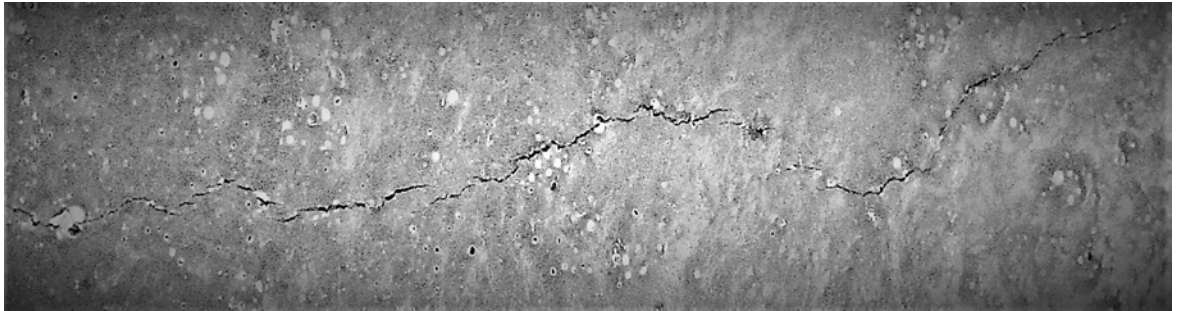


Undvikande av plastiska krympsprickor i betong med en ny beräkningsmetod - del I



Faez Sayahi

2021-04-10

FÖRORD

Projekt 138221 ”Undvikande av plastiska krympsprickor i betong med en ny beräkningsmetod – del I” har genomförts vid Luleå tekniska universitet, LTU, inom forskningsämnen Byggmaterial, i samarbete med Betongindustri AB och Linotol AB.

Ett speciellt och stort tack vill vi i projektgruppen rikta till SBUF - Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond för finansiering och allmänt stöd av denna del I av projektet. Utan bidraget hade det inte varit möjligt att genomföra och slutföra projektet.

Utöver SBUF vill vi även tacka övriga finansiärer som på olika sätt bidragit till att projekt kunnat genomföras; Betongindustri AB, Linotol AB och Skanska Sverige AB/Teknik, samt personer vid Betongindustri AB och Linotol AB som förtjänstfullt medverkat vid genomförandet av arbetet.

Luleå, 10:e april 2021

Faez Sayahi, Tekn dr
Byggmaterial
Luleå tekniska universitet
Projektledare

SAMMANFATTNING

Tidig sprickbildning (upp till 24 timmar efter gjutning) kan bli problematisk för vissa betongkonstruktioner. Den kan påverka de estetiska egenskaperna hos betongelementet men framförallt reducera beständighet och funktion genom bland annat att underlätta inträngning av skadliga material. Dessutom kan sprickorna expandera successivt under betongens livslängd på grund av långsiktig krympning och/eller senare exponering av bruksbelastning och därigenom ytterligare accentuera skadornas konsekvenser.

Tidig sprickbildning orsakas av två drivkrafter: 1) plastisk krympsprickbildning som är ett fysikaliskt fenomen som uppstår på grund av en snabb och stor förlust av fukt, främst i form av avdunstning, 2) autogen krympning på grund av kemiska reaktioner mellan cement och vatten. I detta projekt undersöks framförallt den förstnämnda effekten.

Snabb avdunstning från ytan av färsk betong förorsakar undertryck i betongens porsystem. Detta tryck, känt som det kapillära undertrycket, drar ihop de fasta partiklarna vilket gör att hela betongelementet krymper. Om denna krympning hindras på något sätt uppstår dragspänningar som kan föranleda sprickbildning. Fenomenet inträffar tidigt efter gjutning av betongen medan den fortfarande är i plastiskt skede (upp till ca 8 timmar efterfärdigställande av övertyta) och är i huvudsak observerat i betongkonstruktioner med stor yta till volymförhållande såsom plattor, industrigolv, beläggningar och brobanor.

I projektet ska en modell vidareutvecklas som uppskattar uppsprickningsgraden baserat på avdunstning (beroende på omgivningsförhållandena), blödning (beroende på blandningens utformning) och öppethållandetid (beroende på blandningen och omgivningstemperatur). Detta innebär att den nya metoden även kan jämföra uppsprickningstendensen hos olika betongblandningar under liknande omgivningsförhållanden. Modellen är utvecklad i laboriemiljö samt några halvskaleförsök och baseras på ett antal variationer av betongrecept och härdningsförhållanden.

Utvecklingen sker genom att studera känsligheten på uppsprickningspotentialen genom variation av cementtyp, vct och tillsatsmedel. Validering av resultaten och eventuell nödvändig kalibrering av modellen sker därefter genom fullskalestudier (del II) samt råd och rekommendationer tas fram hur byggtreprenörerna kan förhindra eller begränsa risken för plastiska krympsprickor.

Under del I av projektet har intressanta iakttagelser kunnat göras beträffande olika betongkvaliteters sprickbenägenhet vid halvskaleförsök och framförallt hur den teoretiska modellen stämmer överens med observationerna från försöken. Relationer mellan materialorienterade försöksmetoder och beteendet i halv skala har även studerats. En god bas för möjlig fortsättning av projektet har etablerats.

INNEHÅLL

1. INLEDNING	4
1.1 BAKGRUND.....	4
1.2 SYFTE	6
1.3 METODIK.....	6
2. MATERIAL OCH METODER	8
2.1 MATERIAL	8
2.2 HALVSKALEPLATTOR OCH GJUTFORMAR	9
3. RESULTAT	14
3.1 ALLMÄNT	14
3.1.1 OMGÅNG I - CEMENTTYP OCH VATTENCEMENTTAL (VCT).....	15
3.1.2 OMGÅNG II - VATTENCEMENTTAL.....	19
3.1.3 OMGÅNG III - TILLSATSMEDEL	25
4. DISKUSSION; JÄMFÖRELSE MED MODELL	30
4.1.1 OMGÅNG I - CEMENTTYP OCH VATTENCEMENTTAL.....	30
4.1.2 OMGÅNG II – VATTENCEMENTTAL	31
4.1.3 OMGÅNG III – TILLSATSMEDEL.....	32
4.1.4 PROCENTUELL MINSKNING AV UPPSPRICKNINGSRISK, PRCR	33
5. KÄNSLIGHETSANALYS	35
6. SLUTSATSER	36
7. REKOMMENDATIONER	36
REFERENSER	37
BILAGA A	40
BILAGA B	42
BILAGA C	46

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

Hållbarhet och funktionalitet hos betongkonstruktioner är nära relaterade till om de är sprickfria under sin livslängd eller inte. Om ett betongelement utsätts för ansevärd tidig krympning kan emellertid sprickor bildas vilket försämrar strukturens hållbarhet, detta genom att sprickorna innebär passager för skadliga material att tränga in i betongmassan (Larch, 1957; Tutti, 1982; Jonasson, 1994; Hedlund, 2000; Carlswärd, 2006; Carlswärd & Emborg, 2014).

Den totala krympningen av ett cementbaserat material som betong orsakas av olika sammandragningsmekanismer; uttorkning, hydratation och/eller karbonisering. Den totala krympningen av betong kan delas upp i: a) krympning i tidig ålder, närmare bestämt under de första timmarna och dagarna efter blandningen, och b) långsiktig krympning för tiden därefter.

De två huvudkomponenterna i krympningen i tidig ålder är plastisk krympning och autogen krympning. De förstnämnda inträffar på grund av snabb och stor fuktförlust, främst på grund av avdunstning, medan den senare är ett resultat av de kemiska reaktionerna mellan cement och vatten (Esping & Löfgren, 2005).

Plastiska krympsprickor (figur 1.1), ämnet för denna forskning, inträffar mellan tiden för betonggjutningen och starten av hydratationen, det vill säga under den tid då blandningen ännu inte har fått tillräckligt draghållfasthet (Revina & Shalon, 1964; Powers, 1968). American Society och Civil Engineering, definierar i ACI 305R (1999) uppsprickningen av plastisk krympning som ett fenomen huvudsakligen förknippat med betong i varmt väder. Den förekommer i horisontella, plana betongytor exponerade för vertikal avdunstning, men också i balkar och liknande med mer oregelbundna konstruktioner. Enligt andra rön än från ACI kan den plastiska krympsprickbildningen även utvecklas i andra klimat närhelst avdunstningshastigheten är större än den hastigheten med vilken vattnet stiger till ytan i den nygjutna betongen genom blödning, det vill säga uppåtriktad vattentransport i betongmassan.



Figur 1.1 – Exempel på plastiska krympsprickor i brobanepaltor.

De metoder som användas för närvarande för att mildra uppsprickningsrisken är baserade på att minska avdunstningen från den nyligen gjutna betongen, genom t.ex. täckning av ytan, vattenbegjutning och applicering av membranhärdare (figur 1.2). Genom åren har därför flera metoder utvecklats för att uppskatta avdunstningshastigheten från den färska betongytan och för att i förväg varna om den är för hög. Unos formel (1998) och ACI-nomografen (ACI 305R, 1999) är de mest använda metoderna, se även Betonghandboken Material, kap 9.

Metoderna är således enbart inriktade på att parera för ogynnsamma omgivningsförhållanden och tar inte med den avgörande inverkan av betongens strukturuppbyggnad under de första timmarna. Det finns faktiskt idag ingen metod som säkert kan uppskatta risken för plastiska krympsprickor innan gjutningen. Därigenom försvåras entreprenörernas planering och möjligheter att vidta lämpliga åtgärder för att skydda den nygjutna betongytan. Dessutom kan entreprenörerna inte jämföra uppsprickningsgraden i olika betonger i förväg för att välja en betonglösning med lägst uppsprickningsrisk.

Här har vi identifierat ett stort problem för utförare att åstadkomma högkvalitativa, hållbara betongkonstruktioner.

Genom två SBUF finansierade projekt (12652 och 13401) har grundläggande forskning nyligen utförts och redovisats i en avhandling våren 2019 (Sayhai, 2019). Det konkluderades bl a att sprickbildning i plastiska stadiet är ett resultat av ett komplext samband mellan sammankopplade parametrar såsom avdunstning, kapillärt undertryck i porerna och hydratationshastighet. Det har också observerats när det gäller uppsprickningsgrad, att enbart förlita sig till bestämning av avdunstning, är tvetydigt och ibland helt fel. Detta eftersom olika betongsammansättningar kan ha olika avdunstningshastigheter vid ett och samma gjutförhållande och ge olika sprickrisker. Dessutom är inte risken för sprickbildning entydigt kopplad till avdunstningen. Projekten visade att sprickbildning kan ske för en betongkvalitet för en avdunstningshastighet som är helt skild den som är fallet för uppsprickning hos en annan betongkvalitet.

Följaktligen, en modell föreslogs i SBUF projekten som uppskattar uppsprickningsgraden baserat på avdunstning (beroende på omgivningsförhållandena), blödning (beroende på blandningens utformning) och öppethållandetid (beroende på blandningen och omgivningstemperatur), se Sayahi (2019) och bilaga A. Den nya modellen testades i detta SBUF finansierade projekt och resultaten sammanfattas denna rapport.



Figur 1.2 – Membranhärdning av nygjuten betongplatta.

1.2 Syfte

Huvudsyftet med detta fortsättningsprojekt är enligt ovan att vidareutveckla modellen till en högre tillämpningsgrad så att plastiska sprickor kan undvikas i framtiden. Följande delsyften kan definieras:

1. Identifiera vikten av de tre huvudparametrarna för sprickrisk i modellen (för beskrivning, se bilaga A), dvs. en känslighetsanalys.
2. Förstå hur tillsatsmedel och betongblandning påverkar modellens funktion.
3. Hitta optimala betongrecept, t.ex. mängd och typ av cement och andra bindemedel, filler och tillsatsmedel, för att uppnå den lägsta uppsprickningstendensen.
4. Säkerställa tillräckligt tillförlitlighet med metoden på byggarbetsplatsen och beakta totala kostnader för optimal lösning

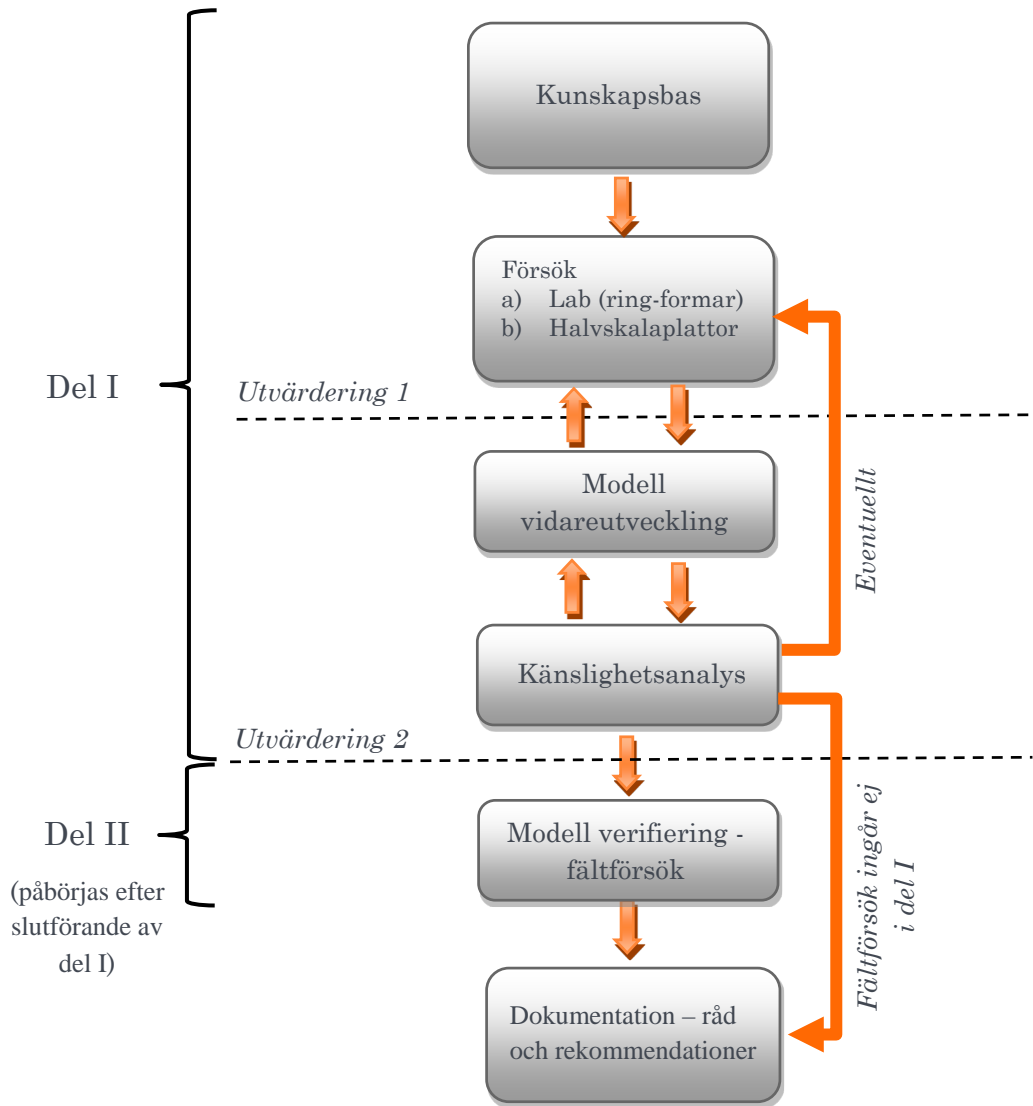
Effektmålet med projektet, dvs. branschnyttan för utförare *efter* projektets genomförande och tillämpning av resultat kan förtydligas till följande delar:

- Entreprenörernas kan på förhand, dvs. innan gjutning, välja en betong med minsta uppsprickningstendens för aktuell tillämpning
- Entreprenören kan välja åtgärder på arbetsplats med hänsyn till väderlek under och strax efter gjutning
- Sprickorna kan hållas på minimal nivå genom ny kunskap om materialval och härdningsmetod.
- Kostsamma reparationer reduceras och resurser kan istället läggas på värdeskapande byggaktiviteter (t ex enligt Lean Construction filosofier).
- Konstruktioner med så lite sprickor som möjligt innebär dessutom längre livslängd och god funktion generellt dvs stora hållbarhetsförtjänster för beställare och samhället.

1.3 Metodik

Projektet har utförts i fem steg (figur 1.3):

1. Parameterstudie genom halvskaletförsök
2. Känslighetsanalys
3. Utvärdering, delrapport 1
4. Verifiering
5. Rapportering



Figur 1.3 – Arbetsplan – Del I och del II

2. MATERIAL OCH METODER

2.1 Material

Halvskaleförsök och relaterade materialförsök ägde rum i Linotol AB:s anläggning i Norrköping i tre omgångar under september och oktober 2020. Tabell 2.1 visar de parametrar som har testats under projektets gång. Testade recept och parametrar i varje omgång samt sammansättning av cement visas i tabeller 2.2 och 2.3. Notera att i denna del av projektet (Del I) testades SKB recept - traditionellt vibrerad betong kan undersökas i Del II. Betongerna producerades, levererades och gjöts av Betongindustri AB, Linköping. Vid gjutningen medverkade även personal från Linotol.

