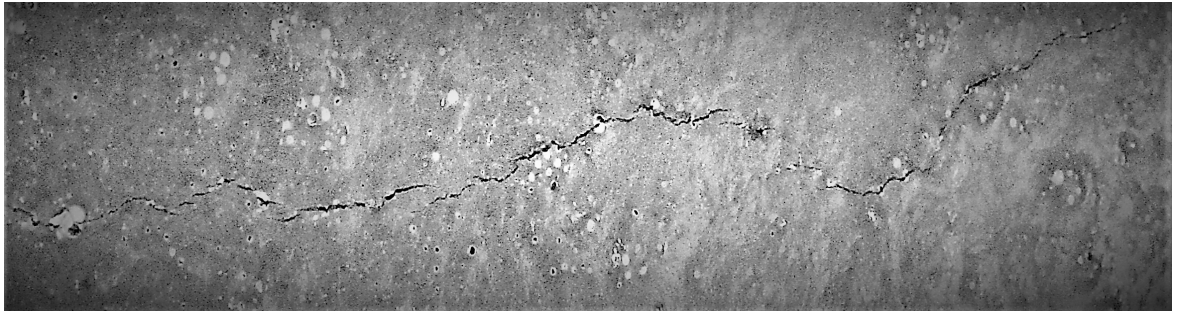


Plastiska krympsprickor: material- och produktionsrelaterade mekanismer (del II)



Faez Sayahi
Augusti 2019

FÖRORD

Projekt 13401 ”Plastiska krympsprickor: material- och produktionsrelaterade mekanismer, del II” har genomförts vid Luleå tekniska universitet inom forskningsämnena Konstruktionsteknik och i slutfasen Byggmaterial.

Ett speciellt och stort tack vill vi rikta till SBUF - Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, för finansiering och allmänt stöd vid start och genomförande av denna del 2 men även del 1 av projektet, Utan detta bidrag hade det inte varit möjligt att genomföra och slutföra projektet liksom sammanhängande doktorandutbildning

Utöver SBUF vill vi i projektgruppen även tacka övriga finansiärer som till på olika sätt medverkat till att projekt kunnat genomföras; Cementa AB, Betongindustri AB och Skanska Sverige AB/Teknik.

Det ska i sammanhanget även kommenteras att ett ansevärt bidrag även erhållits från LTU genom doktorandbidrag från den tekniska fakulteten.

Luleå, 5:e augusti 2019

Faez Sayahi, Tekn dr
Byggmaterial
Luleå tekniska universitet
Utredningsman

Mats Emborg, Professor
Byggmaterial
Luleå tekniska universitet
Betongindustri
Projektledare och huvudhandledare vid doktorandutbildning

Andrzej Cwirzen, professor
Byggmaterial
Luleå tekniska universitet
Ämnesföreträdare och biträdande handledare

Hans Hedlund, Adj professor
Byggmaterial
Luleå tekniska universitet
Skanska Sverige AB
Projektinitierare och biträdande handledare
och LTU (tillika projektledare)

SAMMANFATTNING

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

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 doktorandprojekt undersöks framförallt den förstnämnda effekten.

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

Många parametrar kan påverka sannolikheten för uppkomst av plastisk krympsprickbildning. Bland annat har effekten av vattencement-tal, finmaterial, tillsatsmedel, elementets geometri, omgivningsförhållanden (dvs. temperatur, relativ fuktighet, vindhastighet och solinstrålning), etc. undersökts i tidigare studier. Vid detta doktorandprojekt vid LTU, har, förutom att studera inverkan av flera av parametrarna ovan, ansträngningar gjorts för att nå en bättre och mer omfattande förståelse om sprickbildningens styrande mekanismer. Avdunstning, utveckling av kapillärt undertryck och hydratiseringshastighet har särskilt undersökts för att definiera deras inbördes förhållande att påverka sprickbildningen.

Det har observerats i studien att avdunstningen är den primära drivkraften bakom plastisk krympsprickbildning. Dock, styrs fenomenets allvarlighet för den negativa sprickbildningen genom en korrelation mellan avdunstningen, hastigheten för det kapillära undertryckets utveckling och hydratiseringshastigheten. Enligt resultaten ökar risken för plastisk krympsprickbildning betydligt om kapillär tryckutveckling snabbt sker i porsystemet samtidigt med en långsam hydratation.

