

## UTÖKAD SAMMANFATTNING

Forskningsprojektet ”Härtningsförloppets effekt på betongens egenskaper i ett tidigt skede”, finansierat av SBUF har syftat till verifiering och undersökning av härtningstemperaturens effekt på autogen krympning och självuttorkning. Intentionen var att skapa en bas för uppdatering av de modeller som används för att förutspå och kvantifiera risken för tidiga sprickor under variabla härtningstemperaturer och samtidig krympning.

### Bakgrund

Ung betong utsätts för sprickrisker på grund av en kombination av temperaturrörelser och samtidig krympning och ett tvång. I massiva betongkonstruktioner uppstår stora skillnader i rörelser genom att den värme som alstras inuti konstruktionen inte omfördelas tillräckligt snabbt vilket leder till temperaturgradienter. Samtidigt sker autogena deformationer (AD) i betongen vilket beror på att cemenhydratationen förbrukar vatten och ”egenkrympning” uppträder. Tvång råder genom att rörelserna inte är uniforma i konstruktionen och det mothåll som finns från eventuellt motgjutna konstruktioner. I tunna konstruktioner med stora uttorkningsytor kan en kombination av autogena deformationer och den traditionella uttorkningskrympningen leda till tidiga sprickor. Tvånget utgörs i detta fall framförallt av motgjutna konstruktioner. I detta fall är temperatureffekten inte lika markant.

Autogen krympning ofta benämnd självuttorkningskrympning utgör är en direkt konsekvens av de kemiska reaktionerna och startar tidigt efter gjutningen. Vatten i porsystemet förbrukas (självuttorkning) och tidig krympning uppträder.

Under senare tid har en ökning skett beträffande användningen av betonger med tidig hög hållfasthet, högpreesterande betonger och betonger med olika alternativa bindemedel. Med ett lågt vct ökar den autogena krympningen (AS) [9-12] och ökningen är ofta tillräckligt stor för att i vissa fall framkalla mikro- eller makrosprickor på grund av ökad volym cementpasta och högre bindemedelsinnehåll per volymenhet i dessa betonger. Exempelvis har observeras i försök med högpreesterande betong en autogen krympning av 0,250 ‰ vid åldern 24 h [9], vilket kan jämföras med den traditionella uttorkningskrympningen som kan vara 2 – 3 ggr större först efter några månader.

Det har även observerats att en expansion (”autogen svällning”) istället kan uppträda i detta senare skede. Denna expansion kan innebära en potentiell nytta för betongen eftersom den har förmågan att delvis minska sprickbenägenhet genom att framkallade dragspänningar minskar. Kunskap om autogen svällning är idag relativt knapphändig och i vissa fall motsägelsefull.

Enligt observationer från försök inleds den autogena expansionen i ung betong eller bruk vanligtvis efter nedkylningsfasen efter det att betongen utsätts för temperaturförlopp simulerande det som kan uppträda i konstruktioner i tidigt skede pga hydratationen. Det har observerats att om

härddningstemperaturen uppnår eller överstiger  $50^{\circ}\text{C}$  så karaktäriseras den naturliga nedkylningsfasen av en långsam autogen krympning och följs av en autogen svällning.

Befintliga modeller för autogen krympning baseras normalt på så kallade mognadskoncept. I Sverige används två modeller för att beskriva fria, lastoberoende deformationer i betong. I Modell I bestäms betongens temperaturrörelser med hjälp av olika expansions- och kontraktionskoefficienter och den autogena krympningen beror endast på den ekvivalenta åldern [13]. I Modell II baseras den autogena krympningen både på ekvivalent ålder och på temperatur medan temperaturutvidgningskoefficienten är konstant med tiden. [14]. Båda modellerna har visat sig lämpliga för att beskriva de fria deformationerna (summan av autogen krympning och termisk dilatation) för betonger med vct runt 0,40 och högre och då man använder en normalt portlandcementcement [14]. Svårigheter att få modellerna att stämma överens med försök har uppstått då man använt lägre vct, cementtyper av högre värmeutveckling och betonger som utsätts för komplexa temperaturvariationer [31-32].

Aktuell studie har haft som mål att studera fenomenet för några typiska betongblandningar med kommersiella cement som används idag. Ett mål har även varit att testa av befintliga modeller för autogen krympning och att se om det går att ta fram några rekommendationer angående sammansättning av betong etc.

## Försöksprogram

Försök utfördes på standardbetong med två olika vct (0,38 och 0,55) som blandades med vanligt BAS-cement (Slite). Några kompletterande försök utfördes betong med Anläggningscement (Degerhamn) samt betong där Anläggningscement kombinerats med olika grader av flygaskainblandning. Försöksupställningen baserades på tidigare försök vid LTU [14, 31-32] där den fria rörelsen mäts på testcylindrar med diametern  $\text{Ø}=80$  mm. Härdningsförloppet inleds med en hastig temperaturuppgång, följt av en konstant härddningstemperatur ( $6^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  och  $50^{\circ}\text{C}$  under 1, 3 och 5 dygn) och avslutades med en konstant nedkylningstakt tills  $20^{\circ}\text{C}$  uppnåtts, se Figur 1.