Tabell 2.1 – Testade parametrar.

Testade parametrar	Variation	Metoder/mättningsparametrar (i alla försök)
Tillsatsmedel	Retarder Accelerator Flyttillsatsmedel (SP) dosering	Ringtest Halvskaleförsök Öppethållandetid Blödning Kapillärt undertryck Sprickdokumentation
vct	0,45, 0,55, 0,6, 0,65	
Cementtyp	CEM II/A-V 42.5N – MH/LA/NSR (Anläggningscement FA) CEM II/A-V 52.5N (Bascement)	

Tabell 2.2 - Sammansättning av betong.

Recept	Omgång I - cementtyp			Omgång II - vct			Omgång III - tillsatsmedel		
	ANL FA 0.55	BAS 0.55	BAS 0.45	ANL FA 0.65	ANL FA 0.6	ANL FA 0.45	ANL FA 0.45 SP	ANL FA 0.45 ACC	ANL FA 0.45 RET
Cement (kg/m ³)	340	340	420	300	325	420	420	420	420
Filler (kg/m ³)	111	111	45	130	111	45	45	45	45
0/4 mm (%)	58	58	55	59	59	55	55	55	55
8/16 mm (%)	42	42	45	41	41	45	45	45	45
Flytmedel (% cement)	0,85	1	1,1	0,9	1	0,95	2	0,95	0,95
ACC (% cement)	-	-	-	-	-	-	-	2	-
Retarder (% cement)	-	-	-	-	-	-	-	-	2
vct	0,55	0,55	0,45	0,65	0,6	0,45	0,45	0,45	0,45

Tabell 2.3 - Sammansättning av cement (Cementa AB, Sverige).

Namn	CEM II/A-V 42.5N – MH/LA/NSR (Anläggningscement FA)	CEM II/A-V 52.5N (Bascement)
CaO	-	55,4
SiO ₂	-	23,6
Al ₂ O ₃	-	6,6
Fe ₂ O ₃	-	3,7
MgO	-	2,8
Na ₂ O	0,55	0,32
K ₂ O	-	1,3
SO ₃	2,8	3,4
Cl	0,01	0,07
C ₃ A	2,0	5,3
C ₄ AF	13,6	-
Densitet (kg/m ³)	3000 ± 20	3000
Blaine (m ² /kg)	400 ± 30	457

2.2 Halvskaleplattor och gjutformar

Två försöksupställningar användes under projektets gång, tre ring-testformar, enligt Johansen & Dahl, (1993), figurer 2.1 och 2.2, samt tre halvskalaplattor (figurer 2.3 till 2.5) bl a för att jämföra prestanda av två metoderna.

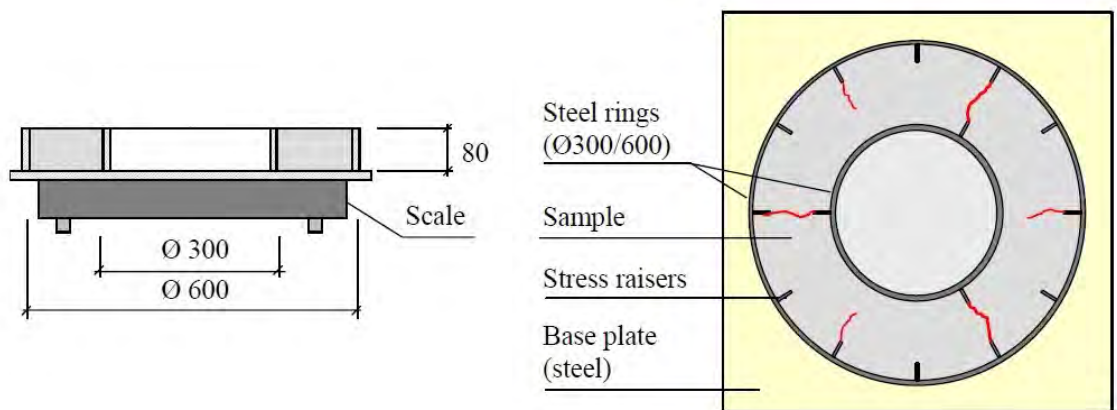
Varje försök pågick under 24 timmar efter gjutningen. Alla betongplattor och utrustningar placerades inomhus för att säkerställa kontroll av omgivningsförhållanden se tabell 2.4. Vind genererades över plattorna och ring-testformarna med 6 fläktar (Showtec SF-150 Axial Touring Fan), se figur 2.5.

Tabell 2.4 – Medelvärde av omgivningsförhållanden samt betongtemperatur under projektets gång.

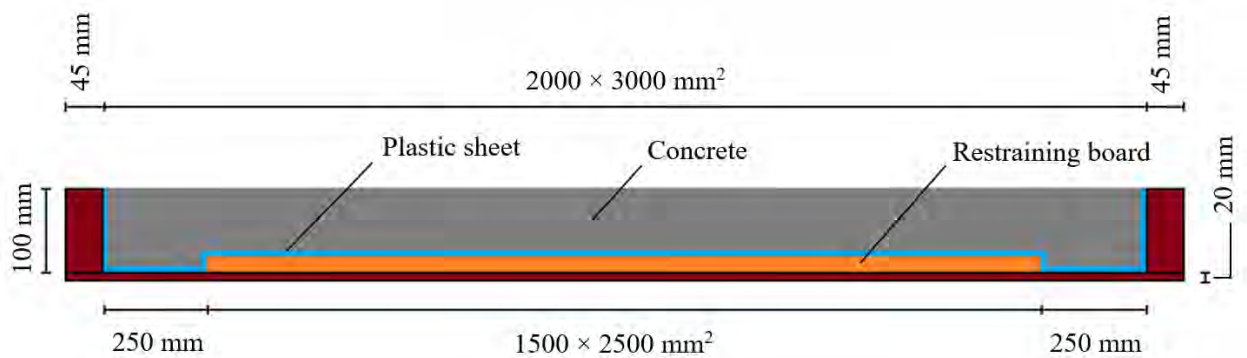
Omgång	T _{luft} (°C)	T _{betong} (°C)	RF. (%)	Vind (km/h)
I	22	22	67	16,20
II	22	22	63	16,20
III	22	22	62	16,20



Figur 2.1 – Ring-test.



Figur 2.2 – Dimensioner av ring-testformen.



Figur 2.3 – Dimensioner av halvskaleformen.



Figur 2.4 – Formarna före gjutning vid halvskaleförsök.



Figur 2.5 – Formarna efter gjutning vid halvskaleförsök. Utrustning för parallella ringförsök skymtar på sidan till vänster om plattorna.

Formarna placerades på 3 lastceller genom vilka viktminskningen registrerades kontinuerligt. Lastcellerna var anslutna till en dator där data (med en noggrannhet av 0,001 kg) samlades in, illustrerades och analyserades i en Catman-datainsamlingsprogramvara (DAQ), producerad av HBM. Massförlusten av proverna ansågs vara lika med mängden avdunstat vatten.

Blödningstestet utfördes enligt den metod som föreslås i (EN 480-4, 2005). För varje betongrecept gjöts betong i ett cylindriskt rör omedelbart före gjutningen av plattorna (figur 2.6). Röret hade dimensionen 250 mm för både diameter och höjd. Ytan täcktes av en plastfilm för att förhindra vattenavdunstning. Vattnet som ackumulerades vid ytan uppsamlades med en pipett efter 15, 30, 45 och 60 minuter vilket analyserades för att ge värde på blödningen.



Figur 2.6 – Blödningstestsformar.

Den inre temperaturen mättes med ett antal termotrådar, som infördes i betongen direkt efter gjutning till ett djup av 400 mm. Termotrådarna anslöts till en dator via en datalogger (Spider 8), där avläsningarna samlades in och analyserades i en EasyView-programvara, producerad av Intab.

Inre temperaturutvecklingen använts för bräkning av öppethållandetid (t_{ini}) i betong, se sektion 3. Öppethållandetiden nås när hydratiseringen i betong startar, dvs. när betongtemperaturen börjar öka (Abel och Hover, 1998).

Kapillära undertrycket uppmättes i halvskaleförsöken med hjälp av Capillary Pressure Sensor System (CPSS), tillverkat av Research and Transfer Center (FTZ) vid Leipzig University of Applied Science (HTWK Leipzig). Givarens kon bör fyllas med avgasat vatten och skjuts försiktigt in i betongen till ett djup av cirka 4-5 cm. Systemet kan mäta kapillära undertrycket upp till 100 kPa (med en noggrannhet på 0,01 kPa), förutom lufttemperaturen, den omgivande RH och ljusstyrkan (dvs. solstrålning). Figur 2.7 visar givaren.

I slutet av varje experiment (24 timmar efter gjutning) bestämdes sprickbredden med ett digitalt mikroskop (Dino Lite AM-413T Pro), se figur 2.7, med en noggrannhet på 0,001 mm. Bilderna samlades in och analyserades i en programvara (DinioCapture 2.0), där sprickbredden

kvantifierades baserat på förstoringen av mikroskopet. Ett exempel på sprickbredden, mätt med detta system, visas i figur 2.8.



Figur 2.7 – Dino Lite AM-413T Pro digital mikroskop för mätning av sprickbredd.



Figur 2.8 – Exempel på sprickbredden, mätt med Dino Lite AM-413T Pro digital mikroskop.

Spricklängden mättes med ett digitalt mätjul (Scale Master Pro) med en noggrannhet på 1 mm, se figur 2.9.



Figure 2.9 – Digitalt mätjul (Scale Master Pro) för att mäta spricklängden.

För att identifiera den exakta starttiden för sprickan övervakades betongytan i halvskalaplattor kontinuerligt av tre digitalkamera, se figur 2.5.

Kapitel 3 presenterar separat testresultaten för varje omgång, där fokuset är på inre temperaturutveckling och uppsprickning i proven. Övriga resultat visas i bilaga B. Diskussion av resultaten presenteras i Kapitel 4.

3. RESULTAT

3.1 Allmänt

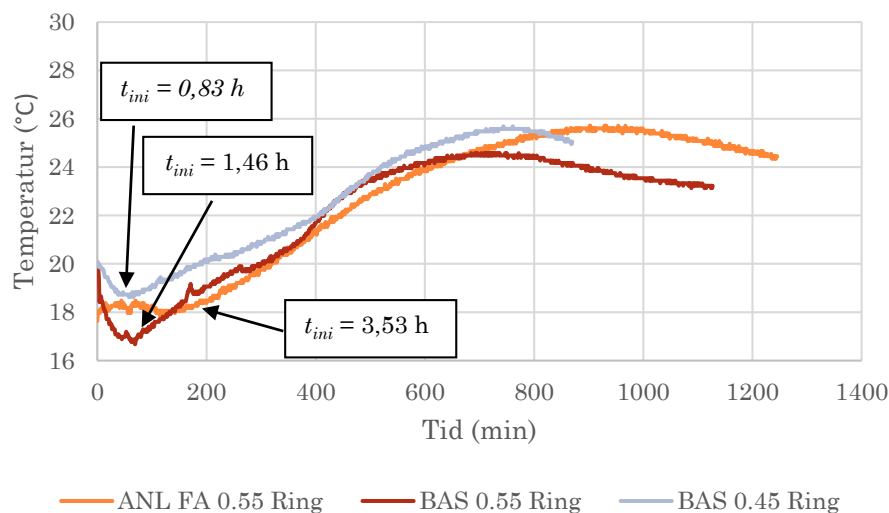
De allmänna egenskaperna hos blandningarna, inklusive flytsättningsmått, densitet, hållfasthet och lufthalt presenteras i tabell 3.1.

Tabell 3.1 - Allmänna egenskaperna hos dem testade blandningarna.

Omgång	Betong\Moment	Flytsättningsmått (mm)	Lufthalt (%)	Hållfasthet (MPa)	Densitet (kg/m ³)
I	ANL FA 0.55	670	1,3	45,9	2360
	BAS 0.55	660	1,2	50,2	2375
	BAS 0.45	710	1,0	62,5	2363
II	ANL FA 0.65	720	1,2	32,93	2317
	ANL FA 0.6	680	2,0	45,1	2362
	ANL FA 0.45	770	1,3	61,86	2386
III	ANL FA 0.45 RET	730	1,1	61,73	2363
	ANL FA 0.45 SP	705	1,1	63,13	2380
	ANL FA 0.45 ACC	705	1,1	63,23	2380

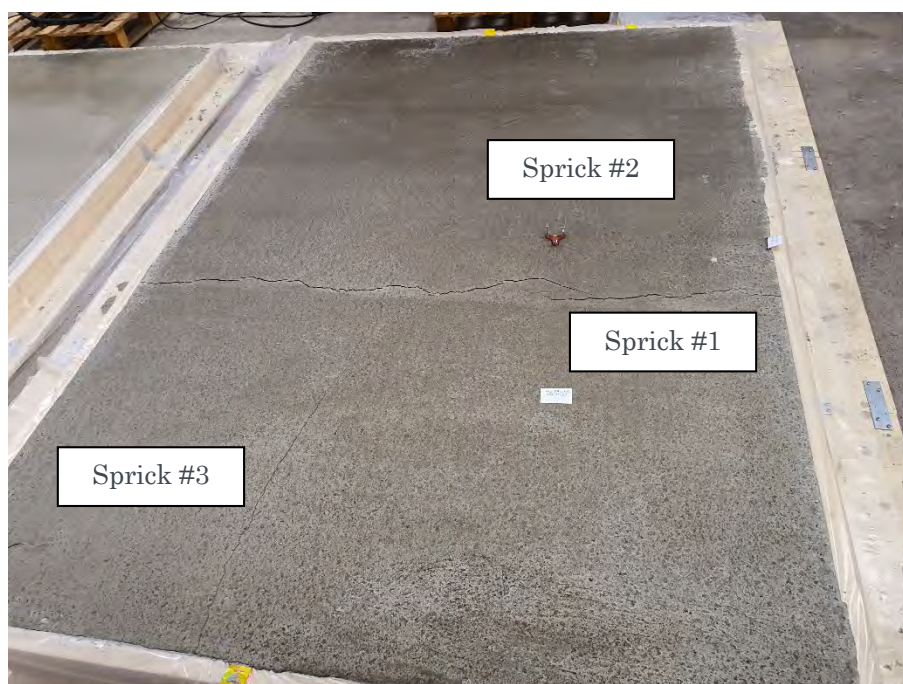
3.1.1 Omgång I - cementtyp och vattencementtal (vct)

Temperaturmätningar från betongerna på omgång I visas i figur 3.1. Det observeras att BAS 0.45 har kortare öppethållandetid, dvs. tidigare temperaturökning jämfört med BAS 0.55 som i sin tur når t_{ini} före ANL FA 0.55.

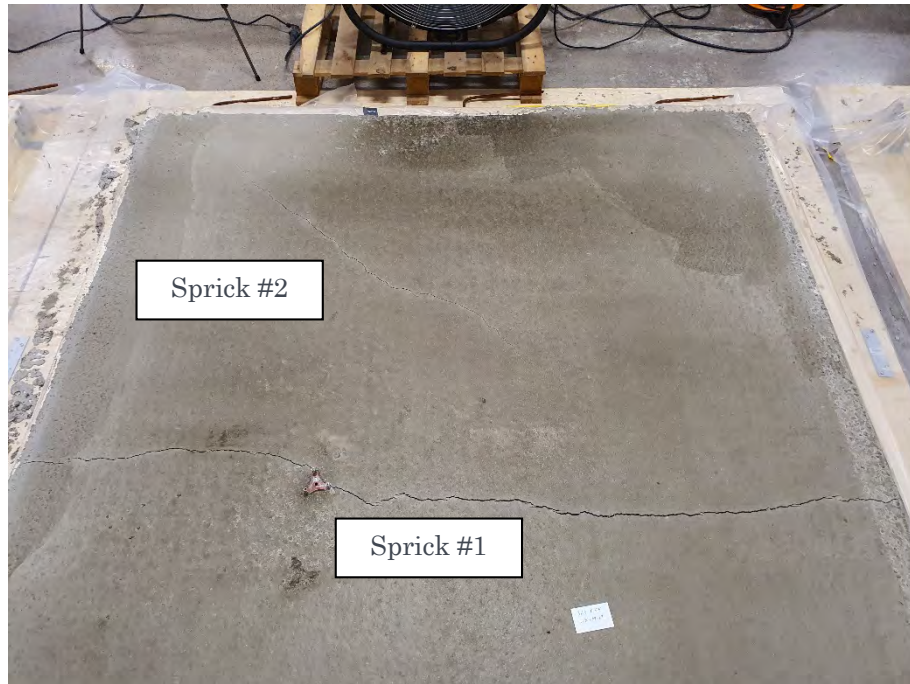


Figur 3.1 – Effekt av cementtyp på betongtemperaturen och bedömd öppethållandetid.