INNEHÅLL

1. INLEDNING	4
1.1 BAKGRUND.....	4
1.2 SYFTE	5
1.3 METODIK.....	5
2. METODER OCH UTFÖRDA TESTER	5
2.1 GJUTFORMAR.....	5
3. PARAMETERSTUDIE	6
3.1 TILLSATSMEDEL	6
3.1.1 <i>Retarder</i>	7
3.1.2 <i>Accelerator</i>	7
3.1.3 <i>Stabiliserande tillsatsmedel</i>	7
3.1.4 <i>Luftporbildande tillsatsmedel (AEA)</i>	7
3.1.5 <i>Krympreducerande tillsatsmedel (SRA)</i>	8
3.2 FIBRER	8
3.3 VATTENCEMENT-TAL	8
3.4 CEMENTTYP	9
3.5 STENHALT (8-16 MM)	9
3.6 FLYTTILLSATSMEDEL	10
3.7 HALVSKALEFÖRSÖK	10
4. MODELLERING	11
5. SLUTSATSER	12
REFERENSER	13

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

Hållbarhet och funktionalitet hos betongkonstruktioner är nära relaterade till om de är sprickfria under sin livslängd eller inte. Om betongelementet utsätts för ansenlig 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).

De två huvudkomponenterna i krympningen i tidig ålder är plastisk krympning och autogen krympning. Det 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). Plastisk krympning, ämnet för denna forskning, inträffar mellan tiden för betonggjutningen och den starten av hydratationen, det vill säga under den tid blandningen ännu inte har fått tillräckligt draghållfasthet (Revina & Shalon, 1964; Powers, 1968). 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.

Erfarna platschefer har haft kännedom om att, när väderförhållandena vid och strax efter gjutningen inte är lämpliga, t.ex. hög temperatur, låg relativ luftfuktighet, och starka vindar, kan man undvika denna typ av sprickbildning genom att vidta omedelbara åtgärder. Om inte dessa vidtas är det sannolikt att mycket dyra reparationer måste vidtas av den spruckna strukturen genom t ex injektering. Det har uppskattat att sprickbildning generellt beräknas kosta cirka 30 miljoner kr per år att åtgärdas, bara i Sverige. Detta kan extrapoleras till cirka 1,5 miljarder kr för hela EU-regionen årligen, baserat på ca 4,5 milj m³ färdigblandad fabriksbetong (i Sverige, jämfört med 245 milj m³ i EU, enligt data från den europeiska fabriksbetongföreningen (ERMCO Statistics, 2017).

När betongen har gjutits tenderar dess fasta partiklar att sedimentera på grund av tyngdkraften och tvingar vattnet i porsystemet upp till ytan. Fenomenet är ofta benämnt blödning som således inte bara är en yteffekt i den nygjutna betongen utan är en process som sker i hela tvärsnittet. Det ackumulerade vattnet förångas gradvis tills betongytan är helt torr. I sådant fall byggs ett negativt hydrauliskt undertryck upp, även känt som kapillärt undertryck, i porsystemet (Radocea, 1992; Qi, et al., 2003; Josserand, et al. 2006; Schmidt & Slowik, 2013). Undertrycket genererar i sin tur dragspänningar i betongmassan om det finns internt och/eller externt tvång. Plastiska krympsprickor inträffar när den inre dragspänningen överträffar den låga draghållfastheten för färsk betong (Boshoff & Combrinck, 2013).

Många variabler såsom vct, cementtyp, fibrer, blandning, elementstorlek, finhalt och omgivningsförhållandena (relativ luftfuktighet, lufttemperatur och vindhastighet m m) kan påverka uppsprickningsgraden hos den färska betongen (Uno 1998; Boshoff & Combrinck, 2013; Lura, et al. 2007). Den forskning som utförts i Skandinavien om plastisk krympning kan spåras tillbaka till mitten av 1980-talet, där forskare som Hedin (1985), Radocea (1992), Johansen & Dahl (1993), Lund et al. (1997), Hammer (1999), Esping och Löfgren (2005) och Bertelsen (2018) studerade olika aspekter av fenomenet och etablerade kunskap för tillämpning på byggarbetsplatser och även för fortsatta undersökningar.

I aktuell forskning som genomförts under en femårsperiod har det noterats att sprickbildning i plastiska stadiet är ett resultat av ett komplext samband mellan sammankopplade parametrar såsom avdunstning, kapillärt undertryck och hydratationshastighet. Det har också observerats att, när det gäller uppsprickningsgrad, enbart förlita sig till bestämning av avdunstning, är tvetydig och ibland helt fel. Detta eftersom olika betongsammansättningar kan ha olika avdunstningshastigheter vid ett och samma gjutförhållanden som dessutom inte är kopplade till risken för uppsprickbildning. Med andra ord kan sprickbildning för en betongkvalitet ske för en avdunstningshastighet som är helt skild den som är fallet för uppsprickning hos annan betongkvalitet.

