-16 (efter pumpe)					4,6	36	0,15
		C 5778-17 (efter pumpe)					4,7	39	0,14
		P 5778 (efter pumpe)	6,0	5,0	33,6	0,152			



		P 5777 (efter blanding)	7,2	5,8	32,2	0,148				
		C 5777-8 (efter blanding)					7,0	41	0,11	
		C 5777-9 (efter blanding)					6,9	43	0,10	
		P 5777 (efter transport)	7,5	6,4	32,6	0,139				
		C 5777-10 (efter transport)					6,4	36	0,13	
		C 5777-11 (efter transport)					6,2	39	0,12	
		P 5777 (efter pumpe)	7,9	7,8	44,4	0,089				
		C 5777-12 (efter pumpe)					6,6	49	0,09	
		C 5777-13 (efter pumpe)					7,2	55	0,08	
Endefundament (vest) Ll. Donnerupvej 29-06-2006	46822	P 5702 (efter blanding)	6,0	5,7	34,2	0,140				
		C 5702-8 (efter blanding)					7,0	36	0,12	
		C 5702-9 (efter blanding)					6,0	31	0,15	
		C 5702-10 (efter blanding)					5,1	37	0,14	
		P 5702 (efter transport)	6,5							
		P 5703 (efter blanding)	6,2	4,5	32,1	0,167				
		P 5703 (efter transport)	6,3							
		K MTH1					7,1	26	0,16	
Endefundament (øst) Ll. Donnerupvej 29-06-2006		P 5704 (efter blanding)	8,3	7,8	31,9	0,123				
		P 5704(efter transport)	8,3							
		P 5705 (efter blanding)	8,3	8,5	30,0	0,120				
		P 5705(efter transport)	8,0							
		K MTH2					5,7	24	0,20	



Figur 8: Målinger af specifik overflade af luftporer i den friske beton vha. AVA foretaget på forskellige tidspunkter i processen. Se værdier i Tabel 6.



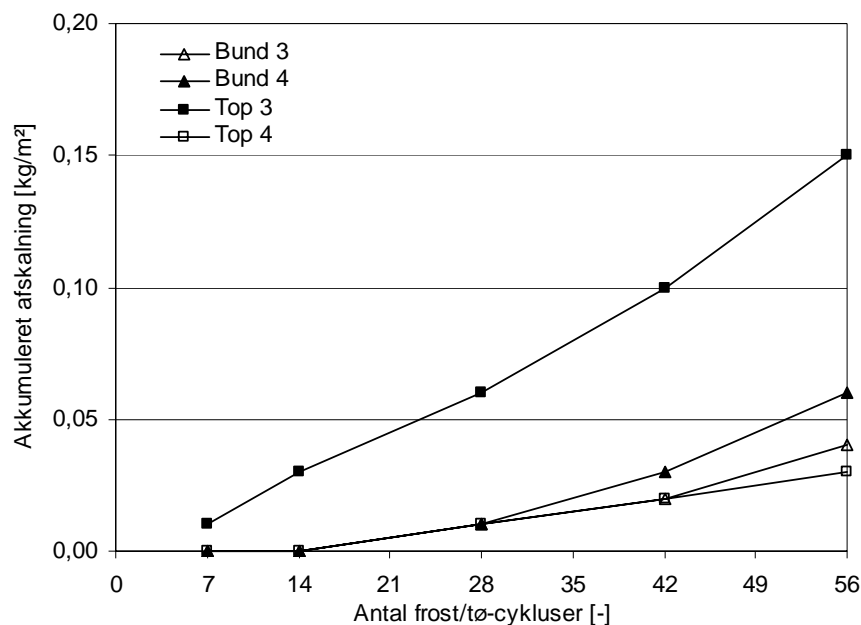
Figur 9: Målinger af specifik overflade af luftporer i hærdnet beton foretaget på forskellige tidspunkter i processen. Se værdier i Tabel 6.

3.2.2 Frost/tø-bestandighed

Frostbestandighed er undersøgt på fire vandrette borekerner udtaget fra 3. prøvestøbning 08-08-2006 af søjlevæggen i Herning. Resultaterne fremgår af Fig. 10.