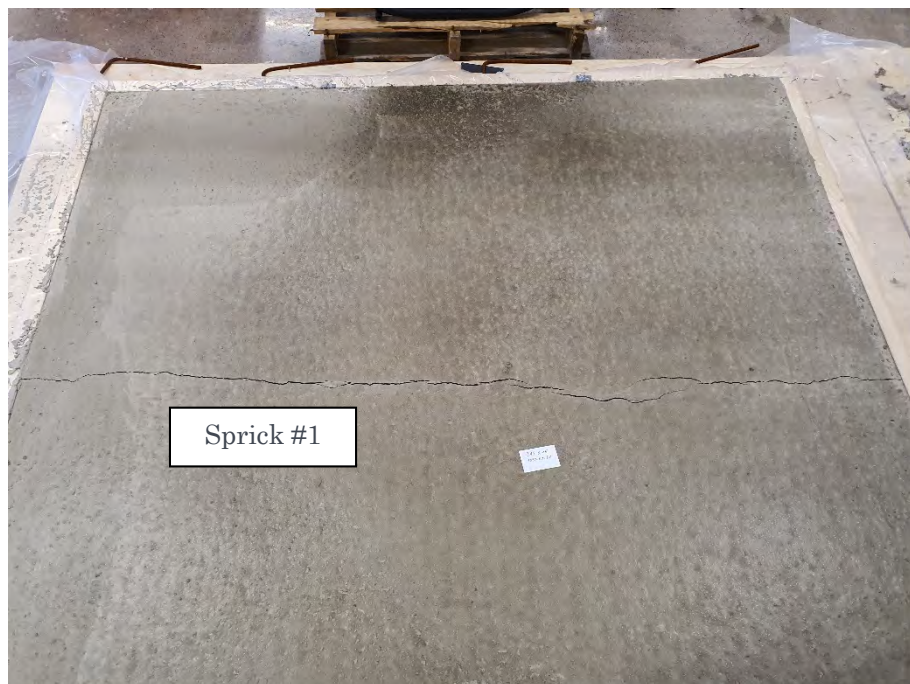
Sprickobservationer hos plattorna visas i figur 3.2a – 3.2c. Det noteras att ANL FA 0.55 har en högre uppsprickningstendens. Dessutom observeras att betongen med Bascement och 0,45 vct har mindre uppsprickningstendens jämfört med betongen med samma cement men 0,55 vct. Figur 3.3 visar motsvarande sprickor i ANL FA 0.55 i ring-test formen. Notera att inga sprickor upptäcktes i BAS 0.55 och BAS 0.45 i ring-test formarna.



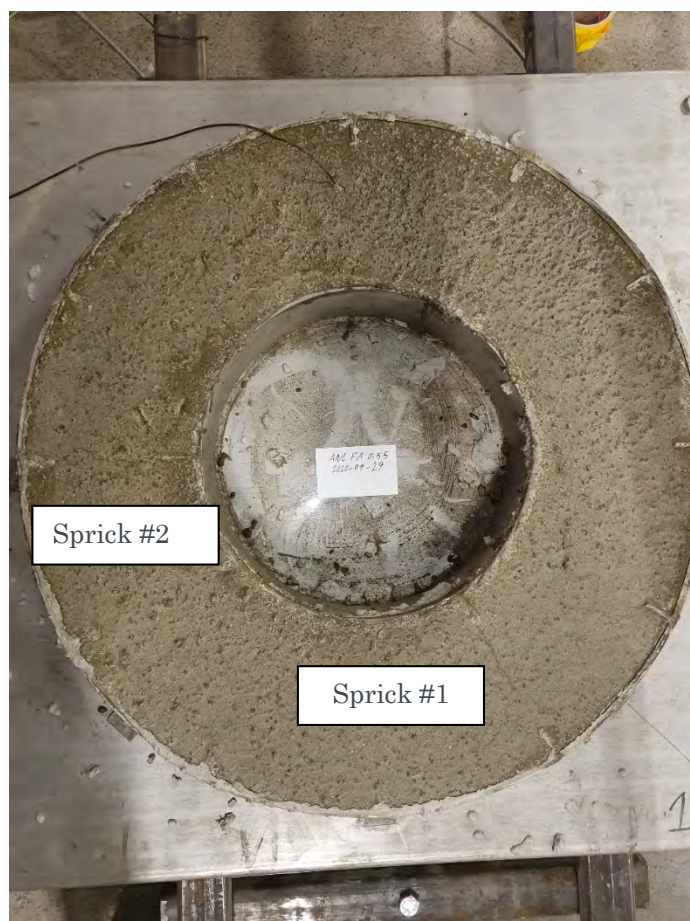
Figur 3.2a – Sprickor (3 st.) 24 timmar efter gjutningen av ANL FA 0.55 - halvskalapalattor.



Figur 3.2b – Sprickor (2 st.) 24 timmar efter gjutningen av BAS 0.55 - halvskalalattor.



Figur 3.2c – Sprick (1 st.) 24 timmar efter gjutningen av BAS 0.45 - halvskalalattor.



Figur 3.3 – Sprickor (2 st.) 24 timmar efter gjutningen av ANL FA 0.55 – ring-test form. Inga sprickor upptäcktes i BAS 0.55 och BAS 0.45 i ring-test formarna.

Tabell 3.2 visar längd, bredd och area av sprickorna i halvskalaplattorna för omgång I 24 timmar efter gjutningen. Samma uppgifter från ring-test formarna visas i tabell 3.3.

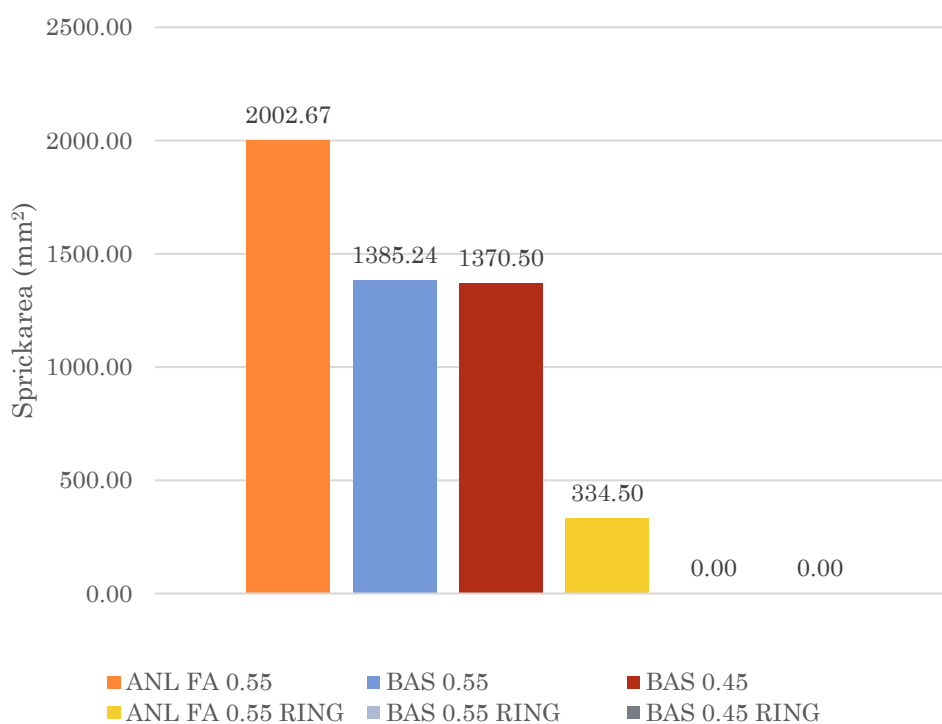
Tabell 3.2 - längd, bredd och sprickarea i halvskalaplattor omgång I 24 timmar efter gjutningen.

ANL FA 0.55	L		B		Area	
Sprick #1	2352	mm	3,879	mm	9123,41	mm ²
Sprick #2	2145	mm	0,894	mm	1917,63	mm ²
Sprick #3	1143	mm	0,853	mm	974,98	mm ²
Totalt	5640,00	mm	5,63	mm	2002,67	mm ² /m ²
BAS 0.55	L		B		Area	
Sprick #1	2087	mm	3,042	mm	6348,65	mm ²
Sprick #2	1406	mm	1,396	mm	1962,78	mm ²
Totalt	3493,00	mm	4,44	mm	1385,24	mm ² /m ²
BAS 0.45	L		B		Area	
Sprick #1	2682	mm	3,066	mm	8223,01	mm ²
Totalt	2682,00	mm	3,07	mm	1370,50	mm ² /m ²

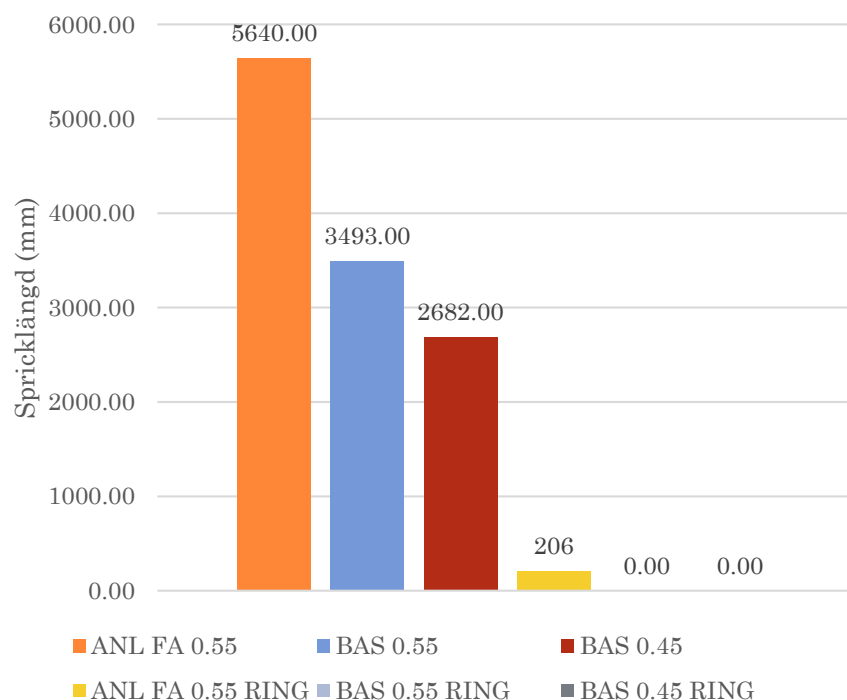
Tabell 3.3 - längd, bredd och sprickarea i ring-testformar med olika cementtyp 24 timmar efter gjutningen

ANL FA 0.55 RING	L		B		Area	
Sprick #1	131	mm	0.365	mm	47.82	mm ²
Sprick #2	75	mm	0.308	mm	23.1	mm ²
Totalt	206	mm	0.673	mm	334.50	mm ²
BAS 0.55 RING	L		B		Area	
-	0	mm	0	mm	0	mm ²
Totalt	0	mm	0	mm	0	mm ² /m ²
BAS 0.45 RING	L		B		Area	
-	0	mm	0	mm	0	mm ²
Totalt	0	mm	0	mm	0	mm ² /m ²

Figurer 3.4 och 3.5 visar påverkan av cementtyp och vct i omgång I på sprickarea och spricklängd i halvskalaförsöket.



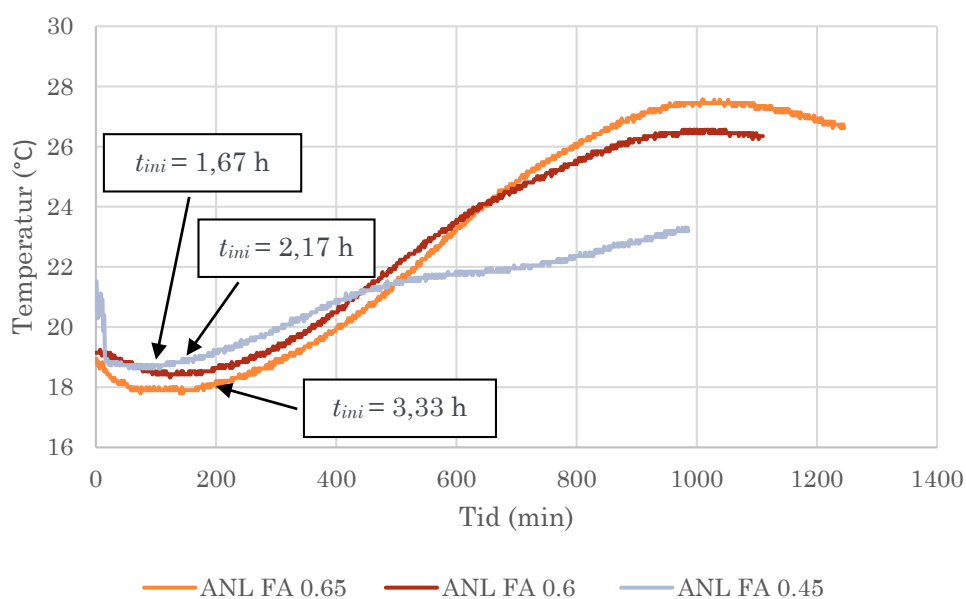
Figur 3.4 – Sprickarea i halvskalapalattor och ring-testformar 24 timmar efter gjutning – cementtyp och vct. Notera att resultat från plattförsöken och ringförsöken inte går att jämföra eftersom de har helt olika exponerade ytor.



Figur 3.5 – Spricklängd i halvskalapalattor och ring-testformar 24 timmar efter gjutning – cementtyp och vct. Notering, se figur 3.4.

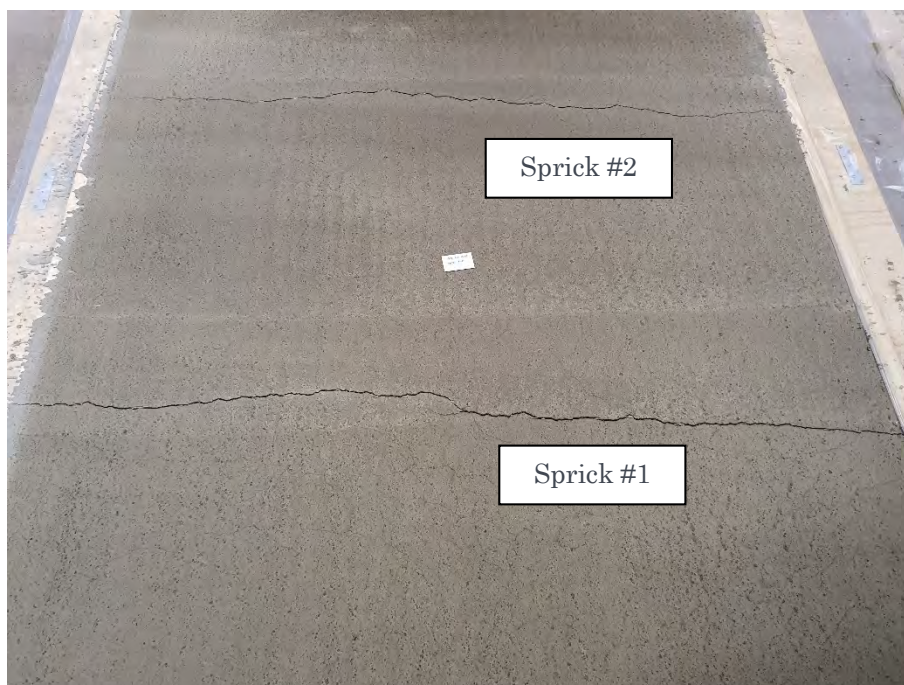
3.1.2 Omgång II - vattencementtal

Påverkan av vct på uppmätt betongtemperatur hos platta (indirekt indikerande på hydratiseringshastighet) visas i figur 3.7. Det observeras således för ANL FA 0.65, som hade långsammare temperaturutveckling, dvs. har längre öppethållandetid (t_{ini}) än de andra betongerna. Samma tendens gäller även för ANL FA 0.6 jämfört med ANL FA 0.45, och även mellan BAS 0.55 och BAS 0.45 i omgång I, se figur 3.1.

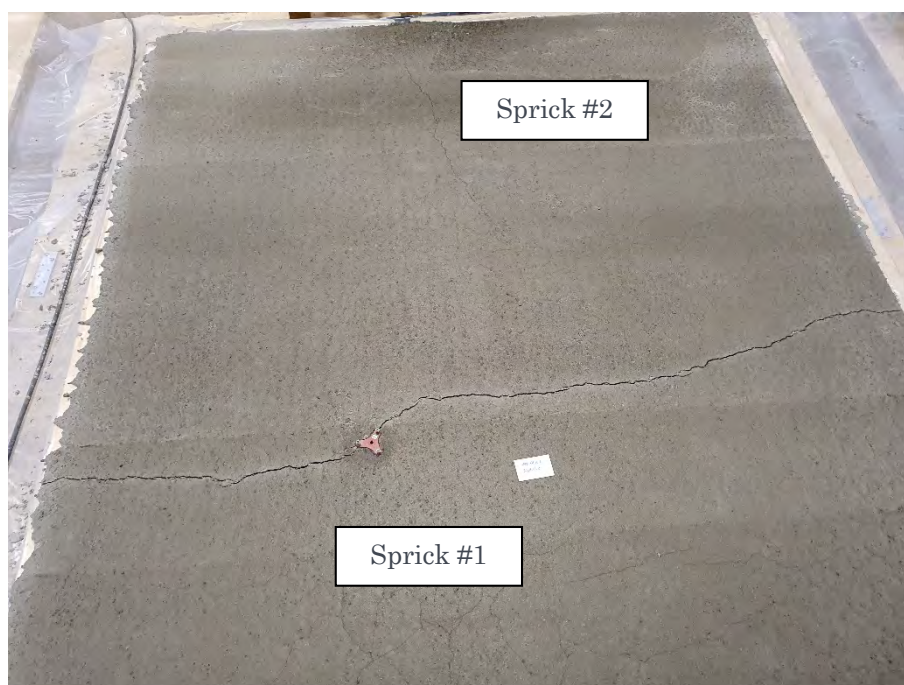


Figur 3.7 – Effekt av vct på inrebetong temperatur.