Baserat på erfarenheter från byggarbetsplatser noterades att förekomsten av plastisk krympning har ökat under de senaste decennierna. För idag vanligt använda betonger, t ex. självkompakterande betong och annan högpresterande betong, kan plastisk krympning vara mycket problematisk (Gram & Piiparinen, 1999; Esping & Löfgren, 2005). Detta på grund av deras ofta låga vct i kombination med hög halten av stabiliserande filler och vattenreducerande tillsatsmedel, (dvs. flyttillsatsmedel) och andra tillsatser. Således är denna typ av sprickbildning inte bara begränsad till heta och torra länder enligt ACIs konklusion ovan, utan har också blivit en utmaning även i det kalla Skandinavien med ofta förekommande höga luftfuktigheter

1.2 Syfte

Projektet har syftat till att erhålla mer kunskap om mekanismerna styrande plastisk krympsprickbildning av betong och kunna modellera fenomenet. I detta avseende har funnits i projektet en tydlig strävan att undersöka rollen hos det kapillära undertryckets uppbyggnadshastighet i relation till hydrationsprocessen. Ett slutligt mål med projektet har varit att komma fram till ett antal förslag till åtgärder före- och efter gjutnings som således kan utgöra allmän riktlinjer för att minska sprickrisken i plastiska stadiet.

1.3 Metodik

Projektet har utförts i tre steg som följer nedan:

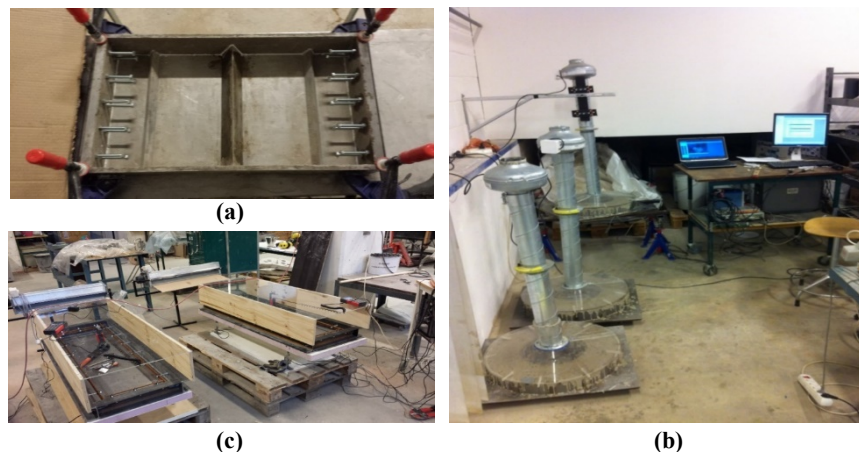
1. Parameterstudie genom laborieförsök
2. Modellering av plastisk krympning i betong.
3. Utvärdering och rapportering

Ovanstående två första steg redovisas i kapitel 3 och 4.

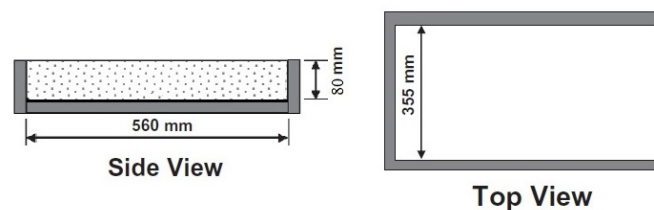
2. METODER OCH UTFÖRDA TESTER

2.1 Gjutformar

Två försöksmetodiker, med och utan tvång, användes under projektets gång. Den första bestod av tre formar för laboratorium: ASTM C1579 (ASTM, 2006), fig. 2.1a, ring test (Johansen & Dahl, 1993), fig. 2.1b, och rektangulär form (fig. 2.1c). Proverna med fri rörelsemöjlighet gjuts i en modifierad form enligt ASTM C1579, där de tre triangulära fastlåsningsinsatserna avlägsnades för att minimera graden av tvång (fig. 2.2). Den andra försöksmetodiken bestod av tester utförda i halv skala med plattor (fig. 2.3) bl a för att kontrollera giltigheten av laborierresultaten.



Figur 2.1 – Gjutformar med tvång: a) ASTM C 1579; b) ring test utrustning; c) rektangulär form.



Figur 2.2– Gjutform utan tvång, tillverkad genom modifiering av ASTM C 1579 (ASTM, 2006).



Figur 3.3 – Form före gjutning vid halvskaletförsök. Utrustning för parallella ringförsök skymtar i bakgrunden

3. PARAMETERSTUDIE

Tabell 3.1 visar de parametrar som har testats under projektets gång.

Tabell 3.1 – Testade parametrar under projektet.

