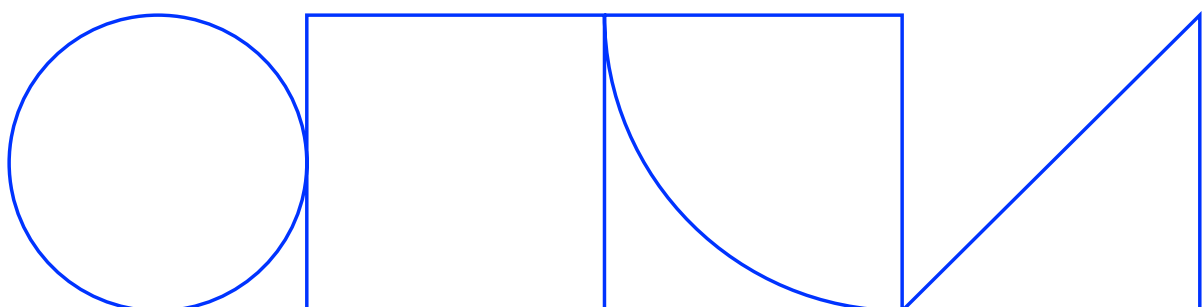


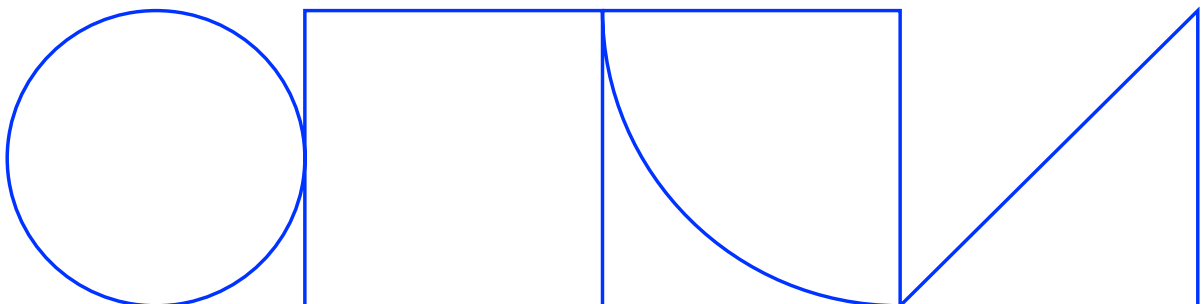
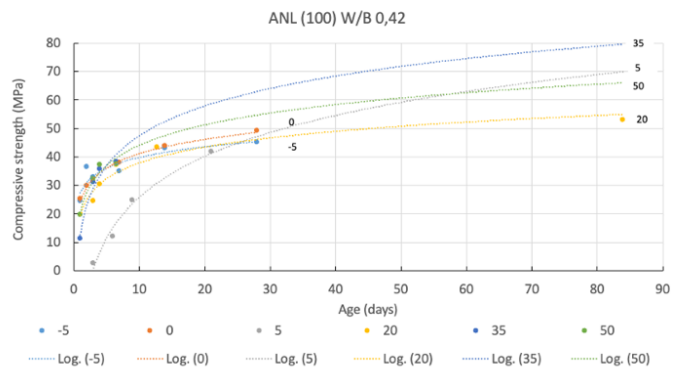
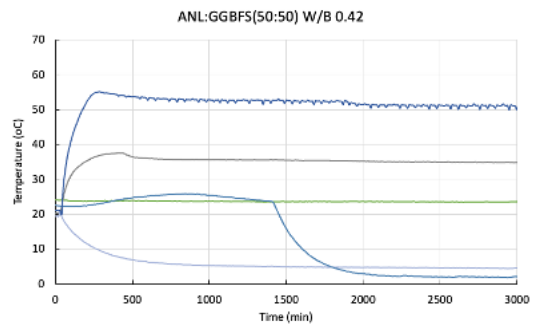
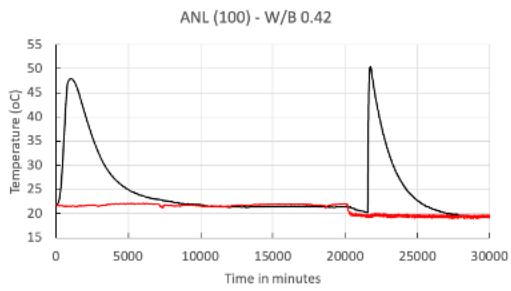
Eco-cement – prestanda vid låga temperaturer

Slutrapport

Andrzej Cwirzen, Ankit Kothari, Hans Hedlund
LTU, Skanska Sverige AB

2024-10-07





Förord

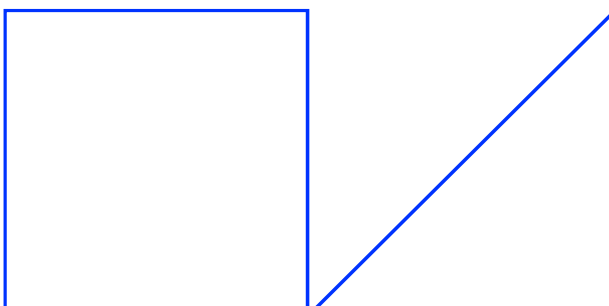
Projektets arbetsgrupp vill rikta ett stort tack till samtliga branschrepresentanter som deltog i arbetet med både sin tid, energi, idéer, branschkunskap och erfarenhet, och ett mer specifikt tack till referensgruppen:

- NCC Sverige AB, Nilla Olsson
- Swerock AB, Staffan Carlström
- Heidelberg Material – Cement, Stefan Sandelin
- RISE, Giedriuz Zirculis
- Skanska Sverige AB, Hans Hedlund

Projektets arbetsgrupp vill slutligen rikta ett stort och varmt tack till SBUF och Skanska Sverige AB för stöd och finansiering av detta projekt.

Andrzej Cwirzen, Ankit Kothari, Hans Hedlund

Luleå, 2024-10-07 / Göteborg 2024-11-01 (Swe.)



Sammanfattning och slutsatser

Portlandcementproducenter erbjuder olika typer och lösningar för att producera betong med lågt CO₂-avtryck. Att delvis ersätta Portlandcement med SCM som masugnsslagg (BFS) är en vanlig lösning. Tyvärr förändras hydratationsprocessen (kemiska reaktioner som styr härdningen). Följaktligen kan dessa betonger binda långsammare eller snabbare, samtidigt som hållfasthetsutvecklingen kan variera. Mognadsfunktionerna ändras beroende på härdningstemperatur och bindemedelssammansättning. Med tanke på att de flesta modeller som för närvarande används utvecklades för ren Portlandcement, kan förutsägelsen av grundläggande egenskaper vara problematisk.

Detta projekt var en fortsättning på den inledande studien vars resultat publicerades i SBUF 13315 "*Ny cement – mognad i kallt väder*". Projektet fokuserade på att bedöma lågtemperaturprestandan hos betong som innehåller 50 vikt% masugnsslagg som ersätter två typer av Portlandcement från Heidelberg Materials Cement. Projektet utvärderade också effekten av flygaska (FA) och slagg (GGBFS) på förutsägelsen av hållfasthets- och värmeutveckling genom mognadsmodeller som används vid utvärdering av materialdata.

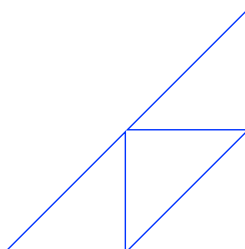
- Närvaron av flygaska och/eller slagg sänker maxtemperaturen under hydratationsprocessen.
- Betong som innehåller flygaska och slagg har högre känslighet för härdning vid låga temperaturer.
- Resultaten tyder på att mognadsbegreppet som det används idag fungerar, men behöver kompletteras.
- Betong med 50 viktprocent slagg kan fortsätta att hydratiseras och få hållfasthet vid -15 °C utan behov av ytterligare temperaturstyrning.