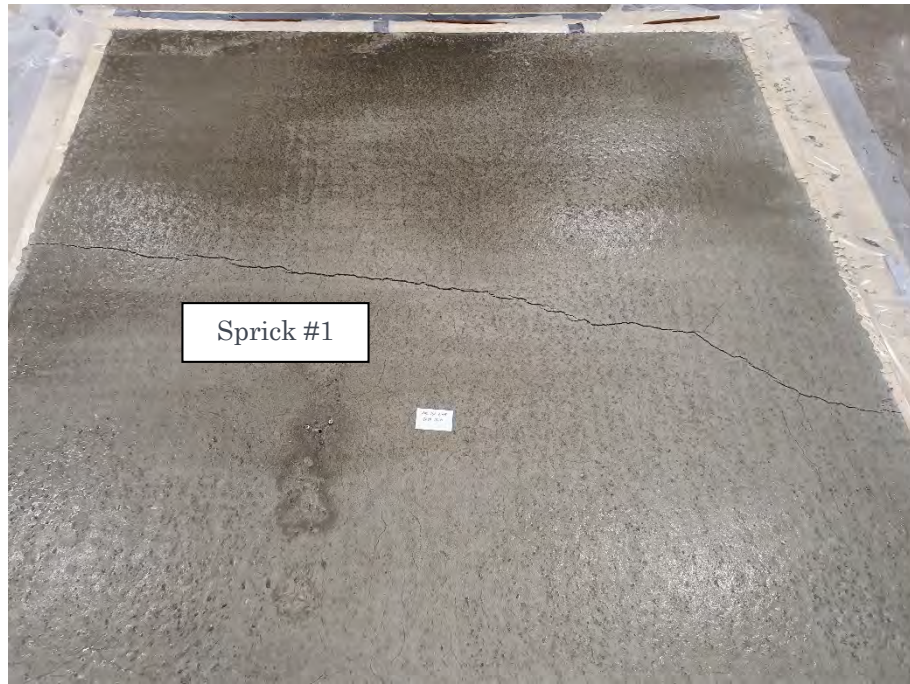
I figur 3.8a – 3.8c observeras att ANL FA 0.65 som har högre vct (med långsammare hydratationshastighet) har en högre uppsprickningstendens. Den lägsta uppsprickningstendensen upptäcktes i ANL FA 0.45. Figur 3.9 visar sprickor i ring-test formarna där ANL FA 0.65 har den högsta uppsprickningsrisken. ANL FA 0.6 och ANL FA 0.45 hamnar i andra respektive tredje plats i jämförelsen.



Figur 3.8a – Sprickor (2 st.) 24 timmar efter gjutningen av ANL FA 0.65 - halvskalapalattor.



Figur 3.8b – Sprickor (2 st.) 24 timmar efter gjutningen av ANL FA 0.6 - halvskalapalattor.



Figur 3.8c – Sprick (1 st.) 24 timmar efter gjutningen av ANL FA 0.45 - halvskalalattor.



Figur 3.9 – Sprickor 24 timmar efter gjutningen i ring-test formarna – påverkan av vct.

Sammanställning av längd, bredd och area av sprickorna i halvskalaplattorna i omgång II 24 timmar efter gjutningen ses i tabell 3.4. Tabell 3.5 visar samma uppgifter från ring-test formarna.

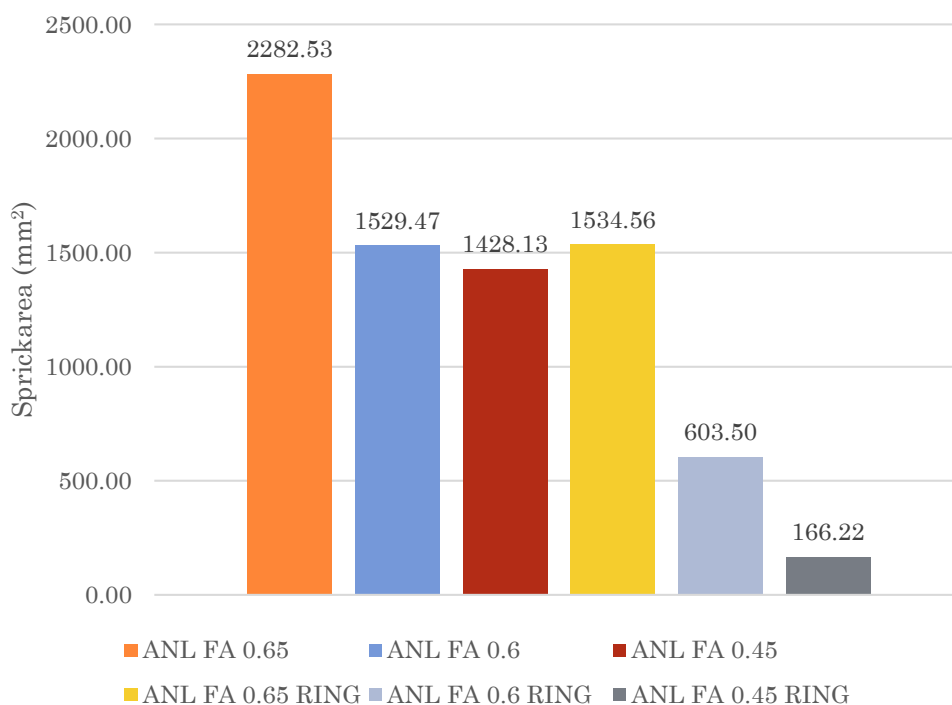
Tabell 3.4 - längd, bredd och sprickarea i halvskalaplattor omgång II 24 timmar efter gjutning.

ANL FA 0.65	L		B		Area	
Sprick #1	2127	mm	3,445	mm	7327,52	mm ²
Sprick #2	2096	mm	3,038	mm	6367,65	mm ²
Totalt	4223,00	mm	6,48	mm	2282,53	mm²/m²
ANL FA 0.6	L		B		Area	
Sprick #1	2384	mm	3,608	mm	8601,47	mm ²
Sprick #2	928	mm	0,62	mm	575,36	mm ²
Totalt	3312,00	mm	4,23	mm	1529,47	mm²/m²
ANL FA 0.45	L		B		Area	
Sprick #1	2356	mm	3,637	mm	8568,77	mm ²
Totalt	2356	mm	3,64	mm	1428,13	mm²/m²

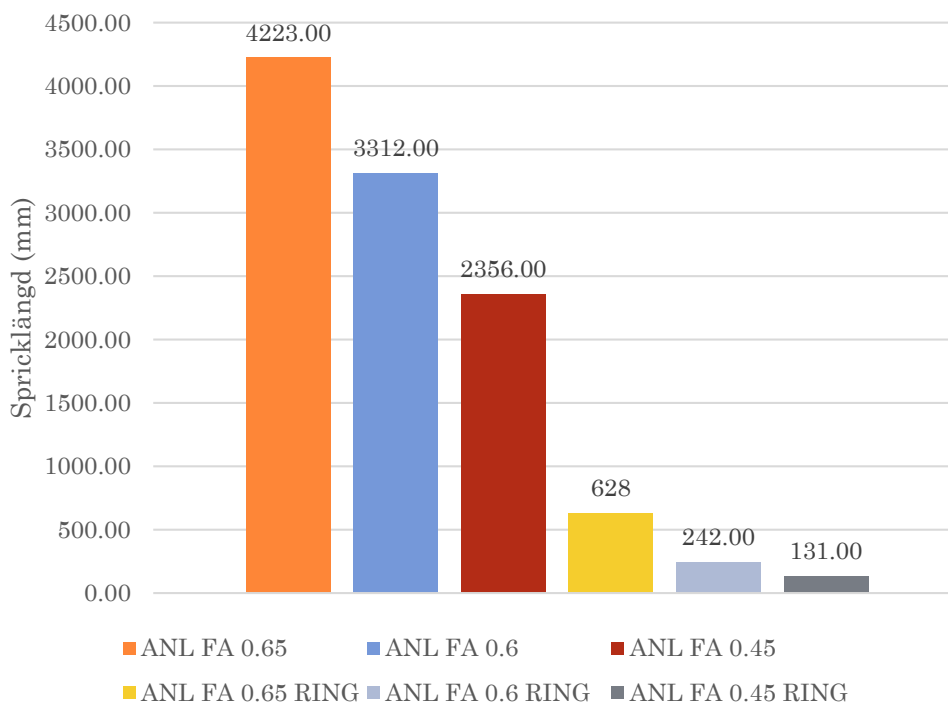
Tabell 3.5 - längd, bredd och sprickarea i ring-test formar omgång II 24 timmar efter gjutning

ANL FA 0.65 RING	L		B		Area	
Sprick #1	134	mm	0,679	mm	90,986	mm ²
Sprick #2	62	mm	0,324	mm	20,088	mm ²
Sprick #3	144	mm	0,672	mm	96,768	mm ²
Sprick #4	103	mm	0,368	mm	37,904	mm ²
Sprick #5	85	mm	0,308	mm	26,18	mm ²
Sprick #6	100	mm	0,534	mm	53,4	mm ²
Totalt	628	mm	2,885	mm	1534,56	mm²/m²
ANL FA 0.6 RING	L		B		Area	
Sprick #1	149	mm	0,619	mm	92,23	mm ²
Sprick #2	93	mm	0,384	mm	35,71	mm ²
Totalt	242,00	mm	1,00	mm	603,50	mm²/m²
ANL FA 0.45 RING	L		B		Area	
Sprick #1	131	mm	0,269	mm	35,24	mm ²
Totalt	131	mm	0,27	mm	166,22	mm²/m²

Figurer 3.10 och 3.11 visar påverkan av olika vct på sprickarea och spricklängd i halvskaleförsöket.



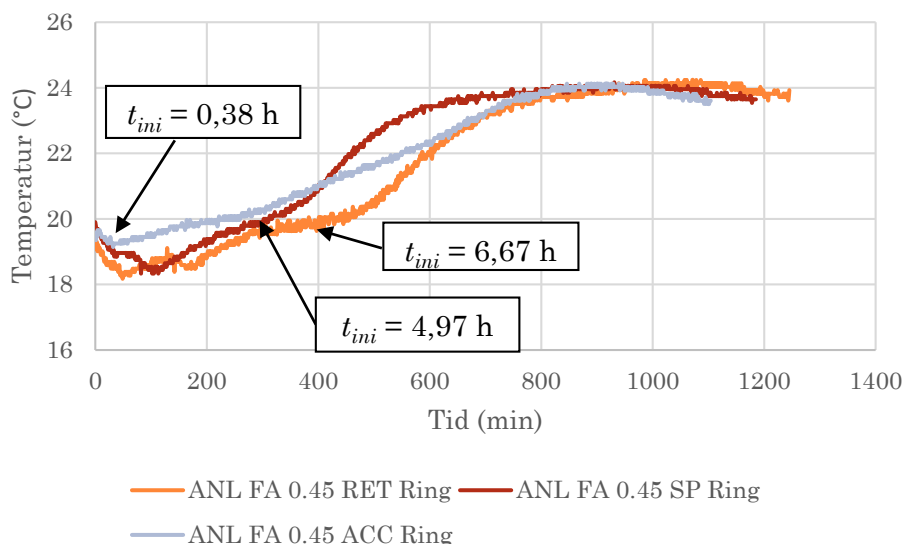
Figur 3.10 – Sprickarea i halvskalalattor och ring-testformar 24 timmar efter gjutning - vct. Notering se figur 3.4.



Figur 3.11 – Spricklängd i halvskalalattor och ring-testformar 24 timmar efter gjutning - vct. Notering se figur 3.4.

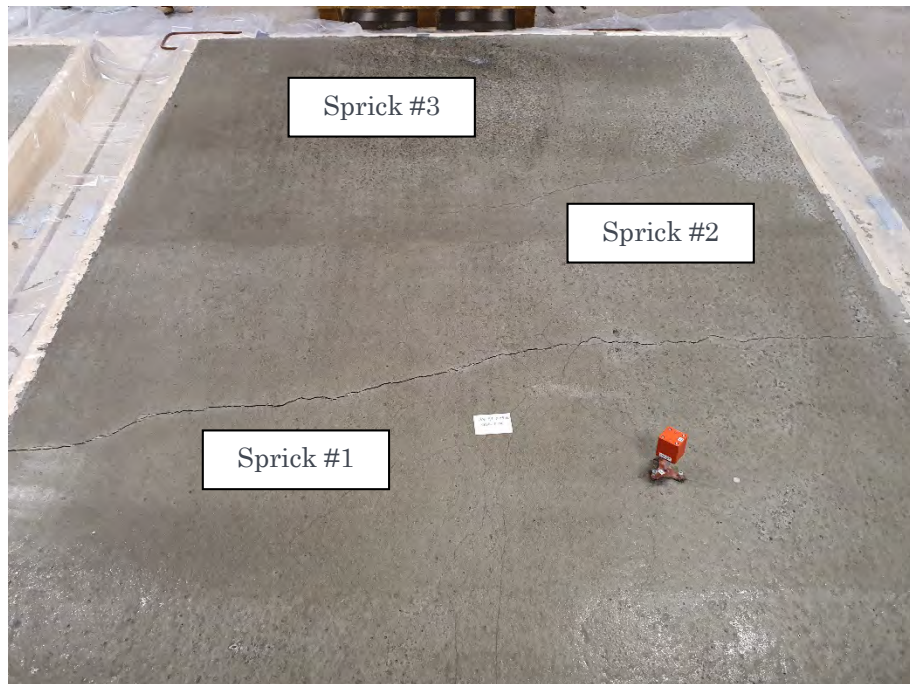
3.1.3 Omgång III - tillsatsmedel

Effekten av retarder, accelerator och flyttillsatsmedel undersöktes i ett inledande skede (se tabell 2.2). Effekten av testade tillsatsmedel på den inre temperaturen (hydratiseringshastigheten) ses i figur 3.12. Med retarder i betongen utvecklades temperaturen mycket långsammare vilket troligen leder till en långsammare draghållfasthetsutveckling. Det betyder att ANL FA 0.45 RET hade längre öppethållandetid (t_{ini}) och mindre draghållfasthet än dem andra betongerna. Detta också stämmer för ANL FA 0.45 SP jämfört med ANL FA 0.45 ACC.

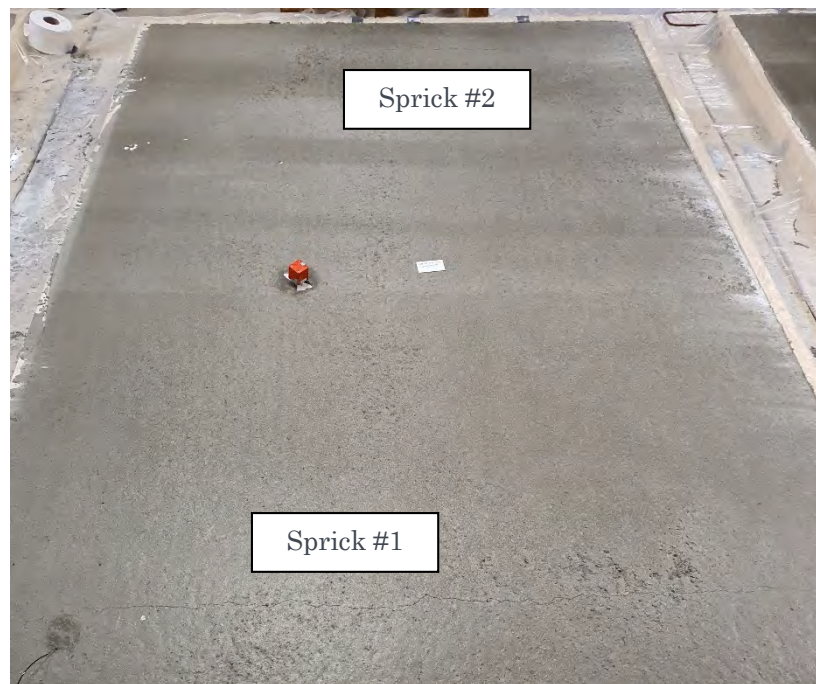


Figur 3.12 – Effekt av tillsatsmedel på inre temperaturen.