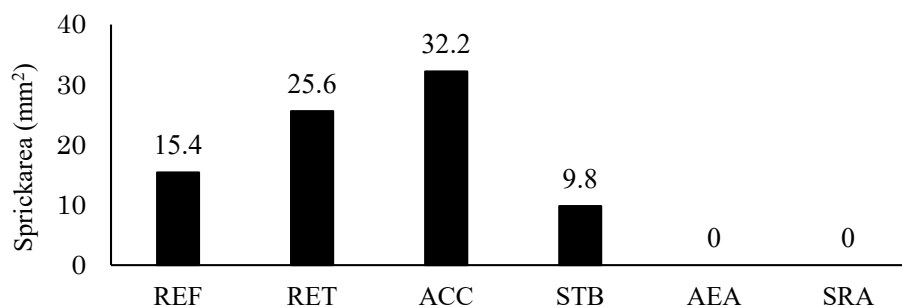
Testade parametrar	Variation	Metod
Tillsatsmedel	Retarder, Accelerator, Stabiliserande medel, Luftporbildande medel (AEA), Krympreducerande tillsatsmedel (SRA)	Ringtest ASTM C 1579
Fibrer	Återvunna fibrer från bildäck (RTSF) Sålfibrer med änkrok, traditionell typ Ho (HSF)	ASTM C 1579
Vct	0,38, 0,45, 0,55, 0,65, 0,67	Ring test Halvskaletförsök
Cementtyp	Byggcement, Anläggningscement, SH-cement Bascement	ASTM C 1579 Ringtest
Stenhalt [%] (8 – 16 mm)	35, 40, 45	Ringtest
Flyttillsatsmedel dosering, SP [%]	0,6, 0,8, 1,0	Ringtest
Vindhastighet [m/s]	0, 4, 8	Ringtest Halvskaletförsök

3.1 Tillsatsmedel

Effekten av retarder, accelerator, stabilisator, luftporbildande medel, och krympreducerande medel (SRA) undersöktes i ett inledande skede. Tillsatsmedlen valdes baserat på deras användning i den svenska byggsektorn. Tabell 3.2 presenterar recepten för de testade betongerna (av självkompakterande konsistens) och tillsatsmedleninnehåll. De allmänna egenskaperna hos blandningarna, inklusive flytsättnått, T_{500} (dvs. tid för 500 mm utflöde), densitet och lufthalt presenteras i tabell 3.3. Tillsatsmedlens påverkan på uppsprickningen (presenterat i sprickarea) visas i figur 3.1.

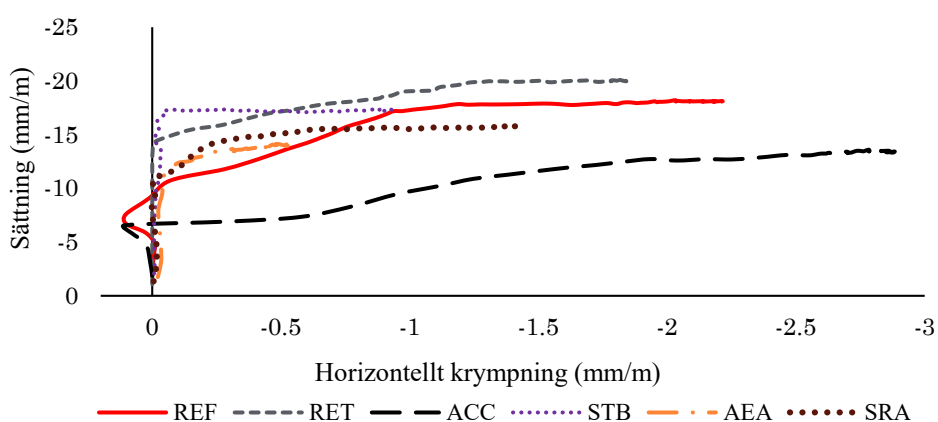
Tabell 3.2 – Betongrecept för testade SKB för att undersöka effekten av tillsatsmedel, (REF = referensbetong, RET = retarder, ACC = accelerator, STB = stabiliserande medel, AEA = luftporbildande medel, och SRA = krympreducerande tillsatsmedel).

	REF	RET	ACC	STB	AEA	SRA
Cement (kg/m ³)	340	340	340	340	340	340
Vatten (kg/m ³)	170	170	170	170	170	170
Grus, 0-4 (kg/m ³)	785	785	785	785	785	785
Grus, 4-8 (kg/m ³)	175	175	175	175	175	175
Sten, 8-16 (kg/m ³)	651	651	651	651	651	651
Filler (kg/m ³)	160	160	160	160	160	160
SP (kg/m ³)	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08
Tillsatsmedel (kg/m ³)	-	6.5	7	3.74	6	10.2
Vct	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50



Figur 3.1- Effekt av tillsatsmedel på genomsnittlig sprickarea, mätt 18 timmar efter gjutningen.

Provens vertikala deformation dvs. sättning är uppritad mot deras horisontella deformationer i figur 3.2. Det verkar som om de spruckna proverna ökar den av gravitationen orsakade vertikala deformationen när den horisontella krympningen gradvis minskar.