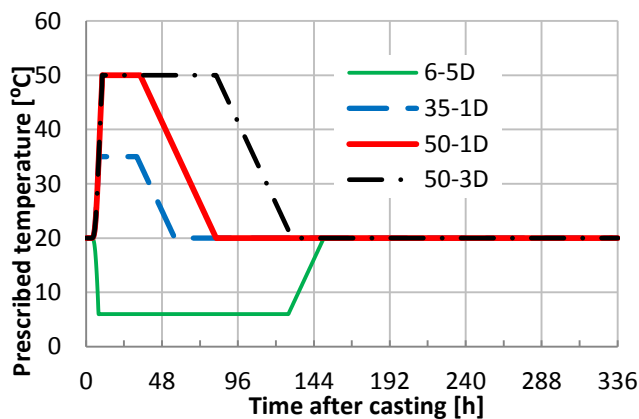
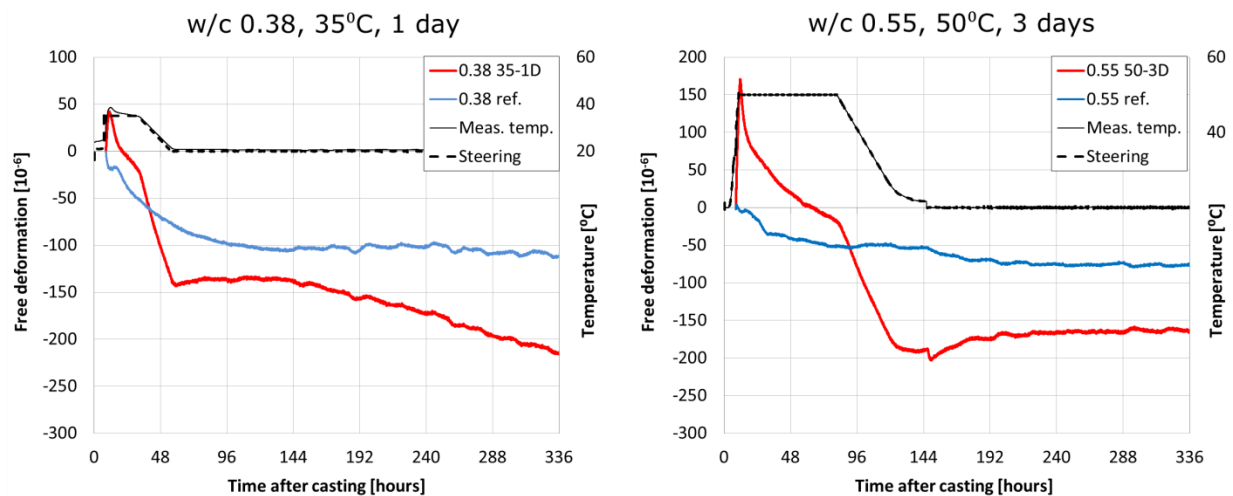


Fig 1. Temperaturprofiler för härdningsförloppet

## Testresultat

För betongen med Basement uppmättes den högsta tryckhållfastheten vid 28 dygn till 70 MPa (vct 0,38) respektive 45 MPa (vct 0,55). De två recepten med ANL uppvisade lägre tryckhållfastheter vid 28 dygn, troligen på grund av en långsammare hydratation.

Exempel på mätningarna av frirörelser, som startade 8,5 h efter gjutning, visas i Figur 2. En initial expansion kan observeras på grund av hydratationsvärmen. För alla värmehärdade prover observerades en snabb krympning under värmeplatån, följt av en expansion efter avsvälningen. De provkroppar som svalnat ned till 6 grader visade däremot krympning och expansion följt av ytterligare krympning vid lagring i 6 grader.



**Fig. 2.** Fria deformationer för (a) BAS1 härdad i 35<sup>0</sup>C i 1 dygn; (b) BAS2 härdad i 50<sup>0</sup>C i 3 dygn. Rött betecknar värmehärdning och blått är referensprovet. Notera svällningen då temperaturen hålls konstant på 20<sup>0</sup>C. ("referenskurva" i figuren).

## Modellering

Den fria deformationen analyserades för att utvärdera tillämpbarhet i den krympmodell som utvecklats av Hans Hedlund [14]. Denna modell ingår normalt i de sprickriskberäkningar som görs i ConTeSt, den programvara som idag vanligtvis används att analysera sprickrisker i Sverige.