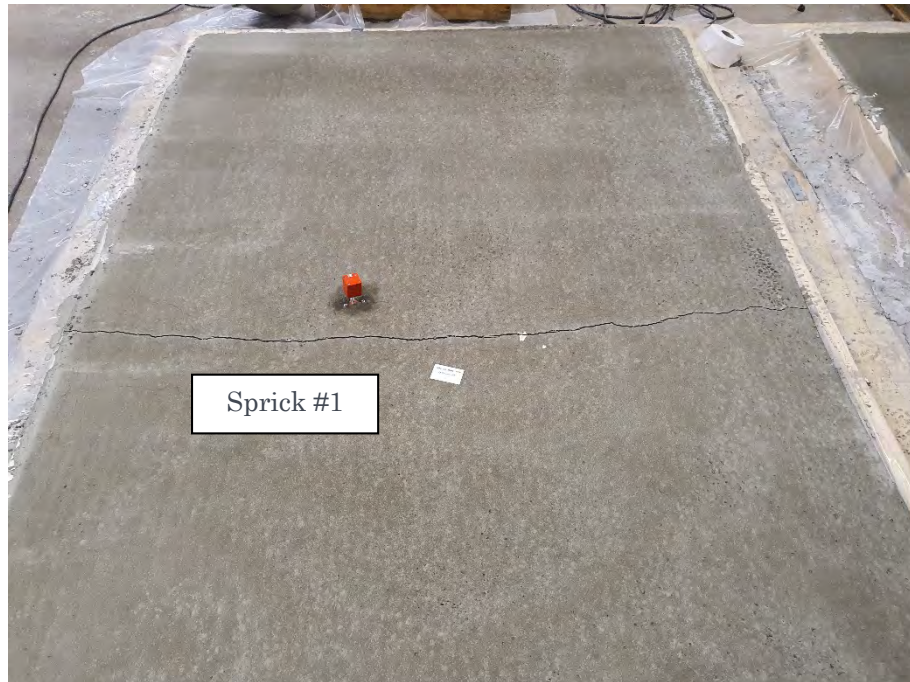
På slutet av testerna observeras att sprickarean ökades efter tillsats av retardern (se figur 3.13a – 3.13c) som tillskrivs den långsammare och försenade hydratationen hos blandningen. Den lägsta uppsprickningstendensen upptäcktes i ANL FA 0.45 ACC med bara en spricka., Denna spricka var dock mycket bredare än sprickorna i dem andra betongerna (se figur 3.15 och tabell 3.6). Figur 3.14 visar sprickor i ring-test formarna.



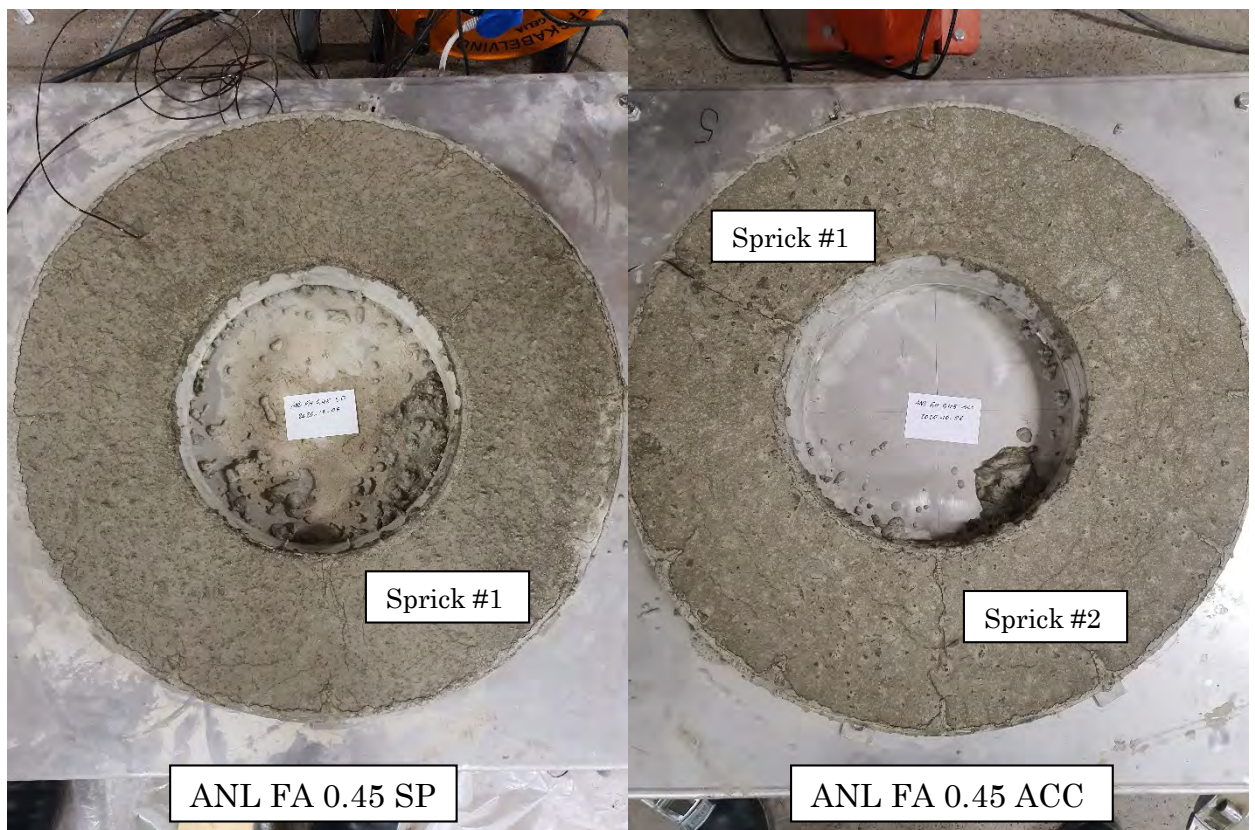
Figur 3.13a – Sprickor(3 st.) 24 timmar efter gjutningen av ANL FA 0.45 RET - halvskalalattor.



Figur 3.13b – Sprickor (2 st.) 24 timmar efter gjutningen av ANL FA 0.45 SP - halvskalalattor.



Figur 3.13c – Sprick (1 st.) 24 timmar efter gjutningen av ANL FA 0.45 ACC - halvskalaplattor.



Figur 3.14 – Sprickor 24 timmar efter gjutningen i ring-test formarna – påverkan av tillsatsmedel.

Tabell 3.6 visar effekten av testade tillsatsmedel på längd, bredd och sprickarea i halvskalaplattorna 24 timmar efter gjutningen. Samma uppgifter från ring-test formarna ses i tabell 3.7.

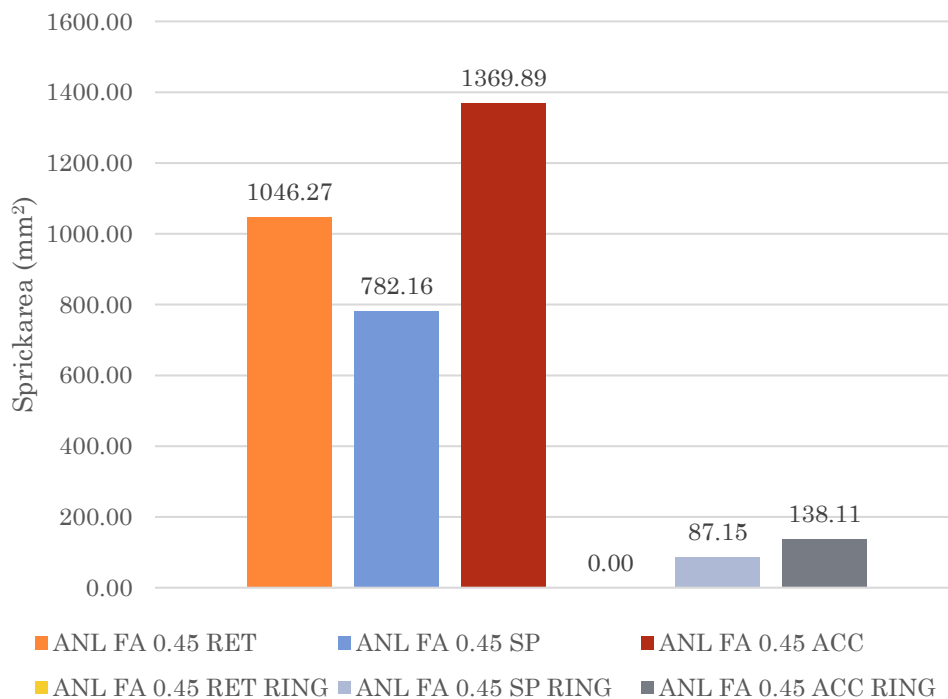
Tabell 3.6 - längd, bredd och sprickarea i halvskalaplattor med olika tillsatsmedel 24 timmar efter gjutning.

ANL FA 0.45 RET	L		B		Area	
Sprick #1	2262,00	mm	2,36	mm	5338,32	mm ²
Sprick #2	1045,00	mm	0,67	mm	703,29	mm ²
Sprick #3	2000,00		0,12		236,00	mm ²
Totalt	5307,00	mm	3,15	mm	1046,27	mm ² /m ²
ANL FA 0.45 SP	L		B		Area	
Sprick #1	2156,00	mm	1,78	mm	3833,37	mm ²
Sprick #2	1546,00	mm	0,56	mm	859,58	mm ²
Totalt	3702,00	mm	2,33	mm	782,16	mm ² /m ²
ANL FA 0.45 ACC	L		B		Area	
Sprick #1	2036,00	mm	4,04	mm	8219,33	mm ²
Totalt	2036,00	mm	4,04	mm	1369,89	mm ² /m ²

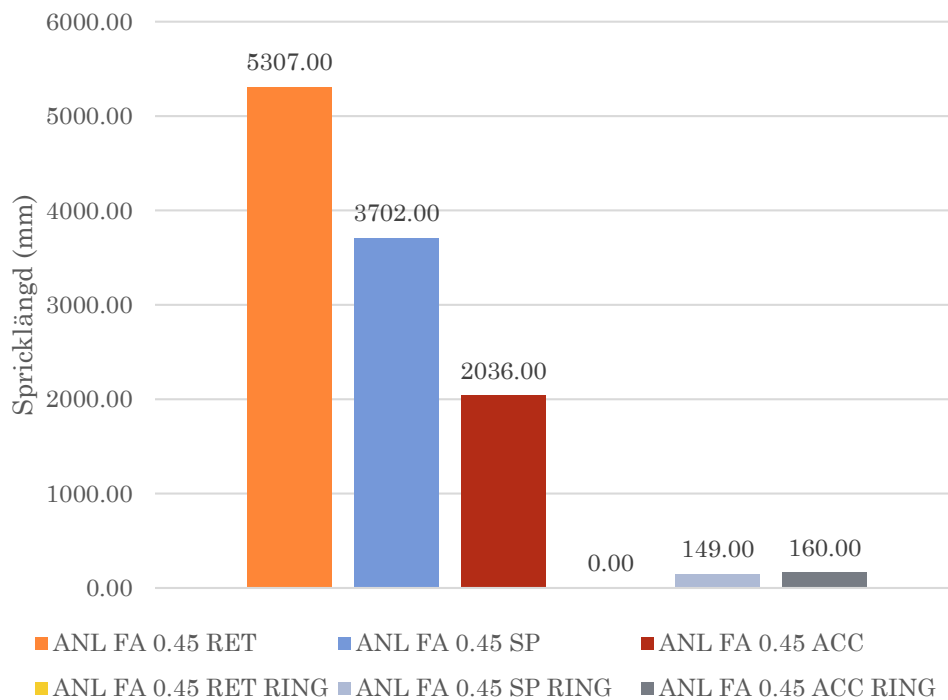
Tabell 3.7 - längd, bredd och sprickarea i ring-test formar med olika tillsatsmedel 24 timmar efter gjutning

ANL FA 0.45 RET RING	L		B		Area	
-	0	mm	0	mm	0	mm ²
Totalt	0	mm	0	mm	0	mm ² /m ²
ANL FA 0.45 SP RING	L		B		Area	
Sprick #1	149,00	mm	0,12	mm	18,48	mm ²
Totalt	149,00	mm	0,12	mm	87,15	mm ² /m ²
ANL FA 0.45 ACC RING	L		B		Area	
Sprick #1	68,00	mm	0,18	mm	12,44	mm ²
Sprick #2	92,00	mm	0,18	mm	16,84	mm ²
Totalt	160,00	mm	0,37	mm	138,11	mm ² /m ²

Figurer 3.15 och 3.16 visar påverkan av dem testade tillsatsmedlen på sprickarea och spricklängd i halvskalaförsöket. Dessutom, i den här omgången fanns ingen överensstämming mellan resultaten från halvskalaplattorna och ring-test formarna (se figurer 3.15 och 3.16).



Figur 3.15 – Sprickarea i halvskalalattor och ring-testformar 24 timmar efter gjutning - tillsatsmedel.



Figur 3.16 – Spricklängd i halvskalalattor och ring-testformar 24 timmar efter gjutning - tillsatsmedel.

4. DISKUSSION; JÄMFÖRELSE MED MODELL

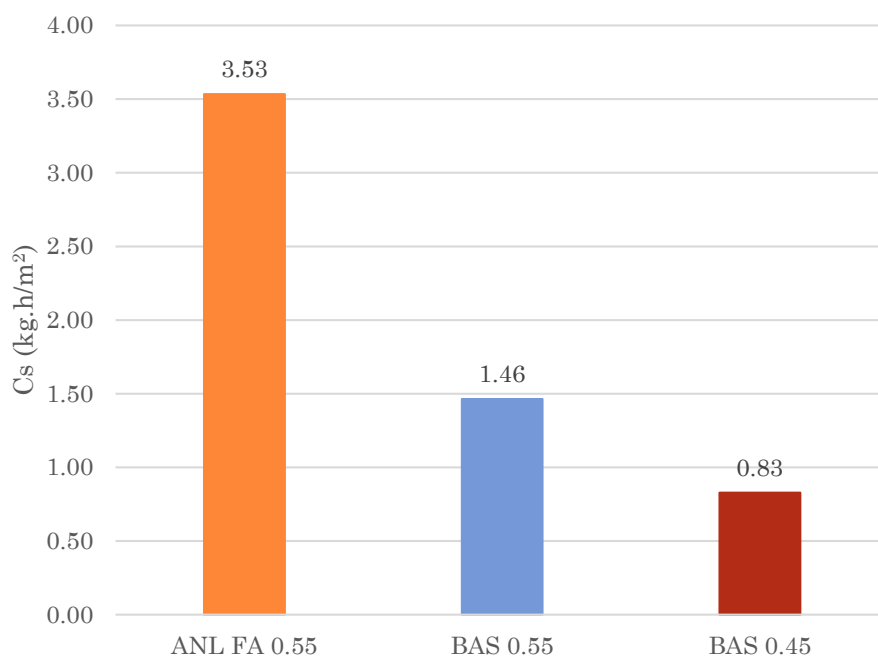
4.1.1 Omgång I - cementtyp och vattencementtal

Långsammare hydratation av betong leder till en långsammare draghållfasthetsutveckling (Sayahi, 2019). Dessutom har det observerats att finare cement i allmänhet accelererar hydratiseringshastigheten (Dellinghausen, et al., 2012).

Baserad på testresultaten från omgång I, noteras att ANL FA 0.55 som innehållande mer grovmalet cement innebärande långsamma hydrationshastighet har en högre uppsprickningstendens. Samma fenomen leder till mindre uppsprickningsrisk i BAS 0.55 och BAS 0.45 som innehåller mindre partiklar (dvs. snabbare hydrationshastighet) jämfört med anläggningscement FA, se tabell 2.3.

Dessutom, skillnaden mellan hydrationshastigheten av de två cementtyper är också relateras till olika mängd C_3A där högre mängd C_3A i cement ökar hydrationshastigheten (Ghourchian, et al, 2018), se tabell 2.3.

Det verkar som att tendens för beräkningarna med modellen, se figur 4.1, överensstämmer bättre med tendenser för uppmätta spricklängder än mätningar av sprickarea, se figur 3.5 respektive figur 3.4. Input till modellen visas i tabell 4.1 som är de uppmätta materialtesterna i försöken för respektive betong.



Figur 4.1 – Uppsprickningstendens (C_s) av betonger med olika cementtyp beräknad baserad på modellen.

Tabell 4.1 – Input i modellen – omgång I – cementtyp och vct, samt beräknad spricktendens.