Figur 3.2 - Sättning jämfört med horisontellt krympning hos betonger vid variation av tillsatsmedel.

3.1.1 Retarder

Sprickarea ökades efter tillsats av retardern som tillskrivs den mycket långsamma och försenade hydratationen hos blandningen. Följaktligen antogs att provet hade en mycket låg draghållfasthet under en betydligt längre tid, vilket enkelt överskreds av dragspänningarna.

3.1.2 Accelerator

Acceleratorn orsakade den största sprickarean och den största horisontella deformationen, se figur 3.1, bland alla testade betonger. En orsak är troligen den snabba ökningen av det kapillära undertrycket, och de höga dragspänningarna som då troligen genererades i betongmassan.

3.1.3 Stabiliserande tillsatsmedel

Sprickarean minskades vid tillsats av stabilisator jämfört med referensbetongen. Trots den stora volymetriska deformationen hos provet, uppvisades en relativt liten horisontell krympning, se figur 3.2. Med andra ord innebar stabilisatorn att betongen deformerades huvudsakligen vertikalt.

3.1.4 Luftporbildande tillsatsmedel (AEA)

Ingen spricka upptäcktes i provet innehållande luftporbildande medel, vilket troligen var relaterat till den mycket låga kapillära undertryckets uppbyggnadshastighet. Detta kan bero av ökningen av luftporernas storlek och antal (Kronlöf, et al., 1995), som antagligen retarderade utvecklingen av betongens initiala elasticitetsmodul eller bukmodul som kan passa bättre för den vätskeliknande betongen. Påverkan av

luftporbildaren kan också tillskrivas en reduktion av kapillärvattnets ytspänning, eftersom det luftporbildande medlet var baserat på syntetiska tensider.

3.1.5 Krympreducerande tillsatsmedel (SRA)

I likhet med det luftporbildande medlet sprack inte det prov med innehåll av SRA-inte ens i slutet av testet. Kapillära undertrycket var mycket lågt, som är orsakad av porvätskanslägre ytspänning efter tillsats av SRA vilket har observerats av Lura, et al, (2007); Mora-Ruacho. et al, (2009) och fler

3.2 Fibrer

Inverkan av stålfibrer från återvunna däck (RTSF) och stålfibrer HSF (med ändkrokar av standardtyp) på plastisk krympsprickbildning undersöktes under projektet för SKB Betongrecepten och fiberinnehållet i de testade proverna presenteras i tabell 3.3. Resultat beträffande uppsprickning från testerna sammanfattas i tabell 3.4.

Tabell 3.3 - Betongrecepten och fiberinnehållet.

Prov	Cement (kg/m ³)	Vatten (kg/m ³)	Grus, 0-4 (kg/m ³)	Sten, 8-16 (kg/m ³)	Filler (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	Vct
REF	340	187	1021	802	160	3.4	0.55
Fiberinnehåll (kg/m ³)							
	RTSF			HSF			
RTSF 2.5	2.5			-			
RTSF 5	5			-			
RTSF 10	10			-			
HSF 5	-			5			
HSF 7.5	-			7.5			

Tabell 3.4 - Sprickmättningsresultat med effekter av stålfibrer RTFS och HSF, 18 timmar efter gjutning. PRCA = percentage reduction of crack area.

Prov	Sprick initieringstid (min)	Maximal sprickbredd (mm)	genomsnittlig sprickbredd (mm)	Total spricklängd (mm)	Genomsnittlig prickarea (mm ²)	PRCA (%)
REF	146	0.419	0.297	319	94.74	-
RTSF 2.5	298	0.182	0.128	269	34.43	63.66
RTSF 5	301	0.098	0.062	233	14.45	84.75
RTSF 10	389	0.052	0.027	69	1.92	98.03
HSF 5	324	0.086	0.055	238	13.09	86.18
HSF 7.5	331	0.049	0.022	42	0.92	99.02

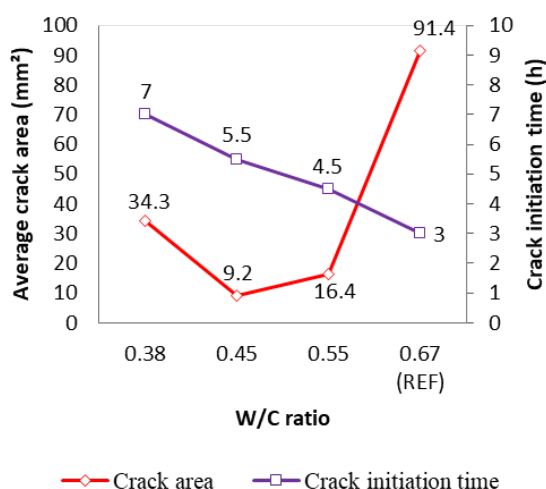
3.3 Vattencement-tal

Betongrecepten som testats för att studera effekten av vct på plastisk krympsprickbildning presenteras i tabell 3.5.