Summary and conclusions

Portland cement producers offer various types and solutions to produce concrete having a low CO₂ footprint. Partially replacing Portland cement with SCMs such as blast furnace slag (BFS) is a common solution. Unfortunately, the hydration processes (chemical reactions that control hardening) are altered. Consequently, these concretes can set slower or faster, while the strength development can vary. The maturity functions are changed depending on the hardening temperature and binder composition. Considering that most models that are currently used were developed for pure Portland cement, the prediction of basic properties could be problematic.

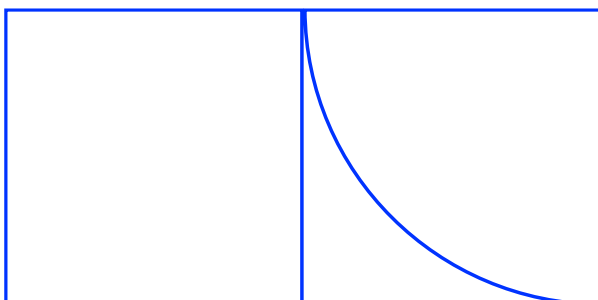
This project was a continuation of the initial study whose results were published in SBUF project SBUF 13315 "*New cement – maturation in cold weather*". The project focused on assessing the low-temperature performance of concrete containing 50-wt.% of blast furnace slag replacing two types of Portland cement produced by Heidelberg Materials - Cement. The project also evaluated the effect of fly ash (FA) and slag (GGBFS) on the prediction of strength development by maturity models used for evaluation of heat- and strength development.

- The presence of fly ash and/or slag lowers the hydration temperature.
- Concrete containing fly ash and slag have a higher sensitivity to curing at low temperatures.
- The results indicate that maturity concept as used today works but need to be complemented.
- Concrete with 50-wt% of slag can continue to hydrate and gain strength at -15 °C without the need for additional heat curing



Innehåll

Förord	1
1 Bakgrund	4
2 Syfte	4
3 Metodik	5
3.1 Materials	5
3.2 Metod	6
4 Utförda undersökningar	8
4.1 Tryckhållfasthetsutveckling	8
4.2 Temperaturutveckling till följd av hydratationsprocessen	11
4.3 Verifiering av nuvarande mognadsmodell	13
4.4 Effekt av mycket låga härdningstemperaturer på hållfasthetsutvecklingen	15
5 Slutsatser	17
6 Litteraturförteckning	18



1 Bakgrund

Det huvudsakliga råmaterialet som matas in i ugnen för att producera Portlandcement (PC) är kalksten. I processen frigörs vid förbränning en stor mängd CO₂ som bidrar till CO₂-belastningen som härrör från tillverkningsprocessen. Slutresultatet är ett totalt utsläpp på minst 650 kg CO₂ per cementklinker. Det vanligaste sättet att minska betongens CO₂-avtryck är att delvis ersätta PC med sekundära cementbaserade material (SCM). Ersättningsnivåerna kan gå så högt som 95 viktprocent när masugnsslagg (GGBFS) används som SCM. I Sverige används idag är den maximal ersättningsnivå ca 50 viktprocent. Vissa cementtillverkare erbjuder även PC med tillsats av en liten mängd flygaska (FA) för att ge cementet/bindemedlet som används i betong ytterligare en lägre klimatbelastning.

Tyvärr finns det en del bekymmer och okända effekter på betong relaterade till användningen av betong som innehåller stora mängder SCM. Detta inkluderar särskilt egenskaper vid tidig ålder, beständighet över tid eller hållfasthetsutveckling. Att gjuta betong, där en stor andel alternativt bindemedel (SCM) ingår, vid låga temperaturer tillför ytterligare komplikationer och kan orsaka problem för entreprenörer och behovet av erforderliga åtgärder för att styra betongens temperatur- och hållfasthetsutveckling.

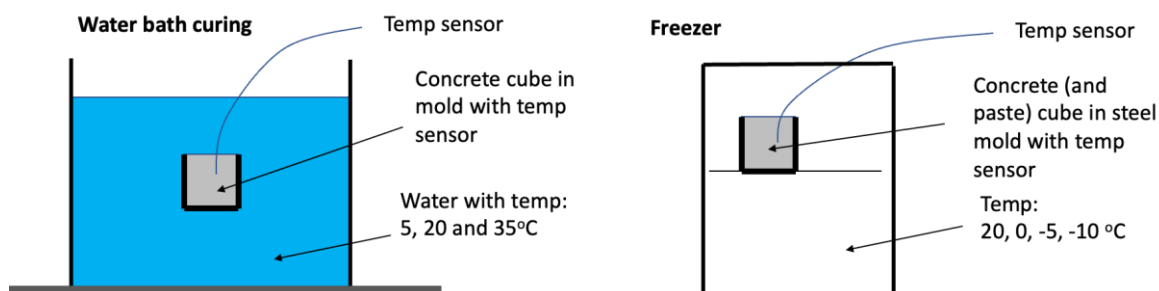
2 Syfte

Projektet har haft syftet undersöka och samla in data som behövs för att bedöma prestanda hos betong, med cementbaserat bindemedel som innehåller en stor andel alternativt bindemedel, vid låga temperaturer. De bindemedlen som har studerats och jämförts är baserade på två typer av Portlandcement och tillsats av Granulated Blast Furnace-slagg (GGBFS), som alternativt bindemedel.

Specifika forskningsfrågor:

- Hur utvecklar Eco-cementen med GGBFS hydratationsvärme jämfört med vanlig PC?
- Med vilken noggrannhet kan hållfasthetsutvecklingen i betong med PC och SCM predikteras över tid med nuvarande materialmodeller utvecklade för PC?

Projektet jämförde värmeutveckling från hydratationsprocessen samt tryckhållfasthetsutveckling för betong baserad på PC och betong som innehåller 50 viktprocent PC och 50 viktprocent GGBFS. Härdning av betong gjordes vid olika temperaturer Figur 1. De insamlade data matades in i en utvärderingsprogramvara för att formulera mognadsfunktioner. Två provningsförfaranden användes, en möjliggjorde härdning vid temperaturer mellan 5 och 35 grader och den andra vid temperaturer mellan -15 och 20 grader.



Figur 1. Temperaturlagring och setup vid provning av betong.

3 Metodik

3.1 Materials

Sammansättning av studerad betong visas i tabell 1. Den totala mängden bindemedel valdes till 400 kg/m³. Slagg (GGBFS) från Swecem ersatte i vissa blandningar med upp till 50 viktprocent PC. Två typer av Portlandcement användes. dvs ANL (CEM I) och ANLFA (CEM II/A-V) levererade av Heidelberg Materials - Cement. ANLFA innehöll också flygaska från Tyskland. Vattencementtalet för betongen var 0,42 respektive 0,5. Den maximala kornstorleken på ballastmaterialet (granit) var 16 mm. Betongen konsistens bestämdes genom mätningar med en standardiserad sättkon och varierade mellan 178 och 214 mm. Den superplasticerare (flytmedel) som användes i betongen är baserat på polykarboxylat, typ Glenium ACE30 producerad av Master Builders, användes för att reglera betongens konsistens.

Blandningar som visas i tabell 2 innehöll även andra typer av kemiska tillsatsmedel, frostskyddsmedel (AF) MasterSet AC 220, accelerator Master X-Seed 130 (ACC) och luftmedbringande medel MasterAir 105 (AE).

Table 1. Betongsammansättning för provning inom temperaturområdet -5 to +50°C.