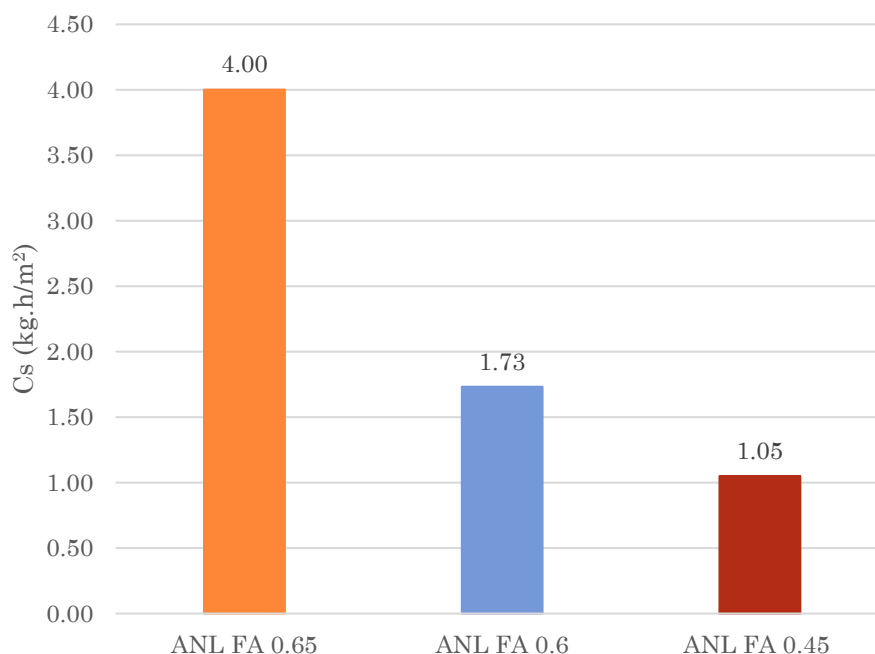
MODELL	Avdunstning (kg/m ² .h)	Blödning (kg/m ²)*	t _{ini} (h)	C _s (kg.h/m ²)
ANL FA 0.55	0,34	0,064	3,33	3,53
BAS 0.55	0,34	0,00	2,08	1,46
BAS 0.45	0,34	0,00	1,57	0,83
	T _{luft} (°C)	T _{betong} (°C)	RF. (%)	Vind (km/h)
	22	22	67	16,20

* För tidsberoende blödningsresultat se bilaga B.

4.1.2 Omgång II – vattencementtal

Med högre vct utvecklas temperaturen i betongen långsammare, vilket leder till en långsammare draghållfasthetsutveckling i mycket tidig skede (Esping & Löfgren, 2005). Dessutom påverkas öppethållandetiden. Den särskilt högre sprickarean hos betongen med vct på 0,65 var relaterat till dess relativt långa öppethållandetid, se figur 3.7.

Beräkningar av modellen presenteras i figur 4.2 som överensstämmer med testresultaten, se figurer 3.10 och 3.11. Input i modellen visas i tabell 4.2.



Figur 4.2 – Uppsprickningstendens (C_s) av betonger med olika vct beräknad baserad på modellen.

Tabell 4.2 – Input i modellen – omgång II – vct, samt beräknad spricktendens.

MODELL	Avdunstning (kg/m ² .h)	Blödning (kg/m ²)*	t _{ini} (h)	C _s (kg.h/m ²)
ANL FA 0.65	0,38	0,06	3,33	4,00
ANL FA 0.6	0,38	0,02	2,17	1,73
ANL FA 0.45	0,38	0,00	1,67	1,05
	T _{luft} (°C)	T _{betong} (°C)	RF. (%)	Vind (km/h)
	22	22	63	16

* För tidsberoende blödningsresultat se bilaga B.

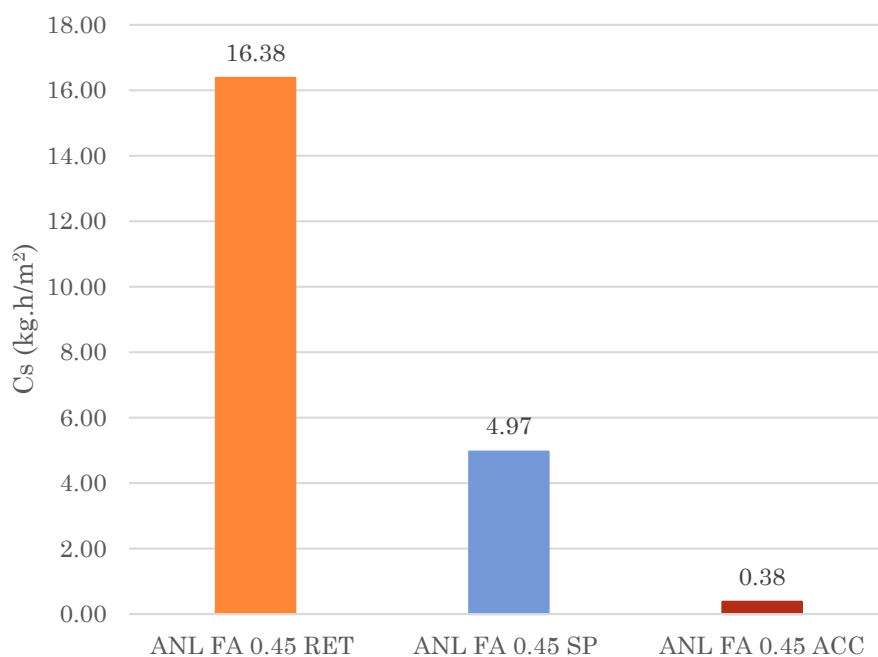
4.1.3 Omgång III – tillsatsmedel

Sprickarean ökades efter tillsats av retardern som tillskrivs den långsamma och försenade hydratationen hos blandningen, se figur 3.12. Följaktligen provet förmodligen hade en låg draghållfasthet under en betydligt längre tid, vilket enkelt överskreds av dragspänningarna.

Acceleratorn orsakade den största och den minsta sprickarean respektive spricklängd bland alla testade betonger, se figurer 3.15 och 3.16. Detta kan relateras till den troligen större autogen krympning hos ANL FA 0.45 ACC (orsakad av den snabbare hydratationen), som senare vidgar den smala plastiska krympsprickan i tidig ålder.

Ökningen av uppsprickningstendens med högre SP-dosering orsakas mest troligt av den fördröjande effekten av ett flyttillsatsmedel, som förlängde öppethållandetiden hos blandningen. Genom att öka SP-dosen minskade hydratationshastigheten gradvis, se figur 3.12, dvs. betongen erhöll troligen en långsammare utveckling av draghållfasthet.

Beräkningar av modellen överensstämmer bara med spricklängdresultaten och inte med sprickarea, se figur 4.3. Input i modellen visas i tabell 4.3.



Figur 4.3 – Uppsprickningstendens (C_s) av betonger med olika tillsatsmedel beräknad baserad på modellen.

Tabell 4.3 – Input i modellen – Omgång III - tillsatsmedel samt beräknad spricktendens.

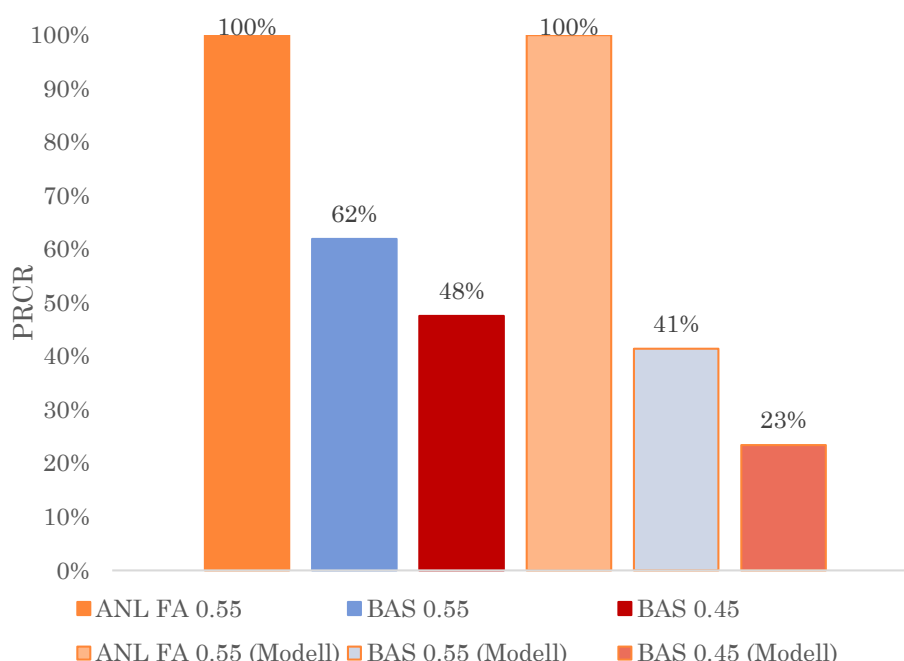
MODELL	Avdunstning (kg/m ² .h)	Blödning (kg/m ²)*	t_{ini} (h)	C_s (kg.h/m ²)
ANL FA 0.45 RET	0,38	0,06	6,67	16,38
ANL FA 0.45 SP	0,38	0,02	3,65	4,97
ANL FA 0.45 ACC	0,38	0,00	1,00	0,38
	T_{luft} (°C)	T_{betong} (°C)	RF. (%)	Vind (km/h)
	22	22	62	16

* För tidsberoende blödningsresultat se bilaga B.

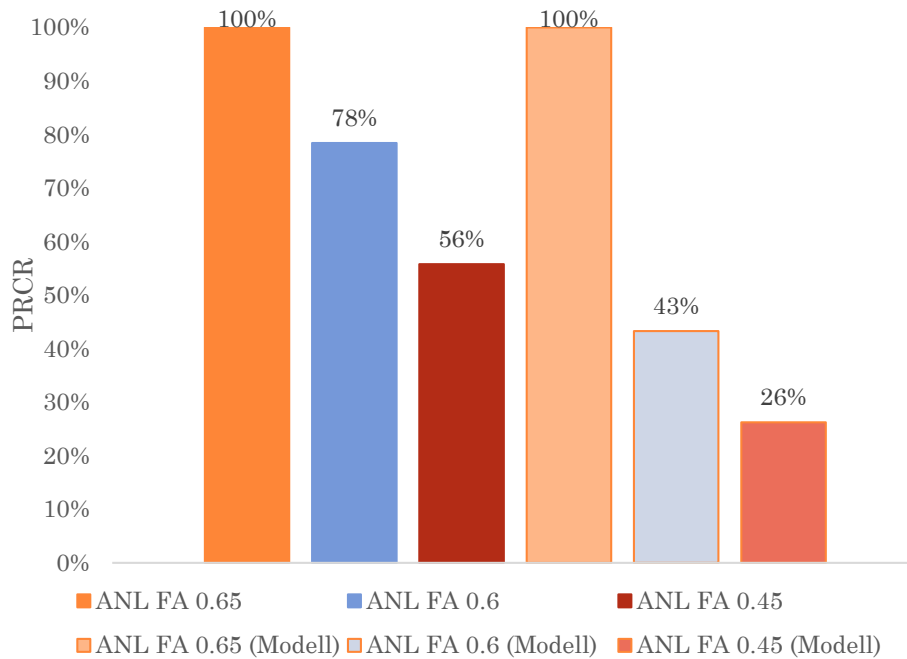
4.1.4 Procentuell minskning av uppsprickningsrisk, PRCR

Figur 4.4 till 4.6 visar procentuell minskning av uppsprickningsrisken (PRCR) i betongerna baserad på spricklängdsresultat och modell, jämfört med provet som hade högsta uppsprickningstendens i varje kategori (dvs. spricklängd och modell).

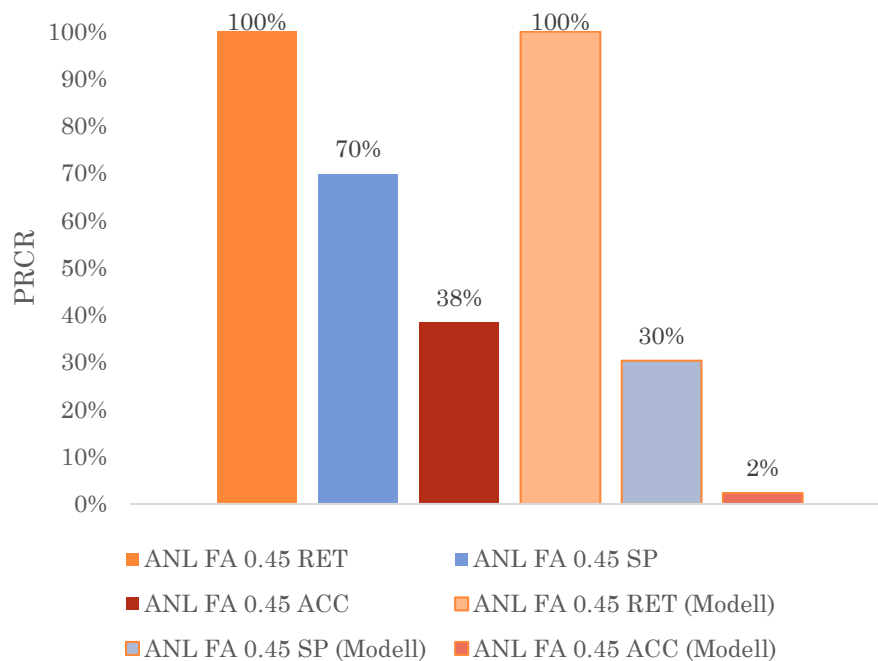
Det verkar att medan PRCR inte stämmer mellan dem två kategorierna men modellen kan uppskatta trenden för uppsprickningsriskminskning. Denna skillnad kan relateras till formegenskaper/tvång eftersom modellen inte tar hänsyn till gjutformens förhållanden.



Figur 4.4 – PRCR (procentuell minskning av uppsprickningsrisken) av betonger med olika cementtyp beräknad baserad på minskning av spricklängdsresultat och modellen. ANL FA 0.55 och ANL FA 0.55 (modell) antas som referens för spricklängd respektive modell.



Figur 4.5 – PRCR av betonger med olika vct beräknad baserad på minskning av spricklängd och modellen. ANL FA 0.65 och ANL FA 0.65 (Modell) antas som referens för spricklängd respektive modell.

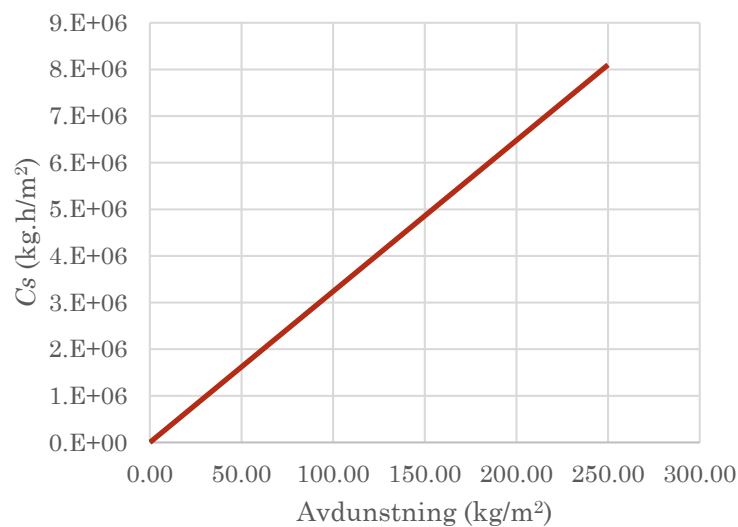


Figur 4.6 – PRCR av betonger med olika tillsatsmedel beräknad baserad på minskning av spricklängd och modellen. ANL FA 0.45 RET och ANL FA 0.45 RET (Modell) antas som referens för spricklängd respektive modell.

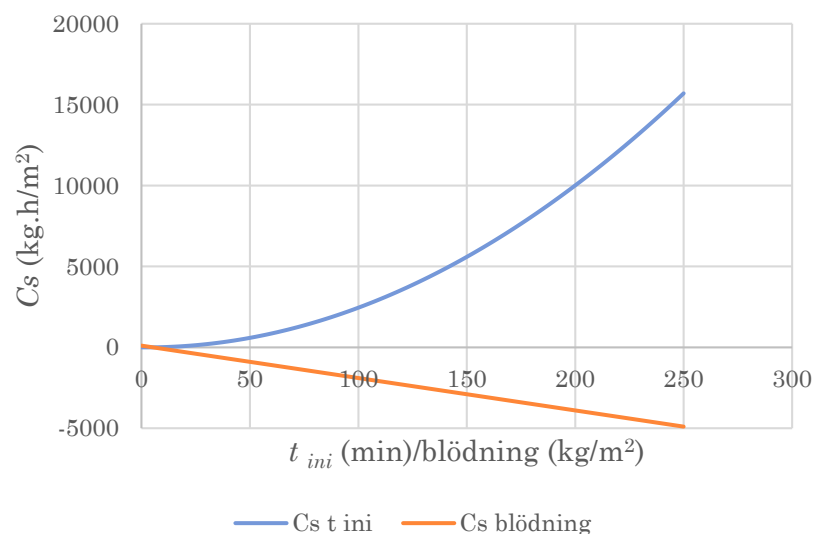
5. KÄNSLIGHETSANALYS

Känslighetsanalys av modellen visade att den är mycket känslig för mindre förändringar av avdunstning, följt av t_{ini} och blödning, se figur 5.1 och 5.2. Notera att intervallerna för avdunstning och blödning ($0 - 250 \text{ kg/m}^2$) utvidgas avsiktligt för att matcha det med t_{ini} . Normala intervall för dessa värden ligger i verkligheten mellan 0 och ungefär 6 till 7 kg/m^2 .