Som det ses, overholder alle fire borekerner kravet om at den samlede afskalning efter 56 frost/tø-cykler ikke må overstige $0,2 \text{ kg/m}^2$. Dermed består betonen frostbestandighedskriteriet angivet i afsnit 2.3. Det skal også siges, at luftporeanalyser på borekerner fra denne 3. prøvestøbning viser afstandsfaktorer under $0,20 \text{ mm}$, hvilket ligeledes er i overensstemmelse med kravet.

For den 4. prøvestøbning 28-09-2006 er der ligeledes udført luftporeanalyser på borekerner, hvor det er konstateret at afstands faktoren er langt under kravet på 0,20 mm (Tabel 6).



Figur 10: Afskalning registreret i frost/tø-test (SS 13 72 44). Se Bilag C.

3.2.3 Kloridindtrængning

Der er foretaget en bestemmelse af diffusionskoefficienten for kloridindtrængning ud fra NT Build 492:1999. Prøvningsrapport ses i Bilag C.

Tre bestemmelser er foretaget på borekerne fra 4. prøvestøbning 28-09-2006 hidrørende fra broens kantbjælke.

Der er målt en gennemsnitlig værdi på $2,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, hvilket svarer til det forventelige, for en beton med den givne recept, se f.eks. Sørensen (1996).



4. Konklusioner

Resultater fra både DR-Byen og SCC Demobroen har vist, at der ikke er problemer med at overholde betonstandardens krav til luftindhold og luftporestruktur, når der benyttes SCC til aggressiv og ekstra aggressiv miljøklasse. Det samme gælder frostbestandighedskravet til frost/tø-prøvning efter SS 13 72 44.

På basis af undersøgelserne må det konkluderes, at SCC generelt er et robust materiale mht. luftporestruktur og frostbestandighed. Der er ikke fundet nogen problemer ved at benytte SCC hverken pga. pumpning eller hydrostatisk trykfordeling som følge af en øget støbetryk ved lodrette støbninger af vægge og søjler.

Det skal afslutningsvis siges, at et eksamensprojekt fra Aalborg Universitet viser at det kan være svært at få SCC til aggressiv eller ekstra aggressiv miljøklasse til at opfylde kravene (Kristensen & Skulason 2006). Dette skyldes dog udelukkende, at det anvendte tilslag ikke var tilstrækkelig frostbestandigt.

4.1 Vægstøbninger i DR-Byen

Luftporeanalyserne fra vægstøbninger med SCC E40 i DR-Byen viste, at der som forventet, var lavere luftindhold i bunden end i toppen af væggene og, at den trykrelaterede ændring i luftindholdet kan forklares med Boyle-Mariottes lov. Det blev ydermere fundet, at placering af pumpestuds over støbeoverfladen med et vist frit fald af betonen til følge kan give større luftindeslutninger i betonen og dermed ændringer i luftporestrukturen. Dette er imidlertid ikke noget som har nogen væsentlig indflydelse på afstands faktoren og dermed frostbestandigheden.

4.2 SCC Demobro

Undersøgelserne omkring effekt af pumpning på SCC Demobroen viste, at der ved pumpning er en tendens til en øgning i mængden af mindre luftporer, mens det samlede luftindholdet forbliver stort set uændret. Dette har ingen implikationer for overholdelse af luftindholds krav, men kan have stor indflydelse på bearbejdigheden af betonen.





5. Litteratur

Jensen, Mikkel V., *Selvkomprimerende beton – effekt af formtryk på luftporestruktur og frostbestandighed*, Eksamensprojektrapport, BYG-DTU, Danmarks Tekniske Universitet, 2005.

Kristensen, L.F. & Skulason, M. *Søsten versus knust granit i selvkomprimerende betoner i aggressive miljøer*, Eksamensprojektrapport, Aalborg Universitet, juni 2006.

SCC-konsortiet, *SCC Demobro*, Teknologisk Institut, marts 2007.

SCC-konsortiet, *Støbning af lodrette konstruktioner med SCC – Fuldskalaforsøg i DR-Byen*, Teknologisk Institut, 2007.

Sørensen, Henrik Erndahl., *Chloridtransport i hærdnet beton – mekanismer, modeller og målemetoder*, Erhvervsforskerprojekt EF 260, Maj 1996

Vejregler, *Almindelige Arbejdsbeskrivelser AAB Betonbroer, Betonarbejde*, Vejdirektoratet, December 2004.