Tabell 3.5 - Betongrecepten av de testade SKB för att undersöka effekten av vct, i kg/m³.

	REF	W/C38	W/C45	W/C55
Cement	300	420	380	340
Cementtyp	Byggcement	Byggcement	Byggcement	Byggcement
Vatten	200	160	171	187
Grus, 0-4	155	0	0	81
Grus, 0-8	771	1021	998	879
Sten, 8-16	628	694	678	651
Filler	220	40	100	160
SP	2.4	4.6	5.7	4.1
vct	0.67	0.38	0.45	0.55

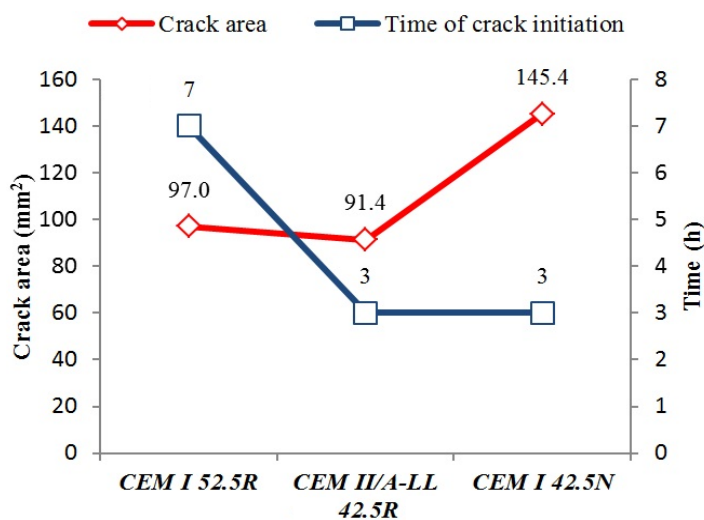
Resultaten identifierar ett optimalt vct-område för att lägsta uppsprickningsgrad inom området mellan 0,45 och 0,55, se figur 3.3. Betong med lägre eller högre vct visade ökad tendens till sprickbildning i tidig ålder, se figur 3.6. Sprickbildning i betong med vct lägre än 0,45 tillskrivs till autogen krympning, medan plastisk krympning är den främsta drivkraften bakom sprickningen, när vct är högre än 0,55.



Figur 3.3 – Genomsnittligt sprickarea och tid för sprickinitiering av SKB i ring test-upsättning med 0,38, 0,45, 0,55 och 0,67 vct, (Sayahi, 2019).

3.4 Cementtyp

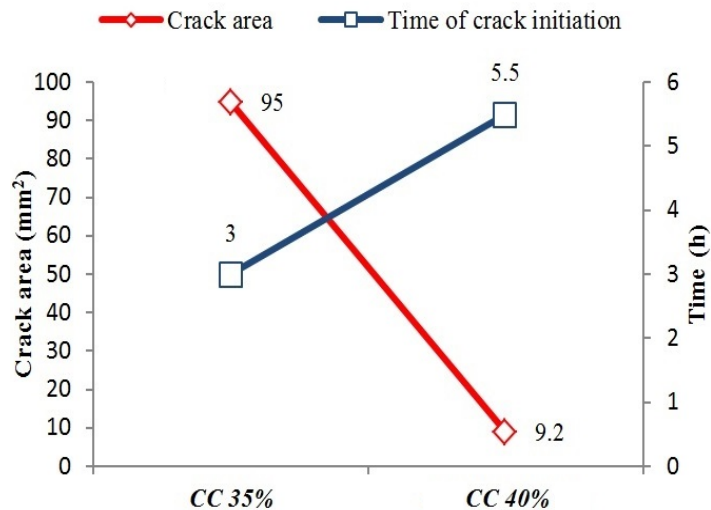
De cement som testats i denna forskning var Byggcement (CEM II/A-LL 42.5R), Anläggningscement (CEM I 42.5N), SH-cement (CEM I 52.5R). Alla cement produceras i Sverige av Cementa AB. I figur 3.4 observeras att betonger innehållande mer grovmalet cement innebärande långsamma hydratationshastighet har en högre sprickningstendens. Till exempel ger betongen med CEM I 42.5N betydligt mer sprickor än de två övriga cementen se.



Figur 3.4 – Genomsnittligt sprickarea och tid för sprickinitiering av SKB, producerad med CEM I 52.5R, CEM II/A-LL 42.5R och CEM I 42.5N cement, från (Sayahi, 2019).