Eftersom avdunstning är en funktion av de omgivande förhållandena fokuserar vi på de andra två modellkomponenterna (dvs. t_{ini} och blödning) för att de kan ändras genom att modifiera betongens recept. Figur 5.1 visar att öppethållandetiden påverkar C_s nästan 3 gånger mer än blödningen vilket innebär att t_{ini} är den viktigaste parametern som ska förändras för att minska uppsprickningsrisken i färskbetong. Detta är särskilt viktigt vid gjutning av betong med hög cementhalt och låg permeabilitet såsom SKB (testat i detta projekt).



Figur 5.1 – Modellens känslighet för avdunstning. Blödning = 1 kg/m^2 och $t_{ini} = 180 \text{ min}$.



Figur 5.2 – Modellens känslighet för t_{ini} och blödning. För beräkning av C_s t_{ini} , blödning = 1 kg/m^2 . För beräkning av C_s blödning, $t_{ini} = 180 \text{ min}$. Avdunstning (E) = 0.26 kg/m^2 för båda kurvorna.

6. SLUTSATSER

I detta projekt testades modellen på SKB med olika cementtyp, vct och tillsatsmedel i lab- (ring-test form) och halvskalaförsök (halvskalaplattor). Baserat på resultaten från det projektet kan följande slutsatser listas:

- Modellen kan jämföra uppsprickningstendensen hos olika betongrecept och uppskatta korrekt den trenden för uppsprickningsriskändring.
- Medan modellen stämmer delvis med sprickareassresultaten, den verkar att uppskatta bättre spricklängdsresultaten, dvs. antal sprickor. Skillnaden mellan modellen och spricklängdsresultaten är orsakad av olika formensegenskaper, dvs. tvång.
- Tillsatsmedlen som testats i denna forskning kan ändra sprickmekanismen genom att förändra betongens deformation.
- Cement med grova partiklar, mindre mängd C₃A, dvs. långsammare hydratation, kan öka uppsprickningsgraden.
- Att höja doseringen av SP, ökar risken för sprickbildning.
- Retarder förlänger betongens öppethållandetid och ökar uppsprickningstendensen. Dock, medan accelerator ökar sprickarean antal sprickor är mindre än retarder och extra flyttmedel.

7. REKOMMENDATIONER

Baserad på ovanstående och baserat på erfarenheter från tidigare doktorandprojekt rekommenderar vi att:

- Modellen är möjlig att använd för på förhand identifiera den betongen med minst uppsprickningstendens.
- Försök att förkorta öppethållandetiden, hindra avdunstning och öka blödningen i betongen.
- Använd Betong med vct mellan 0,45 och 0,55 för att minska uppsprickningsrisken, speciellt för applikationer och gjutförhållanden där plastisk sprickbildning kan vara kritiskt, dvs. när bl a stor avdunstning

Om möjlighet fås att utföra del II av projekt kan rekommendationerna bli mer omfattande.

REFERENSER

ACI 305R, "*Hot Weather Concreting*", ACI Manual of Construction Practice, Part 2, Farmington Hills: American Concrete Institute International, 1999.

ASTM C 1579, "*Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete (using a steel form insert)*". American Society for Testing and Materials, USA, 2006.

Bertelsen I.M.G., Ottosen, L.M., Fischer G., "*Quantitative analysis of the influence of synthetic fibres on plastic shrinkage cracking using digital image correlation*" Construction and Building Materials, 199, 2019, pp. 124–137.

Boshoff, W.P. and Combrinck, R., "*Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete*". Journal of Cement and Concrete Research, Vol. 48, 2013, pp. 34-39.

Carlswärd, J., Emborg, M., "*Shrinkage cracking of thin concrete overlays*", Nordic Concrete Research, Vol. 2014/1, No 49.

Dellinghausen, L.m., Gastaldini, A.L.G., "*Total shrinkage, oxygen permability, and Chloride ion penetration in concrete made with white Portland cement and blast-furnace slag*" Construction and building materials, Vol. 37, 2012, pp. 652-659.

Emborg, M., Carlsson, C.A., Jonasson, J.E., "*Tidig egenskapstillväxt och hårdnande betong*". Ch 9 in Swedish Concrete Handbook - Material, part1, Svensk Byggtjänst, pp 329 - 390 (in Swedish).

EN 197-1, "*Cement: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*", Br. Stand. Inst. London. 2000.

ERMCO Statistics 2017, "*Ready mixed concrete industry statistics - year 2017*". European ready mixed concrete organization, June 2018.

Esping, O. and Löfgren, I., "*Cracking due to plastic and autogenous shrinkage-Investigation of early age deformation of self-compacting concrete-Experimental study*", Technical report, Chalmers University of Technology, Sweden, 2005.

Ghourchian, S., Wyrzykowski, M., Baquerizo, L., Lura, P., (2018) "*Susceptibility of Portland cement and blended cement concretes to plastic shrinkage cracking*", Cem. Concr. Compos. 85, 44–55.

Gram, H.E. and Piiparinen, P., "*Properties of SCC: Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance*". In: Skarendahl, Å., Petersson, Ö. (eds.) Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete, Stockholm, RILEM Publications S.A.R.L., Bagnaux, 2019, pp. 211-225.

Hammer, T., "*Test methods for linear measurement of autogenous shrinkage before setting*". Autogenous Shrinkage of Concrete, (Ed. Tazawa) E & FN Spon, London, 1999, pp. 143-154.

Hedlund, H., "*Hardening Concrete: Measurements and Evaluation of Non-Elastic Deformation and Associated Restraint Stresses*". PhD Thesis. LTU, Luleå, Sweden, 2000.

- Johansen, R. and Dahl, P., "*Control of plastic shrinkage of cement*", Proceedings of the 18th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore 1993.
- Jonasson J-E. "*Modelling of Temperature, Moisture and Stresses in Young Concrete*". Luleå, 1994. Luleå University of Technology, Div. of Structural Engineering, Doctoral Thesis. (1994)
- Josserand, L., Coussy, O. and De Larrard, F., "*Bleeding of concrete as an ageing consolidation process*". Journal of Cement and Concrete Research, Vol. 36(9), 2006, pp. 1603-1608.
- Kronlöf, A., Leivo, M. and Sipari, P., "*Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar*". Journal of Cement and Concrete Research, Vol. 25(8), 1995, pp. 1747-1754.
- Kwak, H.-G. & Ha, S.-J. "Plastic shrinkage cracking in concrete slabs. Part I: a numerical model", Mag. Concr. Res. 58 (2006) 505–516.
- Lerch, W., "*Plastic Shrinkage*" ACI Journal, Vol. 53(8), Feb. 1957, pp. 797-802.
- Lund, A., Skoog, M. and Thorstensson, R., "*Plastiska Krympsprickor i Betong*", Department of Structural Mechanics and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1997
- Lura, P., Pease, B., Mazzotta, G.B., Rajabipour, F. and Weiss, J., "*Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks*". ACI Materials Journal, Vol. 104(2), 2007.
- Mora-Ruacho, J., Gettu, R., Aguado, A., "*Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete*" Cement and Concrete Research, 39, 2009, pp. 141–146.
- Morris, P. and Dux, P., "*Analytical solutions for bleeding of concrete due to consolidation*". Journal of Cement and Concrete Research, Vol 40(10), 2010, pp. 1531-1540.
- Powers, T.C., "*The properties of fresh concrete*", 301, John Wiley and Sons, Inc, N. Y., 1968.
- Qi, C., Weiss, J. and Olek, J., "*Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function*". Journal of Materials and Structures, Vol. 36(6), 2003, pp. 386-395.
- Radocea, A., "*A study on the mechanism of plastic shrinkage of cement-based materials*". Chalmers University of Technology, Sweden, 1992.
- Ravina, D. and Shalon, R., "*Plastic shrinkage cracking*", ACI Journal, Proceeding April 1968, pp. 282-291.
- Sayahi, F., "*Plastic Shrinkage Cracking in Concrete: Mitigation and Modelling*", Doctoral thesis, Luleå University of Technology, 2019.
- Sayahi, F., Emborg, M., Hedlund, H. and Löfgren, L., "*Plastic Shrinkage Cracking in Self-Compacting Concrete: A Parametric Study*", International RILEM conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering, MSSCE 2016, 22-24 August 2016, Lyngby, Denmark, pp. 609-619.

Schmidt, M. and Slowik, V., "*Instrumentation for Optimizing Concrete Curing*". Concrete International, Vol. 35(8), 2013.

Tuutti, K. (1982). "*Corrosion of steel in concrete*". Stockholm, Sweden: Swedish Cement and Concrete Institute, PhD thesis, Report Fo 4.82, 468 p.p.

Uno, P.J., "*Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas*". ACI Materials Journal, Vol. 95, 1998, pp. 365-375.

BILAGA A

Modellen

Baserat på förhållandet mellan avdunstning (E), blödning (B) och öppet hållningstid, t_{ini} , föreslogs följande modell för att uppskatta risken för plastiska krympsprickor:

$$C_s = W_p \times t_{ini} \quad , \quad t = t_{ini} \quad (A.1)$$

eller

$$C_s = (E - B) \times t_{ini} \quad , \quad t = t_{ini} \quad (A.2)$$

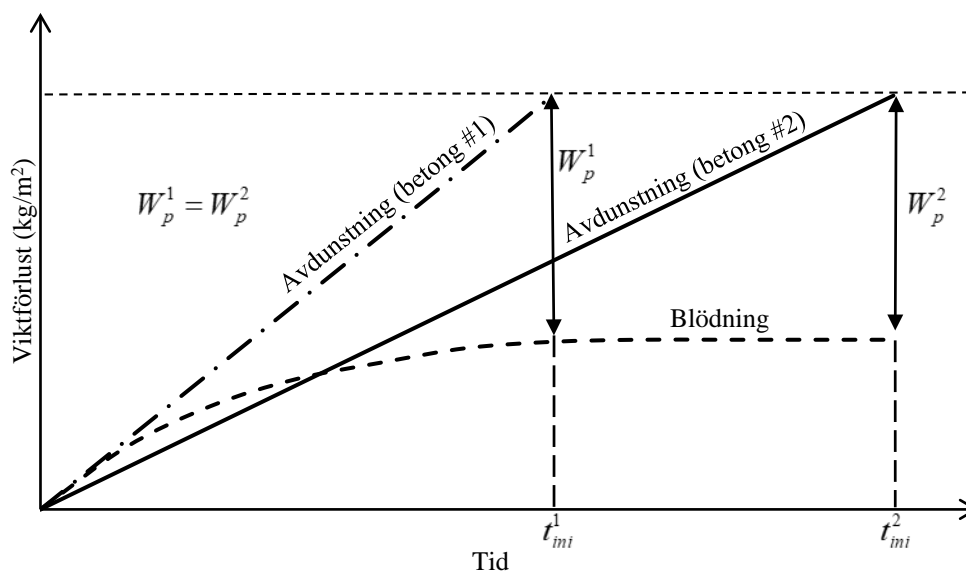
$W_p(t)$ = vatten som avdunstar från betongen vid tiden t , [kg/m^2],

$E(t)$ = det totala avdunstade vattnet vid tiden t , [kg/m^2],

$B(t)$ = det totala blödningen vid tiden t , [kg/m^2], och,

t_{ini} = öppet hållningstid, [h].

Ekvation (A.2) är en utvidgad version av den modell som föreslagits av Boshoff och Combrinck (2013), genom tillägget av effekten av öppet hållningstiden. I Boshoffs och Combrincks modell bestämdes mängden av det förångade vattnet, E , genom att multiplicera avdunstningshastigheten med öppet hållningstiden. Skillnaden i uppsprickningsgraden hos betonger med samma W_p , men olika öppet hållningstider, se figur A.1, inte möjlig att förklara baserad på Boshoff och Combrincks modell. Detta beaktas i den nya modellen genom att multiplicera den totala W_p med t_{ini} . Följaktligen, i figur A.1, är den andra betongen mer benägna att spricka av plastisk krympning jämfört med den första genom en annat värde på t_{ini} .



Figur A.1 – Betonger med lika W_p , men olika t_{ini} som kommer att ge olika risker för plastisk sprickbildning i den föreslagna modellen.

Avdunstningsvärdet kan uppskattas enligt antingen Unos formel (1998) eller ACI-nomografen (1999). Blödningen kan förutsägas baserat på flera modeller som har föreslagits för att simulera blödningen i färsk betong (Kwak & Ha, 2006; Josserand, et al., 2006; Moris & Dux, 2010).

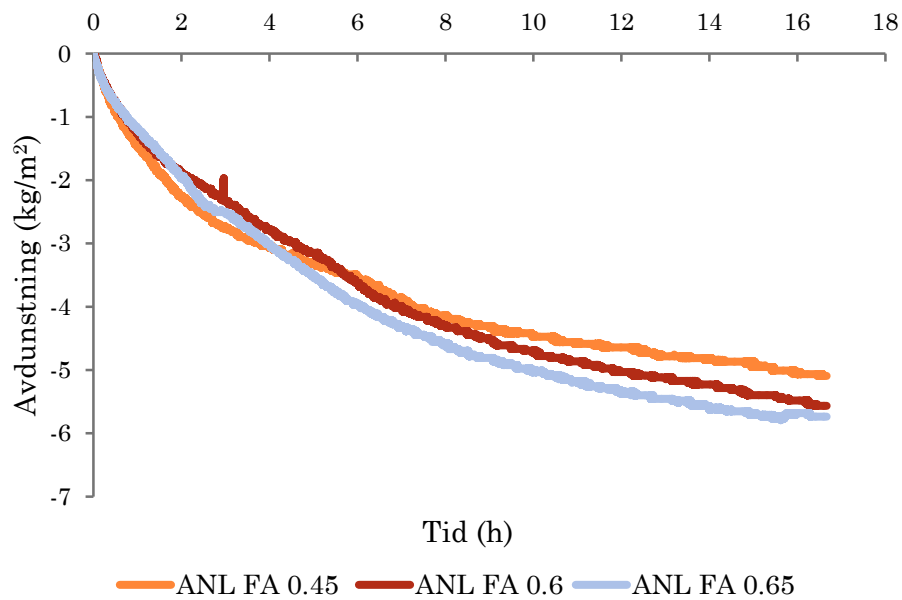
Den initiala öppethållandetiden kan identifieras med flera metoder, såsom Vicat-nålapparat, ultraljudsvågor, eller genom att bestämma inflexionspunkt för den uppmätta temperaturen i betongen.

Om man således gör enkla temperaturmätning på ett betongprov under realistiska förhållande kan följaktligen den nya modellen användas även före betonggjutning för att förutsäga uppsprickningsgrad.

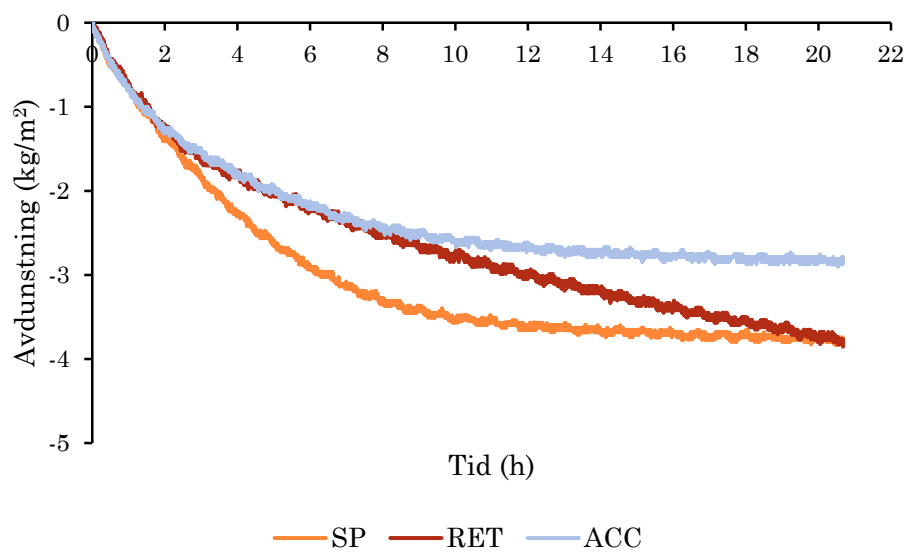
BILAGA B

Övriga resultat

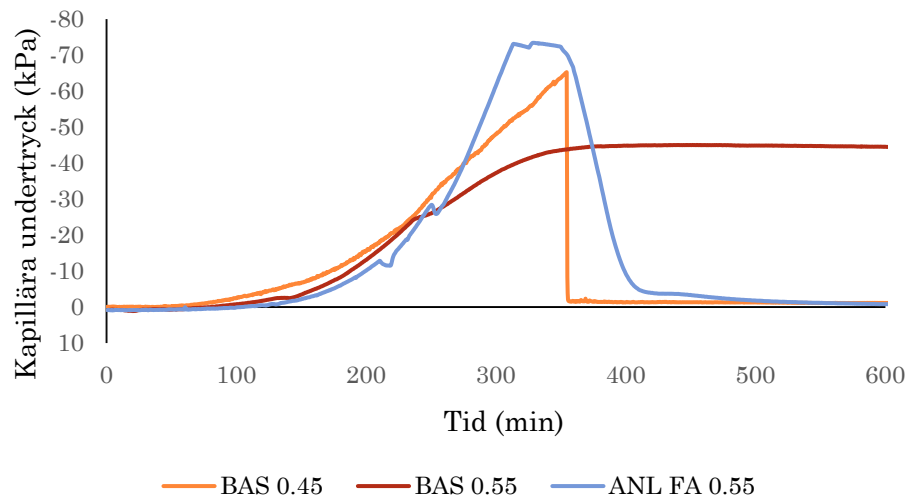
Avdunstningsresultaten från omgång I saknas.