	ANL (100)	ANL_SLAG (50:50)	ANLFA (100)	ANLFA_SLAG (50:50)	ANLFA (100)	ANLFA_SLAG (50:50)
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
ANL	430	215	0	0	0	0
ANLFA	0	0	430	215	430	215
GGBFS	0	215	0	215	0	215
Ballastfraktion 1 (0-8 mm)	1003,91	1003,91	1003,91	1003,91	1003,91	1003,91
Ballastfraktion 2 (8-16 mm)	669,27	669,27	669,27	669,27	669,27	669,27
MasterGlenium ACE 30 (SP)	2,365	2,365	2,365	2,365	1,72	1,72
w/b	0,42	0,42	0,42	0,42	0,50	0,50
Vatten	178,94	178,94	178,94	178,94	213,78	214,4
Sättmått (cm)	9,5	11,5	10,5	16,5	21	13,5
Densitet (färsk betong)	2388	2400,4	2372	2372	2372	2338
Temperatur (färsk betong, gjutnign) (°C)	21,7	22,3	21,3	22	22	22

Table 2. Betongsammansättning för provning inom temperaturområdet -15 to +20°C.

Mix	CEM I 52.5R kg/m ³	GGBFS kg/m ³	w/b	Tillsatsmedel wt.%				Filler kg/m ³		Ballast kg/m ³	
								Kvarts	B15	0-4	4-8
OPC (100%)	400	0	0.42	SP – 0.75				90	90	1075	537
OPC:GGBFS (50:50) (0%AF)	200	200	0.42	SP – 0.75				90	90	1075	537
OPC:GGBFS (50:50) (6%AF)	200	200	0.42	SP	AF	ACC	AE	90	90	1075	537
				0.75	6	10	0.1				
OPC:GGBFS (50:50) (10%AF)	200	200	0.42	0.75	10	10	0.1	90	90	1075	537
OPC:GGBFS (50:50) (15%AF)	200	200	0.42	0.75	15	10	0.1	90	90	1075	537
OPC:GGBFS (50:50) (20%AF)	200	200	0.42	0.75	20	10	0.1	90	90	1075	537
OPC:GGBFS (50:50) (25%AF)	200	200	0.42	0.75	25	10	0.1	90	90	1075	537
OPC:GGBFS (50:50) (30%AF)	200	200	0.42	0.75	30	10	0.1	90	90	1075	537

3.2 Metod

Betong med ett W/B-förhållande lika med 0,42 härdades vid temperaturer av 50, 35, 20, 5, 0, -5, -10 och -15°C. Betong med ett W/B-förhållande av 0,5 härdades vid 50, 35, 20 och 5°C. Betongen som härdats vid 0 och -5°C lagrades vid 20°C under de första 24 timmarna.

Betong utsatt för -15°C härdades vid denna temperatur redan kort tid efter gjutning, dvs ingen inledande lagring vid 20°C applicerades på dessa betonger. Tryckhållfasthetsutvecklingen för dessa betonger mättes på provkroppar direkt efter att de tagits ut ur frysen eller efter att de tagits ut ur frysen, men följt av 24 timmars härdning vid 20°C.

All annan betong härdades vid de specifika tilldelade temperaturerna i vattenbad, förutom de 20°C som härdades i luften. Härdningsregimerna visas i tabell 3.

Tabell 3. Lagring av provkroppar. (*) = betongsammansättning enligt Table 2.

W/B 0.42								
	5°C	20°C	35°C	50°C	-5°C	0°C	-10°C	-15°C
AnI	*	*	*	*	*	*	(*)	(*)
AnIFa	*	*	*	*	*	*		
AnI50 + GGBFS50	*	*	*	*	*	*	(*)	(*)
AnIFa50 + GGBFS50	*	*	*	*	*	*		
W/B 0.5								
AnIFa	*	*	*	*				
AnIFa50 + GGBFS50	*	*	*	*				

Temperaturutvecklingen på grund av bindemedlets hydratation bestämdes med hjälp av en semi-adiabatisk kalorimeter, figur 2. Provkropparna (betong) göts direkt i plåthinkar där termoelement installerats, tre i mitten av provet, en under provet, och en ovanför provet. En värmekabel installerades nära metallhinken för att tillåta uppvärmning av provet efter 14 dagar till den högsta temperaturen som registrerats under hydratationsprocessen i betongen fram till dess.

4 Utförda undersökningar

4.1 Tryckhållfasthetsutveckling

Tryckhållfasthetsutvecklingen för betong som härdats efter olika procedurer visas i figur 3 och figur 5.

Alla betongprover, oavsett cementtyp, härdade under de första 24 timmarna vid 20 °C och senare exponerade för -5 och 0 °C under återstående tid, visade en snabb initial hållfasthetsutveckling. Senare exponering för låga temperaturer minskade dock 28-dygns hållfasthetsvärden.

PC-innehållande flygaska (ANLFA) visade generellt lägre tryckhållfasthet när den härdades vid lägre temperaturer jämfört med motsvarande rena PC-cement (ANL). Exempelvis resulterade härdning vid en konstant lagringstemperatur lika med +5 °C i en 7-dygns tryckhållfasthet lika med 25 MPa för ANL (CEM I) och 16 MPa för ANLFA (CEM II/A-V), vilket motsvarar en minskning med ungefär 36%. Efter 21 dagns lagring vid +5 °C erhöles en tryckhållfasthet hos ANL-betongen lika med 42 MPa respektive 31 MPa för ANLFA, vilket motsvarar en minskning med 20 %. En liknande effekt av FA har observerats tidigare (De Weerd et al., 2012). I allmänhet verkade FA-innehållande PC vara känsligare för härdning vid lägre temperaturer än ren PC, och lägre hållfasthetsvärden för tidig ålder har observerats.