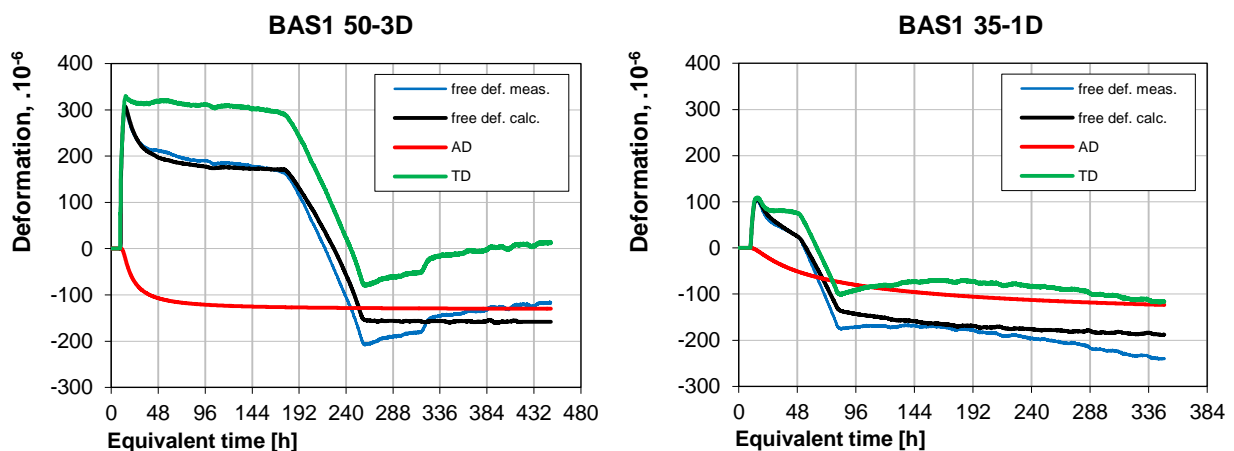
Av särskilt intresse för denna studie var att justera den så kallade temperaturkänslighetsfaktorn. Temperaturkänslighetsfaktorn används för att beräkna storleken på den autogena krympningen genom jämförelse med den autogena krympning som sker vid lagring konstant i 20<sup>0</sup>C.

Nya anpassningsparametrar har beräknats genom individuell anpassning, se Tabell 2 (ekvationerna presenteras i den utförliga texten).

**Tabell 2.** Beräknade anpassningsparametrar

Recipe	Curing	$a_0$ [-]	$a_1$ [-]	$T_1$ [°C]	$b_1$ [-]	$a_2$ [-]	$T_2$ [°C]	$b_2$ [-]	$t_{\text{start}}$ [h]	$\epsilon_{\text{ref}}$ [10 <sup>-6</sup> ]	$\eta_{\text{SH}}$ [-]
BAS1	6-5D	0.1	0.5	9	2.9	0.1	55	7	30	-290	1.5
	35-1D	2.2	1.9	9	2.9	0.9	55	6.5	60	-42	0.6
	50-1D	2.0	-1.3	9	2.9	2.6	73	9.2	8.5	-170	1
	50-3D	1	1.3	9	2.9	0.5	55	6.9	9.9	-52	1.1
BAS2	6-5D	1.2	0.1	9	2.5	1.9	55	5.8	60	-139	0.4
	35-1D	-2.2	1.4	9	3.4	3.9	55	6.0	60	-186	0.2
	50-1D	-1.0	1.0	9	5.3	1.2	50	5.0	60	-156	3.8
	50-3D	0.2	0.2	9	0.2	0.7	55	7.0	60	-120	5

De anpassningsparametrar som representerar bästa tillämpning framstår dock som osystematiska, men har ändå tillämpats vid beräkning mot försök. Se Figur 3, där bästa anpassning mot försök visas.