3.5 Stenhalt (8-16 mm)

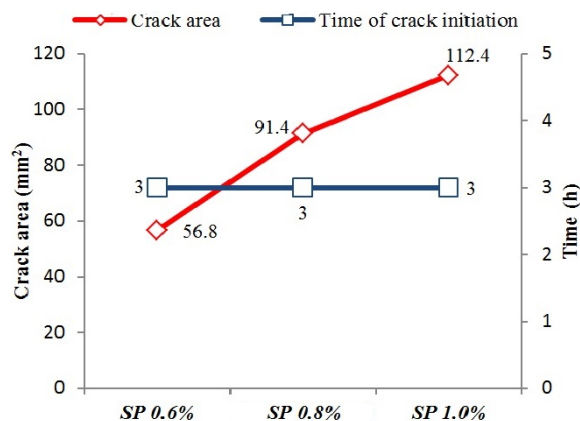
Effekten av stenhalt (8–16 mm) undersöktes även i doktorandforskningsprojektet. se t ex (Sayahi, et al., 2016). Minskning av stenhalt från 40 % till 35 % orsakar en signifikant ökning av uppsprickningstendensen, se figur 3.5.



Figur 3.5 – Genomsnittligt sprickarea och tid för sprickinitiering av SKB med 35 % och 40 % av den totala stenhalten (8-16 mm).

3.6 Flyttillsatsmedel

Resultaten av påverkan av flyttillsatsmedel med doseringarna 0,6 %, 0,8 % och 1,0 % (av cementvikt) på plastisk krympning hos SKB visas i figur 3.6. Sprickarean ökade nästan linjärt med det ökade SP-innehållet.



Figur 3.6 – Genomsnittligt sprickarea och tid för sprickinitiering av SKB med 0,6 %, 0,8 % och 1,0 % SP-dosering, från (Sayahi, 2019).

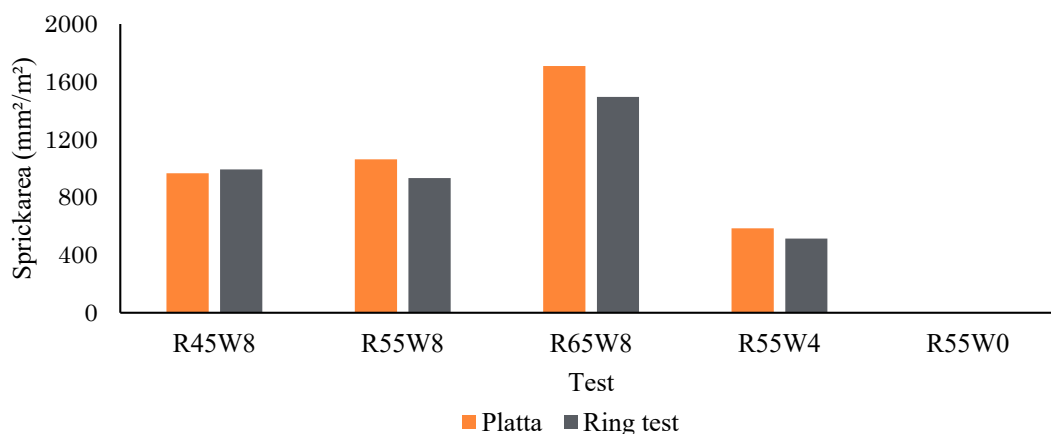
3.7 Halvskaleförsök

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 experiment med fabriksstillverkad betong, där vct och vindhastighet förändrades, se tabell 3.6 visande recepten för de testade betongerna, och vindhastigheter.

Tabell 3.6 – Betongrecept, vct, och vindhastighet i femhalvskaletest.

Test ID.	R45W8	R55W8	R65W8	R55W4	R55W0
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

Resultaten visar en bra överensstämmelse mellan det som observeras i plattorna och de ringtester som genomfördes samtidigt, se figur 3.7.



Figur 3.7 – Jämförelse mellan den genomsnittliga sprickarean (mm^2/m^2) hos plattan och ring-testförsök utförda med samma fabrikstillverkad betongblandning.

Det observerades en minskning av sprickarea när vct minskades. Även om denna reduktion inte var så signifikant som den som observerades i laborietesterna, se figur 3.3, bekräftar den fortfarande det optimala intervallet för vct (mellan 0,45 och 0,55) för att minska uppsprickningsgraden.