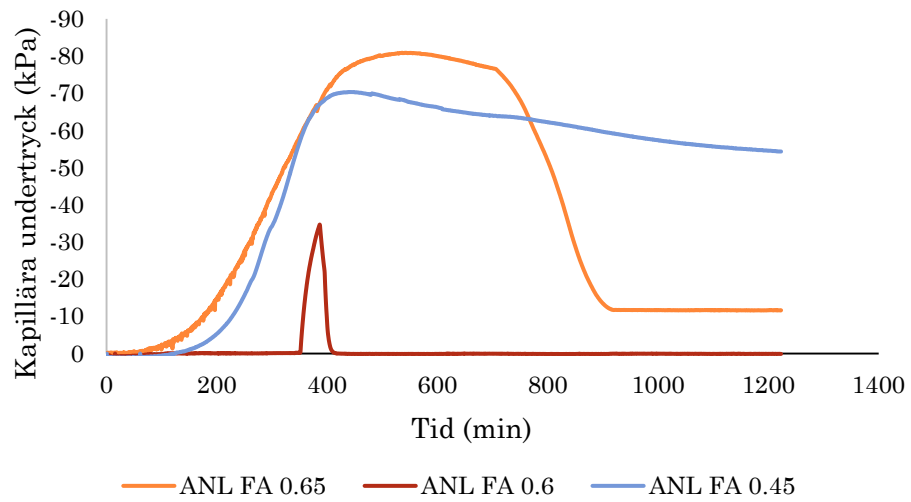
Figur B.1 – Avdunstning. Omgång II – vct.



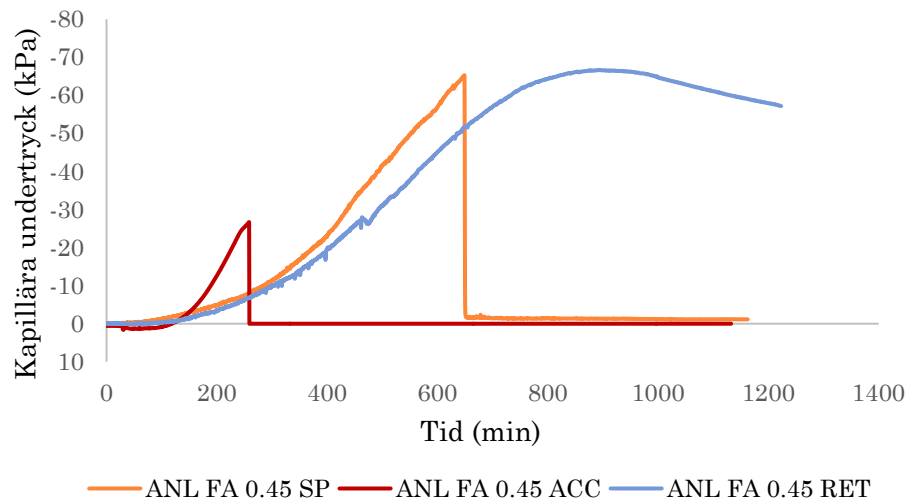
Figur B.2 – Avdunstning. Omgång III – Tillsatsmedel.



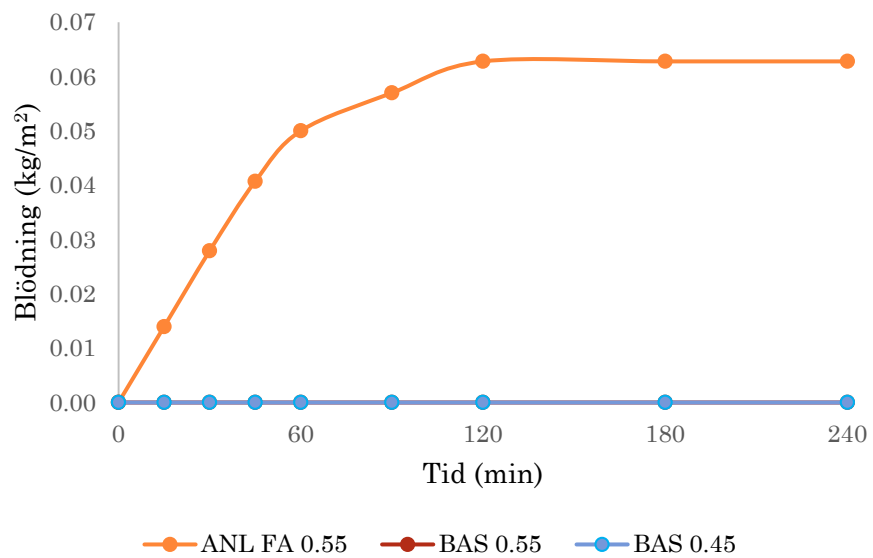
Figur B.3 – Kapillära undertryck. Omgång I – Cementtyp och vct.



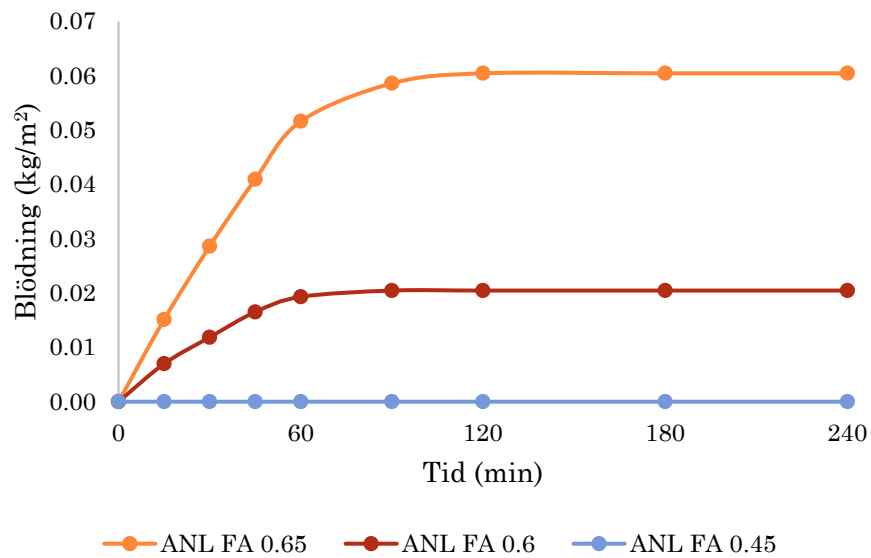
Figur B.4 – Kapillära undertryck. Omgång II – vct. Resultatet för ANL FA 0.6 är inte giltigt pga sensorfel.



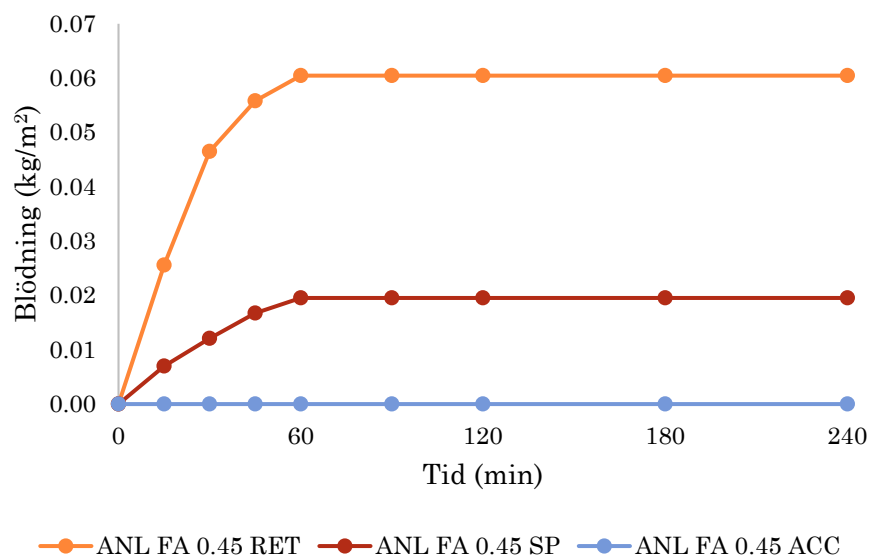
Figur B.5 – Kapillära undertryck. Omgång III – Tillsatsmedel.



Figur B.6 – Blödning. Omgång I – Cementtyp och vct.



Figur B.7 – Blödning. Omgång II – vct.



Figur B.8 – Blödning. Omgång III – Tillsatsmedel.

BILAGA C

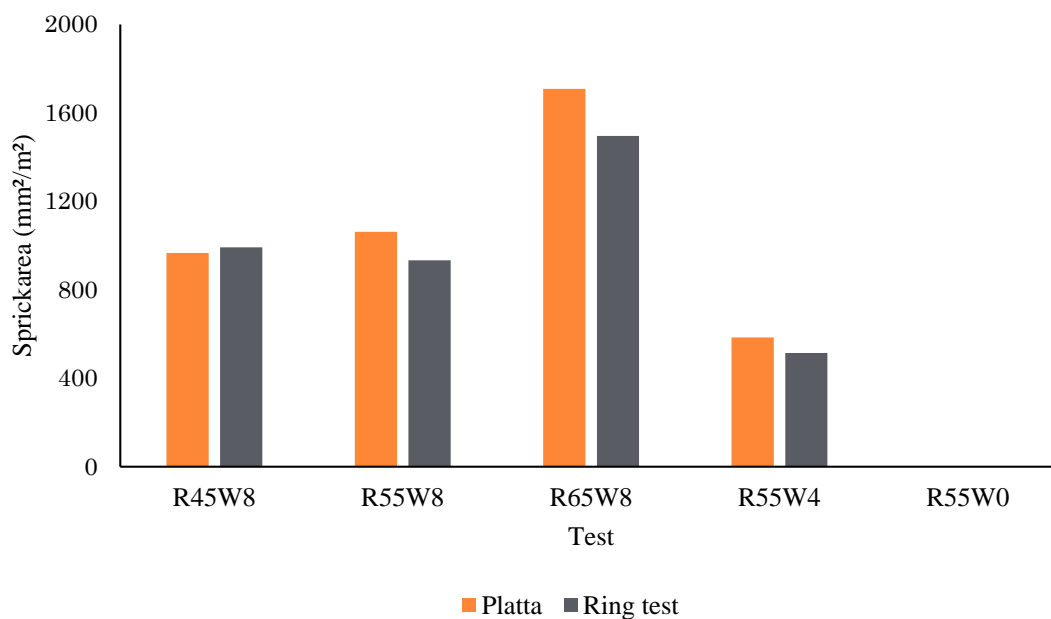
Halvskalaförsök - LTU

Effekt av vct och vindhastighet på plastisk krympning hos den färska betongen studerades genom en mindre serie av halvskaletester. Dessutom var avsikten att kontrollera huruvida trender observerade i laboratoriet kan appliceras i en större skala. Totalt genomfördes fem försök med fabriktillverkad betong, där vct och vindhastighet förändrades, se tabell C.1 visande recepten för de testade betongerna och vindhastigheter.

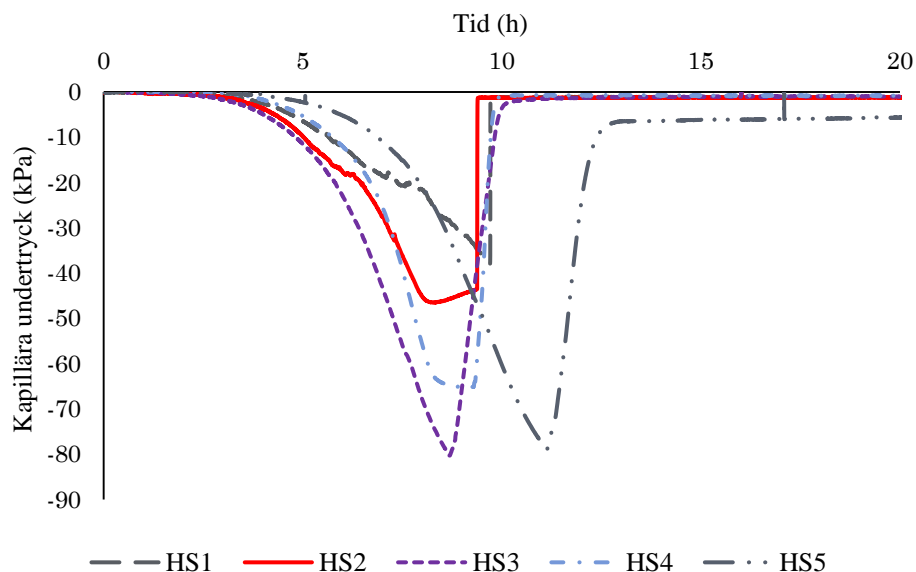
Resultaten visar en bra överensstämmelse mellan det som observeras i plattorna och de ringtester som genomfördes samtidigt, se figur C.1. Kapillära undertrycket och den inre temperaturutvecklingen illustreras i figurer C.2 och C.3.

Tabell C.1 – Betongrecept, vct, och vindhastighet i femhalvskaletest.

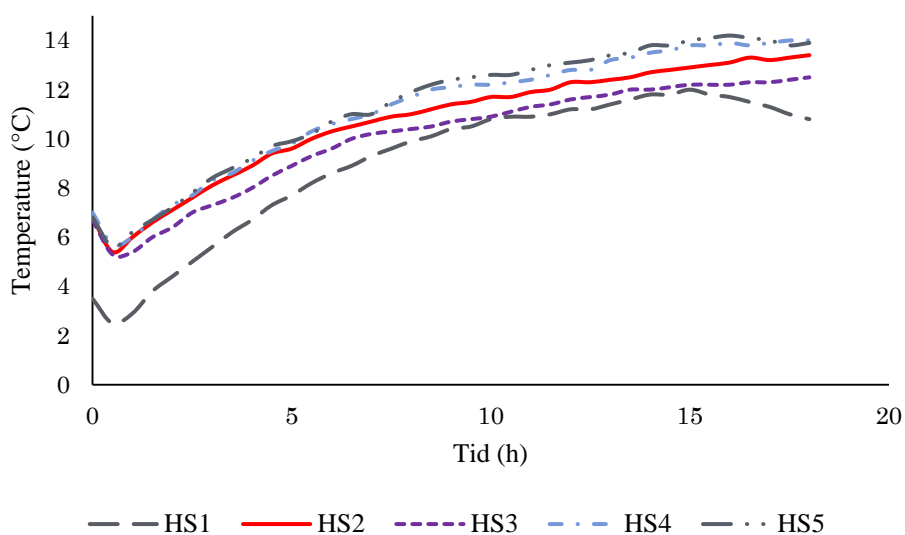
Test ID.	HS1	HS2	HS3	HS4	HS5
Cement (kg/m ³)	420	340	330	340	340
Vatten (kg/m ³)	189	187	195	187	187
Grus, 0-4 (kg/m ³)	1056	1021	1029	1021	1021
Sten, 8-16 (kg/m ³)	830	802	746	802	802
Filler (kg/m ³)	80	160	200	160	160
SP (kg/m ³)	4,2	3,4	2,31	3,4	3,4
vct	0,45	0,55	0,65	0,55	0,55
Vindhastighet (m/s)	8	8	8	4	0
Temp. inne (°C)	6	10	11	11	10
Temp. ut (°C)	-24	-10	-12	-4	-6



Figur C.1 – Jämförelse mellan den genomsnittliga sprickarean (mm²/m²) hos plattan och ring-testförsök utförda med samma fabriktillverkad betongblandning.



Figur C.2 – Kapillärt undertrycks uppbyggnad i halvskaleplattorna, mätt 4 cm från ytan.



Figur C.3 – Intern temperaturutveckling i halvskaleplattorna, mätt på 2 cm från botten.

Bland betongerna mättes den största sprickarean i försöket med $v_{ct} = 0,65$ (figur C.1), som dessutom hade den högsta hastigheten på det kapillära undertryckens uppbyggnad, se figur C.2. Det observerades en minskning av sprickarea när v_{ct} minskades. Även om denna reduktion inte var så signifikant som den som observerades i laborietesterna, se figur C.1, bekräftar den fortfarande det optimala intervallet för v_{ct} (mellan 0,45 och 0,55) för att minska uppsprickningsgraden. Skillnaden kan emellertid hänföras till olika typer av använt cement, eftersom ett CEM II/A-LL 42.5R, Byggcement, användes i laborieexperimenten, medan ett CEM I 42.5N, Anläggningscement, användes i halvskaletesterna.

Som förväntat minskade uppsprickningsgraden gradvis genom att minska vindhastigheten för att nå en sprickfri betong i det femte testet utan vind över ytan. Detta visar vindens avgörande roll för uttorkning av betongytan och den därmed påverkan på krympning och uppsprickningseffekt.