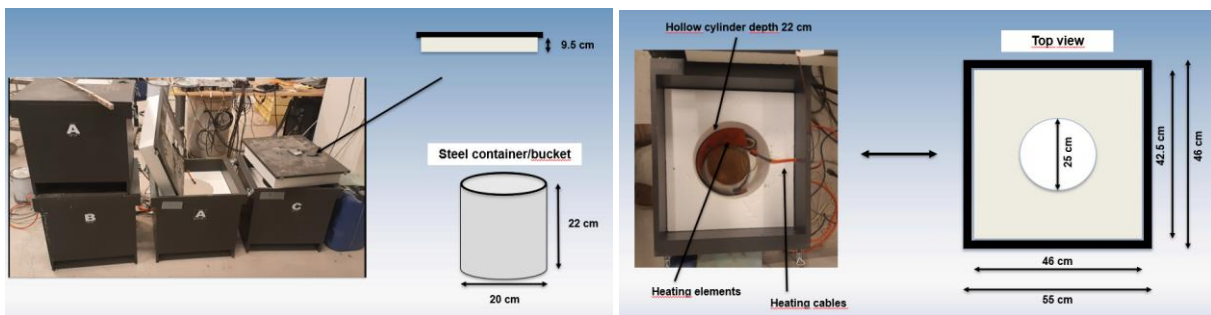
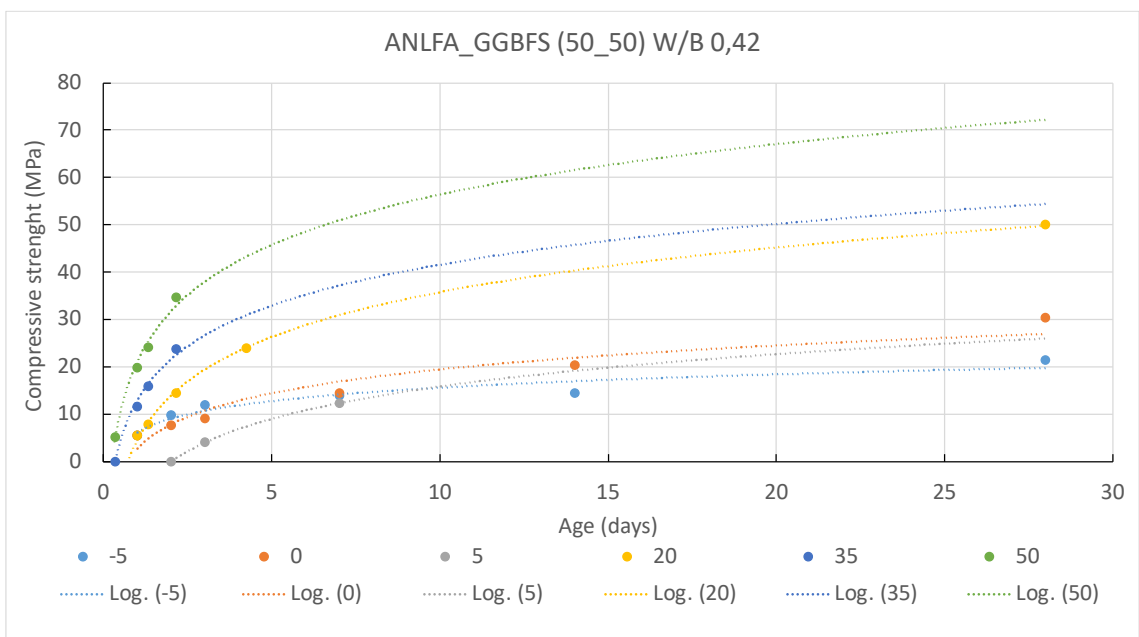
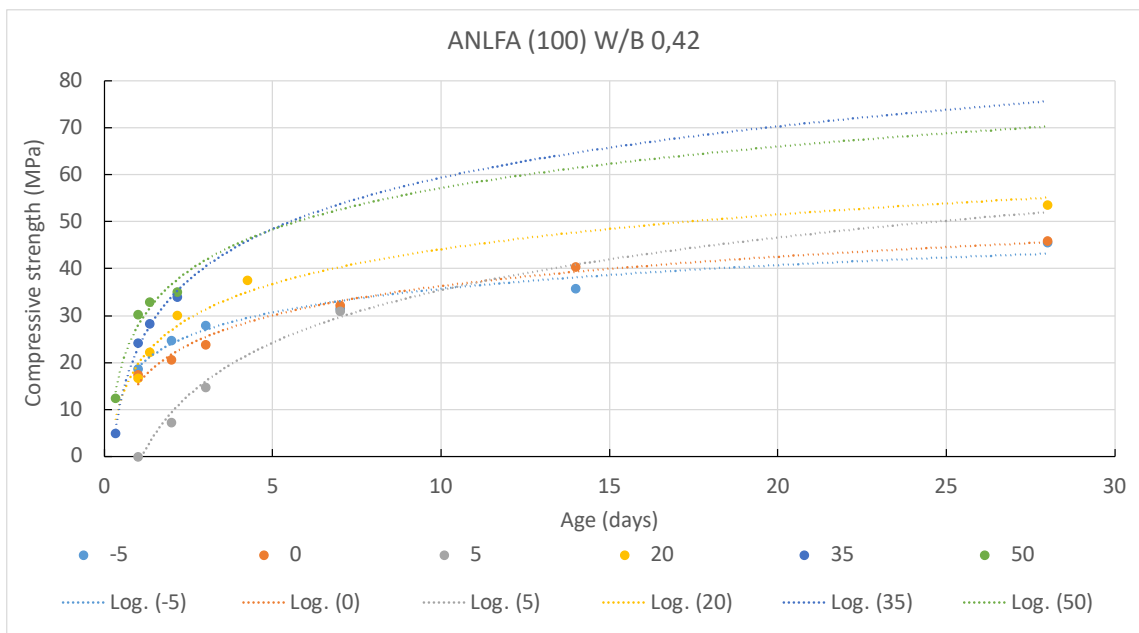


Figure 2. Semi-adiabatisk utrustning för att undersöka temperatur- och värmeutvecklingen i betong.

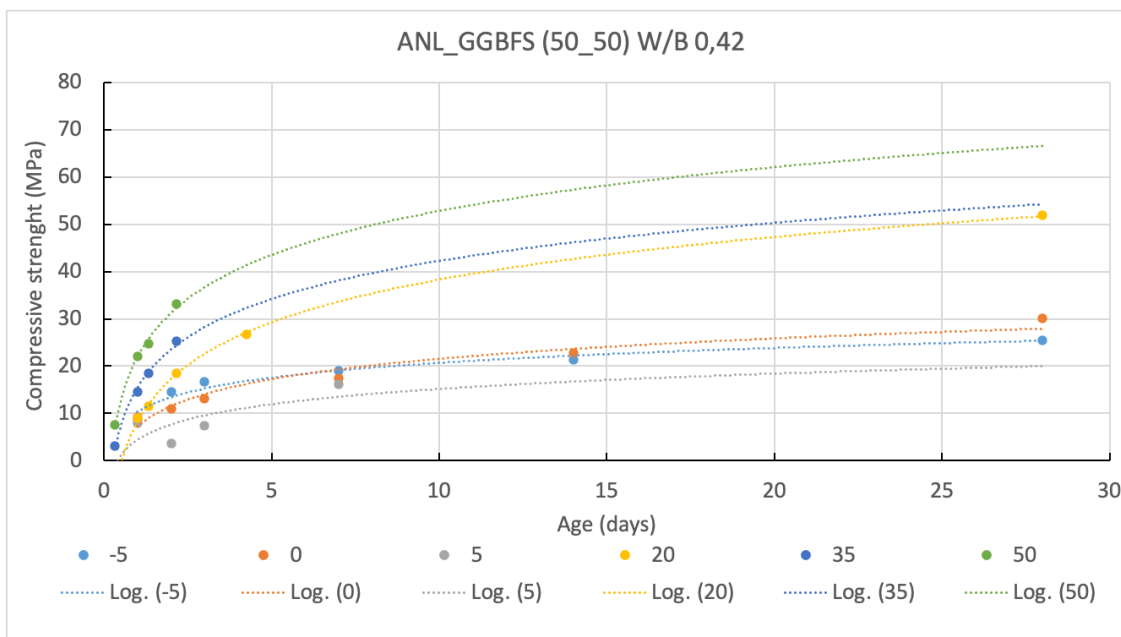
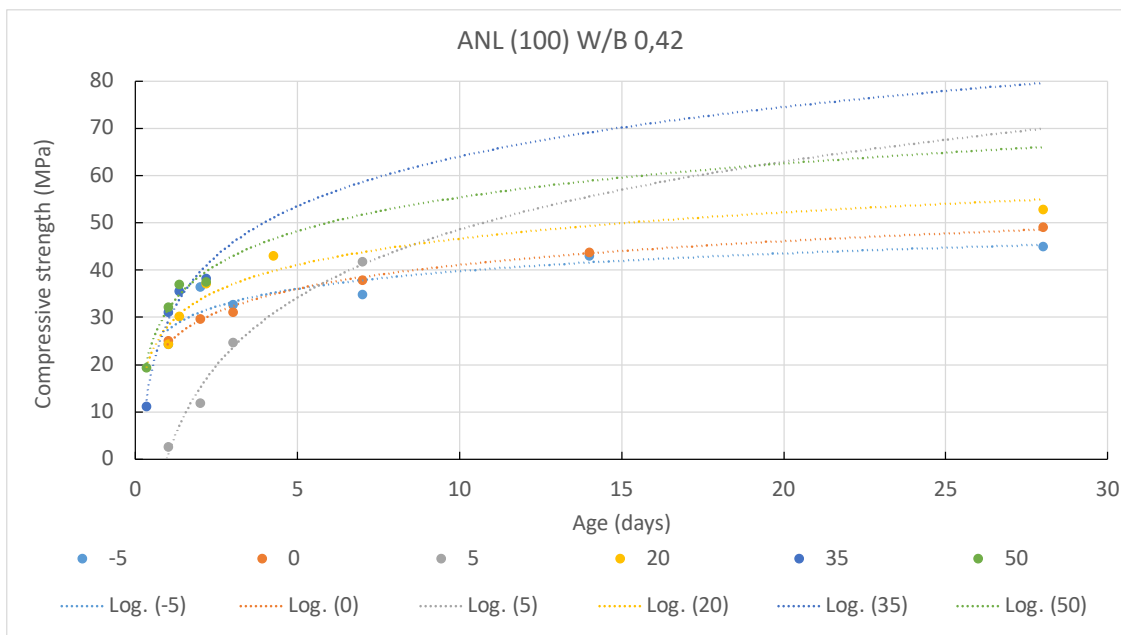
Temperaturen på proverna registrerades även i provkroppar för bestämning av tryckhållfasthet (kuber) som förvarades i vattenbad vid olika temperaturer. I det fallet användes termoelement ingjutna i provkroppen för att följa temperaturutvecklingen.