4. MODELLERING

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

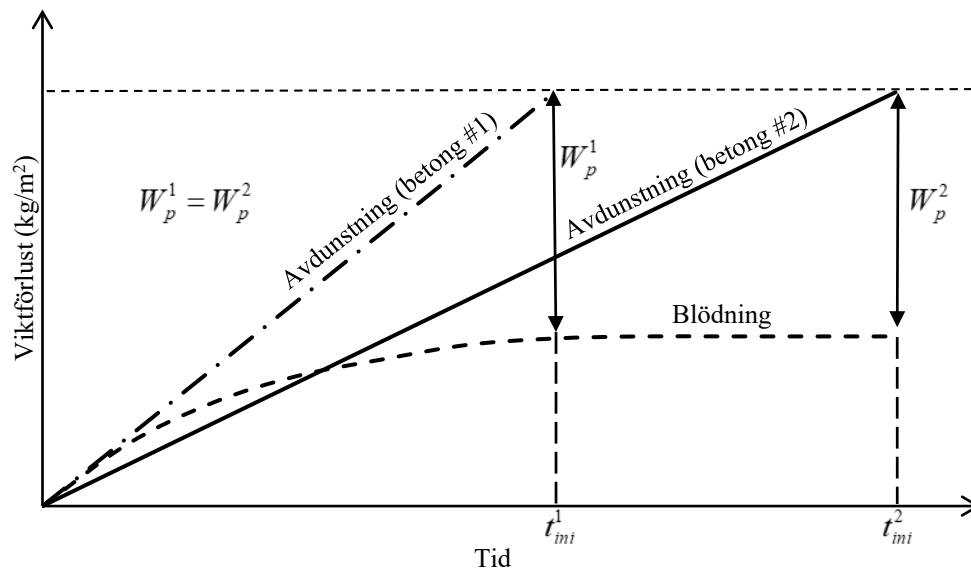
$$C_s = W_p \times t_{ini} \quad , \quad t = t_{ini} \quad (4.1)$$

eller

$$C_s = (E - B) \times t_{ini} \quad , \quad t = t_{ini} \quad (4.2)$$

$W_p(t)$ = 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} = öppethållandetid, [h].

Ekvation (4.2) är en utvidgad version av den modell som föreslagits av Boshoff och Combrinck (2013), genom tillägget av effekten av öppethållandetiden. I Boshoffs och Combrincks modell bestämdes mängden av det förångade vattnet, E , genom att multiplicera avdunstningshastigheten med öppethållandetiden. Skillnaden i sprickningsgraden hos betonger med samma W_p , men olika öppethållandetider, se figur 4.1, 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 4.1, är den andra betongen mer benägna att spricka av plastisk krympning jämfört med den första genom en annat värde på t_{ini} .



Figur 4.1 – 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-nålapparatur, 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 konkret placering för att förutsäga sprickningsgrad.

5. SLUTSATSER

Baserat på resultaten från den aktuella forskningen kan följande slutsatser listas:

Generella fysiska observationer:

- För att förhindra plastiska krympssprickors uppkomst måste de tidiga dragspänningarna hållas under draghållfastheten för färsk betong. Detta kan göras genom att reducera kapillära undertryckets uppbyggnadshastighet, med att fördröja uttorkningstiden och minska avdunstningen in betongens porssystem.
- Förutom avdunstningen bör hastigheten på den kapillära undertrycksutvecklingens och hydratationssprocessen övervägas vid undersökning av plastiska krympningsfenomenet.
- Uppsprickningsgraden av plastisk krympning i betong kan uppskattas baserat på mängden av det förångade vattnet från betongen och den initiala öppethållandetiden.
- Om man antar konstant torkförhållanden över betongelementet, i ett givet djup, är hastigheten med vilken kapillära undertrycket ökar identisk, oavsett sensorns position, och kan därför betraktas som en materialegenskap.

Följande materialtekniska observationer kan göras:

- Tillsatsmedlen som testats i denna forskning kan ändra sprickmekanismen genom att förändra betongens vertikala och horisontella deformationer.
- Stålfibrer minskar sprickstendensen genom att minska den volymetriska deformationen, troligtvis öka draghållfastheten något i tidig ålder och minska mängden av det förångade vattnet från betongporerna.
- Fosfatbaserade retarder och kalciumnitratbaserade acceleratorer ökar betongens spricktendens.

- Stabilisatorer baserade på organisk polymer, luftporbildande medel baserade på syntetiskt ytaktivt medel och krympreducerat tillsatsmedel (SRA) baserat på polymeryglykol minskar den horisontella krympningen och sprickbildningen.
- Återvunna däckstålfibrer (RTSF) kan effektivt minska krympningen och sprickbildning och kan ersätta kommersiellt tillgängliga stålfibrer.
- Det optimala vct-området för att minska sprickrisken är mellan 0,45 och 0,55.
- Cement med grova partiklar och långsammare hydratation kan öka uppsprickningsgraden.
- Minskning av stenhalten (8-16 mm) kan i synnerhet öka betongens sprickstendens. (Denna slutsats drogs dock baserat på ett enkelt försök och bör därför undersökas ytterligare).
- Att höja doseringen av flyttillsats, SP, ökar risken för sprickbildning.

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.
- 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.