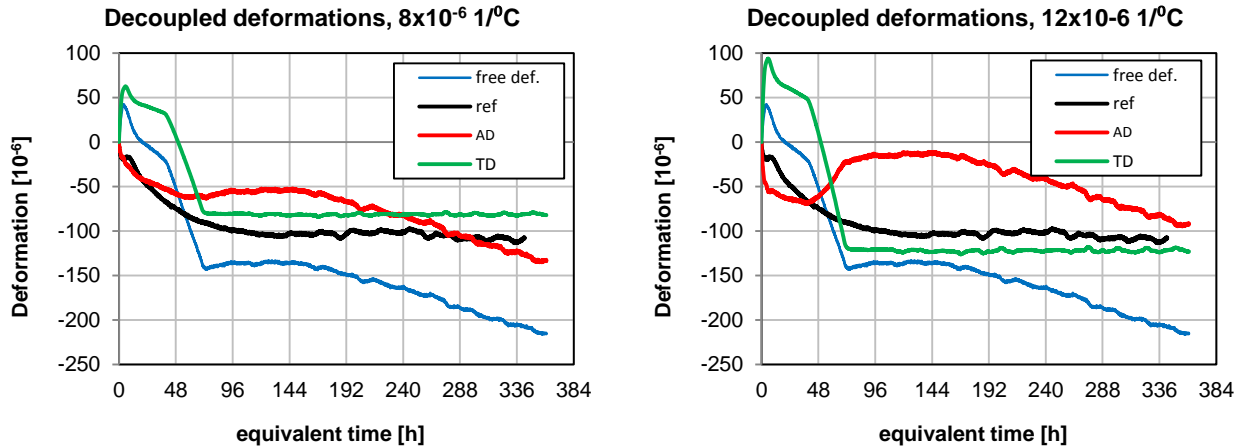


**Fig 3.** Värmehärdade prov av BAS1 betong; härdade i (a) 50°C i 3 dygn, (b) 35°C i 1 dygn. Free def. meas. – laborieredata; free def. calc. – HH bästa passning; AD – autogen deformation, alltid beräknad som strikt krympning; TD – termisk deformation

## Diskussion och slutsatser

De hittills utförda försöken visar att det är svårt att få överensstämmelse med befintlig modell i och med att modellen inte tar hänsyn till den efterföljande expansionen i de värmelagrade proven. Modellen ger även tydliga avvikelser vid beräkning av rörelser vid konstanta temperaturer (grön linje i Figur 3).

För att försöka fastställa en realistisk form på resultaten har de fria deformationerna delats upp i en autogen rörelse respektive en temperaturrörelse genom att anta ett intervall med konstanta temperaturutvidgningskoefficienter baserat på litteraturen, se exempel i Figur 4.



**Fig 4.** Beräknad utveckling av termiskt influerade AD vid varierande härdningstemperaturer för BAS1, härdad i 35 grader i ett dygn. Ref – 20°C isotermisk referens

De olika diagrammen avslöjar att de härledda autogena deformationerna skiljer sig i jämförelse med den 20°C isotermiska referensen

## Slutsatser

- Värmehärdning vid variabla temperaturnivåer medför en icke försumbar svällning. Detta kan minska de påfrestningar som härrör från betongkrympning och temperaturrörelse i ett tidigt skede – för vissa applikationer.
- Högre härdningstemperaturer och längre värmehärdning leder till mer framträdande svällning särskilt för recept med lågt vct.
- Lägre härdningstemperatur (35°C) leder inte automatiskt till mindre svällning – vart gränsen går för obefintlig svällning har inte kunnat utredas i studien. I den begränsade provningen kunde svällningen inte härledas direkt till innehållet av flygaska (FA) i cementen. Betongmixen med totalt 30 % FA uppvisade ingen märkbar svällning.
- Kallhärdning (6°C), som var tänkt att simulera gjutning i kallt klimat visade sig försena, utan att minska svällningen.
- Den observerade expansionen avstannade inte under försökets 2 veckor. Försöksuppställningen och –styrningen utformades ursprungligen för att samla indata för att anpassa befintliga modeller för autogen krympning till varierande härdningstemperaturer. Befintliga beräkningsmodeller för autogen krympning ger en acceptabel förutsägelse för några referensprov men lämpar sig dåligt för alla värmehärdade prov, i synnerhet efter avsvältningsfasen.
- Temperaturutvidgningskoefficienten är svår att bestämma från aktuella försök.

## Rekommendationer för produktion, utförande och förbättrad kvalitet

Studien visade att befintlig modell har vissa nackdelar, främst relaterade till en eventuell svällning som inte beaktas. Fenomenet blir allt viktigare för en ny generation av sammansatta portlandcement och i de fall då sekundära cementbaserade bindemedel används.

Resultaten från denna studie klarlägger problemen hos de nuvarande modellerna och utgör en bas för mer ingående forskning i syfte att utveckla nya och mer tillförlitliga modeller.

En ny aspekt som bör studeras mer är möjligheten att utnyttja den observerade svällningen för att minska sprickrisken i den unga betongen. Om denna svällning kan introduceras på ett kontrollerat sätt genom till exempel ett väl anpassat betongrecept eller optimerade härdningsförhållanden kan eventuellt krympningen och därmed sprickrisken minskas för unga betonger med relativt låg draghållfasthet.

Ett framgångsrikt genomförande av en sådan studie skulle kunna leda till utveckling av förbättrade ”sprickfria” betonger. Vidare har den potentialen att förändra tillverkningsprocessen och gjutteknologin, samtidigt som egenskaperna i den hårdnade betongen förbättras. En lägre sprickrisk skulle även öka hållbarheten för materialet och minska kostnaderna för tidiga reparationer.