Den 50 vikt-% ersättningen av PC med GGBFS hade störst effekt på tryckhållfastheten, speciellt för betong härdad vid lägre temperaturer. Exempelvis minskade 7-dygns tryckhållfastheten för betong med ANLFA, W/B = 0,42 och lagrad vid 5°C, från 30 till 12 MPa. Dessutom minskade den 28-dygns tryckhållfastheten för den betongen från 45 till 30 MPa.

Effekten av cementtypen förefaller vara försumbar vid en jämförelse mellan ren PC (ANL) och cement med flygaska (ANLFA) och uppvisade en likartad hållfasthetsutveckling vid lagring och härdning i låga temperaturer. Cementtillverkarens sammansättning av ANLFA verkar vara kompenserad för närvaro och effekter av flygaskan jämfört det rena Portlandcimentet (ANL). Härdning vid normala och högre temperaturer av betong som innehåller GGBFS resulterade i liknande hållfasthetsvärden för ANLFA cementbaserad betong.



Figur 3: Tryckhållfasthetsutveckling för betong (kub) W/B = 0.42 lagrad vid 50, 35, 20, 5, 0, and -5°C.

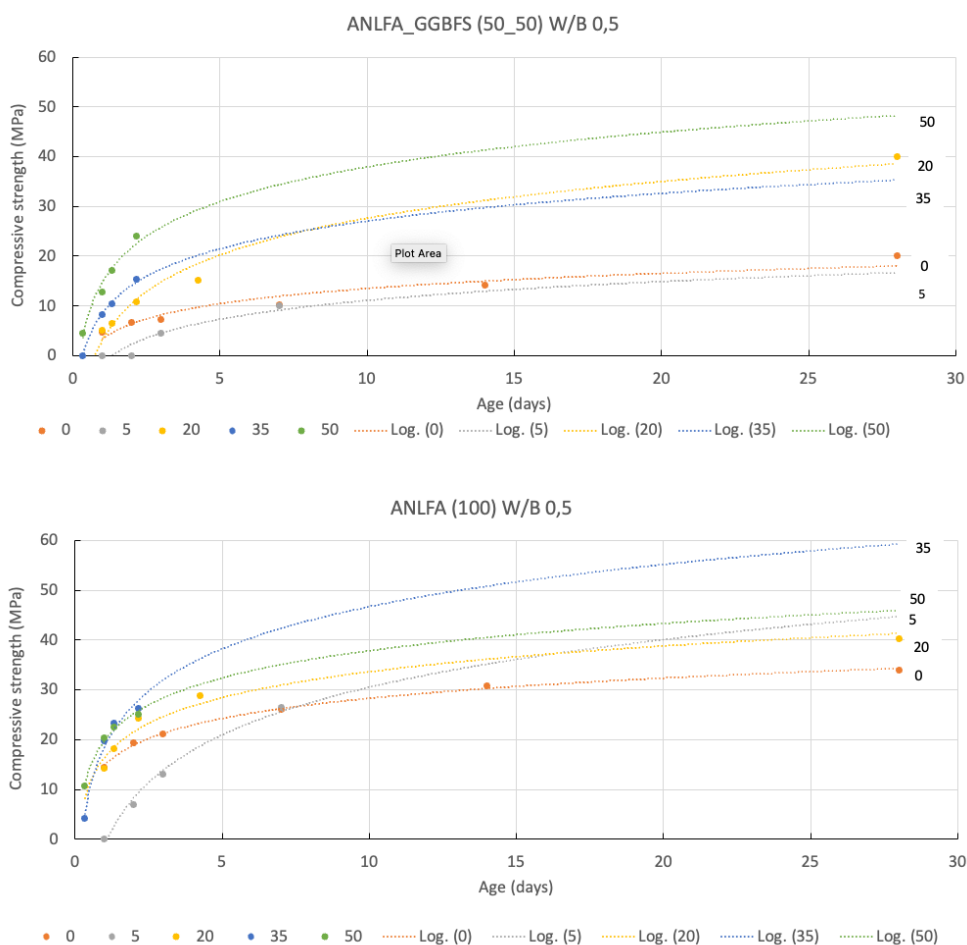


Figur 4. Tryckhållfasthetsutveckling för betong (kub) W/B = 0.42 lagrad vid 50, 35, 20, 5, 0, och -5°C.

Endast en cementtyp användes för blandningar med ett W/B-förhållande på 0,50 och härdning vid -5°C uteslöts. De uppmätta värdena för tryckhållfasthet visas i figur 5.

De observerade trenderna var generellt desamma som för betong med ett W/B lika med 0,42. Värdena var dock något lägre, vilket var förväntat på grund av det högre W/B-förhållandet. Till exempel minskade värdet för 7-dygns tryckhållfasthet för betong som innehåller ren PC (CEM I) och härdad vid en konstant temperatur på 5°C från 31 till 27 MPa.

Betong som innehöll 50 vikt-% GGBFS visade vid 7-dygns ålder hållfasthetsvärdena 12 respektive 9 MPa för ANL- och ANLFA-cement.



Figur 5: Tryckhållfasthetsutveckling för betong (kub) W/B = 0.50 lagrad vid 50, 35, 20, 5, och 0°C.

4.2 Temperaturutveckling till följd av hydratationsprocessen

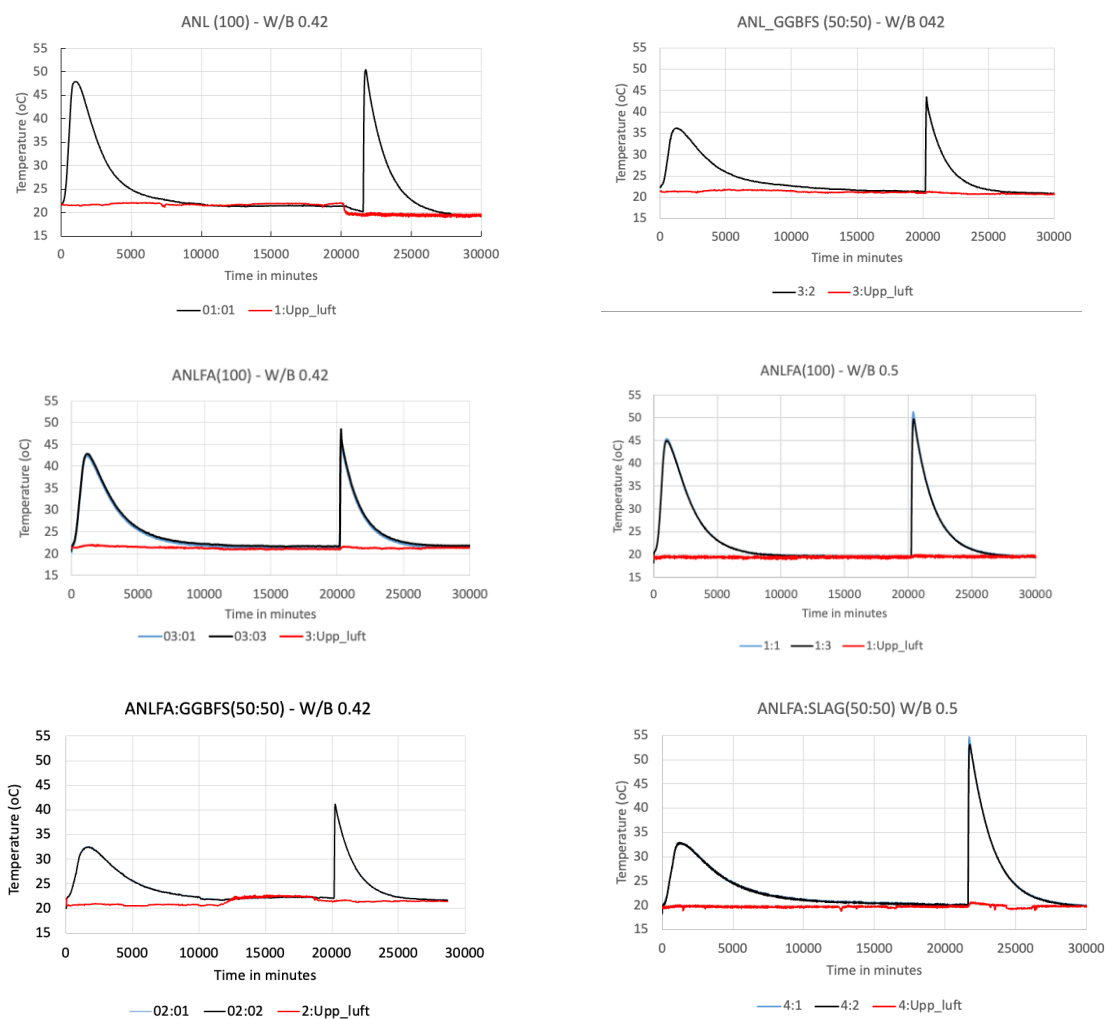
Erhållna resultaten från de semi-adiabatiska utrustningarna visas i figur 6 och figur 7. Det finns två synliga temperaturtoppar. Den första är relaterad till de hydratiseringsprocesser som utvecklas vid härdningstemperaturen på 20°C. Den andra toppen motsvarar den temperatur som utvecklades i betongen efter applicering av uppvärmning som höjde temperaturen till den nivå som uppnåddes endast på grund av hydratiseringsprocesserna.

Den flygaska som blandas in i Portlandcement-baserade system påverkar hydratationsprocessen, den utvecklade värmen (temperaturen) och så småningom även mekaniska egenskaper (De Weerd et al., 2012). Den aktuella studien bekräftar också denna trend. Föreliggande resultat visade att betongen som innehöll 100 viktprocent PC (ANL) utvecklade den högsta temperaturen till följd av hydratationsprocessen och nådde en temperaturnivå lika med 47°C. PC innehållande FA (ANLFA) nådde den maximala temperaturen lika med 42°C. Hydratationsprocessen har modifierats och ytterligare faser har bildats på grund av puzzolana reaktionen med Portlandite. Dessa faser inkluderar vanligtvis Strätlingit (C_2AH_8) och FH_3 , (Pang, 2015).

Lägre härdningstemperaturer tenderar att minska reaktiviteten hos flygaskan. Tidigare resultat visade att härdning vid 5°C orsakade en långsam reaktion av FA. Följaktligen reagerade endast 30 % av FA efter 180 dagar i jämförelse när härdning vid 20°C användes (De Weerd et al., 2012).

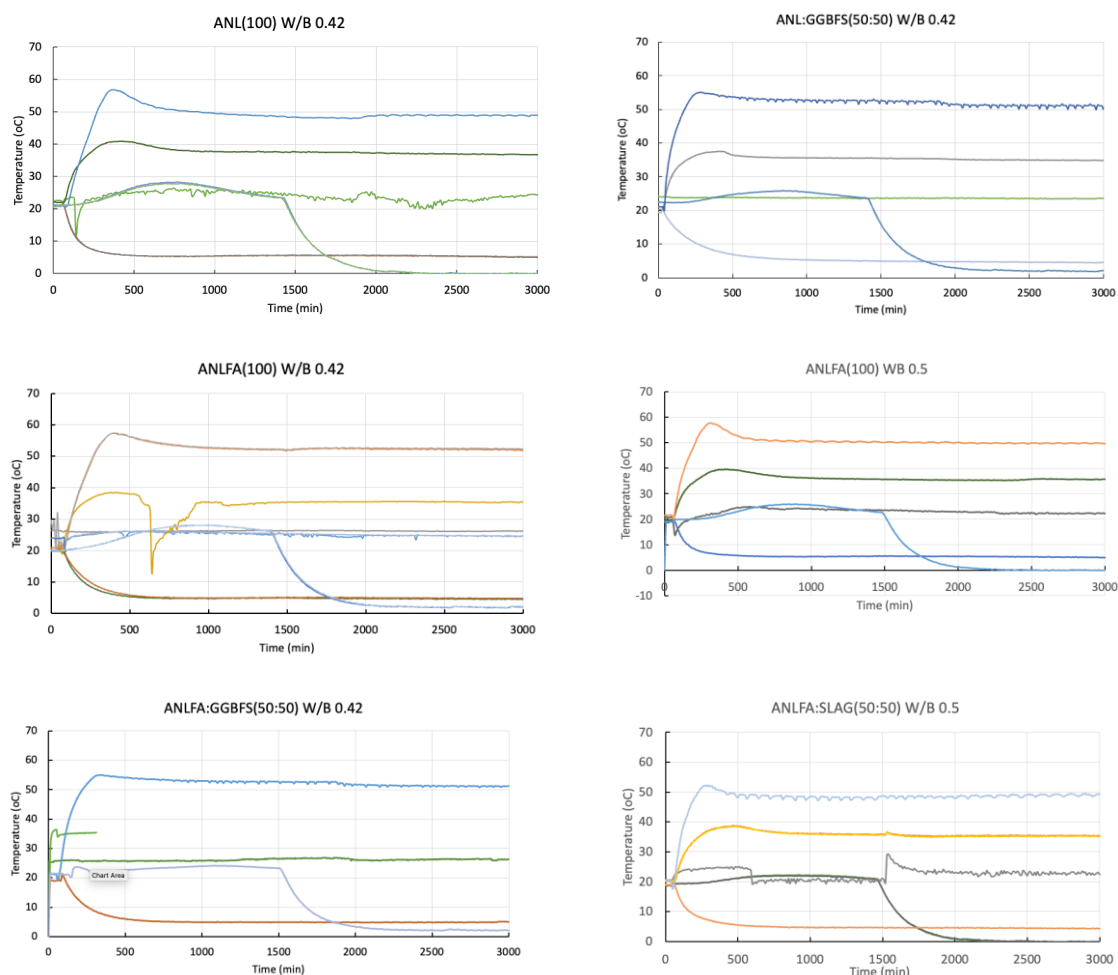
Betong som innehåller denna typ av Portlandcement, men som har ett högre W/B-förhållande på 0,50, har nått en något högre temperatur på 46°C. Denna trend överensstämmer med resultaten från andra forskare (Pang, 2015), där ökning av W/C-förhållandet resulterade i ökad temperatur. Den större mängden vatten i systemet resulterar i att det skapas mer utrymme tillgängligt för hydrationsprodukterna att bildas. Andra studier har visat att denna effekt är mer uttalad efter perioden efter att temperaturmaximum har passerats. Tidigare studier indikerade också att ett högre W/C-förhållande tenderade att förlänga betongens öppethållande period (Pang, 2015). Längden på öppethållande tiden påverkar betongen och kan vara skadlig för hårdnandeprocessen.

Ersättning av 50 viktprocent PC med GGBFS har starkt påverkat den utvecklade maximala härdningstemperaturen. Till exempel sjönk temperaturen från 47°C till 37°C, ANL jämfört med ANL-GGBFS. Minskningen var ännu högre för PC-innehållande FA. I så fall sjönk topptemperaturen till 32°C. GGBFS är känt för sin förmåga att avsevärt sänka temperaturen för betong baserad på Portlandcement. Denna effekt inverkar således på betongens utveckling av mekaniska egenskaper och kan under gynnsamma förhållanden begränsa risken för termisk sprickbildning av massiva strukturer eller när betong gjuts vid höga yttre temperaturer. Problemet uppstår när blandningar med GGBFS ska användas under vinterförhållanden (Alzaza et al., 2022; Cahyani & Rusdianto, 2021).



Figur 6. Temperaturutveckling mätt och registrerad vid semi-adiabatisk provning.

Temperaturutvecklingen mättes också i provkroppar lagrade i vattenbad med temperaturer på 5, 20, 35 och 50°C. De erhållna resultaten visas i figur 7. I allmänhet följde de uppmätta betongtemperaturerna samma trender som observerats i den semi-adiabatiska provningen. Den största temperaturökningen uppmättes för betong, som innehöll ANL-cementet, och härdades vid 50°C följt av de som härdats vid 35°C. Härdning vid lägre temperaturer orsakade endast en liten förändring av den uppmätta temperaturen, som ofta inte översteg mätfelet.

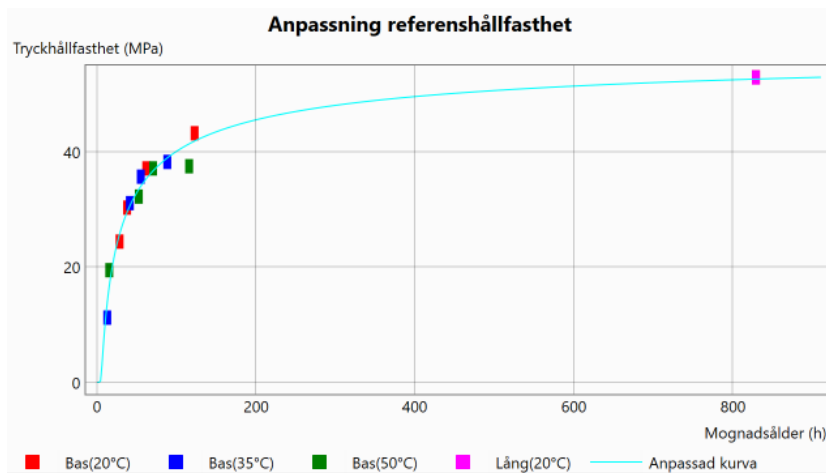


Figur 7. Temperatur i provkroppar (kub) nedsänkt i vattenbad med lagringstemperatur 0, 5, 20, 35, and 50°C.

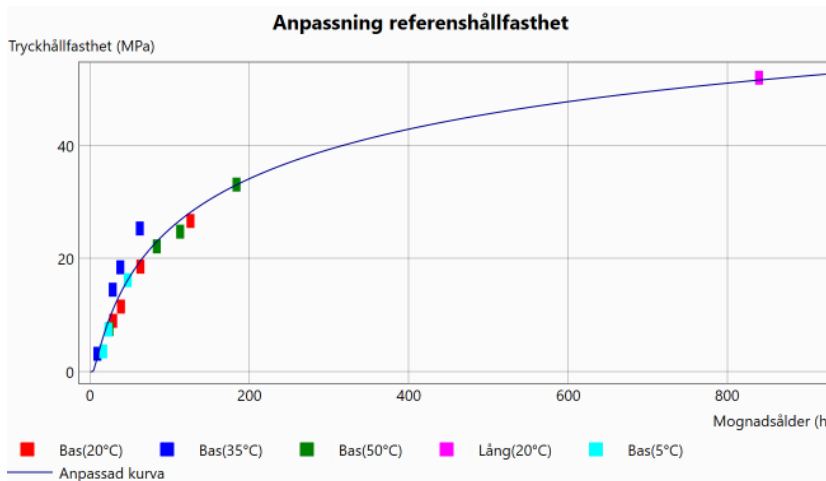
4.3 Verifiering av nuvarande mognadsmodell

Verifieringen av befintliga modeller för att förutsäga hållfasthetsutvecklingen gjordes med hjälp av en procedur som användes för att prova och beskriva den unga betongens utveckling av egenskaper, vilket används för att bedöma risk för sprickbildning i hårdnande betong. Data analyserades och modellerades med hjälp av YoungCon-mjukvaran. De erhållna resultaten visas i figurerna nedan. En något sämre överensstämmelse kunde noteras för blandningar som innehöll ANL-cement med flygaska, men det kan vara relaterat till mätnoggrannheten och vissa problem med temperaturregistrering som man stötte på.

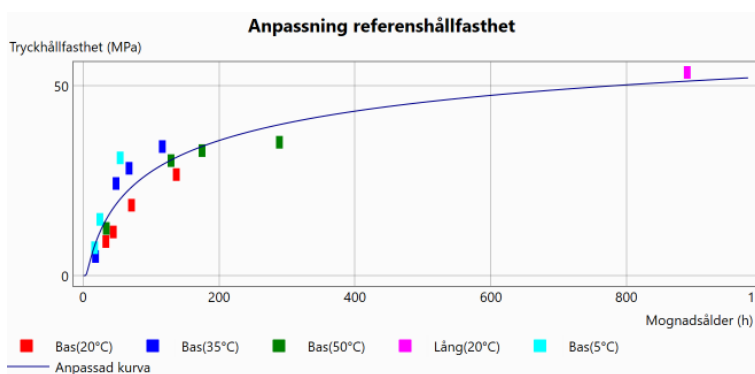
Cement med FA eller 50 vikt-% slagg föreföll inte påverka materialmodellernas noggrannhet.



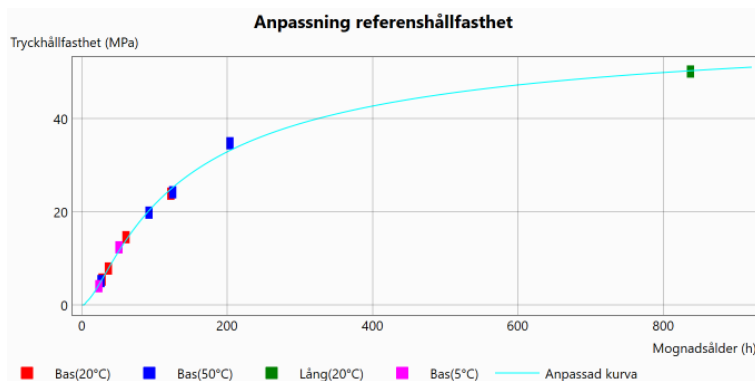
Figur 8 Utvärdering av mognadsfunktionen för betong ANL W/B = 0.42



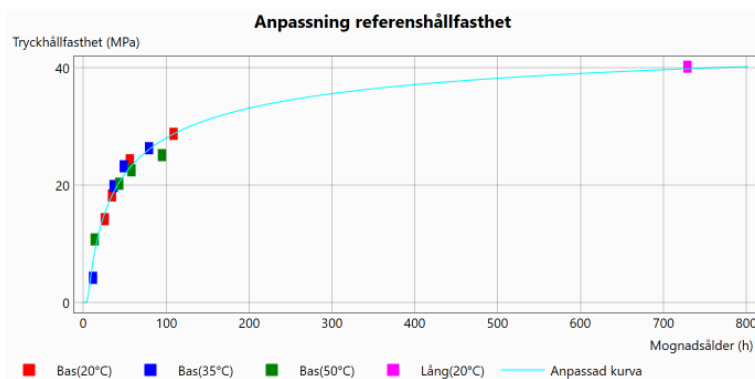
Figur 9. Utvärdering av mognadsfunktionen för betong 50%ANL+50%BFS W/B = 0.42



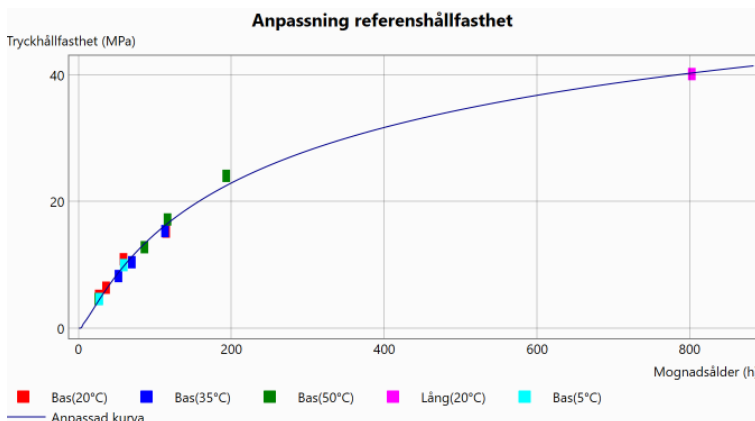
Figur 10. Utvärdering av mognadsfunktionen för betong ANLFA W/B = 0.42



Figur 11. Utvärdering av mognadsfunktionen för betong ANLFA+BFS W/B = 0.42



Figur 12. Utvärdering av mognadsfunktionen för betong ANLFA W/B = 0.50



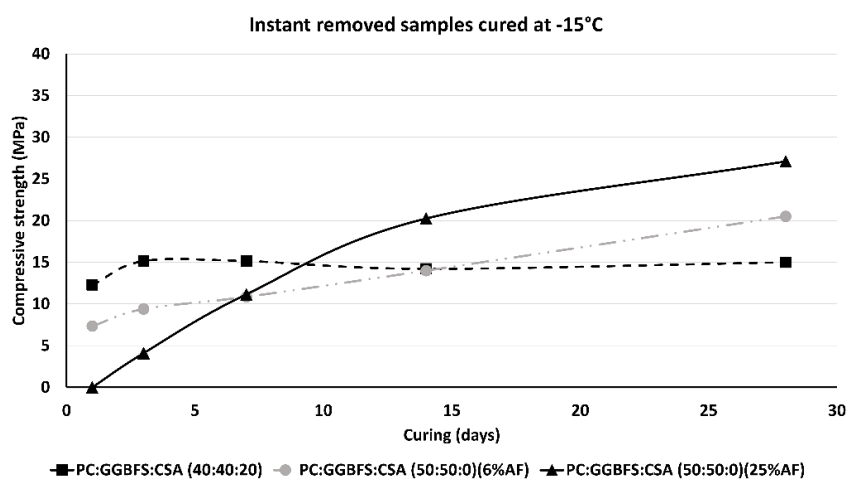
Figur 13. Utvärdering av mognadsfunktionen för betong ANLFA BFS W/B = 0.50

4.4 Effekt av mycket låga härdningstemperaturer på hållfasthetsutvecklingen

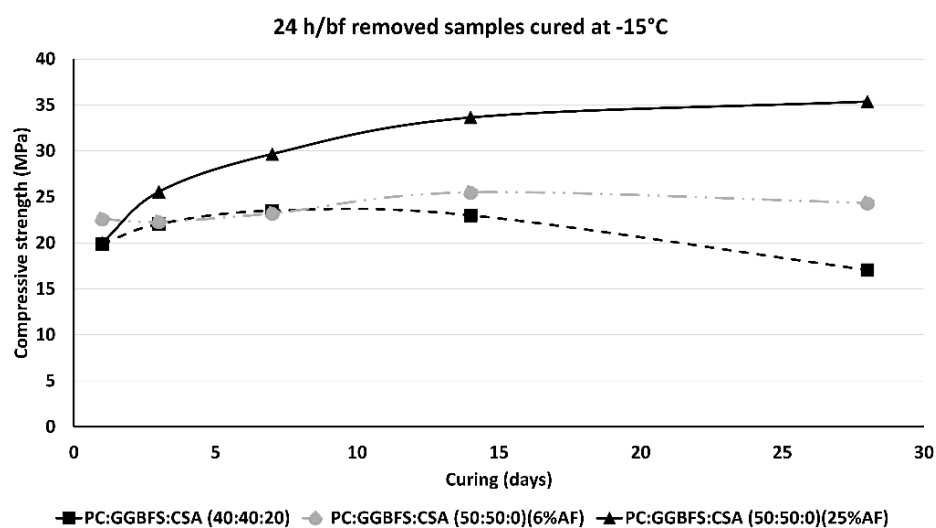
Effekterna av mycket låga temperaturer på tryckhållfasthetsutvecklingen utvärderades på blandningar som visas i Tabell 2. Resultat från alla blandningar som testats i hela doktorandprojektet redovisas på annat håll. Detta inkluderade resultat för blandningar innehållande kalciumsulfataluminatcement (CSA).

De valda resultaten visas i figur 14 och figur 15. Appliceringen av en optimerad blandning av kemisk inblandning gjorde det möjligt för de testade betongarna att utveckla 28-dygns tryckhållfasthetsvärden över 25 MPa när ingen ytterligare härdning vid rumstemperatur användes. Tillämpningen av sådan härdning ökade sluthållfastheten till över 35 MPa.

Det är värt att betona att de presenterade testresultaten gällde blandningar innehållande 50 viktprocent GGBFS.



Figur 14. Hållfasthetsutveckling i betong härdad vid -15 °C applicerad direkt efter gjutning. Tryckhållfastheten mättes direkt efter att provet avlägsnats från frysen.



Figur 15. Hållfasthetsutveckling i betong härdad vid -15 °C applicerad direkt efter gjutning. Tryckhållfastheten mättes 24 timmar efter avlägsnande från frysen och härdning vid 20°C fram till provtryckning.

5 Slutsatser

Följande slutsatser kan dra utifrån projektets resultat utifrån forskningsfrågorna:

1. Hur utvecklar Eco-cementen med GGBFS hydratiseringstemperatur jämfört med vanliga OPC?
 - Närvaron av FA och/eller GGBFS sänker betongens hydratationstemperatur.
 - Betong som innehåller FA och GGBFS har högre känslighet för härdning vid låga temperaturer jämfört med betong som endast innehåller PC.
2. Vad är noggrannheten i att förutsäga den långsiktiga hållfasthetsutvecklingen av ekobindemedelsbaserad betong med GGBFS med hjälp av nuvarande mognadsmodeller?
 - Förekomsten av FA och/eller GGBFS minskade inte noggrannheten hos mognadsmodellen som används i YoungCon-mjukvaran.
 - Dessa resultat indikerar att YoungCon-mjukvaran även kan användas för ANL- och ANLFA-cement tillverkade av Heidelberg Materials – Cement även när 50 viktprocent ersättning med GGBFS används.

Ytterligare forskningsfråga:

3. Hur påverkar en hög mängd GGBFS hållfastheten hos normal betong vid härdning i minusgrader?
 - Appliceringen av en optimerad kombination av kemiska tillsatsmedel möjliggör att betong som innehållande 50 viktprocent GGBFS att hydratisera och få styrka utan behov av ytterligare värmehärdning.

6 Litteraturförteckning

- Alzaza, A., Ohenoja, K., & Illikainen, M. (2022). Improved strength development and frost resistance of Portland cement ground-granulated blast furnace slag binary binder cured at 0 °C with the addition of calcium silicate hydrate seeds. *Journal of Building Engineering*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103904>
- Cahyani, R. A. T., & Rusdianto, Y. (2021). An Overview of Behaviour of Concrete with Granulated Blast Furnace Slag as Partial Cement Replacement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 933(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/933/1/012006>
- De Weerd, K., Haha, M. Ben, Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., & Lothenbach, B. (2012). The effect of temperature on the hydration of composite cements containing limestone powder and fly ash. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 45(7). <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9819-5>
- Pang, X. (2015). The effect of water-to-cement ratio on the hydration kinetics of Portland cement at different temperatures. *The 14th International Congress on Cement Chemistry, October*.